

## بررسی تغییر پذیری عیار بار ورودی کارخانه‌ی فرآوری فسفات اسفوردی به روش زمین آمار

فرهاد محمد تراب<sup>۱\*</sup>، امید حمیدخواه<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد [fmtorab@yazduni.ac.ir](mailto:fmtorab@yazduni.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه یزد [hamidkhah67@yahoo.com](mailto:hamidkhah67@yahoo.com)

(دریافت ۵ دی ۱۳۸۹، پذیرش ۸ آبان ۱۳۹۰)

### چکیده

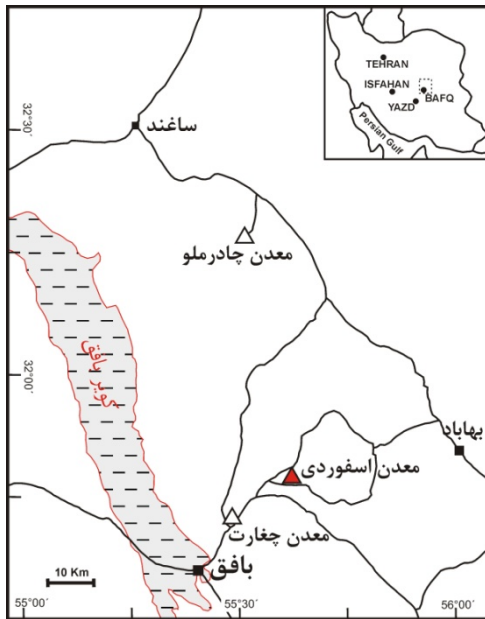
کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، همگی برای تغلیظ خوراکی که نوسانات عیاری آن در حد مجاز باشد طراحی و بهینه سازی می‌شوند و هرگونه نوسان در خارج از این حد، موجب بروز اثرات نامطلوب بر روی کیفیت کنسانتره و بازیابی عملیات جدایش و فرآوری می‌شود. در این مقاله تغییرپذیری عیار خوراک کارخانه‌ی تغلیظ مجتمع معدنی فسفات اسفوردی با استفاده از زمین آمار تحلیل و با شناسایی منابع این تغییرپذیری‌ها، راهکاری به منظور رفع نوسانات موجود ارائه شد. اولین قدم در رسیدن به این هدف، نمونه‌گیری‌های هدفمند از خطوط جریان مواد معدنی در کارخانه است که بدین منظور از نتایج آنالیز نمونه‌های تهیه شده از خوراک کارخانه طی مدت ۹۶۰ ساعت استفاده شد. با توجه به مطالعات انجام شده، وجود نوسانات متناوب سینوسی در عیار خوراک کارخانه ثابت شد که این امر را می‌توان ناشی از استخراج ماده معدنی از جبهه‌کارهای مختلف معدن با مشخصات عیاری متفاوت و همچنین عدم همگن‌سازی مناسب مواد معدنی ارسالی از معدن قبل از خوراک‌دهی به کارخانه دانست. بالا بودن مقادیر اثر قطعه‌ای نسبی (C<sub>0</sub>/C) در تغییرنمای عیار آهن و فسفات به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۶۶، تاییدکننده همین امر است. در ادامه با اعمال عملیات میانگین متحرک، به نوعی همگن‌سازی مواد معدنی ورودی به کارخانه طی چهار بازه‌ی زمانی مختلف (۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ ساعت) شبیه‌سازی شد. با انجام تحلیل حساسیت، بازه‌ی ۳۲ ساعت به عنوان بازه‌ی بهینه انتخاب شد که بر این اساس و با توجه به خوراک ۱۴۰ تن در ساعت، لازم است تا همگن‌سازی مواد در هر مرحله در حدود ۴۵۰۰ تن کانسنگ انجام و سپس به کارخانه خوراک‌دهی شود. بدین ترتیب پیش‌بینی می‌شود بهترین حالت ممکن با کمترین خطا و تغییرپذیری عیار حاصل شود.

### کلمات کلیدی

نوسانات عیاری، زمین آمار، تغییرنما، نمودار کنترلی، تغییرپذیری، میانگین متحرک، همگن‌سازی

## ۱ - مقدمه

کیلومتر راه فرعی به جاده‌ی آسفالته بافق - بهاباد متصل می‌شود (شکل ۱). کانسار فسفات اسفوردی در طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی واقع شده است و شامل کانی‌سازی آپاتیت و مگنتیت در مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی به سن پراکامبرین - کامبرین و به جنس ریولیت، دولومیت و سنگ‌های آلتزه شده (سنگ‌های سبز) است. خوراک این کارخانه سالانه حدود ۳۶۰ هزار تن کانسنگ است که پس از تغلیظ و کانه‌آرایی، دو محصول یکی کنسانتره‌ی فسفات به مقدار سالانه ۱۰۳ هزار تن با عیار ۳۹ درصد  $P_2O_5$  و دیگری کنسانتره‌ی اکسید آهن به مقدار سالانه ۱۳۰ هزار تن با عیار ۶۴ درصد آهن تولید می‌شود. البته هم اکنون کنسانتره‌ی آهن به دلیل مشکلات فنی موجود در خط تولید، تولید نمی‌شود [۳].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی معدن فسفات اسفوردی به همراه موقعیت سایر معادن مهم منطقه

## ۳ - روش مطالعه

در این پژوهش از نتایج نمونه‌های تهیه شده در طی مدت ۹۶۰ ساعت از خوراک کارخانه، استفاده شده است. این نمونه‌ها به صورت دستی و در فواصل زمانی یک ساعته، از محل ته‌ریز سیکلون خوشه‌ای (سیکلون نرمه‌گیر) تهیه و در پایان هر شیفت برای عیار سنجی  $P_2O_5$  و آهن آنالیز شده‌اند. برای نمونه، قسمتی از نتایج این نمونه‌گیری‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

