

## مدلسازی یکپارچه برنامه ریزی تولید و زمانبندی انجام عملیات در سیستم تولید

### سلولی مجازی

فرزانه سلامی<sup>۱</sup>، حسن رضازاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته علوم تصمیم و مهندسی دانش، دانشگاه علوم اقتصادی؛ آدرس پست الکترونیکی [farzane.salami@ses.ac.ir](mailto:farzane.salami@ses.ac.ir)  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تبریز؛ آدرس پست الکترونیکی [hrezazadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:hrezazadeh@tabrizu.ac.ir)

#### چکیده

یکی از مهمترین مسائلی که همواره در صنایع تولیدی مورد توجه بوده است ارائه محصولات متنوع با توجه به نیاز مشتریان در دوره‌های مختلف و در کمترین زمان و هزینه است. در این مقاله سعی بر آن شده است تا از طریق ارائه یک مدل ریاضی یکپارچه، زمانبندی انجام عملیات بر روی ماشین‌ها در سیستم تولید سلولی به صورت انعطاف پذیر انجام شود. برای جلوگیری از هزینه چیدمان مجدد در هر دوره، با توجه به ناپایدار بودن تقاضای دوره‌های مختلف، این تخصیص به صورت غیر فیزیکی (مجازی) انجام خواهد پذیرفت. علاوه بر این برنامه ریزی تولید قطعات در هر دوره برای برآوردن تقاضا در محیط پویا و همچنین کنترل و زمانبندی انجام عملیات امری است که توسط مدل ارائه شده تعیین خواهد گردید.

#### کلمات کلیدی

سیستم تولید سلولی مجازی پویا، تولید انعطاف پذیر، کنترل تولید و زمانبندی، برنامه‌ریزی تولید.

## Integrated model for scheduling and production planning in virtual cellular manufacturing system

F. Salami, H. Rezazadeh

#### ABSTRACT

One of the most important problems that have taken attention in industries is having a system that can flexibly change the way of production according to customer demands with less time and cost. In this paper, we try to generate an integrated mathematical model for scheduling and production planning in a cellular system. Because of much cost of relocating of machines in these systems and dynamic demand, virtual cellular manufacturing system suggested.

#### KEYWORDS

Dynamic Virtual cellular manufacturing system, Flexible manufacturing, Scheduling and production control, Production planning.

<sup>۱</sup> فرزانه سلامی - تهران، خیابان سمیه، بین خیابان قرنی و خیابان ویلا، دانشگاه علوم اقتصادی، دانشکده مدیریت نهادهای اقتصادی - ۰۹۱۴۴۰۰۶۵۰۷



## ۱- مقدمه

با توجه به رقابت جهانی صنایع تولیدی، سیستم‌های تولید باید قادر به تولید محصول با هزینه پایین تولید و کیفیت بالا در کمترین زمان ممکن باشند. علاوه بر این، سیستم‌های تولید باید قادر به تطبیق و یا پاسخ سریع به تغییرات در طرح تقاضای محصولات باشند، بدین منظور، سیستم‌های تولید باید قابلیت تغییر و طرحریزی مجدد بری پاسخ به تغییرات در طرح و تقاضای محصول را بدون اینکه نیازی به سرمایه گذاری عمده ای باشد، داشته باشند. در این راستا سیستم تولید سلولی به عنوان یک سیستم تولید امیدوار کننده و چاره ساز پدید آمده است.

در سیستم تولید سلولی قطعات با فرآیند تولید مشابه در یک سلول پردازش می‌شوند. سیستم تولید سلولی بستر را برای پیاده سازی روش‌های تولید پیشرفته‌تر همچون سیستم تولید انعطاف پذیر (FMS)، طراحی به کمک کامپیوتر (CAD)، تولید به کمک کامپیوتر (CAM)، تولید بهنگام (JIT)، رباتیک و غیره فراهم می‌آورد. [۱][۲][۳]

تغییر تقاضای قطعات در دوره‌ها با فرض وجود توالی عملیات، انعطاف پذیری ماشین آلات و با هدف کمینه سازی هزینه‌ها موجب تغییر چیدمان سلولی در هر دوره می‌شود که این موضوع باعث به وجود آمدن سیستم سلولی مجازی به صورتی انعطاف پذیر می‌گردد.

