

بهینه‌سازی در همروندی فرآیندهای کسب‌وکار با هدف تعادل بار کاری

مهدی یعقوبی^{۱*} و مرتضی زاهدی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹	<p>امروزه سیستم‌های مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار (BPMS) به سرعت در حال گسترش هستند. سازمان‌ها و شرکت‌های بزرگ برای افزایش بهره‌وری اقتصادی و توانایی رقابت در بازار جهانی ناگزیر به استفاده از BPMS در مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار خود هستند. لذا توجه به معیارها و قابلیت‌های این سیستم‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. ایجاد تعادل در بار کاری منابع در BPMS، یکی از چالش‌هایی است که از دیرباز مورد مطالعه و بررسی محققان قرار گرفته است. ایجاد تعادل در بار کاری منابع، هم باعث افزایش پایداری سیستم و هم باعث افزایش کارایی منابع و افزایش کیفیت محصولات می‌شود. در این تحقیق، اثر نامطلوب تأخیر تغییرات زمانی نرخ ورود در وظایف معرفی می‌شود. برای رفع این اثر نامطلوب، الگوی وابسته به زمان از بار کاری منابع را تعریف می‌کنیم و یک روش ابتکاری برای مدیریت و تنظیم همروندی فرآیندها در BPMS معرفی می‌کنیم. برای بهینه‌سازی همروندی فرآیندها از الگوریتم بهینه‌سازی PSO استفاده می‌کنیم، به طوری که، علاوه بر ایجاد تعادل در بار کاری منابع، بار کاری هر منبع در طول زمان (دوره کاری‌اش) یکنواخت می‌شود. ایجاد یکنواختی در بار کاری منابع باعث افزایش کارایی منابع و در نتیجه بهبود در کیفیت محصولات و خدمات می‌شود. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، بهینه‌سازی همروندی فرآیندها، باعث بهبود ۲۹/۸ درصدی در برقراری تعادل و یکنواختی در بار کاری منابع می‌شود.</p>

۱- مقدمه

سیستم‌های مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار (BPMS) یک تحول انقلابی در سیستم‌های هوشمند و سیستم‌های اطلاعاتی هستند. توسعه و بهره‌وری، در بسیاری از شرکت‌ها و سازمان‌ها به سرعت در حال افزایش است. اگرچه این توسعه به واسطه‌ی استفاده از تکنولوژی نوین و مهارت‌های پیشرفته در مدیریت حاصل می‌شود، ولی نمی‌توان نقش BPMS را در این توسعه نادیده گرفت. شرکت‌ها و سازمان‌هایی که در یک زمینه‌ی خاص در تجارت جهانی مشغول فعالیت هستند برای تداوم صنعت خود و حفظ و افزایش مشتریان، باید از روش‌های نوین مشتری‌مداری و مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار بهره ببرند. BMPS امکانی

را برای مدیریت بهتر فرآیندهای کسب‌وکار به وجود می‌آورد [۱-۳]. BPMS برای استفاده کنندگان خود این امکان را فراهم می‌کند که مدیریت هوشمندانه‌ای روی فرآیندهای کسب‌وکار داشته باشند. از آنجایی که ابزارهایی مانند WFMS (سیستم‌های مدیریت جریان کاری) توسعه، اجرا و مدیریت فرآیندها را فراهم می‌کنند، BPMS به گونه‌ای گسترش یافته است تا علاوه بر قابلیت‌های ذکر شده‌ی فوق امکان مدیریت و تعامل بین فرآیندها را فراهم کنند و سازگاری بیشتری با فرآیندهای درون سازمانی داشته باشد [۳، ۴].

چرخه‌ی زمانی درخواست‌ها، یکی از مهم‌ترین معیارهای اندازه‌گیری کارایی فرآیندهای کسب‌وکار است. در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.yaghoubi@shahroodut.ac.ir

۱. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده کامپیوتر و فن‌آوری اطلاعات

۲. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده کامپیوتر و فن‌آوری اطلاعات

این هدف از تکنیک همروندی و مدیریت زمانی چند فرآیند کسب‌وکار استفاده می‌کنیم.

۲- تحقیقات مرتبط

یکی از تکنیک‌های افزایش پایداری سیستم، تعادل بارکاری منابع است، مخصوصاً در مواقعی که تعداد منابع سرویس‌دهنده محدود است. این تکنیک در زمینه‌های مختلف در صنعت و علوم کامپیوتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، می‌توان به سیستم‌های توزیع شده و محاسبات موازی [۱۲]، محاسبات گریدی [۱۳] و سیستم‌های مدیریت پایگاه داده [۱۴] اشاره کرد. از این تکنیک در سیستم‌های مدیریت جریان‌کاری نیز بارها استفاده شده است [۵، ۹، ۱۰، ۱۵-۱۹].

سالانه تحقیقات پرهزینه‌ای برای کاهش چرخه‌ی زمانی در کارخانه‌های تولیدی انجام می‌شود، یکی از آن‌ها، تحقیقاتی است که روی مسئله‌ی باز زمان‌بندی کار کارگاهی^۱ انجام می‌شود، که هدف آن ایجاد یک زمان‌بندی بهینه است تا زمان جریان‌کاری به حداقل خود برسد [۲۰-۲۲]. نتیجه‌ی این تحقیقات قابل‌استفاده در سیستم‌های مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار است، اما مسائل تعریف شده در BPMS به دلیل ماهیت احتمالاتی و تعامل آن با فعالیت‌های انسان، پیچیده‌تر می‌شود.

به‌صورت کلی، نحوه تخصیص وظیفه به منابع، عامل اصلی در کارایی فرآیندهای کسب‌وکار است. از ساده‌ترین تکنیک‌های ارائه شده می‌توان EDD^۴، SPT^۳، FIFO^۲ و MST^۵ را نام برد [۲۳]. مزیت این روش‌های پایه‌ای در این است که به‌سادگی آن‌ها را می‌توان در هر سیستمی مورد استفاده قرار داد یا با روش‌های پیچیده‌تر دیگر ترکیب کرد. عامل دیگری که در کارایی فرآیندهای کسب‌وکار موثر است، استفاده از توانایی و تخصص منابع در زمان تخصیص وظایف است [۴، ۲۴]، این رویکرد به‌طور غیرمستقیم تلاش می‌کند با توجه به نقش منابع، تخصیص وظایف به هر منبع را اولویت‌بندی کند که در مجموع باعث بهتر شدن عملکرد الگوریتم تخصیص در انتخاب منبع مناسب می‌شود ولی باعث کاهش انعطاف‌پذیری الگوریتم تخصیص وظیفه در انتخاب آزادانه منابع می‌گردد. برخی از تحقیقات، تعادل بارکاری را به‌عنوان هدف اصلی

محیط‌های تولیدی، به مدت زمان بین درخواست مشتری و زمان تحویل محصول به مشتری، چرخه‌ی زمانی گفته می‌شود. کاهش چرخه‌ی زمانی در فرآیندهای کسب‌وکار مانند فرآیند تولید، یکی از مهم‌ترین دستاوردهایی است که می‌توان در فرآیندها حاصل شود [۵-۸].

سیستم‌های مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار به دلیل تعامل شدید با انسان دارای ماهیت احتمالاتی هستند، لذا عملکرد الگوریتم‌ها و روش‌های ارائه‌شده در این سیستم‌ها، وابسته به پارامترهای آماری متعددی است. تنوع و کثرت این پارامترها، طراحی یک روش جامع را در این سیستم‌ها بسیار پیچیده می‌کند. محققان برای قابل‌حل شدن چالش‌های موجود در BPMS برخی از پارامترها را در نظر نمی‌گیرند یا مقادیر آن را ثابت فرض می‌کنند. یکی از پارامترهایی که در ایجاد تعادل بارکاری منابع ثابت فرض شده است، نرخ ورود درخواست‌ها به فرآیند است [۹-۱۱]. در این تحقیق، نرخ ورود درخواست‌ها به‌صورت ثابت فرض نمی‌شود و به‌صورت تابعی از زمان در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت دیگری که در تحقیقات پیشین وجود دارد، ناشی از فرض رایجی است که در تئوری صف در نظر گرفته می‌شود. در این فرض، تعداد درخواست‌دهنده نامحدود در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از فرآیندهای کسب‌وکار، جامعه درخواست‌دهنده عموم مردم نیستند و فرض نامحدود بودن تعداد درخواست‌دهنده، از واقعیت کمی دور است. به‌عنوان مثال، در یک فرآیند درون‌سازمانی در سیستم اتوماسیون دانشگاهی، اگر جامعه درخواست‌دهنده دانشجویان یا مدرسین باشند، تعداد درخواست‌دهنده‌ها محدود می‌شود، لذا در این تحقیق، دومین فرضی که در نظر می‌گیریم؛ محدود گرفتن تعداد درخواست‌دهنده است. در تحقیق حاضر، مانند بسیاری از تحقیقات انجام شده، همچنان به ایجاد تعادل بارکاری منابع توجه می‌شود، علاوه بر آن، با ایجاد یکنواختی در بارکاری هر منبع سعی می‌کنیم، کارایی سیستم را افزایش دهیم. متأسفانه در سابقه‌ی تحقیق کمتر به یکنواختی بارکاری یک منبع توجه شده است. ایجاد یکنواختی در بارکاری منابع، با توجه به توانایی هر منبع باعث افزایش کارایی منبع و بهبود کیفیت سرویس‌دهی منابع می‌شود. در این تحقیق، برای رسیدن به

