**مجله کنترل**
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۴۱-۲۹

# محلی‌سازی کنترل نظارتی گسسته-پیش‌آمد نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر

وحید سعیدی[۱]، علی اکبر افضلیان[۲]، داود غرویان[۳]

[۱] فارغ التحصیل دکتری مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، v_saeidi@sbu.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، afzalian@sbu.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه مخابرات، دانشگاه شهید بهشتی، d_gharavian@sbu.ac.ir

دریافت ۱۳۹۵/۹/۳۰ ویرایش اول: ۱۳۹۶/۴/۹ ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۷/۱۵ پذیرش :۱۳۹۶/۹/۱۹

**چکیده:** در طراحی کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد افزایش تعداد حالت‌ها باعث پیچیدگی محاسباتی شده و پیاده‌سازی ناظر را نیز مشکل می‌سازد. محلی‌سازی ناظر یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت‌های ناظر نسبت به هر یک از اجزای سیستم بوده، به طوری که عملکرد همزمان کنترل‌کننده‌های محلی در سیستم گسسته-پیش‌آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه باشد. در این مقاله برای ساده نمودن پیاده‌سازی کنترل نظارتی روی سیستم‌های صنعتی، محلی‌سازی ناظر نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر معرفی شده است. دو روش برای تعمیم روش موجود محلی‌سازی ناظر پیشنهاد شده است: در روش اول گذرهایی غیر از گذری که محلی‌سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌گیرد، در تمامی حالت‌هایی از ناظر یکپارچه که آن گذرها غیرفعال شده‌اند، حلقه می‌گردند. در روش دوم گذرهایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، غیر از گذر کنترل‌پذیری که محلی‌سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌شود، حذف شده و مدل ساده‌تری ایجاد می‌گردد. پس از انجام هر یک از دو روش فوق، ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر ساده می‌گردد. روش‌های معرفی شده نسبت به روش موجود انعطاف‌پذیرتر بوده و ممکن است منتهی به تعداد حالت‌های کمتری گردند. همچنین ثابت می‌شود که نتیجه دو روش معرفی شده یکسان است.

**کلمات کلیدی:** الگوریتم کاهش ناظر، سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد، محلی‌سازی کنترل نظارتی.

# Localization of DES Supervisory Control with Respect to Each Controllable Event

**Vahid Saeidi, Ali A. Afzalian, Davood Gharavian**

**Abstract:** Supervisory control synthesis in discrete-event systems may encounter increasing the state cardinality. Increase in the number of states causes the computational complexity in supervisor synthesis and makes the implementation of the supervisor in industrial systems difficult. Localization of a supervisor is a method to reduce the number of states in the monolithic supervisor w.r.t. each component of the plant. Also, the synchronization of local controllers with the plant is control equivalent to the monolithic supervisor. In this paper, localization of a monolithic supervisor w.r.t. each controllable event is proposed, in order to facilitate implementation of local controllers. Two methods are proposed based on generalizing existing methods. The first method localizes a supervisor based on self-looping some states by disabled events which cannot be disabled by the corresponding local controller. The second one executes the supervisor localization based on removing transitions in the plant model that are disabled in some states of the monolithic supervisor, and are not supposed to be disabled by the corresponding local controller. In both methods, the supervisor is reduced w.r.t. the (reduced) plant model. The proposed methods are more flexible and may lead to less number of states, comparing to the results of existing method. It is proved that the two methods yield same results.

**Keywords:** Supervisor reduction procedure, Discrete-event systems, Supervisor localization procedure.

## ۱- مقدمه

نظریه کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد[۱] که اولین بار توسط Ramadge و Wonham ارائه شد ابزار مناسبی برای کنترل این دسته از سیستم‌ها را ارائه می‌کند. با استفاده از این نظریه می‌توان کنترل‌کننده ناظر را به گونه‌ای طراحی نمود که محدودیت اعمال شده بر رفتار فرآیند در حداقل ممکن باشد، یعنی با داشتن مدل گسسته-پیش-آمد فرآیند کنترل نشده و همچنین منطق کنترلی[۲] مطلوب که به صورت یک مدل گسسته-پیش‌آمد بیان می‌شود، مشخصات کنترلی با حداقل محدودیت برآورده گردد. اهداف کنترلی مختلفی در این نظریه دنبال می‌شود که مهمترین آنها ایمنی، رسیدن به رفتار مورد نظر و عدم انسداد در رفتار ناظر است. با استفاده از این نظریه می‌توان کنترل نظارتی را به-صورت یکپارچه[۳]، پودمانی[۴] و یا سلسله مراتبی[۵] طراحی نمود. در کنترل نظارتی یکپارچه، اطلاعات کافی برای تأمین مشخصه[۶] (منطق کنترلی) وجود دارد. مشکل اصلی در این رویکرد، پیچیدگی محاسباتی به دلیل افزایش تعداد حالت‌ها می‌باشد که در برخی موارد منجر به انفجار حالت می‌شود. به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی، رویکردهای مختلفی همچون، پودمانی[۱-۳]، سلسله مراتبی[۴]، ترکیب پودمانی وسلسله مراتبی [۶، ۵] و نیز روش‌های مبتنی بر اتوماتای غیرقطعی[۷] [۸، ۷] در کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد گزارش شده است. همچنین کنترل نظارتی غیرمتمرکز برای کاهش پیچیدگی در سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد ابعاد وسیع [۹-۱۱] پیشنهاد شده است. از آنجا که یک ناظر غیرمتمرکز دارای مشاهدات جزئی از سیستم گسسته-پیش‌آمد است، اطلاعات کافی از رفتار سایر ناظرهای غیرمتمرکز نداشته و ممکن است با آنها درگیری[۸] پیدا کند.

در [۱۲] شرایطی برای معادل بودن ناظر یکپارچه و ناظر غیرمتمرکز[۹] در زبان‌های بسته[۱۰] ارائه شده است، اما موضوع انسداد[۱۱] ناظر مورد بررسی قرار نگرفته است. تفکیک‌پذیری[۱۲] و تفکیک‌پذیری قوی[۱۳] (هم‌نرمال بودن[۱۴]) برای ایجاد کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد بالا به پایین[۱۵] در [۹] معرفی شده است. اخیراً، روشی برای یافتن زیر زبان تفکیک‌پذیر یک مشخصه معرفی شده است [۱۳]. در رویکرد بالا به پایین، کنترل نظارتی گسترده[۱۶] که با استفاده از الگوریتم محلی‌سازی ناظر[۱۷] ساخته می‌شود، تضمین می‌کند که بین کنترل‌کننده‌های محلی درگیری اتفاق نمی‌افتد. اگرچه اختیارات کنترلی هر یک کنترل‌کننده‌ها محلی است، اما مشاهدات مورد نیاز هر یک از آنها برای تصمیم‌گیری سازگار به صورت سیستماتیک تعیین می‌گردد. در ضمن، سنکرون‌سازی کنترل‌کننده‌های محلی با سیستم گسسته-پیش‌آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه نسبت به سیستم می-باشد[۱۴]. این روش دارای دو تفاوت اصلی نسبت به کنترل نظارتی غیرمتمرکز است: ۱- بر خلاف کنترل غیرمتمرکز که از زبان ناظر برای تفکیک وظایف کنترلی استفاده می‌کند، این روش از مدل اتوماتای ناظر بهره می‌برد. ۲- به دلیل محدودیت در مشاهدات کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز، ممکن است بین آنها درگیری ایجاد شود در حالی که در این روش عدم درگیری بین کنترل‌کننده‌های محلی تضمین شده است. اگر چه در کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد پایین به بالا[۱۸]، با ایجاد هماهنگ-کننده[۱۹] درگیری بین ناظرهای غیرمتمرکز از بین می‌رود[۱۵-۱۷].

در این مقاله، الگوریتم محلی‌سازی ناظر که در [۱۴] ارائه شده است، برای محاسبه کنترل‌کننده‌های محلی متناظر با هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تعمیم[۲۰] داده می‌شود. الگوریتم محلی‌سازی ناظر روشی برای محاسبه کنترل‌کننده‌های محلی در سیستم‌های گسسته-پیش‌آمدی است که از چند جزء[۲۱] تشکیل شده باشند. این روش با توسعه الگوریتم کاهش ناظر[۲۲] نسبت به پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر در هر یک از اجزاء سیستم ارائه شده است [۱۸]. در این مقاله، نشان داده می‌شود که ناظر یکپارچه را می-توان نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر محلی‌سازی نمود و کنترل‌کننده‌های محلی به‌دست آورد که عملکرد همزمان آن‌ها در سیستم گسسته-پیش‌آمد معادل کنترلی[۲۳] ناظر یکپارچه باشد. دو روش برای تعمیم محلی‌سازی ناظر یکپارچه پیشنهاد می‌گردد، ۱- حلقه نمودن گذرهایی غیر از گذری که محلی‌سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌گیرد در حالت‌هایی از ناظر یکپارچه که گذرها در آن غیرفعال شده اند. سپس ساده‌سازی ناظر حلقه شده با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر انجام می-گیرد. ۲- گذرهایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، حذف می‌شوند و ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم

[1] Supervisory Control of Discrete-Event Systems
[2] Control logic
[3] Monolithic
[4] Modular
[5] Hierarchical
[6] Specification
[7] Non-deterministic Automata
[8] Conflict
[9] Decentralized
[10] Prefix closed Languages
[11] Blocking
[12] Decomposability
[13] Strong Decomposability
[14] Conormality
[15] Top-Down Approach
[16] Distributed Supervisory Control
[17] Supervisor Localization
[18] Bottom-Up Approach
[19] Coordinator
[20] Generalize
[21] Component
[22] Supervisor Reduction
[23] Control Equivalent

کاهش ناظر نسبت به مدل گسسته-پیش‌آمد ساده شده کاهش می‌یابد. لازم به‌ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش‌آمد کنترل-پذیری که محلی‌سازی نسبت به آن انجام می‌پذیرد، نمی‌باشند. همچنین، در قضیه ۱ ثابت می‌شود که نتیجه دو روش یکسان است.

اهمیت این روش زمانی مشخص می‌شود که سیستم گسسته-پیش‌آمد تنها از یک بخش با تعدادی پیش‌آمد کنترل‌پذیر تشکیل شده باشد یا این-که برخی از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد دارای چندین پیش‌آمد کنترل-پذیر باشند. چنانچه سیستم گسسته-پیش‌آمد تنها دارای یک جزء باشد روش معرفی شده در [۱۴] امکان محلی‌سازی ناظر را ندارد. چنانچه برخی از اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد بیش از یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر داشته باشند این روش ممکن است کنترل‌کننده‌های محلی با تعداد حالت‌های کمتری را ایجاد نماید. از مزیتهای روش ارائه شده در این مقاله آنست که چون محلی‌سازی ناظر نسبت به اجزاء[۱] سیستم انجام نمی‌شود لذا بر خلاف روش ارائه شده در [۱۴] اجزاء سیستم می‌توانند پیش‌آمدهای مشترک نیز داشته باشند. با وجود اینکه هر کنترل‌کننده محلی امکان مشاهده رفتار سایر کنترل‌کننده‌ها را دارد، اما هر یک از کنترل کننده‌های محلی تنها اختیار غیرفعال کردن یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر را دارد. در ادامه با استفاده از دو مثال کنترل نظارتی مسیر تردد[۲] و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج[۳] در ایستگاه تقویت فشار گاز اهمیت روش ارائه شده در این مقاله روشن می‌گردد. با محلی‌سازی ناظر یکپارچه مسیر تردد، نشان داده خواهد شد که هر کنترل‌کننده محلی متناظر با هر پیش‌آمد کنترل‌پذیر می‌تواند به صورت ساده‌تر و با تعداد حالت‌ها و پیش‌آمدهای کمتری نسبت به ناظرهای محلی که نسبت به هر یک از اجزاء[۴] سیستم ساخته شده‌اند، ایجاد گردد. در محلی‌سازی ناظر یکپارچه پیش‌گیری از وقوع سرج نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر، می‌توان اقدامات کنترلی را به شکل ساده‌تری به برنامه کامپیوتری تبدیل کرد که بتوان روی سیستم‌های صنعتی پیاده‌سازی نمود. به‌طور مشابه با الگوریتم محلی‌سازی ناظر [۱۴]، در این روش نیز از عملگر AND در هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی استفاده می‌گردد. تمامی مراحل مدل‌سازی، تبدیل منطق کنترلی به مدل گسسته-پیش‌آمد، طراحی و کاهش ناظر و نیز محلی‌سازی ناظر با استفاده از نرم‌افزار TCT [۱۹] انجام شده است. TCT یک نرم‌افزار دانشگاهی است که برای طراحی کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد و موضوعات مرتبط با آن ارائه شده است. این نرم افزار محلی‌سازی ناظر را تنها نسبت به پیش-آمدهای هر یک از اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد انجام می‌دهد و قادر نیست محلی‌سازی ناظر یکپارچه را نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر اجرا نماید. لذا شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این مقاله، مطابق روشهای ارائه شده در زیربخش‌های ۳-۳ و ۳-۴ و با انجام تغییراتی در مدل‌های تغذیه شده به TCT انجام شده است.