در تولید سلولی مجازی نیز گروه‌های منابع برای تولید یک خانواده از قطعات اختصاص داده می‌شوند با این تفاوت که ماشین‌ها در محل چیدمان اصلی باقی می‌مانند، در عوض سلول‌ها در برنامه ریزی و سیستم کنترل شکل داده می‌شوند و دارای ماهیت موقت هستند. سیستم تولید سلولی مجازی با داشتن مزایایی چون کاهش حمل و نقل مواد، کنترل بهتر تولید و کاهش کار در جریان فرآیند، طراحی دقیقتر و ساده تر فرآیند می‌تواند انعطاف‌پذیری را به عنوان یک مزیت برای سازمان به ارمغان آورد.

تلاش‌های زیادی در زمینه‌های مختلف بر روی این نوع سیستم‌ها انجام شده است. اما مسأله زمانبندی در کنار برنامه ریزی تولید یکی از مسائلی است که توجه چندانی به آن در سیستم‌های تولید سلولی مجازی انجام نگرفته است.

هر چند مفهوم سیستم تولید سلولی مجازی برای اولین بار در موسسه ملی استانداردها برای مسائل کنترل در طراحی سیستم‌های تولیدی خودکار مورد استفاده قرار گرفت [۴]، ولی اولین تعریف تحت عنوان سلول‌های مجازی به کار آقایان مک لین و همکاران برمی‌گردد که به بررسی مسائل کنترلی در فاز طراحی سیستم‌های اتوماسیون در کارخانه‌های کوچک پرداختند [۵]. نامدن و همکاران در

تحقیقات بعدی کارهای قبلی را تکمیل کردند [۶]. یکی از مسائل مهم در آرایش سلولی کمینه کردن مسافت طی شده توسط قطعات بین ماشین‌ها می‌باشد که ایرانی و همکاران [۷] با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای به طراحی این آرایش پرداخته‌اند و در این روش مسأله به اشتراک گذاری ماشین را مجاز دانسته‌اند.

سادتین و همکاران یک مدل برای زمانبندی سیستم تولید سلولی مجازی و حل آن توسط الگوریتم ژنتیک ارائه کردند [۸] که بعدها نتایج آن در حالات تقسیم عملیات و تقسیم نکردن عملیات مورد بررسی قرار دادند [۹]. مک لین و همکاران با تقسیم هر دوره به چند قسمت و زمانبندی بر این اساس مسأله زمانبندی را حل کردند [۱۰]. نورهاشم مراد و همکاران [۱۱] مسأله برنامه ریزی تولید و زمانبندی در سیستم تولید سلولی در یک دوره را با در نظر گرفتن زمان بیکاری ماشین آلات و مینیمم سازی زمان انجام عملیات با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند (در این مقاله هزینه نگهداری موجودی در نظر نگرفته شده است)

یکی از نکات برجسته مقاله جاری، بررسی سیستم تولید سلولی مجازی در شرایط پویا و همچنین آرایش سلول‌ها در هر دوره می‌باشد که بدون جابه‌جایی ماشین آلات قابل تغییر است. مدل ارائه شده کنترل و زمانبندی عملیات را در هر دوره به گونه‌ای انجام می‌دهد که زمان بیکاری ماشین‌ها و همچنین زمان اتمام تمام کارها کمینه شود. در انتها توسط یک مثال نمونه صحت مدل توسط الگوریتم شاخه کران حل شده است و نتایج ارائه گردیده است.