^۴ Earliest Due Date

^۵ Minimum Slack Time

^۱ Job shop scheduling

^۲ First In First Out

^۳ Shortest Processing Time

ساعت کاری منابع در طول روز و میزان حجم درخواست در ساعات مختلف روز و سایر مواردی که بر کارایی منابع اثر می‌گذارد را در تعریف قاعده انتخاب منبع، مورد توجه قرار دادند. سپس این پارامترها را در یک شبکه بیزی ۳ ترکیب کردند و یک مدل واحد، به‌عنوان قاعده‌ی انتخاب بیزی ۴ برای انتخاب منابع در فرآیندهای کسب‌وکار ارائه دادند. آزمایش‌های گزارش شده‌ی آن‌ها نشان داد، این مدل بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم ایجاد می‌کند. در ادامه‌ی مطالعات Nisafani، Wibisono و همکاران [۱۰] ایده‌ی مشابهی را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها همان ایده‌ی قبلی Nisafani را گسترش دادند و با استفاده از مدل بیزی خام ۵ قاعده انتخاب منبع NBSR۶ را ارائه کردند. در تحقیق انجام شده توسط Kumar و همکاران [۲۸] یک روش جدید و پیچیده برای توزیع وظایف ارائه شد که در حال حاضر در بسیاری از سیستم‌های مدیریت جریان کاری ۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه با سیستم‌های قدیمی‌تر که از تکنیک‌های ضعیف‌تر استفاده می‌کنند روش ارائه شده‌ی ایشان به‌عنوان انقلابی در دستیابی به کیفیت و کارایی در نظر گرفته می‌شود.

در بسیاری از تحقیقات انجام شده از مدل‌های تصادفی به‌عنوان مدلی، جهت تحلیل فرآیندهای کسب‌وکار استفاده می‌شود و این تحقیقات نشان می‌دهد که این مدل‌های تصادفی به‌خوبی برای مقاصد مختلف قابل استفاده است. گراف زمانی احتمالاتی (PTG) که بر پایه‌ی رویدادهای محتمل در فرآیندهای کسب‌وکار بنا شده است، نشان می‌دهد که PTG می‌تواند تحلیل بهتری از عملکرد منابع داشته باشد و در نتیجه مدیریت بهتری از زمان‌بندی منابع ارائه می‌دهد [۲۹]. Son و Kim [۳۰] با استفاده از مدل کردن هر وظیفه ۹ در فرآیند کسب‌وکار به‌عنوان یک سرویس‌دهنده‌ی صف، توانستند روشی برای محاسبه‌ی ظرفیت هر منبع با توجه به زمان اتمام اجرای فرآیند ارائه دهند. Chang و همکاران [۳۱] روش‌های شناسایی مسیر بحرانی در فرآیندهای کسب‌وکار را مورد مطالعه قرار دادند. شبکه‌ی جریان کاری تصادفی (SWN) یکی دیگر از مدل‌هایی است که به‌صورت گسترده توسط محققان مورد

خود قرار داده‌اند و سعی می‌کنند با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، الگوریتمی هوشمند و تعاملی برای تعادل بارکاری منابع ارائه دهند. تحقیقی که به‌وسیله Byung-Hyun Ha و همکاران [۲۵] انجام شد، نشان داد ایجاد تعادل در بارکاری منابع باعث افزایش پایداری سیستم می‌شود و حجم بیشتری از درخواست‌های ورودی در سیستم قابل پذیرش است. Byung-Hyun Ha و همکاران در تحقیق دیگری [۹، ۱۸]، الگوریتمی جهت تعادل بارکاری منابع در BPMS ارائه کردند، آن‌ها مدلی تحلیلی بر اساس داده‌های ذخیره شده در سابقه‌ی رویدادها ارائه دادند، سپس با استفاده از مدل تحلیلی خود و ترکیب آن با مدل شبکه‌ی صف توانستند روشی رسمی (فرمال) برای ایجاد تعادل بارکاری منابع ارائه دهند، آن‌ها روش خود را به کمک شبیه‌سازی فرآیندهای کسب‌وکار مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیق مشابهی که توسط Larbi و همکاران [۲۶] انجام شد. برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی روی ماشین‌های موازی همسان از ایجاد تعادل بارکاری روی ماشین‌های موازی استفاده شد. آن‌ها برای ارزیابی روش پیشنهادی خود، از یک نگاهت بر روی شبکه‌ی پتری استفاده کردند و گزارش‌های آن‌ها نشان داد، تعادل بارکاری عملکرد خوبی در پایداری سیستم دارد.

یکی دیگر از اهدافی که ردپای آن در بسیار از تحقیقات دیده می‌شود، کاهش چرخه‌ی زمانی درخواست‌ها در فرآیندهای کسب‌وکار است [۵، ۹، ۱۰، ۱۵-۱۹، ۲۷]. Xingmei و همکاران [۲۷] با تحلیلی که روی پایگاه داده واقعی ۲۰۱۲ BPI Challenge انجام دادند، توانستند نوعی ارتباط اجتماعی بین منابع تعریف کنند. این ارتباط اجتماعی، یک تحلیل آماری بین منبع کار جاری و منابع کارهای قبلی انجام شده روی نمونه فرآیند (درخواست)، انجام داد که در نهایت باعث بهبود چرخه‌ی زمانی شد. Xu و همکاران [۵] با ارائه یک الگوریتم تخصیص منابع ۲ هزینه‌ی اجرای فرآیند کسب‌وکار را با در نظر گرفتن محدودیت زمانی کاهش دادند. به‌طور مشابه در مطالعات Nisafani و همکاران [۱۹] یک قاعده برای انتخاب منبع ارائه شد. آن‌ها پارامترهای بارکاری منابع، اندازه صف،

⁶ Naïve Bayes Selection Rule

⁷ Workflow management systems

⁸ Probabilistic Timed Graph

⁹ Task

¹⁰ Stochastic Workflow Net

¹ <http://www.win.tue.nl/bpi/doku.php?id=2012:challenge>

² Resource allocation

³ Bayesian Network

⁴ Bayesian Selection Rule

⁵ Naïve Bayes Model

تعریف ۱: مدل تحلیلی فرآیند

یک مدل تحلیلی فرآیند به صورت یک چند تایی $p = (\lambda(t), W, R, L, U, \mu, \xi)$ تعریف می‌شود.

$\lambda(t)$ تابع نرخ ورود درخواست مشتریان است. (در مدل تحلیلی فرآیند توزیع آماری درخواست‌های ورودی را پواسن فرض می‌کنیم)

مجموعه‌ی W وظایف تعریف شده در فرآیند است.

مجموعه‌ی R منابع انسانی موجود در سازمان است.

مجموعه‌ی $L \subseteq W \times W$ شامل اتصالات بین وظایف است. به عنوان مثال، $(w_1, w_2) \in L$ نشان می‌دهد در فرآیند p وظیفه w_2 بعد از وظیفه w_1 انجام می‌شود.

مجموعه‌ی $U \subseteq W \times R$ منابع مسئول هر وظیفه را مشخص می‌کند. به عنوان مثال $(w, r) \in U$ نشان می‌دهد در فرآیند p منبع r مسئول انجام دادن وظیفه w است.

طبق تعریف U می‌توان نتیجه گرفت در فرآیند p برای هر وظیفه $w \in W$ ممکن است چند منبع مسئول وجود داشته باشد، بنابراین به اختصار R_w را به صورت $R_w = \{r | (w, r) \in U\}$ تعریف می‌کنیم که لیست کلیه‌ی منابع مسئول فعالیت w در فرآیند p است.

