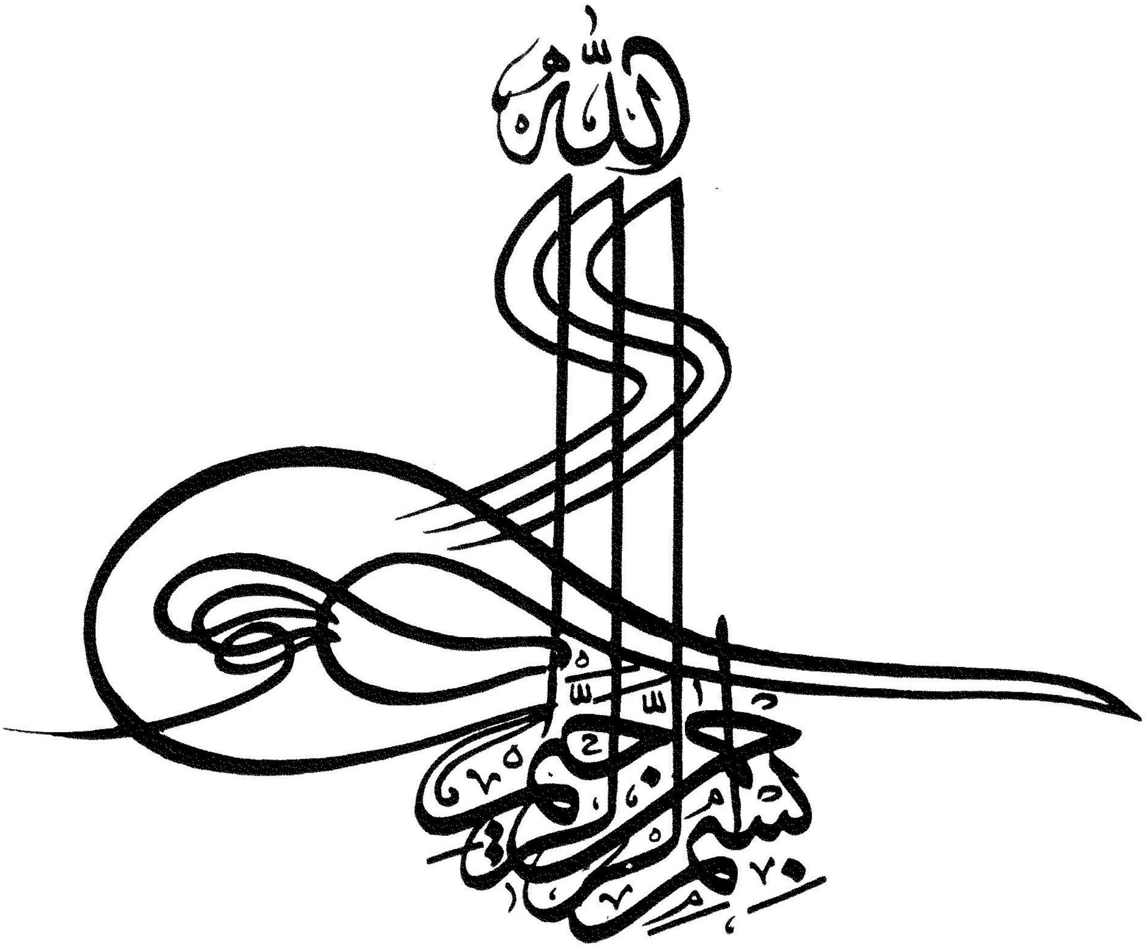


بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها

حداقل کردن مجموع زمان‌های تکمیل کارها در مسئلۀ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری با وجود مسدود شدن

پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد مهندسی صنایع

دانیال خراسانیان

استاد راهنما

دکتر قاسم مصلحی

1390

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها

پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد رشتۀ مهندسی صنایع آقای دانیال خراسانیان

تحت عنوان

حداقل کردن مجموع زمان‌های تکمیل کارها در مسئلۀ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری با وجود مسدود شدن

در تاریخ توسط کمیتۀ تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

1- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر قاسم مصلحی
2- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر علی شاهنده
3- استاد داور	دکتر مهدی بیجاری
4- استاد داور	دکتر سید حمید میرمحمدی
5- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مهدی بیجاری

تشکر و قدردانی

پروردگارا یاد تو دل را زنده کرد و تخم مهر افکند، درخت شادی رویانید و میوهٔ آزادی داد **(**مناجات نامهٔ خواجه عبدا**...** انصاری**)**. ابتدا لازم می‌دانم از خانوادهٔ عزیزم که در تمامی مراحل تحصیلی، پشتیبان و مشوق بنده بوده‌اند، صمیمانه قدردانی نمایم. سپس، از استاد گرامیم جناب آقای دکتر مصلحی که در فراز و نشیب انجام این مطالعه، با راهنمایی‌های ارزشمند و بی‌دریغ خود اینجانب را یاری نمودند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم. از جناب آقای دکتر شاهنده نیز که به عنوان مشاور، نقش بسزایی در بهبود کیفیت این مطالعه داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین، مراتب تقدیر و تشکر خود را نسبت به جناب آقای دکتر بیجاری و جناب آقای دکتر میرمحمدی که زحمت داوری این مطالعه را بر عهده داشته و با نکات ارزندهٔ خود اینجانب را بهره‌مند نمودند، ابراز می‌دارم. به علاوه از استاد گرامی، جناب آقای دکتر بیجاری به عنوان سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده تقدیر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر همدانی که در بحث‌های آماری این مطالعه، کمک زیادی به اینجانب ارزانی نمودند و همچنین سایر اساتید دانشکده که در دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد افتخار علم آموزی از آن‌ها را داشته‌ام، قدردانی می‌نمایم. از جناب آقای رئیسی، جناب آقای کیانفر و جناب آقای مهنام نیز که بنده را در انجام این مطالعه یاری نمودند، تشکر می‌کنم. در پایان، از تمام دوستان صمیمی و مهربانم که لحظات بسیار خوبی را با آنها سپری نمودم، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

