



Effect of Dynamic Parameters and Fluid Impurities on Abrasion of Centrifugal Compressor Impeller of the Gas Transmission Center using Experimental and Analytical Methods

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Keshavarzian H.¹ MSc,
Jabbari M.*¹ PhD,
Soheili M.¹ PhD

How to cite this article

Keshavarzian H, Jabbari M, Soheili M. Effect of Dynamic Parameters and Fluid Impurities on Abrasion of Centrifugal Compressor Impeller of the Gas Transmission Center using Experimental and Analytical Methods. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(11):2645-2651.

ABSTRACT

Abrasion in pipelines and fluid transfer equipment along with impurities in oil and gas and other industrial processes is one of the most important problems of oil, gas and petrochemical industries. Repair of this equipment is considered as one of the major challenges in industry. Wearing was created by the impact of solid particles with gas and liquid particles or by the collision of liquid droplets with the inner wall of the fluid passageway. This research aims to examine the factors affecting the rate of vane wearing including circulation speed of compressor vane, size of particles within methane, density of particles in compounds, angle of incidence and target metal stiffness. To obtain and analyze the rate of vanes' wearing, degraded pieces of vanes' substance were provided and were used as specimen according to the operational conditions, exploitation, and transfer of gas. During the experimental steps, the rate of wearing with varying conditions in solution and solid particles' compounds was measured. According to the results, the speed rate of circulation of centrifugal compressor impeller is an important parameter in increasing efficiency. To obtain this parameter, the mechanical and metallurgical properties of the compressors should have a good quality. Also, considering the relationship with a parabola form, the abrasion increases with increasing the density of particle. The results of the research were compared to the existing standards and theories and the approaches were presented to decrease degradation and wearing in centrifugal compressors' vanes.

Keywords Erosion Ratio; Compressor Impeller; Density of Particles; Size of Particles

¹Mechanical Engineering Department, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

Phone: -

Fax: -

jabbari@iaukhsh.ac.ir

Article History

Received: April 4, 2019

Accepted: May 21, 2019

ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] Engineering Tribology [2] Corrosion Inhibition of carbon steel tubes in cooling system at different sodium salts as function of solution acidity and temperature under low condition [Dissertation] [3] Particle estimation of erosion damage caused by solid particle impact; Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation [4] Erosion due to the impact of solid particles of materials resistant at high temperature [5] Solid-particle erosion in the tube end of the tube sheet of a shell-and-tube heat exchanger [6] Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels [7] The relation between the rate of erosion wear of a pitched blade impeller and its process characteristics [8] Effect of liquid and gas velocities on magnitude and location of maximum erosion in U-bend [9] On Erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades [10] Investigation of hydroabrasion in slurry pipeline elbows and T-junctions. Journal of Energy and Power Engineering [11] Numerical prediction of the erosion due to particles in elbow [12] Development of mechanistic erosion equation for solid particles [13] Erosion of surface by solid particles [14] Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production

تأثیر پارامترهای دینامیکی و ناخالصی سیال در سایش پروانه‌های کمپرسورهای گریز از مرکز انتقال گاز با روش‌های تجربی و تحلیلی

حسن کشاورزبان MSc

گروه مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران

مجید جباری* PhD

گروه مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران

مهرداد سهیلی PhD

گروه مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، ایران

چکیده

پدیده سایش در خطوط لوله و تجهیزات انتقال سیال به همراه ناخالصی‌ها در بخش‌های نفت و گاز و دیگر فرآیندهای صنعتی از مهم‌ترین مشکلاتی است که صنایع نفت، گاز و پتروشیمی با آنها روبرو هستند. تعمیر و اصلاح این تجهیزات هزینه زیادی را به خود اختصاص داده و به عنوان یکی از آسیب‌ها و چالش‌های مهم در صنایع مطرح است. سایش در اثر ضربه ذرات جامد همراه با گاز و مایع یا در اثر برخورد قطرات مایع به دیواره داخلی مجرای عبوری سیال ایجاد می‌شود. در این پژوهش عوامل تأثیرگذار بر نرخ سرعت سایش پره همانند سرعت دوران پروانه کمپرسور، اندازه ذرات داخل گاز متان، غلظت ذرات در ترکیب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای به‌دست‌آوردن و تحلیل میزان و نرخ سایش پره‌ها، قطعاتی از جنس پروانه کمپرسور تخریب‌شده تهیه و به عنوان نمونه مطابق با شرایط عملیاتی و بهره‌برداری و انتقال گاز استفاده شده است. طی مراحل مختلف آزمایش، میزان نرخ سایش با شرایط متفاوت در محلول و ترکیبات ذرات جامد اندازه‌گیری شده است. بر طبق نتایج حاصله سرعت بالای گردش کمپرسورهای گریز از مرکز پارامتری مهم در افزایش راندمان است که برای حصول این پارامتر باید خواص مکانیکی و متالورژیکی کمپرسورها دارای کیفیت مناسبی باشند. همچنین با افزایش غلظت ذرات، سایش با توجه به رابطه سهمی شکل افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده با استانداردهای موجود و تئوری‌های ارائه‌شده مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده و راهکارهایی برای کاهش تخریب در اثر سایش پره کمپرسورهای گریز از مرکز ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: نرخ سایش، پروانه کمپرسور، غلظت ذرات، اندازه ذرات

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

* نویسنده مسئول: jabbari@iaukhsh.ac.ir

برخورد ذرات، بسیار تأثیرگذار در سایش بوده و پارامترهای مهم و کلیدی برای تخمین خوردگی سایشی هستند [3].