$\mu: U \rightarrow \mathbb{R}^+$ یک نگاشت از مجموعه‌ی U به اعداد حقیقی مثبت ایجاد می‌کند. مقدار $\mu((w, r))$ بیانگر متوسط زمان انجام وظیفه w توسط منبع r است که به اختصار با $\mu_{w,r}$ نشان می‌دهیم.

$\xi: U \rightarrow [0, 1]$ یک نگاشت از مجموعه‌ی U به اعداد حقیقی بین صفر و یک است. از آنجایی که برای هر وظیفه w مجموعه‌ای از منابع مسئول R_w وجود دارد و در اجرا فرآیند فقط یکی از منابع وظیفه w را انجام می‌دهد، $\xi((w, r))$ بیانگر احتمال انجام وظیفه w توسط منبع r است که به اختصار به صورت $\xi_{w,r}$ نشان می‌دهیم.

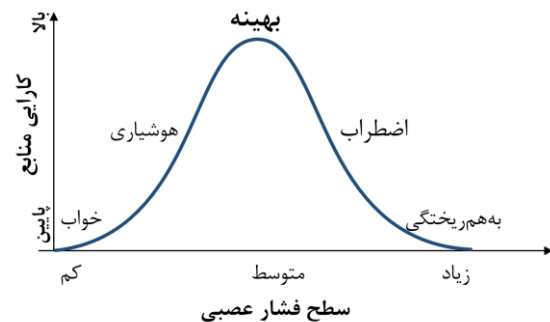
وقتی یک فرآیند کسب‌وکار در شبکه‌ی صف مدل می‌شود، هر وظیفه در فرآیند یک ایستگاه سرویس‌دهی است و هر منبع متناسب به این وظیفه، یک عامل سرویس‌دهنده است [۱۴]. از آنجایی که در هر وظیفه w احتمال قرار گرفتن واحدکاری در لیست اختصاصی منبع $\xi_{w,r}$ است، رابطه‌ی (۱) برای تمام سرویس‌دهنده‌های (منابع) تعریف شده در یک ایستگاه سرویس‌دهی (وظیفه) برقرار است.

$$\sum_{r \in R_w} \xi_{w,r} = 1, \quad \forall w \in W \quad (1)$$

استفاده قرار گرفته است. این مدل بر اساس پایه نظری خوبی تعریف شده است [۳۲-۳۴]. SWN هم‌ارز یک شبکه‌ی پتری تصادفی نامحدود است که برای مدل کردن جریان کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج تجزیه و تحلیل آن قابل استناد در فرآیندهای کسب‌وکار است.

۲-۱- اثر یکنواختی بارکاری در کارایی منابع

در تحقیقی توسط Alluisi و Morgan انجام شد، میزان تاثیر فشار عصبی منابع بر بازدهی آن‌ها اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل (۱) آمده است، این تحقیق نشان داد. منابع انسانی در حد متعادلی از فشار عصبی دارای بازدهی بهینه هستند و این بازدهی نسبت به میزان فشار عصبی منابع انسانی دارای تابع گوسی شکل است. از آنجایی که بارکاری منابع با فشار عصبی آن‌ها رابطه‌ی مستقیم دارد بنابراین از نتیجه‌ی این تحقیق می‌توان برای مدل کردن میزان کارایی منابع بر اساس بارکاری آن‌ها استفاده کرد.



شکل ۱- قاعده‌ی Yerkes-Dodson نشان می‌دهد هرچه سطح فشار عصبی منابع انسانی پایین باشد کارایی آن پایین است و حتی اگر سطح فشار عصبی بیش از حد باشد باز هم کارایی پایین است. فقط در سطح معینی از فشار عصبی کارایی منابع در حالت بهینه خود قرار می‌گیرد [۳۵].

۳- روش پیشنهادی

رایج‌ترین توابع توزیع احتمالی که برای ورود درخواست‌ها به فرآیندهای کسب‌وکار فرض می‌شود، توابع توزیع احتمال گاما و پواسن است. از آن‌جایی که توزیع پواسن دارای یک پارامتر (نرخ ورود) است، در اکثر تحقیقات به عنوان توزیع ورود درخواست‌ها به فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است از طرف دیگر، برای کاهش پیچیدگی مسائل مطرح در BPMS، مقدار پارامتر نرخ ورود در اکثر تحقیقات ثابت فرض شده است. درحالی‌که در واقعیت این پارامتر وابسته به زمان است.

۳-۱- مفاهیم و تعاریف

$$\min \left\{ \frac{\sum_{r \in R} \sum_{i=0}^N (ld_r(t_i) - EL(t_i))^2}{N|R|} \right\}$$

از آنجایی که تغییرات در بارکاری منابع در لحظه‌ی تخصیص وظایف به منابع انجام می‌شود، مقادیر t در رابطه‌ی (۵) گسسته فرض شده است. تعریف ارائه شده از تعادل بارکاری در رابطه‌ی (۵) به تغییرات بارکاری در هر لحظه از زمان توجه دارد به طوری که ابتدا میانگین بارکاری در لحظه‌ی t محاسبه می‌شود سپس تغییرات بارکاری نسبت به میانگین در هر لحظه از زمان، باید کمینه شود تا تعادل بارکاری برای منابع در طول زمان ایجاد شود.

تعریف ۳: یکنواختی در بارکاری منبع

همان طور که در بخش ۲-۱ اشاره شده سطح فشار عصبی در کارایی منابع تاثیر گذار است. از آنجایی که میزان بارکاری هر منبع رابطه‌ی مستقیم با میزان فشار عصبی آن دارد، بهتر است بارکاری هر منبع در سطحی مشخص، با حداقل تغییرات باشد. بنابراین ایجاد یکنواختی در بارکاری هر منبع در طول زمان می‌تواند باعث توزیع بهتری از حجم کاری منبع در طول دوره کاری اش ایجاد کند و در نتیجه باعث افزایش کارایی آن منبع و افزایش کیفیت سرویس‌دهی او شود. رابطه (۶) تعریف یکنواختی بارکاری منابع است که در این تحقیق از آن استفاده خواهیم کرد.

$$ELD_r = \sum_{i=0}^N ld_r(t_i) / N$$

$$\min \left\{ \frac{\sum_{r \in R} \sum_{i=0}^N (ld_r(t_i) - ELD_r)^2}{N|R|} \right\} \quad (6)$$

رابطه‌ی (۶) مقدار ELD_r میانگین بارکاری منبع r در بازه‌ی زمانی $[t_0, t_N]$ محاسبه می‌کند. سپس تغییرات بارکاری را در هر لحظه از زمان نسبت به مقدار ELD_r محاسبه و کمینه می‌کند به طوری که مجموع آن برای کلیه منابع حداقل باشد. این تعریف مشابه تعریف رابطه‌ی (۵) است با این تفاوت که بارکاری منبع را در طول زمان با میانگین بارکاری خودش مقایسه می‌کند و کمینه شدن مقدار آن به معنای یکنواخت شدن بار کاری منابع در طول زمان است.

۳-۲- اثر تاخیری تغییرات نرخ ورود

وقتی اولین درخواست در فرآیند کسب‌وکار به اولین وظیفه می‌رسد. باید توسط منابع مسئول در اولین وظیفه روی آن کار انجام شود، بنابراین باید به اندازه‌ی سرویس‌دهی در وظیفه‌ی اول زمان بگذرد تا درخواست به وظیفه‌ی بعدی

میزان بارکاری هر ایستگاه سرویس‌دهی را می‌توان با داشتن نرخ ورود درخواست به هر ایستگاه و نرخ سرویس‌دهی به دست آورد. اگر مشتریان در هر صف سرویس‌دهی به چند دسته تقسیم شوند و نرخ ورود دسته i ام را با λ_i نشان دهیم و میانگین نرخ سرویس‌دهی را با μ_i نشان دهیم. متوسط نرخ بهره‌وری ρ از سرویس‌دهنده‌ها از رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید [۳۷].

$$\rho = \sum \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (2)$$

در این تحقیق، کلیه‌ی منابع مسئول انجام یک وظیفه در یک دسته قرار می‌گیرند، بنابراین هر دسته در رابطه‌ی (۲) بیانگر یک وظیفه در فرآیند و منابع مسئول آن است. اگر $\lambda_w(t)$ تابع نرخ ورود وظیفه w در زمان t باشد و $\xi_{w,r}$ احتمال تخصیص وظیفه w به منبع r باشد و $\mu_{w,r}$ میانگین نرخ سرویس‌دهی منبع r روی وظیفه w باشد. رابطه‌ی (۳) میزان بارکاری منبع r را در زمان t محاسبه می‌کند.