از آنجا که CMS جز مسائل NP-Hard می‌باشد [۱۲]. با افزایش ابعاد مسأله حل آن توسط روش‌های بهینه‌سازی سنتی مستلزم زمان، حافظه و قدرت پردازش بالا خواهد بود. [۱۳]. لذا در مقالات آینده امکان ارائه روش‌های حل ابتکاری برای مدل مذکور وجود دارد.

## ۲- فرض‌های مدل

- این مسأله دارای  $h$  دوره،  $p$  نوع محصول،  $m$  ماشین است.
- تقاضا برای هر محصول در هر دوره مشخص و قطعی است.
- هزینه ساخت برای هر نوع ماشین در ابتدا دوره معلوم است. در اینجا هزینه ساخت مبین هزینه‌های عملیاتی است که با توجه به بار کاری تخصیص داده شده به ماشین حاصل می‌شود.
- هر قطعه دارای تعدادی عملیات می‌باشد که باید به ترتیب معینی پردازش شوند.
- مکان ماشین آلات ثابت می‌باشد و فاصله‌ی بین آنها مساوی فرض شده است.
- زمان عملیات برای همه قطعات روی هر نوع ماشین معلوم و قطعی بوده و هر قطعه می‌تواند چند برنامه پردازشی مختلف داشته



باشد.

- کل تقاضای هر دوره باید در همان دوره تامین شود و سفارش به تاخیر افتاده مجاز نمی باشد.
- تعداد سلول‌ها در هر دوره ثابت و معین است.
- به اشتراک گذاری ماشین‌ها در بین سلول‌ها مجاز می‌باشد.
- هر عملیات قابل انجام بر روی چند ماشین مختلف می‌باشد.

### ۳- هدف‌های مدل

زمان اتمام کلیه عملیات : یکی از اهداف مدل ارائه شده کاهش زمان بیکاری ماشین آلات و کاهش زمان کل می‌باشد.  
 هزینه انتقال قطعات : اگر همه‌ی عملیات یک قطعه بر روی یک ماشین به پایان نرسد و قطعه به ماشین دیگری در همان سلول یا سلول دیگر انتقال یابد باعث به وجود آمدن این هزینه میگردد.  
 هزینه عملیات ماشین : هزینه انجام عملیات بر روی قطعه می‌باشد که وابسته به زمان انجام عملیات می‌باشد.  
 هزینه نگهداری موجودی : این هزینه زمانی به وجود می‌آید که مقداری از تقاضای قطعه در دوره از موجودی‌های دوره‌های قبل تأمین می‌شود.

### ۴- معرفی مدل

نمادهای مدل :

p, o	نماد انواع قطعه
h	نماد انواع دوره
c, z	نماد سلول‌های مجازی
m, d	نماد انواع ماشین
j, v	نماد عملیاتی قطعه
$D_{ph}$	تقاضای قطعه p در دوره h
$\alpha_m$	هزینه عملیاتی ماشین نوع m
$t_{jpm}$	زمان مورد نیاز برای انجام عملیات j قطعه p روی ماشین m
$ip_p$	هزینه نگهداری موجودی قطعه p در دوره h
$k_p$	تعداد عملیات هر قطعه
w	وزن توابع هدف

متغیرهای تصمیم :

$X_{jpmch}$  ، ۱ اگر عملیات j ام قطعه p روی ماشین m در سلول c و در دوره h پردازش شود و صفر در غیر اینصورت.