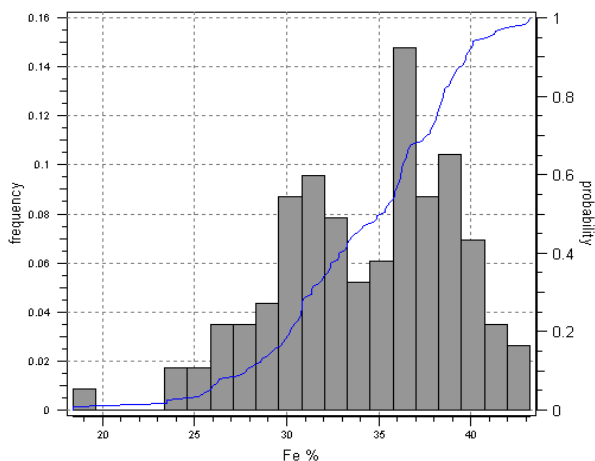
بررسی تغییرپذیری و نوسانات عیاری از مسائل قابل توجه در پروژه‌های معدنی بوده است. مطالعه در مورد نحوه‌ی تغییرپذیری و آگاهی از میزان نوسانات عیار مواد معدنی در خطوط جریان کارخانه‌های فرآوری به‌منظور به‌کارگیری تمهیدات لازم برای افزایش بازیابی و همچنین بررسی اختلافات معنی‌دار عیار بار ارسالی از معدن و خوراک طراحی شده برای کارخانه، یکی از نمودهای مهم این موضوع است [۲، ۱]. اهمیت این موضوع به این دلیل است که در صورت وجود نوسانات شدید در خوراک، بار ورودی به کارخانه هر لحظه دارای خصوصیات متفاوتی است و در نتیجه رفتاری متفاوت در مقابل فرآیندهای پیش‌بینی‌شده در کارخانه از خود نشان می‌دهد. بنابراین تنظیم و کنترل تجهیزات و فرآیندهای مختلف برای خردایش و جدایش مواد معدنی در عمل غیر ممکن می‌شود و در بلندمدت باعث تحمیل هزینه‌هایی به مراتب بیشتر از آنچه برای مخلوط‌سازی مواد معدنی مورد نیاز است، می‌شود [۳]. همگن‌سازی مواد معدنی قبل از ورود به کارخانه، با استفاده از روش‌های متداول موجود [۵، ۴]، یکی از رایج‌ترین اقدامات برای جلوگیری از انتقال نوسانات کیفی خوراک به سایر بخش‌های تولید است.

تغییرنما یا واریوگرام یکی از مهمترین ابزارها در زمین‌آمار به‌منظور بررسی تغییرپذیری در کارهای معدنی است. مهم‌ترین ویژگی تغییرنما نسبت به سایر ابزارهای آماری، ساده‌سازی ساختار تغییرپذیری است که موجب کاربرد بسیار وسیع آن در بسیاری از زمینه‌های وابسته به صنایع معدنی شده است [۶]. کاربرد واریوگرافی به منظور پی بردن به تغییرپذیری‌های بزرگ مقیاس در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی و همچنین رفتارسنجی آرایش مواد و انجام پروسه‌های کنترلی، توسط یک مهندس متالورژی به نام پیر. ام. جی.<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۰ پایه ریزی شد [۷، ۱]. در تمامی کارخانه‌های کانه‌آرایی نمونه‌گیری صحیح، بهینه و هدفمند اساس کار را تشکیل می‌دهد چراکه نمونه‌گیری به عنوان مهمترین ابزار کنترل عیار در کارخانه‌های تغلیظ مواد معدنی شناخته شده است [۱].

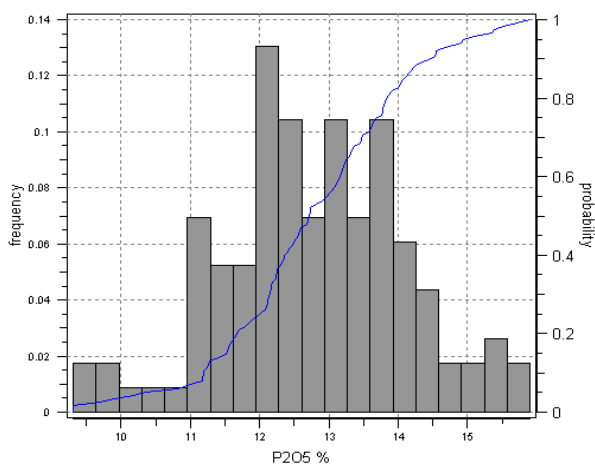
## ۲ - معدن فسفات اسفوردی

مجتمع معدنی و صنعتی فسفات اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان بافق در استان یزد است که با طی ۲/۵

می‌توان در استخراج مواد معدنی از جبهه کارهای مختلف معدن با دامنه‌ی عیاری متفاوت و عدم همگن‌سازی مناسب آنها قبل از خوراک دهی به کارخانه جستجو کرد.



شکل ۲: فراوانی نمای عیار آهن در بار ورودی



شکل ۳: فراوانی نمای عیار فسفات در بار ورودی

### ۳-۲- رسم نمودارهای کنترلی<sup>۴</sup>

نمودار کنترلی (تغییرپذیری) ابزاری مناسب به منظور نمایش تغییرپذیری عیار و شدت آن، در طول زمان است و اغلب به وسیله‌ی این نمودار می‌توان به وجود تغییرات تناوبی یا تصادفی در طول خط جریان مواد پی برد. در این نمودارها، تغییرات عیار عنصر مورد نظر نسبت به زمان رسم می‌شود که با مطالعه آن می‌توان یک دید کلی نسبت به نحوه‌ی نوسانات در خطوط جریان مواد بدست آورد. بدین صورت می‌توان عوامل ایجاد این نوسانات را شناسایی و برای رفع آن‌ها اقدام کرد [۷].

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودار کنترلی عیار آهن و فسفات در بار ورودی کارخانه‌ی اسفوردی نشان داده شده است. در شکل ۴، محور قائم عیار آهن و محور افقی زمان را نشان

مطالعات صورت گرفته در این مقاله و تفسیر نتایج با بهره‌گیری از نرم افزار زمین آماری<sup>۳</sup> SGEMS انجام شده که شامل رسم نمودارهای فراوانی نما، نمودارهای کنترلی، تغییرنما و تعبیر و تفسیر آن‌ها است.

در ادامه با استفاده از روش میانگین متحرک اقدام به شبیه‌سازی همگن سازی مواد معدنی در طی بازه‌های زمانی متفاوت و در نهایت تشخیص زمان بهینه و نحوه‌ی همگن سازی مناسب برای خوراک کارخانه اسفوردی شده است.

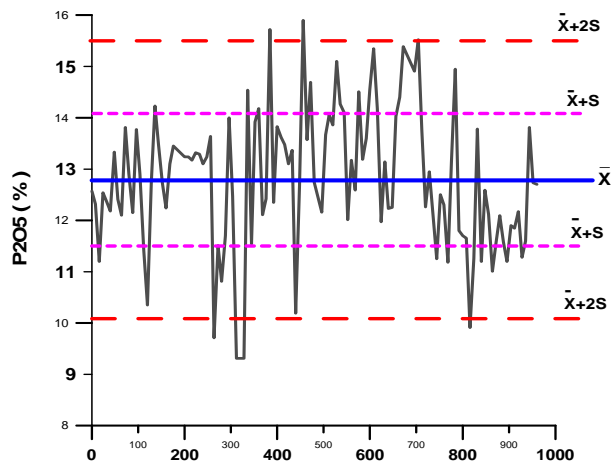
### ۳-۱- رسم و تحلیل نمودارهای فراوانی نما

ابتدا به منظور مطالعه‌ی نحوه‌ی توزیع آماری عیار آهن و فسفات در خوراک کارخانه، فراوانی نمای آنها بر اساس نمونه‌های تهیه شده رسم و پارامترهای مربوط به آن استخراج شده است (جدول ۲). در شکل‌های ۲ و ۳ نمودارهای توأم فراوانی و فراوانی تجمعی به ترتیب برای عیار آهن و فسفات نشان داده شده است.

