بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی صنایع و سیستم ها

کمینه‌سازی مجموع بیشینه‌های زودکرد و دیرکرد در مسئله زمان‌بندی تک ماشین با درنظرگرفتن ورود غیرهمزمان

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی صنایع

مهدی مهنام

استاد راهنما

دکتر قاسم مصلحی

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع آقای مهدی مهنام
تحت عنوان

کمینه‌سازی مجموع بیشینه‌های زودکرد و دیرکرد در مسئله زمان‌بندی تک ماشین با درنظرگرفتن ورود غیرهمزمان

در تاریخ ۸۷/۲/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرارگرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	**دکتر قاسم مصلحی**
۲- استاد مشاور پایان نامه	**دکتر سید رضا حجازی**
۳- استاد داور	**دکتر مهدی بیجاری**

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر مهدی بیجاری

به نام ایزد یکتا

سپاس آفریننده‌ای را که بندگی فقط و فقط او را سزد ...

سپاس از پدرم و مادرم

که عاشقانه، مهربانی، فداکاری و سختکوشی را به من آموختند،

و امید رسیدن به افق‌های روشن را در دلم شکوفا ساختند...

و با سپاس فراوان از

استاد ارجمندم جناب آقای دکتر مصلحی که با سعه صدر و دقت تمام کاستی‌های این شاگرد را تحمل نموده و در همه حال راهنما و پشتیبان من بوده‌اند.

استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر حجازی که بدون راهنمائی‌ها و مساعدت‌های ایشان انجام این پایان نامه ممکن نبود.

استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر بیجاری که زحمت داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشته و همچنین به عنوان سرپرست تحصیلات تکمیلی از هیچ کوششی جهت فراهم آوردن امکانات لازم دریغ نکردند.

و از کلیه اساتید دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها به ویژه آقای دکتر زمانی و آقای مهندس ترکش اصفهانی نیز که تاثیر بسزایی در شکل‌گیری نگرش علمی من داشته‌اند، تشکر وقدردانی نمایم. به امید روزی که بتوانم حق شاگردی این بزرگواران را بجای آورم.

همچنین برخود لازم می‌دانم از کلیه دوستان خوبم به خاطر تمام لحظات شیرین باهم بودن صمیمانه سپاسگزاری نمایم و برای همه آن‌ها آرزوی کامیابی و مسرت دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدرم و مادر مهربانم

که هر قدم مثبت در زندگی را مدیون زحمات و محبت های بی دریغ ایشان هستم.

و تقدیم به

تمامی پژوهشگران و اندیشمندان

و همه آنان که با دقت برنامه ریزی نموده

و

بهینه تصمیم می گیرند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست اشکال ..... یازده
فهرست جداول ..... دوازده
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- هدف تحقیق ۴
۱-۳- کاربرد نتایج ۵
۱-۴- مروری بر مطالب ۶

فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع ۷
۲-۱- مقدمه ۷
۲-۲- زمان‌بندی زودکرد/دیرکرد (E/T) ۸
۲-۳- طبقه بندی مسائل زودکرد/ دیرکرد (E/T) ۸
۲-۳-۱- توابع جریمه ۹
۲-۳-۲- موعد تحویل ۱۰
۲-۳-۳- بیکاری عمدی ۱۵
۲-۴- زمان‌بندی زودکرد/ دیرکرد به صورت کمینه بیشینه ۱۹
۲-۵- زمان‌بندی با ورود غیر همزمان کارها ۲۱
۲-۶- زمان‌بندی زودکرد / دیرکرد با ورود غیرهمزمان کارها ۲۳
۲-۷- جمع‌بندی ۲۵

فصل سوم: بررسی و توسعه مسئله $1||ET_{max}$ ۲۶
۳-۱- مقدمه ۲۶
۳-۲- تعریف مسئله ۲۶
۳-۳- روش ابتکاری ۲۸
۳-۴- الگوریتم شاخه‌وکران ۲۹
۳-۴-۱- ساختار شاخه‌وکران ۲۹

۳-۴-۲- قواعد غلبه ۳۰
۳-۴-۳- حد پایین ۳۴
۳-۴-۲- حد بالا ۳۵
۳-۵- آزمایشات عددی ۳۶
۳-۵-۱- طراحی مسئله ۳۶
۳-۵-۲- نتایج محاسباتی ۳۷
۳-۶- جمع‌بندی ۴۶

فصل چهارم: بررسی مدل و پیچیدگی مسئله $1|r_j|\mathbf{ET_{max}}$ ۴۷
۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- ورود غیرهمزمان کارها ۴۷
۴-۳- تعریف مسئله ۴۹
۴-۴- پیچیدگی مسئله ۵۰
۴-۴-۱- رابطه پیچیدگی مسئله $1|r_j|\mathrm{T_{max}}$ و $1|r_j|\mathrm{L_{max}}$ ۵۱
۴-۴-۲- پیچیدگی مسئله $1|r_j|\mathrm{T_{max}}$ ۵۳
۴-۴-۳- پیچیدگی مسئله $1|r_j|\mathrm{ET_{max}}$ ۵۶
۴-۵- حالت خاص موعد تحویل مشترک ۵۷
۴-۶- جمع‌بندی ۵۹