در بخش دوم، مفاهیم و تعاریف پایه در نظریه کنترل نظارتی سیستم-های گسسته-پیش‌آمد مرور شده است. در بخش سوم، علاوه بر مرور روش‌های کاهش ناظر و محلی‌سازی ناظر، دو روش برای محلی‌سازی کنترل نظارتی یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر، با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر معرفی شده است. در بخش چهارم، با استفاده از دو مثال کاربردی کنترل نظارتی مسیر تردد و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز ، روش ارائه شده در بخش سوم راستی آزمایی شده است. نتیجه‌گیری از روش ارائه شده در مقاله، در بخش پنجم ارائه شده است.

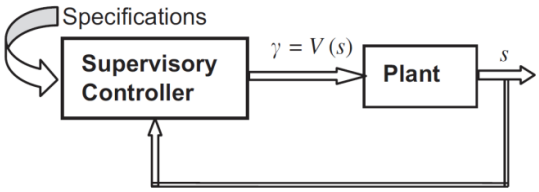
## ۲- کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد

سیستم گسسته-پیش‌آمد (وقایع منفصل) یک سیستم گسسته حالت و پیش‌آمد تحریک[۵] است که تغییر و تحول در حالت‌های آن به طور کامل به وقوع پیش‌آمدهای گسسته غیرهمزمان در طول زمان بستگی دارد [۲۰]. پیش‌آمد، متغیری است که بیان‌گر تغییر از یک حالت گسسته به حالت گسسته دیگر است که در یک لحظه زمانی اتفاق می‌افتد. یک زبان[۶] $L$ روی مجموعه پیش‌آمد $\Sigma$ مجموعه‌ای از رشته‌های با طول محدود (سلسله پیش‌آمدهای محدود) است که از پیش‌آمدهای مجموعه $\Sigma$ ساخته شده باشد، به‌عبارت دیگر $L \subseteq \Sigma^*$ است. $\Sigma^*$ اجتماعی از مجموعه تمامی سلسله پیش‌آمدهای محدود و مجموعه متشکل از پیش‌آمد تهی $(\epsilon)$ است. پیش-آمد تهی، بدین معنی است که هیچ پیش‌آمدی از مجموعه $\Sigma$ رخ نداده است. یک اتوماتون[۷] با پنج تایی $A = (Y, \Sigma, \eta, y_0, Y_m)$ معرفی می‌گردد به‌طوری‌که $\eta: Y \times \Sigma \to Y$ است. همچنین $Y$ مجموعه حالت‌ها، $\Sigma$ مجموعه پیش‌آمدها، $\eta$ تابع گذر حالت، $y_0$ حالت اولیه و $Y_m$ مجموعه حالت‌های نشان‌دار می‌باشد. یک اتوماتون ابزاری برای معرفی یک زبان مطابق با قواعد تعریف شده است. ساده‌ترین راه برای معرفی مفهوم اتوماتون، استفاده از گراف جهت‌دار یا دیاگرام گذرحالت است. اتوماتا جمع اتوماتون‌هاست. مولد[۸] $\mathbf{G} = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ همان اتوماتون $A$ است که حالت‌های بن‌بست آن حذف شده است. حالت‌هایی بن‌بست هستند که از آنها گذری برای رسیدن به سایر حالت‌ها وجود ندارد. در این تعریف $\delta$ تابع گذر جزئی است زیرا این تابع روی جزئی از ورودی (دامنه) خود تعریف شده است. یعنی اینکه $\delta: Q \times \Sigma \to Q$ است. زبان بسته $\mathbf{G}$ شامل سلسله پیش‌آمدهایی در $\Sigma^*$ است که تابع آن به‌صورت $L(\mathbf{G}) = \{s \in \Sigma^* | \delta(q_0, s)!\}$ تعریف شود. علامت ! به معنی آن است که تابع گذر $\delta$ در حالت اولیه $q_0$ و با سلسله پیش‌آمد $s$ تعریف شده است. زبان

[۱] Components
[۲] Guide way
[۳] Surge-Avoidance Supervisor
[۴] Components
[۵] Event Driven
[۶] Language
[۷] Automaton
[۸] Generator

نشان‌دار $\mathbf{G}$ شامل سلسله پیش‌آمدهایی است که در $L(\mathbf{G})$ وجود داشته باشد و از حالت اولیه به یک حالت نشان‌دار ختم شود. یعنی $L_m(\mathbf{G}) = \{s \in L(\mathbf{G}) | \delta(q_0, s) \in Q_m\}$ برقرار باشد. سلسله پیش‌آمد $s' \in \Sigma^*$ پیشوند دنباله $s$ نامیده می‌شود اگر $s = s's''$ باشد و با نماد $s' \leq s$ نشان داده می‌شود. مجموعه بسته[۱] یک زبان $L$ با $\overline{L}$ نشان داده می‌شود و شامل تمامی پیشوندهای زبان $L$ است. اگر یک زبان با مجموعه بسته‌اش مساوی باشد ($L = \overline{L}$) آنگاه به آن، زبان بسته می‌گویند. زبان بسته $\overline{L}$ شامل تمامی پیشوندهای سلسله پیش‌آمدهای زبان $L$ است. حالت $q \in Q$ دسترس‌پذیر[۲] است اگر بتوان از حالت اولیه به آن رسید. یعنی $\{\exists s \in L(\mathbf{G}) | \delta(q_0, s) = q\}$ برقرار باشد. مولد $\mathbf{G}$ دسترس‌پذیر است اگر همه حالت‌های آن دسترس‌پذیر باشد. حالت $q$ هم‌دسترس‌پذیر[۳] است اگر دنباله پیش‌آمدی وجود داشته باشد که آن‌را به یک حالت نشان‌دار برساند. یعنی $\{\exists q_m \in Q_m, \exists s \in \Sigma^* | \delta(q, s)! \ \& \ q_m = \delta(q, s)\}$ برقرار باشد. مولدی هم‌دسترس‌پذیر است که تمام حالت‌های آن هم-دسترس‌پذیر باشد. مولد $\mathbf{G}$ را مرتب[۴] گویند اگر دسترس‌پذیر و هم-دسترس‌پذیر باشد. مولد $\mathbf{G}$ را بدون انسداد گویند اگر هر حالت دسترس-پذیر آن، هم‌دسترس‌پذیر نیز باشد. اگر $\mathbf{G}$ مرتب باشد می‌توان نتیجه گرفت که بدون انسداد است[۱۷].

تصویرطبیعی[۵] یک سلسله پیش‌آمد یا به‌طور ساده تصویر یک سلسله پیش‌آمد، زبانی است که روی مجموعه $\Sigma_o \subseteq \Sigma$ ساخته شده و با $P$ نشان داده می‌شود. $\Sigma_o$ مجموعه پیش‌آمدهای رؤیت‌پذیر می‌باشد. پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر نیز پیش‌آمدهایی هستند که از کانال تصویر عبور نمی‌کنند. تعریف ریاضی تصویر طبیعی یک سلسله پیش‌آمد به‌صورت $P: \Sigma^* \to \Sigma_0^*$ است که در آن ۱- $P(\epsilon) := \epsilon$، ۲- $P(s\sigma) := P(s)P(\sigma)$ for $s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma$ و۳- باشد. تعریف تصویر طبیعی را می‌توان به‌صورت $P: Pwr(\Sigma^*) \to Pwr(\Sigma_0^*)$ تعمیم داد. بدین ترتیب برای هر زبان $L \subseteq \Sigma^*$، $P(L) := \{P(s) | s \in L\}$ تعریف خواهد شد. در تصویر یک سلسله پیش‌آمد، پیش‌آمدهایی که از کانال تصویر ( با مدل ریاضی $P$) عبور نمی‌کنند، حذف می‌گردند. بر این اساس، عکس تصویر طبیعی به‌صورت $P^{-1}: Pwr(\Sigma_o^*) \longrightarrow Pwr(\Sigma^*)$ تعریف می‌گردد، به-طوری‌که برای هر $L \subseteq \Sigma_0^*$، $P^{-1}(L) := \{s \in \Sigma^* | P(s) \in L\}$ باشد. در این تعریف از مجموعه توانی $Pwr(\Sigma^*) = 2^{\Sigma^*}$ استفاده شده است، یعنی $Pwr(\Sigma^*)$ تمامی زیرمجموعه‌های ممکن از مجموعه $\Sigma^*$ می‌باشد [۲۱]. ضرب همزمان[۶] دو زبان $L_1$ و $L_2$ به‌صورت $L = L_1 \parallel L_2$ نشان داده شده و به‌صورت $L = L_1 \parallel L_2 = (P_1^{-1}L_1) \cap (P_2^{-1}L_2)$ تعریف می‌گردد، به‌طوری‌که $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$ و $P_i^{-1}: Pwr(\Sigma_i^*) \to Pwr(\Sigma^*)$ $i = 1,2$ است[۲۰]. زبان‌های $L_1, L_2$ که $(L_1, L_2) \subseteq \Sigma^* \times \Sigma^*$ باشد، غیردرگیر[۷] نامیده می‌شوند اگر $\overline{L_1 \cap L_2} = \overline{L_1} \cap \overline{L_2}$ برقرار باشد. همچنین مولدهای $(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$ غیردرگیر نامیده می‌شوند اگر زبان‌های نشان‌دار آنها غیردرگیر باشند[۲۱]. درگیری دو زبان $L_1, L_2$ بدین معنی است که اشتراک آنها (عملکرد همزمان آنها) دچار انسداد شده و هیچ سلسله پیش‌آمدی برای رسیدن از $L_i$ به $\overline{L}_i, i = 1,2$ وجود نداشته باشد. منظور از کنترل نظارتی یک سیستم گسسته-پیش‌آمد، غیرفعال کردن برخی از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر است. به همین دلیل مجموعه کل پیش‌آمدها به دو زیرمجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر ($\Sigma_c$) و پیش-آمدهای کنترل‌ناپذیر ($\Sigma_u$) افراز می‌شوند. پیش‌آمدهایی که امکان غیرفعال کردن آن‌ها توسط ناظر وجود دارد، کنترل‌پذیر و پیش‌آمدهایی که امکان غیرفعال کردن آن‌ها برای ناظر وجود ندارد، کنترل‌ناپذیر هستند [۱۷]. زیرمجموعه خاصی از پیش‌آمدها که باید فعال شوند با مشخص نمودن زیرمجموعه‌ای از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر انتخاب می‌شوند. چنانچه این مجموعه را با مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌ناپذیر که به‌طور خودکار فعال هستند ملحق کنیم، چنین زیرمجموعه‌ای از پیش‌آمدها الگوی کنترلی[۸] نامیده می‌شود و مجموعه تمامی الگوهای کنترلی به‌صورت $\Gamma = \{\gamma \in Pwr(\Sigma) | \gamma \supseteq \Sigma_u\}$ معرفی می‌گردد. کنترل نظارتی سیستم گسسته-پیش‌آمد $\mathbf{G}$، با نگاشت $V$ به‌صورت $V: L(\mathbf{G}) \to \Gamma$ تعریف شده و جفت $(\mathbf{G}, V)$ بصورت $V/\mathbf{G}$ نوشته می‌شود. بدین ترتیب $\mathbf{G}$ تحت نظارت $V$ می‌باشد (شکل ۱) [۲۲]. زبان $K \subseteq \Sigma^*$ نسبت به $\mathbf{G}$ کنترل‌پذیر است اگر $\overline{K}\Sigma_u \cap L(\mathbf{G}) \subseteq \overline{K}$ برقرار باشد. منظور از $\overline{K}\Sigma_u$ سلسله پیش-آمدهایی در $\overline{K}$ است که پس از آن یک پیش‌آمد کنترل‌ناپذیر رخ می‌دهد [۱۷].