تعداد قطعات نوع p که عملیات j ام آن روی ماشین m در دوره h در سلول c پردازش می‌شود.  
 $I_{ph}$  تعداد قطعات نوع p که در دوره h به h+1 به عنوان موجودی نگهداری می‌شود.  
 $st_{jpmch}$  زمان آغاز عملیات j از قطعه p روی ماشین m در سلول c در دوره h  
 $ft_{jpmch}$  زمان پایان عملیات j از قطعه p روی ماشین m در سلول c در دوره h  
 $y_{jpvomczh}$  ، ۱ اگر عملیات j از قطعه p در سلول c قبل از عمیات v از قطعه o در سلول z روی ماشین m برنامه ریزی شود  
 $C_{\max(p,h)}$  زمان اتمام کلیه عملیات قطعه p در دوره h

تابع هدف :

(۱)

$$\min z = w_1 \left( \sum_p \sum_h C_{\max(p,h)} \right) + w_2 \left( \sum_j \sum_p \sum_m \sum_c \sum_h \alpha_m t_{jpm} Q_{jpmch} \right) + \sum_j \sum_p \sum_m \sum_c \sum_h \sum_n \sum_z \lambda Q_{jpmch} X_{j+1, pnzh} + \sum_p \sum_h I_{ph} IP_p$$

محدودیت‌ها:

(۲)

$$\sum_j \sum_p \sum_m \sum_c \sum_h Q_{jpmch} + I_{p,h-1} + I_{ph} = D_{ph} \quad \forall j, p, h$$

$$C_{\max(p,h)} \geq ft_{jpmch} \quad \forall j, p, m, c, h \quad (۳)$$

$$M \cdot X_{jpmch} \geq st_{jpmch} \quad \forall j, p, m, c, h \quad (۴)$$

$$M \cdot X_{jpmch} \geq ft_{jpmch} \quad \forall j, p, m, c, h \quad (۵)$$

(۶)

$$ft_{jpmch} = st_{jpmch} + Q_{jpmch} t_{jpm} \quad \forall j, p, m, c, h \quad (۷)$$

$$st_{j+1, pmch} \geq ft_{jpdzh} X_{j+1, pmch}$$

$$\forall j, p, m, c, h, d, z$$

(۸)

$$st_{jpmch} \geq ft_{vomzh} - y_{jpvomczh} M$$

$$\forall j, p, m, c, h, z, v, o$$

برابر با ۵۰۰۰۰ فرض شده است. سایر پارامترهای مثال در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند.

قطعه	عملیات	M1	M2	M3	M4
۱	۱		۵	۵	
	۲		۱		
	۳				۵
۲	۱	۳		۳	
	۲		۵		۵
	۳			۵	
۳	۱			۵	
	۲	۲			۵
	۳	۵	۵		
$\alpha_m$		۱	۲	۱	۲

جدول (۱): پارامترهای ورودی مثال نمونه اول (زمان)

هزینه های مرتبط	تقاضا		قطعه
	H=2	H=1	
$IP_p$			
۱۰	۰	۳۰	۱
۵	۱۰	۲۸	۲
۵	۲۱	۱۲	۳

جدول (۲): پارامترهای ورودی مثال نمونه اول (تقاضا و هزینه)

پس از خطی سازی و حل مدل با استفاده از نرم افزار لینگو جواب بهینه زیر حاصل شده است، زیرا بدون خطی سازی جواب لینگو به صورت Local خواهد بود و پس از خطی سازی این جواب Global می شود.

موجودی	قطعه
H=1	
۰	۱
۰	۲
۲۱	۳

جدول (۳): میزان نگهداری موجودی پس از حل مثال اول

توالی انجام عملیات نیز در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است، که به عنوان مثال عبارت 1-3 نشان داده شده در شکل نمایانگر عملیات ۱ از قطعه سوم است.

