

برنامه‌ریزی سطح تولید: رویکرد بهبود بهره‌وری بر اساس مدل‌های کنترل کننده R2R

نویسندگان: دکتر مهدی کرباسیان*^۱ و دکتر رضا برادران کاظم‌زاده^۲

۱. استادیار دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

۲. دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

*E-mail: mkarbasian@yahoo.com

چکیده

معمولاً رابطه بین سطح تولید و منابع مصرف شده می‌تواند میزان بهره‌وری را نشان دهد. بنابراین تعیین میزان تولید در هر مرحله (Run) با توجه به شرایط پیش آمده در مرحله قبل به منظور نزدیک شدن به مقدار ایده‌آل بهره‌وری مهم است. در این مقاله بر اساس مقدار واقعی بهره‌وری که در هر مرحله اندازه‌گیری می‌شود و استفاده از مدل‌های کنترلی Run-to-Run (R2R)، مقدار مناسب تولید برای مرحله بعد پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر این میزان تغییرات و نا بالانسی سطح تولید حداقل می‌گردد. کنترل کننده R2R که در این مقاله استفاده شده است، شامل یک مدل پیش‌بینی بهره‌وری و همچنین یک رویه هموارکننده موزون متحرک نمایی (Exponentially Weighted Moving Average) (EWMA) است. مدل مطرح شده در این مقاله برای اولین بار توانسته است یک دیدگاه مشترک بین مدیران و مهندسين در زمینه ارتقاء بهره‌وری ایجاد کند که این خود اساس ایجاد یکپارچگی مناسبی در برنامه‌ریزی استراتژیک از یک طرف و برنامه‌ریزی عملیاتی را از طرف دیگر فراهم می‌آورد. این توانایی در یک مطالعه موردی که در صنعت فولاد سوپر آلیاژی انجام شده بررسی و تحلیل شده است.

کلید واژه‌ها: تعالی بهره‌وری، برنامه‌ریزی تولید، کنترل کننده R2R

مقدمه

اندازه‌گیری بهره‌وری و ارزیابی آن باعث ارتقاء بهره‌وری می‌شود و معیارهای بهره‌وری، اطلاعات جامعی را از وضعیت سازمان در اختیار تحلیل‌گر قرار می‌دهند. این اطلاعات نقش عمده‌ای را در ارائه راه حل و برنامه‌ریزی برای ارتقاء بهره‌وری خواهند داشت [۱].

اندازه‌گیری بهره‌وری باعث فراهم آوردن اطلاعات بازخورد برای سازمان می‌گردد. اطلاعات بازخورد در قالب اندازه‌های بهره‌وری کارکنان را از اثر اقداماتشان آگاه می‌سازد و قدرت یادگیری آنها را بالا می‌برد. همچنین انگیزه آنها را پس از مشاهده، درک و احساس موفقیت‌هایشان افزون می‌کند [۲].

یکی از روش‌های معمول اندازه‌گیری بهره‌وری محاسبه مستقیم ثبت ستانده به داده می‌باشد و شاخص‌هایی که برای محاسبه ستانده یا خروجی استفاده می‌شوند معمولاً ارزش کل تولیدات می‌باشد [۲]. ارزش داده‌ها نیز عبارت است از مجموع ارزش مواد خام اولیه، ابزار و لوازم مصرفی، سوخت، انرژی و آب خریداری شده و پرداختی بابت خریدهای خارج از واحد صنفی [۲].

بنابراین می‌توان گفت، بهره‌وری رابطه بین مقدار تولید را با منابع صرف شده نشان می‌دهد [۲]. در این صورت تعیین میزان تولید یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های تصمیم‌گیری در امر برنامه‌ریزی تولید و بهره‌وری می‌باشد. اما همواره مسائل و مشکلاتی در صحنه فرایند به وجود می‌آیند که هزینه‌ای بر سیستم تحمیل و یا باعث عدم تحقق درآمد پیش‌بینی شده می‌گردند و بنابراین میزان بهره‌وری حاصل شده از آن مقدار هدف و ایده‌آل کمتر می‌گردد. از جمله عواملی که باعث عدم تحقق بهره‌وری ایده‌آل می‌گردند، می‌توان به عواملی نظیر هزینه‌های پیش‌بینی نشده، ارزیابی محصولات به خاطر ضعیف شدن کیفیت، استفاده از طرح‌های نمونه‌گیری فشرده برای پذیرش محصولات و کاهش ارزش تولیدات به خاطر کیفیت نامنطبق اشاره کرد.