فصل پنجم: بررسی مسئله $1|r_j|\mathbf{ET_{max}}$ در حالت مجاز نبودن بیکاری عمدی ۶۰
۵-۱- مقدمه ۶۰
۵-۲- مدل‌ریاضی ۶۱
۵-۳- روش شاخه‌وکران ۶۲
۵-۳-۱- استراتژی روش شاخه‌وکران ۶۲
۵-۳-۲- قواعد غلبه ۶۳
۵-۳-۳- حد پایین ۶۶
۵-۳-۴- حد بالا ۶۸
۵-۴- آزمایشات عددی ۶۸
۵-۴-۱- طراحی مسئله ۶۸
۵-۴-۲- نتایج محاسباتی ۷۰
۵-۵- جمع‌بندی ۸۲

فصل ششم: بررسی مسئله $1|r_j|\mathrm{ET}_{\max}$ در حالت مجاز بودن بیکاری عمدی ۸۳
۶-۱- مقدمه ۸۳
۶-۲- بیکاری عمدی ۸۳
۶-۳- مدل ریاضی ۸۴
۶-۳-۱- پیچیدگی حل مدل ریاضی ۸۵
۶-۳-۲- راهکارهای حل مدل ریاضی ۸۶
۶-۴- الگوریتم تعیین بیکاری عمدی در یک توالی معلوم ۸۷
۶-۵- روش شاخه‌وکران ۸۹
۶-۵-۱- استراتژی روش شاخه وکران ۸۹
۶-۵-۲- قواعد غلبه ۸۹
۶-۵-۳- حد پایین ۹۵
۶-۵-۴- حد بالا ۹۵
۶-۶- روش‌های فرا ابتکاری ۹۶
۶-۶-۱- الگوریتم ژنتیک ۹۶
۶-۶-۲- بهینه‌سازی گروه ذرات ۹۹
۶-۷- آزمایشات عددی ۱۰۲
۶-۷-۱- طراحی مسئله ۱۰۲
۶-۷-۲- نتایج محاسباتی ۱۰۳
۶-۸- جمع‌بندی ۱۱۸

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۹
۷-۱- مقدمه ۱۱۹
۷-۲- خلاصه و نتایج تحقیق ۱۱۹
۷-۲-۱- مسأله $1||\mathrm{ET}_{\max}$ ۱۲۰
۷-۲-۲- مسأله $1|r_j|\mathrm{ET}_{\max}$ ۱۲۰
۷-۳- پیشنهاد برای تحقیقات آتی ۱۲۱

