

# طرح ریزی و مدلسازی عملیات ماشینکاری CNC با استفاده از

## گراف AND/OR و شبکه‌های پتری فازی

زهرة کثیرالولد<sup>i</sup>؛ محمدرضا جاهدمطلق<sup>ii</sup>؛ شهاب کلانتر<sup>iii</sup>؛ محمد امین شادمانی<sup>iv</sup>

### چکیده

تلاش‌های فراوانی برای دستیابی به سیستم‌های طراحی فرایند هوشمند<sup>1</sup> و افزایش کارایی سیستم‌های CAPP<sup>2</sup> شده است. در این میان نظریه گراف‌ها، شبکه‌های پتری و منطق فازی ابزارهای قدرتمندی هستند که در این مقاله سعی شده با به کارگیری این ابزارها بتوان حالت‌های مختلف امکان‌پذیر، برای انجام یک فرایند را مدلسازی کرد و با اعمال محک‌های مورد توجه طراح فرایند، بهترین مسیر انجام فرایند را به دست آورد. سپس با تبدیل مدل به دست آمده به زبان ماشین یا حالت‌های دیگر قابل پیاده‌سازی بر روی کنترلر ماشین ابزار، بتوان بخش عمده‌ای از روند تولید و گزینش مسیر بهینه انجام فرایند را به صورت خودکار انجام داد. نقطه شروع این پژوهش تحقیقات دنباله‌داری است که از سال‌ها پیش بر روی خودکارسازی عملیات مونتاژ قطعات صنعتی توسط ربات‌ها متمرکز گشته است. در این مقاله نشان خواهیم داد که بسیاری از ایده‌ها و راهکارهای مطرح شده در پژوهش‌های انجام شده با اندکی تغییر مستقیماً قابل کاربرد در حیطه خودکارسازی فرایند طرح‌ریزی عملیات ماشینکاری CNC هستند.

### کلمات کلیدی

طرح‌ریزی<sup>2</sup>، مونتاژ رباتیکی، گراف AND/OR، شبکه‌های پتری فازی، گرافست، ماشین CNC، کنترل‌کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر، کنترل کیفیت

## *Planning and Modeling of CNC Machining Operation Using AND/OR Nets and Fuzzy Petri Nets*

Z. Kasirolvalad; M.R. Jahed M.; S. Kalantar; M.A. Shadmani

### ABSTRACT

Recently, numerous attempts have been made to obtain intelligent process planning systems and to increase the efficiency of computer aided process planning (CAPP) system using new mathematical methods. Graph theories, Petri nets, and fuzzy logic are powerful tools that are employed in this research to model different feasible states for performing a process and to obtain the best process performance path using exertion of the process designer's criteria. Then with the transformation of obtained model to machine language or other states which are capable for applying on tool machine controller can automatically do main part of generation procedure and optimal path selection of process performance. The main idea of this research is the automation of assembly of industrial part using robots. In this paper it will be shown that several ideas and approaches which are proposed in the field of robotic assembly are applicable to the planning procedure modeling with minor modifications.

<sup>i</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ [z\\_kasirolvalad@ee.iust.ac.ir](mailto:z_kasirolvalad@ee.iust.ac.ir)

<sup>ii</sup> استادیار دانشکده کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ [jahedmr@iust.ac.ir](mailto:jahedmr@iust.ac.ir)

<sup>iii</sup> دانشجوی دکتری برق، دانشگاه ملی استرالیا؛ [shahab.kalantar@syseng.anu.edu.au](mailto:shahab.kalantar@syseng.anu.edu.au)

<sup>iv</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه علم و صنعت ایران، [mshadmani@yahoo.com](mailto:mshadmani@yahoo.com)

## KEYWORDS

Planning, Robotic Assembly, AND/OR Graph, Petri Net, Fuzzy Petri Net, Grafcet, CNC Machine, Programmable Logic Controllers, Product Quality.

سیستم‌های واقعه‌گسسته<sup>۱</sup> و سیستم‌های مونتاژ ربائیکی [۹] و دیگر زمینه‌های مهندسی استفاده می‌شوند.

شبکه‌های پتری پایه، در نمایش اطلاعات پیوسته و غیرقطعی ناتوان هستند. متغیرهای فازی قابلیت‌های شبکه پتری را در نمایش و مدلسازی سیستم‌ها افزایش می‌دهند و ضعف شبکه پتری با معرفی شبکه پتری فازی<sup>۱۱</sup> برطرف می‌شود. سیستم‌های مونتاژ ربائیکی از جمله سیستم‌های واقعه‌گسسته هستند که می‌توان آنها را با شبکه پتری مدلسازی کرد [۲]، [۹]. پارامترهای تعیین‌کننده فرایند مونتاژ در این سیستم‌ها، توالی عملیات مونتاژ، تشخیص امکان‌پذیر بودن عملیات، امکان انجام عملیات به صورت موازی، تشخیص انجام صحیح فرایند مونتاژ و غیره هستند. طرح‌ریزی فرایند ماشینکاری را می‌توان به صورت سیستم واقعه‌گسسته در نظر گرفت و آن را با شبکه‌پتری مدلسازی کرد. مطالب مطرح شده در طرح‌ریزی فرایند ماشینکاری، کنترل فرایند ماشینکاری و ایجاد برنامه ماشینکاری بسیار تعیین‌کننده هستند و از سوی دیگر اجرای فرایند ماشینکاری از نظر اشیای مورد نیاز، حالت‌های هندسی اشیای و عمل‌های مختلفی که در فرایند ماشینکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند تا حدودی با عوامل مورد نظر در سیستم مونتاژ ربائیکی متناظر هستند؛ لذا می‌توان از تحقیقاتی که بر روی سیستم‌های مونتاژ ربائیکی انجام شده است استفاده کرد و آنها را برای ماشین‌های CNC به‌کار گرفت. از آنجا که در سیستم‌های مونتاژ ربائیکی و در ماشینکاری CNC همواره با عدم قطعیت و در مواقعی با اطلاعات ناقص روبرو هستیم، لذا شبکه‌های پتری به‌تنهایی برای مدلسازی این نوع سیستم‌ها کافی نیستند و استفاده از منطق فازی ضروری به‌نظر می‌رسد. در این راستا از شبکه‌های پتری فازی؛ که از مزایای شبکه پتری و منطق فازی توأم بهره‌مند است، استفاده می‌شود. از جمله فعالیت‌های علمی و تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: Homem-de-Mello و Sanderson از گراف AND/OR در مدلسازی سیستم‌های مونتاژ ربائیکی استفاده و دنباله‌های عملیاتی امکان‌پذیر را استخراج و با تعریف محک‌های خاص، بهترین دنباله عملیاتی را انتخاب کرده‌اند [۱۰] تا [۱۲]. Cao و Sanderson با تعریف شبکه AND/OR، شبکه پتری و شبکه پتری فازی سیستم‌های صنعتی و ربائیکی را که با عدم قطعیت روبرو هستند مدلسازی کرده‌اند [۹]. Hanna و همکارانش در مدلسازی کیفیت محصولات ماشین CNC از شبکه‌های پتری فازی و کلاس‌های

## ۱- مقدمه

عمده‌ترین عامل افزایش استفاده از سیستم‌های کنترل عددی<sup>۱</sup> تأثیر بسیار شگرف این سیستم‌ها بر روی قابلیت تولید محصولات صنعتی بود. همین عامل باعث شد تا با توجه مراکز تحقیقاتی به این موضوع، سیستم‌های CNC متولد شد و کامپیوتر با سرعتی فراتر از آنچه که تصور می‌شد، نقشی حیاتی در زندگی بشر ایفا کند. CNC باعث شد تا روش‌ها، استراتژی‌ها، کیفیت و قابلیت تکرار تولید محصولات و هزینه‌های تولید دستخوش تغییر و تحول عمده‌ای قرار گیرند که این روند روزبه‌روز با شتاب بیشتری پیش می‌رود [۱]. باعنایت به توانمندی‌هایی که کامپیوتر در اختیار انسان قرار می‌دهد، توجه بسیاری از محققان عرصه ساخت و تولید به استفاده از روش‌های نرم‌افزاری برای افزایش سرعت تولید و کیفیت محصولات و کاهش هزینه‌های تولید جلب شده است و بی‌شک، در دهه‌های اول قرن بیست و یکم، فن‌آوری‌های نرم‌افزاری بیشترین نقش را در ایجاد تحول در سیستم‌های تولیدی و صنعتی ایفا خواهند کرد. امروزه به‌کارگیری روش‌های نوین ریاضی همچون منطق فازی، شبکه‌های عصبی، هندسه فراکتال، نظریه گراف‌ها و هندسه محاسباتی منشأ تحولات فراوانی در کارایی سیستم‌های تولیدی، کاستن از هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت و کمیت محصولات تولیدی شده‌اند. در این میان آنچه که در سال‌های اخیر مدنظر قرار گرفته است، تلاش برای هوشمند کردن نرم‌افزارهای CAD/CAM و طراحی نرم‌افزارهایی است که بتوانند به‌صورت مبتنی بر دانش، مسیر ماشینکاری بهینه، توالی ماشینکاری و کنترل پارامترهای آن را انجام داده و بر ابزار و شرایط آن مدیریت داشته باشند. برای نیل به این هدف روش‌های مدلسازی، گام اول خواهند بود. از سویی دیگر بحث پایش در ماشین‌های CNC مقوله‌ای بسیار پیچیده است که به کارگیری روش‌های مدلسازی در کنار ابزارهای کنترلی، باعث انجام عملیات پایش با هزینه‌هایی بسیار کمتر و قابلیت کنترل بیشتر خواهد بود.

از زمانی که شبکه‌های پتری<sup>۲</sup> را C.A.Petri معرفی کرد [۲] تا [۳] تاکنون پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌های تئوریک و عملی این شبکه‌ها صورت گرفته است. شبکه‌های پتری ابزار قدرتمندی برای نمایش دنباله‌های حالت گسسته<sup>۳</sup> در تولید مسیر<sup>۱</sup> هستند. شبکه‌های پتری به‌طور وسیعی در مدلسازی و تحلیل سیستم‌های صنعتی انعطاف‌پذیر [۱]، [۴] تا [۸]،





ظاهر می‌شود. یک عمل در سیستم نیز می‌تواند به یکی از سه صورت زیر وجود داشته باشد: ۱- مونتاژ ۲- عکس مونتاژ ۳- انتقال حالت داخلی<sup>۱۴</sup>. Sanderson و Homem-de-Mello از گراف AND/OR برای نمایش فرایند مونتاژ بر مبنای خاصیت امکان‌پذیری استفاده کردند [۱۱]. آنها همچنین بر مبنای گراف AND/OR، الگوریتمی برای جستجوی بهترین دنباله پیشنهاد کردند. آنها از دو محک پیشینه‌کردن تعداد دنباله‌های مجزا و کمینه‌کردن زمان اجرای فرایند، بادر نظر گرفتن اجرای موازی دنباله‌ها، بهره بردند [۱۰]، [۱۲].

