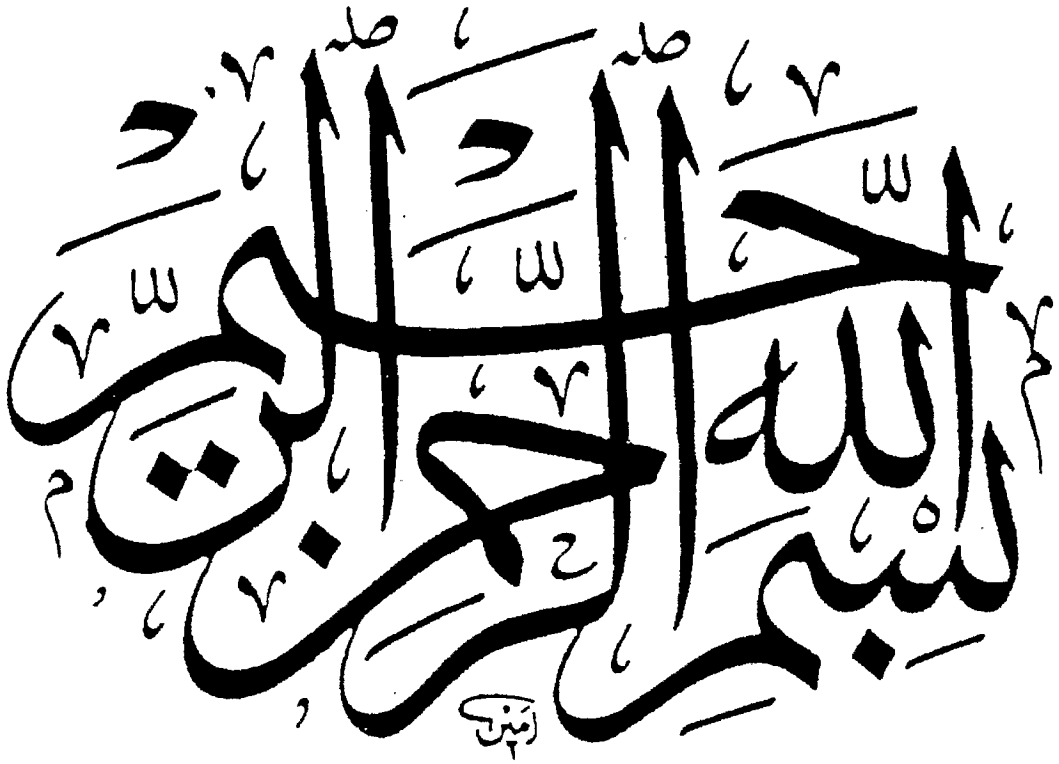

١١١٩٤٣

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه علوم و فنون مازندران

پایان‌نامه

مقطع کارشناسی ارشد

رشته مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی

عنوان:

زمان‌بندی جریان کار کارگاهی ترکیبی با زمان‌های پردازش و تحویل فازی

استاد راهنما:

دکتر ایرج مهدوی

استاد مشاور:

دکتر بابک جوادی

دانشجو:

محمد سلیم مجرد

تابستان ۱۳۸۷

۱۳۸۸ /۲/ -۵

۱۱۱۹۴۳

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم که در تمام دوران تحصیل حامی و مشوق من بودند

تقدیم به:

خواهر و برادر مهربانم

و تقدیم به:

همسر عزیزم

با سپاس و تشکر از راهنمایی‌های اساتید ارجمند **دکتر ایرج مهدوی** و **دکتر بابک جوادی** که در به پایان رساندن این پایان‌نامه مرا یاری نمودند.