پیوست (الف) ۱۲۳
منابع و مراجع ۱۲۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): طبقه‌بندی مسائل زودکرد و دیرکرد از دیدگاه موعد تحویل ۱۰
شکل (۳-۱): نمایش توالی کارها براساس سه مجموعه A، B و C [۷۳] ۲۷
شکل (۳-۲): توالی جزئی σ_{ij} در رویکرد پسرو ۳۱
شکل (۳-۳): تعداد نمونه‌ها با جواب معادل بهترین جواب حاصل در الگوریتم DYNA در اندازه‌ها و دسته‌های مختلف ... ۴۶
شکل (۴-۱): نمایش انواع بیکاری در یک توالی مشخص (الف) بیکاری اجباری (ب) بیکاری عمدی ۴۸
شکل (۴-۲): دیاگرام مسائل زمان‌بندی تک ماشین با ورود غیر همزمان ۴۹
شکل (۴-۳): نمونه مسأله زمان‌بندی $L_{max}<0$ | r_j | ۱ منطبق بر مسأله بخش‌بندی ۵۲
شکل (۴-۴): توالی S ۵۵
شکل (۴-۵): توالی S در حالت $\delta>0$ ۵۵
شکل (۴-۶): توالی S در حالت $\delta<0$ ۵۶
شکل (۵-۱): ایجاد بیکاری‌عمدی با جابجایی کارها در توالی ۶۴
شکل (۵-۲): زمان‌بندی با سه بلوک [۱۰۷] ۶۵
شکل (۵-۳): تأثیر تولید غیرواقعی زمان‌های ورود در زمان‌بندی کارها (الف) تراکم زیاد (ب): پراکندگی زیاد ۶۹
شکل (۵-۴): مقایسه تعداد نمونه بهینه دسته‌های نه‌گانه در اندازه‌های مختلف ۸۰
شکل (۵-۵): مقایسه زمان حل بهینه روش شاخه‌وکران دسته‌های نه‌گانه در اندازه‌های مختلف ۸۰
شکل (۵-۶): مقایسه میانگین درصد حل بهینه روش ابتکاری REDD در دسته‌های نه‌گانه در اندازه‌های مختلف ۸۱
شکل (۵-۷): مقایسه میانگین درصد حل بهینه روش ابتکاری RMST در دسته‌های نه‌گانه در اندازه‌های مختلف ۸۱
شکل (۶-۱): تأثیر ورود غیرهمزمان کارهای بر زمان تکمیل کارهای توالی جزئی σ ۹۰
شکل (۶-۲): تعویض کارهای i و j براساس شرایط لم (۶-۳) ۹۱
شکل (۶-۳): جایگاه نسبی کارهای i و j در حالات ۶-۹ لم (۶-۴) ۹۴
شکل (۶-۴): موقعیت تصادفی یک کروموزوم ۹۷
شکل (۶-۵): نحوه اجرای عملگر تقاطع LOX ۹۸
شکل (۶-۶): نحوه اجرای عملگر جهش تعویض ۹۹
شکل (۶-۷): موقعیت تصادفی یک ذره ۱۰۱
شکل (۶-۸): میانگین‌درصدکارآیی‌حد پایین و قواعد غلبه ۲،۱ و ۳ در قطع گره‌های‌درخت‌جستجو در روش شاخه‌وکران... ۱۰۶
شکل (۶-۹): مدت زمان حل روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در اندازه‌های مختلف ۱۱۷
شکل (۶-۱۰): تعداد نمونه‌ها با جواب معادل بهترین جواب حاصل در دسته‌های نه گانه به تفکیک روش ۱۱۷
شکل (۶-۱۱): میانگین‌درصد اختلاف نتایج‌روش‌های‌ابتکاری و فرا ابتکاری با بهترین‌جواب‌حاصل در اندازه‌های مختلف... ۱۱۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۱): تقسیم‌بندی کلی مسائل زمان‌بندی ۳
جدول (۲-۱): مرور مطالعات زمان‌بندی زودکرد و دیرکرد با موعد تحویل مشترک ۱۲
جدول (۲-۲): مرور مطالعات زمان‌بندی زودکرد/ دیرکرد با موعد تحویل مجزا ۱۶
جدول (۳-۱): شرایط مطلوب نبودن ترتیب (S_{ij}) در مقایسه با ترتیب (S_{ji}) [۱۰۶] ۳۴
جدول (۳-۲): مقایسه عملکرد الگوریتم MMA و MA ۳۸
جدول(۳-۳): نتایج الگوریتم شاخه‌وکران MMA در سری ۱ (R=۰٫۶ و τ= ۰٫۲) ۳۹
جدول(۳-۴): نتایج الگوریتم شاخه‌وکران MMA در سری ۲ (R=۰٫۶ و τ= ۰٫۶) ۴۰
جدول (۳-۵): نتایج الگوریتم شاخه‌وکران MMA در سری ۳ (R=۱٫۶ و τ= ۰٫۲) ۴۱
جدول(۳-۶): نتایج الگوریتم شاخه‌وکران MMA در سری ٤ (R=۱٫۶ و τ= ۰٫۶) ۴۲
جدول (۳-۷): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری در مسأله $1||\mathrm{ET}_{\max}$ ۴۳
جدول (۵-۱): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۱ (D=۰٫۱ و R=۰٫۲۵) ۷۱
جدول (۵-۲): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۲ (D=۰٫۲۵ و R=۰٫۲۵) ۷۲
جدول (۵-۳): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۳ (D=۰٫۵ و R=۰٫۲۵) ۷۳
جدول (۵-۴): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۴ (D=۰٫۱ و R=۰٫۵) ۷۴
جدول (۵-۵): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۵ (D=۰٫۲۵ و R=۰٫۵) ۷۵
جدول (۵-۶): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۶ (D=۰٫۵ و R=۰٫۵) ۷۶
جدول (۵-۷): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۷ (D=۰٫۱ و R=۰٫۷۵) ۷۷
جدول (۵-۸): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۸ (D=۰٫۲۵ و R=۰٫۷۵) ۷۸
جدول (۵-۹): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در سری ۹ (D=۰٫۵ و R=۰٫۷۵) ۷۹
جدول (۶-۱): شرایط دو کار i و jدر دو ترتیب S_{ij} و S_{ji} ۹۳
جدول (۶-۲): نتایج محاسباتی روش شاخه و کران در مسأله $1|r_j, idle|\mathrm{ET}_{\max}$ ۱۰۴
جدول (۶-۳): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۱ ..... ۱۰۸
جدول (۶-۴): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۲ ..... ۱۰۹
جدول (۶-۵): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۳ ..... ۱۱۰
جدول (۶-۶): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۴ ..... ۱۱۱
جدول (۶-۷): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۵ ..... ۱۱۲
جدول (۶-۸): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۶ ..... ۱۱۳
جدول (۶-۹): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۷ ..... ۱۱۴
جدول (۶-۱۰): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۸ ..... ۱۱۵
جدول (۶-۱۱): نتایج محاسباتی روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در سری ۹ ..... ۱۱۶