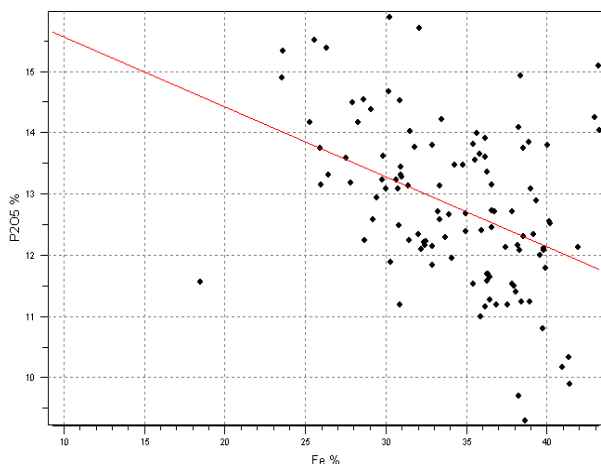
جدول ۱: قسمتی از نتایج آنالیز نمونه‌های خوراک کارخانه اسفوردی

بار ورودی		ردیف	تاریخ
%Fe	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
۴۰/۱۰	۱۲/۵۷	۳	۱۳۸۸/۲/۲۲
۳۸/۴۵	۱۲/۳۲	۱	
۳۷/۵۲	۱۱/۲۰	۲	
۴۰/۱۲	۱۲/۵۴	۳	۱۳۸۸/۲/۲۳
۳۹/۱۱	۱۲/۳۶	۱	
۳۸/۱۰	۱۲/۱۸	۲	
۲۶/۳۶	۱۳/۳۳	۳	۱۳۸۸/۲/۲۴
۳۴/۹۰	۱۲/۴۱	۱	
۳۸/۲۲	۱۲/۱۰	۲	
۴۰	۱۳/۸۱	۳	۱۳۸۸/۲/۲۵
۳۹/۲۸	۱۲/۹۰	۱	
۴۱/۹۰	۱۲/۱۵	۲	
۳۸/۵۰	۱۳/۷۷	۳	۱۳۸۸/۲/۲۶
۳۹/۲۸	۱۲/۹۰	۱	
۳۸	۱۱/۴۱	۲	
۴۱/۲۸	۱۰/۳۵	۳	۱۳۸۸/۲/۲۷
۳۷/۸۰	۱۲/۷۳	۱	
۳۳/۴۰	۱۴/۲۳	۲	

باتوجه به شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است نمودار فراوانی نما از چندین جامعه‌ی مختلف عیاری و تودرتوی نرمال تشکیل شده است که این امر در فراوانی نمای عیار فسفات شدت بیشتری دارد. بر اساس مطالعات صورت گرفته علت این امر را



شکل ۵: نمودار کنترلی، نشان دهنده تغییرات عیار فسفات در بار ورودی بر حسب زمان



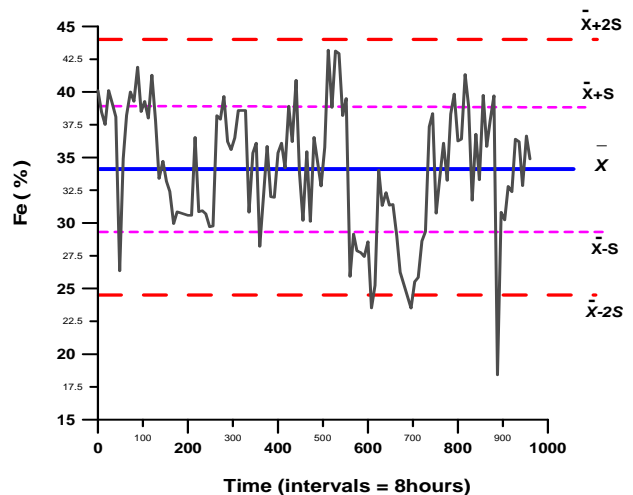
شکل ۶: نمودار پراکندگی عیار آهن در برابر فسفات در بار ورودی

پارامترهای مربوط به نمودار پراکندگی شکل ۶ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: پارامترهای مربوط به نمودار پراکندگی عیار آهن بر حسب فسفات

پارامتر	همبستگی	شیب خط رگرسیون	عرض از مبدأ
مقدار	-۰/۴۱	-۰/۱۱	۱۶/۷۱

می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، خط ممتد روی شکل، میانگین عیار آهن را نمایش می‌دهد و خطوط خط چین  $\bar{x} \pm 2s$  و  $\bar{x} \pm s$  به ترتیب معرف سطح احتمال ۶۸ و ۹۵ درصد می‌باشند. عبور عیار آهن از خط  $\bar{x} - 2s$  نشان‌دهنده شدت تغییرات، در عیارهای پایین است. شدت تغییرات به حدی است که در طی مدت ۹۶۰ ساعت نمونه‌برداری نوسان عیاری بین ۱۸ تا ۴۳ درصد آهن، به وجود آمده است.



شکل ۴: نمودار کنترلی، نشان دهنده تغییرات عیار آهن در بار ورودی بر حسب زمان

همچنین شکل ۵ نیز نمودار تغییرات شدید عیار فسفات را نمایش می‌دهد به‌گونه‌ای که هم در عیارهای بالا و هم در عیارهای پایین تغییرات عیاری در بسیاری از نقاط از خطوط  $\bar{x} \pm 2s$  عبور کرده است که این امر مبین شدت تغییرات عیار است.

نکته‌ی مهم دیگر آنکه نمودارهای کنترلی عیار آهن و فسفات نیز وجود نوسانات تناوبی عیار در خوراک کارخانه را تصدیق می‌کنند به طوری که افزایش و کاهش تناوبی عیار در نمودارها به وضوح مشخص است.

البته با توجه به نمودارها به نظر می‌رسد عیارهای آهن با فسفات دارای یک همبستگی منفی بالایی هستند به طوری که در طی زمان، با افزایش عیار آهن، عیار فسفات کاهش می‌یابد. این موضوع با رسم نمودار پراکندگی عیار آهن بر حسب عیار فسفات روشن می‌شود.