چکیده

در این پایان نامه مسأله زمان‌بندی جریان کار کارگاهی ترکیبی، که توسط تانگ و خوان [۳] ارائه شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. این مسأله شامل زمان‌بندی n کار در s ایستگاه است، که کارها در ایستگاه آخر به صورت دسته‌ای پردازش می‌شوند. تولید دسته‌ای در ایستگاه آخر به صورت دسته‌های سری است، که در آن زمان پردازش یک دسته برابر مجموع زمان‌های پردازش تمام کارهای آن دسته می‌باشد. ما یک مدل برنامه‌ریزی فازی، با فرض فازی بودن زمان‌های پردازش و تحویل، ارائه دادیم. برای نشان دادن عدم قطعیت مربوط به زمان‌های پردازش و تحویل از مجموعه‌های فازی مثلثی استفاده کردیم. هدف مینیمم‌سازی مجموع زودکرد، دیرکرد و زمان انتظار وزن‌دار کارها در نظر گرفته شده است. برای افزایش انعطاف‌پذیری توالی کارها در دسته‌ها را نامشخص و به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفتیم.

مسائل زمان‌بندی معمولاً NP-hard، با فضای حل بزرگ و بهینه‌های موضعی زیاد می‌باشند. وقتی اندازه مسأله بزرگ می‌شود روش‌های حل دقیق مانند برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم شاخه و حد کارایی خود را از دست می‌دهند. بنابراین، یک حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای مسأله در حالت قطعی ارائه کردیم. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده جواب‌های قابل قبول، در زمانی معقول، به خصوص برای مسائل با اندازه بزرگ، بدست می‌آورد.

واژگان کلیدی: جریان کار کارگاهی ترکیبی، برنامه‌ریزی فازی، الگوریتم ژنتیک، تولید دسته‌ای

Abstract

In our work, we investigate a hybrid flow shop scheduling problem. Our work is an extension of Tang and Xuan [٣] work. The problem considered here consists of scheduling n jobs at s stages which are processed on B batches at the last stage. The batch production at stage s is referred to as serial batches where the processing time of a batch is equal to the sum of the processing time of all jobs included in. We demonstrated a fuzzy programming approach for our problem. The uncertainty associated with processing times and due dates are represented by triangular fuzzy sets. The objective is to minimize the sum of weighted earliness, tardiness and waiting time costs. To increase the flexibility of our model, we suppose that the sequences of jobs in batches are decision variables.

Flow shop scheduling problems are NP-hard problems which usually involve extremely large solution space with too many local optima. When the problem size is large it is time-consuming to solve by exact algorithms, such as Branch-and-Bound algorithm and dynamic programming. So, we represented a GA based solution for the crisp model. The computational experiment confirms that the proposed GA gives better quality of solutions with medium computational effort especially for larger problem sizes.

Keywords: hybrid flow shop scheduling; fuzzy scheduling; GA; batch production

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	د
فصل ۱. کلیات تحقیق	
۱-۱. مقدمه	۲
۱-۲. مدل‌های زمان‌بندی	۳
۱-۲-۱. پیچیدگی پردازش	۳
۱-۲-۲. ویژگی کارها	۵
۱-۲-۳. معیار/معیارهای بهینگی	۵
۱-۳. جریان کار کارگاهی ترکیبی	۷
۱-٤. تولید دسته‌ای	۷
۱-۵. لزوم استفاده از رویکردهای غیردقیق	۸
۱-٦. کارهای انجام شده در سایر فصل‌های تحقیق	۹
فصل ۲. ادبیات موضوع	
۲-۱. مقدمه	۱۲
۲-۲. مدل‌های جریان کار کارگاهی و جریان کار کارگاهی ترکیبی با تولید دسته‌ای	۱۳
۲-۳. حل جریان کار کارگاهی و جریان کار کارگاهی ترکیبی با استفاده از GA	۱٦

