

Research Paper

Effect of Two-Phase Gas-Solid Flow into the Cyclone on the Immersion Tubes Behavior by Numerical Method and Microstructural Analyses

*Hamid Sazegaran¹, Seyed Mohammad Javadi²

1- Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

Citation: Sazegaran H, Javadi S.M. Effect of Two-Phase Gas-Solid Flow into the Cyclone on the Immersion Tubes Behavior by Numerical Method and Microstructural Analyses. Metallurgical Engineering 2018; 21(2): 139-148 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.61731.1125>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.61731.1125>

ABSTRACT

The damage caused by the two-phase gas-solid flow in the immersion tubes of the cyclone in the cement industry, which involved the environmental corrosive and abrasive factors is very important. In this paper, the effect of particles flow and their collisions on the corrosion of the immersion tube has been studied by the simulating the two-phase gas-solid flow inside the cyclone. The results of the simulation of gas-solid particles flow and investigations on the particles abrasion on the immersion tube were shown that the collision of particles and shear stress is higher in the upper half compared to the lower half. In addition, microstructural studies conducted by optical and scanning electron microscopies on the strongly damaged corrosive sections of immersion tubes show that chromium carbide is formed in the grain boundaries of austenite and the cracks have nucleated and grown along the grain boundaries of austenite. The formation of chromium carbide on the grain boundaries of austenite caused to decreasing the chromium amount from the adjacent regions of the grain boundaries, which result in intergranular corrosion occurred. Furthermore, the abrasion of the particles collision in the upper half of the immersion tube leads to intensifying the corrosion based on the erosion corrosion mechanism.

Keywords: Immersion tube, Particle flow, Stainless steel, Intergranular corrosion, Erosion corrosion.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Hamid Sazegaran, PhD

Address: Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

Tel: +98 (9352693344)

E-mail: h.sazegaran@qiet.ac.ir

مطالعه اثر جریان دو فاز گاز- جامد درون سیکلون بر رفتار خوردگی ایمرژن تیوب‌ها به روش عددی و ارزیابی ریزساختاری

*حمید سازگارن^۱، سید محمد جوادی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.

چکیده

صدمات ناشی از جریان دو فاز گاز- جامد در قطعات ایمرژن تیوب داخل سیکلون‌های صنعت سیمان که عوامل خورنده محیطی و عوامل ساینده در آن وجود دارد، حائز اهمیت فراوانی است. در این مقاله، با شبیه‌سازی جریان دو فاز گاز- جامد داخل سیکلون به مطالعه اثر جریان ذرات و برخورد آن‌ها بر خوردگی دیواره‌های ایمرژن تیوب پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی جریان گاز- ذرات جامدو نتایج به دست آمده از مطالعات سایش ذرات بر روی قطعات ایمرژن تیوب نشان می‌دهد که میزان برخورد ذرات و مقدار تنش برشی در نیمه بالایی در مقایسه با نیمه پایینی آن بیشتر است. علاوه بر این، مطالعات ریزساختاری صورت گرفته توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی قسمت‌هایی از قطعات ایمرژن تیوب‌ها که به شدت دچار خوردگی شده‌اند، نشان می‌دهد که کاربید کروم در مرزخانه‌های آستنیت تشکیل شده است و ترک‌ها در امتداد مرزخانه‌های آستنیت جوانه‌زنی و رشد کرده‌اند. تشکیل کاربید کروم در مرزخانه‌های آستنیت منجر به فقیر شدن نواحی مجاور مرزخانه‌ها از کروم می‌شود و در نتیجه، خوردگی مرزخانه‌ای رخ می‌دهد. علاوه بر این، سایش ناشی از برخورد ذرات در نیمه بالایی قطعات ایمرژن تیوب منجر به تشدید خوردگی بر اساس مکانیزم خوردگی سایشی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ایمرژن تیوب، جریان ذرات، فولاد زنگ‌نزن، خوردگی مرزخانه‌ای، خوردگی سایشی.

۱. مقدمه

عوامل شامل بالا بودن دما به ویژه در سیکلون آخر، حملات شیمیایی و الکتروشیمیایی توسط عوامل خورنده موجود در محیط همانند مواد قلیایی، گازهای کلر و گوگرد و فلزات انتقالی، اعمال تنش‌های استاتیکی و دینامیکی و تاثیرات ناشی از سایش توسط ذرات ساینده در حال حرکت درون سیکلون می‌باشد [۸-۶]. بالا بودن دما به ویژه در سیکلون‌های پایینی، علاوه بر این که می‌تواند تاثیرات مخربی بر آلیاژ سازنده ایمرژن تیوب داشته باشد، موجب افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی می‌شود [۹ و ۱۰]. در چنین شرایطی، گازهای کلر و اکسید گوگرد موجب می‌شوند که اتمسفر اسیدی درون سیکلون ایجاد گردد. بنابراین، واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی مرتبط با خوردگی و اکسیداسیون شدت می‌یابد. علاوه بر این، بروز خوردگی و اکسیداسیون داغ می‌تواند تاثیرات مخرب جدی ایجاد نماید [۱۱ و ۱۲].

در ساخت قطعات ایمرژن تیوب‌ها معمولاً از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی استفاده می‌شود که به روش ریختگی تولید

به کارگیری قطعات ایمرژن تیوب درون برج‌های پیش‌گرمایش در صنعت تولید سیمان اغلب به منظور بهینه کردن تبادلات حرارتی و جریانات ذرات معلق غبار درون سیکلون‌ها است [۱ و ۲]. طراحی قابل اطمینان، هزینه پایین، انتخاب آلیاژ مناسب، نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر و همچنین ایمنی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر ساخت و تولید ایمرژن تیوب‌ها محسوب می‌شود. انتخاب آلیاژ مناسب برای ساخت قطعات ایمرژن تیوب‌ها با در نظر گرفتن شرایط دمای بالا، خوردگی، اکسیداسیون و تنش‌های مکانیکی امکان‌پذیر خواهد بود [۴-۲]. ایمرژن تیوب‌ها اغلب از قطعات متصل شده به یکدیگر از جنس فولاد زنگ‌نزن ساخته می‌شوند که در نهایت، در موقعیت مناسب خود درون سیکلون قرار می‌گیرند. باید در نظر داشت که شرایط کاری ویژه‌ای به این قطعات تحمیل می‌گردد. در چنین شرایطی، عوامل متعددی بر روی رفتار کاری قطعات ایمرژن تیوب‌ها تاثیرگذار خواهد بود [۴ و ۵]. مهم‌ترین این