چکیده

امروزه با گسترش پدیده جهانی‌سازی و تاثیر آن بر رشد بازارهای رقابتی، افزایش اهمیت رضایت مشتری و استفاده کارآتر از منابع، شرکت‌ها بایستی به سمت سیستم‌های مشتری- محور حرکت نمایند. سیستم تولید به موقع از جمله این رویکردهاست که در دهه‌های اخیر توجه زیادی را در صنایع تولیدی و خدماتی به خود معطوف داشته است. فلسفه تولید به موقع براساس تولید اقلام مورد نیاز، به اندازه لازم و در زمان‌های مورد نیاز است. این سیستم تولیدی دسته جدیدی از مسائل زمان‌بندی را به وجود آورد که در آن زودکرد و دیرکرد کارها هر دو دارای جریمه هستند. یکی از معیارهایی که اخیراً مطرح گردیده و در این‌تحقیق نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد، کمینه‌سازی مجموع بیشینه‌های زودکرد و دیرکرد می‌باشد.

در این مطالعه، ابتدا مسأله زمان‌بندی تک ماشین با موعدهای تحویل مجزا و با هدف کمینه‌سازی مجموع بیشینه‌های زودکرد و دیرکرد به عنوان مسأله پایه بررسی شده و یک روش ابتکاری کارآ برای آن ارائه گردیده است. همچنین با توسعه حدود بالا و پایین مناسب و قواعد غلبه مبتنی بر جابجایی جفتی کارهای مجاور و خاصیتی با عنوان "بی‌اثری"، یک الگوریتم شاخه و کران با استفاده از رویکرد پسرو در نحوه شاخه زدن ارائه شده است. به منظور ارزیابی کارآیی الگوریتم شاخه‌وکران ۱۲۸۰ نمونه به صورت تصادفی در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده است. نشان داده شده که روش شاخه‌وکران با حل بهینه ۱۰۰٪ نمونه‌ها در زمان کمتر از ۷۰۰ ثانیه دارای کارآیی بالایی بوده و نسبت به الگوریتم‌های پیشین در ادبیات موضوع دارای برتری است.

در ادامه، این مسأله با درنظرگرفتن ورود غیرهمزمان کارها به عنوان یک فرض واقع‌گرایانه و مبتنی بر شرایط واقعی تولید مد نظر قرار گرفته است. ابتدا پیچیدگی آن بررسی و براساس مسأله معروف ۳-بخشی نشان داده شده که دارای پیچیدگی "به‌شدت NP-hard" است. سپس این مسأله در دو حالت مجاز نبودن و مجاز بودن بیکاری عمدی مورد بررسی قرار گرفته است.

در حالت اول، یک رویه شاخه‌وکران با رویکرد پیشرو برای حل بهینه مسأله توسعه داده شده است. در این الگوریتم، حد بالا بر اساس قواعد توزیع اصلاح شده بر مبنای زمان‌های ورود متفاوت و حد پایین با درنظرگرفتن فرض حق انقطاع به دست آمده است. همچنین از قواعد غلبه مبتنی بر مسأله پایه و فرض مجاز نبودن بیکاری عمدی برای قطع کردن گره‌ها استفاده شده است. با تولید ۴۸۶۰ نمونه تصادفی در اندازه‌های ۷ تا ۱۰۰۰ کار، نشان داده شده که الگوریتم شاخه‌وکران قادر به حل ۹۴٫۱٪ نمونه‌ها به صورت بهینه بوده که این امر بیان‌کننده کارآیی بالای الگوریتم در حل مسأله در کلیه اندازه‌هاست.

در حالت دوم، ابتدا یک الگوریتم چند جمله‌ای برای به دست آوردن مقادیر بیکاری عمدی در یک توالی معلوم ارائه شده است. سپس مسأله تعیین همزمان توالی و زمان‌بندی کارها بررسی شده و یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح ارائه و نشان داده شده که با توجه به پیچیدگی زیاد قابل به کارگیری نمی‌باشد. بنابراین با استفاده از حدود بالا و پایین مناسب، یک الگوریتم شاخه‌وکران برای دستیابی به جواب‌های بهینه پیشنهاد شده است. در این مسأله امکان استفاده از قواعد غلبه مسأله پایه وجود ندارد؛ بدین جهت سه قاعده جدید با توجه به فروض مسأله ارائه گردیده که موجب افزایش کارآیی الگوریتم شده است. با توجه به پیچیدگی مسأله، الگوریتم شاخه وکران مسائل با حداکثر ۲۰ کار را حل نموده است. همچنین از دو روش فرا ابتکاری تکاملی الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی گروه ذرات برای حل مسأله در اندازه‌های بزرگ استفاده شده است. با بررسی الگوریتم‌ها در ۳۴۲۰ نمونه تصادفی مشخص شد که الگوریتم ژنتیک در بیشتر دسته مسائل دارای مدت زمان حل کوتاهتر و کیفیت بهتری بوده و می‌تواند برای حل این مسأله در ابعاد بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