تقدیم به

خانواده عزیزتر از جانم،اساتید گرانقدرم و دوستان مهربانم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	1
فصل اول: مقدمه	
1-1- تعاریف اولیه	2
1-2- طبقه‌بندی و نمادگذاری مسائل زمان‌بندی	3
1-3- روش‌های حل	5
1-4- فرضیات عمومی مسائل زمان‌بندی	6
1-5- اهداف تحقیق و ضرورت آن	6
1-6- تعریف مسئله	7
1-7- کاربردهای عملی	8
1-8- مروری بر مطالب پایان‌نامه	8
1-9- نتیجه‌گیری	8
فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع	
2-1- مقدمه	9
2-2- ادبیات موضوع مسئلهٔ *PFSS*	9
2-2-1- روش‌های دقیق برای حل مسئلهٔ $Fm\|prmu\|\sum C_j$	11
2-2-2- روش‌های غیردقیق برای حل مسئلهٔ $Fm\|prmu\|\sum C_j$	14
2-3- ادبیات موضوع مسئلهٔ *BFSS*	18
2-3-1- مسئلهٔ $Fm\|block\|C_{max}$	25
2-3-2- مسئلهٔ $Fm\|block\|\sum Cj$	29
2-4- ادبیات موضوع مسئلهٔ *LPFSS*	32
2-5- نتیجه‌گیری	35
فصل سوم: حل حالت *m* ماشینهٔ مسئلهٔ *BFSS* با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان تکمیل کارها	
3-1- مقدمه	36
3-2- ویژگی‌های مسئلهٔ *BFSS*	36
3-3- مدل‌های ریاضی	37
3-3-1- مدل بر اساس زمان‌های خروج	38
3-3-2- مدل بر اساس مقادیر بیکاری و مسدود شدن	39
3-4- الگوریتم شاخه و کران	41

3-4-1- روش شاخه زدن 42
3-4-2- حد بالای اولیه 42
3-4-3- حدود پایین 44
3-4-4- اصول غلبه 49
3-4-5- صرفه‌جویی محاسباتی در الگوریتم شاخه و کران 54
3-5- الگوریتم فرا ابتکاری IG بهبود یافته 55
3-5-1- ایجاد جواب اولیه 56
3-5-2- جستجوی محلی 60
3-5-3- شاخص پذیرفته شدن 61
3-5-4- تخریب و ساخت 61
3-5-5- صرفه‌جویی محاسباتی در الگوریتم MIG 62
3-6- آزمایش‌های عددی 62
3-6-1- تولید مسئله 62
3-6-2- ارزیابی محاسباتی مدل‌های ریاضی 63
3-6-3- ارزیابی محاسباتی الگوریتم شاخه و کران 65
3-6-4- ارزیابی محاسباتی الگوریتم MIG 71
3-7- نتیجه‌گیری 81

فصل چهارم: حل دقیق مسئلهٔ $F2|block|\Sigma Cj$

4-1- مقدمه 82
4-2- نمادگذاری 82
4-3- محاسبهٔ مقدار TCT در حالت دو ماشینه 83
4-4- جواب بهینهٔ برخی حالات خاص 83
4-5- الگوریتم شاخه و کران 86
4-6- صرفه‌جویی محاسباتی در الگوریتم شاخه و کران حالت دو ماشینه 97
4-7- آزمایش‌های عددی 98
4-7-1- تولید مسئله 98
4-7-2- ارزیابی محاسباتی 98
4-8- نتیجه‌گیری 102

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

5-1- مقدمه 103
5-2- روش‌های دقیق ارائه شده برای حالت m ماشینه 103
5-3- الگوریتم MIG ارائه شده برای حل غیردقیق حالت m ماشینه 104

5-4- مطالب گفته شده در مورد حل دقیق حالت دو ماشینه..105
5-5- پیشنهاداتی برای مطالعات آتی 106
مراجع