شکل۱: بلوک دیاگرام سیستم تحت نظارت [۲۲]

در کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد، هنگامی که ناظر نمی‌تواند همه پیش‌آمدهای تولید شده به وسیله سیستم را مشاهده کند مفاهیم نرمال بودن[۹] [۲۳، ۱۲]، پارانرمال بودن[۱۰] [۱۷]، رؤیت‌پذیری نسبی[۱۱] [۲۴] و رؤیت‌پذیری[۱۲] [۱۲] ناظر با مشاهدات جزئی مطرح می‌شود.

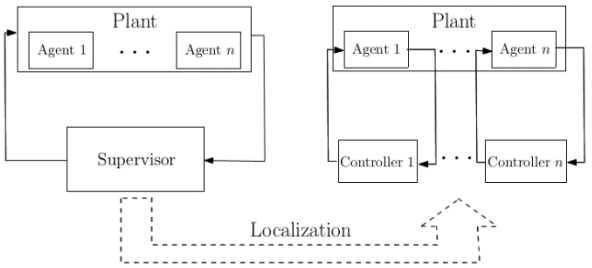
[۱] Closure
[۲] Reachable
[۳] Coreachable
[۴] Trim
[۵] Natural Projection
[۶] Synchronous Product
[۷] Non-conflicting
[۸] Control Pattern
[۹] Normality
[۱۰] Paranormality
[۱۱] Relative Observability
[۱۲] Observability

نرمال بودن یک زبان نشان می‌دهد که پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر، کنترل ناپذیرند، یعنی امکان غیرفعال کردن آنها وجود ندارد. به عبارت دیگر، زبان $K$ نسبت به $(L_m(\mathbf{G}),P)$ نرمال نامیده می‌شود اگر $P^{-1}P(K)\cap L_m(\mathbf{G})=K$ برقرار باشد. پارانرمال بودن یک زبان نشان می‌دهد که وقوع پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر (کنترل‌پذیر یا کنترل‌ناپذیر) از زبان بسته خارج نمی‌شود. زبان $K$ نسبت به $(L(\mathbf{G}),P)$ پارانرمال نامیده می‌شود اگر $\overline{K}(\Sigma-\Sigma_o)\cap L(\mathbf{G})\subseteq\overline{K}$ برقرار باشد. اگر پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر، کنترل‌ناپذیر باشند، آنگاه ناظر $K_s\subseteq E$ نسبت به $(L(\mathbf{G}),P)$ پارانرمال خواهد بود. به منظور توسعه مفهوم پارانرمال بودن در کنترل نظارتی گسترده، یک ویژگی جدید هم‌رؤیت‌پذیری[۱] با نام هم‌پارانرمال بودن[۲] تعریف می‌گردد.

هم‌پارانرمال بودن یک زبان تضمین می‌کند هر سلسله پیش‌آمدی که در $\overline{K}$ به وسیله یک پیش‌آمد رؤیت‌ناپذیر (نسبت به کانال تصویر $P_k$) تعریف شده در $L(\mathbf{G})$ دنبال شود، باید در $\overline{K}$ باقی بماند. یعنی اینکه اگر پیش‌آمدی برای یک کنترل‌کننده قابل مشاهده نبود کنترل‌کننده‌های دیگر با داشتن $\overline{K}$ تصمیم سازگار را برای غیرفعال کردن آن پیش‌آمد اتخاذ نمایند. بر اساس تعریف پارانرمال بودن، ناظری پارانرمال است که پیش-آمدهای کنترل‌پذیر آن رؤیت‌پذیر باشند. با توجه به این گزاره، می‌توان مجموعه‌ای از کنترل‌کننده‌های محلی را به گونه‌ای ایجاد نمود که هر یک تنها پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر (قابل غیرفعال کردن) مربوط به خود را مشاهده کنند.

زبان $K$ نسبت به $\forall k\in,P_k:\Sigma^*\longrightarrow(\Sigma^k)^*$ که $(L(\mathbf{G}),P_k,\Sigma_c^k)$ و $\mathcal{K}$ مجموعه اندیس‌های هر یک از زیرمجموعه‌های مربوط به پیش-آمدهای کنترل‌پذیر است، هم‌پارانرمال نامیده می‌شود، اگر $\forall k\in K=\bigcap_k K_k$ برقرار بوده و $\mathcal{K},\exists K_k,\ \overline{K}_k(\Sigma-\Sigma^k)\cap L(\mathbf{G})\subseteq\overline{K}_k$ باشد[۲۵]. $K_k$ زبانی پارانرمال است که از $K$ به‌دست می‌آید. روش ساختن مولدی که زبان متناظر آن $K_k$ است در زیربخش ۳-۳ توضیح داده شده است.

فرض کنید سیستم $\mathbf{G}$ شامل عوامل $\mathbf{G}^k$ تعریف شده روی پیش‌آمدهای افراز شده $\Sigma^k\ (k\in\mathcal{K})$ باشد، بنابراین $\Sigma=\text{لا}\{\Sigma^k,k\in\mathcal{K}\}$ می‌باشد. نماد لا به معنی اجتماعی از مجموعه‌هاست که دارای عضو مشترک نباشند. فرض کنید $L_k:=L(\mathbf{G}^k)$ و $L_{m,k}:=L_m(\mathbf{G}^k)$ باشد آنگاه رفتار بسته و نشان‌دار $\mathbf{G}$ به ترتیب $L(\mathbf{G})=\|\{L_k,k\in\mathcal{K}\}$ و $L_m(\mathbf{G})=\|\{L_{m,k},k\in\mathcal{K}\}$ خواهد بود. برای سادگی فرض می‌شود که برای هر $k\in\mathcal{K}$ زیر سیستم $\mathbf{G}^k$ بدون انسداد باشد. به‌عبارت دیگر $\bar{L}_{m,k}=L_k$. دراین‌صورت $\mathbf{G}$ الزاماً بدون انسداد است یعنی این‌که $\bar{L}_m(\mathbf{G})=L(\mathbf{G})$ است. چنانچه $\Sigma=\Sigma_c\text{لا}\Sigma_u$ باشد ساختار کنترلی برای هر عامل با استفاده از مجموعه پیش‌آمدهای $\Sigma_c^k=\Sigma^k\cap\Sigma_c$ و $\Sigma_u^k=\Sigma^k\cap\Sigma_u$ ایجاد شده ومولد $\mathbf{LOC}^k$ روی مجموعه پیش‌آمد $\Sigma$ برای عامل $\mathbf{G}^k$ کنترل‌کننده محلی نامیده می‌شود. در این‌صورت $\mathbf{LOC}^k$ تنها پیش‌آمدهای موجود در مجموعه $\Sigma_c^k$ را غیرفعال می‌نماید. این در حالیست که دامنه مشاهده $\mathbf{LOC}^k$ الزاماً محدود به مجموعه پیش‌آمد $\Sigma^k$ نمی‌باشد. در شکل ۲ بلوک دیاگرام ناظر محلی‌سازی شده نشان داده شده است [۱۴].




شکل۲: بلوک دیاگرام ناظر محلی سازی شده [۱۴]

## ۳- محلی‌سازی کنترل نظارتی یکپارچه بر اساس الگوریتم کاهش ناظر

الگوریتم محلی‌سازی ناظر [۱۴]، روشی را برای کاهش تعداد حالت-های ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد ارائه می‌کند. الگوریتم کاهش ناظر یکپارچه [۱۸] اطلاعات اضافه را که در طراحی ناظر به کار رفته است، بدون آنکه تأثیری بر رفتار کنترلی داشته باشد، کاهش می‌دهد. ناظر کاهش یافته دارای مزایایی نسبت به ناظر اصلی بوده، که مهمترین آن کاهش تعداد حالت‌ها و ساده شدن پیاده‌سازی ناظر است. این روش، یک روش ذهنی[۳] است یعنی دسته‌بندی حالت‌های سازگار کنترلی به گونه‌ای است که نمی‌توان ثابت کرد که ناظر ساده شده دارای حداقل تعداد حالت است. در زیربخش ۳-۱ مروری بر روش کاهش ناظر [۱۸] ارائه شده و در زیربخش ۳-۲ نیز مروری بر روش محلی‌سازی ناظر [۱۴] ارائه گردیده است.

### ۳-۱- مروری بر الگوریتم کاهش ناظر

الگوریتم کاهش ناظر مولدی را ایجاد می‌کند که معادل کنترلی ناظر یکپارچه نسبت به سیستم می‌باشد. چنانچه ناظر $K_s\neq\emptyset$ باشد می‌توان آن‌را با مولد $\mathbf{SUP}=(X,\Sigma,\xi,x_0,X_m)$ نشان داد که تشخیص دهنده[۴] $K_s$ نام دارد. تشخیص دهنده مولدی است که زبان متناظر آن با $K_s$ برابر بوده، یعنی $K_s=L_m(\mathbf{SUP})$ است. چنانچه $\mathbf{RSUP}$ ناظر کاهش یافته (ساده شده) باشد آنگاه $|\mathbf{SUP}|\ll|\mathbf{RSUP}|$ بوده و معادل کنترلی $\mathbf{SUP}$ نسبت به $\mathbf{G}$ خواهد بود [۱۸]. یعنی اینکه

$$L_m(\mathbf{G})\cap L_m(\mathbf{RSUP})=L_m(\mathbf{SUP}) \qquad (۱)$$

$$L(\mathbf{G})\cap L(\mathbf{RSUP})=L(\mathbf{SUP}) \qquad (۲)$$

[۱] Coobservability
[۲] Coparanormality
[۳] Heuristic Method
[۴] Recognizer

$|\mathbf{RSUP}| \ll |\mathbf{SUP}|$ به معنی آنست که تعداد حالت‌های **RSUP** نسبت به تعداد حالت‌های **SUP** کمتر است. الگوریتم کاهش ناظر با ادغام حالت‌هایی که سازگار کنترلی[۱] هستند شروع می‌شود. دو حالت سازگار کنترلی هستند اگر پیش-آمدهای فعال شده در یکی از آنها در دیگری غیرفعال نشده و از نظر نشان‌دار شدن نیز یکسان باشند. تعریف ریاضی این مطلب به‌صورت زیر است. مجموعه پیش-آمدهای فعال شده در حالت $x$ با $E(x)$ نشان داده می‌شود به طوری که $E: X \to Pwr(\Sigma)$ و $E(x) = \{\sigma \in \Sigma | \xi(x,\sigma)!\}$ است. مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در حالت $x$ با $D(x)$ نشان داده می‌شود به طوری که $D: X \to Pwr(\Sigma)$ و $D(x) = \{\sigma \in \Sigma \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&(\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0,s) = x \,\&\, \delta(q_0,s\sigma)!]\}$ می‌باشد.

