

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی ته‌نشین‌کننده مرحله استخراج واحد استخراج با حلال و بررسی اثر نرده‌ها و تیغه‌های توزیع جریان

طالب زارعی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

محمد صادق اسدی

شرکت بابک مس ایرانیان، شهر بابک، ایران

چکیده: در این مطالعه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک شبیه‌سازی سه بعدی برای بررسی الگوی جریان ته‌نشین‌کننده مرحله استخراج واحد استخراج با حلال مجتمع مس میدوک انجام شده است. اثر نرده‌ها (پیکت فنس‌ها) و آرایش آن‌ها، اثر تیغه‌های توزیع و الگوی جریان در عملکرد ته‌نشین‌کننده (ستلر)، چگونگی جدایش فازها و توزیع اندازه قطرات مورد بررسی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی قرار گرفت. شبیه‌سازی در قالب اویلری و با بهره‌گیری از مدل MUSIG که براساس معادلات موازنه جمعیت برای محاسبه شکست و بهم‌چسبیدن قطرات است، انجام شده است. نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی مطابقت خوبی داشت. حداکثر خطای شبیه‌سازی ۸/۵٪ گزارش شد. نتایج نشان می‌دهد که با اصلاح مکان قرار گرفتن و ساختار پیکت فنس‌ها و استفاده از تیغه‌های برش جریان در ته‌نشین‌کننده، توزیع جریان در بخش‌های مختلف ته‌نشین‌کننده یکنواخت و جریان‌های چرخشی از بین می‌رود، بنابراین جداسازی فازی بهتر انجام می‌شود. شبیه‌سازی ته‌نشین‌کننده نشان داد که باند آشفتگی بین دو فاز تا انتهای ته‌نشین‌کننده ادامه دارد و بردارهای سرعت در این باند بیشتر در جهت طول ته‌نشین‌کننده می‌باشند. با قرار دادن مناسب پیکت فنس‌ها در ابتدای ته‌نشین‌کننده با فاصله‌های حداکثر ۰/۴ متر با یکدیگر و تیغه‌های برش جریان در ته‌نشین‌کننده باند دیسپرز تا حد زیادی از بین می‌رود. اثر نسبت مساحت بسته به باز (C/O) نرده‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش این نسبت چرخش‌ها و گردابه‌هایی در جریان سیال مشاهده شد که تاثیر منفی در جدایش فازی دارد.

واژه‌های کلیدی: ته‌نشین‌کننده، استخراج با حلال مس، پیکت فنس، تیغه‌های توزیع جریان، دینامیک سیالات محاسباتی

KEYWORDS: Settler, Copper solvent extraction, Picket fences, Flow distribution blades, Computational fluid dynamics

مقدمه

معدن مس میدوک؛ واقع در شهرستان شهر بابک استان کرمان؛ دارای میزان ذخیره زمین شناسی کانسار ۱۷۰ میلیون تن با عیار ۰/۸۳ درصد مس می‌باشد. یکی از روش‌های استخراج مس استخراج با حلال می‌باشد که در واحد لیچینگ انجام می‌پذیرد [۱]. استخراج با حلال یک فرآیند تعادلی است که برای تغلیظ و بالا بردن خلوص محلول رقیق حاصل از مرحله لیچینگ استفاده می‌شود تا اینکه بتواند در مرحله الکترووینینگ قابل استفاده شود [۲]. در مرحله استخراج با حلال یون فلزی از فاز آبی به عنوان یک ترکیب کمپلکس، به فاز آلی انتقال می‌یابد. در مرحله عاری سازی^۱ یون فلزی استخراج شده از فاز آلی به فاز آبی (الکترولیت) منتقل می‌شود. فرآیند استخراج با حلال معمولاً به صورت پیوسته و سری در دو یا سه مرحله استخراج و یک یا دو مرحله عاری سازی می‌باشد که بازده هر مرحله تقریباً ۹۰٪ است [۳]. استخراج مس به روش چرخه‌ای انجام می‌شود. بدین صورت که فاز آبی از فرآیندهای لیچینگ و فاز آلی از مرحله عاری‌سازی وارد مخلوط کننده مرحله استخراج می‌شود و بعد از مخلوط شدن فازها در ته نشین کننده از هم جدا می‌شوند. سپس فاز آبی که مس از آن جدا شده است به مرحله لیچینگ باز می‌گردد و فاز آلی که حاوی فلز مس است وارد مخلوط کننده مرحله عاری سازی می‌شود. در این مرحله یون فلز مس از فاز آلی به فاز آبی که از مرحله الکترووینینگ می‌آید، انتقال می‌یابد. بعد از مخلوط شدن و جداسازی، فاز آلی عاری از یون مس و الکترولیت که حاوی یون مس است بدست می‌آید و فاز آلی عاری از یون مس به مخلوط کننده مرحله استخراج باز می‌گردد که در آنجا دوباره چرخه شروع می‌شود. تعادل در استخراج به PH بستگی دارد. در مرحله استخراج اگر غلظت اسید سولفوریک در فاز آبی آنقدر پایین بیاید که PH بین ۱/۸ تا ۲/۵ قرار گیرد، فاز آلی می‌تواند حاوی یون مس شود. در مرحله احیا سازی غلظت اسید سولفوریک باید بالا باشد (حدوداً ۱۸۰ gr/l) تا تعادل منتقل شود [۵]. عملکرد ته‌نشین کننده‌ها در فرآیند استخراج با حلال تا حد زیادی به توزیع جریان خوراک بر می‌گردد که اثر زیادی روی الگوی جریان در ته‌نشین کننده دارد. ایده آل‌ترین حالت وقتی است که خوراک در کل عرض و عمق ته‌نشین کننده به صورت یکنواخت توزیع شود که باعث به وجود آمدن جریان قالبی در ته نشین کننده می‌شود که مناسبترین الگوی جریان می‌باشد [۶]. زیرا الگوی جریان قالبی از به وجود آمدن گردابه‌های بزرگ و جریان‌های چرخشی که عملکرد فرآیند را مختل می‌کنند، جلوگیری می‌کند.

تاکنون مطالعات گوناگونی برای بهبود عملکرد ته‌نشین کننده‌ها صورت پذیرفته است. میلر و همکاران [۶] برای جلوگیری از به وجود آمدن جریان چرخشی پیشنهاد دادند، خوراک باید در میانه عمق ته نشین کننده وارد شود زیرا اگر در نیمه بالایی خوراک وارد شود باعث ایجاد جریان برگشتی در نیمه پایینی می‌شود و اگر در نیمه پایینی وارد شود باعث ایجاد جریان برگشتی در نیمه بالایی می‌شود.