چکیده

در مدل عمومی کارگاه گردش کاری فرض می‌شود که ظرفیت انبارهای میانی ماشین‌ها نامحدود است. با این وجود، در بسیاری از مدل‌های واقعی کارگاه گردش کاری، انباری بین ماشین‌ها وجود ندارد. در سال‌های اخیر، مطالعات نسبتاً زیادی در مورد زمان‌بندی این مدل‌ها با تابع هدف کمینه‌سازی دامنهٔ عملیات انجام شده است. با این وجود، مطالعات انجام شده با وجود توابع هدف دیگر به شدت کمیاب است. در این مطالعه سعی شده تا روش‌های دقیق و غیردقیق کارایی برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری بدون وجود انبارهای میانی و با تابع هدف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های تکمیل کارها ارائه شود. تاکنون هیچ روش دقیقی برای حل مسئلهٔ مورد بررسی مشاهده نشده است. در این مطالعه، ابتدا دو مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح صفر و یک مختلط برای مسئلهٔ موردنظر ارائه شده که یکی بر مبنای زمان‌های خروج کارها از ماشین‌ها و دیگری بر اساس مدت زمان‌های بیکاری و مسدود شدن موجود در زمان‌بندی هر توالی معین گسترش داده شده است. در ادامهٔ این مطالعه، به منظور ارائهٔ یک روش دقیق کاراتر برای حل مسئلهٔ موردنظر، یک الگوریتم شاخه و کران توسعه داده شده است. بر این اساس، یک روش ابتکاری برای ایجاد یک حد بالای اولیه به همراه چهار حد پایین و سه دستورالعمل برای قرار گرفتن در ساختار الگوریتم شاخه و کران، توسعه داده شده است. الگوریتم شاخه و کران ارائه شده، موفق به حل بهینهٔ 17 مسئله از دو دستهٔ اول مسائل مرجع تیلارد، در محدودیت زمان 3600 ثانیه شده است. پس از توسعهٔ روش‌های دقیق گفته شده، به منظور حل مسائل با اندازهٔ بزرگ، یک الگوریتم فرا ابتکاری حریصانهٔ تکرار شوندهٔ بهبود یافته برای حل غیردقیق مسئلهٔ مورد بررسی ارائه شده است. کارایی این الگوریتم، بسیار بیشتر از کارایی تنها الگوریتم فرا ابتکاری ارائه شده تا قبل از این مطالعه برای حل مسئلهٔ موردنظر، می‌باشد. در پایان این مطالعه سعی شده تا برای حالت دو ماشینهٔ مسئلهٔ گفته شده، گسترش‌هایی علاوه بر مطالب گفته شده برای حالت عمومی ارائه شود. بر این اساس، ابتدا نحوهٔ به‌دست آوردن جواب بهینهٔ دو حالت خاص از این مسئله بیان شده است. سپس، یک روش ابتکاری بسیار کارا، یک حد پایین و سه اصل غلبه توسعه داده شده است. این گسترش‌ها به همراه برخی از گسترش‌های صورت گرفته برای حالت عمومی مسئله، در ساختار یک الگوریتم شاخه و کران مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم شاخه و کران حاصل، موفق به حل بهینهٔ 75 درصد از مسائل تا اندازهٔ 30 کار، در محدویت زمان 3600 ثانیه شده است.

لغات کلیدی: مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری بدون وجود انبارهای میانی، مجموع زمان‌های تکمیل کارها، مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح صفر و یک مختلط، مسائل مرجع تیلارد، الگوریتم شاخه و کران، الگوریتم حریصانهٔ تکرار شونده.

فصل اول

مقدمه

زمان‌بندی یک فرایند تصمیم‌گیری است که در اکثر سیستم‌های تولیدی و سرویس‌دهی استفاده شده و جزء برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت به شمار می‌آید. وظیفهٔ این فرایند، تخصیص منابع محدود به فعالیت‌های موجود در بازه‌های زمانی معین بوده و هدف آن بهینه کردن یک یا چند تابع هدف است. منابع و فعالیت‌ها به عنوان دو عنصر اساسی زمان‌بندی، اشکال گوناگونی می‌تواند داشته باشد. ماشین‌ها در کارگاه‌های تولیدی، باندهای پرواز در فرودگاه‌ها، اتاق‌های عمل در بیمارستان‌ها و واحدهای پردازنده در محیط‌های محاسباتی، نمونه‌هایی از منابع در محیط‌های مختلف است. همچنین، عملیات تولیدی در کارگاه‌ها، برخاستن و فرود آمدن هواپیماها در فرودگاه‌ها، عمل‌های جراحی در بیمارستان‌ها و اجرای برنامه‌ها در محیط‌های محاسباتی، از جمله فعالیت‌های موجود در محیط‌های مختلف می‌باشد. بهره‌برداری کارا از منابع و انطباق زمان‌های تکمیل کارها با موعدهای تحویل آنها، به منظور کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت مشتریان، دو هدف اساسی در زمان‌بندی می‌باشد.

1-1- تعاریف اولیه

اغلب در مسائل زمان‌بندی از منبع با نام ماشین و از فعالیت با نام کار یاد می‌شود. یک کار شامل یک یا چند عمل می‌باشد که باید بر یک یا چند ماشین مختلف پردازش شود. در یک مسئلهٔ زمان‌بندی معین، تعداد کارها با n و تعداد ماشین‌ها با m نشان داده می‌شود. از جمله دیگر داده‌های مورد استفاده در زمان‌بندی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مدت زمان پردازش[1] (p_{ij}): مدت زمانی است که کار j باید در ماشین i پردازش شود. زمانی که فقط یک ماشین در مسئله وجود داشته باشد، اندیس i حذف می‌شود.

موعد تحویل[2] (d_j): زمان وعده داده شده به مشتری برای تکمیل کار j می‌باشد.

زمان ورود[3] (r_j): زودترین زمانی است که پردازش کار j می‌تواند شروع شود.

وزن (w_j): یک فاکتور اولویت‌دهی برای کار j است که اهمیت آن را نسبت به بقیهٔ کارها معین می‌سازد.