پرچم[۲] (نشانه) $M: X \to \{1,0\}$ بصورت $M(x) = 1 \text{ iff} x \in X_m$ تعریف می‌شود. یعنی اینکه اگر $x$ نشان‌دار باشد آنگاه $M$ یک خواهد شد. پرچم $T: X \to \{1,0\}$ بصورت $T(x) = 1 \text{ iff } (\exists s \in \Sigma^*)\xi(x_0,s) = x \,\&\, \delta(q_0,s) \in Q_m$ تعریف می‌شود. یعنی اینکه سلسله پیش‌آمدی که در **SUP** به حالت $x$ رسیده است در **G** به یک حالت نشان‌دار برسد. حال فرض کنید که $\mathcal{R} \subseteq X \times X$ یک رابطه دودویی برای هر جفت حالت $x, x' \in X$ در **SUP** باشد. هر جفت حالت $x, x' \in X$ سازگار کنترلی هستند یعنی $(x,x') \in \mathcal{R}$ اگر

$$E(x) \cap D(x') = E(x') \cap D(x) = \emptyset \qquad (۳)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \qquad (۴)$$

به عبارت دیگر می‌توان گفت هر جفت $(x,x')$ در $\mathcal{R}$ قرار دارند اگر مطابق (۳) هیچ پیش‌آمدی وجود نداشته باشد که در یکی از آنها فعال و در دیگری غیرفعال گردد. همچنین مطابق (۴) هر دو حالت در **SUP** نشان‌دار بوده یا هر دو نشان‌دار نباشند. یک پوشش[۳] بصورت $\mathcal{C} = \{X_i \subseteq X | i \in I\}$ از مجموعه حالت‌های $X$ پوشش کنترلی روی **SUP** نامیده می‌شود اگر

$$(\forall i \in I) X_i \neq \emptyset \wedge (\forall x, x' \in X_i)(x,x') \in \mathcal{R} \qquad (۵)$$

$$(\forall i \in I)(\forall \sigma \in \Sigma)(\exists j \in I)\big[(\forall x \in X_i)\xi(x,\sigma)! \Rightarrow \xi(x,\sigma) \in X_j\big] \qquad (۶)$$

که در آن $I$ مجموعه اندیس‌های هر یک از زیرمجموعه حالت‌های قرار گرفته در یک سلول از پوشش کنترلی می‌باشد [۱۸].

پوشش کنترلی $\mathcal{C}$ حالت‌های **SUP** را در صورتی که سازگار کنترلی باشند در حالت $X_i (i \in I)$ انباشته[۴] می‌کند. مطابق (۵) هر عضو از $\mathcal{C}$ غیرتهی بوده و هر جفت حالت در یک عضو $\mathcal{C}$ باید سازگار کنترلی باشند. مطابق (۶) تمامی حالت-هایی که می‌توانند از هر حالت قرار گرفته در $X_i$ با یک گذار $\sigma$ قابل دسترس باشند، توسط برخی از $X_j$ها پوشش داده می‌شود. با داشتن یک پوشش کنترلی $\mathcal{C} = \{X_i \subseteq X | i \in I\}$ در **SUP**، یک ناظر القایی[۵] بصورت $\mathbf{J} = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ ساخته می‌شود که در آن شرایط (۷) برقرار باشد [۱۸].

$$\begin{aligned} &(i) i_0 = \text{some } i \in I \text{ with} x_0 \in X_i \\ &(ii) I_m = \{i \in I | X_i \cap X_m \neq \emptyset\} \\ &(iii) \kappa: I \times \Sigma \to I \text{ with } \kappa(i,\sigma) = j \text{ provided} \\ &\qquad \text{for such choice of } j \in I, \\ &(\exists x \in X_i)\xi(x,\sigma) \in X_j \,\&\, (\forall x' \in X_i)[\xi(x',\sigma)! \Rightarrow \\ &\qquad \xi(x',\sigma) \in X_j] \end{aligned} \qquad (۷)$$

قرار گرفتن برخی از حالت‌ها روی هم در دو مجموعه سازگار کنترلی، باعث می-شود تا $i_0$ و $\kappa$ بطور یکتا تعیین نشوند، بنابراین ممکن است **J** یکتا نباشد. بطور کلی **J** معادل کنترلی **SUP** نسبت به **G** می‌باشد. یک مولد $\mathbf{RSUP} = (Z, \Sigma, \zeta, z_0, Z_m)$ نسبت به **SUP** نرمال است [۱۸] اگر

$$\begin{aligned} &(i)(\forall z \in Z)\big(\exists s \in L(\mathbf{SUP})\big)\zeta(z_0,s) = z \\ &(ii)(\forall z \in Z)(\forall \sigma \in \Sigma)[\zeta(z,\sigma)! \Rightarrow \\ &\big(\exists s \in L(\mathbf{SUP})\big)[s\sigma \in L(\mathbf{SUP}) \,\&\, \zeta(z_0,s) = z]] \\ &(iii)(\forall z \in Z_m)\big(\exists s \in L_m(\mathbf{SUP})\big)\zeta(z_0,s) = z \end{aligned} \qquad (۸)$$

دو مولد $\mathbf{RSUP} = (Z, \Sigma, \zeta, z_0, Z_m)$ و $\mathbf{J} = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ با نگاشت ایزومورفیسم[۶] $\theta$ ایزومورفیک[۷] هستند اگر نگاشت $\theta: Z \to I$ وجود داشته باشد بطوری‌که

$$\begin{aligned} &(i)\ \theta: Z \to I \text{ is a bijection} \\ &(ii)\ \theta(z_0) = i_0 \text{and } \theta(Z_m) = I_m \\ &(iii)(\forall z \in Z)(\forall \sigma \in \Sigma)\zeta(z,\sigma)! \Rightarrow \\ &\big[\kappa(\theta(z),\sigma)! \,\&\, \kappa(\theta(z),\sigma) = \theta\big(\zeta(z,\sigma)\big)\big] \\ &(iv)(\exists i \in I)(\forall \sigma \in \Sigma)\kappa(i,\sigma)! \Rightarrow [(\exists z \in Z) \\ &\qquad \zeta(z,\sigma)! \,\&\, \theta(z) = i] \end{aligned} \qquad (۹)$$

در [۱۸] ثابت شده است که **RSUP** معادل کنترلی **SUP** نسبت به **G** می‌باشد.

## ۲-۳- مروری بر الگوریتم محلی‌سازی ناظر

مسأله محلی‌سازی ناظر یکپارچه با تعریف مجموعه پیش‌آمدهای فعال شده و مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در یک حالت دلخواه آغاز می‌گردد. ابتدا $E: X \to Pwr(\Sigma)$ مانند زیربخش ۳-۱ تعریف شده، سپس $D^k: X \to Pwr(\Sigma_c^k)$ بصورت $D^k(x) = \{\sigma \in \Sigma_c^k \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&(\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0,\sigma) = x \,\&\, \delta(q_0,s\sigma)!]\}$ تعریف می‌گردد. مجموعه $D^k(x)$ پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر در $\Sigma_c^k$ است که باید در $x$ غیرفعال شوند. اگر پیش‌آمد $\sigma \in \Sigma_c^k$ در $D^k(x)$ نباشد آنگاه $\sigma \in E(x)$ بوده یا این‌که در هر حالت $Q$ از سیستم گسسته-پیش‌آمد متناظر با $x$، تعریف نشده است. $M: X \to \{1,0\}$ و $T: X \to \{1,0\}$ نیز مانند آنچه در زیربخش ۳-۱ آمده، تعریف می‌گردد. رابطه باینری سازگاری کنترلی $R^k$ روی $X$ تعریف می‌گردد. برای هر $x, x' \in X$ گوییم که $(x,x') \in R^k$ اگر شرایط زیر برقرار باشد:

$$E(x) \cap D^k(x') = \emptyset = E(x') \cap D^k(x) \qquad (۱۰)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \qquad (۱۱)$$

[۱] Control Consistent
[2] flag
[۳] Cover
[۴] Lump
[۵] Induced Supervisor
[۶] Isomorphism
[۷] Isomorphic

فرض کنید $I^k$ مجموعه اندیس‌های هر یک از سلول‌های $\mathcal{C}^k = \{X_{i^k}^k \subseteq X | i^k \in I^k\}$ باشد. $\mathcal{C}^k$ یک پوشش کنترلی روی $X$ نسبت به $\Sigma_c^k$ نامیده می‌شود اگر شرایط زیر برقرار باشد:

$$(\forall i^k \in I^k)(\forall x, x' \in X_{i^k}^k)(x, x' \in R^k) \quad (۱۲)$$

$$(\forall i^k \in I^k, \sigma \in \Sigma)\,[(\exists j^k \in I^k)(\forall x \in X_{i^k}^k)\xi(x,\sigma)! \Rightarrow \xi(x,\sigma) \in X_{j^k}^k] \quad (۱۳)$$

$\mathcal{C}^k$ پوشش کنترلی متناظر با کنترل‌کننده $k$ام روی $X$ می‌باشد. یک پوشش کنترلی $\mathcal{C}^k$ حالت‌های **SUP** را روی سلول‌های $X_{i^k}^k (i^k \in I^k)$ تجمیع می‌کند. دو حالت $x, x'$ به سلول مشترک در $\mathcal{C}^k$ تعلق دارند اگر و تنها اگر $x, x'$ سازگار کنترلی بوده و دو حالت آینده که از $x, x'$ با رشته یکسانی قابل دسترس هستند سازگار کنترلی باشند. با ایجاد یک پوشش کنترلی $\mathcal{C}^k$ روی $X$ مبتنی بر تنها اطلاعات کنترلی $\Sigma_c^k$ می‌توان مولد القایی $\mathbf{J}^k = (I^k, \Sigma, \kappa^k, i_0^k, {I_m}^k)$ را با روابط زیر ایجاد نمود.

$$\begin{aligned}&(i) i_0^k \in I^k \text{ such that } x_0 \in X_{i_0^k}^k\\ &(ii) I_m^k = \{i^k \in I^k | X_{i^k}^k \cap X_m \neq \emptyset\}\\ &(iii) \kappa^k: I^k \times \Sigma \to I^k \text{ with } \kappa^k(i^k,\sigma) = j^k, \text{if}\\ &\quad (\exists x \in X_{i^k}^k)\xi(x,\sigma) \in X_{j^k}^k \& (\forall x' \in X_{i^k}^k)\\ &\quad [\xi(x',\sigma)! \Rightarrow \xi(x',\sigma) \in X_{j^k}^k]\end{aligned} \quad (۱۴)$$

حال می‌توان مجموعه‌ای از مولدهای القایی را به‌صورت $\mathbf{J} := \{\mathbf{J}^k | k \in \mathcal{K}\}$ به‌دست آورد. فرض کنید $L(\mathbf{J}) := \cap\{L(\mathbf{J}^k | k \in \mathcal{K}\}$ و $L_m(\mathbf{J}) := \cap\{L_m(\mathbf{J}^k | k \in \mathcal{K}\}$ باشد. در این صورت $\mathbf{J}$ می‌تواند پاسخی برای مسئله کنترل گسترده باشد. مولد $\mathbf{LOC} = (Z, \Sigma, \xi, z_0, Z_m)$ نسبت به **SUP** نرمال است اگر

$$\begin{aligned}&(i)(\forall z \in Z_L)(\exists s \in L(\mathbf{SUP}))\zeta(z_{L,0}, s) = z\\ &(ii)(\forall z \in Z_L)(\forall \sigma \in \Sigma)[\zeta(z,\sigma)! \Rightarrow\\ &(\exists s \in L(\mathbf{SUP}))[s\sigma \in L(\mathbf{SUP}) \& \zeta(z_{L,0}, s) = z]]\\ &(iii)(\forall z \in Z_{L,m})(\exists s \in L_m(\mathbf{SUP}))\zeta(z_{L,0}, s) = z\end{aligned} \quad (۱۵)$$

همچنین دو مولد $\mathbf{LOC} = (Z, \Sigma, \xi, z_0, Z_m)$ و $\mathbf{J} = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ ایزومورف $\theta$ نامیده می‌شوند اگر نگاشت $\theta: Z \to I$ وجود داشته باشد که (۱۶) برقرار باشد.

$$\begin{aligned}&(i)\ \theta: Z_L \to I \text{ is a bijection}\\ &(ii)\ \theta(z_{L,0}) = i_0 \text{and } \theta(Z_{L,m}) = I_m\\ &(iii)(\forall z \in Z_L)(\forall \sigma \in \Sigma)\zeta_L(z,\sigma)! \Rightarrow\\ &[\kappa(\theta(z),\sigma)! \,\&\, \kappa(\theta(z),\sigma) = \theta(\zeta_L(z,\sigma))]\\ &(iv)(\exists i \in I)(\forall \sigma \in \Sigma)\kappa(i,\sigma)! \Rightarrow\\ &\quad [(\exists z \in Z_L)\zeta_L(z,\sigma)! \,\&\, \theta(z) = i]\end{aligned} \quad (۱۶)$$

در [۱۴] ثابت شده است که **LOC** معادل کنترلی **SUP** نسبت به **G** می‌باشد.