پاندا و همکاران [۴] جریان مایع-مایع را در یک ته‌نشین کننده را توسط مدل دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. ایشان اثرات دبی سیال، اندازه قطرات، چگالی فاز آلی و اثر بافل(تیغه) ورودی را مطالعه کردند.

گیگاس و گیرالیکو [۵] روی توزیع خوراک به ته‌نشین کننده کار کردند. آنها برای بهتر شدن توزیع خوراک یک شکل گوه‌ای را برای خوراک به ته‌نشین کننده پیشنهاد کردند. یکی از ایرادات کار آنها این است که نمی‌توان تمام گردابه‌های بزرگ را حذف کرد. لین و همکاران [۶] الگوی جریان را در ته نشین کننده با کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند و یک طراحی بهینه ارائه دادند. الگوی بسیار غیر یکنواخت همراه با چرخش‌های زیاد را در ته‌نشین کننده مشاهده نمودند. میرزایی و همکاران [۷، ۸] یک مدل اولری-اولری CFD برای بررسی استخراج مس از محلول Lix84-I ارائه کردند. برای اجرای این عملیات از یک برج پر شده استفاده کردند و نشان دادند که عملکرد آن مناسب می‌باشد. صانقی و همکاران [۹] نیز به شبیه سازی ته‌نشین کننده پرداختند و نشان دادند که با تغییر در ساختار آن می‌توان بهبود قابل توجهی در الگوی جریان ایجاد نمود. علمداری و همکاران [۱۰] به شبیه‌سازی و بهینه سازی شرایط عملیاتی ستلر در فرآیند استخراج حلالی مس پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با کاهش سرعت ورودی سیال، اضافه کردن دو یا سه ردیف پیکت‌فنس و اعمال چند صفحه پیکت فنس اضافی در جلوی ورودی جدایش فازی افزایش می‌یابد. تاکر و همکاران [۱۱] مطالعه تجربی جداسازی مایع-مایع در یک ته‌نشین کننده گرانشی پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی برای سیستم محلول تری بوتیل فسفات (TBP)-دودکان و اسید نیتریک انجام دادند. اثرات پارامترهای عملیاتی مختلف و پارامترهای هندسی بر جداسازی فاز بررسی شدند. ضخامت باند پراکندگی، کسر حجمی فاز پراکنده محلی و توزیع اندازه قطره در باند پراکندگی اندازه‌گیری شدند. در نهایت یک رابطه همبستگی تجربی برای پیش‌بینی ضخامت باند پراکندگی پیشنهاد شد. استخراج اورانیوم از محلول خوراک U-Zr در حالت جریان متقاطع در یک میکسر ستلر توسط اسرینیوسولا و همکاران [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفت.

(۱) Stripping

معادلات پیوستگی

معادلات پیوستگی وقتی فاز پیوسته غیرقابل تراکم باشد بصورت معادلات ۱ و ۲ می‌باشند.

$$\rho_c \left[\frac{\partial \alpha_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_c U_c) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\rho_d \left[\frac{\partial \alpha_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_d U_d) \right] = 0 \quad (2)$$

ρ دانسیته، α درصد حجمی، t زمان و U بردار سرعت می‌باشد. بردار سرعت در سه جهت نشان داده شده است زیرا که مدل ته‌نشین‌کننده سه بعدی است.

معادلات مومنتوم

دو نوع نیرو روی المان‌های سیال اثر می‌گذارند. که نیروهای سطحی (شامل نیروهای ویسکوز و فشار به دلیل تنش سطحی و حرکت سیال) و نیروهای حجمی می‌باشند. در معادلات مومنتوم نیروهای سطحی به صورت صریح و نیروهای حجمی به صورت ترم منبع ظاهر می‌شوند. معادلات مومنتوم برای فاز پیوسته و فاز پراکنده در لاند و ته‌نشین‌کننده به ترتیب به صورت معادلات ۳ و ۴ می‌باشند [۱۵]:

$$\rho_c [\nabla \cdot (\alpha_c U_c U_c)] = -\alpha_c \nabla P + (\mu_c + \mu_t) \nabla^2 (\alpha_c U_c) + S_{M-c} \quad (3)$$

$$\rho_d [\nabla \cdot (\alpha_d U_d U_d)] = -\alpha_d \nabla P + (\mu_d + \mu_t) \nabla^2 (\alpha_d U_d) + S_{M-d} \quad (4)$$

در معادلات بالا μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار و S_M ترم منبع به خاطر نیروهای حجمی می‌باشد. در ته‌نشین‌کننده نیروهای حجمی عبارتند از، نیروهای شناوری، دراگ، پراکندگی توربالانسی و بالابر (لیفت). نیروی شناوری F_{bou} بدلیل اختلاف دانسیته فاز پیوسته و پراکنده می‌باشد به صورت معادله ۵ در نظر گرفته شده است.

$$F_{bou} = \alpha_d (\rho_d - \rho_c) g \quad (5)$$

نیروی دراگ بین فاز پیوسته و فاز پراکنده بصورت معادله ۶ در نظر گرفته می‌شود [۱۶]

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho |U_{rel}| U_{rel} A_p C_D \quad (6)$$

برای در نظر گرفتن بهم آمیختگی قطرات و از بین رفتن قطرات روش موازنه جمعیتی لو [۱۷] همراه با مدل پرنیس و بلانچ [۱۸] برای ترکیب شدن قطرات و مدل لو و اوسونسون [۱۷] برای از بین رفتن قطرات استفاده شد. مدل موازنه جمعیتی برای در نظر گرفتن توزیع اندازه قطرات گروه‌های اندازه‌ای را در نظر می‌گیرد که هر گروه یک قطر دارد. در مدل به کار رفته در این مطالعه یک میدان سرعت برای فاز پیوسته

کستانیان و همکاران [۱۳] استخراج‌کننده‌های میکسر-ته‌نشین‌گر گریز از مرکز را که بصورت آبشاری موتاژ شده‌اند را به عنوان یک واحد چند مرحله‌ای برای کاربرد صنعتی پیشنهاد و مورد مطالعه قرار دادند. این روش در هیدرومتالورژی و به‌ویژه برای جداسازی و خالص‌سازی فلزات کمیاب، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تینگ و همکاران [۱۴] به مطالعه رفتار گذرا فرآیند استخراج با حلال در میکسر ته‌نشین‌کننده از شروع تا حالت پایا استخراج، انجام دادند. یک محاسبات ریاضی بر اساس اجرای واقعی میکسر-ته‌نشین‌کننده و مدل گذرا به پایا پیشنهاد شد. عوامل موثر بر تعادل استخراج در سیستم استخراج ۳۰٪ TBP/dodecane با استفاده از برنامه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که غلظت اسید نیتریک عامل اصلی است.