واضح است فعالیت‌های بهبود مستمر در راه افزایش کیفیت و کاهش ضایعات شرط اصلی افزایش بهره‌وری است لکن از طرف دیگر، از نظر برنامه‌ریزی تولید، تعیین و تنظیم مقدار مناسب تولید، بر اساس وضعیت موجود به نحوی که از نظر ارزشی، مقدار بهره‌وری تحقق یابد بسیار مهم است. در بخش بعد سعی می‌گردد بعد از آشنایی با کنترل‌کننده‌های R2R، از آن‌ها به عنوان تکنیکی مهندسی و آماری برای تنظیم مناسب مقدار تولید در جهت ارتقاء بهره‌وری استفاده کنیم.

سؤالات تحقیق

این تحقیق مشخصاً به دنبال پاسخگویی به سؤالات زیر است:

۱. رابطه دیدگاه‌های مدیریتی با دیدگاه‌های مهندسی در بهره‌وری چیست و چگونه این رابطه را می‌توان به صورت کمی بیان کرد؟
۲. چگونه می‌توان به صورت همزمان حداکثر صحت و دقت را در رسیدن به بهره‌وری ایده‌آل در هر پریود کسب کرد؟
۳. تأثیر پارامترهای تولید بر سطح تولید در مرحله بعد چیست و چگونه می‌توان آن را به صورت دینامیک در تعیین میزان تولید در آن مرحله دخالت داد؟
۴. آیا مدل کنترل‌کننده R2R می‌تواند به عنوان یک چارچوب مفهومی در تنظیم سطح تولید بر مبنای بهبود بهره‌وری کاربرد داشته باشد؟ در آن صورت بهترین سطح پارامترهای این مدل چگونه تعیین می‌گردند؟

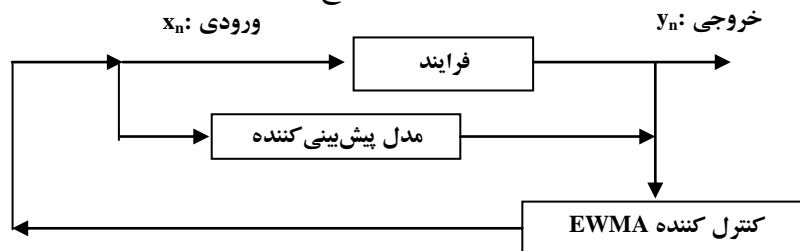
روش تحقیق

از آنجا که این تحقیق به دنبال طراحی مدل کنترل‌کننده R2R به منظور تعیین مقدار بهینه تولید بر اساس بهبود بهره‌وری است. تلاش می‌کند تا با بهره‌گیری از مفاهیم تئوری مطرح در بحث کنترل‌کننده‌های R2R و تفکر عمیق، چارچوب مفهومی مورد نظر را طراحی کند. این چارچوب در مراحل ابتدایی بر اساس دریافته‌ها و استنباط‌های محقق از ادبیات موضوع به دست می‌آید و

این کنترل‌کننده از ۲ مرحله اصلی تشکیل شده است. مرحله اول، ساختن یک مدل خطی رگرسیونی است که متغیرهای ورودی را به متغیرهای خروجی مرتبط می‌کند. این مدل وظیفه پیش‌بینی رفتار سیستم را در هر مرحله دارد. پارامترهای این مدل، معمولاً براساس اطلاعات حاصل از مراحل قبلی تخمین زده می‌شود.