جدول ۲: پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن و فسفات در خوراک

پارامترهای آماری	تعداد داده‌ها	میانگین (%)	واریانس (% <sup>۲</sup> )	انحراف معیار (%)	ضریب تغییرات (%)	میانگین (%)	چارک بالا (%)	چارک پایین (%)	بیشینه (%)	کمینه (%)
آهن	۱۱۵	۳۴/۲۶	۲۳/۱۷	۴/۸۱	۱۴	۳۵/۳۴	۳۸/۲۰	۳۰/۸۲	۴۳/۲۰	۱۸/۴۱
فسفات	۱۱۵	۱۲/۷۹	۱/۷۷	۱/۳۳	۱۰	۱۲/۷۳	۱۳/۶۷	۱۲/۰۱	۱۵/۹۰	۹/۳۱

## ۳-۳- رسم و تحلیل تغییرنماها

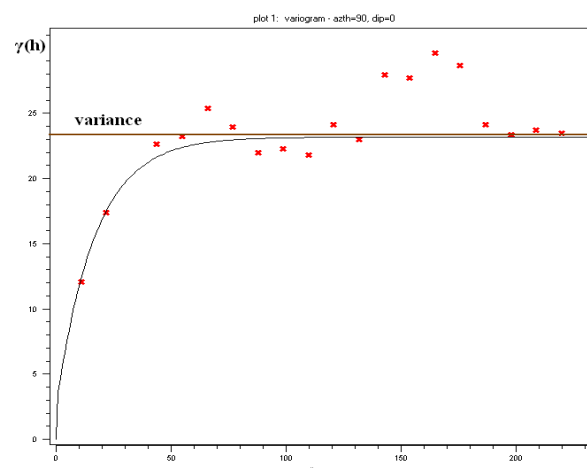
تغییرنما برای تشریح ارتباط فضایی بین عیار (یا هر مشخصه‌ی دیگری مثل ضخامت) نقاط مختلف یک کانسار به کار می‌رود و بنابراین یک ابزار اساسی در زمین آمار است [۶]. در این پژوهش نیز رسم تغییرنما و تشریح و تفسیر پارامترهای مربوط به آن اساس کار را تشکیل می‌دهد که پایه‌ی این تغییرنماها به جای فاصله، زمان در نظر گرفته شده است. در ابتدا تغییرنمای عیار آهن در بار ورودی رسم شده و اقدام به برازش مناسبترین مدل به نقاط واریوگرام شده است.

فاکتورهای مهم مربوط به تغییرنما در جدول ۴ ذکر شده است. با توجه به شکل ۴ مشخص است که محور قائم، معرف واریوگرام  $\gamma(h)$  و محور افقی نمایشگر فاصله‌ی جدایش (h) می‌باشد که در اینجا فاصله زمانی است.

نکته‌ی حائز اهمیت در مورد شکل تغییرنما، وجود نوسانات متناوب سینوسی در مقدار واریوگرام‌ها است. به طور کلی علت پیدایش تغییرپذیری تناوبی را می‌توان در وجود تقارن‌هایی با طبیعت مختلف و تکرار آنها جستجو کرد [۸]. در اینجا می‌توان گفت که این امر نشان دهنده‌ی افزایش و کاهش تناوبی عیار آهن در خوراک کارخانه است که مجدداً، عدم مخلوط‌سازی مناسب بار ورودی به کارخانه را تأیید می‌نماید. با توجه به پارامترهای ذکر شده در جدول ۴ می‌توان به چند نکته اشاره کرد. شعاع تأثیر  $50/60$  به این معنی است که نمونه‌ها تا این فاصله‌ی زمانی به هم وابسته‌اند و در خارج از آن، از یکدیگر مستقل می‌شوند. بنابراین می‌توان زمان تهیه (ویا در این پروژه زمان آنالیز) نمونه‌ها را تا  $\frac{2}{3}$  این فاصله زمانی [۸] یعنی تقریباً

۳۴ ساعت افزایش داد. اگرچه لازم است این نمونه‌ی کلی، از یک سری نمونه‌های جزئی تشکیل شود که به طور تصادفی از خط جریان تهیه می‌شوند. نکته‌ی مهم دیگر مقدار نسبت  $C_0$  به C است. این نسبت می‌تواند معیاری برای بیان استحکام یک ساختار فضایی باشد که در واقع نسبت بزرگی مؤلفه‌ی بی- ساختار به مؤلفه‌ی ساختاردار واریوگرام است و هرچه بزرگتری باشد بیان‌کننده‌ی وجود تغییرپذیری شدیدتر و خطاهای بزرگتر در مراحل مختلف نمونه‌برداری، آماده‌سازی یا آنالیز نمونه- هاست.

در شکل ۸ تغییرنمای عیار فسفات در خوراک رسم شده است. اولین و مهمترین مطلبی که راجع به شکل تغییرنما به نظر می‌رسد، وجود یک روند صعودی همراه با نوسانات متناوب کوچک مقیاس درون آن است بدین معنی که تغییرنما با افزایش گام واریوگرام (h) به حد ثابتی نمی‌رسد و به صعود خود ادامه می‌دهد. این گونه واریوگرام‌ها می‌توانند دلالت بر وجود یک روند مشخص در محدوده‌ی مورد مطالعه داشته باشند و از این رو ممکن است برای تخمین زمین آماری



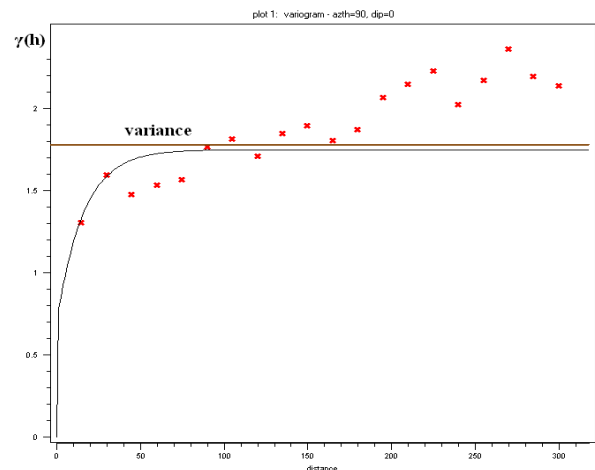
شکل ۷: تغییرنمای عیار آهن به همراه برازش مدل مربوطه

جدول ۴: فاکتورهای مربوط به تغییرنمای شکل ۷

مدل تغییرنما	اثر قطعه ای $(C_0)$ (% <sup>۲</sup> )	شعاع تأثیر (A) (ساعت)	سقف $(C)$ (% <sup>۲</sup> )	$\frac{C_0}{C}$
نمایی	۲/۵	۵۰/۶۰	۲۰/۶۷	۰/۱۲

دوره هفتم، شماره ۱۴، بهار سال ۱۳۹۱

مناسب نباشند [۸].