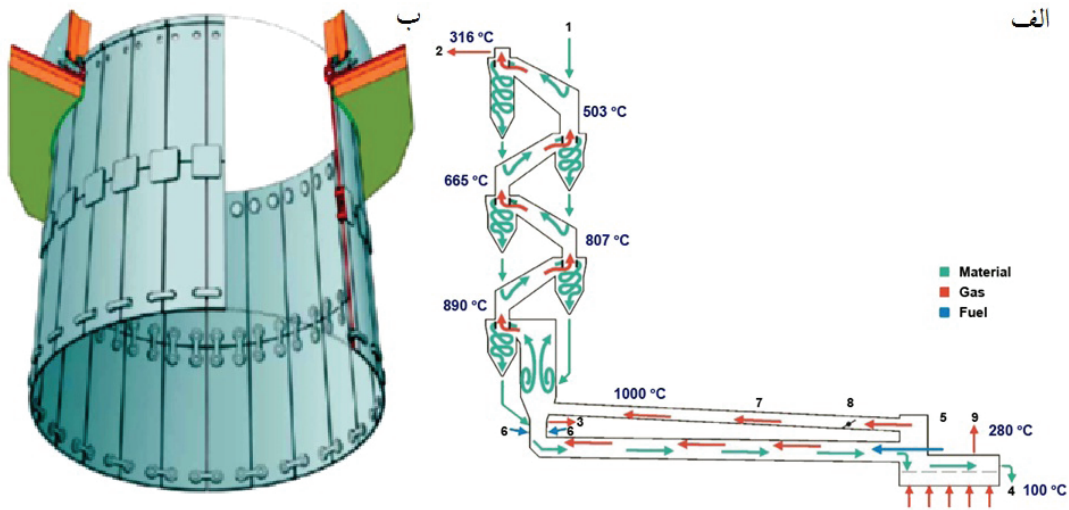
* نویسنده مسئول:

دکتر حمید سازگارن

نشانی: قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: (۹۳۵۲۶۹۳۳۴۴) ۹۸+

پست الکترونیکی: h.sazegaran@qiet.ac.ir



شکل ۱. نحوه قرار گرفتن سیکلون‌ها در یک برج سیمان و نمایش مسیر جریان‌ات گاز و ذرات درون آن (اعداد مشخص شده بیانگر بخش‌های مختلف یک برج سیمان هستند که پنج سیکلون در دماهای ۳۱۶، ۵۰۳، ۶۶۵، ۸۰۷ و ۸۹۰ °C و کوره در دمای ۱۰۰۰ °C کار می‌کند. مواد خارج شده در انتهای کوره و در بخش خروجی دارای دمای ۱۰۰ °C هستند.) (ب) تصویر شماتیک قطعات ایمرژن تیوب قرار گرفته درون سیکلون (قطعات ایمرژن تیوب در دو ردیف قرار می‌گیرند که به قسمت بالای سیکلون متصل می‌شوند).

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن به کار برده شده در ساخت قطعات ایمرژن تیوب (درصد وزنی)

کربن	سیلیسیم	گوگرد	فسفر	منگنز	نیکل	کروم	مولیبدن	مس	تیتانیوم	آلومینیوم	آهن
۰/۴۰	۱/۴۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۱/۲۳	۱۲/۳۴	۲۴/۶۵	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۲۹	باقیمانده

مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی رفتار سایش ذرات از شبیه‌سازی جریان دو فازی گاز- جامد داخل سیکلون و به منظور ارزیابی‌های ریزساختاری از مطالعات میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی استفاده شده است. قابل ذکر است که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج مرتبط با خوردگی قطعات ایمرژن تیوب در شرایط کاری دارند.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد

در شکل ۱، تصویری از نحوه قرار گرفتن سیکلون‌ها درون یک برج سیمان به همراه مسیر جریان‌ات گاز و ذرات و همچنین نمونه‌ای از یک ایمرژن تیوب که در کارخانه سیمان‌درون سیکلون قرار می‌گیرد، به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ایمرژن تیوب معمولاً از دو ردیف قطعه ساخته شده است که توسط اتصالات معینی به یکدیگر متصل می‌گردند. قابل ذکر است که قطعات ایمرژن تیوب اغلب از فولاد زنگ‌نزن ساخته می‌شوند. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در قطعات ایمرژن تیوب مطالعه شده در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، باید در نظر داشت که این قطعات به روش ریخته‌گری ماسه‌ای و به صورت صنعتی تولید

شده‌اند. باید در نظر داشت که این فولادها اغلب حساس به ترک خوردگی تنشی^۱ هستند [۱-۳]. وجود شرایط تنشی و عوامل خوردنده محیطی موجب تشکیل ترک‌های ناشی از خوردگی تنشی می‌شود [۱۳]. علاوه بر این، در صورتی که کربن موجود در فولاد زنگ‌نزن زیاد باشد، کاربیدهای کروم در مرزخانه‌ها تشکیل می‌شود و نواحی نزدیک مرزخانه فقیر از کروم می‌گردد. در چنین شرایطی، لایه محافظ اکسید کروم در نواحی نزدیک مرزخانه تشکیل نخواهد شد و امکان ایجاد خوردگی مرزخانه‌ای فراهم می‌گردد [۱۴]. نکته دیگر این است که در ایمرژن تیوب‌ها، سایش ذرات نیز موجب بروز خوردگی سایشی می‌گردد. در چنین شرایطی، اکسید محافظ تشکیل شده بر روی سطوح قطعه توسط سایش ذرات از بین می‌رود [۱۵ و ۱۶]. این لایه مجدداً به صورت خود به خود تشکیل می‌شود، اما سایش مجدد توسط ذرات آن را دوباره از بین خواهد برد. تشکیل و از بین رفتن لایه محافظ به صورت مکرر اتفاق می‌افتد و در نتیجه، محافظت از خوردگی توسط لایه محافظ به خوبی صورت نمی‌گیرد [۱۷ و ۱۸].

