ارائهٔ الگوریتم پویا برای تنظیم هم‌روندی فرایندهای کسب‌وکار

مهدی یعقوبی[1*]، مرتضی زاهدی[2] و علیرضا احمدی‌فرد[3]

[1و2] دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده کامپیوتر و فناوری اطلاعات، شاهرود، ایران

[3] دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده برق و رباتیک، شاهرود، ایران

چکیده

سامانه‌های مدیریت فرایندهای کسب‌وکار(BPMS)، سامانه‌های پیچیدهٔ اطلاعاتی هستند که جهت رقابت در بازار جهانی و افزایش بهره‌وری اقتصادی، استفاده از آن‌ها در هر سازمانی، امری حیاتی و ضروری است. ایجاد تعادل بارِکاری منابع در BPMS، یکی از چالش‌هایی است که از دیرباز مورد مطالعه و بررسی پژوهش‌گران قرار گرفته است. تعادل بارِکاری منابع، باعث افزایش پایداری سامانه، افزایش کارایی منابع و افزایش کیفیت محصولات می‌شود. در این مقاله، مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی در BPMS به‌عنوان یک مسئلهٔ کاربردی در جهت بهبود تعادل بارکاری منابع و یک‌نواختی در بارکاری هر منبع معرفی می‌شود و برای حل این مسئله، در ابتدای هر فرایند یک عنصر تأخیردهنده در نظر گرفته می‌شود و هدف مسئله تنظیم مقدار تأخیر در ابتدای هر فرایند است. برای این منظور یک الگوریتم بهینه‌سازی پویا ارائه و سرعت اجرای الگوریتم پویای پیشنهادشده نسبت به الگوریتم جستجوی فضای حالت و الگوریتم تکاملی PSO مقایسه می‌شود. مقایسهٔ انجام‌شده نشان می‌دهد سرعت الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم جستجوی فضای حالت به‌صورت ۳۷ ساعت به ۵/۸ سال است؛ درحالی‌که الگوریتم POS همین مسئله را درسه دقیقه حل می‌کند. آزمایش انجام‌شده روی یک پایگاه دادهٔ واقعی ۲۱/۶۴ درصد بهبود را در عملکرد الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: سامانه مدیریت فرایندهای کسب‌وکار، تنظیم هم‌روندی فرایندها، تعادل بارِکاری، بهینه‌سازی پویا، پیچیدگی زمانی.

A Dynamic Programing Algorithm for Tuning Concurrency of Business Processes

Mehdi Yaghoubi[1*], Morteza Zahedi[2] & Alireza Ahmayfard[3]

[1,2]Computer & IT Engineering Department, Shahrood university of technology, Shahrood, Iran.

[3]Electrical & Robotics Engineering Department, Shahrood university of technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Business process management systems (BPMS) are vital complex information systems to compete in the global market and to increase economic productivity. Workload balancing of resources in BPMS is one of the challenges have been long studied by researchers. Workload balancing of resources increases the system stability, improves the efficiency of the resources and enhances the quality of their products. Workload balancing of resources in BPMS is considered as an important factor of the performance and the stability in systems. Setting the workload of each source at a certain level increases the efficiency of the resources.

The main objectives of this research are the concept of resource workload balance and uniformity of the workload for each source at a specified level. To optimize the balance workload and uniformity of each source, the setting multi-process concurrency was offered and studied. Also, the regulation of multi-process concurrency was mentioned as an optimization problem. In this paper, tuning concurrency of the business process is introduced as a problem in BPMS, which is an application issue to improve at workload balance of resources and uniformity in the workload of each resource.

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

* Corresponding author

To solve this problem, a delay vector is defined, each element of delay vector makes the synthetic delay at the first of each business process, then a dynamic optimization algorithm is presented to compute delay vector and the speed of the proposed algorithms is compared with and state-space search algorithm and evolutionary algorithm of PSO. The comparison shows that the speed of the proposed algorithm is 37 hours to 5.8 years compared to the state-space search algorithm, while the POS algorithm solves the same problem in just 3 minutes. The experimental results on a real dataset show 21.64 percent improvement in the performance of the proposed algorithm.

Keywords: Business process management systems, tuning concurrency of business processes, workload balancing, dynamic optimization, time complexity

۱- مقدمه

ظهور سامانه‌های مدیریت فرایندهای کسب‌وکار[1](BPMS) تحولی انقلابی در سامانه‌های هوشمند و سامانه‌های اطلاعاتی ایجاد کرده است. توسعه و بهره‌وری، در بسیاری از شرکت‌ها و سازمان‌ها به‌سرعت درحال افزایش است. اگرچه این توسعه به‌واسطهٔ استفاده از فناوری نوین و مهارت‌های پیشرفته در مدیریت حاصل می‌شود، ولی نقش BPMS را در این توسعه نمی‌توان نادیده گرفت. شرکت‌ها و سازمان‌هایی که در یک زمینه‌ای خاص در تجارت جهانی مشغول فعالیت هستند، برای تداوم صنعت و حفظ و افزایش مشتریان خود، باید از روش‌های نوین مشتری‌مداری و مدیریت فرایندهای کسب‌وکار بهره ببرند. BMPS امکانی را برای مدیریت بهتر فرایندهای کسب‌وکار به‌وجود می‌آورد [3-1]. BPMS برای کاربران خود این امکان را فراهم می‌کند که مدیریت هوشمندانه‌ای روی فرایندهای کسب‌وکار داشته باشند. ازآنجایی‌که ابزارهایی مانند WFMS (سامانه‌های مدیریت جریانِ‌کاری[2]) توسعه، اجرا و مدیریت فرایندها را فراهم می‌کنند، BPMS به‌گونه‌ایی گسترش یافته است تا علاوه‌بر قابلیت‌های ذکر شدهٔ بالا، امکان مدیریت و تعامل بین فرایندها را فراهم کنند و سازگاری بیش‌تری با فرایندهای درون‌سازمانی داشته باشد [3,4].

ایجاد تعادل در بارکاری منابع در BMPS باعث افزایش کارایی و بازدهی منابع و مدیریت بهتر منابع انسانی می‌شود و در نهایت باعث افزایش کیفیت محصولات می‌شود. سامانه‌های مدیریت فرایندهای کسب‌وکار به‌دلیل تعامل شدید با انسان، دارای ماهیت احتمالاتی هستند؛ لذا عملکرد الگوریتم‌ها و روش‌های ارائه‌شده در این سامانه‌ها، وابسته به پارامترهای آماری متعددی است. تنوع و کثرت این پارامترها، طراحی یک الگوریتم جامع جهت ایجاد تعادل بارکاری در این سامانه‌ها را بسیار پیچیده می‌کند. در پیشینهٔ پژوهش از روش‌هایی مانند مدل‌سازی فرایندهای کسب‌وکار در شبکهٔ صف [5,7] استفاده شده و مسئلهٔ تعادل بارکاری را به‌صورت تئوری برای یک فرایند کسب‌وکار حل شده است. از آنجایی که مسئلهٔ تعادل بارکاری در تعامل شدید با فعالیت‌های منابع است برخی از پژوهش‌گران با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری تقویتی نوعی هوشمندی و یادگیری به الگوریتم خود اضافه کرده‌اند [8] و توانستند عملکرد مناسب الگوریتم را برای مدت طولانی‌تری تضمین کنند. متأسفانه در سابقهٔ پژوهش به مسئلهٔ تعادل بارکاری در محیط‌های چند فرایندی توجه چندانی نشده است. در این مقاله، بهبود تعادل بارکاری منابع و تثبیت بارکاری هر منبع را در یک سطح مشخص به‌عنوان هدف اصلی قرار داده‌ایم و مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی را در محیط‌های چندفرایندی به‌عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی معرفی می‌کنیم. در ادامه، چند روش مختلف برای حل این مسئله ارائه می‌شود. حل مسئلهٔ معرفی‌شده با الگوریتم جستجوی فضای حالت دارای پیچیدگی زمانی نمایی است. در این مقاله، جهت افزایش سرعت اجرای آن، یک روش ابتکاری با بهینه‌سازی پویا برای حل آن ارائه می‌دهیم به‌طوری‌که پیچیدگی زمانی آن در مقابل الگوریتم جستجوی فضای حالت به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه‌بر آن، برای حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی به‌عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی از الگوریتم تکاملی PSO استفاده کردیم و در انتهای مقاله برای یک سناریوی مشخص، سرعت اجرای سه روش ارائه‌شده را مورد مقایسه قرار دادیم.

۲- پژوهش‌های مرتبط

یکی از روش‌های افزایش پایداری در BPMS، تعادل بارِکاری منابع است، به‌خصوص در مواقعی که تعداد منابع سرویس‌دهنده محدود است. این روش در زمینه‌های مختلف در صنعت و علوم کامپیوتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان

[1] Business process management system

[2] Workflow Management Systems

مثال، به سیستم‌های توزیع شده و محاسبات موازی [9]، محاسبات گریدی [10] و سامانه‌های مدیریت پایگاه داده [11] می‌توان اشاره کرد. از این روش در سامانه‌های مدیریت جریانِ کاری نیز بارها استفاده شده است [5,6,12-17].

در کل، نحوهٔ تخصیص وظیفه به منابع، عامل اصلی در کارایی فرایندهای کسب‌وکار است. از ساده‌ترین روش‌های ارائه‌شده FIFO[1]، SPT[2]، EDD[3] و MST[4] را می‌توان نام برد [18]. مزیت این روش‌های پایه‌ای در این است که به‌سادگی آن‌ها را در هر سامانه‌ای مورد استفاده می‌توان قرار داد یا با روش‌های پیچیده‌تر دیگر ترکیب کرد. عامل دیگری که در کارایی فرایندهای کسب‌وکار مؤثر است، استفاده از توانایی و تخصص منابع در زمان تخصیص وظایف است [4,19]، این رویکرد به‌طور غیرمستقیم تلاش می‌کند با توجه بـــه نقش منابـــع، تخصیص وظایف به هـــر منبـــع را اولویت‌بندی کند که درمجموع باعث بهترشدن عملکرد الگوریتم تخصیص در انتخاب منبع مناسب، ولی باعث کاهش انعطاف‌پذیری الگوریتم تخصیص وظیفه در انتخاب آزادانه منابع می‌شود.