داده‌های گفته شده از نوع ایستا است؛ زیرا به زمان‌بندی وابسته نمی‌باشد. داده‌های وابسته به زمان‌بندی، داده‌های پویا نامیده می‌شود [1]. از جمله مهمترین داده‌های پویا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

زمان تکمیل (C_j): برابر زمان تکمیل کار j است.

دیرکرد[4] (T_j): برابر مقدار دیرکرد تکمیل کار j، نسبت به موعد تحویل آن است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_j = \max\left(0, C_j - d_j\right) \qquad j = 1,\ldots,n \qquad (1\text{-}1)$$

جریمهٔ واحد[5] (U_j): این کمیت نشان می‌دهد که کار j دارای دیرکرد و یا بدون دیرکرد است و برای محاسبهٔ تعداد کارهای دیرکرددار یک زمان‌بندی، بدون توجه به مقدار دیرکرد آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. مقدار U_j را با استفاده از رابطهٔ زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$U_j = \begin{cases} 1 & if \quad C_j > d_j \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad j = 1,\ldots,n \qquad (2\text{-}1)$$

1-2- طبقه‌بندی و نمادگذاری مسائل زمان‌بندی

ویژگی‌های مختلف سیستم‌های تولیدی و سرویس‌دهی از قبیل آرایش منابع، ویژگی‌های کارها و محدودیت‌های فرایند آنها موجب ایجاد مدل‌های مختلف زمان‌بندی شده است. همچنین، مدل‌های زمان‌بندی از لحاظ تابع هدف نیز به انواع گوناگونی دسته‌بندی می‌شود. در این مطالعه، از نمادگذاری استاندارد ارائه شده توسط گراهام و همکاران [3] برای نمایش مسائل مختلف بهره گرفته می‌شود. قالب کلی این نمادگذاری به صورت $\alpha \mid \beta \mid \gamma$ است که در آن α نشان‌دهندهٔ ساختار منابع یا محیط ماشینی، β معرف ویژگی کارها و یا محدودیت‌های فرایند و γ نمایندهٔ تابع هدف است. در ادامه، یک طبقه‌بندی مختصر از مسائل زمان‌بندی، بر اساس اجزای مختلف این نمادگذاری انجام می‌شود.

---

[1] processing time
[2] due date
[3] release date
[4] tardiness
[5] unary penalty

مهمترین محیط‌های ماشینی به همراه علائم اختصاری آنها که در مکان α نمادگذاری گراهام و همکاران [3] قرار می‌گیرد، به شرح زیر می‌باشد [2]:

تک ماشینه[1] (1): ساده‌ترین محیط ماشینی بوده و یک حالت خاص از بقیهٔ محیط‌های ماشینی می‌باشد.

ماشین‌های موازی مشابه[2] (Pm): در این محیط، m ماشین مشابه به صورت موازی قرار گرفته‌اند. هر کار فقط یک عمل دارد که می‌تواند توسط هر یک از این ماشین‌ها پردازش شود.

کارگاه گردش کاری[3] (Fm): در این محیط، m ماشین به صورت سری قرار دارد. هر کار باید در هر یک از این ماشین‌ها پردازش شود و مسیر همهٔ کارها یکسان است؛ یعنی هر کار ابتدا در ماشین 1، سپس در ماشین 2 و به همین ترتیب، در نهایت در ماشین m پردازش می‌شود.

تولید کارگاهی[4] (Jm): در یک محیط تولید کارگاهی با m ماشین، هر کار مسیر معین و مربوط به خود داشته و ممکن است که بیش از یک بار در یک ماشین پردازش شود.

کارگاه باز[5] (Om): در این محیط، m ماشین وجود دارد و هر کار باید در هر یک از این ماشین‌ها پردازش شود. این محیط، مشابه محیط کارگاه گردش کاری است با این تفاوت که در آن هیچ محدودیتی برای مسیر کارها وجود ندارد. به عبارت دیگر، هر کار با هر ترتیب دلخواهی می‌تواند از ماشین‌ها عبور کند.

برخی از ویژگی‌های کارها و یا محدودیت‌های فرایند، به همراه علامت اختصاری آنها که در مکان β نمادگذاری گراهام و همکاران [3] قرار می‌گیرد، در ادامه شرح داده می‌شود:

جایگشت[6] $(prmu)$: محدودیتی است که می‌توان در محیط‌های کارگاه گردش کاری در نظر گرفت. در این محدودیت، خروج کارها از انبارهای میانی بر اساس قاعدهٔ $FIFO$[7] فرض می‌شود. بر اساس این قاعده، هر کاری که زودتر وارد انبار شده باشد، زودتر نیز باید خارج شود. این فرض باعث می‌شود تا کارها با یک ترتیب مشابه در هر یک از ماشین‌ها پردازش شوند [2]. مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری با وجود محدودیت جایگشت، با نام مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری جایگشتی ($PFSS$[8]) شناخته می‌شود.