اکوارو تأثیر سایش ذرات بر مواد مقاوم در درجه حرارت بالا را آزمایش کرد و اثر سرعت و اندازه ذرات را در نرخ سایش حاصل نمود [4]. حبیب و همکارانش سایش مدل‌های حرارتی را بررسی نمودند و توسط ریزگردها ثابت کردند که رشد سایش با سرعت ذرات ارتباط مستقیم دارد و اندازه ذرات تأثیر به‌سزایی در نرخ رشد سایش دارد [5].

در ریگوز و همکارانش سایش ابزار فولادی را با پارامترهای مختلف شامل زاویه، سرعت و اندازه ذرات ماسه مورد آزمایش قرار دادند. طبق نتایج آنها رشد سایش علاوه بر سرعت و زاویه ذرات به سختی سطح هم بستگی دارد [6]. فورت و جیروت رابطه نرخ سایش فرسایشی حاصل از گردش پره در سیال، جامد و مایع را مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. آنها ثابت نمودند رشد سایش پره در سیالی که ذرات جامد داخل آن وجود دارد می‌تواند بیشتر گردد [7].

مازندر تأثیر پارامتر دینامیکی سرعت جریان سیالات مایع و گاز در افزایش سایش در خم‌های ل‌شکل را بررسی کرد و دریافت که بیشترین تخریب و سایش در انحناها و خم‌ها اتفاق می‌افتد [8].

کی‌گان و همکاران تأثیر عوامل طبیعی مانند جریان گرد و غبار و باران را بر سایش لبه پیشرو پره‌های توربین بادی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که گرد و غبار و باران سنگین باعث شدت سایش و تخریب بیشتر در پره‌ها می‌شود [9].

عظیمیان و بارت سایش جریان مایع حاوی ذرات شن در زانوبی‌ها و سه‌راهی‌ها را به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشات این دو محقق تطابق مناسبی با مدل‌های دانشگاه تولسا دارد [10]. پریرا و همکاران تحلیل عددی سایش در اثر برخورد ذرات سیال به زانو‌ها را انجام دادند و ثابت نمودند بیشترین رشد سایش در شعاع خارجی زانو‌ها و خم‌ها ایجاد می‌شود [11]. عرب‌نژاد و همکاران رابطه سختی فلز و زاویه برخورد را با سایش بررسی نمودند. در تحقیق آنها ارائه گردید که در اغلب موارد سختی بیشتر مواد موجب سایش کمتر آن ماده می‌شود [12].

در این تحقیق به بررسی پدیده سایش ایجادشده توسط سیال گازی چند فازی بر پره‌های کمپرسورهای گریز از مرکز زمینس خطوط لوله انتقال سراسری ایستگاه تقویت فشار گاز پتاوه (یاسوج) پرداخته شده است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، نوآوری‌های این تحقیق در بخش نوع ترکیب سیال و ناخالصی‌ها و تأثیر آنها بر سرعت سایش خواهد بود. سیال مورد بررسی متشکل از گاز متان فاز گاز و آب فاز مایع است. ناخالصی‌ها از نوع پودر سیاه شامل انواع ترکیبات ذرات شن و خاک، اکسید آهن، اکسید منگنز، کوارتز یا اکسید سیلیکون و سولفید آهن، فاز جامد را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش پارامتر دینامیکی همانند سرعت دوران پروانه کمپرسور، اندازه ذرات داخل گاز متان و غلظت ذرات در ترکیب‌ها بر نرخ سرعت سایش پره مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تئوری

مطالعات تئوری و آزمایشگاهی متعددی روی مسئله سایش توسط محققین مختلف صورت گرفته است. اساس پدیده سایش را فینی و بورگین با رابطه ۱ ارائه کردند [13, 14]. طبق این رابطه مقدار کار و انرژی مورد نیاز برای برداشتن یا کنده‌شدن مواد از سطح یک فلز با مقدار انرژی جنبشی منتقل‌شده به فلز توسط ذرات برخوردکننده برابر است.

۱- مقدمه

سایش به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در فرآیند تولید و انتقال نفت و گاز به شمار می‌آید. سایش در کمپرسورها، زانوبی‌ها، واحدهای مته‌زنی و دیگر تجهیزات می‌تواند اتفاق بیفتد. این پدیده اغلب زیان‌آور است و منجر به افزایش لقی بین قطعات متحرک، کاهش دقت ابعادی، ارتعاش و تخریب می‌شود. بسیاری از خرابی‌های خطرناک مربوط به پروانه کمپرسورهای گریز از مرکز، زانوبی‌ها، لوله‌ها، ابزارهای سنجش و کنترل در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز خطوط لوله، واحدهای حفاری و دیگر تاسیسات زیردریایی در دهه‌های اخیر در نتیجه سایش بوده است. این مشکلات و خرابی‌ها باعث مشکلات زیست‌محیطی و مسائل ایمنی و هزینه تعویض بخش‌های فرسوده می‌شود.

استجویک و بچلر کتابی به نام تریبولوژی مهندسی منتشر کردند که نقش سرعت، زاویه برخورد و اندازه ذرات در میزان سایش را نشان دادند [1]. *الربابی* اثرات متقابل فرسایش و سایش بر یکدیگر را بررسی نمود و نشان داد که سایش باعث فرسایش و برعکس فرسایش نیز موجب سایش می‌شود [2].