همان‌گونه که اشاره شد، ابزارهایی مانند بافل‌ها و پیکت فنس‌ها می‌توان عملکرد ته‌نشین‌کننده را تا حدود زیادی بهبود بخشید با این ابزار می‌توان از تولید گردابه‌های بزرگ و کوچک و جریان چرخشی که از مشخصات ته‌نشین‌کننده‌های با مقیاس صنعتی است جلوگیری کرد و همچنین با این ابزار می‌توان توزیع خوراک و سیستم ترکیب بهتری داشته باشیم. یکی دیگر از پارامترهای موثر روی عملکرد ته‌نشین‌کننده توزیع اندازه قطرات می‌باشد. توزیع قطرات در ته‌نشین‌کننده به مخلوط‌کننده و خواص فیزیکی سیالات در ته‌نشین‌کننده بستگی دارد.

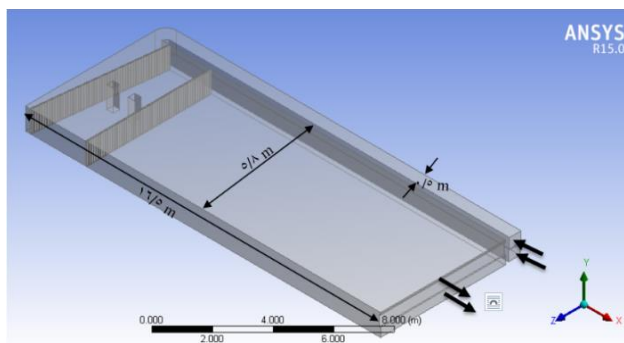
در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی CFX و اطلاعات مربوط به حوضچه و سیال‌های موجود ته‌نشین‌کننده مرحله استخراج واحد استخراج با حلال مجتمع مس میدوک، ته‌نشین‌کننده را شبیه‌سازی کرده و به بررسی توزیع مناسب جریان در آن با استفاده از تیغه‌های برش جریان (بافل‌ها) و نرده‌های توزیع جریان (پیکت فنس‌ها) و قرارگیری آنها در حالت‌های مختلف پرداخته ایم. در نهایت، بهترین طراحی برای نرده‌ها و تیغه‌های توزیع جریان ارائه شده است.

شبیه‌سازی ته‌نشین‌کننده با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی**معادلات حاکم لاند و ته‌نشین‌کننده**

برای شبیه‌سازی ته‌نشین‌کننده از دیدگاه اویلرین-اویلرین برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده شده است. این مدل نسبت به مدل لاگرانژ اثر متقابل فازها را بهتر در نظر می‌گیرد. معادلات پیوستگی و مومنتوم برای فاز پیوسته و پراکنده نوشته شد. از معادلات انرژی در شبیه‌سازی ارائه شده صرف نظر شده است. بطور کلی در این شبیه‌سازی فرض‌های جریان غیرقابل تراکم، همدم، آشفته و ویسکوزیته ثابت فازها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی فازهای مایع

کشش سطحی (mNm^{-1})	دانسیته آلی (kgm^{-3})	دانسیته آبی (kgm^{-3})	ویسکوزیته دینامیکی آلی	ویسکوزیته دینامیکی آبی
۲۶/۱	۸۰۶	۱۱۰۰	۳/۳	۲/۳



شکل ۱- ابعاد ته نشین کننده شبیه سازی شده

به ترتیب برای حالت بدون پیکت فنس و با پیکت فنس استفاده گردید. برای شرایط مرزی ورودی از دی بی جرمی سیال استفاده شده است. برای شرط خروجی از فشار هیدروستاتیکی و سطح آزاد سیال از شرط بدون اصطحکاک بهره گرفته شده است. برای شرط مرزی دیواره‌های ته نشین کننده نیز از شرط بدون لغزش استفاده شده است.

نتایج و بحث

خواص فیزیکی سیالات

برای تحقیقات در واحد استخراج با حلال مجتمع مس میدوک خواص فیزیکی سیالات مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است

تعیین پارامترهای مدل MUSIG

پارامترهای مدل MUSIG عبارتند از تعداد گروه‌های اندازه‌ای، اندازه هر گروه، تعیین ضریب کالیبراسیون ترکیب شدن و از بین رفتن قطرات و تعیین ضخامت اولیه و بحرانی فیلم مایع. هرچه تعداد گروه‌های اندازه‌ای بیشتر باشد می‌توان به توزیع مطلوبتری برای قطرات در ته نشین کننده دست پیدا کرد. در این شبیه سازی براساس کار انجام شده توسط صادقی [۱۶] که از ارزیابی بین گروه‌های اندازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ به گروه ۱۵ که توزیع مطلوب تر قطرات را نشان می‌داد دست یافته بود استفاده شد. بنابراین در این مطالعه، از تعداد گروه اندازه‌ای ۱۵ استفاده شد. حداقل اندازه برای گروه‌های اندازه‌ای براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده برای اندازه‌گیری اندازه قطرات در ورودی $100 \mu m$ در نظر گرفته شد. قطر ماکزیمم $2000 \mu m$ در نظر گرفته شد

و یک میدان سرعت برای فاز پراکنده که شامل گروه های اندازه ای است حل می‌شود و تمام گروه های اندازه ای دارای سرعت یکسانی هستند. در این مدل فرض می‌شود که تمام خواص برای همه قطرات یکسان است. معادله پیوستگی برای گروه اندازه ای i به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho d \left[\frac{\partial \alpha_{d,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_{d,i} U_{d,i}) \right] = S_i \quad (7)$$

ضریب لیفت براساس کار انجام شده توسط بهزادی و همکاران [۱۹] برابر $0/1$ قرار داده شد.

شبیه سازی ته نشین کننده:

در این مطالعه فقط به بررسی واحد E2 مجتمع مس میدوک پرداخته می‌شود که شامل یک حوضچه به ابعاد $16/5 m \times 5/8 m \times 1 m$ با دو ستون نگهدارنده به همراه یک لاندرد متصل در ورودی به ابعاد $16/5 m \times 0/5 m \times 1 m$ با یک ورودی و دو خروجی برای جریان آبی و آلی می‌باشد؛ شکل (۱). در این واحد فاز آبی (PLS) با دی $540 m^3/hr$ با غلظت $2/2-2/9 gr/lit$ از مس وارد مخلوط کننده می‌شود. جریان آلی همراه با جریان برگشتی که در انتهای ته نشین کننده می‌آید، طوری وارد مخلوط کننده می‌شود که نسبت فاز آلی به آبی (O/A) در مخلوط کننده به $1/1$ می‌رسد. ارتفاع سیال در ته نشین کننده $100 cm$ (فاز آبی $85 cm$ و فاز آلی $15 cm$) می‌باشد. جریان در خروجی با دی‌های مجزا برای فاز آبی و آلی می‌باشد که به نسبت برابر از حوضچه خارج می‌شوند. همچنین شرایط مرزی برای سطح بالا (سطح باز) را سطح آزاد (Free Surface) و دیواره‌ها (Walls) را بدون لغزش در نظر می‌گیریم.