۲-۴. جریان کار کارگاهی و جریان کار کارگاهی ترکیبی با پارامترهای فازی ۱۷

فصل ۳. ارایه مدل پیشنهادی

۳-۱. مقدمه ۱۹

۳-۲. کاربرد ۱۹

۳-۳. فرمولاسیون مساله ۲۱

۳-۳-۱. توصیف مساله ۲۱

۳-۳-۲. مدل ۲۲

فصل ٤. حل فازی

۴-۱. مقدمه ۲۹

۴-۲. برنامه‌ریزی هدف فازی ۳۰

۴-۳. روش حل ۳۳

۴-۵. نتیجه‌گیری ۳۷

فصل ۵. حل مدل قطعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

۵-۱. مقدمه ۳۹

۵-۲. نحوه حل ٤۱

۵-۲-۱. نحوه نمایش کروموزوم ۴۱
۵-۲-۲. ارزیابی ۴۱
۵-۲-۳. جمعیت اولیه ۴۹
۵-۲-۴. عملگر تقاطع ۴۹
۵-۲-۵. عملگر جهش ۵۳
۵-۲-۶. جایگزینی ۵۴
۵-۲-۷. شرط توقف ۵۵
۵-۳. آزمون مسایل نمونه و تحلیل کارایی الگوریتم ۵۵
۵-۳-۱. نحوه تولید پارامترهای مسائل نمونه ۵۵
۵-۳-۲. تنظیم پارامترها ۵۶
۵-۳-۳. مقایسه GA و LINGO ۵۸
۵-۳-۴. مقایسه کارایی عملگرهای تقاطع معرفی شده ۵۸
۵-۴. نتیجه‌گیری ۶۲

فصل ۶. نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱. نتیجه‌گیری کلی ۶۵
۶-۲. ارایه پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۶۶

مراجع

فهرست جداول

عنوان | صفحه

جدول ۱-۱. معیارها/اهداف زمان‌بندی ۱۰
جدول ۴-۱. مقادیر مثال ۴-۱ ۳۶
جدول ۵-۱. الگوریتم ۵-۱ ۴۴
جدول ۵-۲. الگوریتم ۵-۲ ۴۴
جدول ۵-۳. داده‌های مثال۵-۱ ۴۵
جدول ۵-۴. زودترین زمان‌های تکمیل برای مثال ۵-۱ ۴۶
جدول ۵-۵. زمان‌های تکمیل نهایی برای مثال ۵-۱ ۴۷
جدول ۵-۶. نحوه تولید مقادیر پارامترها ۵۶
جدول ۵-۷. خلاصه نتایج برای آزمون GA با پارمترهای متفاوت ۵۷
جدول ۵-۸. مقایسه جواب‌های GA و LINGO ۵۹
جدول ۵-۹. خلاصه نتایج مقایسه عملگرها برای ۶۰ کار ۶۳
جدول ۵-۱۰. خلاصه نتایج مقایسه عملگرها برای ۱۲۰ کار ۶۴
جدول ۵-۱۱. درصد بهترین جواب‌ها و میانگین‌ها در ۳۶ مساله تست برای عملگرها ۶۰

فهرست اشکال و نمودارها

عنوان | صفحه

شکل۳-۱. فرایند تولید آهن و فولاد ۲۰
شکل ۴-۱. تابع عضویت مثلثی متقارن ۳۰
شکل ۴-۲. تابع‌های عضویت فازی برای کمی کردن اهداف فازی ۳۵
شکل ۴-۳. نمایش فازی تابع هدف ۳۷
شکل ۵-۱. کروموزوم مثال ۵-۱ ۴۶
شکل ۵-۲. گانت چارت مثال ۵-۱ ۴۸
شکل ۵-۳. گام‌های عمل‌گر UXO ۵۱
شکل ۵-۴. گام‌های عمل‌گر C1 ۵۲
شکل ۵-۵. گام‌های عمل‌گر CXO ۵۴
نمودار ۵-۱. نمودار همگرایی الگوریتم برای مساله Po7 ۵۹
نمودار ۵-۲. نمودار مقایسه‌ای بهترین جواب‌های سه عملگر ۶۱
نمودار ۵-۳. نمودار مقایسه‌ای زمان‌های سه عملگر ۶۱