$$ld_r(t) = \sum_{w \in W_r} \frac{\xi_{w,r} \cdot \lambda_w(t)}{\mu_{w,r}} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، $W_r = \{w | \langle w, r \rangle \in U\}$ مجموعه تمام وظایفی است که در فرآیند برای منبع r تعریف شده است. تعریف ۲: تعادل بارکاری

در سابقه‌ی تحقیق تعاریف مشابهی از تعادل بارکاری منابع ارائه شده است [۹، ۱۱، ۱۸، ۲۶]. در اینجا دو تعریف را ارائه می‌دهیم که از نظر مفهوم، یکسان هستند. در تعریف اول طبق رابطه‌ی (۴) حداکثر بارکاری منابع باید حداقل شود.

$$\min_{r \in R} \max \left\{ \int ld_r(t) d(t) \right\} \quad (4)$$

در تعریفی که در رابطه‌ی (۴) آمده است، بیشینه‌ی بارکاری منابع در طول زمان محاسبه می‌شود و هدف آن کمینه کردن بیشترین بارکاری برای منابع است در حالی در تعریف دقیق‌تر باید بارکاری منابع را در هر لحظه از زمان متعادل باشد. به عبارت دیگر، برای یک بازه‌ی زمانی مشخص $[t_0, t_N]$ مجموع تغییرات بارکاری نسبت به میانگین باید کمینه شود. به بیان دیگر، اگر در بازه‌ی زمانی $[t_0, t_N]$ مقدار رابطه‌ی (۵) کمینه شود تعادل بارکاری برای منابع به وجود آمده است.

$$EL(t) = \sum_{r \in R} ld_r(t) / |R| \quad (5)$$

ثانیه). با توجه به نتیجه شبیه‌سازی، می‌توان اثر نامطلوب عدم تعادل بارکاری منابع را در موارد ذیل خلاصه کرد. اثر تأخیری تغییرات نرخ ورود در فرآیند افزایش نرخ ورود درخواست‌ها در فرآیند محدود بودن تعداد درخواست‌ها در فرآیندهای واقعی توزیع نامتقارن منابع در فرآیند کسب‌وکار.

۳-۳- مسئله‌ی تنظیم همروندی فرآیندها با منابع مشترک

در بخش ۳-۲ اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود در بارکاری منابع شرح داده شد. در این تحقیق، برای حل این مشکل از تنظیم همروندی فرآیندهای کسب‌وکار با منابع مشترک استفاده می‌شود. اگر نمودار بارکاری کلیه منابع را برای تابع تغییرات نرخ ورود $\lambda(t)$ رسم کنیم؛ اثر تأخیری تغییرات نرخ ورود در بارکاری منابع برای هر تابع مشخص $\lambda(t)$ الگوی یکسانی را در بارکاری منابع ایجاد می‌کند. شکل (۴) نمودار بارکاری منابع را برای چهار اجرای مختلف با تابع تغییرات نرخ ورود $\lambda(t) = \frac{u(t)}{10}$ روی سه فرآیند متفاوت با ۲۰۰ درخواست ورودی را نشان می‌دهد.

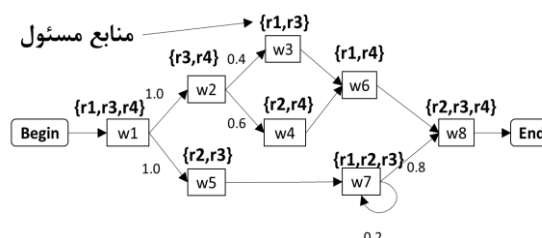
همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، بارکاری منابع برای تابع تغییرات نرخ ورود $\lambda(t) = \frac{u(t)}{10}$ الگوی یکسانی را در طول زمان به خود می‌گیرد. با توجه به اینکه در اجرای فرآیندها از الگوریتم ایجاد تعادل بارکاری استفاده شده است [۱۶]، بازهم در برخی از بازه‌های زمانی، عدم تعادل در بارکاری منابع دیده می‌شود. این عدم تعادل به خاطر نادیده گرفتن اثر تأخیر زمانی در محاسبه‌ی احتمال تخصیص وظیفه به منابع است [۱۶] که با استفاده از شبکه‌ی صف و معادلات تئوری صف حاصل می‌شود [۹، ۱۱]. در این تحقیق، با تنظیم همروندی چند فرآیند، اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود را کاهش می‌دهیم. لذا برای پرداختن به این موضوع، ابتدا لازم است مجموعه‌ی فرآیندها با منابع مشترک را تعریف کنیم.

تعریف ۴: مجموعه فرآیندها با منابع مشترک

در هر سازمان مجموعه‌ای از فرآیندهای کسب‌وکار وجود دارد. وظایف تعریف شده در این فرآیندهای به وسیله‌ی کلیه‌ی منابع انسانی موجود در سازمان انجام می‌شود.

بنابراین مجموعه‌ی $P =$ به‌عنوان کلیه‌ی فرآیندهای کسب‌وکار موجود در یک سازمان با

برسد. به همین صورت می‌توان نتیجه گرفت اثر تغییرات نرخ ورود در نقطه شروع فرآیند، با تأخیر به وظایف تعریف شده در فرآیند می‌رسد. تأخیر تغییرات نرخ ورود در هر وظیفه در فرآیند با توجه به ساختار کنترلی اجزای آن، متفاوت است. وقتی نرخ ورود وابسته به زمان باشد، تأخیر تغییرات نرخ ورود به‌عنوان مهم‌ترین چالش در ایجاد تعادل بارکاری منابع است. تغییر مقدار نرخ ورود با تأخیرهای متفاوت در بخش‌های مختلف فرآیند اثر خواهد گذاشت که باعث پیچیده‌تر شدن مسئله‌ی تعادل بارکاری با نرخ ورود وابسته به زمان می‌شود.

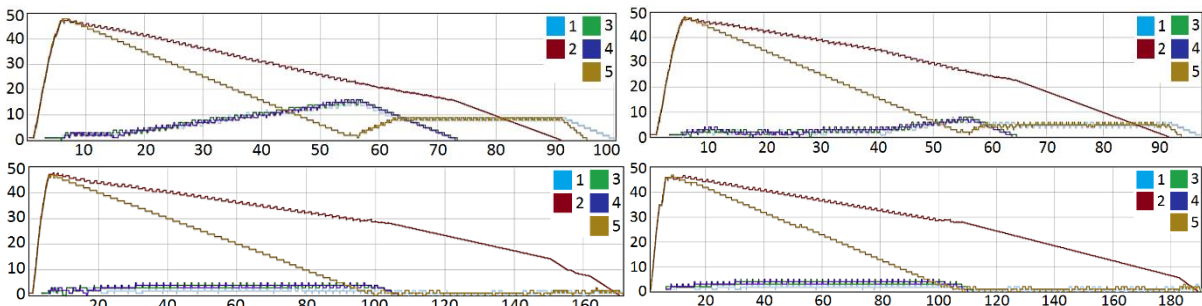
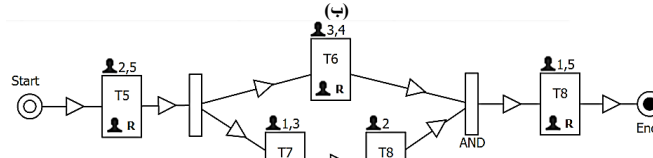
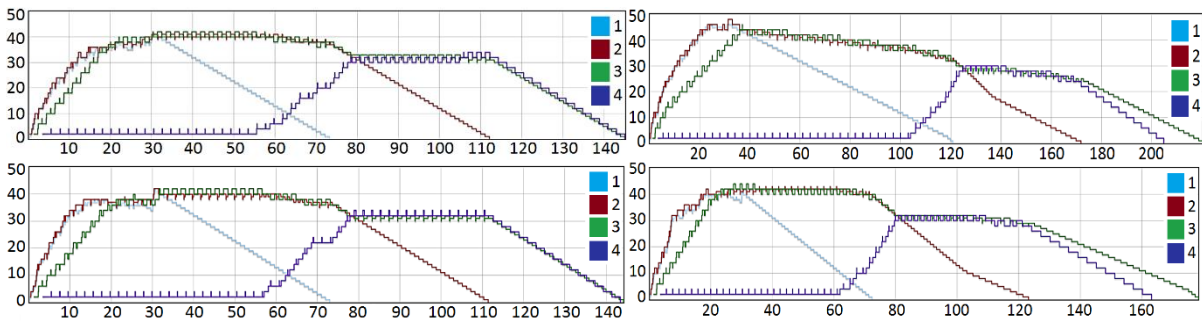
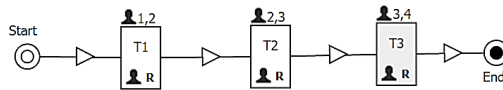
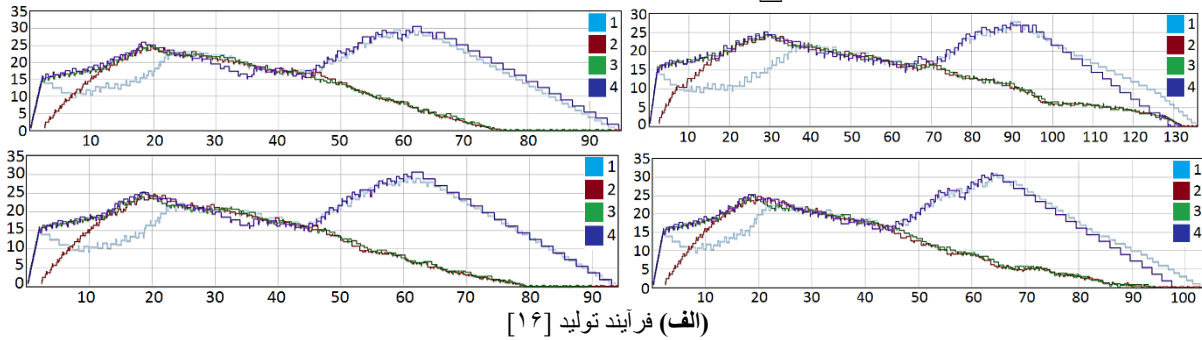
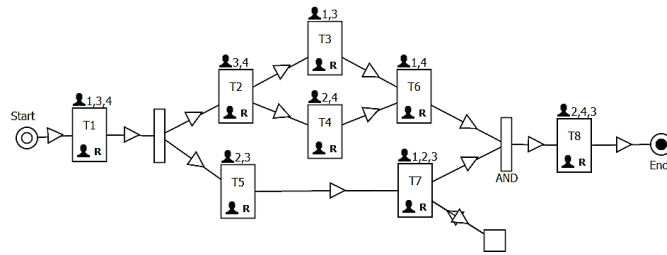