در مرحله دوم اختلاف بین خروجی واقعی فرایند و مقدار پیش‌بینی شده به وسیله مدل، توسط رویه EWMA همواره‌سازی می‌گردد تا بتوان مقدار ورودی فرایند را در مرحله بعد تخمین زد. نکته مهم اینجاست که همزمان با تعیین مقدار جدید ورودی، رویه EWMA با تخمین مجدد عرض از مبدا در مدل رگرسیونی، مدل پیش‌بینی را به‌نگام نیز می‌کند. به‌عبارت دیگر در عملیات به‌نگام کردن مدل، اغتشاشات و شرایط دینامیک فرایند در هر مرحله در تغییر مستمر عرض از مبدا اعمال می‌گردند [۵]. در این مقاله سطح تولید در هر مرحله به عنوان متغیر قابل کنترل و بهره‌وری به عنوان یک مشخصه کیفی در نظر گرفته شده است بنابراین یک متغیر قابل کنترل و یک مشخصه کیفی SISO (Single Input Single Output) وجود دارد. همچنین فرایند دارای نرخ اغتشاش (Drift) نمی‌باشد. تحقیقات انجام شده توسط محققین بر اساس تعداد ورودی- خروجی و وجود نرخ اغتشاش، در جدول ۱، آمده است.

کنترل‌کننده‌های R2R برای طراحی تکنولوژی تولید با مزیت رقابتی استفاده شده است [۱۳]. همچنین این مدل‌ها برای کاهش ضایعات در تولید نیمه‌هادی‌ها و در نتیجه افزایش بهره‌وری کاربرد دارند [۱۴]. این گونه مدل‌ها توانسته‌اند یکنواختی مشخصه‌های کیفی در بسیاری از صنایع را تضمین کنند [۱۵].



شکل ۱. ساختار اساسی کنترل‌کننده R2R

به تدریج با بهره‌گیری از تفکر عمیق، واضح‌تر و غنی‌تر خواهد شد. سپس به منظور اعتبارسنجی مدل و اجرای آن شواهد محیط در صنعت سوپرآلیاژی شناسایی شده و با چارچوب ارائه شده، تطبیق داده می‌شود.

روش گرد آوری و تحلیل داده‌ها

برای اجرای مدل، فرایند ذوب‌سازی در صنعت سوپر آلیاژی انتخاب گردیده است. ابتدا سطح تولید در ۹ هفته متوالی بررسی شده است. همچنین پارامترهای هزینه‌ای مورد نیاز از بخش حسابداری صنعتی بر اساس میانگین یک ساله اخیر به دست آمده است و با توجه به اجرای مدل ریاضی طراحی شده در مقاله (رابطه ۱۹)، مقدار پیش‌بینی تولید در ۴ هفته آخر محاسبه شده است. در بحث تحلیل داده‌ها، نه تنها استفاده از آمار توصیفی مانند نمودار جعبه‌ای، یکنواختی تولید و بهبود بهره‌وری را نمایش می‌دهد. بلکه استفاده از آمار استنباطی و تخمین فاصله اطمینان برای تفاوت میانگین میزان تولید در دو حالت قبل و بعد از پیاده‌سازی مدل، نشان‌دهنده افزایش معنادار سطح تولید می‌باشد.

کنترل‌کننده‌های R2R

کنترل‌کننده R2R، تکنیکی است که ابزاری چون کنترل آماری فرایند، کنترل مهندسی و تنظیم براساس بازخورد را به منظور افزایش دقت و صحت مشخصه کیفی فرایند به صورت همزمان استفاده می‌کند [۳].

این تکنیک در اوایل دهه ۹۰ میلادی توسعه داده شد [۴] و بیشتر در کنترل کیفیت محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱، ساختار اساسی این نوع کنترل‌کننده را نشان می‌دهند.

جدول ۱. دسته بندی تحقیقات انجام شده برای کنترل‌کننده‌های R2R از جهت تعداد ورودی-خروجی و اغتشاش

مدل ورودی - خروجی	فرآیند	بدون اغتشاش	همراه با اغتشاش
چند ورودی - یک خروجی / تک ورودی - تک خروجی		Ingolfsson and Sach [6] Tseng, et al.[7]	Bulter and Stefani [4] Del Castillo [9] Tseng, Chou and Lee [10] Tseng & Hsu [11]
چند ورودی - چند خروجی		Tseng, Chou and Lee [8]	Lee [12]

که در آن:

a' : ارزش هر واحد تولید

x_n : میزان تولید در مرحله n

b' : هزینه متغیر هر واحد تولید

c : هزینه ثابت برای هر واحد تولید

و همچنین P_n میزان ایده‌آل بهره‌وری در هر مرحله می‌باشد.