مقدمه

در این پایان‌نامه مساله زمان‌بندی n کار در s ایستگاه در محیط جریان کار کارگاهی ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته است. تولید دسته‌ای در ایستگاه آخر به‌صورت دسته‌های سری می‌باشد. برای افزایش انعطاف‌پذیری مدل پیشنهادی، توالی کارها در دسته‌ها، نامشخص و به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، زمان‌های پردازش و تحویل کارها به‌عنوان پارامترهای غیرقطعی با ماهیت فازی در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به ماهیت NP-hard بودن مساله، برای حل مساله در ابعاد واقعی، از یک روش فراابتکاری به نام الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

در فصل اول، پس از معرفی انواع مدل‌های زمان‌بندی، محیط جریان کار کارگاهی ترکیبی و تولید دسته‌ای معرفی شده است. در فصل دوم, مروری بر ادبیات موضوع پیرامون مساله جریان کار کارگاهی و جریان کار کارگاهی ترکیبی، کاربرد برنامه‌ریزی فازی در این‌گونه مسایل و همچنین کاربرد الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در فصل سوم، پس از تعریف مساله، مدل ریاضی آن ارایه شده است. در فصل چهارم، برای حل مدل پیشنهادی در محیط غیرقطعی، از یک رویکرد برجسته و کارای برنامه‌ریزی فازی استفاده شده است. در فصل پنجم، برای حل مساله در حالت قطعی, یک الگوریتم ژنتیک ارایه شده و کارایی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل ششم، نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارایه شده است.

فصل اول

کلیات تحقیق

- مقدمه
- مدل‌های زمان‌بندی
- جریان کار کارگاهی ترکیبی
- تولید دسته‌ای
- لزوم استفاده از رویکردهای غیردقیق
- کارهای انجام شده در سایر فصل‌های تحقیق

۱-۱. مقدمه

زمان‌بندی یکی از موضوعات مهم در برنامه‌ریزی عملیات سیستم‌های تولیدی می‌باشد. زمان‌بندی شامل تخصیص منابع در یک بازه زمانی برای انجام مجموعه‌ای از کارها می‌باشد. بسیاری از مشکلات تولیدی مرتبط با مسایل زمان‌بندی می‌باشد: نبودن قطعات هنگامی‌که به آن‌ها نیاز داریم، نداشتن تجهیزات زمانی‌که مورد نیازند، استفاده از موجودی اضافی جهت پوشاندن مشکلات و نداشتن انعطاف‌پذیری و نبود پاسخگویی[۵]. مشکل در مسایل زمان‌بندی این است که این‌گونه مسایل بیشتر NP-Hard می‌باشند[۵]. با توجه به رشد پیچیدگی عملیات‌های تولیدی، حل این‌گونه مسایل با استفاده از تکنیک‌های ریاضی، حتی برای سازمان‌های کوچک و متوسط، مشکل است[۵]. به این دلیل برای حل این‌گونه مسایل از روش‌های فراابتکاری[1]، الگوریتم‌های ابتکاری و یا از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود، که لزوماً جواب بهینه را ارائه نمی‌دهند[۵].

در مسایل زمان‌بندی کلاسیک، پارامترهای مساله (مانند زمان‌های پردازش، زمان‌های تحویل، وزن‌ها و غیره) که قبل از حل باید مقدار آن‌ها داده شود، قطعی در نظر گرفته می‌شوند. اما فرض قطعی بودن این پارامترها محدود کننده است. در فرایندهای تولیدی واقعی بسیاری از این پارامترها مشخص و قطعی نیستند، و این عدم قطعیت باید به گونه‌ای لحاظ شود[۲۷]. برای مقابله با این عدم قطعیت، معمولاً مفاهیم و تکنیک‌های تئوری احتمالات به کار گرفته می‌شوند[۲۸]. متاسفانه حل این‌گونه روش‌ها مشکل است، از سوی دیگر استفاده از توزیع‌های احتمالی خاص، برای پارامترهای نامعلوم، ممکن است گران و یا مشکل باشد. در دهه‌های گذشته از روش‌های حل مبتنی بر مجموعه‌های فازی برای مدل کردن این‌گونه عدم قطعیت‌ها

[1] metaheuristics

استفاده شده است[۲۷]. در این فصل انواع مدل‌های زمان‌بندی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس سازمان‌دهی سایر فصول ارایه شده است.