---

[1] single machine
[2] identical machines in parallel
[3] flow shop
[4] job shop
[5] open shop
[6] permutation
[7] First In First Out
[8] Permutation Flow Shop Scheduling

انبار میانی محدود[1] (b): زمانی که انبارهای میانی ماشین‌ها در محیط‌های چندماشینه نظیر کارگاه گردش کاری و تولید کارگاهی دارای ظرفیت محدود باشد، این حالت اتفاق می‌افتد. در این حالت، در صورتی که موقع تکمیل یک کار روی یک ماشین، انبار بین آن ماشین و ماشین بعدی در مسیر کار موردنظر پر باشد، آن کار به اصطلاح، ماشین جاری را مسدود[2] نموده و با باقی ماندن در این ماشین، مانع از ورود کارهای دیگر به آن می‌شود [4].
انبار میانی صفر[3] ($block$): حالت خاصی از انبار میانی محدود بوده که در آن ظرفیت همهٔ انبارهای میانی برابر صفر است [2].
بدون انتظار[4] (nwt): این حالت در محیط‌های چندماشینه نظیر کارگاه گردش کاری و تولید کارگاهی می‌تواند رخ دهد. در این حالت، شروع تا پایان پردازش هر کار در ماشین‌ها باید بدون وقفه انجام شود [2].

حال، برخی از مهمترین توابع هدف مطرح شده در مسائل زمان‌بندی به همراه علامت اختصاری آنها که در مکان γ نمادگذاری گراهام و همکاران [3] قرار می‌گیرد، شرح داده می‌شود:

دامنهٔ عملیات[5] (C_{max}): این تابع هدف، معادل زمان تکمیل آخرین کاری است که از سیستم خارج می‌شود. مقدار کمینهٔ دامنهٔ عملیات معمولاً اشاره به بهره‌برداری کارا از ماشین‌ها دارد.
مجموع زمان‌های تکمیل کارها ($\sum C_j$): مجموع زمان‌های تکمیل کارها (TCT[6]) را می‌توان به نوعی معرف مجموع زمان‌های نگهداری کارها و یا هزینهٔ موجودی ناشی از زمان‌بندی در نظر گرفت.

از جمله دیگر توابع هدف پرکاربرد می‌توان به مجموع وزن‌دار مقادیر دیرکرد[7] ($\sum w_jT_j$)، مجموع وزن‌دار تعداد کارهای دیرکردار[8] ($\sum w_jU_j$) و بیشینهٔ دیرکرد (T_{max}) اشاره نمود.

1-3- روش‌های حل

به طور کلی، روش‌های حل مسائل زمان‌بندی را می‌توان به دو دستهٔ روش‌های دقیق و غیردقیق تقسیم‌بندی نمود. در روش‌های دقیق، جواب بهینهٔ مسائل به‌دست می‌آید. در صورتی که بتوان یک مسئله را در زمان قابل قبول با استفاده از روش‌های دقیق حل کرد، دیگر توجیهی برای استفاده از روش‌های غیردقیق وجود ندارد. برنامه‌ریزی ریاضی،

---

[1] limited intermediate buffers
[2] block
[3] zero intermediate buffers
[4] no-wait
[5] makespan
[6] total comletion time
[7] total weighted tardiness
[8] weighted number of tardy jobs

برنامه‌ریزی پویا[1] و الگوریتم شاخه و کران[2] از جمله مهمترین روش‌های دقیق به شمار می‌آید. با توجه به پیچیدگی زیاد برخی از مسائل زمان‌بندی، امکان حل دقیق اندازه‌های بزرگ آنها، در زمان قابل قبول، ممکن است وجود نداشته باشد. در این‌گونه موارد، می‌توان از روش‌های غیردقیق نظیر روش‌های ابتکاری و الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهره جست. از جمله مهمترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری ارائه شده می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (GA[3])، جستجوی ممنوع (TS[4])، جستجوی هارمونی (HS[5])، تکامل تفاضلی (DE[6])، بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO[7])، جستجوی محلی محلی تکرارشونده (ILS[8]) و حریصانهٔ تکرارشونده (IG[9]) اشاره نمود.

1-4- فرضیات عمومی مسائل زمان‌بندی

برای همهٔ مسائل زمان‌بندی، یک سری فرضیات عمومی در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی، در صورت رهاسازی نشدن هر یک از این فرضیات، نیازی به بیان آنها در صورت مسئله نیست. برخی از مهمترین این فرضیات به شرح زیر می‌باشد:

- یک کار نمی‌تواند به طور همزمان در دو ماشین پردازش شود.
- هر ماشین بیش از یک کار را به طور همزمان پردازش نمی‌کند.
- مدت زمان پردازش کارها مستقل از توالی بوده و به عبارت دیگر، مدت زمان‌های آماده‌سازی کارها مستقل از توالی می‌باشد.
- انقطاع[10] مجاز نیست.
- بین ماشین‌ها انبار با ظرفیت نامحدود وجود دارد.
- ماشین‌ها همواره در دسترس هستند.
- داده‌ها حالت قطعی دارند.

1-5- اهداف تحقیق و ضرورت آن

مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری، یکی از معروف‌ترین مسائل زمان‌بندی ماشین‌ها، با مصداق‌های عملی فراوان می‌باشد که حدود یک چهارم سیستم‌های تولیدی، خطوط مونتاژ و تسهیلات سرویس‌دهی اطلاعات را در برمی‌گیرد

---

[1] dynamic programming
[2] branch and bound
[3] Genetic Algorithm
[4] Tabu Search
[5] Harmony Search
[6] Differential Evolution
[7] Particle Swarm Optimization
[8] Iterated Local Search
[9] Iterated Greedy
[10] preemption