حال با توجه به شناخت کسب شده از عملکرد کنترل‌کننده R2R می‌توان گفت، تغییرات و اغتشاشات به وجود آمده در صحنه فرایند، که موجب تغییر در بهره‌وری شده‌اند را می‌توان در پارامتر c منعکس کرد. به عبارت دیگر در هر مرحله، مدل (۵)، با توجه به تغییرات در پارامتر c به هنگام می‌گردد. گفتنی است مقدار اولیه پارامترهای a' ، c ، b' با استفاده از وضعیت فرایند تخمین زده شده‌اند. این در حالیست که میزان تولید در هر مرحله به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$x_n = \frac{P_n c}{a' - P_n b'} \quad (6)$$

$$c_n = \frac{(a' - P_n b') x_n}{P_n} \quad (7)$$

حالا با استفاده از رویه EWMA می‌توان مقدار c_n را در هر مرحله به صورت زیر به دست آورد.

$$c_n = \lambda \left(\frac{(a' - P_n b') x_n}{P_n} \right) + (1 - \lambda) c_{n-1} \quad (8)$$

میانگین مربع خطای مجانبی (Asymptotic Mean

Square Error) AMSE، در این حالت برابر است با [16]:

$$AMSE(P_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} E(P_n^2) \quad (9)$$

اصطلاح مجانبی از این حقیقت ناشی می‌شود که این نوع کنترل‌کننده‌ها به خاطر شرایط اولیه در معادلات EWMA، دارای تغییرات کوتاه مدت بوده که باید از

اگر مدل رگرسیونی کنترل‌کننده R2R را به صورت زیر در نظر بگیریم [۳]:

$$y_n = \alpha + \beta x_{n-1} \quad (1)$$

که در آن، y_n خروجی هر مرحله و x_{n-1} ورودی مربوط به آن خروجی می‌باشد و پارامترهای α و β در مرحله اول تخمین زده می‌شوند. اگر T مقدار ایده‌آل برای خروجی باشد، مقدار ورودی برابر خواهد بود با:

$$x_n = \frac{T - a}{b} \quad (2)$$

که در آن a و b تخمین‌های α و β می‌باشند. اگر عرض از مبدا a در هر مرحله توسط رویه EWMA بر اساس اختلاف بین مقدار واقعی خروجی و مقدار پیش‌بینی شده بهنگام شود، خواهیم داشت:

$$a_n = \lambda (y_n - b x_{n-1}) + (1 - \lambda) a_{n-1} \quad (3)$$

که در آن $0 \leq \lambda \leq 1$.

در رابطه (۳)، a_n مقدار عرض از مبدا بهنگام شده در مرحله n ، و λ پارامتر رویه EWMA می‌باشد. با توجه به رابطه (۳)، رابطه (۲)، به صورت زیر باز نویسی می‌گردد:

$$x_n = \frac{T - a_n}{b} \quad (4)$$

که x_n ورودی در هر مرحله n می‌باشد.

اکنون در این مقاله، به جای مدل ساده رگرسیونی یک مدل کسری که می‌تواند بهره‌وری را منعکس کند در نظر می‌گیریم و در هر مرحله میزان تولید را به صورت پیوسته با هدف بهبود بهره‌وری تعیین می‌کنیم. اگر با توجه به دیدگاه مدیریتی، بهره‌وری را خارج قسمت ستانده به داده و بر حسب ارزش ستانده و داده در نظر بگیریم می‌توانیم بهره‌وری را به صورت زیر معرفی کنیم [۲]:

$$P_n = \frac{a' x_n}{b' x_n + c} \quad (5)$$

در رابطه (۱۸) مقدار $(\sigma_\varepsilon^2 + \frac{\lambda^2 \xi \sigma_\varepsilon^2}{2 - \lambda \xi})$ ، واریانس