اوکا و همکاران نشان دادند که میزان سایش، متأثر از فشردگی و ضربات ریزگردها است. همچنین ثابت نمودند که سرعت و زاویه

If $\alpha < \alpha_c$

$$V_c = \frac{2M_p c (\omega_p \sin \alpha - k_2)^2 \left(\omega_p \cos \alpha - \frac{c(\omega_p \sin \alpha - k_2)^2 \phi}{\sqrt{\omega_p \sin \alpha}} \right)}{\sqrt{\omega_p \sin \alpha}}$$

$$k_1 = 0.82 S_{yt}^2 (S_{yt} / \rho_p)^{0.25} \bar{E}^2 (\text{m/s})^{0.5}$$

$$k_2 = 1.55 S_{yt}^5 (S_{yt} / \rho_p)^{0.5} \bar{E}^2 (\text{m/s})$$

$$\bar{E} = (1 - \nu_t^2) / E_t - (1 - \nu_p^2) / E_p (\text{m}^2 / \text{N})$$

$$c = 0.288 (\rho_p / S_{yt})^{0.25} / S_{yt} (\text{s} / \text{m}^3)^{1/2} / \text{N}$$

M_p جرم ذرات، ϕ انرژی مورد نیاز برای حذف ذرات بریده شده در واحد حجم، Ω انرژی مورد نیاز برای حذف ذرات در حالت تغییر شکل پلاستیک و S_{yt} استحکام تسلیم صفحه هدف سایش است. وقتی ذرات با سرعت بالا به سطح یک فلز برخورد کنند باعث از بین رفتن سطح فلز شده و نرخ این سایش به عوامل مختلفی مثل نرمی و سختی فلز بستگی دارد. مکانیزم سایش برای فلزات یا مواد نرم با مواد سخت تفاوت دارد. مواد نرم در ابتدا به آرامی خراشیده شده و این خراشیدگی در مدت زمان زیاد به ساییدگی منجر می شود. اما وقتی ذرات شن به مواد سخت و شکننده برخورد کنند در لحظه برخورد مولکول‌های سطح را جدا کرده و با خود می‌برند.

۳- نمونه مورد آزمایش و تحلیل

در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، ایمپلر روی محور اصلی کمپرسور با سرعت زیاد در حال دوران است. سیال ورودی مانند گاز حاوی ذرات ساینده پودر سیاه، رطوبت و هیدروکربن‌ها وارد ایمپلر شده و پس از تغییر فشار از سوی دیگر خارج می‌شود. بنابراین در شرایط عملی آلباژ ایمپلر با سرعت حداکثر ۷۵۰۰rpm درون گاز درحال دوران بوده و ذرات به آن برخورد می‌کنند. شرایط کاری و عملیاتی مطابق وضعیت میدانی جهت انجام آزمایش شبیه‌سازی می‌شود. تجهیزات آزمایش مورد نیاز در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه دیسک چرخشی تا سرعت ۱۰۰۰۰rpm چرخش می‌کند و شامل سیستم تنظیم سرعت گردش و محفظه نگهداری سیال آزمایش مطابق شکل ۱ است. در این دستگاه نمونه‌ها مطابق شکل درون محفظه حاوی سیال آزمایش قرار گرفته و امکان گردش با سرعت ۱ تا ۱۰۰۰۰rpm وجود دارد. سرعت گردش با سیستم تنظیم دور انجام می‌شود و نمونه مورد آزمایش درون محلول همراه با ذرات آزمایش به چرخش در می‌آید.

قطعاتی به ابعاد تقریبی ۶۰mm در ۱۵mm از ایمپلر تخریب شده مطابق شکل ۲ تهیه و سطح نمونه‌ها کاملاً سنباده‌زنی شده تا سطحی نسبتاً صاف به دست آید و اثرات آزمایش سایش روی قطعات قابل تشخیص باشد



شکل ۱) تجهیزات آزمایش سایش با محفظه نگهدارنده سیال و نمونه با قابلیت اعمال دوره‌های متفاوت

$$\left(\frac{dh}{dt} \cdot A_{\text{impact}} \right) P = \left(\frac{Q_p \rho_p V_p^2}{2} \right) f(\theta) \quad (1)$$

$\frac{dh}{dt} \cdot A_{\text{impact}}$ نرخ حجمی کاهش ضخامت دیواره فلز، P تنش سیال روی فلز، V_p سرعت برخورد ذرات، $Q_p \rho_p$ دبی جرمی ذرات برخوردکننده و $f(\theta)$ تابع زاویه برخورد ذرات هستند.

مدل‌های مختلفی برای اندازه‌گیری سایش پیشنهاد شده است که مدل فینی برای سایش با رابطه ۲ ارائه می‌شود [13].

$$ER = A \cdot V_p^n F(\alpha) \quad (2)$$

ER نرخ سایش شن که به صورت جرم زدوده شده مواد به جرم ماده ساینده بیان می‌شود، A مقدار ثابتی است که به جنس ماده که ساینده شده بستگی دارد، α زاویه برخورد دانه‌های شن، $F(\alpha)$ تابع زاویه برخورد که به نوع ماده بستگی داشته و بین صفر و ۹۰ قرار دارد و n اندیس وابستگی ماده و بین ۲ تا ۴ است.

ER مدلی برای سیستم‌های گاز-مایع-جامد را ارائه داد و معادله جدیدی برای جریان سه‌فازی با رابطه ۳ را پیشنهاد نمود [14]. در این مدل که با نتایج چاه‌آزمایی هماهنگی بسیار خوبی دارد ابتدا براساس روابط ساده تک‌فازی برای جریان گاز در فشارهای پایین نتایج حاصل گردید و سپس رابطه‌ای برای میزان سایش ارائه شد. برخلاف مدل‌های قبل، توان سرعت در این رابطه از درجه دو است.

$$E_p = \frac{V_m^2 \cdot d}{S_p \cdot D^2 \cdot \rho_m} \quad (3)$$

E_p نرخ سایش بر حسب میلی‌متر بر کیلوگرم، D قطر لوله بر حسب میلی‌متر، d قطر ذرات بر حسب میکرون، S_p یک ثابت هندسی، V_m سرعت مخلوط بر حسب متر بر ثانیه و ρ_m دانسیته مخلوط هستند.