شکل ۲- فرآیند تولید [۱۶]

برای مشاهده اثر تأخیری تغییرات نرخ ورود روی بارکاری منابع، یک آزمایش شبیه‌سازی روی فرآیند «تولید» که در شکل (۲) نشان داده شده است با تابع تغییرات نرخ ورود $\lambda(t) = \frac{u(t)}{10} = \begin{cases} 10, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ انجام شد. در این آزمایش تعداد درخواست‌های ورودی به ۲۰۰ درخواست محدود شده بود. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است قسمت‌های هاشور خورده بین زمان‌های صفر الی ۵۳ ثانیه، اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود در فرآیند است. در ابتدای شبیه‌سازی بارکاری منبع ۲ نسبت به منابع ۱، ۳ و ۴ کمتر است و این اثر نامطلوب با افزایش نرخ ورود، افزایش می‌یابد. مشابه این اثر نامطلوب در زمان حدودی ۶ ثانیه، بارکاری منبع ۱ نسبت به سایر منابع کاهش می‌یابد و علت آن عدم استفاده شدن منبع ۱ در سرویس‌دهی در وظیفه‌های w_2 و w_5 است. این اثر نامطلوب تا رسیدن درخواست‌ها به وظیفه‌ی w_7 در فرآیند ادامه خواهد داشت. همچنین در بخش پایانی نمودار بین زمان‌های ۹۴ الی ۲۰۰ در قسمت هاشور خورده تفاوت بین بارکاری منابع ۱ و ۴ با منابع ۲ و ۳ دیده می‌شود که علت آن در محدود بودن تعداد درخواست‌ها است (۲۰۰ درخواست). اگر تعداد درخواست‌ها نامحدود فرض شود و اثر تأخیری را ناچیز فرض کنیم تعادل بارکاری بین کلیه‌ی منابع ایجاد می‌شود. (مشابه بخش‌های میانی شکل (۳) بین زمان‌های ۵۳ الی ۹۴

سازمان در نظر گرفته می‌شود.

منابع مشترک تعریف می‌شود و مجموعه‌ی
 $Rs = \bigcup_{p \in P} p.R$ به‌عنوان کلیه‌ی منابع انسانی موجود در



شکل ۴: الگوهای یکسان بارکاری منابع در اجراهای مختلف با تابع نرخ ورود $\lambda(t) = (u(t))/10$ در سه فرآیند متفاوت، محور افقی زمان اجرا و محور عمودی مدت زمان بارکاری منبع بر حسب ثانیه در شبیه‌ساز است

برای جابجایی کردن بارکاری کلیه‌ی منابع در یک فرآیند در راستای محور زمان، فقط امکان ایجاد تأخیر در ابتدا فرآیند (قبل از شروع فرآیند) وجود دارد و فرض می‌کنیم ایجاد تأخیر قبل از شروع فرآیند اثری در چرخه‌ی زمانی درخواست‌ها نخواهد داشت.

اگر از یک عنصر تأخیردهنده در ابتدای فرآیند p استفاده شود، اثر آن در الگوی بارکاری منبع r به صورت $\overline{ld_{r,p}}(t - \Delta t_p)$ می‌شود که Δt_p میزان تأخیر ایجادشده توسط عنصر تأخیردهنده در طول زمان است. طبق محدودیت (الف)، که در ابتدای این بخش ذکر شد، برای تمام منابع شرکت‌کننده در فرآیند p مقدار Δt_p باید یکسان باشد. برای ایجاد همروندی بین چند فرآیند کافی است، درخواست‌ها در یک لحظه از زمان به فرآیندها برسند و این باعث می‌شود بارکاری منابع مشترک باهم جمع شود. هدف این تحقیق قرار دادن عناصر تأخیر دهنده در ابتدا فرآیندها است به صورتی که مقادیر Δt_p ها به گونه‌ای تنظیم گردد که تعادل بارکاری در منابع بهینه شود. به عبارت دیگر، مقادیر Δt_p در رابطه‌ی \cdot طوری تعیین شود تا رابطه‌ی \cdot کمینه شود.

$$total_ld_r(t) = \sum_{p \in P} \overline{ld_{r,p}}(t - \Delta t_p) \quad (9)$$

$$ELD_r = \sum_{i=0}^N total_ld_r(t_i) / N \quad (10)$$

$$Rs = \cup_{p \in P} p.R \quad (11)$$

$$ULD = \frac{\sum_{r \in Rs} \sum_{i=0}^N (total_ld_r(t_i) - ELD_r)^2}{N|Rs|} \quad (12)$$

$$EL(t) = \sum_{r \in Rs} total_ld_r(t) / |Rs| \quad (13)$$

$$VLD = \frac{\sum_{r \in Rs} \sum_{i=0}^N (total_ld_r(t_i) - EL(t_i))}{N|Rs|} \quad (14)$$

$$LBFAT = \alpha ULD + (1 - \alpha) VLD \quad (15)$$

در رابطه‌های (۹ تا ۱۵) به ازای هر فرآیند یک مجهول Δt_p وجود دارد که میزان تأخیر ایجادشده در ابتدای فرآیند p را نشان می‌دهد و مقادیر Δt_p ها نقش تنظیم‌کننده را در همروندی فرآیندها دارند. رابطه \cdot مقدار مجموع بارکاری

تعریف ۵: الگوی بارکاری منابع در طول زمان اگر به تابع تعریف‌شده در رابطه‌ی (۳) پارامتر فرآیند (p) اضافه شود، فرم جدید آن حاصل می‌شود که در رابطه‌ی (۷) آمده است. اگر مقادیر تعریف‌شده در رابطه‌ی \cdot با استفاده از شبیه‌ساز محاسبه شود و اجرا i ام شبیه‌ساز با $ld_{r,p}^i(t)$ نشان داده شود و N تعداد دفعات اجرای شبیه‌ساز باشد، الگوی بارکاری منابع در طول زمان مطابق با رابطه‌ی \cdot حاصل می‌شود.

$$ld_{r,p}(t) = \sum_{w \in W_r} \frac{p_{w,r} \cdot \lambda_w(t)}{\mu_{w,r}}, \quad p \in P, w \in p.W, r \in p.R \quad (7)$$