۱-۲. مدل‌های زمان‌بندی

در یک بیان ساده، مساله زمان‌بندی ماشین‌ها به شرح زیر می‌باشد:

مدل شامل m ماشین می‌باشد که جهت پردازش n کار مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک برنامه زمان‌بندی برای هر ماشین i و هر کار j، یک یا بیشتر مقاطع زمانی تعیین می‌نماید که در هر مقطع ماشین i کار jرا پردازش می‌نماید. یک برنامه زمان‌بندی موجه است، چنانچه هیچ همپوشانی بین مقاطع زمانی پردازش عملیات‌های مربوط به یک کار وجود نداشته باشد (هیچ کاری به طور همزمان توسط دو ماشین پردازش نشود) و البته هیچ همپوشانی نیز بین مقاطع زمانی عملیات‌های مربوط به یک ماشین وجود نداشته باشد (هیچ ماشینی به طور همزمان دو کار را پردازش ننماید) و همچنین محدودیت‌های مربوط به نوع مساله زمان‌بندی را نیز نقض ننماید[۱].

دسته‌بندی انواع مسایل زمان‌بندی معمولاً بر اساس سه مشخصه پیچیدگی پردازش[1]، ویژگی کارها[2] و معیار/معیارهای بهینگی[3] انجام می‌شود[۱].

۱-۲-۱. پیچیدگی پردازش:

در یک تقسیم‌بندی کلی، سیستم‌های تولیدی شامل یک مرحله[1] و یا چند مرحله[2] جهت پردازش عملیات/عملیات‌های مربوط به کارها هستند. در سیستم‌های تولید تک مرحله‌ای، هر

[1] Processing complexity
[2] Job characteristics
[3] Optimality criteria

مرحله تولیدی می‌تواند شامل یک ماشین و یا بیش از یک ماشین موازی باشد. در صورت وجود چند ماشین موازی در مرحله تولید، ماشین‌ها دارای کارکرد یکسان هستند، ولی سه حالت مختلف می‌تواند در نظر گرفته شود[۱]:

- ماشین‌های موازی یکسان[۳]: در این حالت زمان‌های پردازش کارها مستقل از ماشینی است که جهت پردازش آن کار اختصاص یافته است.
- ماشین‌های موازی با سرعت‌های نسبی متفاوت[۴]: در این حالت ماشین‌های موازی با سرعت‌های نسبی متفاوت کارها را پردازش می‌نمایند.
- ماشین‌های موازی غیر یکسان[۵]: در این حالت زمان‌های پردازش کارها وابسته به ماشینی است که جهت پردازش آن کار اختصاص یافته است.

در سیستم‌های تولید چند مرحله‌ای، هر مرحله شامل یک ماشین بوده و ماشین‌های مراحل تولید مختلف، کارکرد متفاوتی دارند. در سیستم جریان کار کارگاهی[۶] با m مرحله تولید، هر کار حداکثر دارای m عملیات بوده و به صورت یک سویه از مراحل متوالی تولید عبور می‌نماید[۱]. در سیستم تولید کار کارگاهی[۷]، توالی عملیات‌های مربوط به هر کار مشخص و ثابت ولی کارها دارای مسیرهای متفاوتی هستند. در سیستم تولید آزاد[۸]، توالی عملیات‌های مربوط به هر کار ثابت نمی‌باشد. در سیستم‌های تولید چند مرحله‌ای، چنانچه حداقل در یک مرحله، بیش از یک ماشین مستقر شود، سیستم چند مرحله‌ای انعطاف‌پذیر حاصل می‌گردد[۱].