[5]. در مدل عمومی کارگاه گردش کاری فرض می‌شود که ظرفیت انبارهای میانی ماشین‌ها نامحدود است. با این وجود، در بسیاری از مدل‌های واقعی کارگاه گردش کاری، به خاطر نیازهای تکنولوژیکی و یا مشخصات فرایند، ممکن است انبارهای میانی دارای ظرفیت محدود باشد که از این مسئله با عنوان مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری با وجود انبارهای میانی با ظرفیت محدود نام برده می‌شود [4]. حالت خاص این مسئله که در آن ظرفیت همهٔ انبارهای میانی برابر صفر باشد، مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری با وجود مسدود شدن (*BFSS*[1]) نامیده می‌شود و به علت مصداق‌های عملی جذاب آن، اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

نشان داده شده که مسئلهٔ *BFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی دامنهٔ عملیات و با بیش از دو ماشین به شدت *NP-hard* است [4]. همچنین، ثابت شده که حالت دو ماشینهٔ مسئلهٔ *BFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی مقدار *TCT*، به شدت *NP-hard* است [6]. در سال‌های اخیر، مطالعات نسبتاً زیادی در مورد مسئلهٔ *BFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی دامنهٔ عملیات انجام شده است. با این وجود، مطالعه در مورد این مسئله با توابع هدف دیگر به شدت کمیاب است. با توجه به اهمیت بالای تابع هدف کمینه‌سازی مقدار *TCT* در زمان‌بندی، در این مطالعه سعی بر آن است که روش‌های دقیق و غیردقیقی برای حل کارای مسئلهٔ *BFSS* با این تابع هدف، ارائه شود. لازم به ذکر است که تاکنون فقط یک الگوریتم فرا ابتکاری *HS* [7] برای حل این مسئله مشاهده شده است. بر این اساس، ابتدا دو مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح صفر و یک مختلط (*MBIP*[2]) برای حل دقیق مسئلهٔ موردنظر گسترش داده می‌شود. سپس، به منظور ارائهٔ روش دقیق کاراتری که توان حل مسائل با اندازهٔ بزرگ‌تر را دارا باشد، یک الگوریتم شاخه و کران ارائه می‌شود. به علت اندازهٔ بزرگ بسیاری از مسائل واقعی، حل بهینهٔ آنها غیرممکن بوده و یا با صرف زمان بسیار زیاد امکان‌پذیر است. به همین منظور، یک الگوریتم فرا ابتکاری *IG* بهبود یافته نیز برای حل مسئلهٔ موردنظر ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که الگوریتم *IG*، کارایی بسیار بالایی در حل مسائل *PFSS* [8] و *BFSS* [9] با هدف کمینه‌سازی دامنهٔ عملیات داشته است. در نهایت برای حالت دو ماشینهٔ مسئلهٔ موردنظر، گسترش‌هایی علاوه بر مطالب ارائه شده برای حالت m ماشینه، انجام شده و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل آن ارائه می‌شود.

1-6- تعریف مسئله

در مسئلهٔ *BFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی مقدار *TCT*، تعداد n کار باید بر روی m ماشین پردازش شوند. هر کار به ترتیب بر روی ماشین‌های 1 تا m پردازش می‌شود. ظرفیت انبارهای میانی ماشین‌ها صفر است. بنابراین صف‌هایی از کارها بین ماشین‌ها به وجود نمی‌آید. در این مسئله، کار تکمیل شده بر روی یک ماشین، تا زمان خالی شدن ماشین

[1] Blocking Flow Shop Scheduling
[2] Mixed Binary Integer Programming

بعدی، ماشین جاری را مسدود می‌نماید. ورود همهٔ کارها در زمان صفر بوده و مدت زمان‌های آماده‌سازی هر کار روی هر ماشین، مستقل از ترتیب انجام کارها است. بنابراین، مدت زمان آماده‌سازی هر کار روی هر ماشین، در مدت زمان پردازش مربوط به آن منظور می‌شود. هر کار در هر لحظه حداکثر می‌تواند در یک ماشین پردازش شود و هر ماشین در هر لحظه حداکثر یک کار را می‌تواند پردازش نماید. هدف از حل این مسئله، یافتن یک توالی از کارها است که مقدار TCT را کمینه نماید.

1-7- کاربردهای عملی

مسئلهٔ $BFSS$ در بسیاری از سیستم‌های صنعتی و خدماتی کاربرد دارد. گرابوفسکی و پمپرا [10] یک مثال از تولید بلوک‌های سیمانی را توصیف کردند که بین برخی از مراحل آن انبار کردن مجاز نمی‌باشد. گانگ و همکاران [11] مثالی از مسئلهٔ $BFSS$ را مطرح کردند که در صنایع آهن و فولاد اتفاق می‌افتد. از جمله مصداق‌های عملی دیگر این مسئله می‌توان به زمان‌بندی اتاق عمل و زمان‌بندی سلول‌های رباتیک اشاره کرد. به عنوان نمونه، در مسئلهٔ زمان‌بندی اتاق عمل، ماشین‌ها همان اتاق عمل، اتاق بازگشت به حالت اولیه[1] و اتاق بیماران سرپایی است. بیماری که عمل جراحی آن پایان یافته است، تا زمان خالی شدن اتاق بازگشت به حالت اولیه باید در اتاق عمل باقی بماند و در واقع آنجا را مسدود می‌نماید.