طبق مدل بیتر نرخ سایش (V حجم مواد ساینده شده بر ذرات) برای مواد ترد و شکننده به متغیرهای مختلفی مطابق رابطه ۴ بستگی دارد [4].

$$V \approx \omega_p^{e_1} R_p^{e_2} \rho_p^{e_3} k_{It}^{e_4} H_t^{e_5} E^{e_6} \quad (4)$$

ω_p سرعت برخورد ذرات، R_p شعاع ذرات، ρ_p دانسیته ذرات، K_{It} چقرمگی و H_t سختی فلز هدف هستند. در این رابطه توان e_i را می‌توان اعداد مختلفی قرار داد که بستگی به شیوه آزمایش و تئوری‌های متفاوت دارد.

در مدل بیتر حجم و نرخ سایش مواد ترد و نرم شامل تغییر شکل پلاستیک V_D و برش V_C است. در مدل بیتر ملاحظه می‌شود که میزان سایش مواد بستگی به زاویه برخورد و سختی مواد و دیگر پارامترهای سطح و ذرات دارد. زاویه برخورد به سطح از صفر تا ۹۰ درجه و زاویه بحرانی برخورد ۲۰ درجه است. بنابراین روابط حاکم بر سایش مواد نرم در حالت تغییر شکل پلاستیک مطابق رابطه ۵ است [4].

$$V_D = \frac{1}{2} M_p (\omega_p \sin \alpha - k_2)^2 / \Omega \quad (5)$$

روابط حاکم بر سایش برشی مواد نرم با توجه به زاویه برخورد با روابط ۶ و ۷ ارائه می‌شوند [4].

If $\alpha \geq \alpha_c$

$$V_C = \frac{1}{2} M_p \left((\omega_p \cos \alpha)^2 - k_1 (\omega_p \sin \alpha - k_2)^{3/2} \right) / \phi \quad (6)$$

نمونه در حال چرخش باعث سایش شده و سپس وزن نمونه و تغییرات وزن در اثر سایش هر ۲ ساعت یک بار ثبت می‌شود.

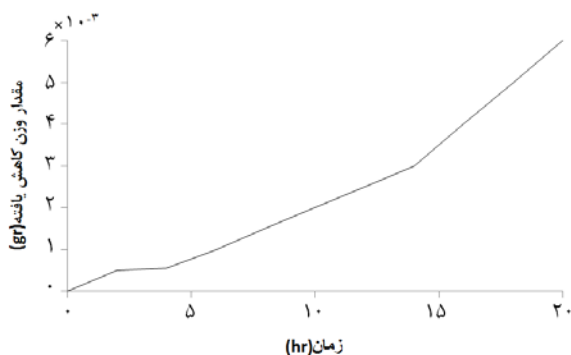
۴- بررسی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

در این آزمایش‌ها پارامترهای سرعت جریان برخورد، سختی فلز هدف، سایز و غلظت ذرات مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. شرایط مورد بررسی آزمایش سایش نمونه پره در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱) حالات مورد بررسی آزمایش سایش نمونه پره با ترکیبات مواد مختلف

حالت	محلول آزمایش	سرعت (rpm)
۱	الکل + پودر سیاه	۴۵۰۰
۲	الکل + پودر سیاه + ذرات اکسید آهن	۵۵۰۰
۳	الکل + ذرات اکسید آهن + آب	۶۵۰۰

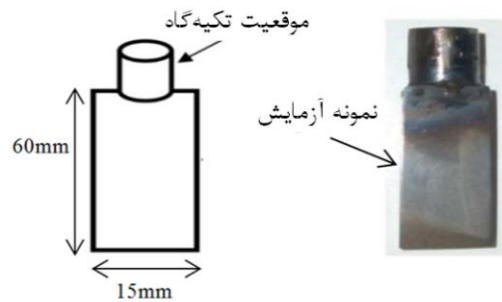
نمودار ۱، تغییرات وزن نمونه را در زمان آزمایش نشان می‌دهد. به دلیل سرعت و نیز غلظت پایین و اندازه ذرات ریز به دست آمده از مش بندی پودر سیاه، میزان سایش در مدت آزمایش ناچیز بود. نمونه هر ۲ ساعت یک بار تمیزکاری و پس از شست‌وشو با استون وزن شده، حداکثر کاهش وزن نمونه پس از ۲۰ ساعت در حدود 0.06 gr حاصل گردیده است. شکل ۳ تصویر این نمونه پس از ۲۰ ساعت گردش در محلول با سایش ناچیز لبه‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین اثرات سایش در دو طرف نمونه رخ داده است که اولین محل برخورد نمونه با سیال گردش عمودی در جهت گردش عقربه‌های ساعت است. بنابراین اثرات سایش بیشتر در این نقاط و لبه‌ها مشاهده می‌شود. برای شرایط حضور پودر سیاه با دانه بندی مجاز و نیز سرعت گردش حداکثر 4500 rpm به نظر می‌رسد میزان سایش قطعه بسیار کم و کارکرد در این شرایط قابل قبول است.