از آنجا که شبکه‌های پتری برای مدلسازی سیستم‌های واقعه‌گسسته مناسب است، از این شبکه‌ها در طراحی مسیر مونتاژ رباتیکی استفاده شده است. مثال‌های متعددی در مورد استفاده از شبکه‌پتری در مدلسازی فرایندهای مونتاژ رباتیکی وجود دارد که در آن دنباله‌ای از عمل‌ها بر مبنای مدل پتری تولید می‌شوند. با طرح بحث عدم قطعیت و ترکیب متغیرهای فازی با شبکه‌پتری، مسأله مونتاژ، شکل تازه‌ای به خود گرفت. Cao و Sanderson با تعریف جدیدی از شبکه‌های پتری فازی، مونتاژ رباتیکی را از منظر دیگری بررسی کردند، این شبکه شامل سه متغیر فازی است که عبارتند از: ۱- متغیرهای فازی محلی ۲- متغیرهای علامت فازی ۳- متغیرهای فازی فراگیر [۹]. آنها برای نمایش اولیه اشیا و عمل‌های سیستم مونتاژ رباتیکی از نمایش شبکه AND/OR استفاده و سپس با ارایه الگوریتمی این شبکه را به شبکه‌پتری تبدیل کردند. از طرفی برای نمایش عدم قطعیت و همچنین تشخیص خطا و استفاده از حسگرها و تعیین دنباله جبران خطای متناسب با خطا، از شبکه‌های پتری فازی استفاده می‌کنند. در این مقاله، مدل ارایه‌شده در تحقیقات فوق به عنوان مبنای تحقیق در نظر گرفته شده و با اعمال تغییرات مناسب، امکان کاربرد آن در زمینه مدلسازی فرایند ماشینکاری بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که پژوهش‌های اشاره‌شده در فوق تشکیل‌دهنده بخشی کوچک از کل تحقیقاتی است که در زمینه طرح‌ریزی مونتاژ صورت پذیرفته است.

### ۳- نمونه کاوی

تا کنون تحقیقات مختصری در زمینه کنترل عملکرد ماشین‌های CNC با استفاده از شبکه‌های پتری صورت گرفته است [۵] تا [۸] و مشخصاً در زمینه طرح‌ریزی عملیات ماشینکاری CNC و طراحی فرایند فعالیت خاصی انجام نشده است. در این مقاله، هدف ارایه روش و بیان قابلیت‌های شبکه‌های پتری فازی در طرح‌ریزی عملیات ماشینکاری در دستگاه‌های CNC است. منظور از طرح‌ریزی عملیات

ماشینکاری CNC ارائه روش‌هایی برای بهبود بخشیدن پارامترهای مؤثر بر این عملیات همچون کاهش زمان ماشینکاری و افزایش سرعت، افزایش کیفیت سطحی و ابعادی و کاهش خطاهای عملیات است [۱۲] تا [۱۵]. استفاده از گراف‌های AND/OR و شبکه‌های پتری باعث می‌شود طراحان فرایند تولید قطعات پیچیده، قبل از اجرای فرایند، در بین روش‌های مختلف، ترتیب عملیات بهینه را انتخاب کرده و با دید بهتری حالت‌های امکان‌پذیر را برای دستیابی به مسیر بهینه انجام فرایند مشخص کنند. این امر از یک سو باعث کاهش هزینه‌ها و آسیب‌های ناشی از آزمون روش‌ها و حالت‌های مختلف انجام فرایند و از سوی دیگر انجام فرایند در حالت بهینه خواهد شد.

برای روشن‌تر شدن موضوع و پیاده‌سازی مراحل مختلف مقاله، از یک قطعه نمونه کاربردی مطابق شکل (۲) استفاده می‌شود [۱۵]. در طراحی فرایند تولید برای شروع کار، طراح قطعه لیستی از کلیه عمل‌های ماشینکاری تهیه کرده و محدودیت‌های ناشی از ترتیب عمل‌ها، ابزارهای موجود، نوع و شرایط قیدوبند، وضعیت و قابلیت‌های ماشین ابزار مورد استفاده و دقت‌های مورد نیاز را در نظر می‌گیرد. در قطعه نمونه به طور کلی دو عمل سوراخکاری و دو عمل براده‌برداری مدنظر قرار گرفته است که برای ساده‌تر شدن شکل‌ها و محاسبات، جزئیات عمل‌ها و پارامترهای لازم تا آنجا که به کلیت بحث و قابلیت‌های روش ارائه شده لطمه نزنند، در نظر گرفته نشده است.

از آنجا که در حین عملیات ماشینکاری جابجایی قطعه مثلاً از یک قیدوبند به قیدوبند دیگر باعث بروز خطا و کاهش دقت می‌شود، بهتر است که شرایطی مهیا شود که قطعه از ابتدا تا انتهای عملیات ماشینکاری توسط یک قیدوبند، موقعیت‌دهی شود. بدین علت در مورد ماشینکاری قطعه نمونه فرض بر این است که از ماشین فرز دارای دو کله‌گی عمودی و افقی استفاده می‌شود. باتوجه به استفاده دوکله‌گی عمودی و افقی، اگر قطعه نمونه شکل (۲) را در نظر بگیریم و در این وضعیت روی میز کار ماشین ابزار قرارگیرد، سوراخکاری شماره ۱ فقط با کله‌گی عمودی و سوراخکاری شماره ۲ فقط با کله‌گی افقی امکان‌پذیر خواهد بود. از طرفی با فرض این‌که قطعه کار در مدت ماشینکاری نباید از قیدوبند جدا شود و قیدوبند نیز ثابت می‌باشد، لذا براده‌برداری قسمت راست شکل (۲) فقط با کله‌گی عمودی امکان‌پذیر است؛ ولی براده‌برداری قسمت چپ شکل (۱) از دو طریق کله‌گی عمودی و افقی قابل انجام است. کلیه عملیات شکل (۲) در جدول (۱) مشخص شده‌اند:

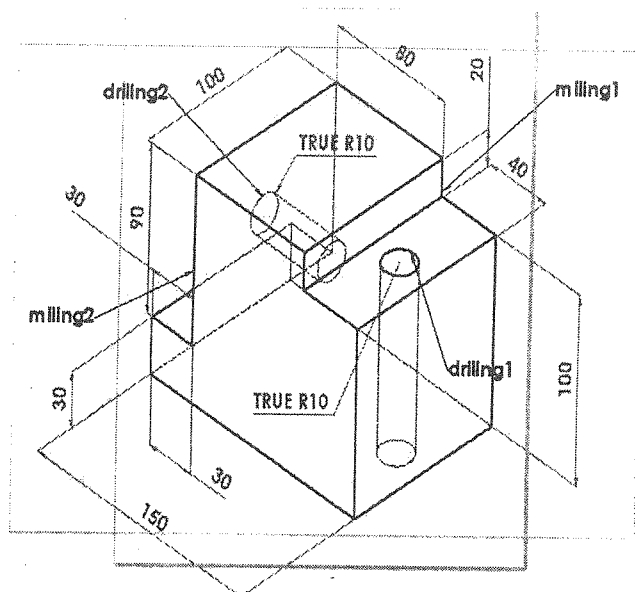
جدول (۱): کلیه عملیات نمون کاوی

عمل	شرح عمل
$R_1$	سوراخکاری ۱
$R_2$	سوراخکاری ۲
$R_4$	براده برداری ۲ با کله گی عمودی
$R_3$	براده برداری ۱
$R_4$	براده برداری ۲ با کله گی افقی

### ۵- گراف AND/OR و شبکه AND/OR

گراف ارتباط، کلیه عملها و روابط بین آنها را به فرم فشرده نمایش می‌دهد. طرح ریزی عملیات شامل بررسی روی طرح‌های متفاوت عملیات و اعمال معیارهای تعیین شده توسط طراح بر روی حالت‌های مختلف امکان‌پذیر است تا از میان طرح‌ها، طرحی که نسبت به معیارها از بقیه جامع‌تر است انتخاب شود. منظور از طرح‌های عملیات، رشته‌های منظمی از عملها است که با اعمال بر روی یک قطعه خام شروع و پس از اجرای کل رشته به محصول نهایی ختم می‌شوند. برای نمایش فشرده این طرح‌ها از نمایش گراف AND/OR استفاده می‌شود. گراف AND/OR گراف بسیار مناسبی برای نمایش کلیه رشته‌های امکان‌پذیر یک فرایند است. منظور از رشته عملیاتی امکان‌پذیر، رشته‌ای از عملهاست که از یک قطعه خام شروع و با مدنظر قرار دادن محدودیت‌های سخت‌افزاری و ارضا کردن معیارهای نرم‌افزاری حتماً به قطعه نهایی یا محصول ختم شود. هرگره در گراف AND/OR مبین قطعه‌ای است که یک یا چند عمل روی آن اجرا شده است و هر hyperarc یا AND-arc در این گراف مطابق با انجام یک عمل امکان‌پذیر است. به این معنی که هر hyperarc دو گره به عنوان ورودی و یک گره به عنوان خروجی دارد که گره خروجی نشان‌دهنده ترتیب اجرای دو عمل ورودی است. گراف AND/OR به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]، [۱۱]:

گراف AND/OR یک مجموعه دوتایی شامل  $(V, H)$  است که  $V$  مجموعه‌ای محدود از گره‌ها و  $H$  یک زیرمجموعه از ضرب کارتزین  $V \times (\Pi(V) - \{0\})$  است و عناصر آن را AND-arc می‌نامند  $\Pi(V)$  مجموعه‌ای از تمام زیرمجموعه‌های  $V$  می‌باشد. هر AND-arc مجموعه‌ای دوتایی شامل  $(\lambda, \Lambda)$  است که  $\lambda$  مجموعه دو گره ابتدایی و  $\Lambda$  گره انتهایی است.