از آنجا که روش ارائه شده در [۱۴]، محلی‌سازی ناظر را نسبت به اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد انجام می‌دهد، در ادامه دو روش برای تعمیم محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر و با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر ارائه شده است.

## ۳-۳- ایجاد کنترل‌کننده‌های محلی با استفاده از حلقه نمودن گذرهای غیرفعال شده در ناظر

الگوریتم محلی‌سازی ناظر در زیربخش ۳-۲ کنترل‌کننده‌های محلی را نسبت به پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد ایجاد می‌نماید. به منظور تعمیم الگوریتم محلی‌سازی ناظر نسبت به هر افراز دلخواه از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر سیستم گسسته-پیش‌آمد، مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در حالت دلخواه $x$ می‌تواند به صورت $D(x) = \cup_k D^k(x)$ نوشته شود که در آن $k \in I^k$ و $I^k$ مجموعه اندیس‌هر یک از سلول‌های پوشش کنترلی $\mathcal{C}^k$ (متناظر با کنترل‌کننده محلی $k$ام) است. در حالت خاص می‌توان افراز مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر سیستم را به‌گونه‌ای انجام داد که هر زیرمجموعه تنها دارای یک پیش-آمد کنترل‌پذیر باشد. لذا می‌توان رابطه (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned}E(x') \cap D(x) &= E(x') \cap [\cup_k D^k(x)]\\ &= \cup_k [E(x') \cap D^k(x)] = \emptyset\end{aligned} \quad (۱۷)$$

که در آن $D^k(x) = \{\sigma \in \Sigma_c^k \,|\, \neg\xi_k(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi_k(x_0, s) = x \,\&\, \delta(q_0, s\sigma)!]\}$ می‌باشد.

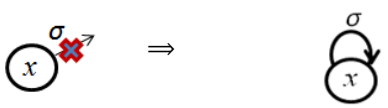
از این‌رو $\forall k \in I^k, E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$ خواهد بود. یعنی این‌که لازم است ناظر یکپارچه رابطه (۱۷) را تأمین نماید. هرچند که الگوریتم کاهش ناظر برای کاهش تعداد حالت‌های ناظر یکپارچه به‌کار می‌رود، با این حال می‌توان این الگوریتم را برای کاهش تعداد حالت‌های هر کنترل‌کننده محلی نیز به‌کار برد.

از آنجا که $k$امین مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تنها می‌تواند در $k$امین کنترل-کننده محلی غیرفعال شود، برای هر جفت حالت $(x, x')$ در $k$امین کنترل‌کننده محلی می‌توان نوشت $\forall j \neq k, E(x') \cap D^j(x) = E(x) \cap D^j(x') = \emptyset$. لذا رابطه (۳) به صورت $E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$ و $E(x) \cap D^k(x') = \emptyset$ ساده‌سازی می‌گردد. این بدان معنی است که

$$\cup_{j \neq k} D^j(x) = D(x) \Longrightarrow E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$$

برقرار بوده، حتی اگر $E(x') \cap D(x) \neq \emptyset$ باشد. با توجه به مفهوم هم-پارانرمال بودن یک ناظر یکپارچه که در [۲۵] معرفی شده است می‌توان برای محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تمامی پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر به‌جز پیش‌آمدی که محلی‌سازی نسبت به آن انجام می-شود، را در حالت‌هایی که غیرفعال شده‌اند به‌صورت حلقه شده[1] ایجاد نمود. این وضعیت در شکل ۳ نشان داده شده است.

با تبدیل پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر غیرفعال به فرم حلقه‌شده (مطابق شکل ۳)، محلی-سازی **SUP** نسبت به $\sigma_k$ با ایجاد اتوماتای $\mathbf{S_k}$ نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای $\sigma_k$ صورت می‌پذیرد. بدیهی است پیش‌آمد $\sigma_k$ (پیش‌آمد کنترل‌پذیری که محلی-سازی نسبت به آن انجام می‌گیرد) به صورت حلقه‌شده تبدیل نخواهد شد چون کنترل‌کننده محلی اختیار غیرفعال کردن آن را دارد.




شکل۳: تبدیل پیش‌آمد کنترل‌پذیر غیرفعال در ناظر یکپارچه به فرم حلقه شده در کنترل کننده محلی ($\sigma \neq \sigma_k$)

[1] Self-looped

حال فرض کنید $\mathcal{R}^k \subseteq X \times X$ یک رابطه دودویی باشد، یعنی برای هر جفت حالت سازگار کنترلی $x$ و $x'$، $(x,x') \in \mathcal{R}^k$ برقرار است اگر

$$E(x') \cap D^k(x) = E(x) \cap D^k(x') = \emptyset \quad (۱۸)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \quad (۱۹)$$

می‌توان تعداد حالت‌های $\mathbf{S_k}$ را با استفاده از سازگاری کنترلی آنها کاهش داد. پوشش $\mathcal{C}^k = \{X_{i^k}^k \subseteq X | i^k \in I^k\}$ از مجموعه حالت‌های $X$ یک پوشش کنترلی روی $\mathbf{S_k}$ نامیده می‌شود اگر (۲۰) و (۲۱) برقرار باشد.

$$(\forall i^k \in I^k)(\forall x, x' \in X_{i^k}^k)(x, x' \in R^k) \quad (۲۰)$$

$$(\forall i^k \in I^k, \sigma \in \Sigma)\,[(\exists j^k \in I^k)(\forall x \in X_{i^k}^k)\xi(x,\sigma)! \Rightarrow \xi(x,\sigma) \in X_{j^k}^k] \quad (۲۱)$$

که در آن $I^k$ مجموعه اندیس‌های $\mathbf{S_k}$ را نشان می‌دهد.

از آنجا که روابط (۱۸) و (۱۹) به روابط ارائه شده برای بیان سازگاری کنترلی در الگوریتم محلی‌سازی ناظر در [۱۴] شبیه هستند، لذا یک پوشش کنترلی که با روابط (۲۰) و (۲۱) ایجاد می‌گردد با پوشش کنترلی ایجاد شده در [۱۴] یکسان خواهد بود. بنابراین می‌توان روابط تکمیلی (۱۴) تا (۱۶) در الگوریتم محلی‌سازی ناظر را برای کاهش تعداد حالت‌های هر کنترل‌کننده محلی به‌کار برد. واضح است که کنترل‌کننده محلی ساده شده با این الگوریتم در حالت خاصی که محلی‌سازی نسبت به یک جزء از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد انجام شود، معادل کنترل‌کننده محلی ایجاد شده باالگوریتم محلی‌سازی ناظر در [۱۴] خواهد بود. همان‌طور که گفته شد این روش به محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد محدود نمی‌شود. در واقع روش پیشنهاد شده برای توزیع وظایف کنترلی ناظر یکپارچه، بر مبنای ویژگی هم‌پارانرمال بودن و پس از آن کاهش تعداد حالت‌های هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر، می‌تواند با افراز دلخواه مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر انجام شود.

## ۴-۳- ساده سازی مدل سیستم گسسته-پیش‌آمد نسبت به پیش‌آمدهای غیرفعال شده در ناظر

با توجه به تعریف مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده $D(x)$ در الگوریتم کاهش ناظر، می‌توان محلی‌سازی ناظر یکپارچه را با ساده‌سازی مدل سیستم گسسته-پیش-آمد انجام داد. طبق تعریف محلی‌سازی ناظر یکپارچه، چنانچه $\sigma \in \Sigma_c^k$ یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر باشد، آنگاه چنین پیش‌آمدی تنها در کنترل‌کننده محلی $k$ام امکان غیرفعال شدن را داشته و سایر کنترل‌کننده‌های محلی با آن مانند یک پیش-آمد کنترل‌ناپذیر برخورد می‌نمایند. برای آنکه مجموعه $D(x)$ برای کنترل‌کننده محلی $k$ام بازنویسی شود، می‌توان $\sigma$ را در حالت‌های مدل گسسته-پیش‌آمد $\mathbf{G}$ متناظر با حالت‌هایی که $\sigma$ در ناظر یکپارچه غیرفعال شده است، تعریف نشده در نظر گرفت، یعنی اینکه

$$\delta(q_0, s)! \,\&\, \neg\delta(q_0, s\sigma)!$$

بدین ترتیب مدل گسسته پیش‌آمد $\mathbf{G_{\not k}}$ به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\mathbf{G_{\not k}} = (Q, \Sigma, \delta_{\not k}, q_0, Q_m)$$

به‌طوری که گذرهای غیرفعال شده در ناظر یکپارچه (به‌جز پیش‌آمدی که محلی-سازی نسبت به آن انجام می‌شود)، در حالت‌های متناظر در مدل گسسته-پیش‌آمد $\mathbf{G}$ حذف شده باشد. بنابراین گذرهای $\mathbf{G_{\not k}}$ طبق رابطه (۲۲) تعریف می‌گردد.

$$\delta_{\not k}(q,\sigma) := \begin{cases} \delta(q,\sigma) \text{ if } \sigma \in \Sigma_c^k \text{or } \sigma \notin D(x) \\ \text{not defined if } \sigma \in \Sigma - \Sigma_c^k,\ \sigma \in D(x) \end{cases} \quad (۲۲)$$

بر اساس $\mathbf{G_{\not k}}$ تعریف شده، می‌توان مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر غیرفعال شده در حالت $x$ از ناظر یکپارچه را برای سیستم گسسته-پیش‌آمد $\mathbf{G_{\not k}}$ به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$D^{\not k}(x) := \{\sigma \in \Sigma \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0, s) = x \,\&\, \delta_{\not k}(q_0, s\sigma)!]\} \quad (۲۳)$$

از طرفی مجموعه پیش‌آمدهای فعال شده در حالت $x$ بر اساس تعریف زیربخش ۱-۳ به‌صورت $E(x) = \{\sigma \in \Sigma | \xi(x,\sigma)!\}$ تعریف شده است. چنانچه این تعریف نسبت به گذرهای تعریف شده در سیستم $\mathbf{G_{\not k}}$ بازنویسی شود تغییری در آن به وجود نمی‌آید. چون گذرهای فعال زیرمجموعه گذرهای سیستم $\mathbf{G}$ بوده و طبق رابطه (۲۲) چنین گذرهایی در سیستم $\mathbf{G_{\not k}}$ حذف نمی‌شوند.

همچنین از آنجا که حالت‌های سیستم $\mathbf{G_{\not k}}$ همان حالت‌های سیستم $\mathbf{G}$ هستند لذا در تعاریف $M$ و $T$ در رابطه (۴) نیز تغییری ایجاد نمی‌شود. بنابراین کافیست ثابت شود که اگر به جای $D^k$ از $D^{\not k}$ استفاده گردد، شرط اول سازگاری کنترلی (۱۰) برقرار خواهد بود. قضیه ۱ به اثبات این موضوع می‌پردازد.

قضیه ۱: چنانچه $D^k(x)$ مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در حالت $x$ توسط کنترل‌کننده محلی $k$ام در (۱۰) باشد و $D^{\not k}(x)$ طبق (۲۳) تعیین شده باشد، آنگاه $D^{\not k}(x) = D^k(x)$ است.

