

## مطالعات زمین آماری به منظور ارزیابی نوسانات عیاری و طراحی سیستم نمونه‌برداری بهینه از خوراک ورودی خط سه چاهون در کارخانه فرآوری سنگ آهن چغارت

آسیه نورسته<sup>۱</sup>\*؛ فرهاد محمدتراب<sup>۲</sup>؛ افشین نمیرانیان<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- دانش‌آموخته فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت مهر ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۱)

### چکیده

خط فرآوری سه چاهون به منظور پرعیارسازی کانسنگ‌های کم عیار معدن سه چاهون در کارخانه فرآوری چغارت، احداث شده است. هدف از این مقاله طراحی سیستم نمونه‌برداری، بررسی نوسانات عیار بار ورودی و همگن‌سازی بهینه در این خط است. برای نیل به این هدف، ابتدا با استفاده از روش دو وزنی، وزن بهینه جزء نمونه‌ها معادل ۰/۴۹ کیلوگرم و با در نظر گرفتن خطای مجاز، تعداد جزء نمونه‌های لازم جهت برداشت معادل ۲۹ نمونه محاسبه گردیده است. با به‌کارگیری واریوگرام که یکی از مهم‌ترین ابزارهای زمین آماری محسوب می‌شود، تناوب زمانی جهت نمونه‌برداری ۱۱۰ ساعت برآورد گردیده است. با همگن‌سازی مناسب بار ورودی در بستر همگن ساز، می‌توان تا حد زیادی از نوسانات عیاری کاست، لذا با اعمال میانگین متحرک، عملیات همگن‌سازی خوراک ورودی در بازه‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی شده و در نهایت ۶۵ ساعت همگن‌سازی بهینه جهت کاهش نوسانات عیاری و افزایش راندمان کارخانه و کیفیت کنسانتره تولیدی مشخص گردیده است. لذا با توجه به نرخ بار ورودی معادل ۶۲۸ تن بر ساعت، لازم است تا در هر مرحله، همگن‌سازی با حجم ۴۰۸۲۰ تن در بستر همگن ساز انجام و سپس به خط سه چاهون خوراک دهی شود. نمودارهای کنترلی ترسیم شده، کاهش نوسانات عیار و قرارگیری تغییرات عیار در حدود مجاز تعیین‌شده توسط کارخانه را تأیید می‌کند.

### کلمات کلیدی

نمونه‌گیری بهینه - واریوگرافی - تغییرپذیری عیار - همگن‌سازی

## ۱- مقدمه

به منظور پریارسازی کانسنگ‌های کم عیار چغارت و سه چاهون، کارخانه‌ای با ظرفیت تولید سالیانه ۳/۲ میلیون تن کنسانتره احداث شده که در سال ۱۳۸۴ به بهره‌برداری رسیده است. خط سه چاهون با هدف تولید سالیانه ۱/۶ میلیون تن کنسانتره آهن با عیار ۶۶ درصد طراحی شده که میزان ۳/۴ میلیون تن سنگ آهن کم عیار از معدن سه چاهون را مصرف می‌کند [۱].

در عمل، روش‌های مختلفی جهت تعیین وزن بهینه نمونه‌برداری وجود دارد که شامل روش‌های صرفاً تجربی و همچنین روش‌های تجربی-آماري تخمین وزن نمونه می‌شود. تعیین وزن بهینه نمونه بر اساس روش "جی" و روش "دو وزنی" دارای کاربرد بیشتری هستند که در این مقاله روش دو وزنی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲].

به منظور طراحی سیستم نمونه‌برداری بهینه، ابتدا نمونه‌برداری از بار ورودی کارخانه و از نمونه گیر خودکار خط سه چاهون انجام شده است. نمونه‌گیری به فاصله زمانی ۲۰ دقیقه و به روش دو وزنی صورت گرفته است. وزن سری نمونه‌های کم ۲ تا ۴ کیلوگرم و وزن سری نمونه‌های زیاد

بین ۱۶ تا ۳۶ کیلوگرم است. سپس نمونه‌ها به روش چهار قسمتی تقسیم و نمونه معرف جهت آماده سازی به آزمایشگاه چغارت منتقل شده‌اند. نمونه‌ها توسط یک مرحله سنگ‌شکن فکی و دو مرحله سنگ‌شکن استوانه‌ای خردایش شده‌اند. پس از خردایش ابتدا توسط ریفل و سپس به روش چهار قسمتی به نمونه ۳۰۰ گرمی تقسیم گردیده و توسط آسیا پودر شده‌اند. از نمونه پودر شده حدود ۵۰ گرم نمونه معرف به روش چهار قسمتی جهت آنالیز آماده شده و ۵۰ گرم نیز بایگانی گردیده است. آنالیز نمونه‌ها به روش تیتراسیون صورت گرفته که عیار آهن (Fe) در نمونه‌ها مطابق جدول ۱ است.

## ۲- تعیین وزن و تعداد جزء نمونه بار ورودی خط چغارت با استفاده از روش دو وزنی

در این مرحله برای نوار نقاله سه چاهون، تعدادی نمونه با وزن کم و زیاد، به صورت مجزا برداشت شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. با محاسبه پراش توزیعی و ترکیبی با استفاده از روابط (۱) و (۲)، می‌توان وزن بهینه جزء نمونه‌ها را در این مرحله با استفاده از رابطه (۳) به دست آورد.

جدول ۱: نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده به روش دو وزنی برای نوار نقاله سه چاهون

| شماره آزمایشگاهی | وزن نمونه‌های بزرگ (Kg) | Fe%   | شماره آزمایشگاهی | وزن نمونه‌های کوچک (kg) | Fe%   |
|------------------|-------------------------|-------|------------------|-------------------------|-------|
| ۱                | ۳۶/۵                    | ۵۲/۰۷ | ۱۱               | ۳/۷۳                    | ۵۰/۱۶ |
| ۲                | ۲۱/۵                    | ۵۰/۰۸ | ۱۲               | ۳/۰۶                    | ۴۹/۵۴ |
| ۳                | ۲۶/۴۵                   | ۴۷/۸۷ | ۱۳               | ۲/۳۸                    | ۴۸/۸۶ |
| ۴                | ۱۸/۵۷                   | ۵۰/۰۰ | ۱۴               | ۲/۹                     | ۴۸/۶۳ |
| ۵                | ۱۸/۱                    | ۵۱/۱۵ | ۱۵               | ۲/۵۵                    | ۵۲/۲۲ |
| ۶                | ۱۶/۴۱                   | ۵۰/۰۰ | ۱۶               | ۳/۵                     | ۴۹/۹۳ |
| ۷                | ۱۸/۲۵                   | ۵۱/۹۲ | ۱۷               | ۲/۳                     | ۵۲/۵۲ |
| ۸                | ۱۶                      | ۵۰/۴۵ | ۱۸               | ۳/۲۵                    | ۴۸/۱۰ |
| ۹                | ۱۷                      | ۴۶/۲۷ | ۱۹               | ۳/۷                     | ۴۵/۹۶ |
| ۱۰               | ۲۱/۵                    | ۵۱/۰۰ | ۲۰               | ۳                       | ۴۹/۴۷ |

پراش در سری جزء نمونه‌های با وزن زیاد؛  $\Delta\bar{m}(1)$  و  $\Delta\bar{m}(2)$  به ترتیب میانگین وزن جزء نمونه‌های با وزن کم و میانگین وزن جزء نمونه‌های با وزن زیاد است [۲][۳].