شکل ۸: تغییرنمای عیار فسفات به همراه برازش مدل مربوطه

### ۳-۴- اعمال عملیات میانگین متحرک<sup>۵</sup> بر داده های بارورودی

عملیات میانگین متحرک راهکاری به منظور تشخیص تغییرپذیریهای بزرگ مقیاس در خطوط جریان مواد معدنی ارائه می‌کند. این عملیات به نوعی تغییرات در طول خط جریان را تعدیل می‌کند، به گونه‌ای که نوسانات عیاری مواد معدنی در خط جریان بسیار نرم‌تر می‌شود و بدین وسیله تغییرات شدید و با مقیاس بزرگ خود را بهتر نمایان می‌کند [۷]. به عبارت دیگر به کمک این روش می‌توان همگن‌سازی خوراک یک کارخانه‌ی فرآوری را در بازه‌های زمانی متفاوت شبیه‌سازی کرد و سپس با توجه به نتایج حاصل از آن، در مورد نحوه‌ی اجرای بهینه‌ی عملیات همگن‌سازی مواد تصمیم‌گیری کرد. در این روش پنجره‌ای متحرک<sup>۶</sup> فرضی با ابعاد مورد نظر در طول خط جریان حرکت داده می‌شود و به صورت مجازی نمونه را در آن چهار چوب مکانی یا زمانی همگن می‌کند و در نهایت یک نتیجه‌ی آنالیز از هر پنجره‌ی ابعادی ارئه می‌کند که این نتیجه را می‌توان به مواد معدنی موجود در کل پنجره نسبت داد.

در این پژوهش، روش میانگین متحرک در طی ۹۶۰ ساعت نمونه‌گیری، بر داده‌های عیاری آهن و فسفات در خوراک اعمال شده است ولی به دلیل اهمیت فسفات در خط تولید کنونی کارخانه، جزئیات اعمال این روش برای عیار فسفات آورده شده و در مورد عیار آهن تنها به ذکر نتایج بسنده شده است.

### ۳-۵- اعمال روش میانگین متحرک بر عیار فسفات در خوراک

در این بخش روش میانگین متحرک به ترتیب در ۶۰، ۴۰، ۳۰ و ۲۰ نقطه با پنجره‌هایی به ابعاد ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ ساعت بر داده های خوراک بر اساس عیار فسفات اعمال شده که نتایج مربوطه در بخش‌های مختلف ارائه و با هم مقایسه شده است.

#### رسم و تحلیل نمودارهای فراوانی نما

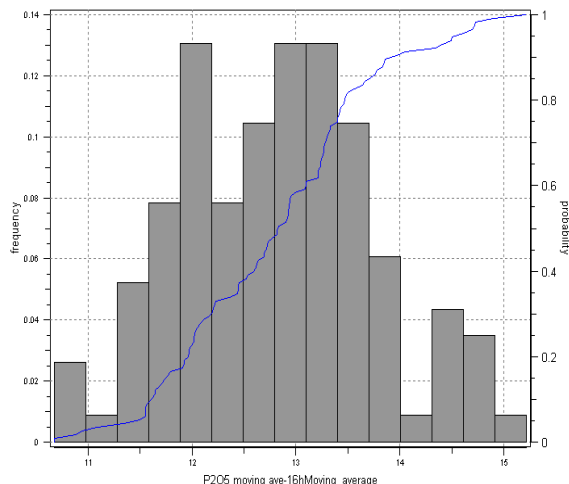
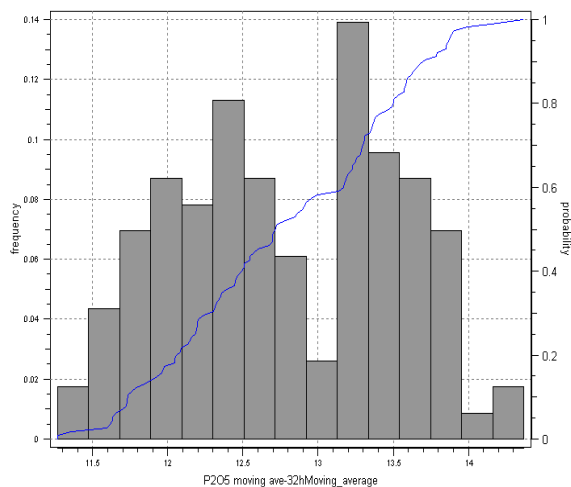
در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نمودارهای فراوانی نما مربوط به عیار فسفات در خوراک کارخانه به ترتیب با پنجره‌هایی به ابعاد ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ ساعت میانگین متحرک نشان داده شده است. همچنین پارامترهای مربوط به این نمودارها در جدول ۶ ذکر شده است.

ولی به هر حال در اینجا به منظور انجام مطالعات تکمیلی اقدام به برازش مناسب‌ترین مدل بر نقاط واریوگرام شده به گونه‌ای که سقف مدل برازش شده به واریانس کلی جامعه منطبق شده است. البته باید به این نکته نیز اشاره کرد که وجود یک روند افزایشی در شکل تغییرنما ممکن است دلالت بر بیشتر بودن فاصله‌ی نمونه‌گیری‌ها از شعاع تاثیر یا دامنه‌ی واریوگرام داشته باشد. بدین معنی که فاصله‌ی نمونه‌گیری‌ها هیچگاه درون زمان شعاع تاثیر قرار نگرفته تا بدین وسیله دامنه‌ی واریوگرام آشکار شود و در نتیجه تغییرنما به یک سقف مشخص برسد. با انطباق مدل نمایی بر نقاط واریوگرام اثر قطعه‌ای بالایی نمایان می‌شود به طوری که اثر قطعه‌ای بیش از نصف مقدار سقف واریوگرام را تشکیل می‌دهد. این امر نشان از وجود نوسانات و تغییرپذیری شدید عیار فسفات در خوراک دارد. همچنین ممکن است بروز اشتباهات فاحش در نمونه‌گیری و یا سایر مراحل از جمله آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها و یا مناسب نبودن فواصل زمانی برداشت و آنالیز نمونه‌ها باعث ایجاد چنین اثر قطعه‌ای بالایی شده باشد. در جدول ۵ پارامترهای مربوط به مدل انطباقی بر نقاط تغییرنما ذکر شده است.

