

# محلی سازی کنترل نظارتی گسسته-پیش آمد نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر

وحید سعیدی<sup>۱</sup>، علی اکبر افزلیان<sup>۲</sup>، داود غرویان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل دکتری مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، v\_saeidi@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، afzalian@sbu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه مخابرات، دانشگاه شهید بهشتی، d\_gharavian@sbu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۱۹

ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۷/۱۵

ویرایش اول: ۱۳۹۶/۴/۹

دریافت: ۱۳۹۵/۹/۳۰

**چکیده:** در طراحی کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش آمد 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-پیش آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه باشد. در این مقاله برای ساده نمودن پیاده‌سازی کنترل نظارتی روی سیستم‌های صنعتی، محلی‌سازی ناظر نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر 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-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، غیر از گذر کنترل پذیری 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 انعطاف پذیرتر 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

مشخصه معرفی شده است [۱۳]. در رویکرد بالا به پایین، کنترل نظارتی گسترده<sup>۱۴</sup> که با استفاده از الگوریتم محل‌سازی ناظر<sup>۱۳</sup> 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 می‌باشد [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. اگرچه در کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد پایین به بالا<sup>۱۸</sup>، با ایجاد هماهنگ‌کننده<sup>۱۹</sup> درگیری بین ناظرهای غیرمتمرکز از بین می‌رود [۱۵-۱۷].

در این مقاله، الگوریتم محل‌سازی ناظر که در [۱۴] ارائه شده است، برای محاسبه کنترل‌کننده‌های محلی متناظر با هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تعمیم<sup>۲۰</sup> داده می‌شود. الگوریتم محل‌سازی ناظر روشی برای محاسبه کنترل‌کننده‌های محلی در سیستم‌های گسسته-پیش‌آمدی است که از چند جزء<sup>۲۱</sup> تشکیل شده باشند. این روش با توسعه الگوریتم کاهش ناظر<sup>۲۲</sup> نسبت به پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر در هر یک از اجزاء سیستم ارائه شده است [۱۸]. در این مقاله، نشان داده می‌شود که ناظر یکپارچه را می‌توان نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر محلی‌سازی نمود و کنترل‌کننده‌های محلی به دست آورد که عملکرد همزمان آن‌ها در سیستم گسسته-پیش‌آمد معادل کنترلی<sup>۲۳</sup> ناظر یکپارچه باشد. دو روش برای تعمیم محل‌سازی ناظر یکپارچه پیشنهاد می‌گردد، ۱- حلقه نمودن گذرهای غیر از گذری که محل‌سازی 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 می‌گیرد. ۲- گذرهای از سیستم گسسته-پیش‌آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، حذف می‌شوند و ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم

نظریه کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد<sup>۱</sup> 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 منطبق کنترلی<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>، پودمانی<sup>۴</sup> یا سلسله مراتبی<sup>۵</sup> طراحی نمود. در کنترل نظارتی یکپارچه، اطلاعات کافی برای تأمین مشخصه<sup>۶</sup> (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 و سلسله مراتبی [۵، ۶] و نیز روش‌های مبتنی بر اتوماتای غیرقطعی<sup>۷</sup> [۷، ۸] 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<sup>۸</sup> پیدا کند.

در [۱۲] شرایطی برای معادل بودن ناظر یکپارچه و ناظر غیرمتمرکز<sup>۹</sup> در زبان‌های بسته<sup>۱۰</sup> ارائه شده است، اما موضوع انسداد<sup>۱۱</sup> ناظر مورد بررسی قرار نگرفته است. تفکیک‌پذیری<sup>۱۲</sup> و تفکیک‌پذیری قوی<sup>۱۳</sup> (هم‌زمان بودن<sup>۱۴</sup>) برای ایجاد کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد بالا به پایین<sup>۱۵</sup> در [۹] معرفی شده است. اخیراً، روشی برای یافتن زیر زبان تفکیک‌پذیر یک