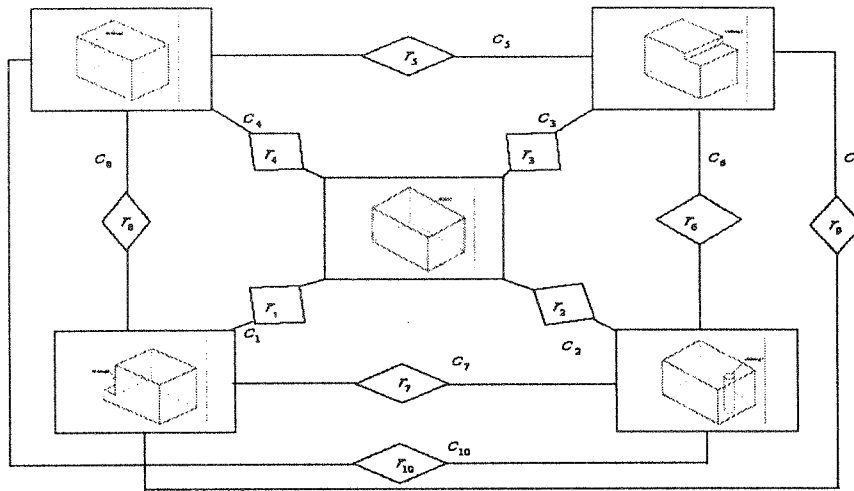
شکل (۲): نمون کاوی

### ع- گراف ارتباط

گراف ارتباط یک گراف بدون جهت ساده است که به صورت  $\langle P, C, R \rangle$  تعریف می‌شود و عبارتند از [۱۶]:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  - مجموعه‌ای از گره‌ها
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$  - مجموعه‌ای از اتصالات
- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_L\}$  - مجموعه‌ای از روابط

به طور کلی گراف ارتباط، کلیه عملها و پارامترهای مورد استفاده در سیستم را به فرم فشرده شده نمایش می‌دهد. در طرح ریزی عملیات، هرگره مبین یک عمل ماشینکاری است و بین هر دو گره درگراف یک اتصال  $c_i$  به همراه رابطه بین دوگره مذکور وجود دارد. تعداد پارامترهای رابطه  $r$  به مشخصات سیستم و نوع عمل ماشینکاری بستگی دارد. شکل (۳) گراف ارتباط نمون کاوی را نشان می‌دهد. در مرکز گراف قطعه خام قرار می‌گیرد و در اطراف آن هر یک از عملها به صورت مجزا قرار می‌گیرند.



شکل (۳): گراف ارتباط نمونه‌کاوی

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$  مجموعه‌ای از حالات

$$A \subseteq \Gamma(S, \Pi(S) - (\{0\} \cup \bigcup_{i=1}^r \{s_i\})) \quad (1)$$

$$N \subseteq \Gamma(S, S) \quad , A \cap N = 0$$

در این روابط  $\Pi(S)$  مجموعه‌ای از تمام زیرمجموعه‌های  $S$  بوده و تابع  $\Gamma$  عبارت است از:

$$\Sigma_1 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad , \Sigma_2 = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \quad (2)$$

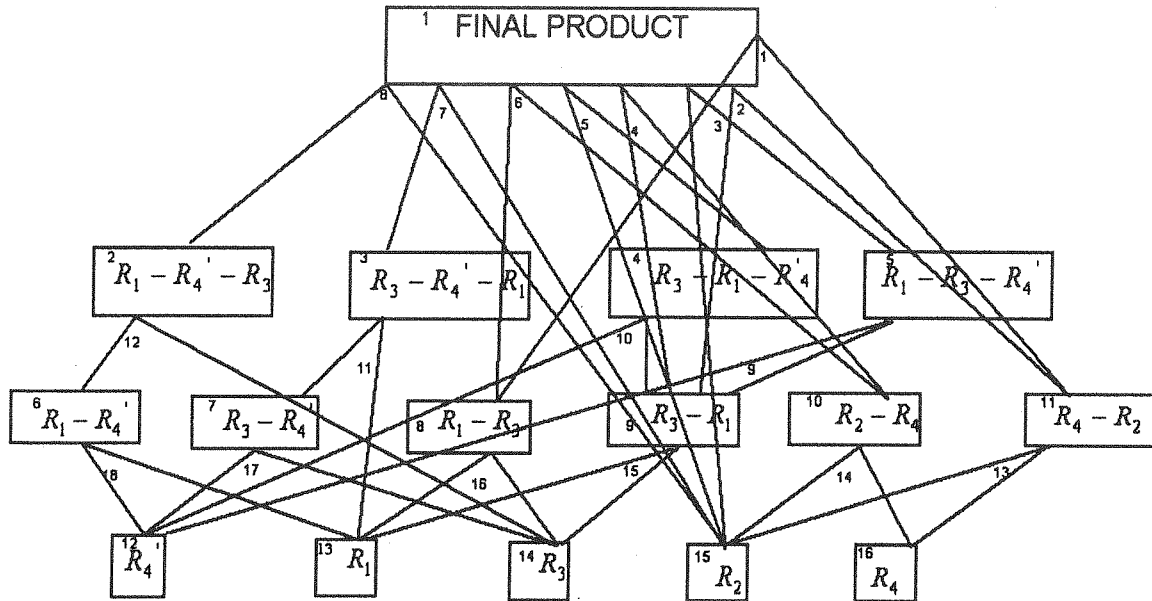
$$\Gamma(\Sigma_1, \Sigma_2) = \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j=1}^n \{\{a_i, b_j\}\}$$

شبکه AND/OR، عناصر  $S$ ، گره، عناصر  $A$ ، AND-arc و عناصر  $N$ ، IST-arc نامیده می‌شوند و این arcها بدون جهت هستند. گره‌ها، اشیای ساده یا مرکب (شامل چند شیء ساده یا موتاژ) را نمایش می‌دهند و AND-arcها تجزیه و یا ترکیب اشیا و IST-arcها انتقال حالت داخلی امکان‌پذیر را به نمایش می‌گذارند.

شبکه AND/OR عملیات ماشینکاری نمونه‌کاوی در شکل (۵) رسم و هریک از عناصر در جدول (۲) تعریف شده‌اند. جستجوی رشته‌های امکان‌پذیر در شبکه AND/OR دو حالت دارد: یکی جستجوی کلیه رشته‌های عملیاتی که از حالت اولیه شروع و به حالت نهایی ختم می‌شوند و دوم جستجوی رشته بهینه تحت معیارهای خاص می‌باشد. چندین تفاوت بین گراف OR و شبکه AND/OR وجود دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- در گراف AND/OR یک گره شروع و چند گره نهایی وجود دارد در حالی که هر گره در شبکه AND/OR می‌تواند یک زیرحالت از حالت اولیه و یا نهایی را نمایش دهد. ۲- در گراف AND/OR کمانی وجود ندارد که مطابق با IST-arc در شبکه AND/OR باشد. در حقیقت، نمایش گراف AND/OR را می‌توان یک حالت خاص از شبکه AND/OR در نظر گرفت.

با توجه به لیست عمل‌های ذکر شده در انتهای بخش ۳ و به‌کاربردن دو کله‌گی برای عملیات ماشینکاری، اجرای موازی عمل‌ها در دودسته کله‌گی عمودی و افقی از نظر کاهش زمان اجرای ماشینکاری امری بدیهی و قابل قبول است؛ اما اجرای موازی دو عمل  $R_2$  و  $R_4$  به علت احتمال برخورد ابزارها با یکدیگر از بین حالت‌های ممکن حذف می‌شود و از بین دو عمل  $R_4$  و  $R_4'$  فقط یکی انجام می‌شود. این موارد به‌عنوان محدودیت‌های سخت‌افزاری، باید در انتخاب رشته‌های عملیاتی امکان‌پذیر مورد توجه قرار گیرند. به‌طور مثال، گراف AND/OR نمونه‌کاوی در شکل (۴) رسم شده است. البته از آنجا که رسم کلیه رشته‌های عملیاتی؛ که به صورت ترتیبی و بدون اجرای موازی انجام می‌شوند و رشته‌های عملیاتی که شامل اجرای موازی هستند، امکان‌پذیر نیست، فقط رشته‌های عملیاتی که شامل عمل‌های موازی هستند در شکل (۴) رسم شده است. لازم به ذکر است که گره‌های انتهایی؛ که خروجی AND-arc هستند، از چپ به راست ترتیب اجرای عملیات را نمایش می‌دهند. در گراف شکل (۴)، فقط ۸ رشته عملیاتی امکان‌پذیر مشاهده می‌شود. به هر یک از این طرح‌ها؛ که از گره‌های شامل یک عمل شروع و به گره انتهایی یا محصول ختم می‌شود یک درخت گفته می‌شود. گسترش گراف AND/OR از ساختار درخت به ساختار شبکه، شبکه AND/OR نامیده می‌شود. شبکه AND/OR نمایش عمومی‌تری از ترکیب‌های هندسی اشیا و عملیات فیزیکی را در برمی‌گیرد و به عنوان اسلوبی برای نمایش و استدلال در مورد محدودیت‌های هندسی در سیستم‌های رباتیک در حوزه صنعتی و غیر صنعتی معرفی می‌شود. شبکه AND/OR به صورت زیر تعریف می‌شود:

شبکه AND/OR مجموعه سه‌تایی  $(S, A, N)$  است که عناصر آن عبارتند از [۹]:



شکل (۲): گراف AND/OR نمونه کاوی

$$ds(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_k = (n_i) \text{ or } t_k = (n \ h \ (n_1) \ (n_2)) \\ ds(t_1) \cdot ds(t_2) \cdot \frac{(r(t_1) + r(t_2))!}{r(t_1)! \cdot r(t_2)!} & \text{if } t_k = (n \ h \ (t_1) \ (t_2)) \end{cases} \quad (۲)$$

در این رابطه،  $ds(t)$  تعداد رشته‌های مجزای درخت  $t$ ،  $r(t)$  تعداد عملیاتی است که در گره  $n$  انجام می‌شود منهای ۱ و  $t_1, t_2$  زیردرخت‌های درخت اصلی هستند.