جدول ۲، بیانگر نتایج حاصل از این محاسبات است. نمودار دو وزنی بر اساس تغییرات پراش نسبت به وزن نمونه‌ها در شکل ۱، نشان داده شده است. پراش‌های محاسبه شده در

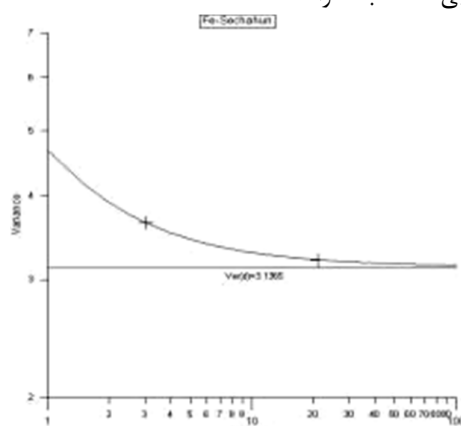
$$\text{Var}(c) = \frac{\Delta\bar{m}(1) \cdot \Delta\bar{m}(2) \cdot [\text{Var}(1) - \text{Var}(2)]}{\Delta\bar{m}(2) - \Delta\bar{m}(1)} \quad (۱)$$

$$\text{Var}(d) = \text{Var}(2) - \frac{\Delta\bar{m}(1) \cdot [\text{Var}(1) - \text{Var}(2)]}{\Delta\bar{m}(2) - \Delta\bar{m}(1)} \quad (۲)$$

$$\Delta m = \frac{\text{Var}(c)}{\text{Var}(d)} \quad (۳)$$

که در آن  $\text{Var}(c)$  پراش ترکیبی؛  $\text{Var}(d)$  پراش توزیعی؛  $\text{Var}(1)$  پراش در سری جزء نمونه‌های با وزن کم؛  $\text{Var}(2)$

این جدول، پراش نمونه‌برداری و آنالیز را نیز در برمی‌گیرد که در ادامه با محاسبه این دو پراش، مقدار حقیقی پراش توزیعی و ترکیبی، محاسبه خواهد شد.



شکل ۱: نمودار تغییرات پراش نسبت به وزن نمونه‌ها در روش دو وزنی

با کسر مقدار پراش روی هم رفته از پراش‌های توزیعی و ترکیبی به دست آمده از روش دو وزنی، مقدار پراش توزیعی  $3/084$  و پراش ترکیبی  $1/485$  حاصل شده است. در نمونه‌برداری با سه مرحله اساسی برداشت نمونه، آماده سازی آن و اندازه‌گیری کمیت مورد نظر سروکار داریم. این خطاها در عمل باهم جمع شده و خطای کلی را تشکیل می‌دهند. پراش کلی عبارت است از [۲]:

$$\text{Var}(t) = \text{Var}(s) + \text{Var}(p) + \text{Var}(a) \quad (5)$$

برای تعیین تعداد نمونه‌ها، باید پراش کلی نمونه‌برداری ( $\text{Var}(t)$ ) را به دست آوریم. در اینجا حدود اطمینان ( $CI$ ) معادل  $1\%$  خطا در نظر گرفته شده است. در کارهای مهندسی، معمولاً سطح اعتماد  $95\%$  بکار می‌رود، بنابراین خواهیم داشت [۲]:

$$CI_{95} = 1/96 \times s \quad (6)$$

بر اساس رابطه فوق می‌توان پراش کلی ( $\text{Var}(t)=s^2$ ) را محاسبه کرد.

$$1 = 1/96 \times s \rightarrow s = 0.051 \rightarrow s^2 = 0.026$$

حال با استفاده از رابطه (۵) و معلوم بودن مقادیر  $\text{Var}(t)$ ،  $\text{Var}(c)$ ،  $\text{Var}(d)$ ،  $\text{Var}(p) + \text{Var}(a)$  و  $\Delta m$  می‌توان تعداد جزء نمونه بهینه را به دست آورد. بنابراین با توجه به رابطه (۷) خواهیم داشت [۲]:

$$n = \frac{\text{Var}(d) + \frac{\text{Var}(c)}{\Delta m}}{\text{Var}(t) - \text{Var}(p) - \text{Var}(a)} \quad (7)$$

در نهایت می‌بایست  $n$  نمونه  $\Delta m$  کیلوگرمی را در فاصله زمانی بهینه برداشت کرد. نتایج به دست آمده در جدول ۴ خلاصه شده است.

جدول ۲: نتایج محاسبه پراش‌های توزیعی و ترکیبی به روش دو وزنی در نوار نقاله سه چاهون پیش از محاسبه پراش آماده سازی و آنالیز

| $\Delta m_1$ | $\Delta m_2$ | $V_1$ | $V_2$ | $V(c)$ | $V(d)$ |
|--------------|--------------|-------|-------|--------|--------|
| ۳/۰۳۷        | ۲۱/۰۲۸       | ۳/۶۴۲ | ۳/۲۰۹ | ۱/۵۳۷  | ۳/۱۳۶  |

جدول ۳: آنالیز نمونه‌های تکراری برای محاسبه مجموع پراش آماده سازی و اندازه‌گیری ( $V(p)+V(a)$ )

| شماره آزمایشگاهی | ۱     | ۹     | ۱۵    | ۱۶    | ۲۰    |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| آنالیز اولیه Fe% | ۵۲/۰۷ | ۴۶/۲۷ | ۵۲/۲۲ | ۴۹/۹۳ | ۴۹/۴۷ |
| آنالیز مجدد Fe%  | ۵۲/۳۰ | ۵۱/۰۰ | ۵۰/۷۶ | ۴۸/۶۰ | ۴۹/۳۷ |