نمودار ۱) دیگرام تغییر وزن نمونه با زمان در محلول الکل و پودر سیاه در دور 4500 rpm



شکل ۳) سطح نمونه قبل و بعد از آزمایش در محلول حاوی پودر سیاه و الکل در 4500 rpm



شکل ۲) نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش سایش

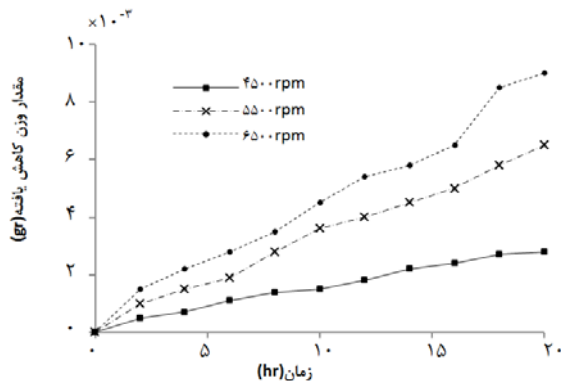
قبل از شروع آزمایش نمونه‌ها کاملاً با استون شست‌وشو و با ترازویی با دقت ۴ رقم اعشار وزن شده است. درون محفظه چرخشی می‌توان انواع محلول‌ها برای شبیه‌سازی محیط عملی شامل انواع الکل، آب، پودر سیاه، ذرات ساینده و ترکیبات هیدروکربنی را با غلظت دلخواه قرار داد. لذا به منظور دقت در آزمایش و کاهش خطای اندازه‌گیری سایش، نمونه‌های ساخته شده در ۴ محلول آب مقطر، آب حاوی مولبیدات به عنوان ممانعت‌کننده خوردگی، اتیلن گلیکول و الکل سفید مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه‌ها در آب مقطر و آب حاوی مولبیدات به شدت دچار خوردگی شده و تغییر رنگ در محلول اتیلن گلیکول مشاهده گردید. اما نمونه در الکل سفید پس از چند روز بدون خوردگی و تغییر رنگ باقی ماند. بنابراین الکل سفید به عنوان محلول بی‌اثر در آزمایش سایش به کار رفته است.

ترکیب شیمیایی، آنالیز عنصری و فازی پودر سیاه به دست آمده از خطوط لوله انتقال گاز از مهم‌ترین بخش‌هایی است که تا حد زیادی می‌تواند تعیین‌کننده منشأ پودر در خط لوله گاز باشد. به منظور شناسایی عناصر و فازهای موجود در پودر سیاه جمع‌آوری شده از خطوط لوله انتقال گاز، آنالیز عنصری با روش EDX و XRF مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز عنصری پودر و ذرات درون گاز به دست آمده شامل انواع اکسید آهن، اکسید منگنز، کوارتز یا اکسید سیلیکون، اکسید آهن هیدراته و سولفید آهن هستند.

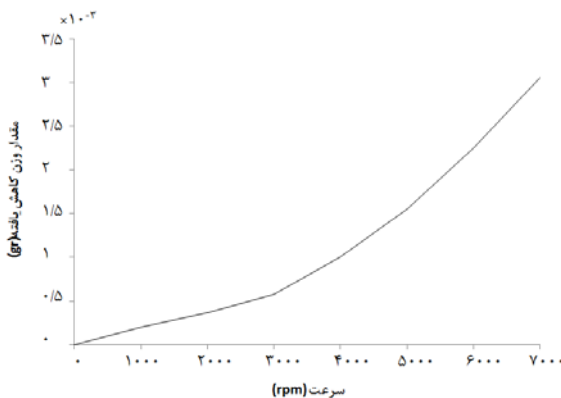
در پودر سیاه داخل خطوط لوله گاز مقادیر قابل توجهی آب وجود داشت و آب موجود در گاز می‌تواند عامل اصلی خوردگی دیواره‌های داخلی خطوط لوله و فعالیت میکروارگانیسم‌ها شود. بخش عمده ترکیبات شامل آهن، گوگرد، سیلیسیم و کلسیم است. علت اصلی وجود آهن در پودر سیاه به دلیل حضور انواع اکسیدهای آهن ناشی از خوردگی دیواره خط لوله و سیلیسیم معمولاً ناشی از شن و ماسه خروجی از چاه هستند.

روش‌های تجربی مختلفی برای انجام آزمایش سایش وجود دارد که به صورت استانداردهای مختلفی ارائه شده است. از آنجا که تنها قطعه قابل قبول برای تهیه نمونه، یک ایمپلر تخریب شده ساخت شرکت زیمنس بود، تهیه نمونه به منظور انجام آزمایش سایش به صورت قطعات بزرگ میسر نبود. همچنین شکل ایمپلر دارای پیچیدگی‌های خاص خود است که تهیه نمونه تخت از آن بدون انجام فرآیندهای مکانیکی مانند پرس که خود باعث تغییر سختی و ساختار می‌شود امکان‌پذیر نیست. نمونه ساخته شده مطابق شکل ۱ درون محفظه دستگاه حاوی سیال آزمایش قرار می‌گیرد و امکان گردش نمونه با سرعت ۱ تا 10000 rpm فراهم می‌شود. دور دستگاه با سیستم تنظیم دور انجام می‌گیرد. ذرات و محلول با برخورد به

محلول حاوی پودر سیاه و اتیل الکل در نمودار ۴ ارائه شده است. طبق تئوری فینی با افزایش سرعت ذرات سیال، مقدار سایش افزایش یافته و نمودار حالت سهمی‌گون است و این افزایش سایش در سرعت‌های بالاتر تاثیر بیشتری دارد. مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی برای گردش ۵ ساعت محلول حاوی اکسید آهن، پودر سیاه و اتیل الکل در سرعت‌های ۴۵۰۰rpm، ۵۵۰۰rpm و ۶۵۰۰rpm در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصله مقدار خطا با افزایش سرعت کاهش می‌یابد و این نتیجه بیانگر افزایش دقت محاسبات تحلیلی با افزایش سرعت سیال است.