۲- کمینه کردن زمان انجام عملیات با استفاده از امکان اجرای موازی هدف‌ها

در اغلب موارد، کوتاه‌ترین درخت در کوتاه‌ترین زمان اجرا می‌شود و یا به عبارت دیگر عمق درخت، معیار دیگری برای ارزیابی کیفیت طرح است. زمانی که عملیات به صورت موازی اجرا می‌شود، متناسب با آن زمان ماشینکاری نیز کاهش می‌یابد. برای محاسبه عمق یک درخت از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۰]:

$$pe(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t = (n_i) \\ 1 + \max(pe(t_1), pe(t_2)) & \text{if } t_k = (n \ h \ (t_1) \ (t_2)) \end{cases} \quad (۴)$$

$pe(t)$  عمق درخت اصلی  $t$  را نشان می‌دهد. عمق کمتر نشان دهنده بیشتر بودن تعداد عملیات موازی است و این خود باعث کاهش زمان اجرای عملیات ماشینکاری می‌شود. بنابراین از میان درخت‌هایی که  $ds(t)$  آنها بیشینه است، درختی انتخاب می‌شود که  $pe(t)$  آن کمینه باشد.

## ۶- محک‌ها و درخت بهینه

همان طور که اشاره شد، هر یک از طرح‌های انجام فرایند، به وسیله یک درخت نمایش داده می‌شود. هر درخت در گراف AND/OR به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\langle \text{زیردرخت} \rangle = \langle \text{زیردرخت} \rangle \langle \text{AND-arc} \rangle \langle \text{گره} \rangle \langle \text{درخت} \rangle$$

$$\langle \text{گره} \rangle = n \quad \text{و} \quad \langle \text{AND-arc} \rangle = h \quad \text{و} \quad \langle \text{درخت} \rangle = t$$

به عنوان مثال، در شکل (۴) ۸ درخت اصلی و تعدادی زیردرخت وجود دارد که دو درخت اصلی در شکل (۶) رسم شده است. ۸ درخت گراف AND/OR شکل (۴) قادر به تولید محصول از قطعه خام هستند، اما حالت‌هایی حایز اهمیت هستند که شرایط فرایند مانند به حداقل رساندن زمان ماشینکاری، حداقل کردن امکان بروز خطا و همچنین بالابردن کیفیت محصول را نیز بهینه سازند. برای رسیدن به این اهداف می‌توان محک‌هایی را در نظر گرفت که با اعمال آنها بر روی درخت‌ها بتوان درخت بهینه را به منظور ارضای محک‌های موردنظر انتخاب و برای تولید محصول از این طرح استفاده کرد. محک‌هایی که در این مقاله در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از:

۱- بیشینه کردن تعداد رشته‌های مجزا در گراف

### AND/OR

تعداد رشته‌های مجزا در یک درخت، معیار مناسبی برای ارزیابی کیفیت و چگونگی طرح است. برای محاسبه تعداد رشته‌های مجزا در هر یک از درخت‌های گراف AND/OR از رابطه ریاضی زیر استفاده می‌شود [۱۰]:

۳- اجرای عملیات سوراخکاری قبل از عملیات فرزکاری برای

حفظ صافی سطح قطعه

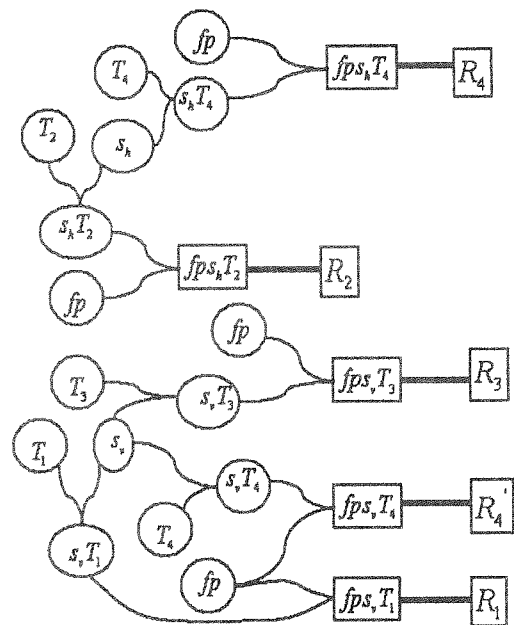
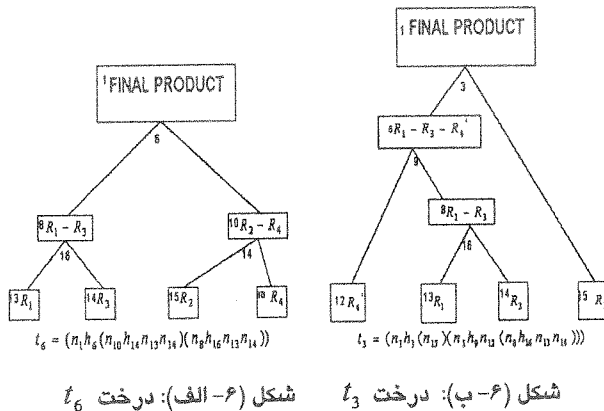
در این قسمت به صافی سطح قطعه تولیدی توجه می‌شود. در عمل برای حفظ صافی سطح، قاعده پرداختکاری بعد از خشکناری را مد نظر قرار می‌دهند. اما با توجه به این‌که در مورد قطعه نمونه عملیات پرداختکاری به منظور ساده و قابل‌فهم‌شدن موضوع در نظر گرفته نشده‌است، لازم است برای آنکه قطعه کار از صافی سطح خوبی برخوردار شود عمل‌های سوراخکاری هر قسمت قبل از براده‌برداری آن قسمت انجام‌گیرد. در کلی‌ترین حالت می‌توان برای عملیات یک رابطه ترتیبی جزئی مانند  $<$  تعریف کرد. اگر در گراف  $N_o^i$  نشانگر عمل مرتبط با گره  $i$  باشند، آنگاه باید رابطه ریاضی زیر در کل گراف برقرار باشد:

$$N_i^1 \setminus N_i^2 \Rightarrow N_o^1 \setminus N_o^2 \quad (5)$$

به عنوان مثال در مورد گراف AND/OR شکل (۴) در هر گره باید ترتیب‌های جزئی  $R_2 < R_4$  یا  $R_2 < R_4$  و  $R_1 < R_3$  در هر گره گراف برقرار باشند. با توجه به اهمیت هر یک از محک‌ها از نظر طراح، ترتیب اعمال محک‌ها بر روی گراف AND/OR متفاوت است. در این مقاله، به ترتیب محک اول و دوم و سوم اعمال‌شد و درخت  $t_6$  به عنوان درخت بهینه انتخاب شد که در شکل (۶-الف) رسم شده‌است.

جدول (۲): تعریف عناصر شبکه AND/OR شکل (۵)

عناصر	شرح
$T_1, T_2, T_3, T_4$	ابزارهای مورد نیاز که به ترتیب برای اجرای عملیات $R_4 - R_4', R_3, R_2, R_1$ استفاده می‌شوند.
$fp$	قطعه خام که درون قیدوبند قرار دارد.
$S_v, S_h$	به ترتیب، کله‌گی افقی و عمودی را نشان می‌دهند.
$S_v T_1, S_v T_3, S_v T_4$	به ترتیب، قراردادن ابزارهای $T_4, T_3, T_1$ را در کله‌گی عمودی نشان می‌دهند.
$S_h T_4, S_h T_2$	به ترتیب، قراردادن ابزارهای $T_4, T_2$ را در کله‌گی افقی نشان می‌دهند.
$fp S_v T_1$	قبل از شروع عملیات $R_1$ کله‌گی عمودی با ابزار $T_1$ در فاصله ۲mm قطعه در نقطه شروع عملیات قرار دارد.
$fp S_v T_3$	قبل از شروع عملیات $R_3$ کله‌گی عمودی با ابزار $T_3$ در فاصله ۲mm قطعه در نقطه شروع عملیات قرار دارد.
$fp S_v T_4$ $fp S_h T_4$	قبل از شروع عملیات $R_4$ (کله‌گی عمودی/افقی) با ابزار $T_4$ در فاصله ۲mm قطعه در نقطه شروع عملیات قرار دارد.
$fp S_h T_2$	قبل از شروع عملیات $R_2$ کله‌گی عمودی با ابزار $T_2$ در فاصله ۲mm قطعه در نقطه شروع عملیات قرار دارد.
$R_1, R_2, R_3, R_4, R_4'$	به ترتیب عملیات‌های $R_4', R_4, R_3, R_2, R_1$ را نشان می‌دهند.



شکل (۵): شبکه AND/OR نمونه‌کاوی

۷- شبکه پتری

شبکه پتری در مدلسازی و آنالیز سیستم‌های واقعه گسسته پیچیده کارایی و انعطاف‌پذیری زیادی دارد. عناصر اصلی شبکه پتری، مکان‌ها و انتقال‌ها هستند. شبکه پتری، گرافی است که در آن مکان‌ها از طریق انتقال‌ها به یکدیگر متصل هستند. برای اجرای شبکه پتری از عنصری به نام توکن استفاده می‌شود و این‌گونه شبکه را شبکه پتری علامت‌دار می‌نامند. در اجرای شبکه، یک انتقال زمانی فعال می‌شود که هر یک از مکان‌های ورودی آن حداقل یک توکن داشته باشند. در فرایند اجرای شبکه، انتقال‌های فعال در اصطلاح شلیک می‌شوند و در اثر این عمل از تعداد توکن‌های مکان‌های ورودی کاسته و به



تعداد توکن‌های مکان‌های خروجی افزوده می‌شود و علامت شبکه تغییر می‌یابد.

به طور کلی، شبکه پتری علامت‌دار را با ساختار زیر نمایش می‌دهند [۹]، [۲]:

ساختار شبکه پتری علامت‌دار  $N = (P, T, \alpha, \beta, \mu)$ ،  $N$  مجموعه پنج‌تایی است:

$$- \text{مجموعه محدود مکان‌ها} \\ P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

$$- \text{مجموعه محدود انتقال‌ها} \\ T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$$

$\alpha, \beta$  - مجموعه‌هایی از کمان‌های جهت دار و  $\mu$  بردار علامت شبکه است که در هر زمان تعداد توکن‌های موجود در هر مکان را نشان می‌دهد. در این مجموعه روابط زیر برقرار است:

$$P \cap T = \emptyset, \alpha \subseteq \{P \times T\}, \beta \subseteq \{T \times P\}$$

یکی از روش‌های به دست آوردن شبکه پتری یک سیستم، استفاده از شبکه AND/OR آن سیستم است. با الگوریتم ارایه شده در [۹] می‌توان شبکه پتری علامت‌دار را از شبکه AND/OR به دست آورد. در این الگوریتم، هر گره در شبکه AND/OR به یک مکان در شبکه پتری نگاشته می‌شود و برای هر AND-arc دو انتقال در نظر گرفته می‌شود که مکان‌های ورودی به انتقال اول، دو گره ورودی AND-arc و مکان خروجی آن گره خروجی AND-arc است؛ ولی انتقال دوم معکوس این حالت است. برای هر IST-arc نیز دو انتقال در نظر گرفته می‌شود که مکان ورودی انتقال اول، مکان خروجی انتقال دوم و بالعکس است. با استفاده از این مطالب، شبکه پتری نمون‌کاوی در شکل (۷) رسم شده است. در این شبکه پتری دنباله‌های شلیک انتقال بسیاری وجود دارد که از حالت اولیه سیستم شروع و به حالت نهایی یا محصول ختم می‌شوند که تعدادی از آنها در جدول (۳) ذکر شده است؛ و هر دو ردیف یک دنباله، به طور موازی و هم‌زمان قابل اجرا هستند. دنباله ۲ مبتنی بر معیارهای در نظر گرفته شده و مجری درخت (۶-الف) است.