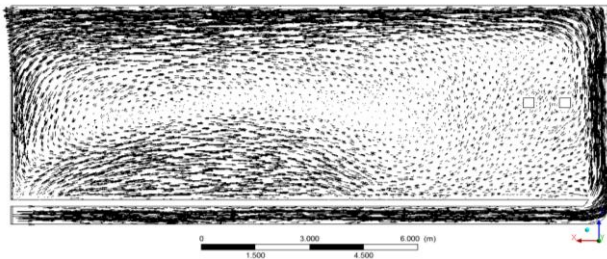
در این مطالعه در ته نشین کننده از دو شبکه محاسباتی با تعداد المان مختلف استفاده شد. نرم‌افزار CFX از المان‌های بر مبنای روش حجم محدود استفاده می‌کند. در این روش از مش ساختار نایافته به علت پیچیدگی هندسه و ساختار پیکت فنس‌ها استفاده شد. برای تست استقلال از 4 مش سه بعدی متفاوت بهره گرفته شده است. هر کدام به ترتیب دارای 100000 ، 120000 ، 170000 و 220000 المان بودند. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داد که باید از دو نوع شبکه محاسباتی متفاوت برای حالت بدون پیکت فنس و با پیکت فنس استفاده شود. وقتی در شبیه سازی از پیکت فنس‌ها استفاده شد، تعداد المان‌های مورد نیاز افزایش یافت. یک راهکار برای کاهش تعداد المان‌ها این بود که هر ردیف پیکت فنس در یک هندسه جداگانه شبکه‌بندی شود و در انتها هر کدام از هندسه‌ها به هم متصل شوند. بنابراین از ساختار مش با المان 120000 و 170000

جدول ۲- درصد شکست برای توزیع اندازه قطرات در ورودی ستلر

کسر اندازه ای (%)	اندازه گروه اندازه ای (μm)	شماره گروه اندازه ای (i)	کسر اندازه ای (%)	اندازه گروه اندازه ای (μm)	شماره گروه اندازه ای (i)
۰	۱۰۰۰	۹	۰/۱۸۸	۱۰۰	۱
۰	۱۱۵۰	۱۰	۰/۳۲۳	۱۷۵	۲
۰	۱۳۰۰	۱۱	۰/۳۰۹	۲۵۰	۳
۰	۱۴۵۰	۱۲	۰/۱۲۴	۳۵۰	۴
۰	۱۶۰۰	۱۳	۰/۰۴۶	۴۵۰	۵
۰	۱۸۰۰	۱۴	۰/۰۱	۶۰۰	۶
۰	۲۰۰۰	۱۵	۰	۷۰۰	۷
			۰	۸۵۰	۸

جدول ۳- مقایسه داده های تجربی با نتایج شبیه سازی برای کسر حجمی (بر حسب درصد) فاز آلی در نقاط مختلف در ته نشین کننده

ارتفاع سیال (m)			$x = 1 \text{ (m)}$			$x = 8 \text{ (m)}$			$x = 16 \text{ (m)}$		
تجربی	شبیه سازی	خطا (%)	تجربی	شبیه سازی	خطا (%)	تجربی	شبیه سازی	خطا (%)	تجربی	شبیه سازی	خطا (%)
۵/۵	۵/۳	۳/۶	۵/۲	۴/۹	۵/۷	۴/۷	۵/۱	۸/۵	۵/۵	۵/۳	۳/۶

شکل ۲- الگوی جریان در ته نشین کننده بدون حضور پیکت فنس در ارتفاع $y = 0/3 \text{ m}$

وارد ته نشین کننده می‌شوند. شکل ۲ الگوی جریان در ته نشین کننده بدون حضور پیکت فنس در ارتفاع $y = 0/3 \text{ m}$ را نشان می‌دهد. با وجود اینکه الگوی جریان در ته نشین کننده را در $y = 0/3 \text{ m}$ برش زده‌ایم و این ارتفاع نزدیک به کف ته‌نشین کننده می‌باشد اما جریان در حالت‌های مختلف قرارگیری نرده‌های توزیع جریان تقریباً غیر یکنواخت و همراه با جریان‌های چرخشی است. این جریان چرخشی باعث از بین رفتن لایه‌های ته‌نشین کننده می‌شود. همچنین به دلیل وجود ستون‌های بزرگ (ستون نگهدارنده ستلر) در ته‌نشین کننده جریان بسیار تحت تاثیر قرار گرفته است. جریان پشت این ستون آرام و یک فضای مرده به حساب می‌آید. لایه جدا شده فاز آبی از همان ابتدای ته‌نشین کننده وجود دارد و ضخامت لایه‌های جدا شده در خروجی ته نشین کننده کاهش پیدا می‌کند. عامل این تغییر به دو علت می‌باشد، یکی به دلیل جریان‌های چرخشی که در انتهای ته نشین کننده وجود دارد و دیگر اینکه باید تمام جریان ورودی از دو خروجی بالایی و پایینی خارج شوند که خود باعث به وجود آمدن این پدیده می‌شود. [۲۱]

تا تقریباً قطر قطرات هنگامیکه ته نشین می‌شوند و فازها از هم جدا می‌شوند به پیوستگی نزدیک باشند. توزیع اندازه قطرات اندازه‌گیری شده در ورودی ته نشین کننده در جدول ۲ نشان داده شده است. چون فرآیند ته نشین کننده تحت تاثیر فرآیند ترکیب شدن قطرات است تا نسبت به از بین رفتن قطرات، بنابراین ضریب کالیبراسیون از بین رفتن قطرات خیلی روی فرآیند تاثیر گذار نیست. لذا از مقدار پیش فرض توسط نرم افزار یعنی $0/1$ برای این ضریب استفاده شد. ضخامت اولیه و بحرانی فیلم مایع بین قطرات قابل اندازه‌گیری نبود. بنابراین ضخامت اولیه $(10 \times 4 - 10 \times 1 \text{ m})$ و ضخامت بحرانی $(10 \times 8 - 10 \times 1 \text{ m})$ را براساس کار انجام شده توسط ماگریا و بلاس [۲۰] انتخاب شد.

مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های تجربی

برای اعتبار شبیه سازی در ته نشین کننده از داده‌های تجربی مربوط کسر حجمی فاز آلی در نقاط مختلف در طول (x)، ارتفاع (y) و عرض (z) در ته نشین کننده استفاده شد. مقایسه بین داده‌های تجربی و شبیه سازی در این نقاط در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج شبیه سازی آن وجود داشت.

شبیه سازی ته نشین کننده

در شبیه سازی ته نشین کننده اثر پیکت فنس‌ها، مکان پیکت فنس‌ها، تعداد پیکت فنس‌ها، فاصله بین پیکت فنس‌ها و محل و شکل تیغه‌های برش روی عملکرد ته‌نشین کننده مورد بررسی قرار گرفت. جریان‌های خروجی از لاندرا (حوضچه باریک و طولی جانبی حوضچه اصلی)

شبیه سازی با پیکت فنس های غیر موازی

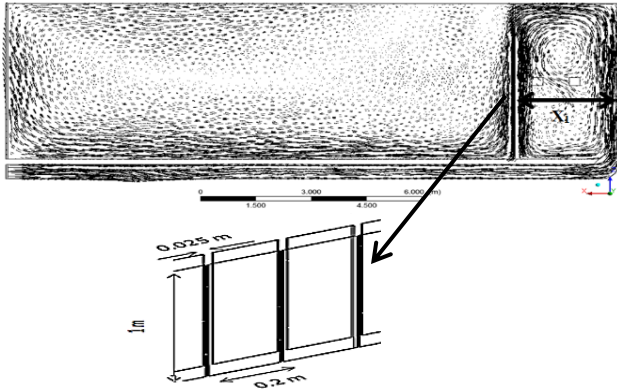
در شبیه سازی ته نشین کننده با پیکت فنس ابتدا اثر پیکت فنس ها در عملکرد ته نشین کننده و سپس مکان، تعداد، فاصله بین آنها و اثر پیکت فنس ها در اندازه قطرات بررسی شد که در همه آنها از پیکت فنس های مکعب مستطیلی استفاده شده است.

شبیه سازی با یک ردیف پیکت فنس

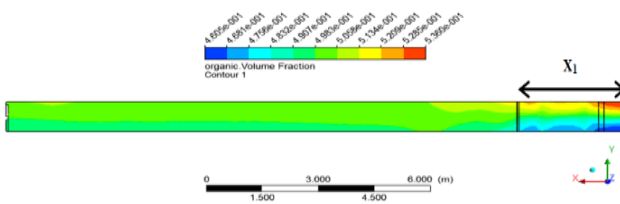
شبیه سازی با پیکت فنس تحت همان شرایط شبیه سازی بدون پیکت فنس انجام شد. شکل ۳ الگوی جریان در ته نشین کننده را با یک ردیف پیکت فنس نشان می دهد. این پیکت فنس در فاصله $x_1 = 2/80 \text{ m}$ از ابتدای ته نشین کننده قرار گرفته است. این فاصله نزدیکترین فاصله ممکن از ستون دوم موجود در ته نشین کننده است که می توان پیکت فنس ها را قرار داد. این فاصله بعد از ستون ردیف دوم می باشد. همانطور که این شکل نشان می دهد پیکت فنس ها باعث کاهش باند دیسپرژن شده اند و بردارهای سرعت در همه جهات منتشر شده اند (بردارهای سرعت تجمع در یک مکان خاص ندارند). این شکل همچنین نشان می دهد که باند دیسپرژن تا انتهای ته نشین کننده ادامه دارد و استفاده از دو ردیف پیکت فنس را ملزوم می نماید. شکل ۴ کانتورهای کسر حجمی مربوط به شکل ۳ را نشان می دهد. از این شکل مشخص است که پیکت فنس ها باعث افزایش ضخامت لایه های جدا شده می شوند. این شکل به صورت کیفی می باشد و نمی تواند به خوبی بیانگر ضخامت لایه های جدا شده باشد.

شکل ۵ و ۶ به ترتیب بردارهای سرعت و کانتور کسر حجمی فاز آلی در ته نشین کننده با یک ردیف پیکت فنس ($y = 0/3 \text{ m}$ و $x_1 = 0/63 \text{ m}$) است. با قرار دادن یک ردیف پیکت فنس در ابتدای ته نشین کننده می توان نتیجه گرفت که هر چه پیکت فنس نزدیک به ابتدای ورودی ته نشین کننده نصب شود دارای عملکرد بهتری است. دلیل آن به کاری که پیکت فنس ها انجام می دهند، برمی گردد.

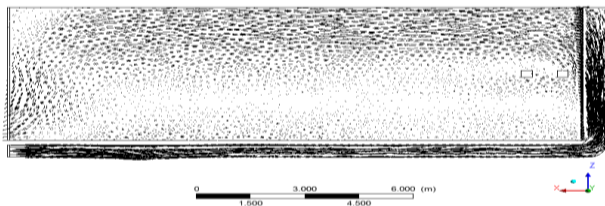
کار اصلی پیکت فنس ها انتشار بردارهای سرعت با جلوگیری از تجمع جریان در قسمت خاصی از حوضچه و توزیع کردن جریان در عرض ورودی حوضچه به صورت همگن می باشد. این باعث می شود که احتمال برخورد قطرات بیشتر شود و قطرات بیشتری به هم برخورد کنند. برخورد قطرات باعث ترکیب شدن قطرات و بزرگتر شدن آنها می شود و هرچه اندازه قطرات بزرگتر شود نیروی شناوری روی آنها افزایش یافته و پدیده ته نشینی در ته نشین کننده سریعتر اتفاق می افتد. ترکیب قطرات دارای دو مکانیسم ترکیب قطره-قطره و فصل مشترک می باشد. در ابتدای ته نشین کننده مکانیسم حاکم، مکانیسم ترکیب قطره-قطره و در انتهای ته نشین کننده مکانیسم حاکم، مکانیسم ترکیب قطره-فصل



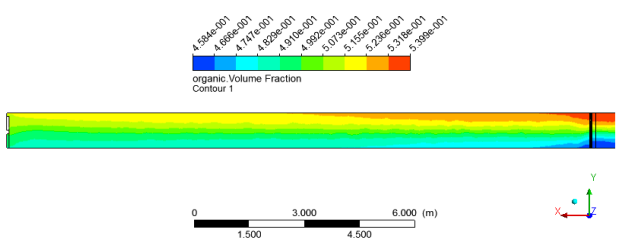
شکل ۳- الگوی جریان در ته نشین کننده با یک ردیف پیکت فنس (شکل ۳- الگوی جریان در ته نشین کننده با یک ردیف پیکت فنس) و ابعاد پیکت فنس ها در ته نشین کننده مجتمع مس میدوک