فصل اول
مقدمه

۱ ـ مقدمه

زمان‌بندی یک فرآیند تصمیم‌گیری است که با تخصیص بهینه منابع به فعالیت‌های اصلی تولید در طول زمان در ارتباط است و شامل دو جزء تخصیص منابع و برنامه‌ریزی عملیات است. بخش اول پاسخ به این پرسش است که چه منابعی و به چه مقدار باید به فعالیت تخصیص داد و بخش دوم جواب به این پرسش است که فعالیت‌ها چه وقت و به چه ترتیب انجام شوند [۱]. از آن‌جایی که مسائل زمان‌بندی در ابتدا برای محیط‌های تولیدی مطرح شده است، اصطلاحات استفاده شده در آن نیز بیشتر صنعتی است. به عنوان نمونه "ماشین" معادل "منبع" و "کار" معادل "فعالیت" می‌باشد. آن‌چه باعث اهمیت روزافزون مسأله زمان‌بندی می‌شود این واقعیت است که بسیاری از شرکت‌ها و بنگاه‌های تولیدی و خدماتی با کمبود منابع روبرو هستند. از این گذشته پدیده جهانی‌سازی فشار بیشتری بر شرکت‌ها جهت رقابتی‌تر شدن و استفاده بهتر از منابع وارد می‌سازد. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید از جمله ابزارهایی هستند که بدون صرف هزینه زیاد می‌توانند منجر به افزایش چشمگیر بهره‌وری نهاده‌ها، کاهش ضایعات و صرفه‌جویی در هزینه‌ها شوند.

مسائل زمان‌بندی، چنانچه در جدول (۱-۱) نشان داده شده است، براساس وضعیت کارگاه، قطعیت داده‌ها، سیستم ورود قطعات و روش‌های حل به دسته‌های متفاوتی تقسیم می‌شوند. این دسته‌بندی می‌تواند براساس وضعیت

کارگاه به‌صورت تک‌ماشین[1]، ماشین‌های موازی[2]، جریان کارگاهی[3]، زمان‌بندی کارگاهی[4]، سیستم تولید انعطاف‌پذیر، تولید سلولی و خطوط مونتاژ صورت گیرد. اگر اطلاعات کارها به صورت قطعی در دسترس باشد آن مسائل قطعی گفته می‌شوند و در صورتی که حتی یک پارامتر به صورت قطعی شناخته شده نباشد، مسأله به صورت احتمالی یا فازی درنظرگرفته می‌شود. همچنین در برخی محیط‌ها همه کارها در زمان صفر در دسترس هستند، که به زمان‌بندی ایستا[5] موسوم است و در برخی محیط‌های دیگر در زمان‌های متفاوت از قبل مشخص یا نامشخص در دسترس قرار می‌گیرند که زمان‌بندی پویا[6] نامیده می‌شوند. روش‌های حل نیز به دو دسته رویه‌های بهینه و ابتکاری تقسیم می‌شوند. بسیاری از روش‌های حل دقیق از روش‌های مدل‌سازی ریاضی، برنامه‌ریزی پویا و شاخه‌وکران بدین منظور استفاده می‌کنند؛ و روش‌های ابتکاری نیز معمولاً از قواعد توزیع[7]، الگوریتم‌های تقریبی[8] و روش‌های فراابتکاری[9] بهره می‌برند.

جدول (۱-۱): تقسیم‌بندی کلی مسائل زمان‌بندی

وضعیت کارگاه	قطعیت داده‌ها	ورود قطعات	روش‌های حل
تک‌ماشین	قطعی	ایستا	دقیق
ماشین‌های موازی	غیرقطعی	پویا	الگوریتم‌های خطی
جریان کارگاهی	احتمالی	برون خط	مدلسازی ریاضی
کارگاهی	فازی	برخط	برنامه‌ریزی پویا
خطوط مونتاژ			شاخه‌وکران
تولید انعطاف‌پذیر			روش‌های ابتکاری
			روش‌های فرا ابتکاری
			SA و GA و TS و ...

در زمان‌بندی، سه مفهوم اصلی منابع، کارها و معیار تصمیم‌گیری حالت‌های مختلفی می‌توانند داشته باشند. در این مطالعه برای نمایش مسائل مختلف زمان‌بندی از نمادگذاری استاندارد تعریف شده توسط گراهام و همکاران [۲] استفاده شده است. در این نمادگذاری یک مسأله به صورت $\alpha|\beta|\gamma$ نمایش داده می‌شود، که α بیان‌کننده شرایط ماشین، β نشان‌دهنده ویژگی‌ها و محدودیت‌های مسأله و γ معیار مسأله است. برای محیط تک ماشین α برابر یک

[1] single machine
[2] parallel machines
[3] flow shop
[4] job shop
[5] static
[6] dynamic
[7] dispatching rules
[8] approximation algorithms
[9] meta-heuristic

بوده و β نیز به عنوان نمونه یک زیرمجموعه از نمادهای r_j، $prec$ و $pmtn$ است، که به ترتیب نشان‌دهنده ورود غیر همزمان قطعات، محدودیت پیش‌نیازی بین کارها و امکان انقطاع کارهاست. همچنین γ می‌تواند نماد معیارهای متفاوتی مانند C_{max}، $\sum T_i$ و $\sum U_i$ باشد که به ترتیب بیان‌کننده معیارهای محدوده زمانی، مجموع دیرکرد و تعداد کارهای دیرکرددار هستند.