برای آنکه شبکه پتری ملزم به اجرای دنباله ۲ شود باید در شبکه پتری شکل (۷) تغییراتی اعمال و برای حس کردن خطاها و تصمیم‌گیری در صورت بروز خطا تکمیل شود. در بخش بعد با معرفی عملیات حسگری و سیکل‌های جبران خطا، شبکه پتری؛ که شامل اطلاعات جزئی نیز می‌باشد و از طرفی دنباله ۲ را اجرا کند، ارایه می‌شود. هر یک از مکان‌ها و انتقال‌های شبکه پتری شکل (۷) در جدول (۴) تعریف شده‌اند.

جدول (۳): چهار دنباله در شکل (۷)

دنباله ۱	$t_{13}t_{15}t_{17}t_{18}t_{16}t_{14}t_{25}t_{27}t_{29}t_{30}t_{28}t_{26}t_1t_3t_5t_6t_4t_2$
دنباله ۲	$t_{19}t_{21}t_{23}t_{24}t_{22}t_{20}t_7t_9t_{11}t_{12}t_{10}t_8$
دنباله ۳	$t_{13}t_{15}t_{17}t_{18}t_{16}t_{14}t_{13}t_3t_5t_6t_4t_2$
دنباله ۴	$t_{13}t_3t_5t_6t_4t_2t_{13}t_{15}t_{17}t_{18}t_{16}t_{14}$
دنباله ۵	$t_7t_9t_{11}t_{12}t_{10}t_8t_{19}t_{21}t_{23}t_{24}t_{22}t_{20}$
دنباله ۶	$t_1t_3t_5t_6t_4t_2t_{13}t_{15}t_{17}t_{18}t_{16}t_{14}t_{25}t_{27}t_{29}t_{30}t_{28}t_{26}$
دنباله ۷	$t_7t_9t_{11}t_{12}t_{10}t_8$

## ۸- شبکه‌های پتری فازی

مدلسازی سیستم‌هایی که در آنها اطلاعات ناقص، تقریبی و یا عدم قطعیت دارند با شبکه‌های پتری پایه امکان‌پذیر نیستند. برای حل این مسأله با استفاده از منطق فازی، شبکه‌های پتری فازی؛ که به نوعی تعمیم یافته شبکه‌های پتری هستند، معرفی می‌شود. استراتژی استدلال در شبکه‌های پتری فازی مبتنی بر منطق فازی است و شلیک انتقال‌ها با عملیات روی توابع عضویت در یک مجموعه جهانی خاص معادل است. تفاوت‌های اصلی بین شبکه پتری و شبکه پتری فازی، مقادیر فازی مربوط به مکان‌ها و توکن‌ها و قوانین استدلالی حاکم بر شلیک انتقال‌هاست.

شبکه پتری فازی FPN یک مجموعه هفت‌تایی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$FPN = (P, T, Q_i, \alpha, \beta, m_f, \mu_f) \quad (۴)$$

- (۱)  $P$  مجموعه محدود مکان‌ها
- (۲)  $T$  مجموعه محدود انتقال‌ها
- (۳)  $Q_i$  مجموعه محدود از توکن‌های حالت
- (۴)  $\alpha$  تابع ورودی و مجموعه‌ای از کمان‌های جهت‌دار است که از مکان‌ها به انتقال‌ها رسم شده‌اند.  $\alpha \subseteq \{P \times T\}$
- (۵)  $\beta$  تابع خروجی و مجموعه‌ای از کمان‌های جهت‌دار است که از انتقال‌ها به مکان‌ها رسم شده‌اند.  $\beta \subseteq \{T \times P\}$
- (۶)  $m_f$  تابعی است که به مکان  $p_i$  مقدار دوتایی  $(\rho, \ell)$  را اختصاص می‌دهد که در آن  $\rho$  متغیر فازی محلی و  $\ell$  متغیر علامت فازی است.

$$m_f : P \rightarrow \{(\rho, \ell)\}, m_f(p_i) = (\rho(p_i), \ell(p_i))$$

این مکان‌ها معرف قراردادن ابزارها در فاصله ۲mm از نقطه شروع عمل‌های مربوطه بر روی قطعه هستند.	$P_{14}, P_{10}, P_5$ $P_{21}, P_{18}$
به ترتیب، معرف اجرای عمل‌های $R_4, R_3, R_2, R_1$ هستند.	$P_{15}, P_{11}, P_6$ $P_{22}, P_{19}$
به ترتیب، عمل قراردادن ابزارهای $T_1, T_2, T_3$ و $T_4$ در کله‌گی عمودی، افقی، عمودی، افقی و عمودی هستند.	$t_{13}, t_7, t_1$ $t_{25}, t_{19}$
اجرای عملیات حرکت کله‌گی و قراردادن ابزار در فاصله ۲mm نقطه شروع عملیات‌ها.	$t_{15}, t_9, t_3$ $t_{27}, t_{21}$
به ترتیب، معرف شروع عمل‌های $R_4, R_3, R_2, R_1$ هستند.	$t_{17}, t_{11}, t_5$ $t_{29}, t_{23}$
به ترتیب، معرف خاتمه عمل‌های $R_4, R_3, R_2, R_1$ و برگشت کله‌گی به فاصله ۲mm نقطه شروع عمل‌های مربوطه هستند.	$t_{18}, t_{12}, t_6$ $t_{30}, t_{24}$
باعث حرکت کله‌گی و فاصله گرفتن از قطعه.	$t_{16}, t_{10}, t_4$ $t_{28}, t_{22}$
به ترتیب، معرف عملیات جداکردن ابزار $T_1, T_2, T_3, T_4$ از کله‌گی عمودی، افقی، عمودی، افقی و عمودی هستند.	$t_{14}, t_8, t_2$ $t_{26}, t_{20}$

در این کاربرد از شبکه‌های پتری فازی نیازی به استفاده از متغیرهای فازی فراگیر نیست و متغیرهای فازی محلی و متغیرهای علامت فازی برای مدلسازی کافی هستند. یکی از کاربردهای شبکه‌های پتری فازی در مدلسازی سیکل جبران خطاهایی است که از طریق اطلاعات سنسورها در حین اجرای عملیات به دست می‌آیند. این اطلاعات قبل از اجرای عملیات شناخته شده نیستند و به صورت برخط حاصل می‌شوند. برای نمایش عملیات حسگری از انتقال حسگر استفاده می‌شود. وظیفه این انتقال بررسی اطلاعات مکان ورودی و تعیین عملیات بعدی با استفاده از این اطلاعات است. برای مدلسازی عملیات حسگری از انتقال طردمقابل<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود.

انتقال  $t_i$  را انتقال طردمقابل گویند؛ در صورتی که روابط زیر برقرار باشند: اگر  $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_s}$  مکان خروجی انتقال  $t_i$  باشند، بعد از شلیک شدن  $t_i$  روابط زیر برقرار باشند:

$$D \neq 0, D' \neq 0, D \cap D' = 0$$

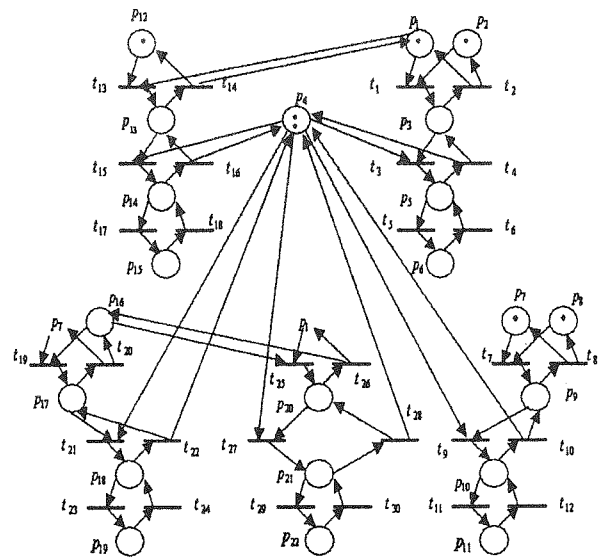
$$D \cup D' = \bigcup_{j=1}^s \{p_{i_j}\}$$

$$\Delta(\ell(p_{i_j})) = 1 \text{ or } \Delta(\ell(p_{i_j})) = 0, 1 \leq j \leq s \quad (7)$$

$$\text{and } D = \bigcup_j \{p_{i_j} : \Delta(\ell(p_{i_j})) = 1\},$$

$$D' = \bigcup_j \{p_{i_j} : \Delta(\ell(p_{i_j})) = 0\}$$

استدلال فازی یک انتقال حسگر طرد متقابل در شکل (۸) نشان داده شده است و به صورت زیر بیان می‌شود: مکان ورودی به انتقال حسگر دارای یک توکن و متغیر فازی محلی



شکل (۷): شبکه پتری نمونه کاوی ۱

(۷)  $\mu_f$  تابع متحد<sup>۱۰</sup> و نگاشت از انتقال‌ها به توابع استدلالی مربوطه است و تابع استدلالی  $f_i$  متغیرهای مربوط به مکان‌های ورودی و مجموعه‌ای از توکن‌ها را به متغیرهای مربوط به مکان‌های خروجی و مجموعه دیگری از توکن‌ها می‌نگارد.

$$\mu_f : T \rightarrow \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$$

در این تعریف از دو نوع متغیر فازی استفاده شده است:

- متغیر فازی محلی  $\rho$ ، که به یک مکان متصل می‌شود و مقدار آن بر عدم قطعیت متغیر یا شیء محلی که به آن مکان نسبت داده شده است، دلالت دارد و با استفاده از یک تابع توزیع عضویت  $n$  بعدی (با این فرض که شیء  $n$  بعدی است) نشان داده می‌شود.