---

[1] Single stage
[2] Multi stage
[3] Identical parallel machines
[4] Uniform parallel machines
[5] Unrelated parallel machines
[6] Flow shop
[7] Job shop
[8] Open shop

۱-۲-۲. ویژگی کارها:

عمده‌ترین ویژگی کارها که در مسایل زمان‌بندی مدنظر قرار می‌گیرند عبارتند از [۱]:

- زمان پردازش عملیات‌های کارها توسط ماشین‌های موازی یکسان یا غیر یکسان مراحل تولیدی.
- زمان ورود کارها به سیستم: در مدل‌های زمان‌بندی، کارها یا در زمان صفر در سیستم در دسترس می‌باشند و یا به تدریج وارد می‌شوند.
- موعد تحویل پردازش کارها.
- زمان‌های آماده‌سازی جهت پردازش کارها روی ماشین‌ها: زمان‌های آماده‌سازی می‌توانند جزئی از زمان‌های پردازش و یا بصورت مجزا و وابسته به توالی کارها در نظر گرفته شوند.
- وابستگی پردازش کارها به یکدیگر.
- امکان شکست کار[1].

۱-۲-۳. معیار/معیارهای بهینگی:

زمان‌بندی‌های مختلف بر اساس معیار/معیارهای بهینگی سنجیده می‌شوند. در یک تقسیم‌بندی اولیه، معیارهای ارزیابی زمان‌بندی‌های مختلف در هر یک از دو گروه معیارهای عادی[2] و معیارهای غیرعادی[3] قرار می‌گیرند. معیارهای ارزیابی عادی، معیارهایی هستند که افزایش در حداقل یکی از زمان‌های تکمیل کارها سبب افزایش مقدار آن‌ها می‌گردد. بعلاوه،

---

[1] Preemption
[2] Regular measures
[3] Irregular measures

معیارهای ارزیابی عملکرد زمان‌بندی‌های مختلف می‌توانند به سه گروه "**معیارهای مبتنی بر زمان تکمیل کارها**"، "**معیارهای مبتنی بر موعد تحویل کارها**" و "**معیارهای مبتنی بر هزینه موجودی و بهره‌وری**" دسته بندی شوند. در جدول ۱-۱، سه گروه از معیارها / اهداف زمان‌بندی لیست شده‌اند. بهینه‌سازی هر یک از معیارهای مذکور به طور مستقیم و یا غیرمستقیم بر کمینه‌سازی هزینه‌های بکارگیری منابع جهت تخصیص به عملیات‌ها[1] تأثیر می‌گذارند.[۱]

در مباحث زمان‌بندی، نمادگذاری مسایل به شکل $\alpha|\beta|\gamma$ و براساس سه مشخصه مورد بحث انجام می‌شود[۱].

در بعضی موارد، دسته‌بندی مسایل زمان‌بندی براساس دو مشخصه دیگر علاوه بر سه مشخصه مذکور نیز انجام می‌شود. مشخصه چهارم، مبتنی بر تعداد کارهای معرفی شده به مدل می‌باشد. چنانچه تعداد کارهای معرفی شده به مدل از ابتدا مشخص باشد، مساله زمان‌بندی یک مساله استاتیک و چنانچه تعداد کارهای معرفی شده به مدل متغیر باشد، مساله زمان‌بندی یک مساله دینامیک خواهد بود. مشخصه پنجم، میزان عدم قطعیت در پارامترهای مساله زمان‌بندی می‌باشد. بر اساس مشخصه فوق، پارامترهای مساله زمان‌بندی مانند زمان‌های پرازش عملیات‌های کارها، زمان ورود کارها به سیستم و ... به‌صورت معین[2]، احتمالی[3] و یا فازی[4] می‌توانند باشند.[۱]

---

[1] Scheduling cost
[2] Deterministic
[3] Stochastic
[4] Fuzzy

۱-۳. جریان کار کارگاهی ترکیبی[1]