مجانبی AVAR (Asymptotic Variance) و $(\frac{\delta}{\lambda \xi})^2$ میزان اربب مجانبی خروجی می‌باشد. بنابراین با استفاده از مدل ریاضی (۱۹) می‌توان مقدار بهینه λ را به طوریکه شرط تعادل سیستم همزمان با حداقل کردن اربب و واریانس تحقق یابد محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} \text{Min } \text{AMSE}(P_n) \\ 0 < \lambda \leq 1 \\ |1 - \lambda \xi| \leq 1 \end{aligned} \quad (19)$$

شرط $|1 - \lambda \xi| \leq 1$ در این مدل به منظور پایداری اضافه شده است [۱۷] که بر اساس ماتریس ویژه Γ به دست آمده است. همچنین در مدل ۱۹، واریانس مجانبی بخشی از تابع هدف می‌باشد که کمینه می‌گردد. در مرحله بعد با استفاده از مقدار بهینه λ که از مدل (۱۹) به دست آمده و با توجه به رابطه (۶) میزان بهینه تولید در هر مرحله با در نظر گرفتن استراتژی مدیریت در بحث بهره‌وری، مشخص و برنامه‌ریزی می‌گردد.

مطالعه موردی

در صنعت فولاد سوپر آلیاژی، بخش ذوب‌سازی، اساسی‌ترین قسمت تولیدی می‌باشد. این بخش خوراک دیگر قسمت‌های تولید از جمله ریخته‌گری، آهنگری، عملیات حرارتی و تکمیل محصول را فراهم می‌کند. شکل ۲، عملیات تولیدی را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

میزان ذوب تولید شده در بخش ذوب‌سازی مستقیماً روی مقدار شمش تولیدی مؤثر است. از طرف دیگر باید توجه داشت که ارزش هر کیلوگرم فولاد آلیاژی در مقابل فولاد معمولی بسیار بالاتر می‌باشد و از این لحاظ برنامه‌ریزی رکن اصلی را در میان دیگر برنامه‌ریزی‌های مدیریت به خود اختصاص می‌دهد. همچنین هزینه انحراف از هدف و ضایعات در این نوع تولید، بسیار بالاتر از فرایند ساخت فولاد معمولی است.

شرایط پایداری آن جدا شود. با توجه به معادله‌های (۶) و (۹)، معادله حلقه- بسته به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶].

برای حل مجموعه معادلات دیفرانسیل (۸)، در این کنترل‌کننده از روش فضای حالت باید استفاده کرد. بردار حالت به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$z'_n = (c_{n-1}, n) \quad (10)$$

با تعریف فوق می‌توان معادلات فوق را در فضای حالت به صورت زیر نشان داد.

$$z_{n+1} = Az_n + W_n$$

$$P_n = C'z_n + R_n$$

که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \lambda \xi & \lambda \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ W_n = \begin{bmatrix} \lambda(c + \varepsilon_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

همچنین $R_n = c + \varepsilon_n$ و $C' = (-\xi, \delta)$ می‌باشد [۱۶]. با استفاده از معادله زیر می‌توان خروجی فرایند را محاسبه، همچنین وضعیت پایداری آن را بررسی کرد [۱۷]

$$z_n = A^n z_0 + \sum_{j=1}^{n-1} A^{n-j-1} W_j \quad (15)$$

ماتریس A^n با استفاده از رابطه $A^n = p \Gamma^n p^{-1}$ محاسبه می‌شود که در آن:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 - \lambda \xi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

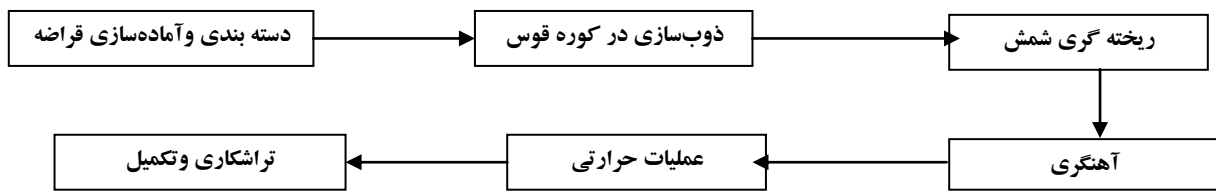
بر اساس تئوری فضای حالت می‌توان نتیجه‌گیری کرد، موقعی مشخصه کیفی حالت پایدار دارد که شرط $|1 - \lambda \xi| \leq 1$ برقرار باشد. اگر $z_0 = (0, 0)$ در آن صورت، با فرض پایدار بودن فرایند داریم.