شکل ۴- کانتورهای کسر حجمی فاز آلی با یک ردیف پیکت فنس ($x_1 = 2/80 \text{ m}$ و $z = 0 \text{ m}$)

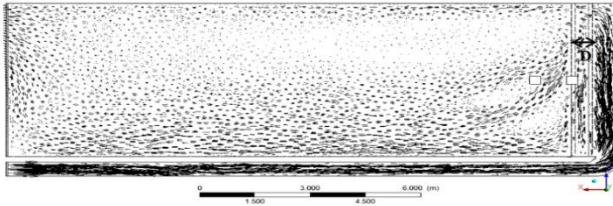


شکل ۵- الگوی جریان در ته نشین کننده با یک ردیف پیکت فنس ($x_1 = 0/63 \text{ m}$ و $y = 0/3 \text{ m}$)

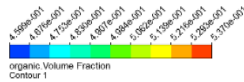


شکل ۶- کانتورهای کسر حجمی فاز آلی با یک ردیف پیکت فنس ($x_1 = 0/63 \text{ m}$ و $z = 0 \text{ m}$)

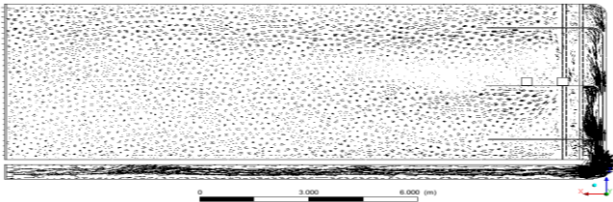
مشترک می باشد. حضور پیکت فنس ها باعث افزایش برخورد قطرات می شود بنابراین وقتی پیکت فنس ها در ابتدای ته نشین کننده قرار بگیرند موثر واقع خواهند شد. هرچه پیکت فنس ها به انتهای ته نشین کننده نزدیک شوند به علت اینکه ممکن است قطرات را از فصل مشترک دور کنند باعث کاهش ترکیب قطره-فصل مشترک می شوند.



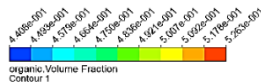
شکل ۷- الگوی جریان در ته‌نشین‌کننده با دو ردیف پیکت فنس
($D=0/47\text{ m}$ و $x1=0/63\text{ m}$, $y=0/3\text{ m}$)



شکل ۸- کانتورهای کسر حجمی فاز آلی با دو ردیف پیکت فنس
($D=0/47\text{ m}$ و $x1=0/63\text{ m}$, $z=0\text{ m}$)



شکل ۹- الگوی جریان ته‌نشین‌کننده با دو ردیف پیکت فنس و تیغه‌های
برش جریان امتداد یافته
($D=0/47\text{ m}$ و $x1=0/63\text{ m}$, $y=0/3\text{ m}$)



شکل ۱۰- کانتورهای کسر حجمی فاز آلی در ته‌نشین‌کننده با دو ردیف
پیکت فنس و تیغه‌های برش جریان امتداد یافته
($D=0/47\text{ m}$ و $x1=0/63\text{ m}$, $z=0\text{ m}$)

اثر نسبت C/O در جدایش فازی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی پیکت فنس‌ها، نسبت سطح بسته (C) پیکت فنس‌ها به سطح باز (O) پیکت فنس‌ها (C/O) می‌باشد. در تمام شبیه‌سازی‌های قبلی پیکت فنس‌های بکار برده شده دارای نسبت C/O برابر ۸ بود. در یک شبیه‌سازی جدید اثر نسبت C/O در جدایش فازی بررسی شد. از آنجا که کاهش نسبت C/O باعث کاهش در انتشار بردارهای سرعت و کاهش کارایی پیکت فنس می‌شود، در این بررسی اثر کاهش این نسبت با نصف شدن اندازه پیکت فنس‌ها

اثر تعداد پیکت فنس‌ها و فاصله بین آنها در عملکرد ته‌نشین‌کننده

طبق بررسی صورت گرفته با جابجا کردن یک ردیف پیکت فنس در طول ته‌نشین‌کننده جایگاه مناسب برای پیکت فنس ردیف اول در فاصله $x1=0/63\text{ m}$ می‌باشد. اما مشکل جریان‌های گردابه‌ای با یک ردیف پیکت فنس همچنان در حوضچه باقی ماند لذا از دو ردیف پیکت فنس استفاده شد که با توجه به کارایی و اثرگذاری پیکت فنس‌ها در ابتدای ته‌نشین‌کننده و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته؛ که نشان داد افزایش فاصله پیکت فنس‌ها باعث جریان چرخشی شدید بین پیکت فنس‌ها و مختل شدن فرآیند جداسازی می‌شود. زیرا این جریان ناآرام باعث افزایش از بین رفتن قطرات بزرگتر و لایه‌های فازی جدا شده بعد از پیکت فنس اول و کاهش کارایی پیکت فنس دوم می‌شود؛ پیکت فنس ردیف دوم در فاصله $D=0/47\text{ m}$ از پیکت فنس ردیف اول قرار داده شد که به ستون اول برخورد می‌کند. شکل ۷ الگوی جریان در ته‌نشین‌کننده با دو ردیف پیکت فنس را نشان می‌دهد. همانطور از این شکل مشخص است بردارهای سرعت بعد از پیکت فنس ردیف دوم بهتر منتشر شده‌اند اما باند دیسپرژن (پراکندگی دو فاز در یکدیگر) کامل از بین نرفته است. شکل ۸ کانتورهای کسر حجمی فاز آلی را نشان می‌دهد این شکل نشان می‌دهد که ضخامت لایه‌های جدا شده بعد از پیکت فنس‌های ردیف دوم تا حد زیادی افزایش پیدا کرده است

همانگونه که از شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۷ برمی‌آید، عامل اصلی در ناهمگونی الگوی جریان ته‌نشین‌کننده بعد از اصلاحات صورت گرفته در آن، ستون‌های نگه دارنده می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف در فواصل گوناگون پیکت فنس‌ها و نتیجه نامطلوب توزیع جریان از تیغه‌هایی جهت برش و توزیع جریان ورودی در ستلر استفاده گردید. در شکل ۹ با امتداد تیغه‌های برش جریان در طول ته‌نشین‌کننده تأثیرات گردابه‌ای ناشی از ستون‌ها بر روی الگوی جریان کاهش یافت و جداسازی موثرتری بین فازها رخ می‌دهد.