بنابراین، مطالعه رفتار خوردگی قطعات ایمرژن تیوب‌ها اهمیت پیدا می‌کند. در این مقاله، علل خوردگی قطعات ایمرژن تیوب درون سیکلون‌های کارخانه سیمان مورد

1. Stress Corrosion Cracking



شکل ۲. الف) نمایش محل خوردگی و سوراخ‌های اتصال قطعات به یکدیگر در یک قطعه ایمرژن تیوب و ب) نمایش یک ترک ایجاد شده در قطعه ایمرژن تیوب ناشی از عوامل تنشی و خوردگی.

شده است. همچنین جهت محاسبه مسیر ذرات از مدل فاز گسسته^۲ که بر اساس قانون دوم نیوتن، ابتدا شتاب ذره را بر حسب مجموع نیروهای وارد بر آن محاسبه می‌کند، استفاده شد و سپس با انتگرال گیری از آن، سرعت و مسیر ذره محاسبه گردید. سپس، با توجه به حجم بالای ذرات جامد در جریان ورودی، اثر فاز گسسته (ذرات جامد) بر فاز پیوسته با استفاده از انتقال مومنتوم بین دو فاز در محاسبات اعمال شد. از آنجا که مسیر ذرات داخل سیکلون وابسته به قطر و موقعیت ورودی آن‌ها نسبت به دهانه ورودی است، محاسبات برای قطر ذرات مختلف و درصد جرمی آن‌ها وارد معادلات شد. محدوده ذرات از ۵ تا ۸۵۰ میکرون است که توزیع جرمی آن‌ها بر اساس اطلاعات کارخانه، وارد شد. می‌دانیم که ایمرژن تیوب نقش مهمی در طولانی کردن مسیر ذرات و جلوگیری از خروج مستقیم ذرات از ورودی به خروجی دارد. بنابراین، ذرات با قطرهای مختلف به طور مکرر با سطوح داخلی و خارجی آن برخورد پیدا می‌کنند.

مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی تاثیرات خوردگی بر قطعات ایمرژن تیوب از مطالعات میکروسکوپ نوری (LM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. قابل ذکر است که خوردگی در این قطعات به گونه‌ای رخ می‌دهد که قطعات قرار گرفته در ردیف بالایی شدیداً دچار خوردگی می‌شوند و در برخی موارد، شکست و حتی جدا شدن کامل قطعات نیز مشاهده می‌شود. در شکل ۲، قسمت‌هایی از قطعات ایمرژن تیوب که دچار خوردگی شدید شده است، به تصویر کشیده شده است. برای مطالعه تاثیرات خوردگی بر قطعات ایمرژن تیوب، نمونه‌هایی از قسمت‌های خورده شده در قطعات ردیف بالایی به صورت مقطعی توسط وایرکات بریده شد. نمونه‌های بریده شده ابتدا مانع گرم و سپس سمباده‌زنی و پولیش کاری شدند و در نهایت، در زیر میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند.

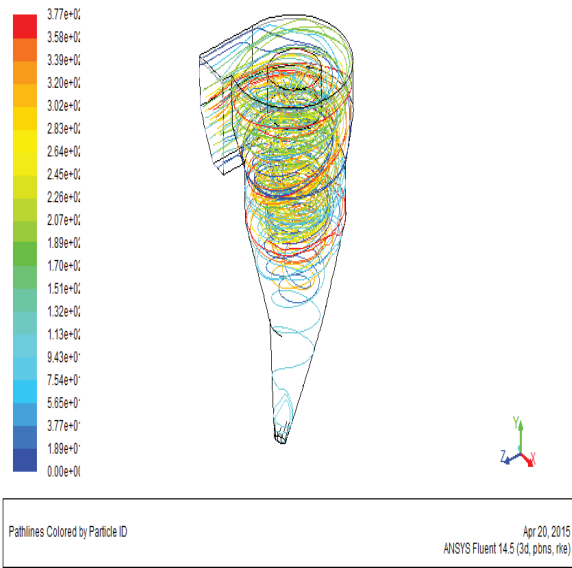
شده‌اند. قابل ذکر است که تهیه و تولید مذاب مورد استفاده توسط کوره القایی بدون هسته با فرکانس متوسط صورت گرفت و فرآیند مذاب‌ریزی در دمای 1600°C انجام شد.

فرآیند شبیه‌سازی

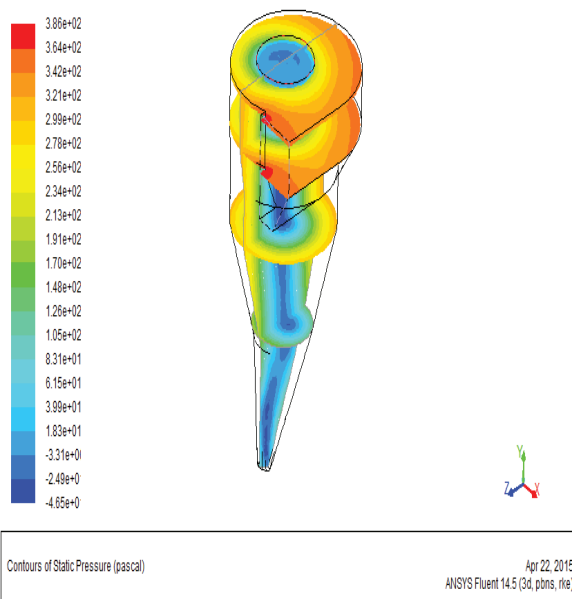
ایمرژن تیوب‌ها به منظور بهبود جریان دو فازی گاز-ذرات جامد درون سیکلون‌های صنعت سیمان به کار برده می‌شوند. در یک کارخانه تولیدکننده سیمان اغلب ۵ سیکلون وجود دارد که جریان گاز-ذرات جامد درون آن‌ها از بالا به پایین برقرار است. قابل ذکر است که در سیکلون‌های پایینی برخورد ذرات و دما افزایش می‌یابد. بنابراین، در یک برج سیمان حاوی ۵ سیکلون، بررسی شرایط اعمالی در ایمرژن تیوب‌های قرار گرفته در سیکلون‌های ۴ و ۵ از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این پژوهش، سیکلون شماره ۵ که پایین‌ترین سیکلون است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در فرآیندهای شبیه‌سازی انجام شده، دمای جریان ورودی به سیکلون شماره پنج مورد مطالعه برابر 900°C و دبی جریان برابر $672573 \text{ m}^3/\text{h}$ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که اعداد بر اساس نتایج واقعی به دست آمده از آزمون‌های تعیین جریان ورودی و دبی از سیکلون شماره ۵ استخراج شده‌اند. جرم مواد ورودی به سیکلون‌ها یا همان جرم ذرات ورودی برابر 168000 kg/h در نظر گرفته شد. بر این اساس توزیع جریان دو فازی گاز-ذرات جامد داخل سیکلون محاسبه می‌گردد. قابل ذکر است که شبیه‌سازی جریان مواد درون سیکلون توسط نرم‌افزار فلونت نسخه ۱۵ انجام شده است. در این نرم‌افزار جهت مدل‌سازی جریان آشفته گاز-جامد از روش حجم‌های محدود استفاده می‌شود.