$$\text{Lim}_{j \rightarrow \infty} \sum_{j=0}^{n-1} (1 - \lambda \xi)^{n-j-1} = 1 / \lambda \xi \quad (17)$$

$$y_n = \frac{\delta}{\lambda \xi} - \xi \lambda \sum_{j=0}^{n-1} (1 - \lambda \xi)^{n-j-1} \varepsilon_j + \varepsilon_n$$

از رابطه (۱۷) به دست می‌آوریم:

$$\text{AMSE}(y_n) = \text{Lim}[y_n^2] = \sigma_\varepsilon^2 + \frac{\lambda^2 \xi \sigma_\varepsilon^2}{2 - \lambda \xi} + (\frac{\delta}{\lambda \xi})^2 \quad (18)$$



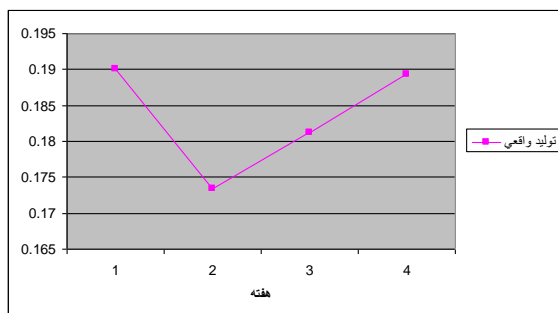
شکل ۲. فرایند تولید در فولاد آلیاژی

b: هزینه متغیر هر تن مذاب سوپر آلیاژی استاندارد تولید شده شامل هزینه مقدار قراضه شارژ شده، انرژی مصرفی، مواد آلیاژی، نیروی انسانی و...
c: هزینه ثابت تولید در مذاب‌سازی به ازاء هر واحد تولید.

جدول ۲ مقادیر این پارامترها را بر اساس میانگین یک ساله اخیر نشان می‌دهد.
اگر مقدار ایده‌آل بهره‌وری در یک دوره ۰/۷۵ توسط مدیریت تعیین شده باشد، با توجه به روابط (۱۹) و (۶)، پیش‌بینی تولید در ۴ هفته آخر به صورتی که در جدول ۳ آمده مشخص گردیده است.

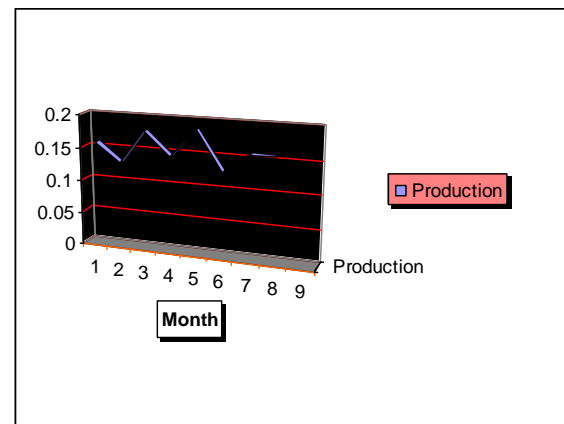
جدول ۲. مقدار برآورد شده پارامترهای مدل پیش‌بینی

پارامتر	مقدار (به صد هزار تومان)
a	۳۹,۴
b	۱۵,۶
c	۷,۱



شکل ۴. روند تولید را در چهار هفته اخیر

از نظر تکنیکی در فرایند ذوب‌سازی میزان تولید در هر پرپود (یک هفته) بر روی مقدار تولید در پرپود دیگر کاملاً مؤثر است. علت این امر استهلاک تدریجی اجزای سیستم ذوب ساز و وجود مواد مذاب مراحل قبل در سیستم می‌باشد. شکل ۳، آمار میزان تولید در ۹ هفته متوالی را نشان می‌دهد. نمودار، مشخص می‌کند، میزان تولید به صورت یک سری ایستای خود همبسته (Stationary Auto correlated) می‌باشد [۵].