۱-۲- هدف تحقیق

مسائل زمان‌بندی را می‌توان از دو دیدگاه مدیریت کارگاه و مشتری مورد بررسی قرار داد. هنگامی که به مسأله از طرف مدیریت توجه شود، هدف، کمینه‌سازی معیارهایی مانند بارگذاری ماشین و میانگین زمان در جریان است. در حالی که از دیدگاه مشتری تحویل به موقع در موعد تحویل در اولویت قرار دارد. امروزه، کنترل فرآیند تولید، کل زنجیره تامین را در برمی‌گیرد. در این رویکرد تامین‌کننده باید کالاها را تا حد امکان در زمان مقرر تحویل دهد. این مفهوم به سیستم تولید به موقع (JIT[1]) موسوم است. فلسفه تولید به موقع براساس تولید اقلام مورد نیاز، به اندازه لازم و در زمان‌های مورد نیاز است [۳]. بنابراین در یک سیستم تولید JIT هر کار بایستی تا حد امکان نزدیک به موعد تحویل آن تکمیل شود. عدم توجه به موعد تحویل یک کار، ممکن است موجب از دست دادن مشتری یا هزینه جبران تاخیر در خط تولید یا مونتاژ شود. از طرف دیگر، تولید یک کار زودتر از موعد تحویل آن ممکن است منجر به هزینه موجودی و یا فساد محصول شود. به‌عبارت‌دیگر، دیرکرد منعکس‌کننده عدم رضایت مشتری و زودکرد نشان‌دهنده عملکرد موجودی است. بنابراین می‌توان مسأله کمینه‌سازی زودکرد و دیرکرد را بیان‌کننده سیاست مدیریت در برنامه‌ریزی کوتاه مدت و زمان‌بندی تولید یا خدمت بنگاه برشمرد. در این تحقیق به بررسی مسأله زمان‌بندی تک ماشین با هدف کمینه‌کردن مجموع بیشینه‌های زودکرد و دیرکرد به عنوان یک معیار کاربردی در سیستم‌های تولید به موقع پرداخته می‌شود.

یکی از فرض‌های اصلی مسأله زمان‌بندی کلاسیک این است که زمان ورود کارها ثابت هستند [۱]. در حالی که در بسیاری از محیط‌های تولیدی و خدماتی، ورود کارها، مشتریان و سفارشات آن‌ها در زمان‌های متفاوت رخ می‌دهد. همچنین در بسیاری از فرآیندهای شیمیایی و متالورژی کارها بایستی از یک یا چند مرحله قبل از فرآیند اصلی بگذرند که این زمان‌های فرآیند می‌تواند به عنوان زمان‌های ورود متفاوت برای کارها درنظرگرفته شود. در این تحقیق علاوه بر بررسی مسأله کمینه‌سازی مجموع بیشینه های زودکرد و دیرکرد در حالت پایه، این مسأله با فرض زمان‌های ورود کارها به صورت غیرهمزمان نیز درنظرگرفته شده است. از آن‌جایی که این مسأله تا کنون

[1] Just In Time

توسط محققان بررسی نشده است، ابتدا پیچیدگی آن مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به شدت پیچیدگی، از الگوریتم‌های حل دقیق مبتنی بر شمارش ضمنی برای یافتن جواب بهینه و الگوریتم‌های ابتکاری برای رسیدن به جواب‌های مناسب در یک مدت زمان معقول استفاده شده است.

۱-۳- کاربرد نتایج

به طور کلی مسأله زمان‌بندی دارای نقش اساسی در اغلب صنایع تولیدی و خدماتی یا محیط‌های پردازش اطلاعات است. زمان‌بندی پروژه[۱]، زمان‌بندی کارگاهی[۲]، زمان‌بندی سیستم‌های مونتاژ انعطاف‌پذیر[۳]، زمان‌بندی اقتصادی انباشته‌ها[٤]، و همچنین برنامه‌ریزی و زمان‌بندی در زنجیره تامین[٥] را می‌توان از نمونه‌های کاربرد زمان‌بندی در صنایع تولیدی برشمرد. از طرف دیگر، تعیین جدول زمانی[٦]، زمان‌بندی مسابقات[۷]، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی در حمل‌ونقل[۸] و زمان‌بندی نیروی انسانی[۹] از جمله کاربردهای مسائل زمان‌بندی در صنایع خدماتی هستند [٤].