- متغیر علامت فازی  $\ell$ ، به یک مکان متصل می‌شود و یک تابع توزیع عضویت تک‌بعدی است که بر عدم قطعیت وجود توکن در آن مکان دلالت می‌کند.

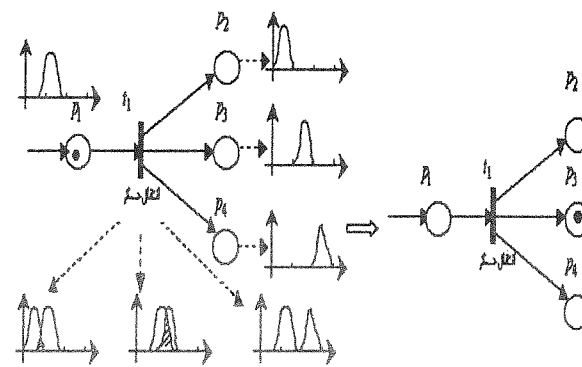
لازم بذکر است که [۹] در تعریف شبکه‌های پتری فازی از متغیر فازی دیگری به نام متغیر فازی فراگیر استفاده کرده است.

جدول ۴: تعریف مکان‌ها و انتقال‌های شکل (۷)

مکان و انتقال	شرح
$P_4, P_7, P_1$	به ترتیب، معرف در دسترس بودن کله‌گی عمودی و افقی و قطعه موجود در قیدبند است.
$P_8, P_2$ $P_{16}, P_{12}$	به ترتیب، معرف در دسترس بودن ابزار $T_4, T_3, T_2, T_1$ است.
$P_{13}, P_9, P_3$ $P_{20}, P_{17}$	به ترتیب، معرف قراردادن ابزارهای $T_1, T_2, T_3$ و $T_4$ در کله‌گی عمودی، افقی، عمودی، افقی و عمودی است.

آن  $p_i$  است و هر یک از مکان‌های خروجی یک خروجی طرف‌متقابل با متغیر فازی محلی  $p_j$  و  $1 \leq j \leq s$  دارند. مقدار  $p_i$  عامل اصلی در تعیین مکانی است که توکن بعد از شلیک شدن انتقال حسگر در آن جای می‌گیرد. تابع استدلال شامل  $s$  مرحله است که در هر مرحله متغیر فازی محلی مکان ورودی با متغیر فازی محلی  $Z$  امین مکان خروجی تقاطع داده می‌شود. آن مکان خروجی که متغیر فازی آن بیشترین هم‌پوشانی را با متغیر فازی محلی مکان ورودی داشته باشد، مکانی است که بعد از شلیک انتقال حسگر یک توکن در آن جای می‌گیرد.

در عملیات ماشینکاری CNC و بخصوص در مورد نمون‌کاری؛ که در بخش‌های قبلی بررسی شد، حالت‌هایی پیش می‌آید که باعث ایجاد اختلال و خطا در روند اجرای برنامه از پیش تعیین شده می‌شود که این خطاهای احتمالی را می‌توان با استفاده از حسگرها و اطلاعات مبتنی بر آنها تا حد قابل قبولی کاهش داده و از سیکل‌های جبران خطا استفاده کرد. برای مدلسازی این سیکل‌ها از مدل شبکه‌پتری فازی بهره می‌گیرند. به‌عنوان مثال، خراب‌شدن ابزار (شکستن و کندشدن) از مواردی است که با عملیات حسگری قابل جبران است. عملیات حسگری ابزار در دو مرحله قابل انجام است: در مرحله اول ابزار بعد از قرارگرفتن در کله‌گی و قبل از شروع عملیات مربوطه، تحت بررسی قرار می‌گیرند و در صورت داشتن عیب و نقص، در عملیات استفاده نشده و درون پالت محتوی ابزارهای خراب قرار می‌گیرند.



شکل (۸): نمایش استدلال فازی و شلیک انتقال حسگر در مرحله دوم، ابزار در حین عملیات ماشینکاری حس می‌شوند و مبتنی بر اطلاعات حس شده دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد:

- ۱- ابزار سالم است و عملیات ادامه می‌یابد.
  - ۲- ابزار خراب است و باید سیکل جبران خطا اجرا شود، لذا عملیات متوقف می‌شود و تعویض ابزار صورت می‌گیرد.
- شکل (۹- الف) تغییر یافته شبکه‌پتری شکل (۶) است که با اضافه کردن تعدادی مکان (که حالت خاصی را به نمایش

نمی‌گذارند)، شبکه‌پتری به اجرای دنباله ۲ ملزم خواهد شد. برای مدلسازی مرحله اول، از نمایش پتری شکل (۹- ب) استفاده می‌شود. در این مدلسازی از انتقال حسگری طرف‌متقابل  $S$  استفاده شده است و زیرمجموعه‌های این انتقال مکان‌های  $p_{j,3}$  و  $p_{j,4}$  هستند. در این عملیات، انتقال‌های  $t_j$  گسترش می‌یابند و مرحله اول حسگری در آنها اجرا می‌شود. برای مدلسازی مرحله دوم، متغیرهای فازی و مجموعه‌های فازی زیر، تعریف و بر طبق تجربیاتی که از نحوه عملکرد ماشین در هنگام اجرای عملیات به دست می‌آید قواعد زیر استخراج می‌شوند:

- متغیر فازی  $x$  (صدای ماشین در حین کار) برای متغیر فازی  $x$  دو مجموعه فازی  $A$  (صدای نرمال) و  $B$  (صدای غیر نرمال) تعریف می‌شود.
- متغیر فازی  $y$  (نیروی ماشینکاری) برای متغیر فازی  $y$  سه مجموعه فازی  $C$  (نیروی زیاد) و  $D$  (نیروی نرمال) و  $E$  (نیروی صفر) تعریف می‌شود.
- متغیر فازی  $z$  (وضعیت ابزار) برای متغیر فازی  $z$  دو مجموعه فازی  $F$  (ابزار سالم) و  $G$  (ابزار معیوب) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{if } x \text{ is } A \text{ AND } y \text{ is } D \text{ then } z \text{ is } F \\ \text{if } x \text{ is } B \text{ AND } y \text{ is } C \text{ then } z \text{ is } G \\ \text{if } y \text{ is } E \text{ then } z \text{ is } G \end{aligned} \quad (8)$$

برای مدلسازی این قواعد فازی با شبکه‌پتری، هر یک از گزاره‌ها را با یک مکان و هر قاعده را با یک انتقال نمایش می‌دهند [۱۷]. شبکه پتری فازی این مرحله در شکل (۹- ج) رسم شده است. مکان‌ها و انتقال‌های شکل (۹) در جدول (۵) تعریف شده است. در شکل (۹- ج) مکان  $p_{k,10}$  با کمان منع‌کننده<sup>۱۷</sup> به انتقال  $t_{k,5}$  متصل شده است؛ یعنی تا زمانی که مکان  $p_{k,10}$  فاقد توکن است انتقال  $t_{k,5}$  قادر به شلیک است و با ورود توکن به مکان  $p_{k,10}$  انتقال  $t_{k,5}$  قادر به شلیک نیست. ذکر این نکته لازم است که محدودیتی در تعریف تعداد متغیرها، مجموعه‌های فازی و قواعد فازی وجود ندارد و به نظر طراح و حساسیت موضوع و دقت کار بستگی دارد. عملیات حسگری ابزار در حین اجرای هر یک از عمل‌ها باید انجام شود، به عبارتی عمل ماشینکاری و عملیات حسگری باید به‌طور موازی انجام گیرند. البته برای پایش شرایط ابزار روش‌های بسیاری پیشنهاد شده است که متناسب با شرایط ماشین و ابزار می‌توان از آنها بهره گرفت؛ اما از آنجا که این مطالب ارتباط چندانی به موضوع مقاله ندارد دو روش اندازه‌گیری صدای ماشین و نیروهای ماشینکاری به‌عنوان متغیرهای فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و حساسیتی بر روی این بحث، در

این مقاله وجود ندارد و بررسی آن نیازمند تحقیقات در این زمینه می باشد.

$$\begin{aligned} x \text{ is } A = d_1 = p_{k3}, x \text{ is } B = d_2 = p_{k4} \\ y \text{ is } C = d_3 = p_{k5}, y \text{ is } D = d_4 = p_{k6}, y \text{ is } E = d_5 = p_{k7} \\ z \text{ is } F = d_6 = p_{k8}, z \text{ is } G = d_7 = p_{k9} \end{aligned} \quad (9)$$

## ۹- گرافست

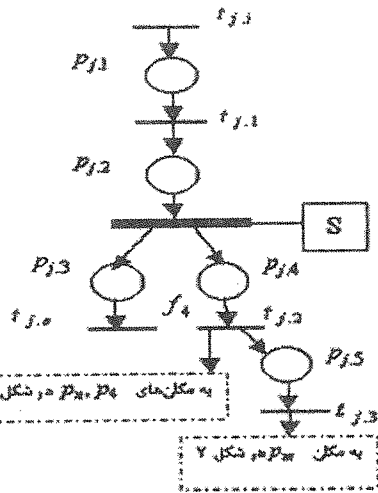
گرافست<sup>۱۸</sup> برای نمایش الگوریتم های اجرا شده توسط کنترل کننده های منطقی طراحی شده است [۲]. گرافست نوعی شبکه پتری است که بر روی آن تغییراتی انجام گرفته است. گرافست، گرافی با عناصر مرحله<sup>۱۹</sup>، انتقال و کمان های جهت دار است.