شکل ۳. روند تولید ذوب‌سازی در ۹ هفته متوالی (بر حسب تن)

با توجه به موارد فوق استفاده از یک سیستم کنترل R2R بر اساس نزدیک شدن به مقدار ایده‌آل بهره‌وری در هر مرحله می‌تواند در فرایند ذوب‌سازی اثربخش باشد. به این منظور و با توجه به پارامترهای تعریف شده در بخش قبل خواهیم داشت:

a: ارزش هر واحد(تن) مذاب سوپر آلیاژ استاندارد تولید شده در قسمت ذوب‌سازی

جدول ۳. برنامه‌ریزی تولید بر اساس مدل R2R در چهار هفته اخیر

مقدار بهنگام شده هزینه ثابت (Cn)	تولید واقعی	مقدار برنامه‌ریزی شده تولید	هفته
۷/۰۹۲۱۰۲۶۶۷	۰/۱۹۰۱	۰/۱۹۲۲۳۸۲۶۷	۱
۷/۰۲۳۳۱۶۶۴	۰/۱۷۳۴	۰/۱۹۲۰۲۴۴۴	۲
۶/۹۹۰۲۱۶۷۶	۰/۱۸۱۲	۰/۱۹۰۱۶۱۹۹۶	۳
۶/۹۹۰۳۴۳۰۸۴	۰/۱۸۹۳	۰/۱۸۹۲۶۵۷۹۷	۴
		۰/۷۵	P
		۰/۱	lambda

نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

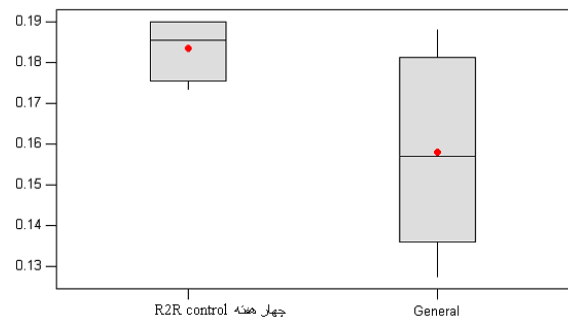
در این مقاله با الهام گرفتن از تکنیک R2R در کنترل مهندسی و انجام تغییراتی در آن، مدلی برای برنامه‌ریزی تولید به منظور بهبود بهره‌وری توسعه داده شد.

سادگی مدل، کاهش پراکندگی و افزایش صحت میزان تولید، عملیاتی بودن، عدم نیاز به داده‌های فراوان و مختلف و برقراری ارتباط با مهندسیین کنترل از جمله بخشی از مزایای مدل مطرح شده است که کارایی آن در صنعت سوپر آلیاژی بررسی گردید. این مدل دیدگاه‌های مدیریتی را در اندازه‌گیری بهره‌وری به دیدگاه مهندسی در اندازه‌گیری آن نزدیک می‌گرداند و از این لحاظ یک دید مشترک بین این دو دسته ایجاد کرده که این خود نقش مؤثری در یکپارچگی سازمان و تصمیمات آن دارد.

مدل توسعه داده شده در این مقاله در حالت SISO می‌باشد که می‌توان آن را برای تحقیقات بعدی به حالت MIMO (Multiple Input Multiple Output) گسترش داد به عبارت دیگر X یک بردار به اندازه تعداد محصولات بوده و پارامترهای a, b, c, P نیز حالت برداری پیدا کرده و مقدار تولید برای مجموعه‌ای از محصولات به دست آید. دینامیک بودن مقدار ایده‌آل P برای هر مرحله نیز قابل بررسی است. همچنین می‌توان به جای مدل ۵، عملکرد دیگر مدل‌هایی که در ادبیات بهره‌وری مطرح هستند را بررسی کرد.