هدف کمینه سازی زودکرد و دیرکرد به ویژه با درنظرگرفتن ورود غیرهمزمان کارها به عنوان یک فرض واقع‌گرایانه برای بسیاری از صنایع یک امر حیاتی است. برای مثال، صنایع ساخت طبق سفارش (MTO[۱۰]) در اندازه‌های کوچک و متوسط سفارشات خود را از مشتریان دریافت کرده و یک موعد تحویل خاص برای هر سفارش وجود دارد. موعدهای تحویل می‌بایست به دلیل مشکلات حمل‌ونقل و تعهد مشتریان مورد توجه قرار گیرند. همچنین امروزه این مسائل در زمان‌بندی فعالیت‌های شبکه‌ها در زمینه فن‌آوری اطلاعات نیز دارای کاربردهای فرآوانی هستند. در این حوزه‌ها، ماشین بیان‌کننده پردازشگر و یا سایت اینترنتی و کارها نشان دهنده درخواست کاربران است. بنابراین در این مسائل با توجه به تعداد کاربران، حل مسائل در اندازه‌های بزرگ و در زمان کوتاه دارای اهمیت بسیار است. لذا بررسی مسائل تک ماشین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از طرف دیگر، معمولاً تنها یک ماشین، خدمت‌دهنده[۱۱] یا پردازشگر[۱۲] به ویژه در گلوگاه خط تولید، مونتاژ یا به طورکلی سیستم تولیدی یا خدماتی مورد نظر است. بنابراین زمان‌بندی کارها بر روی ماشین گلوگاه به بهبود کل

---

[1] project scheduling
[2] job shop scheduling
[3] scheduling of flexible assembly systems
[4] economic lot schedulling
[5] supply chain
[6] timetabling
[7] tournament scheduling
[8] planning and scheduling in transportation
[9] workforce scheduling
[10] Make To Order
[11] server
[12] processor

خط تولید کمک می‌کند. از دیدگاه تئوری نیز مسأله تک ماشین، حالت پایه مسائل زمان‌بندی پیچیده‌تر مانند ماشین‌های موازی، جریان کارگاهی و کارگاهی بوده و این محیط‌ها به این حالت خاص قابل تبدیل می‌باشند.

۱-۴- مروری بر مطالب

در فصل دوم مسأله زمان‌بندی زودکرد/ دیرکرد به عنوان حوزه کاری تحقیق مد نظر قرار گرفته و انواع مسائل و همچنین مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در این حوزه به ویژه با درنظرگرفتن ورود غیرهمزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل سوم مسأله کمینه‌سازی مجموع بیشینه زودکرد و دیرکرد تعریف و الگوریتم شاخه و کران ارائه شده برای آن بهبود داده می‌شود. در فصل چهارم مسأله کمینه سازی مجموع بیشینه زودکرد و دیرکرد در زمان‌بندی تک ماشین با ورود غیر همزمان کارها معرفی و پیچیدگی آن بررسی می‌شود. در ادامه، این مسأله در دو حالت مجاز بودن و مجاز نبودن بیکاری عمدی در فصل‌های پنجم و ششم مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه‌گیری و پیشنهادت برای رویکردهای آتی نیز در فصل آخر بیان شده است.

فصل دوم
مروری بر ادبیات موضوع

۲ ـ ۱ مقدمه

فلسفه تولید به موقع دسته جدیدی از مسائل زمان‌بندی را به وجود آورده که در آن هر دو حالت زودکرد و دیرکرد کارها دارای هزینه هستند. توابع هدف خطی و غیرخطی گوناگونی جهت کمینه‌سازی هزینه کل در این مدل‌ها درنظرگرفته شده است. این مسأله برای بسیاری از صنایع یک امر حیاتی است. برای مثال، صنایع ساخت طبق سفارش، سفارشات در اندازه‌های کوچک و متوسط از مشتریان دریافت شده و یک موعد تحویل خاص برای هر سفارش درنظرگرفته می‌شود. به همین دلیل در طول دو دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققان بوده و با فرض‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین معیار کمینه‌سازی زودکرد و دیرکرد در اشکال مختلف و با فرضیات متفاوتی در موعد تحویل کارها، مجاز بودن بیکاری یا وزن‌دار بودن زودکرد و دیرکرد، توجه محققان را به خود جلب کرده است.

در این فصل مسأله کمینه‌سازی زودکرد و دیرکرد در زمان‌بندی تک ماشین به طور کامل مرور شده است. همچنین ورود غیرهمزمان کارها نیز به عنوان یک فرض واقع‌گرایانه در ادبیات موضوع زمان‌بندی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت این فرض در مسائل زمان‌بندی زودکرد/ دیرکرد بررسی شده است.