بسیاری از فرایندهای تولیدی به‌صورت مسایل زمان‌بندی جریان کار کارگاهی مدل می‌شوند. در جریان کار کارگاهی کلاسیک مجموعه‌ای از کارها، تعدادی ایستگاه را در مسیری مشابه، طی می‌کنند و هر ایستگاه شامل تنها یک ماشین است[۳۱]. اما با توجه به توسعه تکنولوژی، مدل جریان کار کارگاهی توسعه یافته است. در مدل توسعه یافته، هر ایستگاه شامل تعدادی ماشین موازی مشابه است. این نوع محیط جریان کار کارگاهی را معمولاً به‌عنوان جریان کار کارگاهی ترکیبی یا جریان کار کارگاهی با ماشین‌های (پردازشگرهای) چندگانه[2] می‌شناسند[۳۱]. در واقع، HFS شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های تولیدی است که در آن‌ها چندین ماشین موازی در حال کار می‌باشند. بعضی از ایستگاه‌ها ممکن است شامل تنها یک ماشین باشند، اما حداقل یکی از ایستگاه‌ها باید شامل چند ماشین باشد[۱۱].

۱-٤. تولید دسته‌ای

تولید دسته‌ای در دو دهه اخیر، در مسایل زمان‌بندی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ماشین‌ها را از لحاظ پردازش به دو دسته می‌توان تقسیم کرد: پردازشگر تکی[3] و پردازشگر دسته‌ای[4]. پردازشگر تکی، در هر زمان یک کار را پردازش می‌کند. پردازشگر دسته‌ای، کارها را به صورت دسته‌ای پردازش می‌کند و یک زمان آماده‌سازی برای پردازش دسته روی ماشین لازم است[۶]. ماشین‌های دسته‌ای را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ماشین‌های دسته‌ای موازی[5] و ماشین‌های دسته‌ای سری[1] [۷]. ماشین‌های دسته‌ای موازی می‌توانند چندین کار را به

---

[1] Hybrid Flow Shop (HFS)
[2] multiple machines(processors)
[3] discrete processors
[4] batch processors
[5] parallel batch (p-batch)

صورت همزمان انجام دهند. زمان پردازش دسته روی این‌گونه ماشین‌ها، برابر بیشینه زمان پردازش کارهای دسته مربوطه است[۷]. ماشین‌های دسته‌ای سری کارهای یک دسته را به صورت پشت سرهم پردازش می‌کنند. زمان پردازش دسته روی این ماشین‌ها برابر مجموع زمان پردازش کارهای دسته مربوطه است[۷]. دو نوع زمان آماده‌سازی وجود دارد[۷]: منتظر[۲] و غیرمنتظر[۳]. در آماده‌سازی غیرمنتظر تمام کارهایی که یک دسته را تشکیل می‌دهند باید در پردازشگر دسته‌ای در دست باشند تا آماده‌سازی آغاز شود، اما در آماده‌سازی منتظر، آماده‌سازی پردازشگر دسته‌ای قبل از رسیدن کارهایی که دسته را تشکیل می‌دهند، می‌تواند انجام شود[۶].

۱-۵. لزوم استفاده از رویکردهای غیردقیق

مسایل زمان‌بندی جریان کار کارگاهی معمولاً مسایلی NP-Hard، با فضای حل بزرگ و بهینه‌های موضعی زیاد می‌باشند[۱۸،۱۵]. وقتی اندازه مساله بزرگ می‌شود، حل این‌گونه مسایل با روش‌های دقیقی مانند الگوریتم شاخه و کران[۴] و برنامه‌ریزی پویا[۵]، بسیار زمان‌بر خواهد بود[۱۸]. امروزه گرایش به رویکردهای محاسباتی الهام گرفته شده از پدیده‌های طبیعی و فیزیکی مانند الگوریتم‌های مبتنی بر محاسبات تکاملی و جمعیت شامل الگوریتم ژنتیک[۶]، الگوریتم مِمتیک[۷]، جستجوی پراکنده[۸] و سیستم‌های ایمنی[۹]، الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی

---

[1] serial-batch (s-batch)
[2] anticipatory
[3] nonanticipatory
[4] Branch and Bound
[5] Dynamic Programming
[6] Genetic Algorithms (GA)
[7] Memetic
[8] Scatter Search
[9] Immune Systems