جهت محاسبه سایش ذرات به دیواره ایمرژن تیوب و بررسی مسیر ذرات با قطرهای مختلف، ابتدا معادلات جریان آشفته داخل سیکلون (معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و توربولنسی) حل شدند [۱۹ و ۲۰]. به منظور حل معادلات جریان آشفته داخل سیکلون از مدل RNG k-e استفاده

2. Discrete phase model (DPM)



شکل ۳. جریان چرخشی گاز- ذرات جامد داخل سیکلون.



شکل ۴. توزیع فشار گاز- ذرات جامد درون سیکلون بر روی صفحات عرضی و طولی.

در شکل ۵، توزیع سرعت گاز- ذرات جامد درون سیکلون نشان داده شده است. کمترین مقادیر میزان سرعت حرکت گاز- ذرات جامد در قسمت محور سیکلون مشاهده می‌شود و این در حالی است که مقادیر سرعت بر روی دیواره‌های ایمرژن تیوب نسبتاً زیاد است. مطابق با اشکال ۳ تا ۵، مشاهده می‌شود که در قسمت‌های بالایی سیکلون نسبت به قسمت‌های پایینی آن و همچنین بر روی دیواره‌های ایمرژن تیوب شدت جریان ذرات، میزان فشار و توزیع سرعت بیشتر است. این نشان می‌دهد که ایمرژن تیوب اثر قابل قبولی بر روی تغییر جریان گاز- ذرات جامد و بهینه کردن مسیر حرکت

قابل ذکر است که به منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌های تهیه شده در محلول ایچ ماربل به مدت ۲ ثانیه ایچ شدند. نتایج به دست آمده از مطالعات میکروسکوپ نوری شامل بررسی ترک‌ها و علل جوانه‌زنی و رشد آن‌ها و همچنین بررسی ریزساختار فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده است.

علاوه بر این، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای انجام ارزیابی‌های ریزساختاری و بررسی اثرات خوردگی بر فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده در قطعات ایمرژن تیوب استفاده شد. قبل از انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی، پوشش آلیاژ Au-Pd بر روی نمونه‌های مانت شده توسط دستگاه پوشش‌دهی Sputter Coater SC7620 ایجاد شد. در این پژوهش، میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450VP مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) به منظور شناسایی فازهای گوناگون از لحاظ ترکیب شیمیایی به کار گرفته شد.

ارزیابی ریزسختی

به منظور بررسی میزان سختی فازهای گوناگون که در ریزساختار فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده در قطعات ایمرژن تیوب وجود دارد، از دستگاه ریزسختی سنچ ویکرز استفاده شد. دستگاه مورد استفاده توسط شرکت بوهرلر^۳ ساخته شده است و شماره مدل آن ۶۱۲۵-۱۶۰۰ است. زمان بارگذاری در این دستگاه برابر ۵ است و مقدار بار اعمالی ۲۵ g انتخاب شد. قابل ذکر است که از بزرگنمایی ۴۰۰ برابر دستگاه برای شناسایی و مشاهده فازهای گوناگون و همچنین تعیین ریزسختی استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

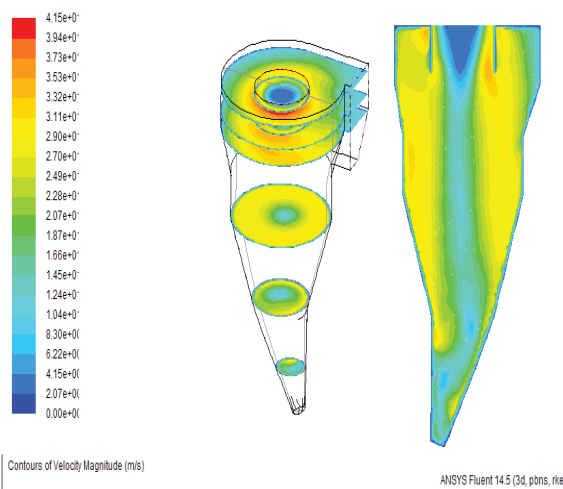
در شکل ۳، جریان چرخشی گاز- ذرات جامد داخل سیکلون نشان داده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در قسمت مخروطی پایین جریان گاز- ذرات جامد خیلی ضعیف‌تر از قسمت بالای سیکلون است. در نتیجه، نیروی درگ سیال در آن قسمت کاهش می‌یابد و بنابراین، ذرات درون جریان می‌توانند در قسمت مخروطی پایین جدا شوند. علاوه بر این، جریان چرخشی شدید گاز در قسمت بالایی سیکلون منجر به برخورد شدید ذرات درون جریان با دیواره‌های قطعات ایمرژن تیوب در این قسمت خواهد شد. در شکل ۴، توزیع فشار گاز- ذرات جامد در مقاطع مختلف درون سیکلون نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود فشار در دهانه ورودی، بیشترین مقادیر و در قسمت محور چرخش سیکلون، کمترین مقادیر را دارد. علاوه بر این، میزان فشار گاز بر روی دیواره‌های ایمرژن تیوب نیز زیاد است که موجب برخورد شدید ذرات درون جریان با دیواره‌ها خواهد شد [۲۰ و ۲۱].

3. Buehler

تیوب موجب افزایش میزان سایش در این قسمت‌ها می‌گردد. در نتیجه، این انتظار وجود دارد که سایش ایجاد شده توسط جریان گاز- ذرات جامد در قسمت بالایی ایمرژن تیوب منجر به تشدید میزان خوردگی در این قسمت‌ها شود [۲۲ و ۲۳].