<sup>13</sup> Strong Decomposability

<sup>14</sup> Conormality

<sup>15</sup> Top-Down Approach

<sup>16</sup> Distributed Supervisory Control

<sup>17</sup> Supervisor Localization

<sup>18</sup> Bottom-Up Approach

<sup>19</sup> Coordinator

<sup>20</sup> Generalize

<sup>21</sup> Component

<sup>22</sup> Supervisor Reduction

<sup>23</sup> Control Equivalent

<sup>1</sup> Supervisory Control of Discrete-Event Systems

<sup>2</sup> Control logic

<sup>3</sup> Monolithic

<sup>4</sup> Modular

<sup>5</sup> Hierarchical

<sup>6</sup> Specification

<sup>7</sup> Non-deterministic Automata

<sup>8</sup> Conflict

<sup>9</sup> Decentralized

<sup>10</sup> Prefix closed Languages

<sup>11</sup> Blocking

<sup>12</sup> Decomposability

روشهای ارائه شده در زیربخش‌های ۳-۳ و ۴-۳ و با انجام تغییراتی در مدل‌های تغذیه شده به TCT انجام شده است.

در بخش دوم، مفاهیم و تعاریف پایه در نظریه کنترل نظارتی سیستم‌های گسسته-پیش‌آمد مرور شده است. در بخش سوم، علاوه بر مرور روش‌های کاهش ناظر و محل‌سازی ناظر، دو روش برای محل‌سازی 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<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup>  $L$  روی مجموعه پیش‌آمد  $\Sigma$  مجموعه‌ای از رشته‌های با طول محدود (سلسله پیش‌آمدهای محدود) است که از پیش‌آمدهای مجموعه  $\Sigma$  ساخته شده باشد، به عبارت دیگر  $L \subseteq \Sigma^*$  است.  $\Sigma^*$  اجتماعی از مجموعه تمامی سلسله پیش‌آمدهای محدود و مجموعه متشکل از پیش‌آمد تهی ( $\epsilon$ ) است. پیش‌آمد تهی، بدین معنی است که هیچ پیش‌آمدی از مجموعه  $\Sigma$  رخ نداده است. یک اتوماتون<sup>۷</sup> با پنج تایی  $A = (Y, \Sigma, \eta, \gamma_0, Y_m)$  معرفی می‌گردد به طوری که  $\eta: Y \times \Sigma \rightarrow Y$  است. همچنین  $Y$  مجموعه حالت‌ها،  $\Sigma$  مجموعه پیش‌آمدها،  $\eta$  تابع گذر حالت،  $\gamma_0$  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 گذر حالت است. اتوماتا جمع اتوماتون‌هاست. مولد<sup>۸</sup>  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  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  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$  است. زبان بسته  $G$  شامل سلسله پیش‌آمدهایی در  $\Sigma^*$  است که تابع آن به صورت  $L(G) = \{s \in \Sigma^* | \delta(q_0, s)!\}$  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