۱-۲- تعادل بارکاری منابع

در برخی از پژوهش‌ها، تعادل بارِکاری منابع به‌عنوان هدف اصلی پژوهش در نظر گرفته شده است. در این پژوهش‌ها با استفاده از تئوری صف و مدل‌سازی فرایندهای کسب‌وکار در شبکهٔ صف[5]، الگوریتم‌های هوشمندی جهت تخصیص منابع ارائه شده است؛ به‌طوری‌که تعادل بارِکاری منابع را اولویت اصلی خود قرار داده‌اند. پژوهشی که به‌وسیله بیونگ‌هیون و همکاران [5] انجام شد، نشان داد ایجاد تعادل در بارِکاری منابع باعث افزایش پایداری سامانه می‌شود. بیونگ‌هیون و همکاران در پژوهش دیگری [6]، الگوریتمی جهت تعادل بارِکاری منابع در BPMS ارائه کردند؛ آن‌ها یک مدل تحلیلی بر اساس داده‌های ذخیره‌شده در سابقهٔ رویدادها ارائه دادند؛ سپس با استفاده از مدل تحلیلی خود و ترکیب آن با شبکهٔ صف توانستند، روشی رسمی (فرمال) برای ایجاد تعادل بارِکاری منـــابع ارائه دهنـــد، آن‌ها روش خـــود را به‌کمک شبیه‌سازی فرایندهای کسب‌وکار مورد ارزیابی قرار دادند. زی و همکاران [7] در تکمیل پژوهش *بیونگ‌هیون* و همکاران [6] روش آن‌هـــا را گسترش دادند و توانستند بـــا ترکیب نظریهٔ صف و مدل‌های تصادفی، روش بهتری به‌عنوان «تخصیص تصادفی پویا با هدف کاهش چرخهٔ زمانی[6]» جهت تخصیص وظایف ارائه دهند. ایشان با اضافه‌کردن یک پارامتر جدید به شبکهٔ صف، تخمین بهتری از چرخهٔ زمانی ارائه دادند و با جابه‌جایی واحدهای‌کاری در صفِ اختصاصیِ (فهرستِ کاری) منابع تعادل بارِکاری منابع را افزایش دادند و هم‌زمان چرخهٔ زمانیِ درخواست‌ها را بهبود بخشیدند. ایدهٔ اصلی آن‌ها در کاهش بارِکاری منابع با جابه‌جاییِ واحدهای‌کاری، از منابع با بارِکاری بالا به منابع غیرفعال است.

در پژوهشی که توسط *Georgoulakos* و همکاران انجام شد [20]، یک روشِ بهینه‌سازیِ چندهدفهٔ تکاملی برای طراحی مدلِ فرایند سازمانی ارائه شد که نشان داد، روش برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم تکاملی ژنتیک در تحلیل و آنالیز ارتباط زیرفرایندها با فرایند اصلی می‌تواند سودمند باشد.

در مطالعه‌ای که توسط *Wibig* انجام شد[21]، یک روش خـــودکار بـــرای زمان‌بندی کـــارها بر اساس روش‌هـــای بهینه‌سازی ژنتیک و برنامه‌ریزی پویا در مدل‌سازی فرایندهای کسب‌وکار معرفی شد. ایشان نشان داد برنامه‌ریزی پویا هزینهٔ محاسبات را به‌صورت قابل توجهی می‌تواند کاهش دهد. *Wibig* در ادامهٔ پژوهش‌های خود یک الگوریتم مرتب‌سازی ژنتیک غیرغالب[7] نسخهٔ دوم (NSGA II) برای بهینه‌سازی چندهدفه ارائه داد[22]. ایشان در ارائهٔ الگوریتم پیشنهادی خود از روش برنامه‌ریزی پویا استفاده کرد و نشان داد روش او دارای پیچیدگی زمانی کم‌تری نسبت به الگوریتم پایهٔ NSGA است.

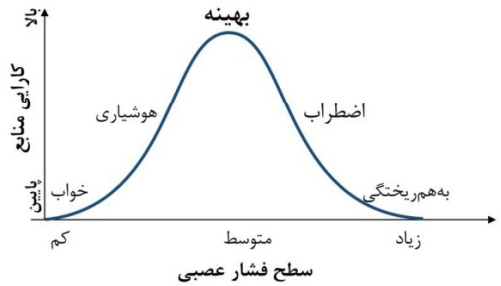
۲-۲- میزان بارکاری، سطحِ فشار عصبی و کارایی منابع

در پژوهشی توسط *آلوییسی و مورگان* انجام شد، میزان تأثیر فشار عصبی منابع بر بازدهی آن‌ها اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل (۱) آمده است، این پژوهش نشان داد. منابع انسانی در حد متعادلی از فشار عصبی، دارای بازدهی بهینه هستند و بازدهی منابع نسبت به میزان فشار عصبی آن‌ها دارای تابع گوسی شکل است. ازآن‌جایی‌که بارِکاری منابع با فشار عصبی آن‌ها رابطهٔ مستقیم دارد، بنابراین از نتیجهٔ این پژوهش برای مدل‌کردن میزان کارایی منابع بر اساس بارِکاری آن‌ها می‌توان استفاده کرد؛ به عبارت دیگر برای هر منبع سطح مشخصی از بارکاری وجود دارد که اگر بارکاری در این سطح

[1] First in First out
[2] Shortest Processing Time
[3] Earliest Due Date
[4] Minimum Slack Time
[5] Queueing network

[6] Dynamic Stochastic task allocation approach for Workload Balancing
[7] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

باشد، منبع مورد نظر دارای بیشینه کارایی و بازدهی در انجام وظایف خود است.



(شکل-۱): قاعدهٔ Yerkes-Dodson نشان می‌دهد هرچه سطح فشار عصبی منابع انسانی پایین باشد، کارایی آن پایین 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[23]

(Figure-1): The Yerkes–Dodson law is an empirical relationship between arousal and performance, The law dictates that performance increases with physiological or mental arousal, but only up to a point. When levels of arousal become too high, performance decreases [23].

۳- طرح مسئله

یک BPMS شامل مجموعه‌ای از فرایندهای کسب‌وکار است که برای توصیف تمام فعالیت‌های موجود در یک سازمان تعریف می‌شود. این فرایندها با توجه به نوع و عملکرد هر سازمان تعریف می‌شوند و از مجموعه‌ای از منابع انسانی برای اجرای فعالیت‌های تعریف‌شده در سازمان استفاده می‌شود. به‌طور عمومی هر فرایند دارای یک ورودی درخواست است و درخواست‌های ورودی هر فرایند با توجه به جامعه درخواست‌دهنده دارای آهنگ یا نرخ ورود متفاوتی هستند؛ البته اگر تابع توزیع آماری آن‌ها پواسن یا گاما فرض شود؛ بنابراین در محیط‌های چندفرایندی حل مسئلهٔ تعادل بارکاری در شرایطی که نرخ ورود متفاوت است، بسیار مشکل می‌شود؛ درحالی‌که این مسئله برای یک فرایند مشخص با نرخ ورود ثابت حل شده است [5-7]. نکتهٔ قابل توجه این است؛ زمان فعال‌سازی فرایند یا به عبارت دیگر زمان شروع برای رسیدن نخستین درخواست توسط مدیران در سازمان‌ها تعیین می‌شود با تعیین زمان مناسب برای فعال‌سازی هر فرایند در محیط‌های چند فرایندی می‌توان تعادل بارکاری منابع و سطح بهینه برای بارکاری هر منبع را بهبود داد؛ لذا در ادامه، برای شرح مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی فرایندها لازم است، برخی مفاهیم و تعاریف بیان شود.

۱-۳- مفاهیم و تعاریف

تعریف۱: مدلِ تحلیلیِ فرایند کسب وکار

مدلِ تحلیلیِ فرایند کسب‌وکار به‌صورت چندتایی $p = \langle \varphi, W, R, L, U, \mu, \xi, \sigma, T, last, ld \rangle$ تعریف می‌شود.

أ. φ نرخ ورود درخواست مشتریان است.(در مدل تحلیلی فرایند توزیع آماری درخواست‌های ورودی را پواسن فرض می‌شود)

ب. W مجموعهٔ وظایف[1] تعریف‌شده در فرایند است.

ج. R مجموعهٔ منابع انسانی موجود در فرایند است.

د. مجموعهٔ $L \subseteq W \times W$ شامل اتصالات بین وظایف است. به‌عنوان مثال، $\langle w_1, w_2 \rangle \in L$ نشان می‌دهد در فرایند p وظیفه w_2 بعد از وظیفه w_1 انجام می‌شود.

ه. مجموعهٔ $U \subseteq W \times R$ منابع مسئول هر وظیفه را مشخص می‌کند. به‌عنوان مثال $\langle w, r \rangle \in U$ نشان می‌دهد در فرایند p منبع r مسئول انجام‌دادن وظیفه w است. طبق تعریف U می‌توان نتیجه گرفت در فرایند p برای هروظیفه $w \in W$ ممکن است، چند منبع مسئول وجود داشته باشد؛ بنابراین به‌اختصار R_w به‌صورت $R_w = (r | \langle w, r \rangle \in U)$ تعریف می‌شود که مجموعهٔ تمام منابع مسئول فعالیت w در فرایند p است.

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

ز. $\xi: U \rightarrow [0,1]$ یک نگاشت از مجموعهٔ U به اعداد حقیقی بین صفر و یک است. از آن‌جایی‌که برای هر وظیفهٔ w مجموعه‌ای از منابع مسئول R_w وجود دارد و در اجرای فرایند فقط یکی از منابع وظیفه w را انجام می‌دهد؛ $\xi(\langle w, r \rangle)$ بیان‌گر احتمال انجام وظیفه w توسط منبع r است که به‌اختصار به‌صورت $\xi_{w,r}$ نشان داده می‌شود.