جدول ۴: تعیین تعداد جزء نمونه  $n$  و وزن بهینه جزء نمونه  $\Delta m$  حاصل از روش دو وزنی

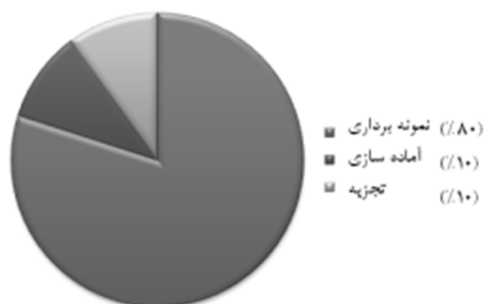
| n  | $\Delta m(kg)$ | var(pa) | var(d) | var(c) | Var(t) | پارامتر          |
|----|----------------|---------|--------|--------|--------|------------------|
| ۲۹ | ۰/۴۹           | ۰/۰۵۲   | ۳/۰۸۴  | ۱/۴۸۵  | ۰/۲۶۰۳ | مقدار محاسبه شده |

اغلب تشخیص این نوع تغییرپذیری ها در محیط‌های نمونه‌گیری تک بعدی بسیار ساده‌تر است. یکی از بارزترین و ساده‌ترین این محیط‌ها، خطوط جریان مواد روی نوار نقاله یا درون لوله‌های انتقال پالپ در کارخانه‌های پرعیارکنی مواد معدنی است [۴].

اینک به بررسی تغییرپذیری عیار در بار ورودی نوار نقاله خط سه چاهون می‌پردازیم. شکل ۳ تغییرات عیار آهن بار ورودی در سال ۸۸ به مدت ۸۶۵۲/۵ ساعت را نشان می‌دهد. نوسانات عیار در این بازه زمانی در این شکل کاملاً مشخص است.

با توجه به هیستوگرام شکل ۴ یک جامعه نرمال با چولگی اندک به سمت مقادیر کمتر ملاحظه می‌شود. با توجه به جدول پارامترهای این هیستوگرام، تغییرپذیری عیار شدیدی ملاحظه می‌شود. لذا جهت کاهش این تغییرپذیری باید همگن سازی بهینه صورت گیرد. جدول ۵، پارامترهای مربوط به این هیستوگرام را نشان می‌دهد.

با توجه به فرمول ۵ می‌توان سهم مؤلفه‌های مختلف سازنده پراش کلی به دست آمده از جداول فوق را به صورت نمودار دایره‌ای نمایش داد (شکل ۲).

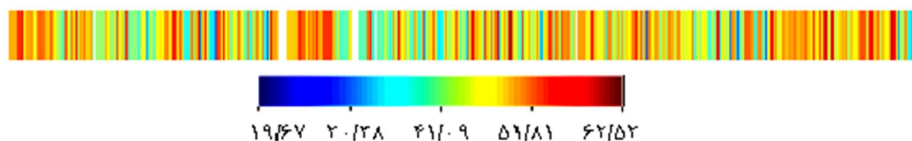


شکل ۲: نمودار دایره‌ای نشان‌دهنده سهم خطای هر یک از مراحل در نمونه‌برداری از نوار نقاله سه چاهون

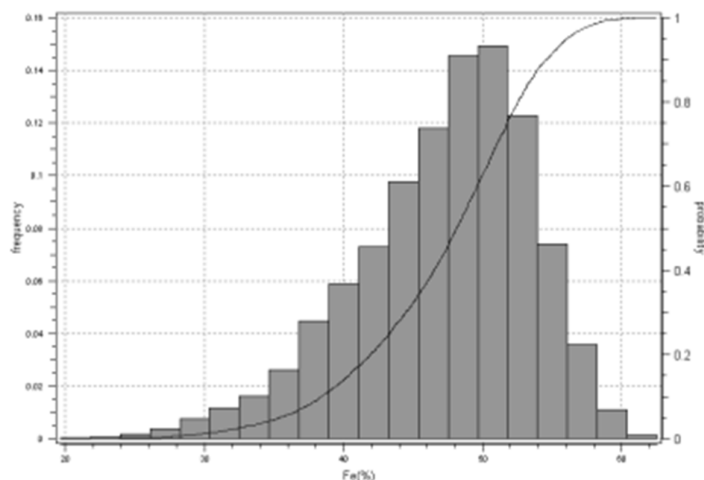
### ۳- بررسی تغییرپذیری عیار بار ورودی نوار نقاله سه چاهون

#### ۱-۳ مطالعات آماری

تغییرپذیری‌های بزرگ مقیاس ممکن است خود را در خلال یک سیستم نمونه‌گیری از کارخانه‌ی فرآوری نشان دهد.



شکل ۳: تغییرپذیری عیار آهن بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ در مدت زمان ۸۶۵۲/۵ ساعت



شکل ۴: هیستوگرام و فراوانی تجمعی (pdf+cdf) عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸

جدول ۵: پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸

| پارامترهای آماری | تعداد داده‌ها | میانگین | واریانس | انحراف معیار | میانه | چارک بالا | چارک پایین | بیشینه | کمینه |
|------------------|---------------|---------|---------|--------------|-------|-----------|------------|--------|-------|
| مقدار            | ۳۴۲۳          | ۴۷/۱۸   | ۴۰/۳۱   | ۶/۳۵         | ۴۸/۱۴ | ۵۱/۷۶     | ۴۳/۳       | ۶۲/۵۲  | ۱۹/۶۷ |

## ۳-۲- واریوگرافی

پایه و اساس روش‌های زمین‌آماري، همبستگی فضایی داده‌ها است و واریوگرام مهم‌ترین ابزار جهت بررسی همبستگی‌های فضایی بین داده‌هاست. واریوگرام در حقیقت همان واریانس وابسته به فاصله است که با نماد  $2\gamma(h)$  نشان داده می‌شود و هدف اصلی از برقرار کردن آن شناسایی ساختار تغییرپذیری داده‌ها بخصوص نسبت به فاصله (مکانی یا زمانی) است که از فرمول زیر حاصل می‌شود [۵]:

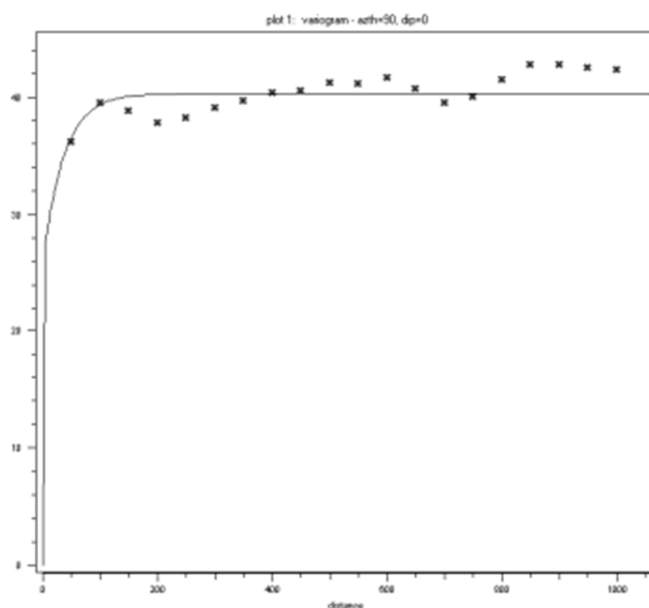
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (9)$$

با محاسبه واریوگرام به ازای گام‌های مختلف، نمودار واریوگرام حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل واریوگرام، مقدار واریوگرام به صورت تناوبی در حال کم و زیاد شدن است که نشان‌دهنده تغییرات متناوب عیار در خط جریان و عدم همگن‌سازی مناسب در بار ورودی است.

واریوگرام ترسیم شده برای بار ورودی نوار نقاله سه چاهون، دلالت بر وجود تغییرپذیری‌های تناوبی صعودی

دارد (شکل ۵). با توجه به شعاع تأثیر حاصل از برازش مدل نمایی به واریوگرام مذکور، فاصله زمانی مناسب جهت نمونه‌برداری از نوار نقاله ۱۱۰ ساعت تعیین می‌گردد، زیرا نمونه‌ها در این فاصله زمانی به یکدیگر وابسته هستند. اگرچه وجود تغییرات تناوبی در عیار باعث بی اعتباری این فاصله زمانی است و بالا بودن اثر قطعه‌ای واریوگرام، مدل به دست آمده را به یک مدل اثر قطعه‌ای تام نزدیک کرده است. از سوی دیگر، با توجه به شکل واریوگرام، دوره تناوب ۳۵۰ ساعت برآورد می‌شود که می‌توان زمان بهینه جهت نمونه‌برداری را نصف این مقدار یعنی ۱۷۵ ساعت در نظر گرفت. لذا با توجه به مقادیر حاصله، زمان بهینه‌ی اخذ نمونه‌ها، کمینه این مقادیر، معادل شعاع تأثیر ۱۱۰ ساعت در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اثر قطعه‌ای بالای نشان داده شده در جدول ۶، نیز چنین استنتاج می‌شود که خطای نمونه‌برداری و ناهمگنی نمونه‌ها بالا است. اگر همگن‌سازی مناسب صورت گیرد، فاصله زمانی مذکور افزایش خواهد یافت.



شکل ۵: واریوگرام عیار آهن بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ و مدل نمایی برازش شده بر آن

جدول ۶: پارامترهای مربوط به مدل برازش شده به واریوگرام عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸

| پارامترهای واریوگرام | مدل واریوگرام | میانگین | واریانس | اثر قطعه‌ای ( $C_0$ ) | C    | سقف واریوگرام (sill) | شعاع تأثیر (ساعت) | $\frac{C_0}{C}$ |
|----------------------|---------------|---------|---------|-----------------------|------|----------------------|-------------------|-----------------|
| مقدار                | نمایی         | ۴۷/۱۸   | ۴۰/۳۱   | ۲۶                    | ۱۴/۳ | ۴۰/۳                 | ۱۱۰               | ۱/۸۲            |

#### ۴- اعمال عملیات میانگین متحرک بر داده‌های بار ورودی

عملیات میانگین متحرک راه کاری جهت شناسایی و تشخیص تغییرپذیری‌های بزرگ مقیاس در خطوط جریان مواد معدنی ارائه می‌نماید. این عملیات به نوعی تغییرات در طول خط جریان را تعدیل می‌نماید، به گونه‌ای که با همگن‌سازی، نوسانات عیاری مواد معدنی در خط جریان بسیار نرم‌تر می‌شود و بدین وسیله تغییرات شدید و با مقیاس بزرگ خود را بهتر نمایان می‌سازد [۶].

با استفاده از تکنیک میانگین متحرک، همگن‌سازی مصنوعی بار ورودی در نوار نقاله چغارت با پنجره‌های زمانی مختلف شبیه‌سازی شده است. در این روش با در نظر گرفتن پنجره‌های مختلف زمانی، همگن‌سازی مواد به طور مصنوعی انجام و سپس با ترسیم واریوگرام و محاسبات آماری مربوطه، ابعاد پنجره بهینه استخراج گردیده است. در این محاسبات سعی شده تا کاهش ناهمگنی کوتاه دامنه با کاهش اثر قطعه‌ای واریوگرام‌ها تا رسیدن به اثر قطعه‌ای صفر مدلسازی شود. ابعاد پنجره بهینه به منظور کاهش ناهمگنی غیر تصادفی بلند دامنه با کاهش واریانس کلی جامعه و رسیدن آن به واریانس مجاز جهت نیل به حدود تغییرات عیاری مجاز محاسبه و مدلسازی شده است.

برای داده‌های عیار آهن بار ورودی نوار نقاله سه چاهون در سال ۸۸، میانگین متحرک با پنجره‌های متعدد اعمال گردیده است. در اینجا میانگین متحرک با پنجره ۵، ۲۰، ۶۵ و ۶۱۰ ساعت به عنوان نمونه بررسی می‌شود. با اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک ۲۰ ساعت، اثر قطعه‌ای واریوگرام، صفر می‌شود. با توجه به عیار طراحی‌شده کارخانه  $37 \pm 5$  تعیین‌شده توسط کارخانه، پنجره متحرکی که به ازای آن حدود تغییرات عیار  $\bar{X} \pm 5\%$  باشد، پنجره با ابعاد ۶۵ ساعت است. همچنین برای اینکه نتایج حاصله قابل قیاس با خط چغارت باشند، محاسبه پنجره متحرک ۶۱۰ ساعت که به ازای آن تغییرات عیار در محدوده‌ی  $\bar{X} \pm 2\%$  قرار می‌گیرد.