نمودار ۳) مقایسه تغییرات وزن نمونه‌ها در سرعت‌های گردش مختلف در محلول حاوی اکسید آهن، پودر سیاه و الکل



نمودار ۴) میزان تغییرات تحلیلی افزایش سایش در اثر سرعت طبق رابطه فینی

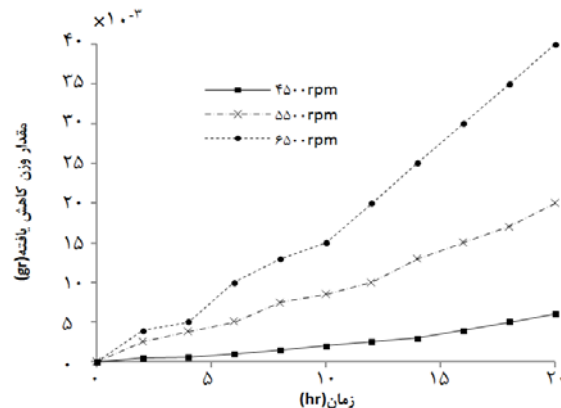
جدول ۲) مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی برای گردش ۵ ساعت محلول حاوی اکسید آهن، پودر سیاه و اتیل الکل

سرعت (rpm)	میزان سایش با روش تحلیلی (gF)	میزان سایش با روش تجربی (gF)	درصد خطا
۴۵۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۹	۲۵
۵۵۰۰	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۷	۱۰
۶۵۰۰	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۵	۴

طبق نتایج حاصله پودر سیاه موجود در خطوط لوله شامل بخش عمده اکسید و سولفید آهن به همراه ذرات کوارتز (خاک) است. در سیستم فیلتراسیون مستقر در ایستگاه‌های تقویت فشار طبق استاندارد API و طراحی انجام شده باید ذرات بزرگتر از ۵μm جدا شده و ذرات کوچکتر از فیلتر عبور کند.

تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر سیاه به دست آمده از ایستگاه تقویت فشار پتاوله در شکل ۴ نشان داده شده است. ذرات ریز و درشت با دانه‌بندی متفاوت و توزیع نامگن در پودر مورد بررسی

در شکل ۳ سطح ظاهری نمونه نیز نشان‌دهنده تخریب و سایش شدیدتر در لبه‌های قطعه به ویژه در کناره‌های برخورد به ذرات ساییده است. این مسأله برای شرایط کمپرسورهای نیوویپینگان و زیمنس بسیار مهم است. مقایسه تغییرات وزن در سرعت‌های مختلف گردش در نمودار ۲ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت گردش، میزان نرخ سایش تا ۸ برابر افزایش یافته است. حداکثر دور کمپرسورهای نیوویپینگان در حدود ۴۵۰۰rpm بوده و این مقدار برای کمپرسورهای زیمنس تا ۷۵۰۰rpm می‌رسد. بدیهی است که چنین سرعت بالایی علاوه بر ملاحظات طراحی‌های مکانیکی، نیاز به ساخت قطعاتی با استحکام متالورژیکی بسیار بالاتر دارد.



نمودار ۲) مقایسه تغییرات وزن نمونه در محلول حاوی پودر سیاه و اتیل الکل در سرعت‌های ۴۵۰۰rpm، ۵۵۰۰rpm و ۶۵۰۰rpm

بحث‌های تئوری در بخش پودر سیاه و نیز آنالیز پودر سیاه به دست آمده از سیستم فیلتراسیون شبکه گاز نشان می‌دهد که این پودر حاوی مقادیر عمده‌ای از اکسید آهن بوده است. ذرات اکسید آهن ناشی از سایش و خوردگی جداره‌های خط لوله به عنوان ذرات ساییده در پودر سیاه قرار گرفته است و به دلیل سختی بالای خود نسبت به آهن خط لوله، در هر اندازه که باشد به عنوان ساییده عمل می‌کند. وجود ذرات اکسید آهن ریز عبوری از سیستم فیلتراسیون، خود عامل سایش پره کمپرسور است. حضور رطوبت و هیدروکربن‌ها آنها را به صورت ذرات بزرگتر همراه با سایر مواد درآورده و اثرات سایش و ضربه بر سطح را تشدید کرده است. عدم فیلتراسیون به دلایل مختلف و به ویژه باز شدن فیلترها حتی برای چند ثانیه می‌تواند باعث ورود ذرات بزرگ به داخل سیستم گردش کمپرسور شده و اثرات ضربه و سایش بسیار شدیدتر را پدید آورد.

در نمودار ۳ مقایسه تغییرات وزن ۳ نمونه در محلول الکل سفید، پودر سیاه و اکسید آهن ارائه گردیده است. طبق این نمودار ملاحظه می‌شود که تغییرات وزن برای نمونه مقادیر ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱گرم به ترتیب برای سرعت‌های گردش ۴۵۰۰rpm، ۵۵۰۰rpm و ۶۵۰۰rpm هستند. مقایسه این مقادیر با حالت قبل که فاقد اکسید آهن به عنوان ذرات ساییده است، اثرات حضور این فاز را به خوبی مشخص می‌کند.