ح. $\sigma: R \rightarrow \mathbb{R}^+$ یک نگاشت از مجموعهٔ R به اعداد حقیقی مثبت است و برای هر عضو $r \in R$ به‌اختصار به‌صورت σ_r بیان می‌شود. مقدار σ_r بیان‌گر بهترین مقدار برای بارکاری منبع r است؛ به‌طوری که در این سطح از بارِکاری منبع r طبق قاعدهٔ Yerkes-Dodson بهترین کارایی را دارد. مقادیر σ با بررسی و تحلیل آماری سابقهٔ رویدادها برای هر منبع r قابل محاسبه است.

[1] Tasks

ط. $T:\langle t_0,t_1,t_2,\dots,t_N\rangle$ دنبالهٔ گسسته از اعداد طبیعی است؛ به‌طوری‌که $\forall t_i\in T, t_i<t_{i+1}$ و t_i ها بیان‌گر زمان‌هایی است که بارِکاری دست‌کم یکی از منابع $r\in R$ در فرایند p تغییر کرده است (بارِکاری منابع در زمان تخصیص وظیفه به منبع افزایش و در زمان تکمیل اجرای آن کاهش می‌یابد).

ی. $last$ تابعی است که مقدار آخرین عنصر دنبالهٔ T از فرایند p را برمی‌گرداند. به عبارت دیگر مقدار t_N را برمی‌گرداند و به‌صورت $last(p)$ استفاده می‌شود.

ک. $ld:R\times T\to\mathbb{R}^+$ یک نگاشت از مجموعهٔ $R\times T$ به اعداد حقیقی مثبت است که برای هر عضو $\langle r,t_i\rangle\in R\times T$ مشخص می‌کند بارکاری منبع r در فرایند p در زمان t_i چقدر بوده است و به‌اختصار با $ld_{r,p}(t_i)$ نشان داده می‌شود.

وقتی یک فرایند کسب‌وکار در شبکهٔ صف مدل می‌شود، هر وظیفه در فرایند یک ایستگاه سرویس‌دهی و هر منبع منتسب به این وظیفه، یک عامل سرویس‌دهنده است. ازآن‌جایی‌که در هر وظیفه w احتمال قرارگرفتن واحدِکاری در فهرست اختصاصی منبع $\xi_{w,r}$ است، رابطهٔ (۱) برای تمام سرویس‌دهنده‌های (منابع) تعریف‌شده در یک ایستگاه سرویس‌دهی (وظیفه) برقرار است:

$$\sum_{r\in R_w}\xi_{w,r}=1,\forall w\in W \qquad (۱)$$

میزان بارِکاری هر ایستگاه سرویس‌دهی را با داشتن نرخ ورود درخواست به هر ایستگاه و نرخ سرویس‌دهی می‌توان به‌دست 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 رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید[۳۷].

$$\rho=\sum\frac{\lambda_i}{\mu_i} \qquad (۲)$$

در این مقاله، کلیهٔ منابع مسئولِ انجام یک وظیفه در یک دسته قرار می‌گیرند؛ بنابراین هر دسته در رابطهٔ (۲) بیان‌گر یک وظیفه در فرایند و منابع مسئول آن است. اگر $\varphi_w(t)$ تابع نرخ ورود وظیفه w در زمان t و $\xi_{w,r}$ احتمال تخصیص وظیفه w به منبع r و $\mu_{w,r}$ میانگین نرخ سرویس دهی منبع r روی وظیفه w باشد. رابطهٔ (۳) میزان بارِکاری منبع r را در زمان t محاسبه می‌کند:

$$ld_r(t)=\sum_{w\in W_r}\frac{\xi_{w,r}\cdot\varphi_w(t)}{\mu_{w,r}} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳)، $W_r=\{w|\langle w,r\rangle\in U\}$ مجموعه تمام وظایفی است که در فرایند برای منبع r تعریف شده است.

تعریف۲: تعادل بارکاری

در پیشینه پژوهش تعاریف متفاوتی از تعادل بارکاری منابع ارائه شده است [5,6,24]. در اینجا دو تعریف را ارائه می‌دهیم که از نظر مفهوم، یکسان هستند. در تعریف نخست طبق رابطهٔ (۴) بیشینه بارِکاری منابع باید کمینه شود:

$$\min\max_{r\in R}\left\{\int ld_r(t)d(t)\right\} \qquad (۴)$$

در تعریف نخست، مجموع بارکاری را در طول زمان درنظر گرفته است؛ درحالی‌که در تعریف دقیق‌تر، بارکاری منابع در هر لحظه از زمان باید متعادل باشد. به‌عبارت دیگر، برای یک بازهٔ زمانی مشخص $[t_0,t_N]$ مجموع تغییرات بارِکاری باید کمینه شود. به بیان دیگر، اگر در بازهٔ زمانی $[t_0,t_N]$ مقدار رابطهٔ (۵) کمینه شود، تعادل بارِکاری برای منابع به وجود آمده است:

$$EL(t)=\sum_{r\in R}ld_r(t)\Big/|R|$$
$$min\left\{\frac{\sum_{r\in R}\sum_{i=0}^{N}(ld_r(t_i)-EL(t_i))^2}{N|R|}\right\} \qquad (۵)$$

ازآن‌جایی‌که تغییرات در بارِکاری منابع در لحظهٔ تخصیص وظایف به منابع انجام می‌شود، مقادیر t در رابطهٔ (۵) گسسته فرض شده است. تعریف ارائه‌شده از تعادل بارِکاری در رابطهٔ (۵) به تغییرات بارِکاری در هر لحظه از زمان توجه دارد؛ به‌طوری‌که ابتدا میانگین بارکاری در لحظهٔ t محاسبه می‌شود $(EL(t))$؛ سپس تغییرات بارکاری نسبت به میانگین در هر لحظه از زمان، باید کمینه شود تا تعادل بارکاری برای منابع در طول زمان ایجاد شود.

تعریف۳: سطح بهینه برای بارِکاری منابع

همان‌طور که در بخش ۲-۲ اشاره شده؛ سطح فشار عصبی در کارایی منابع تأثیرگذار است. ازآن‌جایی‌که میزان بارِکاری هر منبع رابطهٔ مستقیم با میزان فشار عصبی آن دارد، بهتر است بارِکاری هر منبع r در سطحی مشخص σ_r، با کمینه تغییرات باشد. بنابراین ایجاد یکنواختی در بارِکاری هر منبع در طول زمان در سطح مشخص σ_r باعث توزیع بهتری از حجم‌کاری منبع در طول دورهٔ کاری‌اش می‌تواند ایجاد کند و در نتیجه باعث افزایش کارایی آن منبع و افزایش کیفیت سرویس‌دهی

آن شود. رابطهٔ (۶) تعریف کم‌ترین تغییرات نسبت به سطح بهینه برای بارِکاری منابع است:

$$min\left\{\frac{\sum_{r\in R}\sum_{i=0}^{N}(ld_r(t_i)-\sigma_r)^2}{N|R|}\right\} \qquad (۶)$$

تعریف۴ : مجموعه فرایندها با منابع مشترک

در هر سازمان مجموعه‌ای از فرایندهای کسب‌وکار وجود دارد. وظایف تعریف‌شده در این فرایندها توسط منابع انسانی مسئول در سازمان انجام می‌شود. بنابراین مجموعهٔ $\boldsymbol{P} = (p|\exists q \in P, p \neq q, p.R \cap q.R \neq \emptyset)$ به‌عنوان کلیهٔ فرایندهای کسب‌وکارِ موجود در یک سازمان با منابع مشترک تعریف و مجموعهٔ $Rs = \bigcup_{p\in P} p.R$ به‌عنوان مجموعهٔ تمام منابع انسانی موجود در سازمان در نظر گرفته می‌شود.

تعریف۵: الگوی بارِکاری منابع در طول زمان

اگر به تابع تعریف‌شده در رابطهٔ (۳) پارامتر فرایند (p) اضافه شود، رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید. اگر مقادیر تعریف‌شده در رابطهٔ (۷) با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی محاسبه شود و اجرای i ام شبیه‌ساز با $ld^i_{r,p}(t)$ نشان داده شود و N تعداد دفعات اجرای شبیه‌ساز باشد، آن‌گاه الگوی بارِکاری منابع در طول زمان مطابق با رابطهٔ (۸) حاصل می‌شود:

$$ld_{r,p}(t) = \sum_{w\in W_r} \frac{\xi_{w,r}\cdot\varphi_w(t)}{\mu_{w,r}}, p \in P, w \in p.W, r \in p.R \qquad (۷)$$

$$\overline{ld_{r,p}}(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} ld^i_{r,p}(t_0)\Big/_N & , t = t_0 \\ \sum_{i=1}^{N} ld^i_{r,p}(t_1)\Big/_N & t = t_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{N} ld^i_{r,p}(t_n)\Big/_N & t = t_n \end{cases} \qquad (۸)$$

۲-۳- بهینه‌سازی در تنظیم هم‌روندیِ فرایندها

تنظیم هم‌روندی فرایندها هنگام اجرای آن‌ها طوری باید انجام شود که اگر یک منبع در یک فرایند، بارِکاری کم‌تری دارد، در همان لحظه در فرایندی دیگر بارِکاری بیش‌تری نسبت به سایر منابع داشته باشد. تنظیم هم‌روندی بهینه برای دو فرایند با یک الگوریتم خطی ساده امکان‌پذیر است؛ ولی تنظیم هم روندی برای چند فرایند، یک مسئلهٔ پیچیده‌تر است. در این مقاله، این مسئله برای چند فرایند به‌عنوان یک مسئلهٔ بهینه سازی معرفی و برای حل آن، یک الگوریتم پویا ارائه می‌شود.

برای تنظیم هم‌روندی فرایندها باید به فرض‌ها و محدودیت‌های زیر اشاره کرد:

الف) جابه‌جایی بارِکاری یک منبع در فرایند در راستای محور زمان امکان‌پذیر نیست؛ در صورت لزوم، بارِکاری تمامِ منابعِ شرکت‌کننده در فرایند را در راستای زمان می‌توان جابه‌جا کرد. به عبارت دیگر کل فرایند در راستای زمان قابل جابه‌جایی است؛ ولی بارِکاری یک منبع مشخص در فرایند را در راستای زمان نمی‌توان جابه‌جا کرد.