شکل ۶ همگن شدن عیار با افزایش ابعاد پنجره متحرک را نشان می‌دهد. با توجه به مقیاس مشاهده می‌شود که با همگن شدن بیشتر، دامنه نوسانات عیار کاهش می‌یابد، به‌طوریکه پیش از اعمال میانگین متحرک دامنه نوسانات عیاری، ۱۹/۶۷

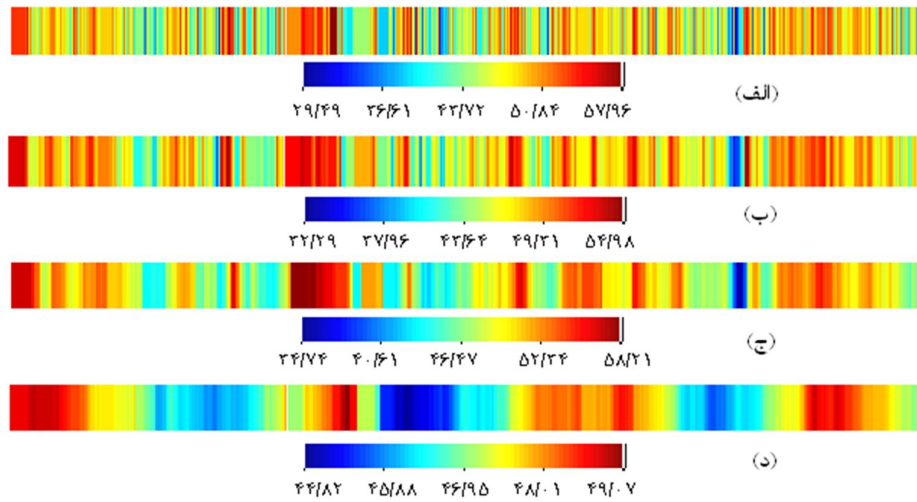
تا ۶۲/۵۲ بوده است و با اعمال میانگین متحرک کاهش یافته تا با پنجره متحرک ۶۱۰ ساعت، این تغییرات به ۴۴/۸۲ تا ۴۹/۰۷ رسیده است.

در این مرحله اقدام به ترسیم هیستوگرام‌های مربوط به هر مرحله همگن‌سازی گردید (شکل ۷). به ازای میانگین متحرک با پنجره‌های ۵، ۲۰، ۶۵ و ۶۱۰ ساعته کاهش واریانس و کاهش دامنه نوسانات عیاری به خوبی قابل مشاهده است. داده‌ها همچنان یک جامعه نرمال را تشکیل داده‌اند و به جز مورد آخر، کاملاً به دو جامعه پر عیار و کم عیار تفکیک شده است. چولگی منفی که پیش از اعمال میانگین متحرک مشاهده شده بود، پس از اعمال میانگین متحرک، با افزایش ابعاد پنجره متحرک، رفته‌رفته از بین می‌رود. نتایج حاصله از هیستوگرام‌های مذکور در جدول ۷، نشان داده شده است.

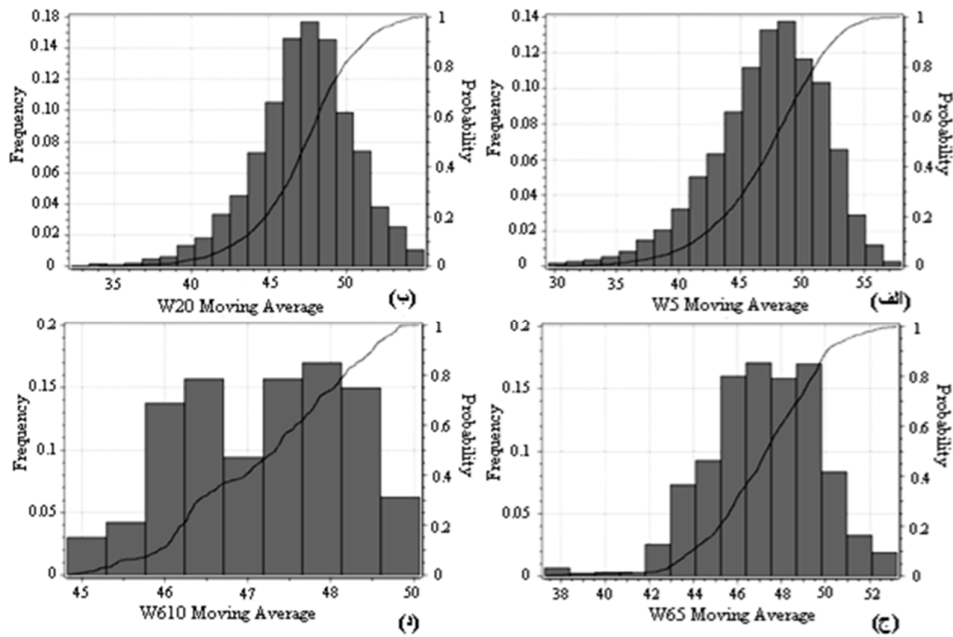
برای هر یک از میانگین‌های متحرک مذکور، اقدام به رسم واریوگرام شده است (شکل ۸) و (جدول ۸). با توجه به شیب قسمت پرش واریوگرام، هرچقدر شیب این قسمت از منحنی بیشتر باشد، محیط ناهمگن تر است و در فاصله کمتری به سقف می‌رسد، به عبارتی شعاع تأثیر کوچک‌تری دارد. بنابراین ساختار فضایی در فاصله کوچکی وجود خواهد داشت. با کاهش شیب، درجه ناهمگنی محیط کاهش می‌یابد، به این معنی که محیط همگن تر می‌شود [۵].

تغییرات تناوبی و صعودی عیار، پس از اعمال میانگین متحرک، مشهود است که با افزایش ابعاد پنجره متحرک، در اثر همگن‌سازی بیشتر و کاهش نوسانات عیاری و تغییرپذیری‌های کوچک مقیاس، تغییرات صعودی کم‌کم از بین رفته و واریوگرام حالت سینوسی بیشتری به خود می‌گیرد، به‌طوریکه در پنجره متحرک ۶۱۰ ساعت، همگن‌سازی بلند دامنه به خوبی مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۸-ج دوره تناوب بلند دامنه، ۲۶۰۰ ساعت است. شعاع تأثیر نیز با افزایش پنجره متحرک، افزایش می‌یابد، زیرا در اثر همگن‌سازی، نمونه‌ها وابستگی فضایی بیشتری به یکدیگر خواهند داشت و در نتیجه بازه زمانی برداشت نمونه، افزایش می‌یابد. همچنین کاهش اثر قطعه‌ای بیانگر کاهش خطاهای مراحل نمونه‌برداری و از بین رفتن تغییرات کوچک مقیاس در اثر همگن‌سازی بیشتر، می‌شود.