1-8- مروری بر مطالب پایان‌نامه

در ادامه این مطالعه، در فصل دوم ادبیات موضوع مسئلهٔ $BFSS$ و برخی از مسائل مشابه آن بررسی می‌شود. سپس در فصل سوم، دو مدل $MBIP$، یک الگوریتم شاخه و کران و یک الگوریتم IG بهبود یافته برای حل مسئلهٔ $BFSS$ با هدف کمینه‌سازی مقدار TCT گسترش داده می‌شود. در فصل چهارم، برای حالت دو ماشینهٔ مسئلهٔ موردنظر، گسترش‌هایی علاوه بر مطالب گفته شده برای حالت m ماشینه انجام شده و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل آن پیشنهاد می‌شود. در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی بیان می‌شود.

1-9- نتیجه‌گیری

در این فصل، ابتدا برخی از مفاهیم مقدماتی زمان‌بندی بیان شد. سپس، اهداف این مطالعه، ضرورت آن و برخی کاربردهای عملی آن بررسی شد. بر این اساس، در این مطالعه سعی می‌شود تا روش‌های دقیق و غیردقیق کارایی برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری بدون وجود انبارهای میانی و با هدف کمینه‌سازی مقدار TCT ارائه شود.

---

[1] recovery

فصل دوم
مروری بر ادبیات موضوع

2-1- مقدمه
در این مطالعه، مسئلهٔ *BFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی مقدار *TCT* مورد بررسی قرار می‌گیرد که تاکنون، فقط یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل آن مشاهده شده است. با توجه به این که در مسئلهٔ *BFSS*، انباری بین ماشین‌ها وجود ندارد، امکان جلو زدن کارها از یکدیگر، روی هر یک از ماشین‌ها، وجود ندارد. بنابراین، زمان‌بندی این مسئله از نوع جایگشتی می‌باشد؛ یعنی، ترتیب پردازش کارها روی تمام ماشین‌ها یکسان باقی می‌ماند. از این رو، این مسئله با مسئلهٔ *PFSS* شباهت دارد و بر این اساس در این فصل، ابتدا به برخی از مهمترین مطالعات انجام شده در مورد مسئلهٔ *PFSS* با تابع هدف کمینه‌سازی مقدار *TCT* اشاره می‌شود. سپس، با توجه به شباهت ساختاری دو تابع هدف دامنهٔ عملیات و *TCT*، مطالعات انجام شده در مورد مسئلهٔ *BFSS* با وجود این توابع هدف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان فصل نیز اشارهٔ مختصری به مطالعات انجام شده در مورد مسئلهٔ زمان‌بندی کارگاه گردش کاری جایگشتی با وجود انبارهای میانی با ظرفیت محدود (*LPFSS*[1]) خواهد شد.

2-2- ادبیات موضوع مسئلهٔ *PFSS*
در مسئلهٔ *PFSS*، m ماشین و n کار وجود دارد که هر کار باید به ترتیب در ماشین‌های 1 تا m پردازش شود. بین هر دو ماشین یک انبار با ظرفیت نامحدود وجود دارد و برای آن که توالی کارها روی همهٔ ماشین‌ها یکسان باشد، خروج

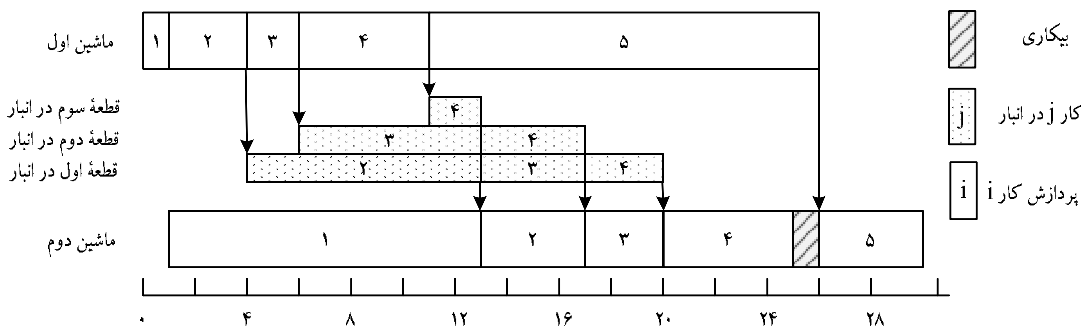
---
[1] Limited-buffer Permutation Flow shop Scheduling

کارها از انبارهای میانی بر اساس قاعدهٔ $FIFO$ فرض می‌شود. هدف از حل این مسئله، یافتن یک توالی از کارها است که یک معیار معین را بهینه نماید. به این ترتیب فضای جواب این مسئله، $n!$ عضو دارد. در نمادگذاری گراهام [3]، مسئلهٔ $PFSS$ با توابع هدف کمینه‌سازی دامنهٔ عملیات و کمینه‌سازی مقدار TCT، به ترتیب با نمادهای $Fm|prmu|C_{max}$ و $Fm|prmu|\sum C_j$ نمایش داده می‌شود. در سال 1954، جانسون [12] یک الگوریتم برای یافتن جواب بهینهٔ مسئلهٔ $F2|prmu|C_{max}$ ارائه داد که در زمان چندجمله‌ای قابل حل است. با این وجود، ثابت شده که مسائل $F2|prmu|\sum C_j$ و $F3|prmu|C_{max}$ به شدت $NP\text{-}hard$ هستند [13]. در ادامه، یک مثال ساده از چگونگی زمان‌بندی در مسئلهٔ $PFSS$ بیان می‌شود.