ب) برای جابه‌جاییِ بارِکاری تمام منابع در یک فرایند در راستای محور زمان، فقط امکان ایجاد تأخیر در ابتدا فرایند (قبل از شروع فرایند) وجود دارد.

اگر از یک عنصر تأخیردهنده در ابتدای فرایند p استفاده شود، آنگاه اثر آن در الگوی بارِکاری منبع r به‌صورت $\overline{ld_{r,p}}(t-\Delta t_p)$ می‌شود که Δt_p میزان تأخیر ایجادشده توسط عنصر تأخیردهنده در شروع فرایند p است. طبق محدودیت (الف) برای تمام منابع شرکت‌کننده در فرایند p مقدار Δt_p باید یکسان باشد. برای ایجاد هم‌روندی بین چند فرایند کافی است، درخواست‌ها در یک لحظه از زمان به فرایندها برسند و این باعث می‌شود بارِکاری منابع مشترک باهم جمع شود. هدف از حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی فرایندها، قراردادن عناصر تأخیردهنده در ابتدای فرایندها است؛ به‌صورتی‌که مقادیر Δt_pها به‌گونه‌ای تنظیم شود که انحراف از تعادل بارِکاری در منابع (رابطهٔ (۱۳)) و تغییرات نسبت به سطح بهینه برای هر منبع (رابطهٔ (۱۱))، کمینه شود. به‌عبارت‌دیگر، مقادیر Δt_p در رابطهٔ (۹) طوری تعیین شود تا رابطهٔ (۱۴) کمینه شود:

$$total_ld_r(t) = \sum_{p\in P} \overline{ld_{r,p}}(t-\Delta t_p) \qquad (۹)$$

$$Rs = \bigcup_{p\in P} p.R \qquad (۱۰)$$

$$ULD = \frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_{ld_r}(t_i)-\sigma_r)^2}{N|Rs|} \qquad (۱۱)$$

$$EL(t) = \sum_{r\in Rs} total_ld_r(t)/|Rs| \qquad (۱۲)$$

$$VLD = \frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_ld_r(t_i)-EL(t_i))^2}{N|Rs|} \qquad (۱۳)$$

$$LBFAT = \alpha ULD + (1-\alpha)VLD \qquad (۱۴)$$

در رابطه‌های (۹ تا ۱۴) به‌ازای هر فرایند یک مجهول Δt_p وجود دارد که میزان تأخیر ایجادشده در ابتدای فرایند p را نشان می‌دهد. مقادیر Δt_pها نقش تنظیم‌کننده را در هم‌روندی فرایندها دارند. رابطهٔ (۹) مقدار مجموع بارِکاری منبع r را در اجرای هم‌روند فرایندهای مجموعهٔ P محاسبه

می‌کند. رابطه (۱۱) میزان یک‌نواختی بارِکاری منابع را در طول زمان محاسبه می‌کند، در صورتی مقدار ULD[1] کمینه می‌شود که بارِکاری $total_ld_r(t)$ برای تمام منابع مانند r در طول زمان تغییرات کم‌تری نسبت به مقدار σ_r داشته باشد. در رابطهٔ (۱۳)، VLD[2] جمع مربعات تفاوت بارِکاری منابع نسبت به میانگین در طول زمان است که کمینه‌شدن آن به معنای تعادل بیش‌تر در بارِکاری منابع است. در رابطهٔ (۱۴)، $LBFAT$[3] تابع هدف مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی است و معیار اندازه‌گیری جهت تعادل بارکاری کلیهٔ منابع و یک‌نواختی در بارکاری هر منبع است. مقدار α و $(1-\alpha)$ به‌ترتیب به‌عنوان ضریب تأثیر مقادیر ULD و VLD معرفی می‌شوند.

۴- حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی

۴-۱- جستجوی فضای حالت

نخستین و ساده‌ترین روش برای حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی جستجو در فضای حالت مسئله است. با بررسی تمام حالت‌های موجود مسئله و محاسبه مقدار LBFAT برای هر حالت، با توجه به روابط (۹ تا ۱۴) به‌سادگی به این نتیجه می‌توان رسید که پیچیدگی زمانی محاسبهٔ مقدار LBFAT ، در بدترین حالت $O(|P||Rs|+2N|Rs|+|Rs|)=O(|Rs|(|P|+2N+1))$ می‌شود. که در آن $|P|$ تعداد فرایندهای هم‌روند شده است. N تعداد رویدادهای اتفاق‌افتاده در طول اجرای فرایند است که در هر رویداد بارکاری برخی منابع تغییر کرده و $|Rs|$ تعداد منابع موجود در سازمان است.

برای تنظیم مسئلهٔ هم‌روندی چند فرایند در جستجوی فضای حالت تمام حالت‌هایی که Δt_pها را می‌توان مقداردهی کرد، شمارش می‌کنیم. با محاسبهٔ جایگشت‌های مختلف فرایندها و فاصلهٔ زمانی هر دو فرایند پشت سر هم به این نتیجه می‌توان رسید که کل حالت‌های مسئله برابر با $|P|!\binom{N}{|P|}$ می‌شود. با جای‌گذاری مقدار ترکیب $|P|$ از N این تعداد به‌صورت $\frac{N!}{(N-|P|)!}$ ساده می‌شود. بنابراین با اعمال پیچیدگی زمانی محاسبهٔ LBFAT پیچیدگی زمانی الگوریتم جستجوی فضای حالت برای حل مسئلهٔ پیشنهادشده به‌صورت $\theta(\frac{N!}{(N-|P|)!}|Rs|(|P|+2N+1))$ می‌شود. با بسط $N!$ و $(N-|P|)!$ و ساده‌سازی عبارات بسط‌داده‌شده، به پیچیدگی زمانی $O(N^{|P|}|Rs|(|P|+2N+1))$ می‌توان رسید.

[1] Uniformity of workload
[2] Variancc of workload
[3] Load Balancing Factor Along Time

۴-۲- بهینه‌سازی پویا

روش برنامه‌نویسی پویا یا بهینه‌سازی پویا، روش شناخته‌شده‌ای است که در ریاضیات، علوم رایانه و علوم مدیریت استفاده می‌شود. با اینکه نخستین‌بار این روش توسط ریچارد بلمن در سال ۱۹۴۰ معرفی و استفاده شد [25]، هنوز مورد توجه پژوهش‌گران و نویسندگان قرار می‌گیرد [26-29]. بهینه‌سازی پویا یکی از روش‌های بهینه‌سازی به روش تقسیم حل است که به‌صورت بازگشتی (پایین به بالا) جواب بهینهٔ مسئله را پیدا می‌کند. اگر $P=\{p_1,p_2\}$ باشد، با دوبار پیمایش روی بازهٔ زمانی $[t_0,t_N]$ مقدار بهینه برای LBFAT حاصل می‌شود. الگوریتم WorkloadMerge نحوهٔ ادغام بارِکاری منابع را برای حالتی‌که $|P|\geq 2$ است و مقدار کمینهٔ LBFAT حاصل می‌شود، نشان می‌دهد.

(الگوریتم-۱): ادغام بارکاری فرایندها

Algorithm WorkloadMerge ()
Input:
⟨**A**: list of Process, $\mathbf{D_A}$: delay vector of A, **q**: process⟩
Output: ⟨minLBFAT, newD, $ld_r^{A\cup\{q\}}$⟩

$\{P \leftarrow A.push(q);$
$MinWLFAT=\infty;$
$\boldsymbol{for}\left(m=0;m<\max_{p\in A}(last(p));m++\right)\{$
$D \leftarrow D_A.push(m);$
$ld_r(t)=\sum_{p_i\in P} ld_{r,p_i}(t-D(i));\ \forall t \in \{t_0,t_1,t_2,\dots t_{\max(last(p),last(q))}\}$
$Rs=\bigcup_{p\in P} p.R$
$ULD=\frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_{ld_r}(t_i)-\sigma_r)^2}{N|Rs|}$
$EL(t)=\sum_{r\in Rs} total_ld_r(t)/|Rs|$
$VLD=\frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_ld_r(t_i)-EL(t_i))^2}{N|Rs|}$
$LBFAT \leftarrow (ULD+VLD)/2$
$if(LBFAT<minLBFAT)\{$
$minLBFAT \leftarrow LBFAT;$
$newD \leftarrow D;$
$ld_r^{A\cup\{q\}}(t)=ld_r(t);$
$\}//if$
$\}//for$
$\boldsymbol{for}(n=1;n<last(q);n++)\{$
$\boldsymbol{foreach}\ (d_i \in D_A)\ \boldsymbol{do}\ d_i \leftarrow d_i+n;$
$D \leftarrow D_A.push(0);$
$ld_r(t)=\sum_{p_i\in P} ld_{r,p_i}(t-D(i));\ \forall t \in \{t_0,t_1,t_2,\dots t_{\max(last(p),last(q))}\}$
$Rs=\bigcup_{p\in P} p.R$

$$ULD = \frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_{ld_r}(t_i) - \sigma_r)^2}{N|Rs|}$$

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

$$VLD = \frac{\sum_{r\in Rs}\sum_{i=0}^{N}(total_ld_r(t_i) - EL(t_i))^2}{N|Rs|}$$

$LBFAT \leftarrow (ULD + VLD)/2$
if $(LBFAT < minLBFAT)$*{*
  $minLBFAT \leftarrow LBFAT;$
  $newD \leftarrow D;$
  $ld_r^{A\cup\{q\}}(t) = ld_r(t);$
}//if
}//for
return $\langle minLBFAT, newD, ld_r^{A\cup\{q\}}(t)\rangle$
}// WorkloadMerge

اگر فرض کنیم برای مجموعه‌ای از فرایندهای مانند A مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی به‌صورت بهینه حل شده و مقدار Δt_p برای $\forall p \in A$ به‌صورت بهینه به‌دست آمده و در بردار D قرار گرفته است، الگوریتم WorkloadMerge یک ادغام بهینه (کمینه مقدار برای LBFAT در رابطهٔ (۱۴)) از بارِکاری منابع در فرایند q با بارِکاری منابع در فرایندهای مجموعهٔ A ایجاد می‌کند. اگر $A = \{p\}$ و $D = [0]$ باشد، الگوریتم WorkloadMerge یک ادغام بهینه بین بارکاری منابع در فرایندهای p و q ایجاد می‌کند. در این حالت کافی است تابع $WorkloadMerge(\{p\}, [0], q)$ فراخوانی شود؛ در این حالت، در دو حلقهٔ for یک بار برای فرایند p تأخیر با مقادیر m و یک بار برای فرایند q تأخیر با مقادیر n ایجاد و کم‌ترین مقدار LBFAT محاسبه می‌شود. پیچیدگی الگوریتم $WorkloadMerge$ به‌سادگی قابل محاسبه است و برابر با $O(|Rs|(|P| + 2N + 1) \times 2N)$ می‌شود که در آن $|P|$ تعداد فرایند، $|Rs|$ تعداد منابع مشترک در فرایندها و $N = \max_{p\in P}(last(p))$ بیشینه تعداد رویدادهای رخ در فرایند است که به واسطه آن بارِکاری دست‌کم یک منبع تغییر کرده است.