اثبات: اثبات این قضیه در دو مرحله قابل انجام است: الف- $D^{\not k}(x) \subseteq D^k(x)$ ب- $D^k(x) \subseteq D^{\not k}(x)$

الف- روند اثبات را می‌توان به صورت زیر آغاز نمود.

$$\forall \sigma \in D^{\not k}(x) \Rightarrow \sigma \in \{\sigma \in \Sigma \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0, s) = x \,\&\, \delta_{\not k}(q_0, s\sigma)!]\}$$

چنانچه $\sigma \in \Sigma - \Sigma_c^k,\ \sigma \in D(x)$ باشد $\neg\delta_{\not k}(q_0, s\sigma)!$ است. همچنین $\sigma \notin D(x) \Rightarrow \sigma \notin D^{\not k}(x)$ برقرار است. لذا لازم است $\sigma \in \Sigma_c^k$ بوده و می‌توان نوشت:

$$\sigma \in \{\sigma \in \Sigma_c^k \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0, s) = x \,\&\, \delta(q_0, s\sigma)!]\} = D^k(x)$$

ب- روند اثبات را می‌توان به صورت زیر آغاز نمود.

$$\forall \sigma \in D^k(x) \Rightarrow \sigma \in \{\sigma \in \Sigma_c^k \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0, s) = x \,\&\, \delta(q_0, s\sigma)!]\}$$

بر اساس رابطه (۱۰)، چنانچه $\sigma \in \Sigma_c^k$ باشد $\delta_{\not k}(q_0, s\sigma) = \delta(q_0, s\sigma)$ است. لذا می‌توان نوشت:

$$\sigma \in \{\sigma \in \Sigma \,|\, \neg\xi(x,\sigma)! \,\&\, (\exists s \in \Sigma^*)[\xi(x_0, s) = x \,\&\, \delta_{\not k}(q_0, s\sigma)!]\} = D^{\not k}(x)$$

بدین ترتیب اثبات قضیه کامل می‌شود.

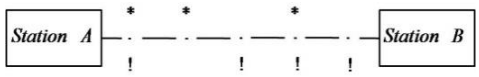
روش ارائه شده در این مقاله برای هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر یا هر افرازی از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر قابل انجام است. لذا در مقایسه با روش ارائه شده در [۱۴]، این روش برای محلی‌سازی ناظر انعطاف‌پذیرتر خواهد بود. به عبارت دیگر ممکن است کنترل‌کننده‌های محلی به دست آمده با روش جاری به تعداد حالت-های کمتری منتهی شوند. به ویژه در شرایطی که سیستم گسسته-پیش‌آمد از یک جزء تشکیل شده باشد یا این که برخی از اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد دارای چند پیش‌آمد کنترل‌پذیر باشند. در مثال ۴-۱ ارائه شده برای کنترل نظارتی مسیر تردد، تعداد حالت‌های هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی بدست آمده نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر، در مقایسه با تعداد حالت‌های کنترل‌کننده محلی به دست آمده با روش ارائه شده در [۱۴]، کمتر است.

## ٤- مثال‌هایی از محلی‌سازی کنترل نظارتی یکپارچه

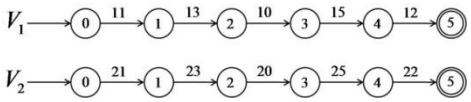
به منظور راستی‌آزمایی روش ارائه شده در این مقاله، محلی‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد[۱] و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج[۲] در ایستگاه تقویت فشار گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ٤-١- محلی‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد

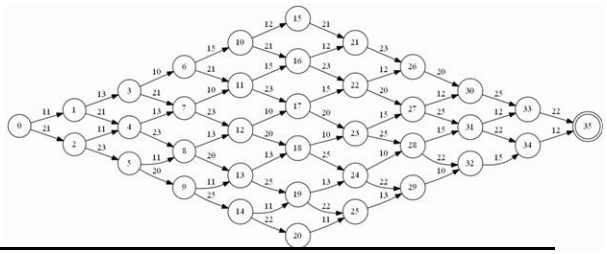
مسیر ترددی را با دو ایستگاه A و B مطابق شکل۴ در نظر بگیرید. مسیری که ایستگاه‌های A و B را به هم متصل می‌کند شامل ۴ بخش که برخی از آنها دارای چراغ راهنمایی و یا تشخیص دهنده عبور هستند، تشکیل شده است [۱۷]. دو خودرو $\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}$ به طور همزمان از مسیر استفاده می‌کنند. $\mathbf{V}_i, i = 1,2$ ممکن است در حالت صفر (در ایستگاه A)، حالت $j$ (هنگام تردد از بخش‌های $j = 1, \dots, 4$) یا حالت ۵ (در ایستگاه B) قرار داشته باشند. مولد $\mathbf{V}_i, i = 1,2$ در شکل ۵ نشان داده شده است. پیش‌آمدهای فرد کنترل‌پذیر بوده و پیش‌آمدهای زوج کنترل‌ناپذیرند. مدل گسسته-پیش‌آمد مسیر تردد در اثر قرار گرفتن خودروها در هر یک از بخش‌های مسیر به‌صورت $\mathbf{G} = \mathbf{sync}(\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2})$ محاسبه شده و مولد آن مطابق شکل ۶ به دست می‌آید. توضیحات مربوط به دستور **sync** و سایر دستورات TCT که در این بخش استفاده شده، در پیوست مقاله ارائه شده است.




شکل ۴: شماتیک یک مسیر تردد

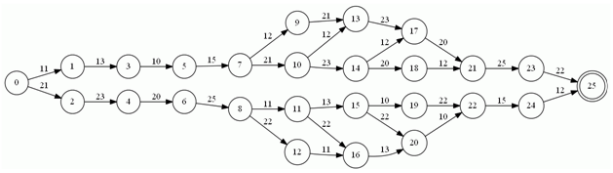


شکل ۵: مدل گسسته-پیش‌آمد هر خودرو

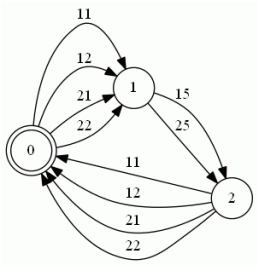


شکل ۶: مدل گسسته-پیش‌آمد سیستم $\mathbf{G}$

به منظور جلوگیری از تصادم، لازم است کنترل چراغ‌های راهنمایی تضمین کند که خودروهای $\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}$ در هیچ بخشی از مسیر به صورت همزمان تردد نمی‌کنند. چنین منطق کنترلی را می‌توان با اجرای دستور $\mathbf{E} = \mathbf{mutex}(\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}, [(1,1),(2,2),(3,3),(4,4)])$ روی مدل سیستم گسسته-پیش‌آمد ایجاد نمود. برای طراحی ناظر نرمال از دستور $\mathbf{SUP} = \mathbf{supnorm}(\mathbf{G}, \mathbf{E}, [13,23])$ استفاده می‌گردد. چنین ناظری که در شکل ۷ نشان داده شده است، پیش‌آمدهای 13 و 23 را غیرفعال نمی‌کند. بنابراین مشاهده پیش‌آمدهای 13 و 23 تأثیری بر رفتار ناظر ندارد. ناظر نرمال کاهش یافته با استفاده از دستور supreduce در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می-گردد که تعداد حالت‌ها شدیداً کاهش یافته به‌طوری‌که از ۲۶ حالت در ناظر یکپارچه به ۳ حالت در ناظر کاهش یافته رسیده است. دستور supreduce از اطلاعات جدول داده‌های کنترلی[۳] که با استفاده از دستور SA قابل مشاهده است، برای کاهش تعداد حالتها استفاده می‌کند. این جدول فهرست پیش‌آمدهای کنترل-پذیری را که در برخی حالت‌ها غیرفعال شده‌اند، نشان می‌دهد (جدول ۱).



شکل ۷: ناظر نرمال مسیر تردد $\Sigma_{uo} = \{13,23\}$



شکل ۸: ناظر نرمال کاهش یافته برای مسیر تردد

جدول ۱: جدول داده‌های کنترلی ناظر نرمال مسیر تردد

| حالت | پیش‌آمد غیرفعال شده | حالت | پیش‌آمد غیرفعال شده |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۱ | ۵ | ۲۱ |
| ۲ | ۱۱ | ۶ | ۱۱ |
| ۳ | ۲۱ | ۱۸ | ۲۵ |
| ۴ | ۱۱ | ۱۹ | ۱۵ |

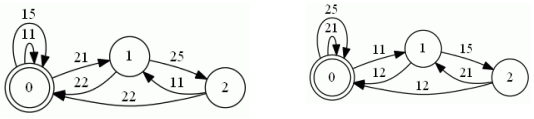
کنترل‌کننده‌های محلی که با استفاده از الگوریتم localize ایجاد شده‌اند در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. الگوریتم localize هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی را بر اساس کاهش حالت‌های ناظر یکپارچه نسبت به پیش‌آمدهای غیرفعال شده در آن

[۱] Guide way

[۲] Surge-Avoidance Supervisor

[۳] Control Data

عامل کنترلی ایجاد می‌کند مثلاً برای ایجاد کنترل‌کننده محلی $V_1$ تنها پیش-آمدهای ۱۱ و ۱۵ در جدول ۱ غیرفعال فرض می‌گردد. از آنجا که تعداد حالت‌های هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی با تعداد حالت‌های ناظر کاهش یافته برابر است، ناظر نرمال طراحی شده طبق معیار تعریف شده در [۱۴] قابل محلی‌سازی نیست (تعداد حالت‌های هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی باید از تعداد حالت‌های ناظر کاهش یافته کمتر باشد). این در حالی است که با روش ارائه شده در بخش ۳-۳ می‌توان این ناظر را نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر محلی‌سازی نمود. بر اساس جدول ۱ تنها پیش‌آمدی غیرفعال فرض خواهد شد که محلی‌سازی نسبت به آن انجام می‌گیرد، مثلاً برای محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمد ۲۱، این پیش-آمد تنها در حالت‌های ۱، ۳ و۵ غیرفعال می‌گردد. همچنین برای محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمد ۱۱، این پیش‌آمد تنها در حالت‌های ۲، ۴ و ۶ غیرفعال می‌گردد. اگرچه کاهش تعداد حالت‌های ناظر به‌صورت دستی فرایندی پیچیده و گاه غیرممکن است با این وجود در این مثال سازگاری کنترلی حالت‌های صفر و ۲ در الگوریتم‌های کاهش ناظر یکپارچه، محلی‌سازی ناظر نسبت به $V_2$ و محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمد کنترل‌پذیر ۲۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۷ و جدول ۱ واضح است که $E(0) = \{11,21\}, D(0) = \emptyset$ و $E(2) = \{23\}, D(2) = \{11\}$ برقرار است. لذا $E(0) \cap D(2) = \{11\}$ بوده یعنی حالت‌های صفر و ۲ در پوشش کنترلی ناظر کاهش یافته سازگار کنترلی نیستند. از طرفی $E(0) = \{11,21\}, D^2(0) = \emptyset$ و $E(2) = \{23\}, D^2(2) = \{11\}$ بوده و $E(0) \cap D^2(2) = \{11\}$ است. بنابراین حالت‌های صفر و ۲ در پوشش کنترل‌کننده محلی $V_2$ نیز سازگار کنترلی نیستند. این درحالیست که برای ایجاد پوشش کنترلی در محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش-آمد ۲۱ مجموعه پیش‌آمدهای فعال‌شده و مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در حالت‌های صفر و ۲ به‌صورت $E(0) = \{11,21\}, D^{21}(0) = \emptyset$ و $E(2) = \{23\}, D^{21}(2) = \emptyset$ به‌دست آمده و $E(0) \cap D^{21}(2) = E(2) \cap D^{21}(0) = \emptyset$ خواهد بود. از سوی دیگر $M(0) = M(2) = 0$ است. بنابراین حالت‌های صفر و ۲ در پوشش کنترل‌کننده محلی مربوط به پیش‌آمد ۲۱ سازگار کنترلی بوده و می‌توانند با هم در یک سلول انباشته شوند. این روش حداقل اطلاعات لازم را برای تصمیم‌گیری ناظر به‌منظور غیرفعال کردن هر پیش-آمد ارائه می‌کند. کنترل‌کننده‌های محلی ایجاد شده در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود در این روش تعداد حالت‌های هر یک از کنترل‌کننده‌های محلی به حداکثر ۲ حالت کاهش یافته و پیاده‌سازی آن روی سیستم‌های صنعتی ساده‌تر خواهد بود. از آنجا که پیش‌آمدهای ۱۳ و ۲۳ اثری بر رفتار کنترلی ناظر ندارند (در هیچ حالتی غیرفعال نمی‌شوند) گذار آنها در شکل ۱۰- و نشان داده نشده است. همچنین، می‌توان دید که عملکرد همزمان کنترل‌کننده‌های محلی در $\mathbf{G}$ معادل کنترلی ناظر نرمال یکپارچه نشان داده شده در شکل ۷ می‌باشد. روش دوم برای ایجاد کنترل‌کننده‌های محلی نسبت به هر پیش‌آمد کنترل‌پذیر بر اساس حذف پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر (غیر از پیش‌آمدی که محلی‌سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌شود) در حالت‌هایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد است که متناظر با حالتی در ناظر یکپارچه هستند که در آن حالت غیرفعال شده‌اند، یعنی این‌که آن حالت با سلسله پیش‌آمدی قابل دسترس است که حالت متناظر در ناظر، با آن سلسله پیش-آمد قابل دسترس باشد. مثلاً برای ایجاد کنترل‌کننده محلی نسبت به پیش‌آمد ۲۱ این پیش‌آمد در حالت‌های ۱، ۳و ۵ غیرفعال می‌گردد. این حالت‌ها به ترتیب متناظر با حالت‌های ۱، ۳ و۶ در $\mathbf{G}$ هستند.