از جمله نقاط مشترک شبکه پتری با گرافست این است که در هر دو، دو نوع گره وجود دارد، در شبکه پتری مکان و انتقال و در گرافست مرحله و انتقال. نمایش اولیه گرافست بسیار شبیه به نمایش شبکه پتری است. هر مرحله در گرافست به عمل<sup>۲۰</sup> مربوط است و فقط یک توکن دریافت می کند. در مورد سیستم های پیچیده تر، از مراحل بزرگ<sup>۲۱</sup> استفاده می شود. هر انتقال در گرافست یک فاکتور پذیرش<sup>۲۲</sup> دارد که تابعی از متغیرهای ورودی و حالت داخلی است. کمان های جهت دار از مراحل به انتقال ها و بالعکس کشیده می شوند. انتقال در گرافست با برقراری دو شرط زیر قادر به شلیک می شود:

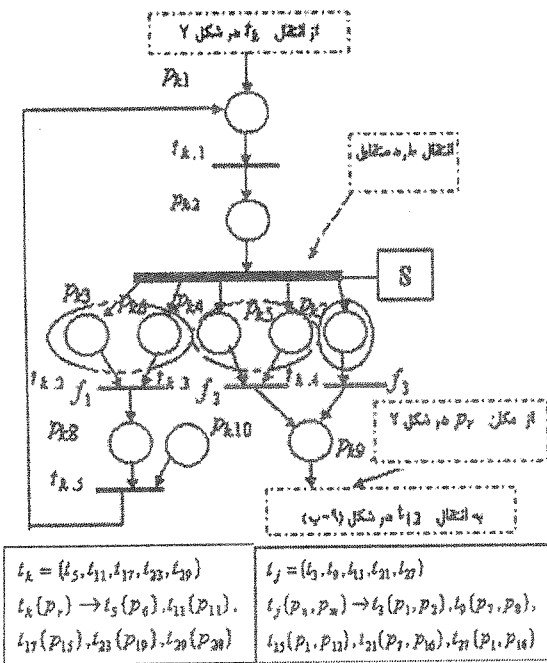
۱- همه مراحل پیشین یا ورودی به آن انتقال فعال یا به عبارتی یک توکن داشته باشند.

۲- فاکتور پذیرش انتقال درست<sup>۲۳</sup> باشد.

با برقراری این دو شرط، انتقال قادر به شلیک بوده و در اثر شلیک توکن ها از مراحل ورودی انتقال بیرون و در مراحل خروجی آن جای می گیرند. مدت زمانی که این جابجایی طول می کشد صفر است.

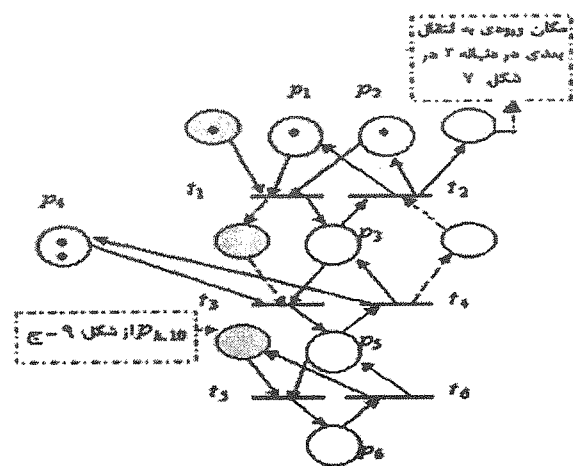


شکل (۹-ب): مدل حسگری مرحله اول



شکل (۹-ج): مدل حسگری مرحله دوم

در این نوع گراف دو نوع عمل وجود دارد: ۱- عمل های سطحی<sup>۲۴</sup> که این نوع عمل ها با متغیر بولی مدل می شوند و می توانند شرطی یا غیر شرطی باشند و در یک مدت زمان محدود اجرا می شوند ۲- عمل های آنی<sup>۲۵</sup> که مانند یک پالس عمل می کند و هرگاه مرحله مربوط به آن عمل توکن می گیرد بلافاصله یک پالس تولید می شود و این پالس خود می تواند عامل اجرای عمل سطحی دیگری شود. برای سیستم های پیچیده از عمل های بزرگ<sup>۲۶</sup> استفاده می کنند، که به دو دسته سطحی و آنی تقسیم می شوند. عمل های بزرگ شامل تحمیل کردن<sup>۲۷</sup>، پوشش دادن<sup>۲۸</sup> و مسدود کردن<sup>۲۹</sup> و عمل های بزرگ آنی شامل تحمیل<sup>۳۰</sup>، پوشش<sup>۳۱</sup> و انسداد<sup>۳۲</sup> است [۲]. در شکل (۱۰) نمایش گرافست نمون کاوی رسم و انتقال ها، مرحله ها و نوع عمل ها در جدول (۶) لیست شده اند.



شکل (۹-الف): شبکه پتری مجری دنباله ۲

در این مقاله نشان داده شد که بسیاری از ایده‌های کارآمد و مرسوم در حیطه مونتاژ خودکار رباتیکی را می‌توان با اندکی تغییر به حیطه فرایند ماشینکاری CNC تسری داد. گراف AND/OR و شبکه AND/OR و شبکه پتری به عنوان سه ابزار قدرتمند در مدلسازی معرفی شدند و با استفاده از آنها حالت‌های مختلف امکان‌پذیر برای انجام فرایند مدلسازی شدند و سه محک بر روی حالت‌های انجام فرایند اعمال شد. با اعمال این محک‌ها بهترین حالت امکان‌پذیر انجام فرایند انتخاب شد. برای مدلسازی و کنترل صافی سطح و کیفیت محصول ماشین CNC از تکنیکی مبتنی بر شبکه پتری فازی استفاده شد. همچنین با ارایه یک نمونه‌کاوی مرتبط با ماشین CNC نشان داده شد که چطور متغیرهای فازی صدای ماشین در حین کار، نیروی ماشینکاری در ماشین‌های سنتی در پایش و کنترل کیفیت سطح محصول استفاده می‌شوند. در تحقیقاتی که هم اکنون در دست انجام است این مدلسازی با زبان برنامه نویسی Visual C++ و در محیط نرم‌افزار طراحی Solidworks 2001 در حال شبیه‌سازی است. با پیاده‌سازی نرم‌افزاری، مقایسه این مدلسازی با عملکرد واقعی ماشین بر روی قطعه امکان‌پذیر می‌شود.

جدول (۶): تعریف انتقال‌ها و مرحله‌های شکل (۱۰)

مرحله و انتقال	شرح
۱	مرحله اولیه است و گراف‌های $G_2$ و $G_3$ و $G_4$ (به ترتیب، گراف تعویض ابزار معیوب، گراف حسگر برای عملیات با کله‌گی عمودی و کله‌گی افقی) را مسدود می‌کند.
۲ و ۳	عملیات $A_2$ و $A_3$ که به ترتیب ابزار $T_1$ و $T_2$ را در کله‌گی عمودی و افقی قرار می‌دهند، نشان می‌دهند.
۴ و ۵	دو مرحله بزرگ هستند که به ترتیب عملیات حسگری ابزار $T_1$ و $T_2$ را قبل از شروع ماشینکاری نمایش می‌دهند.
۶ و ۷	در این دو مرحله به ترتیب دو عملیات $R_1$ و $R_2$ را انجام می‌دهند و همزمان عملیات حسگری ابزار در حین ماشینکاری اجرا می‌شود و گراف‌های $G_2$ و $G_3$ احضار می‌شوند.
۸ و ۹	بعد از اتمام عملیات‌ها کله‌گی‌ها از قطعه کار جدا می‌شوند.
۱۰ و ۱۱	جداسازی کله‌گی عمودی و افقی به ترتیب از ابزار $T_1$ و $T_2$ به ترتیب، عمل‌های حسگری ابزار قبل از عملیات ماشینکاری اجرا شده، با سالم بودن ابزار $T_1$ به ادامه عملیات می‌پردازد و در صورت خرابی ابزار $T_1$ گراف $G_2$ احضار می‌شود.
۱۲ و ۱۳	به ترتیب، عمل‌های حسگری ابزار قبل از عملیات ماشینکاری انجام، با سالم بودن ابزار $T_2$ به ادامه عملیات می‌پردازد، با معیوب بودن ابزار $T_2$ گراف $G_3$ احضار می‌شود.
۱۴ و ۱۵	در گراف $G_2$ به ترتیب، مرحله اولیه تعویض ابزار، ابزار

معماری کنترلی توضیح داده شده را می‌توان برآحتی با استفاده از سیستم‌های کنترل استاندارد موجود نظیر کنترل کننده‌های منطقی برنامه پذیر نرم<sup>۳</sup> مبتنی بر PC پیاده‌سازی کرد. خوشبختانه زبان برنامه‌سازی استاندارد SFC (بخشی از زبان‌های IEC61131) که بر اساس ایده گرافست بنا نهاده شده به وسیله اکثر سیستم‌های توسعه برنامه‌های کنترلی پشتیبانی شده و ترجمه یک مدل بیان شده به وسیله شبکه پتری فازی به یک برنامه SFC کاملاً سراسر است [۱۸]. این موضوع از چند جنبه حائز اهمیت است، از جمله آنکه لزوم استفاده از کنترل‌کننده‌های مختص برای ماشین‌های CNC تا حدودی رنگ می‌بازد. در ضمن، تطابق با دید سیستم‌های باز از دیگر مزایای این رهبرد است. با استفاده از الگوریتمی ساده می‌توان گرافست شکل (۱۰) را به یک برنامه SFC تبدیل کرد. از طرف دیگر، این نمایش مبتنی بر گرافست می‌تواند پایه‌ای برای تولید کد CNC به‌طور خودکار باشد. البته باید در نظر داشت که SFC از مکانیزم عمل بزرگ پشتیبانی نمی‌کند. این مکانیزم‌ها می‌توانند به وسیله بلوک‌های تابعی استاندارد پشتیبانی شده در استاندارد IEC61131 مدلسازی شوند. در ضمن، امکان ترجمه مستقیم شبکه پتری تولید شده به SFC وجود دارد.