(۹)

$$st_{jvmzh} \geq ft_{jpmch} - (1 - y_{jpvomczh})M$$

$$\forall j, p, m, c, h, z, v, o$$

$$\sum_c X_{jpmch} \leq 1 \quad \forall j, p, m, c, h \quad (10)$$

(۱۱)

$$X_{jpmch}, y_{jpvomczh} \in \{0,1\} \quad \forall j, p, m, c, h, z, v, o \quad (12)$$

$$Q_{jpmch}, st_{jpmch}, ft_{jpmch}, I_{ph} \geq 0 \quad \forall j, p, m, c, h$$

تابع هدف (۱) از ۴ قسمت تشکیل شده است که قسمت اول زمان اتمام تمام کارها، قسمت دوم هزینه عملیاتی ماشین، قسمت سوم هزینه حمل و نقل قطعات و قسمت چهارم هزینه نگهداری موجودی را کمینه می کند. محدودیت (۲) بیانگر برطرف شدن تقاضا در هر دوره را می باشد. محدودیت (۳) تضمین می کند که زمان اتمام تمامی عملیات هر قطعه در هر دوره از زمان اتمام هر یک از عملیات بیشتر باشد. محدودیت (۴) و (۵) نشان می دهد که در صورتی که عملیاتی روی یک ماشین انجام نگردد زمان شروع و پایان آن صفر محاسبه گردد. محدودیت (۶) نحوه محاسبه زمان اتمام یک عملیات را نشان می دهد. محدودیت (۷) بیان می کند زمان شروع یک عملیات از زمان پایان عملیات قبلی بیشتر است. محدودیت های (۸) و (۹) تقدم دو عملیات از قطعات مختلف را که روی یک ماشین قابل انجام هستند را تعیین می کند. محدودیت (۱۰) تضمین می کند که اگر عملیات  $j$  از قطعه  $p$  روی ماشین  $m$  انجام شود، این عمل فقط در یک سلول قابل انجام باشد، به عبارت دیگر یک عملیات روی همان ماشین در سلول دیگر پردازش نگردد. محدودیت های (۱۱) و (۱۲) بر بازه های مجاز متغیرهای تصمیم تأکید می کند.

## ۵- بررسی موردی

در این بخش، جهت بررسی صحت مدل پیشنهادی دو مثال نمونه ارائه و در نهایت توسط الگوریتم شاخه کران در نرم افزار لینگو حل خواهد شد.

### ۵-۱- مثال اول

مسئله نمونه ارائه شده دارای ۴ ماشین، ۲ سلول، ۲ دوره، ۳ قطعه می باشد که قطعات هر کدام دارای ۳ عملیات می باشند که به ترتیب شماره گذاری پردازش می شوند. فاصله ی بین ماشین آلات نیز برابر با ۱۰ و مقادیر  $w1$  و  $w2$  برابر با ۰.۹۵ و ۰.۰۵ و ظرفیت ماشین آلات



### ۵-۲- مثال دوم

مسأله نمونه ارائه شده دارای ۲ ماشین، ۲ سلول، ۲ دوره، ۴ قطعه می باشد که قطعات هر کدام دارای ۲ عملیات می باشند که به ترتیب شماره گذاری پردازش می شوند. فاصله ی بین ماشین آلات نیز برابر با ۱۰ و مقادیر  $w_1$  و  $w_2$  برابر با ۰.۹۵ و ۰.۰۵ و ظرفیت ماشین آلات برابر با ۵۰۰۰۰ فرض شده است. سایر پارامترهای مثال در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده اند.

قطعه	عملیات	M1	M2
۱	۱		۵
	۲	۱	
۲	۱	۳	
	۲		۲
۳	۱	۴	۴
	۲		۵
۴	۱	۱	
	۲	۲	
$\alpha_m$		۱	۲

جدول (۴): پارامترهای ورودی مثال نمونه دوم (زمان)

هزینه های مرتبط	تقاضا		قطعه
	H=2	H=1	
$IP_p$			
۱۰	۰	۳۰	۱
۵	۱۰	۲۸	۲
۵	۲۰	۲۰	۳
۱۰	۱۵	۱۲	۴

جدول (۵): پارامترهای ورودی مثال نمونه دوم (تقاضا و هزینه)