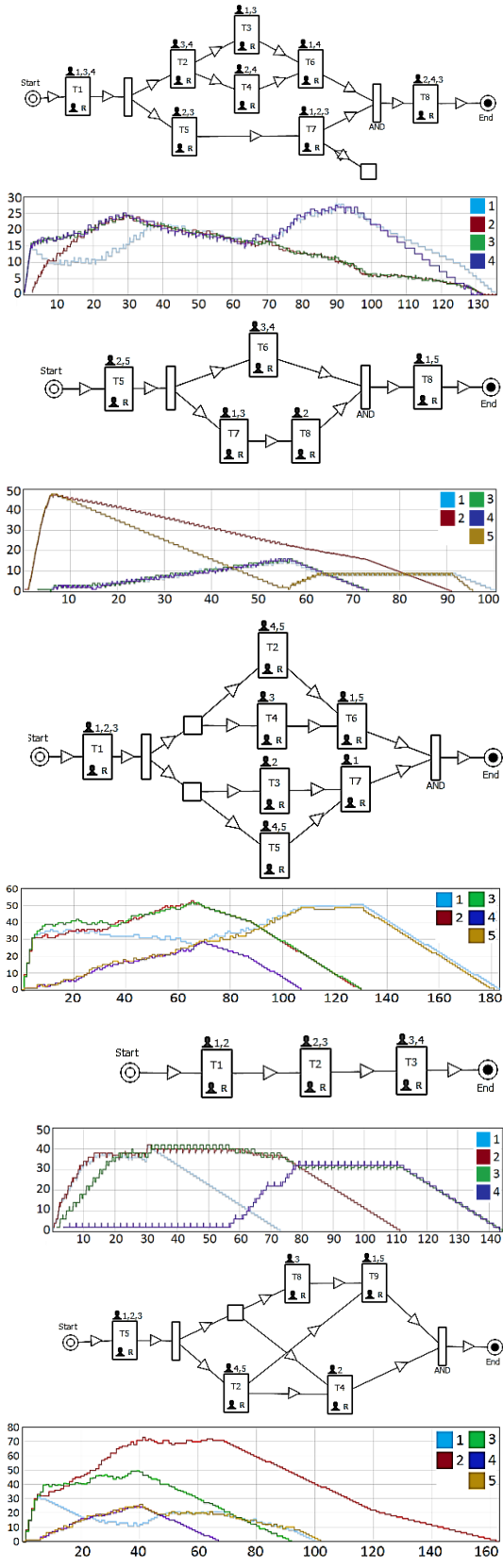
$$\overline{ld_{r,p}}(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N ld_{r,p}^i(t_0) / N & t = t_0 \\ \sum_{i=1}^N ld_{r,p}^i(t_1) / N & t = t_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N ld_{r,p}^i(t_n) / N & t = t_n \end{cases} \quad (8)$$

۳-۳-۱- بهینه‌سازی در همروندی فرآیندها

برای بهبود اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود در تعادل بارکاری باید زمان اجرای فرآیندها را طوری تنظیم کنیم که اگر یک منبع در یک فرآیند بارکاری کمتری دارد، در همان لحظه در فرآیندی دیگر دارای بارکاری بیشتری نسبت به سایر منابع داشته باشد. تنظیم همروندی بهینه برای دو فرآیند با یک الگوریتم خطی ساده امکان‌پذیر است، ولی ایجاد همروندی برای چند فرآیند یک مسئله‌ی پیچیده‌تر است. در این تحقیق، این مسئله برای چند فرآیند به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی معرفی می‌شود و برای حل آن، از الگوریتم تکاملی PSO^۱ استفاده می‌شود. لذا در ادامه، برای تنظیم همروندی فرآیندها باید به فرض‌ها و محدودیت‌های ذیل اشاره کرد.

جابجایی بارکاری یک منبع در فرآیند در راستای محور زمان امکان‌پذیر نیست، در صورت لزوم، می‌توان بارکاری تمام منابع شرکت‌کننده در فرآیند را در راستای زمان جابجا کرد. به عبارت دیگر کل فرآیند در راستای زمان قابل جابجایی است ولی نمی‌توان بارکاری یک منبع مشخص در فرآیند را در راستای زمان جابجا کرد.

¹ Particle swarm optimization



شکل ۵: فرآیندهای انتخاب شده جهت تنظیم هم‌روندی

منبع r را در اجرای هم‌روندی فرآیندهای $p \in P$ محاسبه می‌کند. رابطه \cdot میزان یکنواختی بارکاری منابع را در طول زمان محاسبه می‌کند، در صورتی مقدار ULD_1 حداقل می‌شود که بارکاری $total_ld_r(t)$ برای تمام منابع مانند r در طول زمان تغییرات کمتری داشته باشد. در رابطه‌ی \cdot ، VLD_2 جمع مربعات تفاوت بارکاری منابع نسبت به میانگین در طول زمان است که حداقل شدن آن به معنای تعادل بیشتر در بارکاری منابع است. در رابطه‌ی \cdot ، $LBFAT_3$ تابع هدف این تحقیق است و یک معیار اندازه‌گیری جهت تعادل بارکاری کلیه‌ی منابع و یکنواختی در بارکاری هر منبع است. مقدار α و $(1 - \alpha)$ به ترتیب به‌عنوان ضریب تاثیر مقادیر ULD و VLD است که در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مقدار $\alpha = 0.5$ فرض شده است.

۳-۳-۲- بهینه‌سازی و تنظیم هم‌روندی چند فرآیندها
 PSO یک الگوریتم تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی است [۳۶, ۳۷]. که در بسیار از تحقیقات از آن استفاده شده است [۳۸-۴۰]. این الگوریتم با استفاده از یک جمعیت اولیه از ذرات در یک فضای d بعدی با مقادیر اولیه تصادفی برای موقعیت و سرعت این ذرات، با یک الگوریتم تکراری، مسائل بهینه‌سازی را به صورت تقریبی حل می‌کند.
 در این الگوریتم یک تابع هزینه برای هر ذره تعریف می‌شود، ورودی این تابع مقدار موقعیت ذره $X(c)$ در فضای d بعدی است. برای مقداردهی سرعت V^{new} و موقعیت جدید X^{new} هر ذره c در هر تکرار از دو مقدار بهترین (کم هزینه‌ترین) جواب عمومی ذرات و بهترین جواب محلی ذره استفاده می‌شود. در رابطه‌های (۱۶ و ۱۷) روش بهنگام‌سازی سرعت و موقعیت هر ذره آمده است.

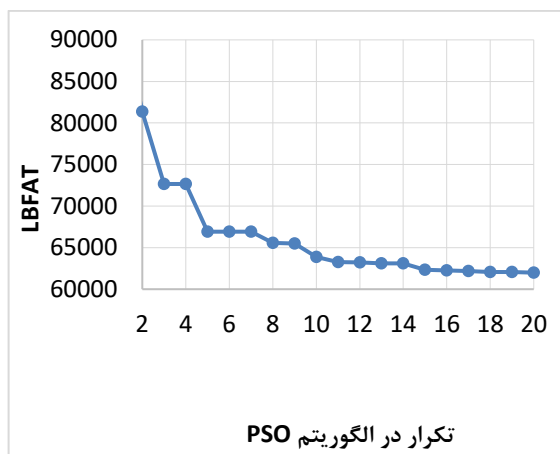
$$V^{new}(c) = c_1 r_1 (Global - X^{cur}(c)) + c_1 r_1 (Local(c) - X^{cur}(c)) + wV^{cur}(c) \quad (16)$$

$$X^{new}(c) = X^{cur}(c) + V^{new}(c) \quad (17)$$

³ Load Balancing Factor Along Time

¹ Uniformity of workload
² Variance of workload

فرآیند برای نرخ ورود با تابع $\lambda(t) = \frac{u(t)}{10}$ را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی الگوی بارکاری، هر فرآیند در شبیه‌ساز ۴ بار اجرا شده است و الگوی بارکاری آن‌ها طبق رابطه‌ی (۸) محاسبه شده است.