جدول (۵): تعریف مکان‌ها و انتقال‌های مجموعه شکل (۹)

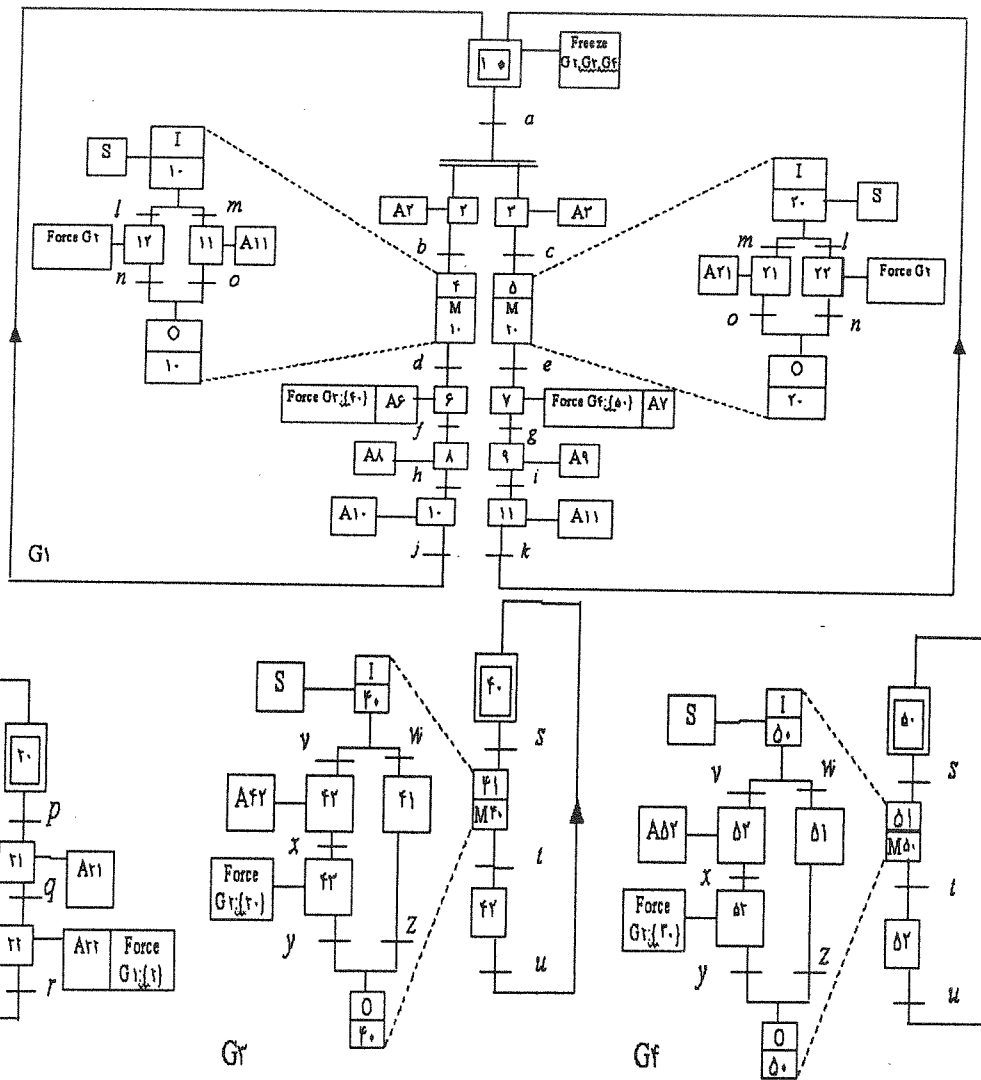
مکان و انتقال	شرح
$P_{k,2}, P_{k,1}$	این مکان‌ها به ترتیب، معرف فعال بودن حسگر، در دسترس بودن متغیر فازی محلی و علامت متغیر فازی هستند.
$t_{k,1}$	این انتقال مقادیر متغیرهای $X$ و $Y$ را در حین عملیات به دست می‌آورد و عملیات فازی‌سازی را انجام می‌دهد.
$t_{k,5}$	این انتقال باعث ادامه عملیات حسگری تا قبل از پایان اجرای عملیات می‌شود.
$t_{k,6}$	این انتقال در صورت بروز خطا عملیات حسگری را متوقف می‌سازد.
$t_{j,0}, t_{j,1}$	این انتقال‌ها به ترتیب، معرف انتقال ورودی و خروجی انتقال سیکل جبران خطا هستند.
$t_{j,1}$	این انتقال، ابزار را در قسمت حسگر قرار می‌دهد و مقدار متغیر فازی محلی آن را محاسبه می‌کند.
$t_{j,2}$	ابزار معیوب را از کله‌گی جدا و ابزار معیوب را در پالت ابزارهای معیوب قرار می‌دهد.
$t_{j,3}$	ابزار جدید از همان نوع را در کله‌گی قرار می‌دهد.
$P_{j,2}, P_{j,1}$ $P_{j,5}, P_{j,4}, P_{j,3}$	به ترتیب، معرف شروع عملیات حسگری، در دسترس بودن مقدار متغیر فازی، سالم بودن ابزار، معیوب بودن ابزار و قرار داشتن ابزار معیوب در پالت هستند.

- [8] Hanna, M.: "Modelling products quality from a CNC machining centre using fuzzy Petri nets with neural networks", Proceedings. IEEE Conf. on Merging Technologies and Factory Automation, EFTA '96, Vol. 2, p.p 440-445, 1996.
- [9] Sanderson, A. C.; Cao, T.; *Intelligent Task Planning Using Fuzzy Petri Nets*, Singapore: World Scientific, 1996.
- [10] Homem-de-Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: "Evaluation and selction of assembly plans", Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, p.p 1588-1593, 1990.
- [11] Homem-de-Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: "AND/OR Graph representation of assembly plans", IEEE Trans.on Robotics and Automation, Vol. 6, No.2, p.p 188-199, 1990.
- [12] Homem-de-Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: "Two criteria for the selection of assembly plans: maximizing the flexibility of sequencing the assembly tasks and minimizing the assembly time through parallel execution of assembly tasks", IEEE Trans.on Robotics and Automation, Vol. 7, No.5, p.p 626-633, 1991.
- [13] Kasirolvalad, Z.; Jahed Motlagh, M. R; Shadmani, M.A; "An Intelligent Modular Modeling Approach for Quality Control of CNC Machine Product Using Adaptive Fuzzy Petri Nets", 8th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, China, p.p 1342-1347, 2004.
- [14] Kasirolvalad, Z; Jahed Motlagh, M. R; "An Intelligent architecture for control of machining operation process in CNC machine tool", in Proceedings of the Int. Conference on Artificial Intelligence, Las Vegas, Nevada, p.p 433-436, vol. I, 2004.
- [15] Jahed Motlagh, M. R; Kasirolvalad, Z, "Modeling and control of product quality in CNC machines with adaptive fuzzy Petri nets", in Proceedings of The 23<sup>rd</sup> IASTED Int. Conference on Modeling, Identification, and Control, Grindelwald, Switzerland, p.p 333-338, 2004.
- [16] De Floriani, L.; Nagy, G.: "A graph model for face-to-face assembly", Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, p.p 75 - 78, 1989.
- [17] Cheng, P.; Forward, K.: "Fuzzy Petri nets", Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Vol. 2, p.p 402 -408, 1997.
- [18] Bonfatti, F.; Monari, P. D.; Sampieri, U.; *IEC1131-3 programming methodology*, Published by CJ International, 1997.

معیوب را از کله‌گی جدا و آن را در پالت دیگری قرار و در آخر ابزار دیگری از همان نوع را انتخاب می‌کند.	۳۲ و
به ترتیب، در حالت سالم بودن ابزار $T_1$ و $T_2$ در حین ماشینکاری به ادامه عملیات می‌پردازند.	۵۱ و ۴۱
به ترتیب، در حالت معیوب بودن $T_1$ و $T_2$ دستگاه خاموش می‌شود.	۵۲ و ۴۲
این انتقال‌ها به ترتیب، معرف آماده بودن ماشین، قراردادن ابزار $T_1$ را در کله‌گی عمودی، سالم بودن ابزار قبل از شروع به‌کار و شروع عملیات $R_1$ ، اتمام عملیات $R_1$ ، نبودن ابزار در کله‌گی و بالاخره برگشت به حالت اولیه برای اجرای عملیات $R_3$ هستند.	$d, b, a$ $j, h, f$
به ترتیب، معرف قراردادن ابزار $T_2$ را در کله‌گی افقی، سالم بودن ابزار قبل از شروع به کار و شروع عملیات $R_2$ ، اتمام عملیات $R_2$ ، نبودن ابزار در کله‌گی و بالاخره برگشت به حالت اولیه برای اجرای عملیات $R_4$ هستند.	$g, e, c$ $k, i$
این انتقال‌ها برای هر دو قسمت به ترتیب، معیوب بودن ابزار $T_1$ ( $T_2$ )، سالم بودن ابزار $T_1$ ( $T_2$ ) و $n$ و $q$ هر دو اتمام عمل حسگری را نشان می‌دهند.	$m, l$ $o, n$
این انتقال‌ها به ترتیب، معیوب بودن ابزار $T_1$ ( $T_2$ )، قراردادن ابزار خراب در پالت و وجود ابزار جدید از همان نوع $T_1$ ( $T_2$ ) را نشان می‌دهند.	$r, q, p$
این انتقال‌ها برای هر دو قسمت به ترتیب، معیوب بودن ابزار $T_1$ ( $T_2$ ) در حین عمل، خاموش بودن ماشین، و $z$ ، $y$ هر دو اتمام عمل حسگری در حین عمل را نشان می‌دهند.	$w, v$ $y, z, x$

## مراجع

- [1] Krar, S.; Gill, A.; Smid, P.; *Simplified Computer Numerical Control*, First Edition, New York: Industrial Press Inc, 2000.
- [2] David, R.; Alla, H.; *Petri Nets and Grafset*, first published by Prentice Hall, 1992.
- [3] Peterson, J. L.; *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.
- [4] Al-Jaar, R. Y.; Desrochers, A.: "Petri nets in automation and manufacturing", in Advanced in Automation and Robotics Vol.2, ed.G.N.Saridis, JAI Press, p.p 153 - 218, 1991.
- [5] Hanna, M.: "Determination of product quality from an FMS cell using fuzzy Petri nets", IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics 'Human, Information and Technology', Vol.2, p.p 2002-2007, 1994.
- [6] Hanna, M.; Buck, A.; Smith, R.: "Fuzzy Petri nets to model and control output quality from an flexible manufacturing cell", In Conf. on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, p.p 87-92, 1994.
- [7] Hanna, M.; Buck, A.; Smith, R.: "Synergistic fuzzy timed Petri nets to model and control product quality in a flexible machining centre", Proceeding for the IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics,



شکل (۱۰): گراف های  $G_1$  و  $G_2$  و  $G_3$  و  $G_4$  نمونه کاوی

### زیر نویس ها

- 20 Actions
- 21 Macrosteps
- 22 Receptivity
- 23 True
- 24 Level Actions
- 25 Impulse Actions
- 26 Macroactions
- 27 Forcing
- 28 Masking
- 29 Freezing
- 30 Force
- 31 Mask
- 32 Freeze
- 33 Soft Programmable Logic Controller

- 1 Intelligent Process Planning
- 2 Computer Aided Process Planning
- 3 Planning
- 4 NC or Numerical Control
- 5 Computer Numerical Control
- 6 Knowledge base
- 7 Petri net
- 8 Discrete State Sequences
- 9 Task Planning
- 10 Discrete Event Systems
- 11 Fuzzy Petri Net
- 12 Sequential Function Chart
- 13 Sensing Operation
- 14 Internal State Transition (IST)
- 15 Association Function
- 16 Mutually Exclusive Transition
- 17 Inhibitor Arc
- 18 Grafset
- 19 Step