برای حل مسئلهٔ هم‌روندی جهت فرایندهای بیش‌تر از دو فرایند، اگر P مجموعه‌ای فرایندهای ورودی مسئله باشد، کافی است، ابتدا مسئله برای تمام زیرمجموعه‌های دوعضوی از P با استفاده از الگوریتم $WorkloadMerge$ حل شود؛ سپس تمام زیرمجموعه‌های سه‌عضوی P را به‌صورت بهینه ادغام می‌کنیم؛ به‌عنوان مثال برای حل یک زیرمجموعه سه‌عضوی مانند $\{p_1, p_2, p_3\}$ سه بار تابع ادغام بارکاری به‌صورت‌های $WorkloadMerge(\{p_1, p_2\}, [\Delta t_{p_1}, \Delta t_{p_2}], p_3)$ برای ادغام p_3 با $\{p_1, p_2\}$ و $WorkloadMerge(\{p_2, p_3\}, [\Delta t_{p_2}, \Delta t_{p_2}], p_1)$ برای ادغام p_1 با $\{p_2, p_3\}$ و به همین صورت برای ادغام p_2 با $\{p_1, p_3\}$ تابع به‌صورت $WorkloadMerge(\{p_1, p_3\}, [\Delta t_{p_1}, \Delta t_{p_3}], p_2)$ فراخوانی می‌شود و خروجی کمینه این سه فراخوانی به‌عنوان ادغام بهینه برای مجموعه $\{p_1, p_2, p_3\}$ در نظر گرفته می‌شود. به همین صورت زیرمجموعه‌های چهارعضوی حل و از مقادیر حاصل‌شده در مراحل قبلی استفاده می‌شود و این مراحل تا رسیدن به جواب نهایی که مجموعه P است، ادامه می‌یابد. حال اگر S_P^k مجموعهٔ تمام زیرمجموعه‌های k تایی از مجموعه فرایندهای P باشد و اگر تابع $WorkloadMerge$ به‌اختصار با WM نشان شود و برای دسترسی به خروجی تابع $WorkloadMerge$ که به‌صورت سه‌تایی $\langle w, D, ld\rangle$ است، از نمادهای WM_w ، WM_D و WM_{ld} استفاده شود، رابطهٔ بازگشتی (۱۵) برای حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی به‌صورت پویا ارائه می‌شود:

$$\forall A \in S_P^2: \langle w_A, D_A, ld_r^A\rangle \leftarrow WM(\langle\{p\}, [0], q\rangle), p, q \in A, p \neq q$$

$$\forall B \in S_P^k \quad 3 \le k \le |P| \quad : \begin{cases} w_B \leftarrow \min\limits_{q\in B}\left(WM_w(\langle B - \{q\}, D_{B-\{q\}}, ld_r^{B-\{q\}}\rangle)\right) \\ p \leftarrow \operatorname{Arg}\min\limits_{q\in B}\left(WM_w(\langle B - \{q\}, D_{B-\{q\}}, ld_r^{B-\{q\}}\rangle)\right) \\ D_B \leftarrow WM_D(\langle B - \{p\}, D_{B-\{p\}}, ld_r^{B-\{p\}}\rangle) \\ ld_r^B \leftarrow WM_{ld}(\langle B - \{p\}, D_{B-\{p\}}, ld_r^{B-\{p\}}\rangle) \end{cases} \qquad (۱۵)$$

در رابطهٔ (۱۵) ابتدا مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی برای تمام زیرمجموعه‌های دوعضوی P حل می‌شود و سه‌تایی‌های $\langle w_A, D_A, ld_r^A\rangle$ برای تمام مجموعه‌های دوعضوی به‌دست می‌آید؛ سپس مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی برای زیر مجموعه‌های سه‌عضوی حل می‌شود. در حل مسائل با یک عضو بیش‌تر از مقادیر حاصل‌شده از زیرمجموعه‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود و مسائل با یک عضو کم‌تر به‌کمک تابع $WorkloadMerge$ با عضو جدید ادغام شده و مقدار کمینه آن برای مرحلهٔ بعد استفاده می‌شود.

پیچیدگی زمان الگوریتم پویای ارائه‌شده در این مقاله با توجه به رابطهٔ (۱۵) قابل محاسبه است. تعداد دفعاتی که تابع $WorkloadMerge$ فرآخوانی می‌شود، برابر با $\binom{|P|}{2} + 3\binom{|P|}{3} + 4\binom{|P|}{4} + \cdots + |P|\binom{|P|}{|P|}$ است، درنتیجه در بدترین حالت تعداد دفعات فراخوانی $O(|P|2^{|P|})$ و با اعمال پیچیدگی زمانی تابع $WorkloadMerge$ پیچیدگی زمانی الگوریتم پویای ارائه‌شده در بدترین حالت $O(|P|2^{|P|} \times |Rs|(|P| + 2N + 1) \times 2N)$ می‌شود؛

بنابراین در حـــل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی، الگوریتم پویای ارائه‌شده نسبت به الگوریتم جستجوی فضای حالت دارای پیچیدگی زمانی کم‌تری است. در هر دو الگوریتم پیچیدگی زمانی نسبت به $|P|$ نمایی است؛ با این تفاوت که در نسخهٔ پویا پایه از N به ۲ کاهش یافته و در الگوریتم جستجوی فضای حالت پیچیدگی زمانی نسبت به N یک چندجمله‌ای از درجهٔ $|P|+1$ است؛ درحالی که در نسخهٔ پویا یک چندجمله‌ای از درجهٔ ۲ است. ازآن‌جایی‌که مقدار N بزرگ‌ترین مؤلفه در مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی است و این مؤلفه نسبت به $|P|$ بسیار بزرگ است. تغییرات حاصل‌شده در پیچیدگی زمانی در نسخهٔ پویا تأثیر چشم‌گیری در سرعت اجرای الگوریتم دارد.

۳-۴- الگوریتم تکاملی PSO

الگوریتم‌های ارائه شده در بخشهای ۴-۱ و ۴-۲ مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی فرایندهای کسب‌وکار را به‌صورت بهینه حل می‌کنند و باتوجه به کاهش چشم‌گیر در پیچیدگی زمانی در نسخهٔ پویا، هنوز هر دو الگوریتم نسبت به مؤلفهٔ $|P|$ نمایی هستند. الگوریتم های زیادی وجود دارد که به‌صورت تقریبی مسائل بهینه‌سازی را حل می‌کنند و پیچیدگی زمانی آن‌ها نسبت به حل بهینه کم‌تر است، مانند الگوریتم ژنتیک، PSO، ICA [30] و کلونی مورچه‌ها، تپه‌نوردی و غیره. در این بخش برای حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی از الگوریتم PSO استفاده می‌کنیم. PSO یک الگوریتم تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی است [31]، که در بسیار از پژوهش‌ها از آن استفاده شده است [32-35]. 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 به‌صورت 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 (کم‌هزینه‌ترین) جواب عمومی ذرات و بهترین جواب محلی ذره استفاده می‌شود. در رابطه‌های (۱۶و۱۷) روش به‌هنگام‌سازی سرعت و موقعیت هر ذره آمده است:

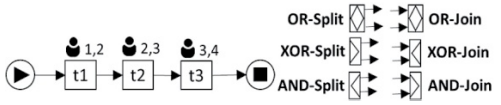
$$V^{new}(c) = c_1 r_1 (Global - X^{cur}(c)) + c_1 r_1 (Local(c) - X^{cur}(c)) + w V^{cur}(c) \quad (۱۶)$$

$$X^{new}(c) = X^{cur}(c) + V^{new}(c) \quad (۱۷)$$

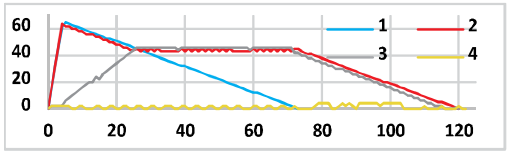
مقادیر r_1 و r_2 دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک است، مقادیر c_1 و c_2 به‌ترتیب ضرایب تأثیر جواب عمومی و محلی ذرات است، مقدار w هم ضریب اینرسی ذره است. در آزمایش انجام‌شده در این مقاله مقادیر c_1 ،c_2 و w به‌ترتیب ۰/۷ ، ۰/۳ و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. برای کمینه‌کردن مقدار رابطهٔ (۱۴) از الگوریتم تکاملی PSO استفاده می‌کنیم. جهت بهینه‌سازی مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی چند فرایند، کافی است، مقدار رابطهٔ (۱۴) به‌عنوان تابع هدف، کمینه شود؛ در این بهینه‌سازی، بردار Δt به‌عنوان بردار موقعیت ذرات درنظر گرفته می‌شود، که بُعد این بردار برابر با تعداد فرایندهایی است که قرار است، هم‌روند شوند.