شکل ۶- مقادیر LBFAT فرآیندهای همروند در تکرارهای الگوریتم بهینه‌ساز PSO

شکل (۷) نتایج کمینه‌سازی رابطه‌ی (۱۹) که با الگوریتم PSO انجام شده است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است بارکاری همروندی فرآیندها، قبل از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی دارای مقدار ۸۸۳۵۷ برای LBFAT است. این مقدار بعد از بهینه‌سازی به مقدار ۶۱۹۸۹ کاهش یافت (شکل ۵). این کاهش نشان می‌دهد پارامتر $\Delta t = [106.52, 3.87, 45.24, 0, 3.22]$ به‌عنوان یک تنظیم‌کننده توانسته است، علاوه بر ایجاد تعادل در بارکاری منابع، در بارکاری هر منبع، الگوی یکنواخت‌تری ایجاد کند. میزان کاهش مقدار بهینه LBFAT نسبت به حالتی که مقدار $\Delta t = [0, 0, 0, 0]$ است ۲۹/۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد و این میزان کاهش در مقدار LBFAT به معنای تعادل بارکاری و یکنواختی بیشتر در بارکاری منابع است.

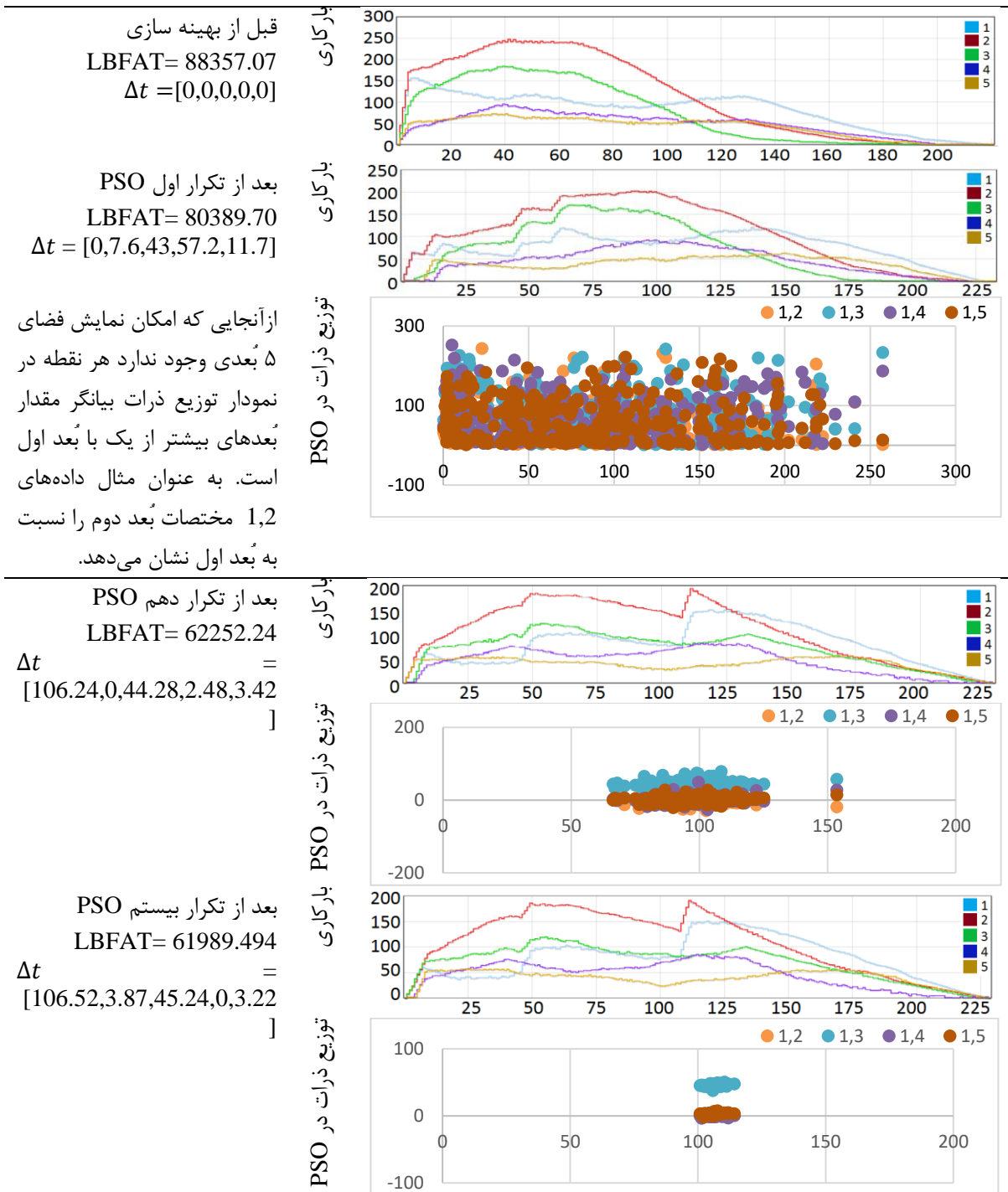
مقادیر $r1$ و $r2$ دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک است، مقادیر $c1$ و $c2$ به ترتیب ضرایب تاثیر جواب عمومی و محلی ذرات است، مقدار w هم ضریب اینرسی ذره است. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مقادیر $c1$ ، $c2$ و w به ترتیب ۰/۷، ۰/۳ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. برای حداقل کردن مقدار رابطه ۰ از الگوریتم تکاملی PSO استفاده می‌کنیم. جهت بهینه‌سازی مسئله‌ی تنظیم همروندی چند فرآیند، کافی است، مقدار رابطه (۱۵) به عنوان تابع هدف، کمینه شود، در این بهینه‌سازی، بردار Δt به‌عنوان بردار موقعیت ذرات در نظر گرفته می‌شود، که بُعد این بردار برابر با تعداد فرآیندهایی است که قرار است همروند شوند.

۴- آزمایش و نتایج

در این آزمایش از ۵ فرآیند کسب و کار با ۵ منبع مشترک استفاده می‌کنیم. برخی از این فرآیندها به عنوان معیار ارزیابی در سایر تحقیقات استفاده شده‌اند [۱۶، ۱۴]. از هر فرآیند با نرخ ورودی $\lambda(t) = \frac{u(t)}{10}$ و تعداد ورودی ۲۰۰ درخواست، چهار اجرا در شبیه‌ساز انجام می‌شود. سپس طبق رابطه ۰ الگوهای بارکاری منابع برای هر فرآیند حاصل می‌شود. برای بهینه‌سازی رابطه‌ی (۱۵) با الگوریتم PSO، مقادیر بردار موقعیت ذرات را به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر الی ۲۵۰ به تعداد ۳۰۰ ذره مقداردهی اولیه می‌کنیم و الگوریتم را تا همگرا شدن به جویا بهاب کمینه‌ی سراسری تکرار می‌کنیم. در این آزمایش بعد از ۲۰ تکرار همگرایی حاصل شد و مقدار جواب کمینه‌ی سراسری تا تکرار ۲۵ام تغییر نکرد.

شکل (۵) مدل فرآیندهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد در ذیل هر مدل فرآیند، نمودار بارکاری منابع نشان داده شده است. این جدول علاوه بر مدل فرآیند، الگوی بارکاری هر

^۱ شبیه‌ساز فرآیندهای کسب و کار بخشی از نرم افزار مدیریت آماری (نما) است که در آزمایشگاه وب‌کاوی و شناسایی الگو طراحی و پیاده ساز شده است. <http://nama.gu.ac.ir>



۵- نتیجه‌گیری

ایجاد تعادل در بارکاری منابع در سیستم‌های مدیریت فرآیندهای کسب‌وکار در شرایط بار سنگین، باعث افزایش پایداری سیستم و افزایش کارایی منابع و کیفیت محصولات می‌شود. پیچیدگی مسئله‌ی بارکاری در BPMS باعث شده است فرضیات محدود کننده‌ای در تحقیقات پیشین در نظر گرفته شود، مانند ثابت فرض کردن نرخ ورود درخواست‌ها و نامحدود گرفتن تعداد درخواست دهنده‌ها، در این تحقیق، نرخ ورود را به صورت تابعی از زمان در نظر گرفتیم و تعداد درخواست‌ها را هم نامحدود فرض نکردیم. این دو فرض باعث ایجاد اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود در بارکاری فرآیندها می‌شود، ولی نکته‌ی قابل توجه این است که با مشخص بودن تابع تغییرات نرخ ورود و تعداد درخواست‌ها، بارکاری منابع الگوی مشخصی را دنبال خواهد کرد. در ادامه‌ی این تحقیق، برای حذف اثر نامطلوب تأخیر تغییرات نرخ ورود در بارکاری از تکنیک تنظیم همروندی بهینه‌ی چند فرآیند استفاده کردیم. برای تعادل بارکاری منابع و یکنواختی بارکاری هر منبع با تنظیم بهینه‌سازی اجرای همروند فرآیندها می‌توان اثر نامطلوب

تأخیر تغییرات نرخ ورود در هر فرآیند را کاهش داد. در این تحقیق، برای بهینه‌سازی و تعیین پارامتر همروندی فرآیندها از الگوریتم تکاملی PSO استفاده شد. مهم‌ترین مزایای روش پیشنهاد شده در این تحقیق را می‌توان در موارد ذیل خلاصه کرد.