کاهش ناظر نسبت به مدل گسسته-پیش‌آمد ساده شده کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش‌آمد کنترل-پذیری که محل‌سازی 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 محل‌سازی ناظر را ندارد. چنانچه برخی از اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد بیش از یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر داشته باشند این روش ممکن است کنترل‌کننده‌های محل‌سازی با تعداد حالت‌های کمتری را ایجاد نماید. از مزیت‌های روش ارائه شده در این مقاله آنست که چون محل‌سازی ناظر نسبت به اجزاء سیستم انجام نمی‌شود لذا بر خلاف روش ارائه شده در [۱۴] اجزاء سیستم می‌توانند پیش‌آمدهای مشترک نیز داشته باشند. با وجود اینکه هر کنترل‌کننده محل‌سازی امکان مشاهده رفتار سایر کنترل‌کننده‌ها را دارد، اما هر یک از کنترل‌کننده‌های محل‌سازی تنها اختیار غیرفعال کردن یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر را دارد. در ادامه با استفاده از دو مثال کنترل نظارتی مسیر تردد<sup>۲</sup> و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج<sup>۳</sup> در ایستگاه تقویت فشار گاز اهمیت روش ارائه شده در این مقاله روشن می‌گردد. با محل‌سازی ناظر یکپارچه مسیر تردد، نشان داده خواهد شد که هر کنترل‌کننده محل‌سازی متناظر با هر پیش‌آمد کنترل‌پذیر می‌تواند به صورت ساده‌تر و با تعداد حالت‌ها و پیش‌آمدهای کمتری نسبت به ناظرهای محل‌سازی که نسبت به هر یک از اجزاء<sup>۴</sup> سیستم ساخته شده‌اند، ایجاد گردد. در محل‌سازی 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. به طور مشابه با الگوریتم محل‌سازی ناظر [۱۴]، در این روش نیز از عملگر AND در هر یک از کنترل‌کننده‌های محل‌سازی استفاده می‌گردد. تمامی مراحل مدل‌سازی، تبدیل منطق کنترلی به مدل گسسته-پیش‌آمد، طراحی و کاهش ناظر و نیز محل‌سازی 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 نرم‌افزار محل‌سازی ناظر را تنها نسبت به پیش‌آمدهای هر یک از اجزای سیستم گسسته-پیش‌آمد انجام می‌دهد و قادر نیست محل‌سازی ناظر یکپارچه را نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر اجرا نماید. لذا شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این مقاله، مطابق

<sup>۵</sup>Event Driven

<sup>۶</sup>Language

<sup>۷</sup>Automaton

<sup>۸</sup>Generator

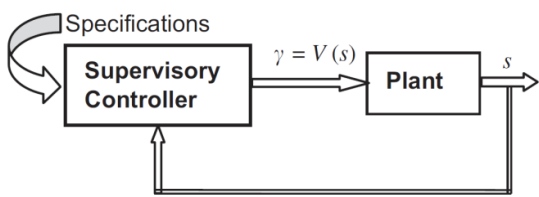
<sup>۱</sup> Components

<sup>۲</sup>Guide way

<sup>۳</sup>Surge-Avoidance Supervisor

<sup>۴</sup>Components

می‌گردد، به طوری که  $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$  و  $P_i^{-1}: Pwr(\Sigma_i^*) \rightarrow$   $i = 1, 2$  است [۲۰]. زبان‌های  $L_1, L_2$  که  $(L_1, L_2) \subseteq \Sigma^* \times \Sigma^*$  باشد، غیردرگیر<sup>۷</sup> نامیده می‌شوند اگر  $\overline{L_1} \cap \overline{L_2} = \overline{L_1} \cap \overline{L_2}$  برقرار باشد. همچنین مولدهای  $(G_1, G_2)$  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  $\bar{L}_i, i = 1, 2$  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 به طور خودکار فعال هستند ملحق کنیم، چنین زیرمجموعه‌ای از پیش‌آمدها الگوی کنترلی<sup>۸</sup> نامیده می‌شود و مجموعه تمامی الگوهای کنترلی به صورت  $\Gamma = \{\gamma \in Pwr(\Sigma) | \gamma \supseteq \Sigma_u\}$  معرفی می‌گردد. کنترل نظارتی سیستم گسسته-پیش‌آمد  $G$ ، با نگاشت  $V$  به صورت  $V: L(G) \rightarrow \Gamma$  تعریف شده و جفت  $(G, V)$  بصورت  $V/G$  نوشته می‌شود. بدین ترتیب  $G$  تحت نظارت  $V$  می‌باشد (شکل ۱) [۲۲]. زبان  $K \subseteq \Sigma^*$  نسبت به  $G$  کنترل‌پذیر است اگر  $\bar{K} \cap L(G) \subseteq \bar{K}$  برقرار باشد. منظور از  $\bar{K}$  سلسله پیش-آمدهایی در  $\bar{K}$  است که پس از آن یک پیش‌آمد کنترل‌ناپذیر رخ می‌دهد [۱۷].