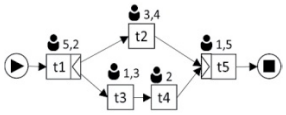
۵- آزمایش و نتایج

در این بخش، بـــرای مقایسهٔ ســـرعت اجـــرای ســـه الگوریتم ارائه‌شده در بخش ۴ یک آزمایش با پنج فرایند کسب‌وکار با پنـــج منبع مشترک انجام می‌شود. در شکـــل (۵-۱) نمودار YAWL[1] [36] پنج فرایندهـــای کسب‌وکـــار با نمودارهـــای بارکاریِ منابعِ مسئول در این فرایندها آمده است.

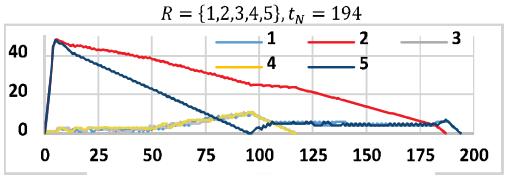


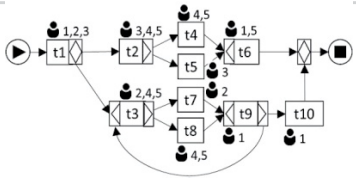
$R = \{1,2,3,4\}, t_N = 121$





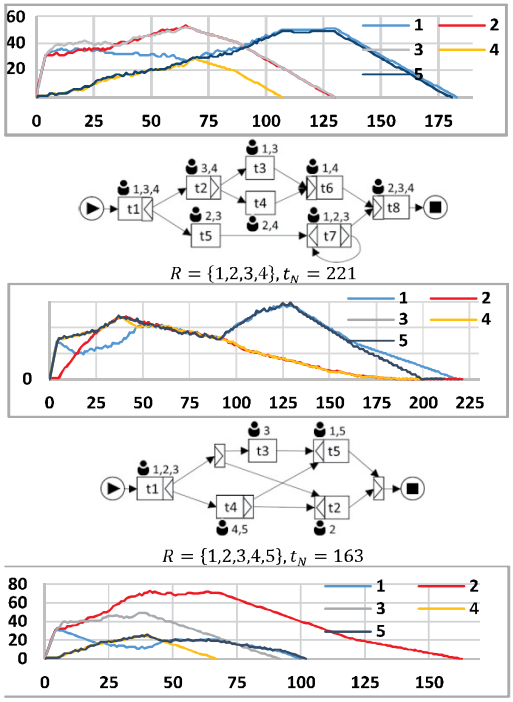
$R = \{1,2,3,4,5\}, t_N = 194$





$R = \{1,2,3,4,5\}, t_N = 183$

[1] Yet another workflow language

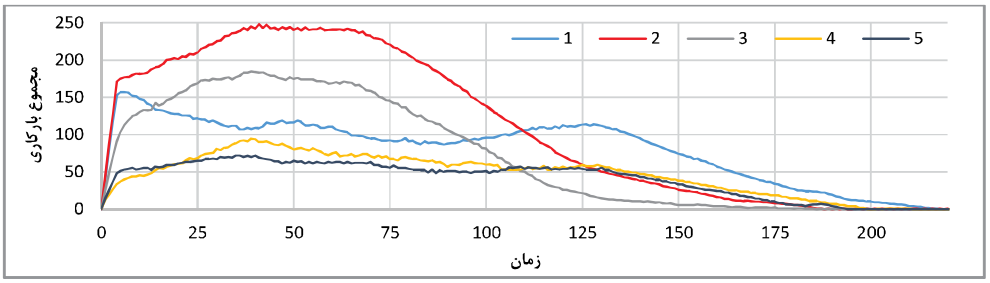


(شکل-۲): پنج فرایند کسب‌وکار و نمودار بارکاری آن‌ها

(Figure-2): Five business process and resource workload

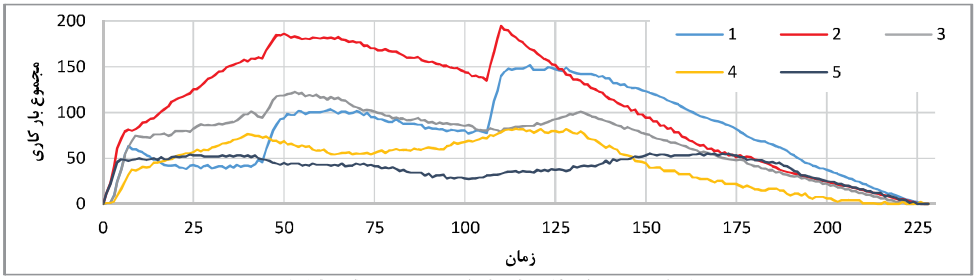
در شکل (۲) الگوهای بارکاری منابع برای هر یک از فرایندهای توسط شبیه‌سازی به‌دست آمده است. در شبیه‌سازی توزیع آماری درخواست‌های ورودی پواسن فرض شده و نرخ ورود روی مقدار ۰/۱ تنظیم شده و مجموع کل درخواست‌های ورودی به دویست درخواست محدود شده است. برای هر فرایند جهت استخراج الگوی بارکاری، اجرای شبیه‌ساز پنج بار تکرار شد و الگوی بارکاری طبق رابطهٔ (۸) به‌دست آمد. در شکل (۲) علاوه‌بر الگوی بارکاری منابع مدل فرایند کسب‌وکار با زبان مدل‌سازی YAWL رسم شده است. در هر مدل روی هر وظیفه شمارهٔ منابع مسئول مشخص شده است.

اگر مقادیر Δt_pها را به‌عنوان بردار تأخیر D (تنظیم کنندهٔ هم‌روندی) دارای مقدار $D = [0,0,0,0,0]$ فرض شود، الگوی بارِکاری جمع‌شدهٔ منابع به‌صورت شکل (۳ الف) و مقدار LBFAT آن برابر با مقدار ۸۸۳۵۷ می‌شود. بعد از تکرار نخست در الگوریتم PSO برای مقدار بردار تأخیر به‌صورت $D = [0,7.6,43,57.2,11.7]$ حاصل شد که در این حالت مقدار LBFAT برابر با ۸۰۳۸۹ می‌شود (الگوی شکل (۳ د)). با حل مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی با یکی از روش‌های بخش ۴ به‌صورت بهینه، الگوی شکل (۳ ب) یا به‌صورت تقریبی (با الگوریتم PSO) الگوی شکل (۳ ج) حاصل می‌شود؛ که به‌ترتیب مقادیر ۶۱۹۸۹ و ۶۲۰۷۳ برای LBFAT به‌دست آمده است. تنظیم مقدار D در هم‌روندی فرایندها باعث می‌شود، بارکاری منابع در راستای محور زمان به‌گونه‌ای جابه‌جا شود تا هدف بهینه‌سازی مسئله که تعادل بارکاری و یک‌نواختی بارکاری منابع است، تأمین شود.



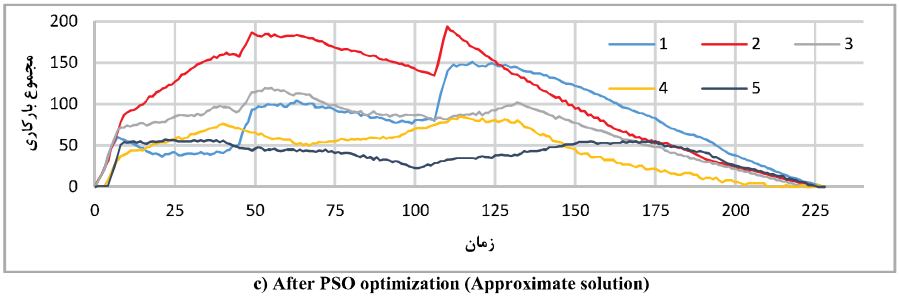
a) Before Optimization

(الف) قبل از بهینه‌سازی با $D = [0,0,0,0,0]$ و LBFAT = 88357



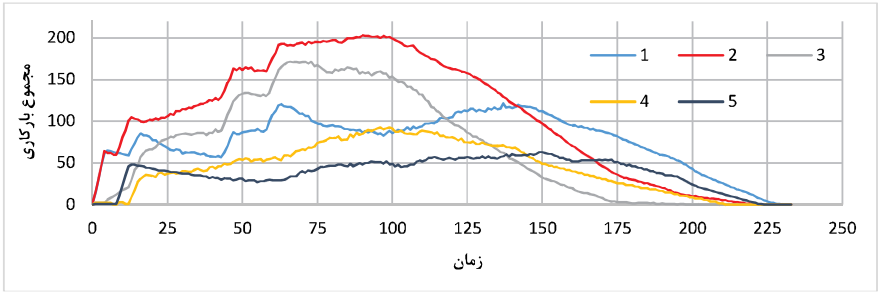
b) After full search optimization (Optimal solution)

(ب) جواب بهینه با $D = [106,0,44,2,3]$ و LBFAT = 61989



c) After PSO optimization (Approximate solution)

(ج) جواب تقریبی با $D = [106, 4, 45, 0, 3]$ و LBFAT = 62073



d) After first step in PSO optimization

(د) جواب بعد از تکرار اول PSO با $D = [0, 7.6, 43, 57.2, 11.7]$ و LBFAT = 80389

(شکل-۳): نتیجهٔ تنظیم هم‌روندی فرایندها با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادشده

(Figure-3): result of tuning concurrent by running the proposed algorithm

برای آزمایش سرعت اجرای الگوریتم‌های معرفی‌شده در این مقاله از یک رایانه با پردازندهٔ Core i7 با فرکانس 4GHr با 16Gbyte حافظهٔ اصلی استفاده و نتایج آزمایش در جدول (۱) گزارش شد.