شکل ۱۰ نمودار کسر حجمی فاز آلی بر حسب ارتفاع در انتهای ته‌نشین‌کننده را نشان می‌دهد. اثر پیکت فنس روی باند دیسپرژن را از شکل ۱۰ که نمودار کسر حجمی فاز آلی نسبت به ارتفاع را در انتهای ته‌نشین‌کننده در مقایسه با حالت بدون پیکت فنس نشان می‌دهد، بهتر می‌توان فهمید. همانطور که این شکل نشان می‌دهد نمودار مربوط به دو ردیف پیکت فنس و تیغه‌های برش جریان دارای کسر حجمی بیشتری است یعنی باند دیسپرژن با ضخامت کمتری در انتهای ته‌نشین‌کننده است.

به دلیل افزایش توربالانسی می‌شود. همچنین پیکت فنس‌ها نباید از همدیگر فاصله زیادی (بیشتر از ۰/۵ متر) داشته باشند زیرا باعث کاهش کارایی پیکت فنس بعدی می‌شود.

۴- وجود ستون‌های نگه دارنده در ستلر باعث اغتشاش جریان در پشت خود ستون شده و عملکرد پیکت فنس‌ها را خنثی می‌کند. از طرفی برخورد جریان با دیواره انتهایی ورودی جریان نیز عامل تشدید جریان‌های گردابه‌ای می‌باشد.

۵- استفاده از تیغه‌های برش جریان در ورودی ستلر باعث توزیع مناسب جریان بر روی پیکت فنس‌ها شده و از تجمع جریان در انتهای ورودی ته نشین کننده جلوگیری می‌کند.

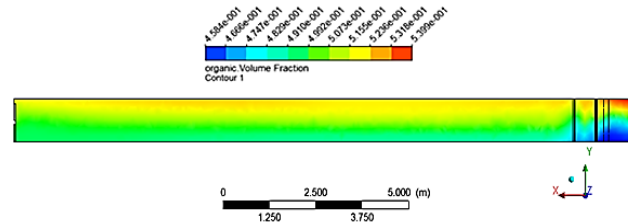
پیشنهاد نهایی برای بهبود ستلر بصورت زیر می‌باشد:

نوع پیکت فنس از صفحات مکعب مستطیلی به طول ۱ متر و عرض ۲۰ سانتیمتر و به ضخامت ۱/۲۵ سانتیمتر می‌باشد. نوع تیغه‌های برش جریان را صفحات مکعب مستطیلی به طول ۱ متر که از ابتدای ورودی تا میانه ستلر ادامه می‌یابند و به ضخامت ۱/۲۵ سانتیمتر می‌باشند. تعداد پیکت فنس‌ها دو ردیف دوتایی و موازی؛ تعداد تیغه‌های برش جریان سه تیغه موازی؛ محل پیکت فنس اول ۰/۶۳ متر از ابتدای ستلر؛ فاصله بین پیکت فنس‌ها ۰/۴۷ متر؛ افزایش نسبت بسته به باز با افزایش تعداد پیکت فنس‌ها $(C/O) = 8$ می‌باشد. بکارگیری موارد فوق در حوضچه ته‌نشین کننده باعث توزیع بهتر جریان شده و وجود تیغه‌های برش جریان باعث توزیع جریان بر روی پیکت فنس‌ها می‌شود و در نهایت عملکرد ته‌نشین کننده به میزان مطلوبی بالاتر می‌رود.

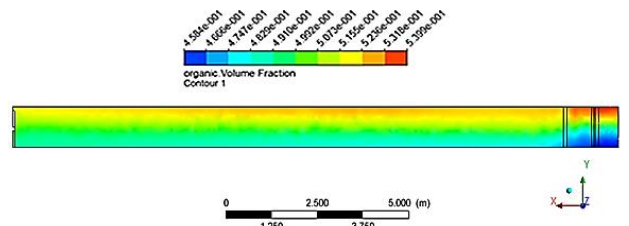
تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مالی مجتمع مس میدوک شهر بابک بوده است و از پشتیبانی این شرکت تشکر و قدردانی می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۱/۱۴۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۲۰/۰۶/۱۴۰۲



شکل ۱۱- الگوی جریان در ته نشین کننده با دو ردیف پیکت فنس با نسبت $(D=0/65$ و $x1=0/85$ m, $z=0$ m) $C/O=4$



شکل ۱۲- کانتورهای کسر حجمی فاز آلی با یک ردیف پیکت فنس با نسبت $(D=0/65$ و $x1=0/85$ m, $z=0$ m) $C/O=8$

مطالعه شد. در این کار نسبت C/O برابر ۴ (فشردگی کمتر با پیکت فنس بیشتر) در نظر گرفته شد.

اثر این تغییر را به وضوح می‌توان در شکل ۱۱ که کانتورهای کسر حجمی فاز آلی بر حسب ارتفاع را نشان می‌دهد مشاهده کرد. همانطور که از این شکل مشخص است ضخامت لایه‌های جدا شده بعد از پیکت فنس‌ها کاهش پیدا کرده است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ضخامت باند دیسپرژن هنگامی که نسبت C/O برابر ۸ است افزایش بیشتری پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه ته نشین کننده واحد E2 استخراج با حلال مجتمع مس میدوک با کمک دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم افزار ANSYS CFX 15 شبیه سازی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی صورت گرفته به صورت زیر می‌باشد:

۱- پیکت فنس‌ها باید در ابتدای ته‌نشین کننده قرار بگیرند. زیرا پیکت فنس‌ها باعث افزایش ترکیب قطره-قطره می‌شوند که این فرآیند در ابتدای ته‌نشین کننده حاکم است.

۲- افزایش تعداد پیکت فنس‌ها باعث از بین رفتن کامل باند دیسپرژن می‌شود و از این رو باعث عملکرد بهتر ته‌نشین کننده می‌شود.

۳- پیکت فنس‌ها نباید بیشتر از ۰/۴ متر بهم نزدیک باشند زیرا باعث به وجود آمدن جریان چرخشی در بین پیکت فنس‌ها شده که علی‌رغم افزایش ترکیب شدن قطرات باعث شکستن قطرات