موجودی	قطعه
H=1	
۰	۱
۱۰	۲
۲۰	۳
۰	۴

جدول (۶): میزان نگهداری موجودی پس از حل مثال دوم

### ۶- نتیجه

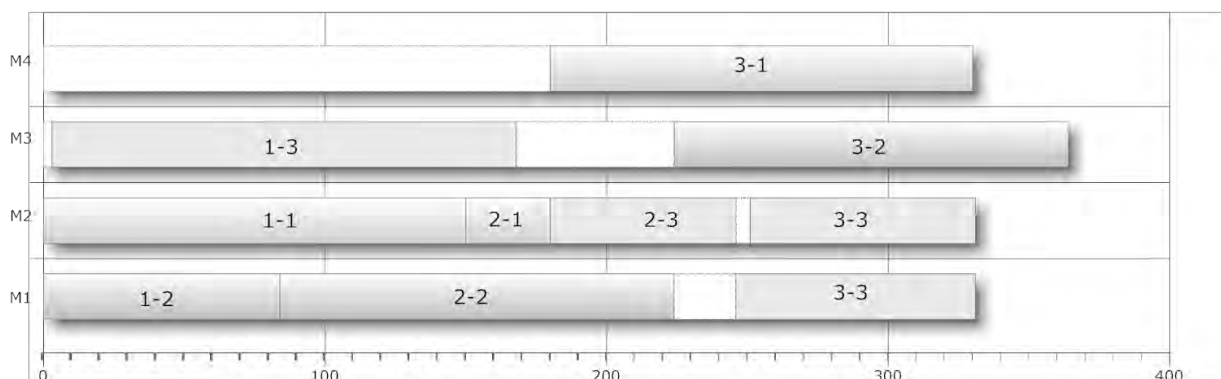
در این مقاله یک مدل برای برنامه ریزی تولید و زمان بندی انجام عملیات به صورت یکپارچه ارائه گردید. تابع هدف مدل مذکور عبارت بود از کمینه کردن هزینه عملیات ماشین، زمان انجام کلیه عملیات، هزینه نگهداری موجودی و هزینه جابه جایی قطعات.

با توجه به تعداد زیاد محدودیت های این مدل پیشنهاد یک روش حل فراابتکاری می تواند مفید باشد، زیرا با افزایش ابعاد مساله زمان حل به شدت افزایش می یابد. یکی از موارد دیگری که می توان در مدل در نظر گرفت تعادل بار کاری بین ماشین ها می باشد.

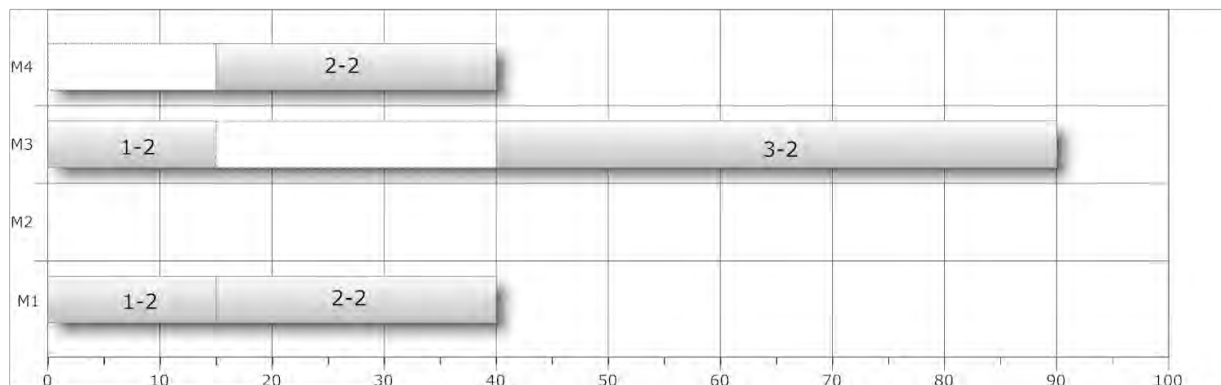
همانطور که در شکل ۱ و ۲ ملاحظه می گردد مدل حداقل ترین زمان بیکاری ماشین آلات را نتیجه داده است. حتی در دوره دوم امکان حذف ماشین ۲ و به کارگیری آن در قسمت دیگری وجود دارد.