(جدول-۱): پیچیدگی زمانی و زمان اجرای الگوریتم‌های ارائه‌شده

$(|P| = 5. |Rs| = 5, N = 211)$

(Table-1): Time complexity of the presented algorithms

الگوریتم	جمعیت(p)	تکرار(m)	پیچیدگی زمانی	زمان اجرا	نوع جواب
جستجوی فضای حالت	×	×	$O(N^{\|P\|}\|Rs\|(\|P\| + 2N + 1))$	۵/۸ سال (تخمینی)	بهینه
بهینه سازی پویا	×	×	$O(\|P\|2^{\|P\|} \times \|Rs\|(\|P\| + 2N + 1) \times 2N)$	۳۷ ساعت	بهینه
PSO	۵۰	۲۰	$O(\|Rs\|(\|P\| + 2N + 1) \times mp)$	۱:۲۶ دقیقه	تقریبی
PSO	۱۰۰	۲۰	$O(\|Rs\|(\|P\| + 2N + 1) \times mp)$	۳:۰۲ دقیقه	بهینه

۶- مطالعهٔ موردی

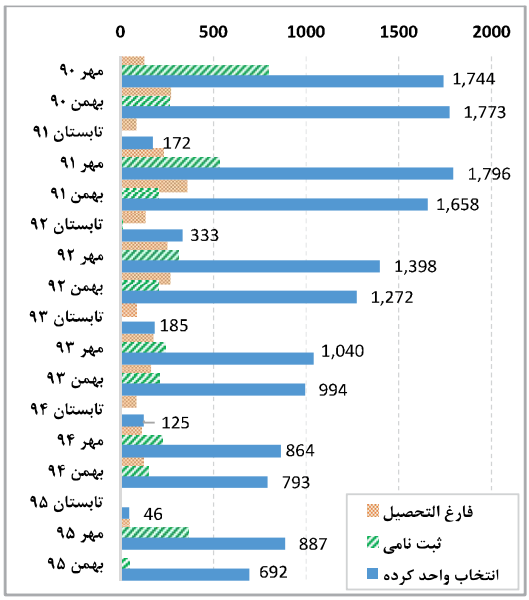
در این مطالعه از پایگاه داده مؤسسهٔ غیر انتفاعی آموزش عالی میرداماد گرگان طی سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۶ استفاده شده است. شکل (۴) تعداد دانشجویان ثبت نامی، فارغ‌التحصیل و دانشجویان انتخاب واحد کرده را طی این ۶ سال به تفکیک نیم‌سال تحصیلی نشان می‌دهد.

در این مؤسسه طی این ۱۲ نیم‌سال تحصیلی (در این مطالعه از اطلاعات نیم‌سال‌های تابستانی استفاده نشده است) پنج فرایند اصلی وجود دارد که عبارتند از:

۱- ثبت نام دانشجویان تازه‌وارد
۲- انتخاب واحد دانشجویی
۳- ارائهٔ دروس نیم‌سال تحصیلی جاری
۴- برگزاری امتحانات و اعلام نمرات
۵- تسویه حساب و فارغ التحصیلی

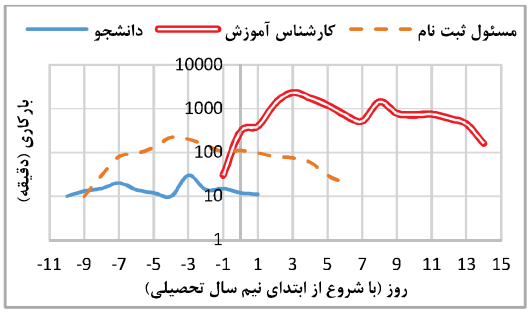
در این مؤسسه بارِکاری منابع انسانی در ابتدای نیم‌سال تحصیلی متأثر از سه فرایند ثبت‌نام، ارائهٔ دروس و انتخاب واحد است. کاربران و منابع انسانی در این مؤسسه در نقش‌های دانشجو، کارشناس آموزشی، کارشناس مالی، مدیر گروه آموزشی، مسئول ثبت‌نام و تأیید اولیه مدارک، مسئول فارغ‌التحصیلی و اساتید قرار گرفته‌اند. این منابع بر اساس نقش

تعریف‌شده در فرایندهای یادشده مشغول فعالیت هستند. در شکل (۵) میانگین بارکاری برخی از منابع طبق رابطهٔ (۸) برای سه فرایند یادشده محاسبه شده است.



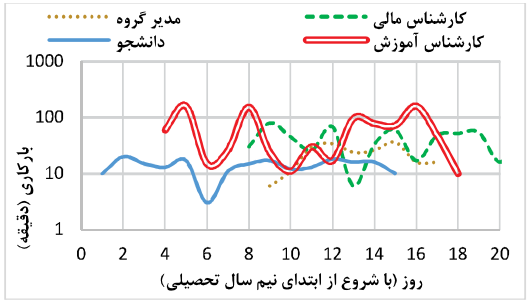
(شکل-۴): تعداد دانشجویان انتخاب واحده کرده، ثبت نامی و فارغ‌التحصیل در پایگاه داده مؤسسه آموزش عالی میرداماد

(Figure-4): Number of student that chosen courses, complete registration and graduated in Mirdamad institute of education data set.



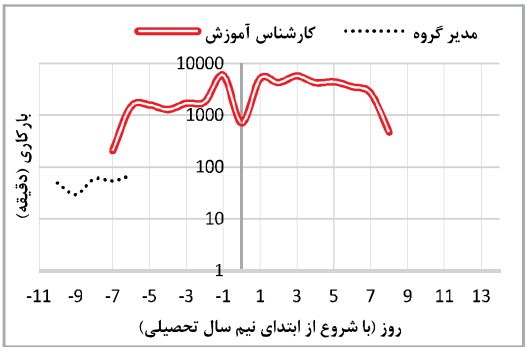
(الف) بارکاری در فرایند ثبت‌نام دانشجویان تازه‌وارد

a) Workload in registration process



(ب) بارکاری در فرایند انتخاب واحد

b) Workload in cource selection process



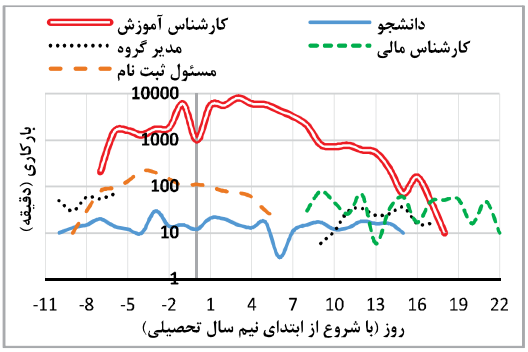
(ج) بارکاری در فرایند ارائهٔ دروس

c) Workload in cource presnting process

(شکل-۵): میانگین بارکاری منابع انسانی در ابتدای نیم‌سال تحصیلی

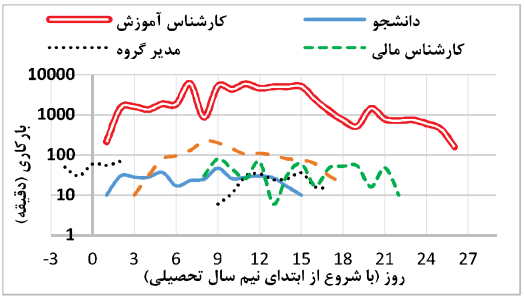
(Figure-5): Average of resource workload in start of semester

در این مطالعه، هدف افزایش تعادل و یک‌نواختی بارِکاری منابع درگیر در این فرایندها به‌خصوص کارشناسان آموزشی مؤسسه است. بعد از اجرای الگوریتم پیشنهادی و تنظیم هم‌روندی برای سه فرایند ثبت‌نام، انتخاب واحد و ارائهٔ دروس مقدار بردار تأخیر به‌صورت D=[12.01,0,9.09] حاصل شد که نسبت به بردار تأخیر D=[0,0,0] (حالت فعلی فرایندها) مقدار LBFAT از ۱۴۲۰۴ به ۱۱۱۳۰ کاهش یافت. به بیان دیگر تنظیم هم‌روندی باعث ۲۱/۶۴ درصد کاهش در مقدار LBFAT شد. این کاهش به معنای این است که اگر فرایند ثبت‌نام و ارائهٔ دروس به‌ترتیب با تأخیر ۱۲ و ۹ روز (درصورت امکان) انجام شوند، بارِکاری منابع تعادل و یک‌نواختی بیش‌تری خواهد داشت. شکل (۶الف) و (۶ب) وضعیت مجموع بارکاری منابع قبل و بعد از اجرای الگوریتم هم‌روندی را نشان می‌دهد.



(الف) قبل از اجرای الگوریتم هم‌روندی فرایندها

a) Before running tuning concurrent algorithm



(ب) بعد از اجرای الگوریتم هم‌روندی فرایندها

b) After running tuning concurrent algorithm

(شکل-۶): مجموع بارِکاری منابع در سه فرایند

(Figure-6): Total workload of resources in three process

همان‌طورکه در شکل(۶ب) مشخص است، الگوریتم هم‌روندی فرایندها با ایجاد تأخیر در دو فرایند ثبت‌نام (۱۲ روز) و ارائهٔ دروس (۹ روز) توانست بارکاری کارشناس آموزش را یک‌نواخت‌تر کند و بارکاری دانشجویان را که کم ترین بارکاری بین کاربران سامانه دارند، بین روزهای اول تا پانزدهم تجمیع کند. علاوه برآن الگوریتم سعی کرده است، مقادیر بیشینه بارکاری منابع را تا حد امکان بر روی هم منطبق کند که نشان از تعادل بیش‌تر بارکاری منابع است.