جدول ۵: فاکتورهای مربوط به تغییرنمای شکل ۸

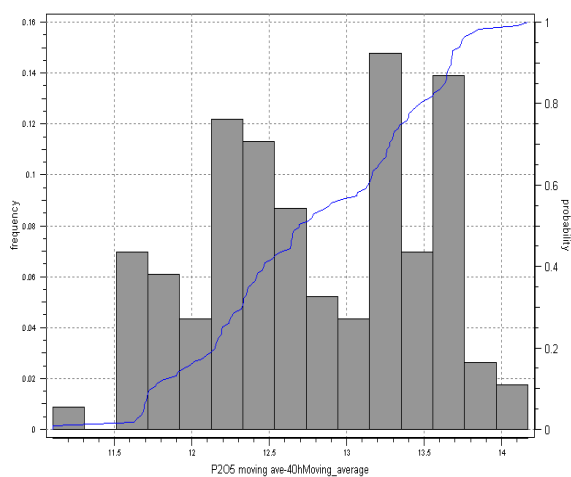
مدل تغییرنما	اثر قطعه ای (C <sub>0</sub> ) (%)	شعاع تاثیر (A) (ساعت)	سقف (C) (%)	C <sub>0</sub> /C
نمایی	۰/۷۰	۴۸	۱/۰۵	۰/۱۶۶

میانگین متحرک با پنجره ۲۴ ساعت



شکل ۹: فراوانی نمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۱۶ ساعت

شکل ۱۱: فراوانی نمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۳۲ ساعت

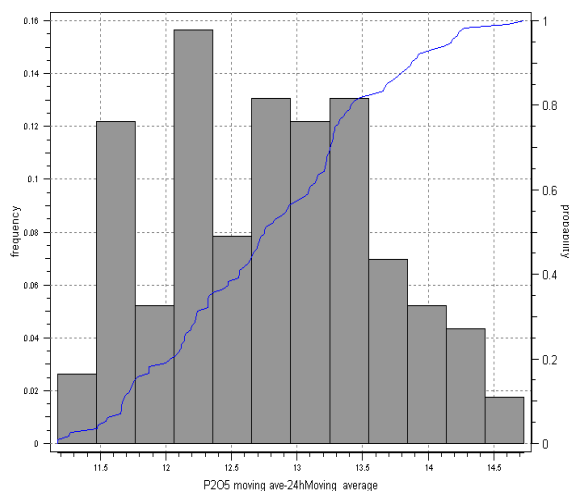


شکل ۱۲: فراوانی نمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۴۰ ساعت

در اینجا مهم‌ترین نکته کاهش واریانس و همچنین کاهش دامنه‌ی نوسانات عیاری، با انجام روش میانگین متحرک می‌باشد، به گونه‌ای که مقدار واریانس از  $1/77$  قبل از اعمال روش، به  $0/49$  با اجرای میانگین متحرک ۴۰ ساعته کاهش یافته است. ولی با وجود کاهش دامنه‌ی نوسانات و مقدار واریانس در هر مرحله، نمی‌توان به سادگی بهترین حالت را از بین فراوانی‌ها انتخاب کرد زیرا در اینجا به طور تقریبی تمامی نمودارهای رسم شده از چند جامعه‌ی عیاری تشکیل شده‌اند و با افزایش ابعاد پنجره‌ی متحرک، نمی‌توان حالت بهینه‌ای را مشخص کرد. ولی به نظر می‌رسد نمودارهای شکل ۱۰ و ۱۱ دارای شرایط بهتری هستند که البته می‌بایست صحت این مطلب و در نهایت بازه‌ی زمانی بهینه را با مطالعه روی واریوگرام‌های آنها تشخیص داد.

### رسم و تحلیل نمودارهای تغییرنا

واریوگرام‌های عبار فسفات به همراه برازش مدل مربوطه پس از اعمال روش میانگین متحرک با پنجره‌ای به ابعاد ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ ساعت به ترتیب در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ و جدول مربوطه به پارامترهای هر نمودار در ادامه نشان داده شده است. آنچه از تغییرناهای رسم شده مشخص است، کاهش شدید اثر قطعه-ای نسبت به مقدار آن قبل از اعمال روش میانگین متحرک می‌باشد که نشان از کاهش شدید تغییرپذیری عبار و خطا در مراحل مختلف دارد.



شکل ۱۰: فراوانی نمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال

جدول ۶: پارامترهای مربوط به فراوانی نماهای شکل های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲

پارامترهای آماری	میانگین (%)	واریانس (%) <sup>۲</sup>	انحراف معیار (%)	ضریب تغییرات (%)	میانہ (%)	چارک بالا (%)	چارک پایین (%)	بیشینه (%)	کمینه (%)
۱۶ ساعت	۱۲/۸۱	۰/۸۹	۰/۹۴	۷/۳۶	۱۲/۸۴	۱۳/۴۰	۱۲/۰۳	۱۵/۲۲	۱۰/۶۸
۲۴ ساعت	۱۲/۷۹	۰/۶۷	۰/۸۲	۶/۴۰	۱۲/۷۵	۱۳/۲۹	۱۲/۱۴	۱۴/۷۳	۱۱/۱۸
۳۲ ساعت	۱۲/۷۸	۰/۵۴	۰/۷۳	۵/۷۵	۱۲/۷۲	۱۳/۳۶	۱۲/۱۹	۱۴/۳۷	۱۱/۲۷
۴۰ ساعت	۱۲/۷۸	۰/۴۹	۰/۷۰	۵/۵۰	۱۲/۶۹	۱۳/۳۴	۱۲/۲۰	۱۴/۱۷	۱۱/۱۰

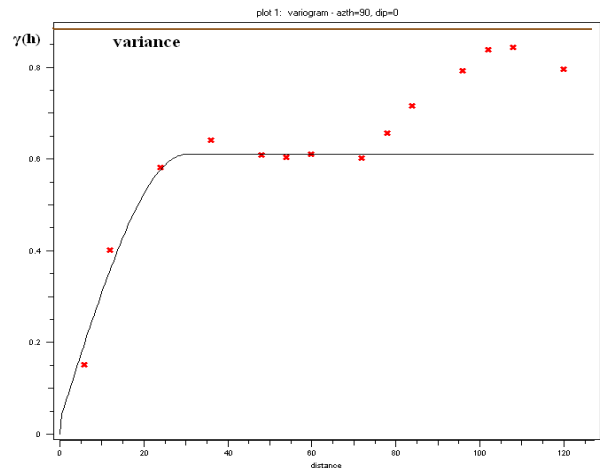
جدول ۷: پارامترهای مربوط به تغییرنمای شکل ۱۳

مدل تغییرنما	اثر قطعه ای (C <sub>0</sub> ) (%) <sup>۲</sup>	شعاع تاثیر (A) (ساعت)	سقف (C) (%) <sup>۲</sup>	C <sub>0</sub> /C
کروی	۰/۰۳	۳۰	۰/۵۸	۰/۰۵۲

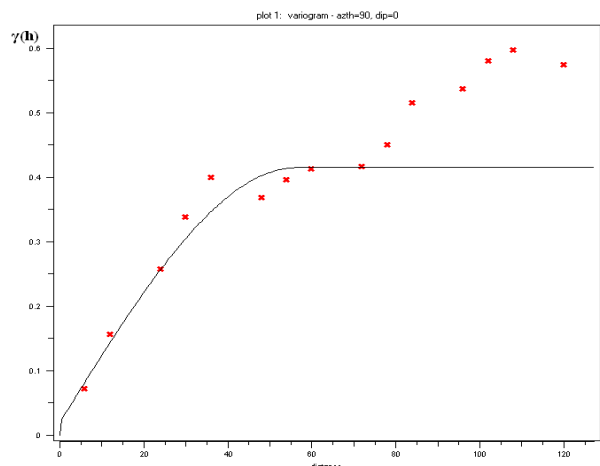
جدول ۸: پارامترهای مربوط به تغییرنمای شکل ۱۴