سرعت برخورد ذرات، فاکتور مهمی در تعیین سرعت سایش است که برای مواد ترد و نرم سرعت آستانه‌ای تعریف می‌شود. با سرعتی کمتر از سرعت آستانه‌ای هیچ آسیب سایشی مشاهده نمی‌شود. مقدار ضربه با جرم، شعاع دوران و سرعت زاویه‌ای رابطه مستقیم دارد. به علت تفاوت سرعت گردش ایمپلر از ۴۵۰۰rpm در کمپرسور نیوویپینگان به ۷۵۰۰rpm در زیمنس میزان سایش افزایش داشته است. محاسبات تحلیلی با توجه به رابطه ۲ برای گردش ۵ ساعت در

این آزمایش برای نمونه‌ای به ضخامت ۲mm نیز انجام شد که برخورد ذرات درشت با سرعت ۶۵۰۰rpm باعث تغییر شکل لبه‌ها و ایجاد خم در این نواحی شد. نتایج حاصله، سایش در لبه پره‌های ایمپلر کمپرسور را ارائه کرد.

تخریب‌های این بخش بسیار شدیدتر از انتظار بوده و به خوبی اثر حضور ذرات درشت را نشان می‌دهد. باید در نظر داشت که طبق روابط قبل، اندازه ضربه متناسب با جرم جسم برخوردکننده و سرعت ذرات است. با توجه به اینکه سرعت جسم در کمپرسورهای زیمنس بسیار بیشتر از انواع دیگر است، بنابراین باعث ایجاد خسارات جدی به سطح در حالت حضور ذرات درشت در سیستم شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بررسی پدیده سایش در پره کمپرسورهای گریز از مرکز انتقال گاز خطوط لوله پرداخته شد و از مجموع بررسی‌های تئوری و انجام آزمایش‌های مختلف روش‌هایی جهت افزایش مقاومت سایش حاصل گردید.

نتیجه حاصله نشان می‌دهد که سرعت بالای گردش کمپرسورهای گریز از مرکز انتقال گاز به عنوان یک عامل تکنولوژیک مهم در افزایش راندمان است و باید دقت شود که این سرعت بالا، نیازمند کیفیت بالاتر خواص مکانیکی و متالورژیکی در کمپرسور است. طبق روابط بیان شده افزایش سرعت باعث افزایش ضربه و سایش خواهد شد.

سایش طبق یک رابطه تقریباً سهمی با افزایش غلظت ذرات، افزایش می‌یابد. در غلظت‌های خیلی بالا که جای حلال و حل‌شونده جابه‌جا می‌شود افزایش غلظت ذرات تاثیر معکوسی خواهد داشت. اما در صنایع نفت و گاز، محدوده غلظت ذرات همراه با مواد هیدروکربنی از ۱ تا ۲ درصد وزنی تجاوز نمی‌کند. طبق استاندارد API617، گاز باید فاقد هرگونه رطوبت و ذرات جامد بزرگتر از حد مجاز باشد که با توجه به اثرات موجود بر سطح قطعات کمپرسور در ورودی‌ها و خروجی‌های آن، به طور مطمئن ذرات با اندازه بزرگتر از حدود مجاز وارد سیستم شده و در سیال گاز وجود دارند. بنابراین نصب یک استرینر به منظور جلوگیری از ورود ذرات و قطعات بزرگ به داخل کمپرسور گاز انجام گردید.

پودر سیاه به عنوان عامل بسیار مهم در سایش و تخریب قطعات در سیستم انتقال گاز به مقدار بسیار زیاد وجود داشته و باعث گرفتگی و بسته شدن فیلترها بسیار زودتر از موعد مقرر می‌شود. با تعویض فیلترها که با کوچکترین تاخیر در اجرای آن باعث ترکیدن فیلتر و کنده شدن درپوش‌های بالایی یا پایینی می‌شود گاز هر چند برای مدت کمی بدون فیلتر حداقل در چند بخش وارد کمپرسور خواهد شد. در این حالت تمامی مباحث گفته شده در مورد ضربه و اثر اندازه و سرعت برای این ذرات ورودی صادق بوده و می‌توانند با سرعت و شدت برخورد خود تخریب‌های بسیار زیادتر از انتظاری را ایجاد کنند. این تخریب‌ها علاوه بر مسیر انتقال و کمپرسورها در مناطق مصرف بر توربین‌های گازی نیز موثر بوده و می‌توانند منجر به سایش و تخریب پوشش و شکست شوند. بنابراین به منظور جلوگیری از سایش زود هنگام ایمپلر، افزایش سطح تمیزی گاز و اندازه فیلترها موثر هستند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

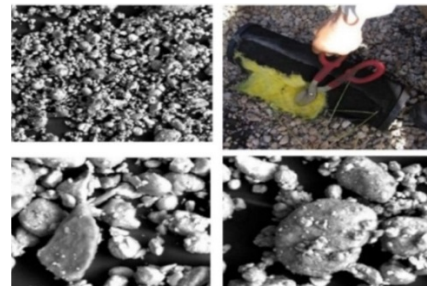
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

مشاهده می‌شود. شکل و اندازه ذرات در تصویر مشخص است و ملاحظه می‌شود که ذرات با اندازه‌های بسیار بزرگتر از $5\mu\text{m}$ و کوچکتر از $50\mu\text{m}$ وجود داشته و اغلب در اثر سایش دارای گوشه‌های نیمه‌گرد و برخی دارای گوشه‌های تیز شده‌اند. ذرات با گوشه‌های تیز باعث سایش شدید بخش‌های دیگر می‌شوند.

بخشی از ایمپلرهای تخریب شده موجود در ایستگاه تقویت فشار گاز پتاوه در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق شکل اثرات ضربه و کنده شدن بخش‌های از پره تا حدود 20mm به وضوح روی سطح وجود دارد. این امر قطعاً نمی‌تواند ناشی از حضور ذرات ساییده ریز باشد و قطعات بزرگتر عامل آن بوده است. به غیر از ایمپلر، در مدخل ورودی گاز به کمپرسور مطابق شکل ۵ نیز اثرات کنده شدن بخش‌هایی از قطعه نشان داده شده است.