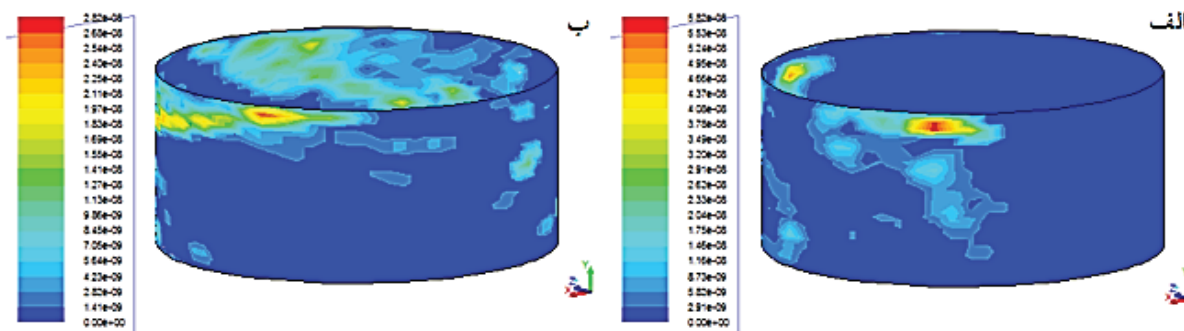
در شکل ۶، نرخ سایش ذرات روی دیواره‌های داخلی و خارجی ایمرژن تیوب نشان داده شده است. دلیل این سایش برخورد مکرر و شدید ذرات است. سطح خارجی ایمرژن تیوب به دلیل مومنتوم بالای ذرات ورودی، و عدم امکان تغییر مسیر آن‌ها به دلیل جرم زیاد، مورد حمله ذرات ورودی قرار می‌گیرد. اما، در طول سیکلون ذرات درشت در مجاورت دیواره سر خورده و از سیکلون خارج می‌شوند و ذرات بسیار ریز که توان جدا شدن از جریان را ندارند، تحت تاثیر نیروی درگ از داخل ایمرژن تیوب عبور کرده و از بالای آن خارج می‌گردند. اما این جریان در حال خروج، همچنان دوران نموده تا ذرات همراه آن تحت اثر نیروی گریز از مرکز به دیواره داخلی ایمرژن برخورد کنند و سبب سایش سطح داخل گردند.

به منظور بررسی خوردگی در قطعات ایمرژن تیوب از ارزیابی‌های میکروسکوپی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر قبل از اچ از نمونه بریده شده از قسمت بالایی ایمرژن تیوب که دچار خوردگی شدید شده است، در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان طور که

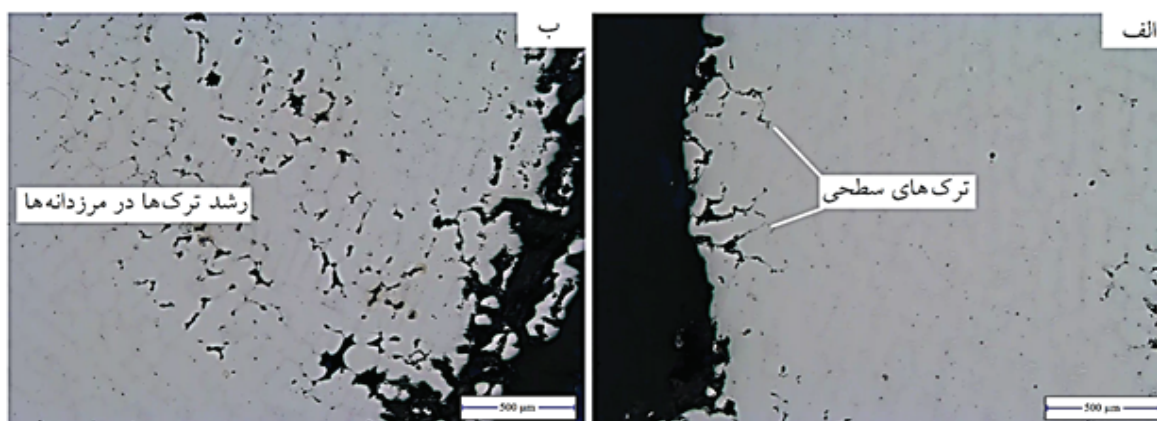


شکل ۵. توزیع سرعت گاز- ذرات جامد درون سیکلون بر روی صفحات مختلف عرضی و طولی.