علائم اختصاری و نمادها

U_c : سرعت برداری فاز پیوسته [m/s]	A_p : سطح تصویر شده قطرات [m ²]
U_d : سرعت برداری فاز پراکنده [m/s]	C_d : ضریب دراگ [-]
U_{rel} : سرعت نسبی بین فازها [m/s]	d_i : قطر گروه اندازه ای [m]
α_c : کسر حجمی فاز پیوسته [-]	F^{buo} : نیروی شناوری [N/m ³]
α_d : کسر حجمی فاز پراکنده [-]	F^{drag} : نیروی دراگ [N/m ³]
α_{di} : کسر حجمی گروه اندازه ای i [-]	F^{td} : نیروی توربالانسی [N/m ³]
μ_c : ویسکوزیته فاز پراکنده [Pa.s]	g : سرعت مشخصه شکست قطرات [s/∧]
μ_d : ویسکوزیته فاز پیوسته [Pa.s]	g : شتاب جاذبه [m/s ²]
μ_m : ویسکوزیته فاز مخلوط [Pa.s]	k : انرژی جنبشی توربالانسی [m ² /s ²]
ρ_o : دانسیته مرجع [kg/m ³]	Re : عدد رینولدز [-]
ρ_c : دانسیته فاز پیوسته [kg/m ³]	S_i : ترم منبع بخاطر نرخ انتقال جرم به گروه اندازه ای i [kg/(m ³ .s)]
ρ_d : دانسیته فاز پراکنده [kg/m ³]	t : زمان [s]

منابع

- [1] Mousavi S.M., Vossoughi M., Yaghmaei S., Jafari A., [Copper Recovery from Chalcopyrite Concentrate by an Indigenous Acidithiobacillus Ferrooxidans in an Air-Lift Bioreactor](#). *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering(IJCCE)*, **25(3)**: 21-26 (2006).
- [2] Guerdouh A., Barkat D., [Influence of the Solvent on the Extraction of Copper \(II\) from Nitrate Medium Using Salicylideneaniline](#). *Journal of Dispersion Science and Technology*, **38(7)**: 930-934 (2017).
- [3] Smellie I.A., Forgan R.S., Brodie C., Gavine J.S., Harris L., Houston D., Hoyland, A.D., McCaughan, R.P., Miller, A.J., Wilson, L., Woodhall, F.M., [Solvent Extraction of Copper: An Extractive Metallurgy Exercise for Undergraduate Teaching Laboratories](#). *Journal of Chemical Education*, **93(2)**: 362-367 (2015).
- [4] Panda S.K., Singh K., Shenoy K., Buwa V.V., [Numerical Simulations of Liquid-Liquid Flow in a Continuous Gravity Settler Using OpenFOAM and Experimental Verification](#). *Chemical engineering journal*, **310**: 120-133 (2017).
- [5] Gigas B., Giralico M., editors., [Advanced Methods for Designing Today's Optimum Solvent Extraction Mixer Settler Unit](#). Proceedings International Solvent Extraction Conference, eds KC Sole, PM Cole, JS Preston, and DJ Robinson; (2002).
- [6] Lane G.L., Mohanarangam K., Yang W., Robinson D.J., Barnard K.R., [Flow Pattern Assessment and Design Optimisation for an Industrial Solvent Extraction Settler Through in Situ Measurements and CFD Modelling](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **109**: 200-214 (2016).
- [7] Mirzaie M., Sarrafi A., Hashemipour H., Baghaie A., Molaeinasab M., [CFD Simulation and Experimental Investigation of the Copper Solvent Extraction in a Pilot Plant Pulsed Packed Column in Sarcheshmeh Copper Complex](#). *Heat and Mass Transfer*, **53(6)**:1995-2008 (2017).

- [8] Mirzaie M., Sarrafi A., Pour H.H., Baghaie A., Molaeinasab M., [Experimental Investigation and CFD Modeling of Hydrodynamic Parameters in a Pulsed Packed Column](#). *Solvent Extraction and Ion Exchange*, **34(7)**: 643-660 (2016).
- [9] Sadeghi R., Mohebbi A., Sarrafi A., Soltani A., Salmanzadeh M., Daneshpojooh S., [CFD Simulation and Optimization of the Settler of an Industrial Copper Solvent Extraction Plant: A Case Study](#), *Hydrometallurgy*, **106(3)**: 148-158 (2011).
- [۱۰] منصوریان د، کشاورز علمداری ا، شبیه سازی دینامیک محاسباتی سیال در محفظه ی جداکننده ی فرآیند استخراج حلالی مس، نشریه مهندسی متالورژی، **۲۰(۲)**: ۹۰ تا ۹۷ (۱۳۹۶).
- [11] Thaker A.H., Darekar M., Singh K.K., Buwa V.V., [Experimental Investigations of liquid-liquid Disengagement in a Continuous Gravity Settler](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **139**: 174-187 (2018).
- [12] Sreenivasulu B., Suresh A., Rao C., Sivaraman NJJoR., Chemistry N., [Mixer-Settler Runs with Tri-Iso-Amyl Phosphate and Tri-N-Butyl Phosphate for the Aqueous Reprocessing of U-Zr Alloy](#), *fuels*, **330(3)**: 1207-1220 (2021).
- [13] Kostanyan A.E., Erastov A.A., [Industrial Countercurrent Chromatography Separations Based on a Cascade of Centrifugal Mixer-Settler Extractors](#). *Journal of Chromatography A*, **1572**: 206-212 (2018).
- [14] Ting Y., Hui H., Zhan-yuan L., Lan Z., Zheng L., HAO-gui, Z.H.A.O., Guo-an, Y.E., [Transient Behavior and Mathematical Model of Solvent Extraction Process in Mixer-Settler](#), **42(4)**: 214 (2020).
- [۱۵] زارعی ط، فارسیانی م، عابدینی ا، بررسی آزمایشگاهی و ارائه رابطه‌های تجربی برای سینی درپچه‌ای در مقیاس صنعتی در حد بالا و پایین عملیاتی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۶(۳)**: ۱۹۹ تا ۲۰۹ (۱۳۹۶).
- [۱۶] رحیمی م، مطالعه اختلاط فازها در سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۱(۱)**: ۱۰۱ تا ۱۱۳ (۱۳۹۱).
- [17] Luo H., Svendsen HF., [Theoretical Model for Drop and Bubble Breakup in Turbulent Dispersions](#). *AIChE Journal*, **42(5)**: 1225-1233 (1996).
- [18] Prince M.J., Blanch H.W., [Bubble Coalescence and Break-Up in Air-Sparged Bubble Columns](#). *AIChE journal*, **36(10)**: 1485-1499 (1990).
- [19] Behzadi A., Issa R., Rusche H., [Modelling of Dispersed Bubble and Droplet Flow at High Phase Fractions](#). *Chemical Engineering Science*, **59(4)**: 759-770 (2004).
- [20] Magiera R., Blass E.. [Separation of Liquid-Liquid Dispersion by Flow Through Fibre Beds](#). *Filtration & separation*, **34(4)**: 369-376 (1997).
- [۲۱] موسوی راد س.م، تاثیر روش‌های تبادل یونی و استخراج با حلال آلی بر حذف فلزهای بالقوه سمی از فاز آبی پساب کارخانه‌های صنعتی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۳(۴)**: ۴۳ تا ۵۲ (۱۳۹۳).