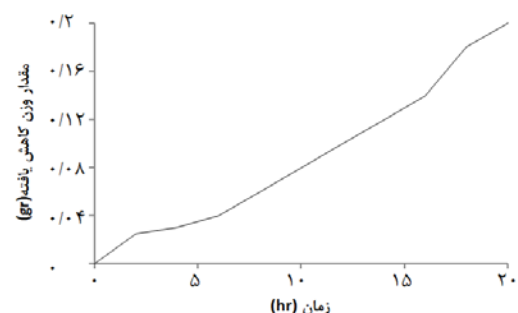
به منظور بررسی اثر اندازه ذرات، آزمایش دیگری انجام گردیده که در این آزمایش سیال مورد بررسی شامل الکل سفید، پودر سیاه، اکسید آهن و ذرات درشت‌تر به دست آمده از دانه‌بندی پودر سیاه انتخاب شد. بدین منظور مخلوط پودر سیاه و اکسید آهن غربال شده و در حدود ۱۰ درصد وزنی ذرات با اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر به سیستم افزوده شد. بخش عمده این ذرات اکسید آهن است. با توجه به نتایج در نمودار ۵، تغییرات وزنی به وضوح نشان داده شده است. کاهش وزن تا حدود ۴۰ برابر نسبت به شرایط پودر سیاه به تنهایی و سرعت گردش 4500rpm است.



شکل ۴) تصویر فیلتر تصفیه گاز و تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر سیاه با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت



شکل ۵) بخش‌هایی از ایمپلرهای موجود در ایستگاه تقویت فشار گاز پتاوه



نمودار ۵) تغییرات وزن نمونه در مخلوط الکل، پودر سیاه و ذرات درشت اکسید آهن در سرعت گردش 6500rpm

condition [Dissertation]. Baghdad: University of Baghdad; 2003.

3- Oka YI, Okamura K, Yoshida T. Particle estimation of erosion damage caused by solid particle impact.; Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*. 2005;259(1-6):95-101.

4- Aquaro D. Erosion due to the impact of solid particles of materials resistant at high temperature. *Meccanica*. 2006;41(5):539-551.

5- Habib HM, Badr HM, Said SAM, Ben-Mansour R, Al-Anizi SS. Solid-particle erosion in the tube end of the tube sheet of a shell-and-tube heat exchanger. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2006;50(8):885-909.

6- Rodríguez E, Flores M, Pérez A, Mercado-Solis RD, González R, Rodríguez J, et al. Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels. *Wear*. 2009;26(11):2109-2115.

7- Fořt I, Jirout T. The relation between the rate of erosion wear of a pitched blade impeller and its process characteristics. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011;89(10):1929-1937.

8- Mazumder QH. Effect of liquid and gas velocities on magnitude and location of maximum erosion in U-bend. *Open Journal of Fluid Dynamics*. 2012;2(2):29-34.

9- Keegan MH, Nash DH, Stack MM. On Erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013;46(38).

10- Azimian M, Bart HJ. Investigation of hydroabrasion in slurry pipeline elbows and T-junctions. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2014;8:65-78.

11- Pereira GC, de Souza FJ, de Moro Martins DA. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbow. *Powder Technology*. 2014;261:105-117.

12- Arabnejad H, Mansouri A, Shirazi SA, McLauri BS. Development of mechanistic erosion equation for solid particles. *Wear*. 2015;332-333:1044-1050.

13- Finnie I. Erosion of surface by solid particles. *Wear*. 1960;3(2):87-103.

14- Bourgoyne Jr AT. Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production. SPE/IADC Drilling Conference, 28 February-3 March, New Orleans, Louisiana. New Orleans: Society of Petroleum Engineers; 1989.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

فهرست علائم

A	مقدار ثابت وابسته به جنس ماده ساییده شده
d	قطر ذرات بر حسب میکرون
D	قطر لوله بر حسب میلی‌متر
ER	نرخ سایش شن که به صورت جرم زدوده شده مواد به جرم ماده ساییده
E_p	نرخ سایش بر حسب میلی‌متر بر کیلوگرم
$f(\theta)$	تابع زاویه برخورد ذرات
$F(\alpha)$	تابع زاویه برخورد
h	ضخامت دیواره فلز
H_t	سختی فلز هدف
K_{It}	چقرمگی
M_p	جرم ذرات
P	تنش سیال بر روی فلز
$Q_p \rho_p$	دبی جرمی ذرات برخورد کننده
R_p	شعاع ذرات
S_p	یک ثابت هندسی
S_{yt}	استحکام تسلیم صفحه هدف سایش
V	حجم مواد ساییده شده بر ذرات
V_c	حجم و نرخ سایش مواد ترد و نرم شامل تغییر شکل برشی
V_D	حجم و نرخ سایش مواد ترد و نرم شامل تغییر شکل پلاستیک
V_m	سرعت مخلوط بر حسب متر بر ثانیه
V_p	سرعت برخورد ذرات

علائم یونانی

α	زاویه برخورد دانه‌های شن
ω_p	سرعت برخورد ذرات
ρ_m	دانسیته مخلوط
ρ_p	دانسیته ذرات
\emptyset	انرژی مورد نیاز برای حذف ذرات بریده شده در واحد حجم
Ω	انرژی مورد نیاز برای حذف ذرات در حالت تغییر شکل پلاستیک

منابع

- 1- Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering Tribology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2005.
- 2- Al-Rikabi ZY. Corrosion Inhibition of carbon steel tubes in cooling system at different sodium salts as function of solution acidity and temperature under low