مدل تغییرنما	اثر قطعه ای (C <sub>0</sub> ) (%) <sup>۲</sup>	شعاع تاثیر (A) (ساعت)	سقف (C) (%) <sup>۲</sup>	C <sub>0</sub> /C
کروی	۰/۰۲	۵۶	۰/۴۰	۰/۰۵

در تغییر نمای شکل های ۱۵ و ۱۶ داده های تجربی دارای روند صعودی می باشند و به سقف مشخصی نمی رسند. با توجه به واریوگرام های رسم شده و پارامترهای مربوطه از جمله اثر قطعه ای و شعاع تأثیر، می توان تغییرنمای شکل ۱۵ (اعمال روش میانگین متحرک با پنجره ای با ابعاد ۳۲ ساعت) را مناسب ترین گزینه دانست چرا که اثر قطعه ای در واریوگرام شکل ۱۵ نسبت به دو مورد قبل به میزان قابل توجهی کاهش یافته، در صورتی که این مقدار در واریوگرام شکل ۱۶ تغییر چندانی نداشته است. باید توجه داشت که کاهش اثر قطعه ای تا مقدار ۰/۰۰۱ بیشتر موجب افزایش هزینه های همگن سازی می شود تا اینکه باعث بهبود شرایط بار ورودی به منظور خوراک دهی به کارخانه شود، بنابراین در اینجا باید حالت بهینه استفاده شود.



شکل ۱۳: برازش مدل کروی بر تغییرنمای عیار فسفات در خوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۱۶ ساعت



شکل ۱۴: برازش مدل کروی بر تغییرنمای عیار فسفات در خوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۲۴ ساعت

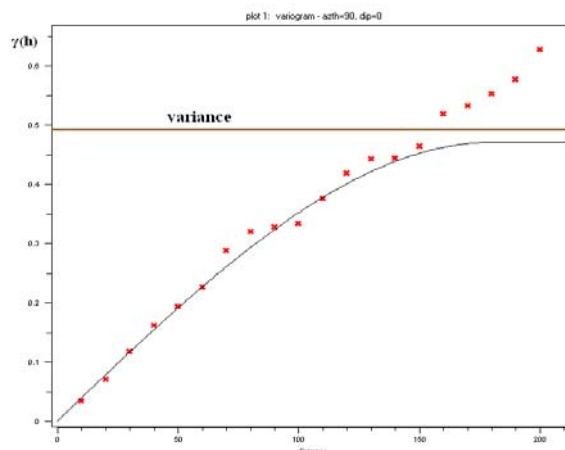


جدول ۹: پارامترهای مربوط به تغییرنمای شکل ۱۵

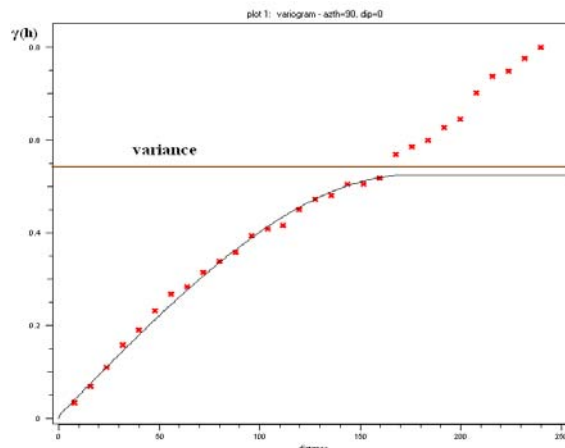
مدل تغییرنما	اثر قطعه ای (C <sub>0</sub> ) (%) <sup>۲</sup>	شعاع تاثیر (A) (ساعت)	سقف (C) (%) <sup>۲</sup>	$\frac{C_0}{C}$
کروی	۰/۰۰۵	۱۷۵	۰/۵۲	۰/۰۰۹

جدول ۱۰: پارامترهای مربوط به تغییرنمای شکل ۱۶

مدل تغییرنما	اثر قطعه ای (C <sub>0</sub> ) (%) <sup>۲</sup>	شعاع تاثیر (A) (ساعت)	سقف (C) (%) <sup>۲</sup>	$\frac{C_0}{C}$
کروی	۰/۰۰۱	۱۸۰	۰/۴۷	۰/۰۰۲

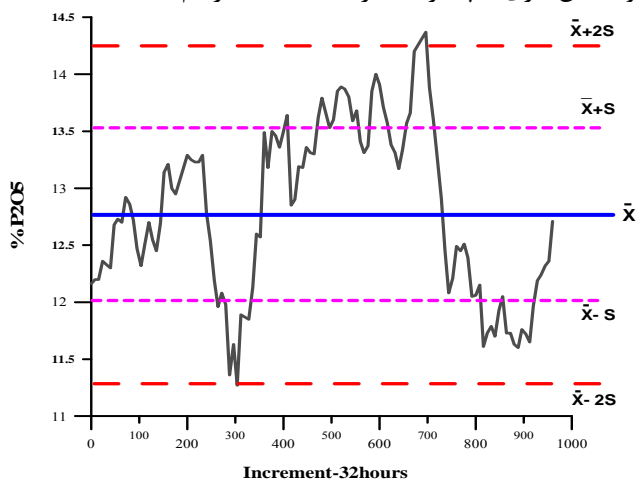


شکل ۱۵: برازش مدل کروی بر تغییرنمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۳۲ ساعت



شکل ۱۶: برازش مدل کروی بر تغییرنمای عبار فسفات درخوراک پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره ۴۰ ساعت

تغییرات عبار فسفات در خوراک پس از اعمال میانگین متحرک و همگن سازی با پنجره متحرک ۳۲ ساعت رسم شده است.



شکل ۱۷: نمودار کنترلی، نشان دهنده ی تغییرات عبار فسفات در خوراک بر حسب زمان پس از اعمال همگن سازی بهینه

نکته ی دیگر آنکه مقدار شعاع تأثیر در تغییرنمای شکل ۱۵ نسبت به موارد قبل، از مقدار ۵۶ ساعت به ۱۷۵ ساعت رسیده که این مقدار در تغییرنمای شکل ۱۶ با تفاوتی اندک به ۱۸۰ ساعت می رسد که این مورد نیز شاهدهی دیگر بر بهینه بودن ۳۲ ساعت همگن سازی است. نکته ای که از شعاع تأثیر استنباط می شود آن است که با انجام همگن سازی، شعاع تأثیر نمونه ها افزایش می یابد بدین معنی که می توان با افزایش فواصل زمانی نمونه برداری، هزینه های آنالیز و نمونه گیری را تا حدود زیادی کاهش داد.