مثال 2-1: یک مثال از مسئلهٔ $PFSS$، با وجود پنج کار و دو ماشین را در نظر بگیرید. مدت زمان پردازش هر یک از کارها روی هر یک از ماشین‌ها در جدول 2-1 آمده است. نمودار گانت زمان‌بندی توالی (5-4-3-2-1) در شکل 2-1 به تصویر در آمده است. در این شکل، هر عمل با یک مستطیل نشان داده شده و شمارهٔ کارها در داخل مستطیل نوشته شده است. همچنین، وضعیت کارها در انبار بین دو ماشین، در این شکل نشان داده شده است.

جدول 2-1: مدت زمان‌های پردازش کارها روی ماشین‌ها مربوط به مثال 2-1

j	1	2	3	4	5
$p_{1,j}$	1	3	2	5	15
$p_{2,j}$	12	4	3	5	4



شکل 2-1: نمودار گانت زمان‌بندی توالی (5-4-3-2-1) در مثال 2-1

همان‌طور که در شکل 2-1 مشاهده می‌شود، هر کار، ابتدا روی ماشین 1 و سپس روی ماشین 2 پردازش می‌شود. همچنین، توالی پردازش کارها روی هر دو ماشین برابر (5-4-3-2-1) است. با توجه به این فرض عمومی مسائل زمان‌بندی که هر ماشین بیش از یک کار را به طور همزمان پردازش نمی‌نماید، کارهایی که موقع تکمیل در ماشین 1 با پر بودن ماشین 2 مواجه شوند، در انبار منتظر می‌مانند. همچنین، به عنوان یک نمونه از کاربرد قاعدهٔ $FIFO$ در این

زمان‌بندی، پس از تکمیل کار 1 در ماشین 2 و خالی شدن این ماشین، از بین کارهای 2، 3 و 4 که در انبار هستند، کار 2 که زودتر وارد انبار شده، وارد ماشین 2 می‌شود.

توالی $\pi = (\pi(1), \pi(2) \ldots, \pi(n))$ را در نظر بگیرید. کار $\pi(i)$ معرف کار i ام توالی موردنظر می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های گفته شده در مورد مسئلهٔ $PFSS$، به سادگی می‌توان زمان‌های تکمیل کارها روی هر یک از ماشین‌ها را برای هر توالی معین π، با استفاده از روابط 2-1 تا 2-3 محاسبه نمود [2]:

$$C_{i,\pi(1)} = \sum_{l=1}^{i} p_{l,\pi(1)} \qquad i = 1, \ldots, m \qquad \text{1-2}$$

$$C_{1,\pi(k)} = \sum_{l=1}^{k} p_{l,\pi(l)} \qquad k = 1, \ldots, n \qquad \text{2-2}$$

$$C_{i,\pi(k)} = \max(C_{i-1,\pi(k)}, C_{i,\pi(k-1)}) + p_{i,\pi(k)} \qquad i = 2, \ldots, m; k = 2, \ldots, n \qquad \text{3-2}$$

مقدار دامنهٔ عملیات توالی π برابر $C_{n,\pi(m)}$ است. همچنین، مقدار TCT این توالی را می‌توان با جمع زمان‌های تکمیل همهٔ کارها به صورت زیر محاسبه نمود:

$$TCT = \sum_{j=1}^{n} C_{m,\pi(j)} \qquad \text{4-2}$$

تاکنون، مطالعات بسیار زیادی در مورد حل مسئلهٔ $PFSS$ با توابع هدف گوناگون ارائه شده است. با این وجود در این بخش، فقط به مهمترین مطالعات انجام شده در مورد این مسئله با تابع هدف کمینه‌سازی مقدار TCT پرداخته می‌شود. روش‌های ارائه شده برای حل این مسئله را می‌توان به دو دستهٔ روش‌های دقیق و غیردقیق تقسیم‌بندی نمود که در ادامه به صورت جداگانه به آنها پرداخته می‌شود.

در بسیاری از مطالعات انجام شده در مورد مسئلهٔ $Fm|prmu|\sum C_j$، ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی با استفاده از مسائل مرجع تیلارد [14] صورت گرفته است. در مسائل مرجع تیلارد، مجموعهٔ {500، 200، 100، 50، 20}، سطوح مختلف تعداد کارها را و مجموعهٔ {20، 10، 5}، سطوح مختلف تعداد ماشین‌ها را شامل می‌شود. این مسائل، شامل 12 دسته بوده که هر دستهٔ آن، شامل 10 مسئله با اندازهٔ یکسان می‌باشد. ترکیب‌های مختلف تعداد کارها و ماشین‌ها ($n|m$) در دسته‌های این مسائل عبارتند از: 5 | 20، 10 | 20، 20 | 20، 5 | 50، 10 | 50، 20 | 50، 5 | 100، 10 | 100، 20 | 100، 10 | 200، 20 | 200 و 20 | 500.

2-2-1- روش‌های دقیق برای حل مسئلهٔ $Fm|prmu|\sum C_j$

تاکنون، تعداد معدودی روش دقیق برای حل مسئلهٔ $Fm|prmu|\sum C_j$ ارائه شده است. از جمله مهمترین این روش‌ها می‌توان به [15-18] اشاره نمود که به طور خلاصه در جدول 2-2 آمده است. در هیچ یک از این مطالعات، جواب بهینه‌ای برای هیچ یک از مسائل مرجع تیلارد [14] گزارش نشده و کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی روی مسائل