۷- نتیجه‌گیری

تعادل بارکاری منابع در سامانه‌های مدیریت فرایندهای کسب‌وکار (BPMS) به‌عنوان یک عامل مهم کارایی و پایداری سامانه مطرح است. قرارگرفتن بارکاری هر منبع نیز در یک سطح مشخص باعث افزایش کارایی و بازدهی منابع می‌شود. در این مقاله، دو مفهوم تعادل بارکاری منابع و یک‌نواختی بارکاری هر منبع در یک سطح مشخص به‌عنوان اهداف اصلی این پژوهش تعریف و برای بهینه‌سازی میزان تعادل بارِکاری و یک‌نواختی بارکاری هر منبع از ایدهٔ تنظیم هم‌روندی چند فرایند استفاده و مسئله تنظیم هم‌روندی چند فرایند را به‌عنوان یک مسئلهٔ بهینه‌سازی بیان شد. برای حل مسئلهٔ مطرح‌شده، سه روش متفاوت برای حل آن ارائه شده است؛ این روش‌ها عبارتند از: الگوریتم جستجوی فضای حالت، الگوریتم بهینه‌سازی پویا و الگوریتم تکاملی PSO. پیچیدگی زمانی هر یک از این الگوریتم‌ها در این مقاله محاسبه شد و در انتها برای آزمایش سرعت اجرای روش‌های ارائه‌شده یک مثال مشخص از پنج فرایند با الگوریتم‌های معرفی‌شده مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج گزارش‌شده نشان داد که روش بهینه‌سازی پویای معرفی‌شده در این مقاله، کاهش قابل توجهی در پیچیدگی زمانی نسبت به الگوریتم جستجوی فضای حالت داشت؛ به‌طوری‌که نسبت سرعت آن برای آزمایش انجام‌شده ۳۷ ساعت به ۵/۸ سال بود. علاوه‌برآن، حل مسئلهٔ مطرح‌شده با الگوریتم تکاملی PSO نشان داد الگوریتم تکاملی PSO به‌خوبی مسئلهٔ تنظیم هم‌روندی فرایندها را می‌تواند حل کند و برای آزمایش مطرح‌شده تنها در سه دقیقه جواب بهینه را یافت. با افزایش جمعیت ذرات در PSO احتمال به‌دست‌آمدن جواب بهینه افزایش می‌یابد؛ اما از نظر تئوری تضمین نمی‌کند در همهٔ شرایط جواب بهینه را به‌دست آورد. در انتهای این پژوهش، روی پایگاه داده واقعی میرداماد طی سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۶ یک مطالعهٔ موردی انجام شد و نتایج آزمایشِ الگوریتم تنظیم هم‌روندی روی سه فرایند ثبت‌نام، انتخاب واحد و ارائهٔ دروس، ۲۱/۶۴ درصد بهبود را در تعادل و یک‌نواختی بارِکاری منابع نشان داد.

8- References — ۸- مراجع

[1] M. Hammer, *The agenda: What every business must do to dominate the decade*: Crown Pub, 2003.

[2] M. Hammer and J. Champy, *Reengineering the Corporation: Manifesto for Business Revolution, A*: Zondervan, 2009.

[3] H. Smith and P. Fingar, *Business process management: the third wave* vol. 1: Meghan-Kiffer Press Tampa, 2003.

[4] W. M. Van Der Aalst, A. H. Ter Hofstede, and M. Weske, "Business process management: A survey," in *International conference on business process management*, 2003, pp. 1-12.

[5] B.-H .Ha, J. Bae, and S.-H. Kang, "Workload balancing on agents for business process efficiency based on stochastic model," in *Business Process Management*, ed: Springer, 2004, pp. 195-210.

[6] 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, pp. 64-84, 2006.

[7] 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, pp. 401-414, September 2015.

[8] X. Liu, J. Chen, Y. Ji, and Y. Yu, "Q-learning Algorithm for Task Allocation Based on Social Relation," *Process-Aware Systems,* pp. 49-58, 2015.

[9] D. E. Culler, J. P. Singh, and A. Gupta, *Parallel computer architecture :a hardware/software approach*: Gulf Professional Publishing, 1999.

[10] 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, pp. 77-84, 2004.

[11] E. Rahm, "Dynamic load balancing in parallel database systems," in *European Conference on Parallel Processing*, 1996, pp. 37-52.

[12] L.-j. Jin, F. Casati, M. Sayal, and M.-C. Shan, "Load balancing in distributed workflow management system," in *Proceedings of the 2001 ACM symposium on Applied computing*, 2001, pp. 522-530.

[13] W. Zhao, L. Yang, H. Liu, and R. Wu, "The Optimization of Resource Allocation Based on Process Mining," in *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications*, ed: Springer, 2015, pp. 341-353.

[14] M. Zur Muehlen, "Organizational management in workflow applications–issues and perspectives," *Information Technology and Management,* vol. 5, pp. 271-291, 2004.

[15] J. Xu, C. Liu, and X. Zhao, "Resource allocation vs. business process improvement: How they impact on each other," in *BPM*, 2008, pp. 228-243.

[16] 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, 2014.

[17] 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," in *Asia Pacific Business Process Management*, ed: Springer, 2015, pp. 70-80.

[18] S. Rhee, H. Bae, D. Ahn, and Y. Seo, "Efficient workflow management through the introduction of TOC concepts," in *Proceedings of the 8th annual international conference on industrial engineering theory, applications and practice (IJIE2003)*, 2003.

[19] M. Shen, G.-H. Tzeng, and D.-R. Liu, "Multi-criteria task assignment in workflow management systems," in *System Sciences, 2003. Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on*, 2003.

[20] K. Georgoulakos, K. Vergidis, G. Tsakalidis, and N. Samaras, "Evolutionary Multi-Objective Optimization of business process designs with pre-processing," in *Evolutionary Computation (CEC), 2017 IEEE Congress on*, 2017, pp. 897-904.

[21] M. Wibig, "Dynamic Programming and Genetic Algorithm for Business Processes Optimisation," *International Journal of Intelligent Systems and Applications,* vol. 5, p. 44, 2012.

[22] M. Wibig and C. Polska, "NSGA II algorithm application within the dynamic programming approach to business process optimisation," *Journal of Applied Computer Science,* vol. 21, pp. 195-207, 2013.

[23] E. A. Alluisi and B. B. Morgan Jr, "Engineering psychology and human performance," *Annual review of psychology,* vol. 27, pp. 305-330, 1976.

[24] S .Dreyfus, "Richard Bellman on the birth of dynamic programming," *Operations Research,* vol. 50, pp. 48-51, 2002.

[25] P. Diban, M. K. A. Aziz, D. C. Foo, X. Jia, Z. Li, and R. R. Tan, "Optimal biomass plantation replanting policy using dynamic programming ", *Journal of Cleaner Production,* vol. 126, pp. 409-418, 2016.

[26] R. Jia, S. J. Mellon, S. Hansjee, A. Monk, D. Murray, and J. A. Noble, "Automatic bone segmentation in ultrasound images using local phase features and dynamic programming," in *Biomedical Imaging (ISBI), 2016 IEEE 13th International Symposium on*, 2016, pp. 1005-1008.

[27] M. Roozegar, M. Mahjoob, and M. Jahromi, "Optimal motion planning and control of a nonholonomic spherical robot using dynamic programming approach: simulation and experimental results," *Mechatronics,* 2016.

[28] C. Finck and R. Li, "Operational load shaping of office buildings connected to thermal energy storage using dynamic programming," 2016.

[۲۹] م. فتاحی حسن آباد، ح. قانعی یخدان و ع. م. لطیف، "ارائه یک روش نوین جهت تعیین قوت واترمارک با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری"، پردازش علائم و داده‌ها، شماره ۱۰، صفحات ۴۳-۵۶، ۱۳۹۲.

[29] M.Fatehi Hassan Abaad, H.Ghanee and A.M. Latif, "A novel method for suitable selection of watermark strength in digital image watermarking based on imperialist competitive algorithm" *JSDP*, vol. 10 no. 1, pp. 56-43, 2013.

[30] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*, ed: Springer, 2011, pp. 760-766.

[31] 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, pp. 813-826, 2015.

[32] 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, pp. 3888-3916, 2015.

[33] 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, pp. 351-359, 2015.

[۳۴] ف. احمدی زر، خ. ب. سلطانیان و ف. اخلاقیان طابف "طراحی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی به وسیله استراتژی تکاملی با جمعیت‌های موازی"، پردازش علائم و داده‌ها، شماره ۱۳، صفحات ۱۰۱-۱۱۴، ۱۳۹۵.

[34] F. Ahmadizar , Kh.B. Soltanian and F. Akhlaghian, " Construction and Training of Artificial Neural Networks using Evolution Strategy with Parallel Populations", *JSDP*. vol. 13, no. 1, pp. 101-114, 2016.

[35] W. M. van der Aalst and A. H. Ter Hofstede, "YAWL: yet another workflow language," *Information systems,* vol. 30, pp. 245-275, 2005.

مهدی یعقوبی دانشجوی دکترای دانشگاه صنعتی شاهرود در رشتهٔ مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی است. مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشتهٔ مهندسی کامپیوتر گرایش نرم‌افزار در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعت نفت و دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ کرده است. از سال ۱۳۸۵ به‌عنوان عضو هیأت علمی گروه مهندسی کامپیوتر در دانشگاه گلستان فعالیت دارد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان داده‌کاوی، فرایندکاوی، تحلیل و طراحی فرایندهای کسب‌وکار و طراحی و پیاده‌سازی سامـانه‌های اطلاعاتی هوشمند است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:
m.yaghoubi@gu.ac.ir

مرتضی زاهدی در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود است. وی پروژه‌هایی را در زمینه تعامل انسان و رایانه، شناسایی الگو، پردازش تصویر و ویدئو، و بینایی ماشین در دست اجرا دارد که در آنها به‌طورمعمول از اطلاعات و دانش آماری استفاده می‌شود. ایشان دارای دکترای تخصصی رایانه از دانشگاه RWTH-Aachen آلمان است. تألیف کتب و مقالات علمی و همچنین سرپرستی پروژه‌های دانشگاهی و صنعتی در ایران و کشورهای اروپایی در کارنامهٔ کاری ایشان دیده می‌شود.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:
m.zahedi@shahroodut.ac.ir

علیرضا احمدی‌فرد مدرک کارشناسی را از دانشگاه صنعتی اصفهان در مهندسی الکترونیک و کارشناسی ارشد را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در مهندسی مخابرات و مدرک دکترای تخصصی را در زمینه پردازش تصویر و ماشین بینایی از مرکز CVSSP دانشگاه Surrey در سال ۲۰۰۲ اخذ کردند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش سیگنال،پردازش تصاویر و شناسایی الگو است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:
ahmadyfard@shahroodut.ac.ir