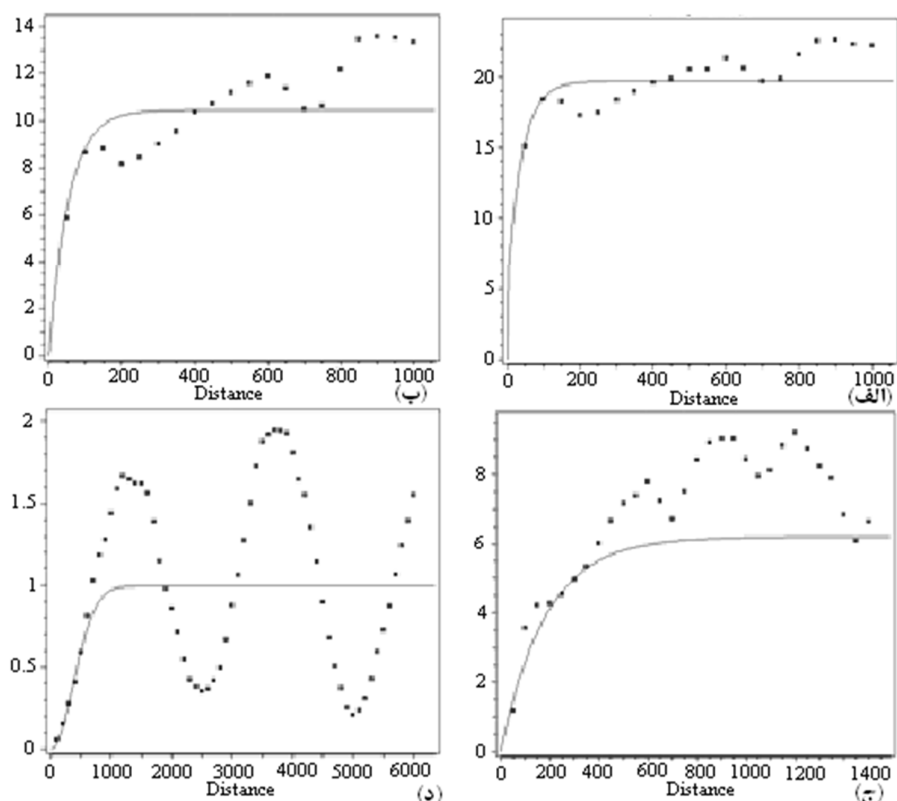
شکل ۶: تغییر پذیری عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک (الف) ۵ ساعت (ب) ۲۰ ساعت (ج) ۶۵ ساعت (د) ۱۱۰ ساعت



شکل ۷: هیستوگرام و فراوانی تجمعی (pdf+cdf) عیار آهن بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک (الف) ۵ ساعت (ب) ۲۰ ساعت (ج) ۶۵ ساعت (د) ۱۱۰ ساعت

جدول ۷: پارامترهای آماری مربوط به عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ قبل و پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک ۵ ساعت، ۲۰ ساعت، ۶۵ ساعت و ۱۱۰ ساعت

| پارامترهای آماری | تعداد داده‌ها | میانگین | واریانس | انحراف معیار | میانه | چارک بالا | چارک پایین | بیشینه | کمینه |
|------------------|---------------|---------|---------|--------------|-------|-----------|------------|--------|-------|
| ۵ ساعت           | ۳۴۲۳          | ۴۷/۱۷   | ۱۹/۷۶   | ۴/۴۴         | ۴۷/۶۵ | ۵۰/۴۳     | ۴۴/۶۰      | ۵۰/۴۳  | ۲۹/۴۹ |
| ۲۰ ساعت          | ۳۴۲۳          | ۴۷/۱۹   | ۱۰/۴۶   | ۳/۲۳         | ۴۷/۴۲ | ۴۹/۲۸     | ۴۵/۳۵      | ۵۴/۹۸  | ۳۲/۲۹ |
| ۶۵ ساعت          | ۳۴۲۳          | ۴۷/۲۰   | ۶/۲۲    | ۲/۴۹         | ۴۷/۳۰ | ۴۹/۰۸     | ۴۵/۶۰      | ۵۳/۲۴  | ۳۷/۲۵ |
| ۱۱۰ ساعت         | ۳۴۲۳          | ۴۷/۱۸   | ۰/۹۹    | ۰/۹۹         | ۴۷/۳۳ | ۴۸/۰۴     | ۴۶/۳۰      | ۴۹/۰۷  | ۴۴/۸۲ |



شکل ۸: واریوگرام عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ و برازش مدل مناسب بر واریوگرام پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک (الف) ۵ ساعت (ب) ۲۰ ساعت (ج) ۶۵ ساعت (د) ۶۱۰ ساعت

جدول ۸: پارامترهای مربوط به مدل برازش شده به واریوگرام عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون در سال ۸۸ پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک ۵ ساعت، ۲۰ ساعت، ۶۵ ساعت و ۶۱۰ ساعت

| پارامترهای واریوگرام | مدل واریوگرام | میانگین | واریانس | اثر قطعه‌ای ( $C_0$ ) | C     | سقف واریوگرام (sill) | شعاع تأثیر (ساعت) | $\frac{C_0}{C}$ |
|----------------------|---------------|---------|---------|-----------------------|-------|----------------------|-------------------|-----------------|
| ۵ ساعت               | نمایی         | ۴۷/۱۷   | ۱۹/۷۶   | ۵                     | ۱۴/۷  | ۱۹/۷                 | ۱۲۰               | ۰/۳۴            |
| ۲۰ ساعت              | نمایی         | ۴۷/۱۹   | ۱۰/۴۶   | ۰                     | ۱۰/۴۶ | ۱۰/۴۶                | ۱۶۰               | ۰               |
| ۶۵ ساعت              | نمایی         | ۴۷/۲۰   | ۶/۲۲    | ۰                     | ۶/۲۲  | ۶/۲۲                 | ۵۵۵               | ۰               |
| ۶۱۰ ساعت             | گوسی          | ۴۷/۱۸   | ۰/۹۹    | ۰                     | ۰/۹۹  | ۰/۹۹                 | ۸۰۰               | ۰               |

## ۵- نمودار کنترلی

نمودار کنترلی (نمودار تغییرپذیری) ابزاری مناسب جهت نمایش تغییرپذیری عیار و شدت آن، در طول زمان است و اغلب به وسیله‌ای این نمودار می‌توان به وجود تغییرات تناوبی یا تصادفی در طول خط جریان مواد پی برد [۴].

در این نمودارهای کنترلی، تغییرات عیار عنصر مورد نظر نسبت به زمان رسم می‌شود که با مطالعه‌ی آن، می‌توان یک دید کلی نسبت به نحوه‌ی نوسانات در خطوط جریان مواد به

دست آورد. بدین صورت می‌توان عوامل ایجاد این نوسانات را شناسایی و جهت رفع آن‌ها اقدام نمود [۵].