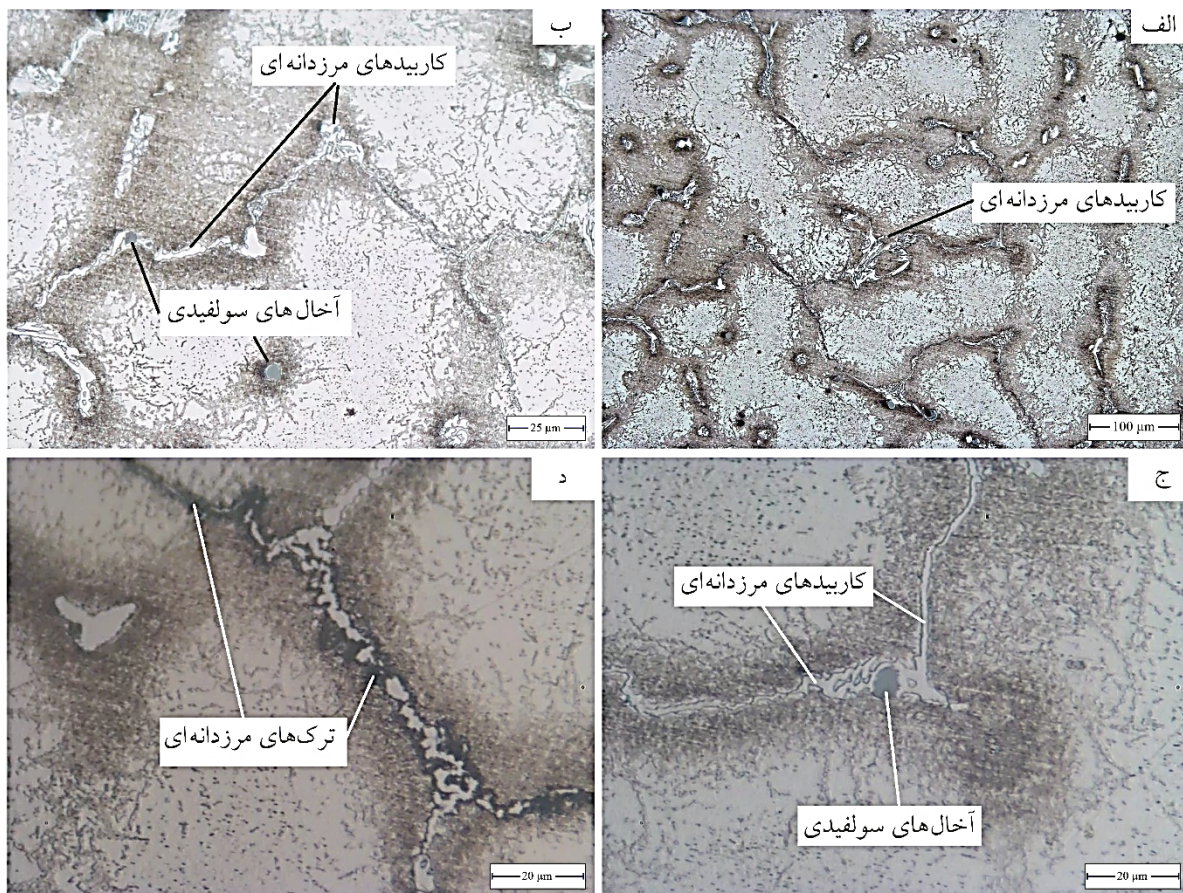
گاز- ذرات جامد دارد. از طرف دیگر، نشان داده می‌شود که شدت برخورد ذرات درون گاز با دیواره‌های ایمرژن تیوب بسیار زیاد است و در قسمت‌های بالایی شدیدتر نیز می‌باشد. بنابراین، زیاد بودن شدت برخورد ذرات درون گاز (که بسیار سخت و ساینده نیز هستند) در قسمت‌های بالایی ایمرژن



شکل ۶. نرخ سایش روی الف) سطح داخلی و ب) سطح خارجی ایمرژن تیوب ناشی از حرکت و جریان گاز- ذرات جامد.



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ نوری از الف) ترک‌های سطحی و ب) رشد ترک‌ها در مرز دانه‌ها در بزرگنمایی ۵۰ برابر قبل از اچ.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از اچ توسط ماربل الف: در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، ب: در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و ج و د) در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر.

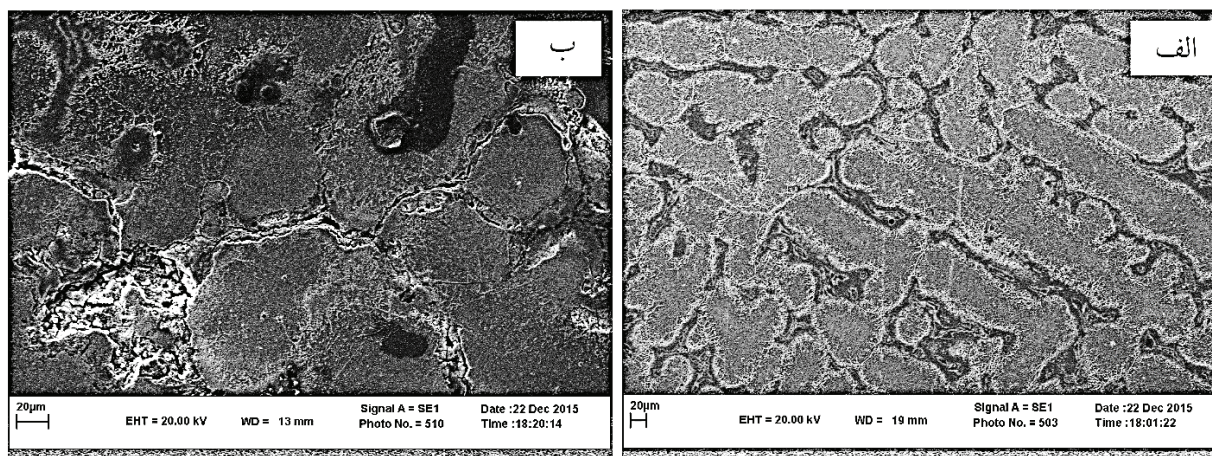
پنج اندازه‌گیری ارائه شده است. بر اساس این که سختی فاز تشکیل شده در مرزدانه‌ها منطبق با سختی کاربیدها است، احتمالاً فاز تشکیل شده در مرزدانه‌ها، کاربید کروم می‌باشد. در شکل ۸-ج، تشکیل کاربیدهای کروم در امتداد مرزدانه‌ها نمایش داده شده است. تشکیل این کاربیدها موجب می‌گردد که میزان کروم حل شده در آستنیت در اطراف مرزدانه‌ها کاهش یابد. در نتیجه، خوردگی مرزدانه‌ای رخ می‌دهد. در شکل ۸-د، یک ترک مرزدانه‌ای در امتداد مرزدانه‌ها نمایش داده شده است. تشکیل چنین ترک‌هایی در امتداد مرزدانه‌ها ممکن است به خوردگی مرزدانه‌ای یا خوردگی تنش‌ی مرتبط باشد. بدیهی است که رشد این ترک‌ها در مرزدانه‌ها موجب تضعیف ساختار فلزی و جدا شدن دانه‌ها از یکدیگر می‌شود و در نتیجه، سرعت و شدت خوردگی افزایش می‌یابد.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از آزمون ریزسختی‌سنجی ویکرز بر روی فازهای مختلف.