لازم به یاد آوری است که برای تعیین مقدار تولید در هر مرحله، مقدار اختلاف تولید واقعی (بدون ضایعات) مرحله قبل و مقدار پیش‌بینی شده آن براساس رویه EWMA هموارسازی شده و علاوه بر تعیین میزان تولید در مرحله بعد، پارامتر C_{n+1} نیز در مدل پیش‌بینی بهنگام می‌شود. شکل ۴ وضعیت تولید را در چهار هفته اخیر نشان می‌دهد.

با استفاده از آزمون t برای تفاوت میانگین‌های مربوط به میزان تولید در دو جامعه (جامعه اول چهار هفته اخیر و جامعه دوم ۹ هفته) با اطمینان ۹۵٪ فاصله اطمینان مقدار (۰/۰۴۴۲۶ تا ۰/۰۰۶۸۷) را نشان می‌دهد (نرم‌افزار مورد استفاده Minitab 14 است) که حاکی از افزایش معنا دار در تولید و بهره‌وری می‌باشد. همچنین رسم نمودارهای جعبه‌ای (Box Plot) (شکل ۵) برای دو جامعه فوق کاهش پراکندگی را نیز برای ۴ هفته اخیر اثبات می‌کند.



شکل ۵. کاهش پراکندگی تولید در چهار هفته اخیر

منابع

9. Del Castillo, E. (1999) Long run and transient analysis of a double EWMA feedback controller. IIE Transactions:Vol. 31: pp.1157-1169.
10. Tseng, S.T.,Chou, R.J., and Lee, S.P.,(2002b) Statistical design of double EWMA controller, Applied Stochastic Models in Business and Industry:Vol18: pp. 313-322.
11. Tseng, S.T., Hsu, N.j., (2005) Sample Size Determination for Achieving Asymptotic Stability of dEWMA Feedback control Scheme. IEEE Technology and Society Magazine: Vol19:pp. 427-444.
12. Lee,S.P.,(2001) Global Stability of Double EWMA Controller.PhD Thesis,Michigan State University.
13. Sonderman, T., (2001) APC as a competitive manufacturing technology:getting it right for 300mm, AEC/APC Symposium XIII.
14. Baliga,j. (1999) Advanced process control:soon to be must, Semiconductor:Vol3.
15. Bunkofske,R., (2000)Using real- time process control to enhance performance and improve yield learning, Micro:Vol10
16. Del Castillo, E. (2002) Statistical Process Adjustment for Quality Control. John Wiley & Sons.NewYork.
17. Astrom, K.J. and Wittenmark, B. (1997) Computer controlled systems, Theory and Design. 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
۱. شیبا، شوچی، (۱۳۸۰) رویکرد نوین مدیریت کیفیت جامع در آمریکا، ترجمه محمد اقدسی، انتشارات ساپکو، تهران، ص ۱۲۵
۲. خاکی، غلامرضا، (۱۳۷۷) آشنایی با مدیریت بهره‌وری (تجزیه و تحلیل آن در سازمان)، انتشارات سایه نما، تهران، ص ۶۹
3. Del Castillo, E. and Hurwitz, A, (1997) Run to Run process control: a review and some extensions , Journal of Quality Technology:Vol 29: pp. 184-196.
4. Butler and Stefani, j. A. (1994) Supervisory run to run to run to run controls of a polysilicon gate etch using insitu elipsometry, IEEE Transactions on semiconductor manufacturing:Vol: 7: pp.193-201.
5. Box and Luceno.(1997) Statistical control: By monitoring and feedback adjustment. Prentice Hall. NY: pp.195-200
6. Ingolfsson, A.and Sachs, e.; Hu, A; (1995) Run by Run process control: combining SPC and feedback control. IEEE Transactions on semiconductor manufacturing: Vol.8: pp.26-43.
7. Tseng, S.T., Yeh, A.B., Tsung, f., and Chan, Y.Y., (2003) A Study of Variable EWMA Controller, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing:Vol16:pp. 633-643.
8. Tseng, T.S. and Chou, J.R. and Lee, P.S. (2002a) A study on multivariate EWMA controller. IIE Transactions: Vol.34: pp.541-549.