#### رسم نمودار کنترلی

با توجه به آنکه بازه ی زمانی بهینه به منظور همگن سازی مواد معدنی ۳۲ ساعت تشخیص داده شد، در ادامه نمودار کنترلی

با استفاده از روش میانگین متحرک بر داده های بار ورودی مشخص شد بهترین و بهینه ترین بازه زمانی برای همگن سازی مواد معدنی ۳۲ ساعت است. بدین منظور می بایست بار ارسالی از معدن به مدت ۳۲ ساعت (با توجه به ظرفیت ۱۴۰ تن بر ساعت کارخانه تقریباً معادل ۴۵۰۰ تن ماده معدنی) انباشت و پس از انجام عملیات مخلوط سازی به کارخانه خوراک دهی شوند. همچنین این روش نشان داد که همگن سازی مواد معدنی قبل از ورود به کارخانه تا چه حد می تواند در بهبود شرایط مؤثر باشد چون پس از استفاده از این روش، اثر قطعه ای تغییرنماها به شدت کاهش یافت که این امر دلالت بر کاهش شدت تغییرپذیری عیار و همچنین کاهش و متعادل کردن خطا در مراحل مختلف نمونه برداری، آماده سازی و آنالیز نمونه ها دارد.

نکته مهم دیگر آنکه، با وجود نوسانات متناوب در عیار بار ورودی به کارخانه، نمونه برداری به روش ردیفی سیستماتیک می تواند تا حدود زیادی گمراه کننده باشد و بنابراین پیشنهاد می شود که از روش ردیفی تصادفی برای نمونه گیری از خطوط جریان در کارخانه استفاده شود [۱۰، ۹]. همچنین بازنگری در نحوه ی نمونه برداری، از جمله فواصل زمانی گرفتن نمونه ها و توجه به وزن بهینه ی نمونه برداری (قابل محاسبه با روش های دو وزنی و جی) نیز می تواند در کاهش خطا و اشتباه و در نتیجه کاهش اثر قطعه ای تغییر نماها ثمر بخش واقع شود.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیریت محترم مجتمع فسفات اسفوردی و سایر پرسنل آن واحد که شرایط انجام این مطالعه را فراهم کردند، قدردانی می شود.

#### منابع

جلالی، محمد؛ (۱۳۸۸)؛ بکارگیری ابزارهای آماری و زمین آماری در ارزیابی نوسانات عیاری خوراک کارخانه پرعیارکنی مجتمع مس

blending stockpile reduce variation? “, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol.74, P.121– 133.

[۵] Petersen, I.F.; (2004); “Blending in circular and longitudinal mixing piles“, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol.74, P.135– 141.

[۶] مدنی، حسن؛ (۱۳۷۳)؛ مبانی زمین آمار؛ مرکز نشر دانشگاه

با مقایسه ی نمودار شکل ۱۷ با شکل ۵، حذف تغییرات کوچک مقیاس و همچنین کاهش بازه ی نوسانات عیاری مشهود است به طوری که در کمترین نمونه ای عیار فسفات از سطوح احتمال  $\bar{x} \pm 2s$  عبور کرده است.

لازم به ذکر است نتایج حاصل از اعمال روش میانگین متحرک بر داده های عیار آهن مطابق با آنچه برای عیار فسفات گفته شد، نیز مبین آن است که بازه ۳۲ ساعت برای همگن سازی بار ورودی بر اساس عیار آهن نیز مناسب ترین و بهینه ترین بازه است.

#### ۴- نتیجه گیری

مهم ترین نتیجه ی حاصل شده، اثبات وجود تغییرپذیری شدید و نوسانات متناوب سینوسی در عیار خوراک کارخانه است که این موضوع به دلیل استخراج مواد معدنی از جبهه کارهای مختلف معدن با خصوصیات متفاوت و همچنین عدم همگن سازی مناسب آن ها قبل از خوراک دهی به کارخانه است. به نظر می رسد این امر ریشه و عامل اصلی بسیاری از مشکلات موجود در کارخانه فرآوری مجتمع فسفات اسفوردی است. با وجود چنین نوسانات شدیدی، بار ورودی به کارخانه هر لحظه دارای خصوصیات متفاوت است و در نتیجه رفتاری متفاوت در مقابل فرآیند های پیش بینی شده در کارخانه نشان می دهد. بنابراین تنظیم و کنترل تجهیزات و فرآیند های مختلف برای خردایش و جدایش مواد معدنی در عمل غیر ممکن می گردد و باعث می شود در بلند مدت، هزینه هایی به مراتب بیش از آنچه که برای مخلوط سازی مواد معدنی نیاز است، به معدن تحمیل شود. به هر حال مخلوط سازی و همگن کردن مواد معدنی قبل از باردهی به کارخانه تنها راه حل برای رفع مشکلات موجود است. اصلاح، نوسازی و راه اندازی تجهیزات موجود در سالن انباشت کارخانه که از ابتدا به منظور همگن سازی مواد طراحی شده است، ساده ترین و کم هزینه ترین راه باشد.

[۱] Pitrad, F.F.; (1993); “ Pierre Gy’s sampling theory and sampling practice: Heterogeneity, Sampling Correctness, and Statistical Process Control”; CRC press, 488 p.

[۲] تقوایی نژاد، مجتبی؛ شایسته فر، محمد رضا؛ دیانتی، محمدرضا؛ سرچشمه؛ نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن؛ دوره ۴؛ شماره هشتم؛ صفحه ۵۹-۶۶.

[۳] حمیدخواه، امید؛ (۱۳۸۹)؛ بررسی تغییرپذیری عیار بار ورودی به کارخانه ی فرآوری فسفات اسفوردی به روش زمین آمار؛ پایان نامه کارشناسی اکتشاف معدن؛ دانشگاه یزد.

[۴] Robinson, G.K.; (2004); “How much would a

صنعتی امیر کبیر؛ واحد تفرش.

[۷] Minnitt, R.C.A., Pitard, F.F.; (2008); "Application of variography to the control of species in material process streams: %Fe in an iron ore product", The journal of the southern African Institute of Mining and Metallurgy Vol.108, P.109-122.

[۸] حسنی پاک، علی اصغر؛ (۱۳۷۵)؛ زمین آمار (ژئو استاتیسیتیک)؛ انتشارات دانشگاه تهران.

[۹] حسنی پاک، علی اصغر؛ (۱۳۸۰)؛ نمونه‌برداری معدنی؛ انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۰] Paakkunainen, M., Reinikainen, S.p., Minkkinen, P.; (2007); "Estimation of the variance of sampling of process analytical and environmental emissions measurements", chemometrics and intelligent laboratory systems, Vol.88, P.26-34.

پی‌نوشت

- 1- Variogram
- 2-Pierre M. Gy
- 3-Stanford Geostatistical Modeling Software
- 4-Control chart
- 5-Moving average
- 6-Moving window