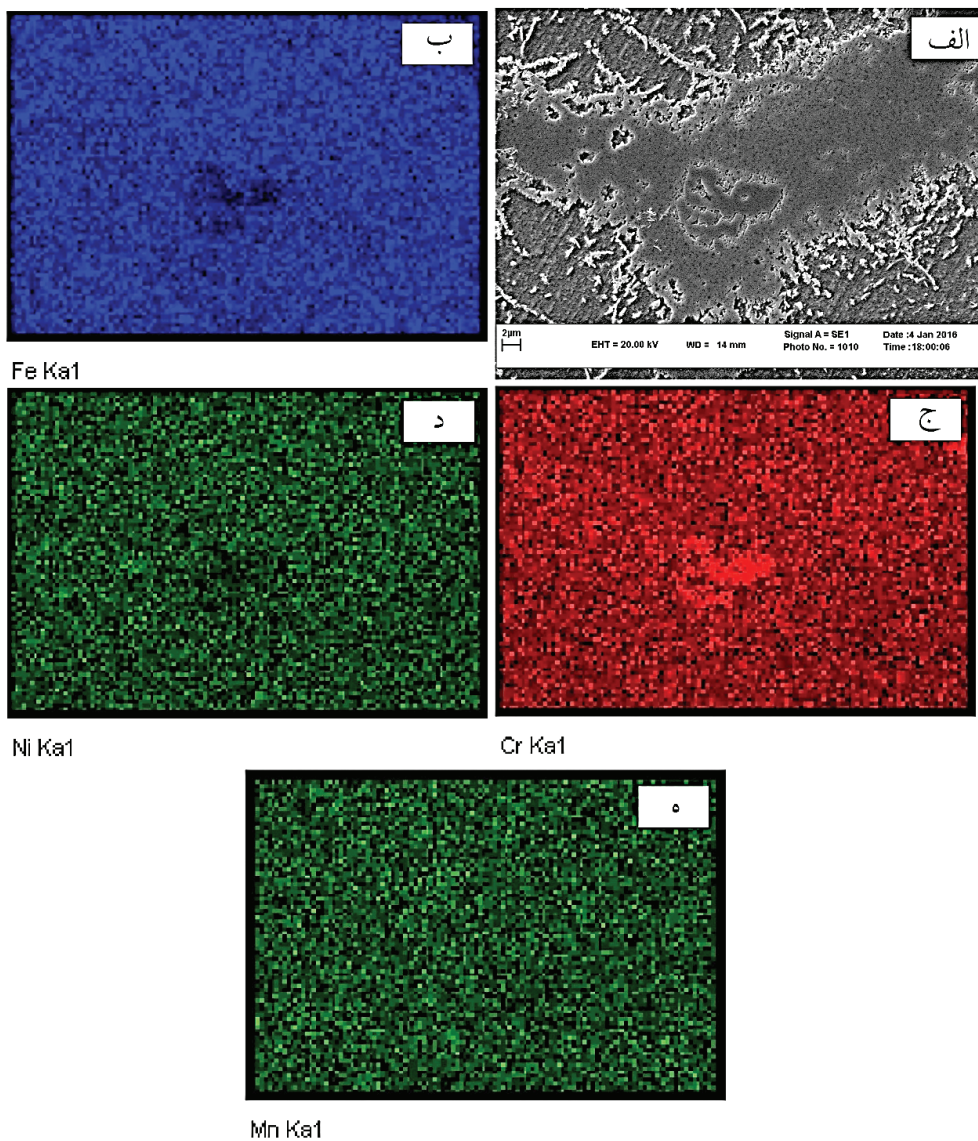
فاز	آستنیت	فاز مرزدانه‌ای
مقدار ریزسختی (HV)	۱۷۵	۸۷۰

مشاهده می‌شود، ترک‌هایی در سطوح قطعه ایمرژن تیوب و در نواحی دچار خوردگی شده به وجود آمده است. ترک‌ها از سطوح شروع شده‌اند و به داخل قطعه رشد یافته‌اند. قابل ذکر است که در برخی از قسمت‌ها، ترک‌های تشکیل شده در امتداد مرزدانه‌ها به صورت عمقی گسترش یافته‌اند. باید در نظر داشت که تشکیل این ترک‌ها و رشد آن‌ها موجب تشدید خوردگی می‌گردد. قابل ذکر است که در اثر رشد این ترک‌ها و افزایش شدت خوردگی، قطعه از این قسمت دچار شکست می‌شود.

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تشکیل ترک‌ها به همراه خوردگی در امتداد مرزدانه‌ها رخ داده است. در شکل ۸، تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برابر بعد از اچ توسط ماربل نمایش داده شده است. در این شکل، دانه‌ها و مرزدانه‌های آستنیت و آخال‌های سولفیدی مشاهده می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در مرزدانه‌ها، فاز دیگری نیز تشکیل شده است که احتمالاً کاربید کروم است. به منظور تشخیص فاز ایجاد شده در مرزدانه‌های آستنیت از ریزسختی‌سنجی ویکرز استفاده شد. در جدول ۲ نتایج به دست آمده از ریزسختی‌سنجی ویکرز بر روی دانه‌ها و فازهای مرزدانه‌ای بر اساس میانگین



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ الف) ریزساختار آستنیتی و ب) رشد ترک در امتداد مرز دانه‌های آستنیت.



شکل ۱۰. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج آنالیز EDX از عناصر ب) آهن، ج) کروم، د) نیکل و ه) منگنز.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان گاز- ذرات جامد، توزیع فشار و توزیع سرعت درون سیکلون صنایع سیمان شبیه‌سازی شده است و علاوه بر آن، مطالعات میکروسکوپی بر روی قسمت‌هایی از ایمرژن تیوب‌های قرار گرفته درون سیکلون که در معرض خوردگی شدید واقع شده‌اند، صورت گرفت و نتایج زیر به دست آمده است.

۱- نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بیان می‌کند که شدت جریان گاز- ذرات جامد، میزان فشار و توزیع سرعت در قسمت‌های بالایی سیکلون بیشتر از قسمت‌های پایینی است و در نتیجه، سایش در قسمت‌های بالایی ایمرژن تیوب‌ها تاثیر زیادی دارد.

۲- بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که ترک‌هایی در امتداد مرزخانه‌ها تشکیل شده‌اند و علاوه بر آن تشکیل کاربیدهای کروم در مرزخانه‌ها مشاهده می‌شود.

۳- تاثیرات سایش توسط ذرات جامد، تشکیل کاربیدها در مرزخانه‌ها و جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها در امتداد مرزخانه‌ها موجب تشدید خوردگی در قسمت بالایی ایمرژن تیوب می‌شود.

۴- مکانیزم‌های خوردگی فعال در قسمت بالایی ایمرژن تیوب‌ها شامل خوردگی سایشی، خوردگی مرزخانه‌ای و خوردگی تنش‌ی است.