در یک نمودار کنترلی، میانگین عیار به دست آمده از نمونه‌ها<sup>۱</sup> ( $\bar{X}$ ) و حدود کنترلی بالایی<sup>۲</sup> (UCL) و پائینی<sup>۳</sup> (LCL)، میانگین طراحی اولیه کارخانه یا میانگین هدف<sup>۴</sup> (TA) و حدود مجاز بالایی<sup>۵</sup> (US) و پائینی<sup>۶</sup> (LS) مربوط به این میانگین، نشان داده می‌شوند. حدود کنترلی نباید با حدود مجاز اشتباه شوند. حدود مجاز توسط کارخانه بر اساس

نمونه هر یک به وزن ۰/۴۹ کیلوگرم در شعاع تأثیر بهینه به دست آمده از مدل واریوگرام یعنی ۱۱۰ ساعت برداشت شود. با توجه به اینکه مناسب‌ترین روش نمونه‌برداری در این سیستم، روش نمونه‌برداری ردیفی- تصادفی است، لذا لازم است تا فواصل زمانی ۱۱۰ ساعت به عنوان ردیف‌های ثابت در نظر گرفته شود و در این فاصله، هر یک از جزء نمونه‌ها به صورت کاملاً تصادفی برداشت شوند. بدیهی است با انجام همگن‌سازی مناسب در بستر همگن ساز، علاوه بر افزایش شعاع تأثیر، از حجم و تعداد نمونه بهینه نیز کاسته می‌شود که نه تنها در تغییرپذیری عیار ورودی بلکه در مینیمم کردن و کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری و آنالیز نیز تأثیر بسزایی خواهد داشت.

زمان بهینه همگن‌سازی کوتاه دامنه بار ورودی نوارنقاله سه چاهون ۲۰ ساعت محاسبه شده است. در خصوص زمان همگن‌سازی بلند دامنه با در نظر گرفتن حدود تغییرات عیار  $\bar{X} \pm 2\%$  به عنوان حدود مجاز، ۶۱۰ ساعت برآورد گردید. با توجه به اینکه نرخ بار ورودی به خط سه چاهون برابر با ۶۲۸ تن بر ساعت است تناژ همگن‌سازی بهینه ۳۸۳۰۸۰ تن برآورد می‌گردد. ولی با توجه به اینکه حدود تغییرات مجاز در طراحی اولیه انجام شده خط سه چاهون  $\bar{X} \pm 5\%$  است، لذا زمان همگن‌سازی برای بار ورودی خط سه چاهون ۶۵ ساعت برآورد می‌گردد که تناژ همگن‌سازی برابر ۴۰۸۲۰ تن است. با توجه به ظرفیت ۱۲۰۰۰۰ تنی هر یک از بسترهای همگن ساز خط سه چاهون، امکان همگن‌سازی با حدود مجاز مشابه خط چغارت ( $\bar{X} \pm 2\%$ )، وجود نداشته و می‌بایست تعداد یا ظرفیت بسترهای همگن ساز موجود را افزایش داد. در غیر این صورت می‌توان همگن‌سازی را با حدود مجاز ( $\bar{X} \pm 5\%$ )، به حجم کل ۴۰۸۲۰ تن انجام داد.

نکته قابل توجه که در همه مدل‌سازی‌ها مشخص گردید این است که افزایش ابعاد پنجره متحرک منجر به کاهش دامنه نوسانات عیاری، کاهش شدید اثر قطعه‌ای واریوگرام‌ها و به تبع آن افزایش پیوستگی فضایی نمونه‌ها و افزایش شعاع تأثیر می‌گردد و در نتیجه امکان افزایش فواصل نمونه‌برداری و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورد. تغییرات کوچک مقیاس عیار، در اثر قطعه‌ای واریوگرام نمایان شده و تغییرات بزرگ مقیاس، در واریانس کلی جامعه و تغییرات تناوبی آن نمایان می‌گردد.

طراحی‌های اولیه تعیین می‌شود. اگرچه هدف شناخت تغییرپذیری‌ها است ولی حدود مجاز به تغییرپذیری فرآیند بستگی ندارد. بنابراین تعیین حدود کنترلی قابل قبول که امکان کنترل فرآیند بر اساس حدود مجاز را می‌دهد، بر عهده کارشناس کنترل فرآیند است [۷].

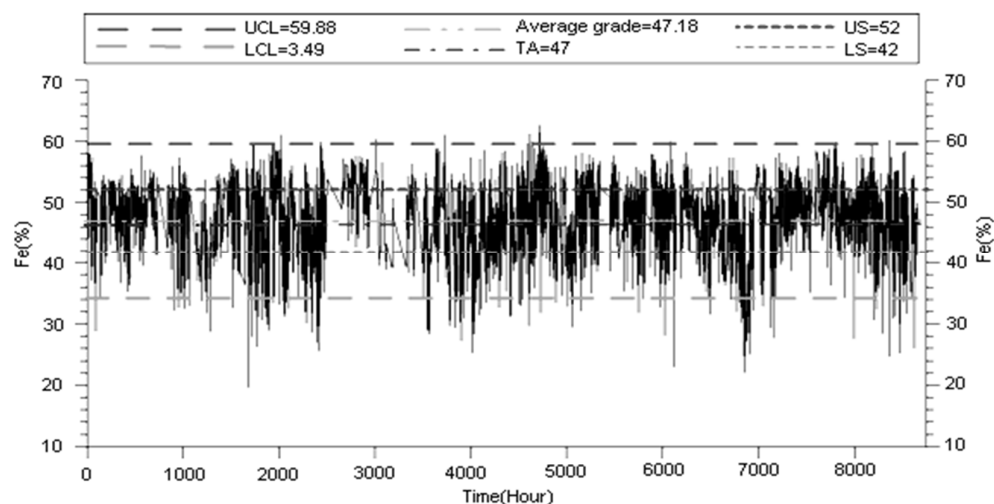
نمودار کنترلی عیار آهن در بار ورودی در خط چغارت در شکل ۹ رسم شده است. ملاحظه می‌شود که عیار آهن، نوسانات زیادی را متحمل شده، به‌طوری‌که عیار آهن از ۲۰٪ تا ۶۴٪ متغیر بوده است. میانگین عیار آهن ۴۸/۱۷٪ است. حدود کنترلی به دست آمده بر اساس این میانگین، خیلی بزرگ‌تر از حدود کنترلی مجاز تعیین شده توسط کارخانه است، لذا در مراحل بعد، با همگن‌سازی بهینه، می‌بایست بهترین حالت جهت کمینه کردن اختلاف بین این دو حدود و حتی کمتر شدن حدود کنترلی از حدود مجاز کارخانه صورت گیرد. عبور عیار از مقدار LCL نشان‌دهنده شدت تغییرات عیار، در عیارهای پایین است.