همروندی بهینه‌ی فرآیندها باعث افزایش تعادل در بارکاری منابع، ایجاد یکنواختی در بارکاری هر منبع، افزایش کارایی منابع و پایداری سیستم می‌شود

- مراحل بهینه‌سازی فقط یک‌بار برای مجموعه‌ی فرآیندهای یک سازمان که قرار است همروند شوند، انجام می‌شود.

- الگوی بارکاری که به عنوان ورودی در همروندی استفاده شده است، مختص تعریف تابع زمانی در این تحقیق نیست و الگو بارکاری برای تغییرات نرخ ورود با هر تابع دیگری قابل استخراج است.

مراحل بهینه‌سازی همروندی فرآیندها، مستقل از الگوریتم‌های تخصیص وظایف به منابع است؛ بنابراین قابل استفاده در کنار روش‌های تخصیص منابع در BPMS است.

مراجع

- [1] M. Hammer., "The agenda: What every business must do to dominate the decade", Crown Publisher, 2003.
- [2] M. Hammer and J. Champy, "Reengineering the Corporation: Manifesto for Business Revolution", Zondervan Publisher, 2009.
- [3] H. Smith and P. Fingar, "Business process management: the third wave", Meghan-Kiffer Press Tampa. vol. , 2003.
- [4] W. M. Van Der Aalst, A. H. Ter Hofstede and M. Weske, "Business process management: A survey" International conference on business process management, 2003 .
- [5] J. Xu, C. Liu and X. Zhao, "Resource allocation vs. business process improvement: How they impact on each other", BPM, 2008.
- [6] Z. Huang, X. Lu and H. Duan, "A task operation model for resource allocation optimization in business process management, Systems, Man and Cybernetics, Part A", IEEE Transactions on Systems and Humans, vol. 42, no. 5, 2012, pp. 1256-1270.
- [7] Z. Huang, W. M. van der Aalst, X. Lu and H. Duan, "Reinforcement learning based resource allocation in business process management", Data & Knowledge Engineering, vol. 70, no. 1, 2011, pp. 127-145.
- [8] J. Wang and A. Kumar, "A framework for document-driven workflow systems", International Conference on Business Process Management, 2005, pp. 285-301.
- [9] B.-H. Ha, J. Bae, Y. T. Park and S.-H. Kang, "Development of process execution rules for workload balancing on agents", Data & Knowledge Engineering, vol. 56, no. 1, 2006, pp. 64-84.

- [10] A. Wibisono, A. S. Nisafani, H. Bae and Y.-J. Park, "On-the-Fly Performance-Aware Human Resource Allocation in the Business Process Management Systems Environment Using Naïve Bayes", *Asia Pacific Business Process Management*, Springer, 2015, pp. 70-80.
- [11] Y. Xie, C.-F. Chien and R.-Z. Tang, "A dynamic task assignment approach based on individual worklists for minimizing the cycle time of business processes", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 99, 2015, pp. 401-414.
- [12] D. E. Culler, J. P. Singh and A. Gupta, "Parallel computer architecture: a hardware/software approach", Gulf Professional Publishing, 1999.
- [13] D. Grosu and A. T. Chronopoulos, "Algorithmic mechanism design for load balancing in distributed systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 34, no. 1, 2004, pp. 77-84.
- [14] E. Rahm, "Dynamic load balancing in parallel database systems", *European Conference on Parallel Processing*, Springer, 1996.
- [15] L.-j. Jin, F. Casati, M. Sayal and M.-C. Shan, "Load balancing in distributed workflow management system", *Proceedings of the 2001 ACM symposium on Applied computing*, ACM, 2001.
- [16] W. Zhao, L. Yang, H. Liu and R. Wu, "The Optimization of Resource Allocation Based on Process Mining", *International Conference on Intelligent Computing*, Springer, 2015, pp. 341-353.
- [17] M. Zur Muehlen, "Organizational management in workflow applications—issues and perspectives", *Information Technology and Management*, vol. 5, no. 3-4, 2004, pp. 271-291.
- [18] B.-H. Ha, J. Bae and S.-H. Kang, "Workload balancing on agents for business process efficiency based on stochastic model", *International Conference on Business Process Management*, Springer, 2004, pp. 195-210.
- [19] A. S. Nisafani, A. Wibisono, S. Kim and H. Bae, "Bayesian Selection Rule for Human-Resource Selection in Business Process Management Systems", *Journal of Society for e-Business Studies*, vol. 17, no. 1, 2012, pp. 53-74.
- [20] E. G. Coffman and J. L. Bruno, "Computer and job-shop scheduling theory", John Wiley & Sons, 1976.
- [21] K. R. Baker, *Introduction to sequencing and scheduling*, John Wiley & Sons, 1974.
- [22] M. Pinedo, "Scheduling: theory, algorithms and systems", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [23] S. Rhee, H. Bae, D. Ahn and Y. Seo, "Efficient workflow management through the introduction of TOC concepts" *Proceedings of the 8th annual international conference on industrial engineering theory, applications and practice (IJIE2003)*, 2003.
- [24] M. Shen, G.-H. Tzeng and D.-R. Liu, "Multi-criteria task assignment in workflow management systems", *System Sciences, Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference (IEEE)*, 2003.
- [25] Y. Liu and K. Zhang, "Strategy for Workflow Task Assignment Based on Load Balance and Experiential Value", *Computer Engineering*, vol. 21, no. 1, 2009, pp. 1-22.
- [26] S. Larbi and S. Mohamed, "Modeling the Scheduling Problem of Identical Parallel Machines with Load Balancing by Time Petri Nets", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, vol. 7, no. 1, 2014, pp. 42-48.
- [27] X. Liu, J. Chen, Y. Ji and Y. Yu, "Q-learning Algorithm for Task Allocation Based on Social Relation", *International Workshop on Process-Aware Systems*, 2015, pp. 49-58.

- [28] A. Kumar, W. M. van der Aalst and E. M. Verbeek, "Dynamic work distribution in workflow management systems: How to balance quality and performance", *Journal of Management Information Systems*, vol. 18, no. 3, 2002, pp. 157-193.
- [29] J. Eder, H. Pichler, W. Gruber and M. Ninaus, "Personal schedules for workflow systems", *International Conference on Business Process Management*, Springer, 2003.
- [30] J. H. Son and M. H. Kim, "Improving the performance of time-constrained workflow processing", *Journal of Systems and Software*, vol. 58, no. 3, 2001, pp. 211-219.
- [31] D.-H. Chang, J. H. Son and M. H. Kim, "Critical path identification in the context of a workflow, Information and software Technology", vol. 44, no. 7, 2002, pp. 405-417.
- [32] W. M. Van Der Aalst, K. M. Van Hee and H. A. Reijers, "Analysis of discrete-time stochastic petri nets, *Statistica Neerlandica*", vol. 54, no. 2, 2000, pp. 237-255.
- [33] K. van Hee and H. Reijers, "An analytical method for computing throughput times in stochastic workflow nets, *Simulation in industry*, vol. 10, no. 3, 1999.
- [34] L. Zerguini and K. M. van Hee, "A new reduction method for the analysis of large workflow models, *Promise*", Citeseer, 2002, pp. 188-201.
- [35] E. A. Alluisi and B. B. Morgan Jr., "Engineering psychology and human performance", *Annual review of psychology*, vol. 27, no. 1, 1976, pp. 305-330.
- [36] J. Kennedy, "Particle swarm optimization, *Encyclopedia of machine learning*", Springer, 2011, pp. 760-766.
- [37] S. Intelligence, "Particle swarm optimization", MCCAFFREY, James. [online].[cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/hh335067.aspx>, 2007.
- [38] Z. Liu, P. Zhu, W. Chen and R.-J. Yang, "Improved particle swarm optimization algorithm using design of experiment and data mining techniques", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 52, no. 4, 2015, pp. 813-826.
- [39] C. Ou-Yang, H.-J. Cheng and Y.-C. Juan, "An Integrated mining approach to discover business process models with parallel structures: towards fitness improvement", *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 13, 2015, pp. 3888-3916.
- [40] H.-J. Cheng, C. Ou-Yang and Y.-C. Juan, "A hybrid approach to extract business process models with high fitness and precision", *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, no. 6, 2015, pp. 351-359.