در شکل ۹، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی‌های مختلف از نمونه‌های تهیه شده نمایش داده شده است. مطابق با شکل ۹-الف، دانه‌های و مرزخانه‌های آستنیت مشاهده می‌شود. البته، فازهای کاربیدی در مرزخانه‌ها نیز مشاهده می‌شود. در شکل ۹-ب، یک ترک مشاهده می‌شود که در امتداد مرزخانه‌های آستنیت رشد یافته است. تشکیل و رشد این گونه ترک‌ها احتمالاً به بروز پدیده خوردگی مرزخانه‌ای ارتباط پیدا می‌کند. در شکل ۱۰، یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه نتایج آنالیز اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی در مورد عناصر آهن، کروم، نیکل و منگنز ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، توزیع عناصر نیکل و منگنز به صورت یکنواخت است. اما، توزیع عناصر آهن و کروم در مرزخانه‌ها به صورت یکنواخت نمی‌باشد. علت این پدیده را می‌توان به تشکیل کاربید کروم در مرزخانه‌ها ارتباط داد. قابل ذکر است که تشکیل کاربید کروم در مرزخانه‌های آستنیت منجر به فقیر شدن نواحی اطراف مرزخانه از کروم می‌شود و در نتیجه، خوردگی مرزخانه‌ای رخ خواهد داد.

تشکیل کاربیدهای کروم در مرزخانه‌ها و وجود شرایط خوردگی تنشی در قطعات ایمرژن تیوب موجب تشدید خوردگی می‌شود. سایش ذرات نیز موجب افزایش شدت و سرعت خوردگی می‌گردد. در مجموع، همه این عوامل موثر بر رفتار خوردگی فولاد مورد استفاده است. قابل ذکر است که به منظور بهبود رفتار خوردگی ایمرژن تیوب‌ها چندین راه‌کار وجود دارد. این راه‌کارها شامل کاهش میزان کربن موجود در فولاد مورد استفاده به منظور کاهش میزان کاربیدهای مرزخانه‌ای، افزایش ضخامت ایمرژن تیوب‌ها در قسمت‌هایی که خوردگی در اثر سایش ذرات شدت می‌یابد، استفاده از پوشش‌های مقاوم به سایش و مقاوم به خوردگی در قسمت‌های بالایی قطعات ایمرژن تیوب و تغییر ماده مورد استفاده در ساخت ایمرژن تیوب‌ها (استفاده از سرامیک‌های مقاوم به سایش به جای فولادهای زنگ‌نزن) می‌باشد.

References

- [1] Coker K. Understand cyclone design. *Chem Eng Prog* 1993; 51: 214-221
- [2] Molerus O, Gluckler M. Development of a cyclone separations with new design. *Powder Technol* 1996; 86: 37-43
- [3] Gregg WW. High efficiency cyclones for powder processing applications. *Adv Filtr Sep Technol* 1995; 9: 240-248
- [4] Ray MB, Luning PE, Hoffmann A. Post Cyclone (PoC): An innovative way to reduce the emission of fines from industrial cyclones. *Ind Eng Chem Res* 1997; 36: 2766-2774
- [5] Jo Y, Tien C, Ray MB. Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones. *Powder Technol* 2000; 113: 97-108
- [6] Lim KS, Kim HS, Lee KW. Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field. *Aerosol Sci* 2004; 35: 103-116
- [7] Jiao J, Zheng Y, Sun G, Wang J. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone. *Separ Purif Technol* 2005; 35: 186-192
- [8] Stairmand CJ. Design and performance of cyclone separators. *Trans Inst Chem Eng* 1951; 29: 356-362
- [9] Koch WH. How to design more efficient cyclone. *Chem Eng* 1987; 26: 224-232
- [10] Doerschlag C, Miczek G. Cyclone Dust Collector. *Chem Eng* 1977; 35: 126-133
- [11] Davies CN. The Collection Efficiency of Cyclone. *J Air Polut Control Assoc* 1960; 42: 1246-1255
- [12] Leigh D. Handbook of Powder Science. Harvard School of Public Health. Boston. Massachusetts. 1992
- [13] Pantazopoulos G, Vazdirvanidis A, Tsinopoulos G. Failure analysis of a hard-drawn water tube leakage caused by the synergistic actions of pitting corrosion and stress-corrosion cracking. *Eng Fail Anal* 2011; 18: 649-657
- [14] Das SK, Munda P, Chowdhury SG, Das G, Singh R. Effect of microstructures on corrosion and erosion of an alloy steel gear pump. *Eng Fail Anal* 2014; 40: 89-96
- [15] Aribo S, Barker R, Hu X, Neville A. Erosion-corrosion behaviour of lean duplex stainless steels in 3.5% NaCl solution. *Wear* 2013; 302: 1602-1608
- [16] Wood RJK, Walker JC, Harvey TJ, Wang S, Rajahram SS. Influence of microstructure on the erosion and erosion-corrosion characteristics of 316 stainless steel. *Wear* 2013; 306: 254-262
- [17] Kim HJ, Jeon SH, Kim ST, Park YS. Influence of the shielding gas composition on the passive film and erosion corrosion of tube-to-tube sheet welds of hyper duplex stainless steel. *Corr Sci* 2015; 91: 140-150
- [18] Wellman RG. Methods for studying erosion-corrosion. Chapter Book. Cranfield University. UK. 2005
- [19] Wang B, Xu DL, Chu KW, Yu AB. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. *App Mathem Model* 2006; 30: 1326-1342
- [20] Safikhani H, Zamani J, Musa M. Numerical study of flow field in new design cyclone separators with one, two and three tangential inlets. *Adv Powder Technol* 2018; 29 (3): 611-622
- [21] Safikhani H, Mehrabian P. Numerical study of flow field in new cyclone separators. *Adv Powder Technol* 2016; 27 (2): 379-387
- [22] Kozolub P, Klimanek A, Bialecki RA, Adamczyk WP. Numerical simulation of a dense solid particle flow inside a cyclone separator using the hybrid Euler-Lagrange approach. *Particuology* 2017; 31: 170-180
- [23] Parvaz F, Hosseini SH, Elsayed K, Ahmadi G. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Sep Purif Technol* 2018; 201: 223-237