عملیات	قطعه	ماشین	دوره	شروع	پایان
۱	۱	۲	۱	۰	۱۵۰
۱	۲	۱	۱	۳۶	۱۵۰
۱	۳	۱	۱	۱۸۰	۲۸۴
۱	۳	۲	۱	۲۲۶	۲۸۲
۱	۴	۱	۲	۰	۱۵
۱	۴	۱	۱	۰	۱۲
۲	۱	۱	۱	۱۵۰	۱۸۰
۲	۲	۲	۱	۱۵۰	۲۲۶
۲	۳	۲	۱	۲۸۴	۴۸۴
۲	۴	۱	۱	۱۲	۳۶
۲	۴	۱	۲	۱۵	۴۵

جدول (۷): زمان بندی انجام عملیات پس از حل مثال دوم



شکل (۱): گانت چارت انجام عملیات مثال اول روی ماشین آلات در دوره H=1



شکل (۲): گانت چارت انجام عملیات مثال اول روی ماشین آلات در دوره H=2

## ۷- مراجع

- Irani SA, Cavalier TM, Cohen PH., "Virtual manufacturing cells: exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem", International Journal of Production Research 1993;31(4):791-810.
- Saadettin ErhanKesen , SanchoyK.Das,Zulal G ungor , "A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)", Computers & Operations Research ,37, 1148-1156,2010
- Saadettin Erhan Kesen,Zulal Gungo, "How important is the batch splitting activity in scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)?", International Journal of Production Research Vol. 49, No. 6, 15 March 2011, 1645-1667
- K.L. Mak, J. Ma and L.X. Cui ., "Integrated Multi-period Production Scheduling and Cell Formation for Virtual Cellular Manufacturing Systems", Engineering Letters, 19:4, EL\_19\_4\_07
- Norhashimah Morad,AMS Zsllzala., "Integrated production planning and scheduling in cellular manufacturing using genetic algorithms" innovations and Applications, 2-4 September 1997, Conference Publication No. 446,O IEE, 1997
- [۷] Kusiak A. , "Intelligent manufacturing systems". New Jersey: Prentice Hall; 1990.
- [۸] Wemmerlow U, Hyer NL. "Research issues in cellular manufacturing". International Journal of Production Research 1987;25(3):413-31.
- [۹] Wemmerlow U, Hyer NL. "Cellular manufacturing in the US industry: a survey of users". International Journal of Production Research 1989;27(9):1511-30.
- [۱۰] J.A. Simpson, R.J. Hocken, J.S. Albus, "The automated manufacturing research facility of the national bureau of standards", Journal of Manufacturing Systems1 (1)-17-32-1982
- [۱۱] McLean CR, Bloom HM, Hopp TH., "The virtual manufacturing cell. In: Proceedings of the 4th IFAC/IFIP conference on information control problems in manufacturing technology". Gaithersburg, MD; 1982. p. 1-9.
- [۱۲] Nomden G, Slomp J, Suresh NC., "Virtual manufacturing cells: a taxonomy of past research and identification of future research issues". International Journal of Flexible Manufacturing System 2006;17:71-92.

[۱۲] R. Tavakkoli-Moghaddam, M.B. Aryanezhad, N. Safaei, A. Azaron, "Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics", Applied Mathematics and Computation 170-761-78-2005.

[۱۳] اصغرپور محمدجواد، نیک بخش جوادیان؛ طراحی سیستم تولید سلولی در شرایط پویا و احتمالی و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۸، شماره ۱، صفحه ۱۱۹-۱۰۷، ۱۳۸۳