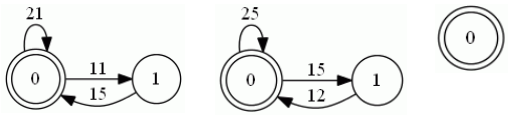



الف- کنترل‌کننده محلی $V_1$ ب- کنترل‌کننده محلی $V_2$

شکل ۹: کنترل‌کننده‌های محلی متناظر با هر یک از عامل‌ها

همچنین نتیجه محلی‌سازی با روش‌های ارائه شده در بخش ۳-۳ و ۳-۴ یکسان بوده و مطابق شکل ۱۰ خواهد بود. قضیه ۱ نیز در تأیید همین موضوع ارائه شده است.

الف- پیش‌آمد ۱۱ ب- پیش‌آمد ۱۵



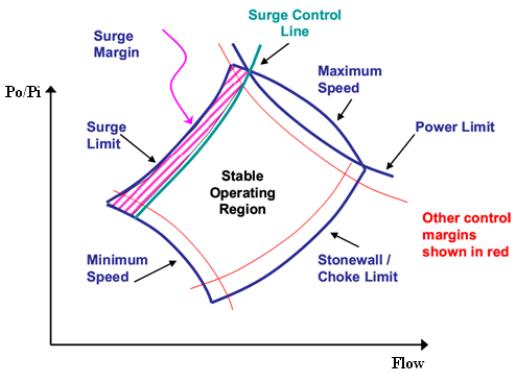

ج- پیش‌آمد ۲۱ د- پیش‌آمد ۲۵ و- پیش-آمدهای ۱۳و۲۳

شکل ۱۰: کنترل‌کننده‌های محلی متناظر با هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر

## ۲-٤- محلی‌سازی کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج

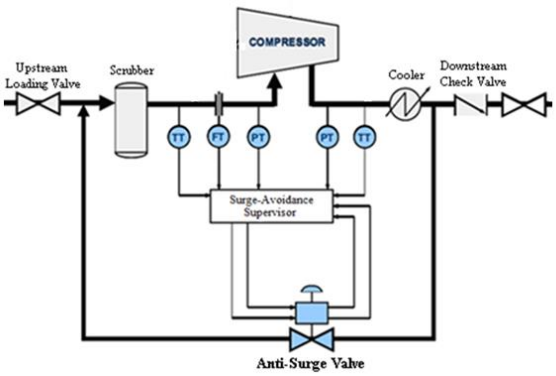
گاز طبیعی یکی از منابع مهم تأمین انرژی در دنیا بوده که عمدتاً از خطوط لوله برای انتقال و توزیع آن در مناطق مختلف استفاده می‌شود. از آنجا که جریان گاز در خطوط لوله با افت فشار همراه است از ایستگاه‌های تقویت فشار در فواصل مختلف و بسته به توپوگرافی زمین برای جبران افت فشار استفاده می‌گردد. هر ایستگاه تقویت فشار از یک یا چند ردیف کمپرسور همراه با عملگرهای آن که ممکن است مکانیکی یا الکتریکی باشد تشکیل شده است. به منظور بهره‌برداری از یک کمپرسور در ناحیه پایدار[۱]، لازم است فشار مسیرهای مکش[۲] و تخلیه[۳] و نیز سرعت کمپرسور در محدوده عادی عملکرد قرار داشته باشند(شکل ۱۱) [۲۷].

[۱] Stable Operating Region
[۲] Suction
[۳] Discharge




شکل ۱۱: ناحیه عملکرد کمپرسور در بهره‌برداری ایمن [۲۷]

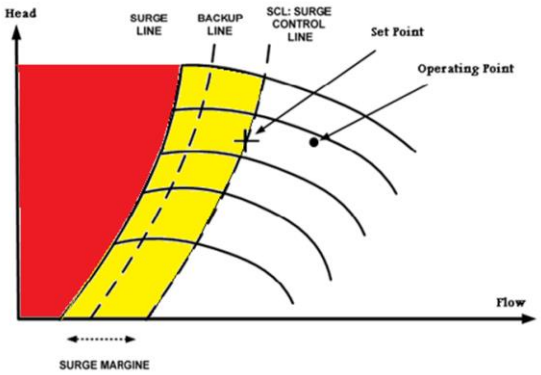
برای تحقق این اهداف دو نوع کنترل مورد نیاز است: کنترل فشار و کنترل دبی برای هر کمپرسور که به ترتیب توسط کنترل سرعت کمپرسورها و کنترل میزان باز و بسته شدن شیر کنارگذر هر کمپرسور تأمین می‌گردد. در شکل ۱۲ نمودار شماتیکی کنترل حداقل دبی برای پیش‌گیری از وقوع سرج نشان داده شده است. پدیده سرج، به معنی نوسان گاز در طول محور کمپرسور بوده که در مشخصه عملکردی کمپرسور نشان داده می‌شود. پیش‌گیری از وقوع سرج با استفاده از باز و بسته نمودن پیوسته شیر کنارگذر کمپرسور انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای "کنترل غلبه بر وقوع سرج"[۱] گزارش شده است [۲۹، ۲۸] که برخی از آن‌ها از روش‌های کنترل زمان تحریک و برخی دیگر از روش‌های کنترل پیش‌آمد تحریک و به‌صورت تجربی استفاده نموده‌اند. روش "پیش‌گیری از وقوع سرج"[۲] روشی است که در این مثال با استفاده از نظریه کنترل نظارتی مورد بررسی قرار گرفته و ناظر یکپارچه طراحی شده نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر محلی‌سازی می‌گردد. از آنجا که هدف این مقاله مدل‌سازی گسسته-پیش‌آمد ایستگاه تقویت فشار گاز و طراحی کنترل نظارتی برای پیش‌گیری از وقوع سرج نیست، توضیحات کامل در [۳۰] ارائه شده است.



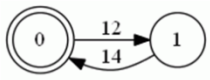

شکل ۱۲: شماتیک یک ایستگاه تقویت فشار گاز تحت کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج

برای ایجاد منطق کنترلی، خط SCL بر اساس نسبت فشار و دبی کمپرسور در ناحیه عملکرد آن ایجاد می‌گردد (شکل ۱۳). مدل گسسته-پیش‌آمد پیش‌گیری از وقوع سرج که بر اساس عبور از خط SCL ساخته می‌شود، دارای دو حالت و دو پیش‌آمد کنترل‌ناپذیر است (شکل ۱۴). پیش‌آمد ۱۲ نشان دهنده عبور نقطه کار کمپرسور از خط SCL به سمت چپ و پیش‌آمد ۱۴ عبور از SCL به سمت راست می‌باشد.

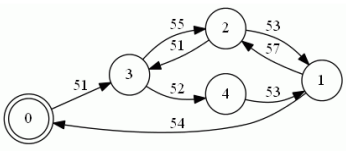
شیر کنارگذر اصلی‌ترین تجهیز برای جلوگیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز می‌باشد، به‌طوری‌که با تأمین حداقل دبی گاز در کمپرسور نقطه کار را در سمت راست خط SCL حفظ کند. یک مدل گسسته-پیش‌آمد برای شیر کنارگذر همراه با کنترل‌کننده PI در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در زمانی‌که نقطه کار در سمت راست SCL قرار دارد کنترل‌کننده PI وظایف کنترلی را به عهده دارد. در شکل ۱۵ پیش‌آمد ۵۱ فرمان باز شدن شیر، ۵۵ توقف باز شدن، ۵۳ فرمان بسته شدن، ۵۷ توقف بسته شدن، ۵۲ باز شدن کامل شیر و ۵۴ بسته شدن کامل شیر است. پیش‌آمدهای فرد، کنترل‌پذیر و پیش‌آمدهای زوج کنترل‌ناپذیرند.




شکل۱۳: ناحیه سرج واقعی کمپرسور (سمت چپ Surge Line) و ناحیه سرج فرضی برای ایجاد منطق کنترلی (ناحیه بین SCL و Surge Line)




شکل۱۴: مدل گسسته-پیش‌آمد عبور نقطه کار از خط سرج




شکل۱۵: مدل گسسته-پیش‌آمد از شیر کنارگذر همراه با کنترل‌کننده PI

با داشتن مدل گسسته-پیش‌آمد ایستگاه تقویت فشار گاز و منطق کنترلی در شکل-های ۱۶ و ۱۷، ناظر یکپارچه طراحی شده مطابق شکل ۱۸ به دست می‌آید. از آنجا که این ناظر تنها یک عامل کنترلی (شیر کنارگذر) دارد، لذا محلی‌سازی آن بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۴] امکان‌پذیر نیست و نمی‌توان محلی‌سازی را با استفاده از دستور localize در TCT انجام داد. این در حالی است که بر اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله، می‌توان ناظر یکپارچه را به منظور کاهش تعداد حالت‌ها، نسبت به هر یک از پیش‌آمدها محلی‌سازی نمود. این کار با استفاده از روش ارائه شده در بخش ۳-۴ و با تغییراتی که مطابق قضیه ۱ در مدل گسسته-پیش‌آمد (شکل ۱۶) صورت می‌گیرد، قابل انجام است. به همین منظور از جدول داده‌های کنترلی ناظر یکپارچه استفاده می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲: جدول داده‌های کنترلی ناظر پیش‌گیری از وقوع سرج

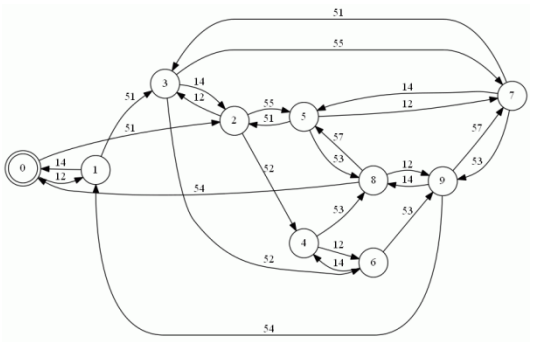
| حالت | پیش‌آمد غیرفعال شده | حالت | پیش‌آمد غیرفعال شده |
|---|---|---|---|
| ۰ | ۵۱ | ۶ | ۵۱ |