۲-۲- زمان‌بندی زودکرد و دیرکرد (E/T)

مسأله زمان‌بندی زودکرد و دیرکرد از مجموع دو هدف متفاوت زودکرد و دیرکرد کارها به‌دست‌آمده و بنابراین در دسته مسائل دوهدفه[1] و همچنین کمینه‌سازی مجموع[2] قرار می‌گیرد [۵]. به طور کلی می‌توان مسأله مجموع مجموع زودکرد و دیرکرد را به صورت زیر تعریف نمود که در آن :

n= تعداد کارها (قطعات)

C_i= زمان ختم کار i ام

p_i= زمان پردازش کار i ام

α_i = ضریب هزینه هر واحد زودکرد کار i ام

β_i = ضریب هزینه هر واحد دیرکرد کار i ام

با درنظرگرفتن زمان اختتام کار i به صورت C_i، کار i دارای زودکرد است اگر $C_i \leq d_i$ باشد و $E_i=\max\{۰, d_i-C_i\}$ است. از طرف دیگر کار i دارای دیرکرد است اگر $C_i \geq d_i$ باشد و مقدار آن برابر $T_i= \max\{۰, C_i - d_i\}$ است. بنابراین مجموع زودکرد ودیرکرد در حالت کلی به صورت زیر است:

$$ET = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i E_i + \beta_i T_i)$$

تابع هزینه فوق شامل دو قسمت است. قسمت اول هزینه زودکرد کارهایی می‌باشد که قبل از موعد تحویل آنها آماده شده‌اند و درنتیجه هزینه‌هایی مانند انبارداری را در بر خواهند داشت. قسمت دوم هزینه دیرکرد کارهایی می‌باشد که بعد از موعد تحویل آنها آماده شده‌اند و در نتیجه جریمه‌هایی از طرف مشتریان در برخواهند داشت.

۲-۳- طبقه بندی مسائل زودکرد و دیرکرد (E/T)

مسأله زمان‌بندی زودکرد و دیرکرد برای اولین بار توسط سیدنی [٦] معرفی شد. او مسأله کمینه‌سازی بیشینه جریمه زودکرد یا دیرکرد را ارائه نمود. کانت [۷] این مسأله را با درنظرگرفتن موعد تحویل مشترک و نامحدود بررسی نمود. پس از آن طیف گسترده‌ای از مسائل مورد مطالعه قرار گرفتند. این مسائل بر اساس انواع جریمه‌ها, موعد تحویل کارها، فشردگی موعد تحویل و وجود یا عدم وجود بیکاری عمدی قابل طبقه‌بندی هستند. بیکر و اسکودر [۸] مرور کاملی بر این مسائل داشته‌اند.

---

[1] bi-objective
[2] minsum

۲-۳-۱- توابع جریمه

توابع هزینه می‌تواند از چندین دیدگاه مختلف مورد بررسی قرار گیرد:

- خطی یا غیر خطی
- جریمه‌های یکسان یا متفاوت
- تفاوت در جریمه‌ها بین کارها
- تفاوت در جریمه‌ها بین زود کرد و دیرکرد

بنابراین با توجه به فروض و حالت‌های مختلف، معیارهای متعددی برای مسأله زودکرد/ دیرکرد ارائه شده که می‌توان آن‌ها را در چهار قالب کلی زیر دسته‌بندی نمود:

- **میانگین انحرافات مطلق از موعد تحویل (MAD[1]):** در این تابع جریمه‌ها به صورت یکسان درنظرگرفته می‌شوند. بر این اساس تابع هزینه بدون توجه به شدت دیرکرد و یا زودکرد کارها به صورت یکسان با آنها برخورد می‌نماید.

$$ET = \sum_{i=1}^{n} (E_i + T_i)$$

- **مجموع وزنی زودکرد و دیرکرد (WET[2]):** درصورتی‌که تفاوت در جریمه‌ها تنها بین زودکرد و دیرکرد کارها درنظرگرفته شود، می‌توان گفت جریمه‌ها برای تمامی کارهای زودکرددار و همین‌طور برای تمامی کارهای دیرکرددار یکسان هستند و تنها تفاوت در اختلاف بین ضریب هزینه زودکرد و ضریب هزینه دیرکرد می‌باشد. بنابراین تابع هدف را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$ET = \sum_{i=1}^{n} (\alpha E_i + \beta T_i)$$

که در آن α ضریب هزینه زودکرد و β ضریب هزینه دیرکرد برای کلیه کارهاست.

- **مجموع وزنی زودکرد و دیرکرد متقارن (STWET[3]):** در این مسأله تفاوتی در هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وجود ندارد اما ارزش و یا هزینه کارها با یکدیگر متفاوت است. در این حالت تابع هدف به صورت زیر خواهد بود.

$$ET = \sum_{i=1}^{n} w_i (E_i + T_i)$$

که در آن w_i ضریب هزینه کار i است.

---

[1] Mean Absolute Deviation
[2] Weighted Earliness and Tardiness
[3] Symmetric total Weighted Earliness and Tardiness