با مقایسه نمودارهای کنترلی عیار آهن بر حسب زمان برای پنجره‌های متحرک مذکور در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که در این جا اثر تغییرات و نوسانات ریز کوچک مقیاس حذف گردیده و تنها نوسانات بزرگ مقیاس عیار آهن در طی زمان نمایان شده و از چگالی (تراکم) نمودار به شدت کاسته شده است. همانطور که گفته شد، در اثر افزایش پنجره متحرک، دامنه نوسانات عیاری کاهش می‌یابد که این مطلب در نمودار کنترلی رسم شده برای هر یک از پنجره‌های متحرک ۵، ۲۰، ۶۵ و ۶۱۰ ساعت کاملاً مشهود است. ملاحظه می‌شود که با ۶۱۰ ساعت همگن‌سازی، از شدت تغییرات عیار به شدت کاسته شده و حدود کنترلی نیز کمتر از حدود مجاز تعیین شده کارخانه است.

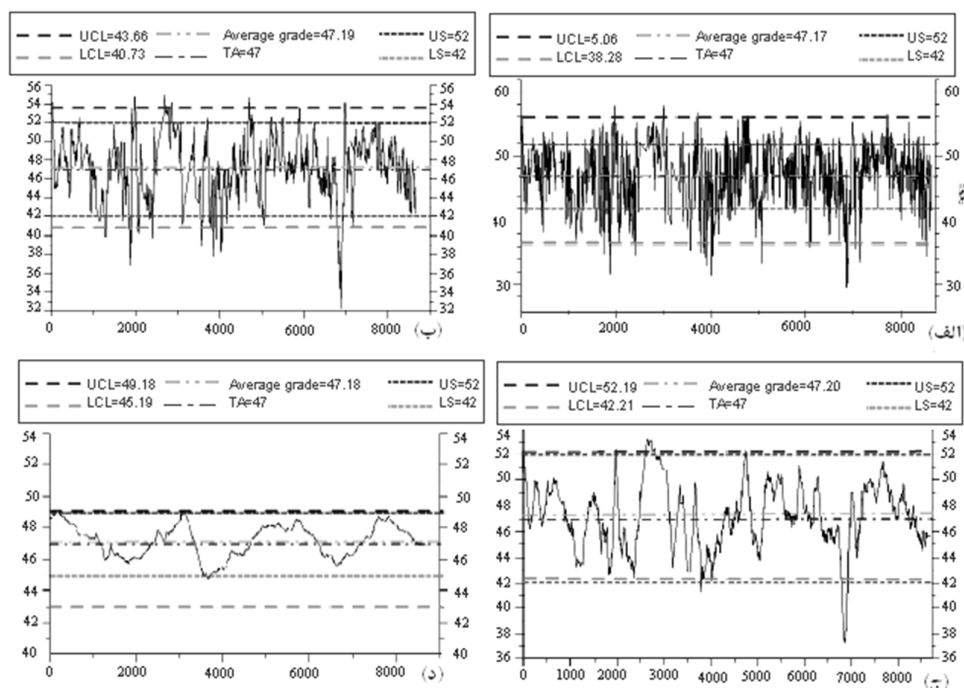
## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه بر روی خوراک ورودی خط سه چاهون، نتیجه می‌شود که عدم وجود برنامه همگن‌سازی مناسب، باعث بالا رفتن ناهمگنی‌های ترکیبی و توزیعی در بار ورودی شده است. این مشکل به خوبی در واریوگرام ترسیم شده به خاطر بالا بودن اثر قطعه‌ای این واریوگرام و غلبه بخش تصادفی به بخش ساختاردار آن نمود یافته است.

در این شرایط به منظور نمونه‌برداری بهینه با توجه به نتایج به دست آمده از روش دو وزنی، لازم است تا تعداد ۳۰



شکل ۹: نمودار کنترلی عیار آهن در بار ورودی خط سه چاهون پیش از همگن سازی



شکل ۱۰: نمودار کنترلی عیار آهن در بار ورودی سه چاهون در سال ۸۸ پس از اعمال میانگین متحرک با پنجره متحرک (الف) ۵ ساعت (ب) ۲۰ ساعت (ج) ۶۵ ساعت (د) ۶۱۰ ساعت

## ۷- تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است تا از مدیریت شرکت سنگ آهن مرکزی- بافق و مرکز پژوهشی سنگ آهن که امکان انجام این تحقیق را فراهم آوردند و همچنین کارشناسان کارخانه فرآوری و واحد آزمایشگاه معدن به خاطر همکاری در نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها صمیمانه تشکر گردد.

## ۸- مراجع

- [۱] شرکت مهندسی کاوش زمین یزد؛ ۱۳۸۰؛ "طرح بهره‌برداری از معدن سنگ آهن چغارت"؛ شرکت ملی فولاد ایران؛ وزارت صنایع و معادن.
- [۲] حسنی پاک، ع؛ ۱۳۸۴؛ "نمونه‌برداری معدنی (اکتشاف، استخراج و فرآوری)؛" دانشگاه تهران.
- [۳] تقوایی نژاد، م؛ شایسته فر، م؛ دیانتي، م؛ جلالی، م؛ ۱۳۸۸ " به‌کارگیری ابزارهای آماری در ارزیابی نوسانات عیاری

خوراک کارخانه پرعیار کنی مجتمع مس سرچشمه"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره چهارم، شماره هشتم، ص ۵۹-۶۶.

[4] 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, pp. 109-122.

[۵] حسنی‌پاک، ع؛ ۱۳۸۹؛ زمین آمار (ژئواستاتستیک)؛ دانشگاه تهران.

[6] Thyse E.L., Akdogan G., Viljoen R.M.; 2009; "*The application of time series variography as an aid in controlling the %SiO<sub>2</sub> within a feed stream to an ilmenite smelter*"; The 7th International Heavy Minerals Conference 'What next', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, pp.123-128.

[7] Pitard F.F.; 1993; *Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: Hetrogeneity, Sampling Correctness, and Statistical Process Control*; International Standard Book; Number 93-3569.

- 
- 1- Average Grade
  - 2- Upper Control Limit
  - 3- Lower Control Limit
  - 4- Target Average
  - 5- Upper Specification
  - 6- Lower Specification