[۱] Anti-Surge Control

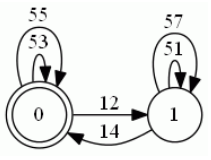
[۲] Surge-Avoidance

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۲ | ۵۵ | ۷ | ۵۷ |
| ۴ | ۵۳ | ۸ | ۵۳ |

مثلاً برای محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمد ۵۱ لازم است پیش‌آمدهای نشان داده شده در جدول ۲ به‌جز پیش‌آمد ۵۱ در حالت‌هایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد متناظر با حالت‌های ناظر پیش‌گیری از وقوع سرج که در آن غیرفعال شده‌اند، حذف (تعریف نشده) گردند. مثلاً حالت۷ در ناظر، متناظر با حالت۸ در سیستم گسسته-پیش‌آمد است لذا پیش‌آمد ۵۷ در این حالت حذف می‌گردد. حالت ۶ در ناظر در اثر وقوع پیش‌آمدهای (از چپ به راست) ۵۳،۵۵،۱۴،۵۱،۱۲ایجاد شده است، در مدل گسسته-پیش‌آمد با وقوع این سلسله پیش‌آمد حالت ۸ ایجاد می‌گردد. نتیجه محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمد ۵۱ مطابق شکل ۱۹ به دست می‌آید. نتیجه محلی‌سازی ناظر نسبت به سایر پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. بنابراین می‌توان گفت، محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر پیش‌آمد کنترل‌پذیر، با حذف گذرهایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند ولی کنترل‌کننده محلی اختیار غیرفعال کردن آنها را ندارد و کاهش ناظر یکپارچه نسبت به مدل گسسته-پیش‌آمد ساده شده با استفاده از دستور supreduce قابل انجام است. لازم به‌ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش‌آمد کنترل‌پذیری که محلی‌سازی نسبت به آن انجام می‌پذیرد، نمی‌باشد. پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های محلی که عملکرد همزمان آن‌ها در سیستم گسسته-پیش‌آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه است، ساده‌تر از پیاده‌سازی ناظر یکپارچه خواهد بود. از آنجا که کنترل‌کننده‌های محلی متناظر با پیش‌آمدهای ۵۵ و ۵۷ یکسان هستند، نتیجه الگوریتم محلی‌سازی برای هر دو پیش‌آمد در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

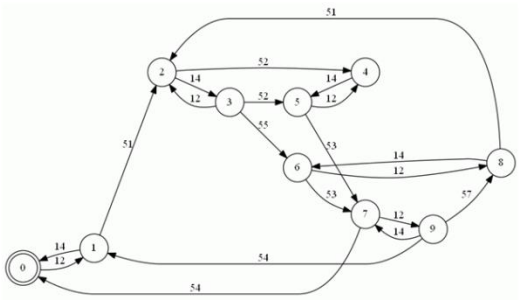


شکل ۱۶- مدل گسسته-پیش‌آمد ایستگاه تقویت فشار گاز برای پیش‌گیری از وقوع سرج

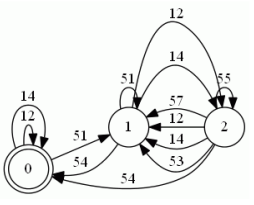


شکل ۱۷: مشخصه پیش‌گیری از وقوع سرج

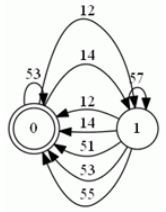
همچنین ناظر کاهش یافته با استفاده از دستور supreduce معادل کنترل‌کننده محلی به دست آمده در شکل ۲۱ است. بنابراین محلی‌سازی ناظر نسبت به پیش‌آمدهای ۵۵ و ۵۷ برای پیاده‌سازی ساده‌تر منطق کنترلی نسبت به این پیش‌آمدها مؤثر نبوده است.



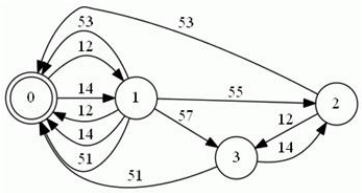
شکل ۱۸: کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج



شکل ۱۹: کنترل‌کننده محلی متناظر با پیش‌آمد ۵۱



شکل ۲۰: کنترل‌کننده محلی متناظر با پیش‌آمد ۵۳



شکل ۲۱: کنترل‌کننده محلی متناظر با هر یک از پیش‌آمدهای ۵۵ و ۵۷

## ۵- نتیجه‌گیری

محلی‌سازی کنترل‌نظارتی یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت‌ها نسبت به هر یک از عامل‌های کنترلی می‌باشد. روشی که در [۱۴] برای محلی‌سازی کنترل نظارتی ارائه شده است بر مبنای کاهش ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد می‌باشد. چنانچه فرایند تحت نظارت تنها از یک جزء تشکیل شده باشد، محلی‌سازی با این روش، امکان‌پذیر نیست. در این مقاله، با انجام تغییراتی در الگوریتم کاهش ناظرروش محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر ارائه شده است. دو روش برای انجام این کار معرفی شده است: ۱- حلقه نمودن گذرهایی غیر از گذری که محلی‌سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌گیرد در هر حالتی از ناظر یکپارچه که گذر در آن غیرفعال شده است. ۲- گذرهایی از سیستم گسسته-پیش‌آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، حذف می‌شوند و ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر نسبت به سیستم گسسته-پیش‌آمد ساده شده کاهش می‌یابد. لازم به‌ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش‌آمد کنترل‌پذیری که محلی‌سازی نسبت به آن انجام می‌پذیرد، نمی‌باشند. در قضیه ۱ ثابت شد که نتیجه دو روش یکسان است. از آنجا که روش ارائه شده در [۱۴] برای سیستم‌های گسسته-پیش‌آمدی ارائه شده که دارای چندین جزء باشند، روش ارائه شده در این مقاله نسبت به آن جامع‌تر است. یعنی این‌که نه‌تنها قابلیت تعمیم برای محلی‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر را دارد بلکه امکان محلی‌سازی نسبت به مجموعه پیش‌آمدهای هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش‌آمد را نیز دارد.

## مراجع

[1] Y. Willner, M. Heymann, Supervisory control of concurrent discrete-event systems, International Journal of Control, 54(1991), 1143-1169.
[2] J. Komenda, J. H. Van Schuppen, Modular Control of Discrete-Event Systems with Coalgebra, IEEE Trans. Autom. Control, 53(2008), 447-460.
[3] J. Komenda, T. Masopust, J. H.van Schuppen, On conditional decomposability. Systems & Control Letters, 61(2012), 1260-1268.
[4] H. Zhong, W. M. Wonham, On the consistency of hierarchical supervision in discrete-event systems. IEEE Trans. Autom. Control, 35(1990), 1125-1134.
[5] K. Schmidt, T. Moor, S. Perk, Nonblocking Hierarchical Control of Decentralized Discrete Event Systems. IEEE Trans. Autom. Control, 53(2008), 2252-2265.
[6] K. Schmidt, C. Breindl, Maximally Permissive Hierarchical Control of Decentralized Discrete Event Systems. IEEE Trans. Autom. Control, 56(2011), 723-737.
[7] R. Malik, H. Flordal, P. Pena, conflicts and projections. in Proc. 1st IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems (DCDS'07).
[8] S. Mohajerani, R. Malik, M. Fabian, AN algorithm for weak synthesis observation equivalence for compositional supervisor synthesis. in Proc. WODES'12, 239-244.
[9] K. Rudie, W. M. Wonham,Think globally, act locally: decentralized supervisory control. IEEE Trans. Autom. Control, 37(1992), 1692-1708.
[10] T. S. Yoo, S. Lafortune, A General Architecture for Decentralized Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Discrete Event Dyn. Syst., 12(2002),335-377.
[11] K.Cai, R. Zhang, W. M. Wonham, (2015). On Relative Coobservability of Discrete-Event Systems. in Proc. Amer. Control Conf. (ACC15), Chicago, IL, 371-376.
[12] F. Lin, W. M. Wonham, On observability of discrete-event systems, Information Sciences. 44(1988), 173-198.
[13] L. Lin, A. Stefanescu, R. Su, On Distributed and Parameterized Supervisor Synthesis Problems. IEEE Trans. Autom. Control, 61(2016), 777-782.
[14] K. Cai, W. M. Wonham, Supervisor Localization: A Top-Down Approach to Distributed Control of Discrete-Event Systems. IEEE Trans. Autom. Control,55(2010), 605-618.
[15] L. Feng, W. M. Wonham, Supervisory Control Architecture for Discrete-Event Systems. IEEE Trans. Autom. Control, 53(2008), 1449-1461.
[16] J. Komenda, T. Masopust, J. H. van Schuppen, Coordination control of discrete-event systems revisited. Discrete Event Dynamic Systems, 25(2015), 65-94.
[17] W. M. Wonham, Supervisory control of discrete-event systems. University of Toronto,2015,http://www.control.utoronto.ca/DES
[18] R. Su, W. M. Wonham, Supervisor reduction for discrete-event systems, Discrete-event Dyn. Syst., 14(2004), 31-53.
[19] W. M. Wonham, Control Design Software: TCT. Developed by Systems Control Group, University of Toronto, Canada, 2014,http://www.control.utoronto.ca/cgi-bin/dlxptct.cgi.
[20] C. G. Cassandras, S. Lafortune, Introduction to Discrete Event Systems (2nd ed.). Springer, NewYork, 2008.
[21] L. Feng, W. M. Wonham, Supervisory Control Architecture for Discrete-Event Systems, IEEE Trans. Autom. Control, 53(2008), 1449-1461.
[22] A. Afzalian, A. Saadatpoor, W. M. Wonham, Systematic supervisory control solutions for under-load tap-changing transformers. Control Engineering Practice, 16(2008), 1035-1054.
[23] R. Cieslak, C. Desclaux, A. S. Fawaz, P. Varaiya, Supervisory control of discrete-event processes with partial observations. IEEE Trans. Autom. Control, 33(1988), 249-260.
[24] K. Cai, R. Zhang, W. M. Wonham, Relative Observability of Discrete-Event Systems and its Supremal Sublanguages. IEEE Trans. Autom. Control, 60(2015), 659- 670.
[25] V. Saeidi, Ali A. Afzalian, D. Gharavian, On coparanormality in distributed supervisory control of discrete-event systems, submitted to Asian Journal of Control.
[26] K. T. Seow, M. T. Pham, C. Ma, M. Yokoo, Coordination Planning: Applying Control Synthesis Methods for a Class of Distributed Agents, IEEE Trans. Control Syst. Technol., 17(2009), 405-415.
[27] S. M. Folga, Natural Gas Pipeline Technology Overview, Argonne national laboratory, 2007.
[28] J. T. Gravdahl and O. Egeland, Compressor Surge and Rotating Stall-Modeling and Control, Springer-Verlag, London, 1999.
[29] S. Y. Yoon, Z. Lin and P. E. Allaire, "Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings-Theory and Implementation", Springer-Verlag, London, 2013.
[30] V. Saeidi, Ali A. Afzalian, D. Gharavian, Discrete-Event Modeling and Supervisory Control Synthesis for a Gas Transmission System, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Accepted with minor revision.

## پیوست

در جدول زیر توضیحات کوتاهی در مورد تعدادی از دستورات TCT استفاده شده در مقاله ارائه می گردد.

| | |
|---|---|
| Sync | برای سنکرون کردن دو سیستم گسسته-پیش‌آمد استفاده می‌شود. |
| Mutex | برای حذف کردن برخی از حالت‌ها از یک مشخصه استفاده می‌شود. |
| Supcon | برای طراحی ناظر با مشاهدات کامل استفاده می‌شود. |
| Supnorm | برای طراحی ناظر نرمال با مشاهدات جزئی استفاده می‌شود. |
| Supreduce | برای کاهش ناظر و به‌دست آوردن کنترل‌کننده‌ای با تعداد حالت کمتر استفاده می‌شود. |
| Localize | برای محلی‌سازی ناظر نسبت به اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد استفاده می‌شود. |
| SA | برای مشاهده جدول داده‌های کنترلی یک ناظر استفاده می‌شود. |