شکل ۱: 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<sup>۹</sup> [۲۳، ۱۲]، پارانرمال بودن<sup>۱۰</sup> [۱۷]، رؤیت‌پذیری نسبی<sup>۱۱</sup> [۲۴] و رؤیت‌پذیری<sup>۱۲</sup> [۱۲] ناظر با مشاهدات جزئی مطرح می‌شود.

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

تصویر طبیعی<sup>۵</sup> یک سلسله پیش‌آمد یا به طور ساده تصویر یک سلسله پیش‌آمد، زبانی است که روی مجموعه  $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$  ساخته شده و با  $P$  نشان داده می‌شود.  $\Sigma_0$  مجموعه پیش‌آمدهای رؤیت‌پذیر می‌باشد. پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر نیز پیش‌آمدهایی هستند که از کانال تصویر عبور نمی‌کنند. تعریف ریاضی تصویر طبیعی یک سلسله پیش‌آمد به صورت  $P: \Sigma^* \rightarrow \Sigma_0^*$  است که در آن  $P(\epsilon) = \epsilon$ ،  $P(\sigma) = P(s)\sigma$  for  $s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma$  باشد. تعریف تصویر طبیعی را می‌توان به صورت  $P: Pwr(\Sigma^*) \rightarrow Pwr(\Sigma_0^*)$  تعمیم داد. بدین ترتیب برای هر زبان  $L \subseteq \Sigma^*$ ،  $P(L) := \{P(s) | s \in L\}$ ،  $L \subseteq \Sigma^*$  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 به صورت  $P^{-1}: Pwr(\Sigma_0^*) \rightarrow Pwr(\Sigma^*)$  تعریف می‌گردد، به طوری که برای هر  $L \subseteq \Sigma_0^*$ ،  $P^{-1}(L) := \{s \in \Sigma^* | P(s) \in L\}$  باشد. در این تعریف از مجموعه توانی  $2^{\Sigma^*} = Pwr(\Sigma^*)$  استفاده شده است، یعنی  $Pwr(\Sigma^*)$  تمامی زیرمجموعه‌های ممکن از مجموعه  $\Sigma^*$  می‌باشد [۲۱]. ضرب همزمان<sup>۶</sup> دو زبان  $L_1$  و  $L_2$  به صورت  $L = L_1 \parallel L_2$  نشان داده شده و به صورت  $L = L_1 \parallel L_2 = (P_1^{-1}L_1) \cap (P_2^{-1}L_2)$  تعریف

<sup>۷</sup>Non-conflicting

<sup>۸</sup>Control Pattern

<sup>۹</sup>Normality

<sup>۱۰</sup>Paranormality

<sup>۱۱</sup>Relative Observability

<sup>۱۲</sup>Observability

<sup>۱</sup>Closure

<sup>۲</sup>Reachable

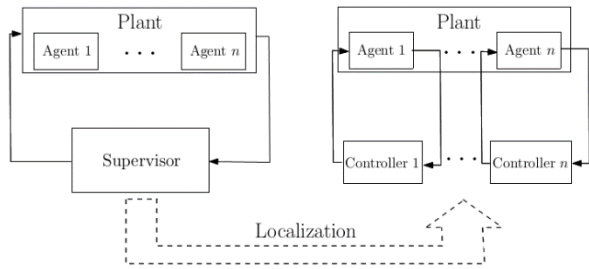
<sup>۳</sup>Coreachable

<sup>۴</sup>Trim

<sup>۵</sup>Natural Projection

<sup>۶</sup>Synchronous Product

برای عامل  $G^k$  کنترل‌کننده محلی نامیده می‌شود. در این صورت  $LOC^k$  تنها پیش‌آمدهای موجود در مجموعه  $\Sigma_c^k$  را غیرفعال می‌نماید. این در حالیست که دامنه مشاهده  $LOC^k$  الزاماً محدود به مجموعه پیش‌آمد  $\Sigma^k$  نمی‌باشد. در شکل ۲ بلوک دیاگرام ناظر محلی سازی شده نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۲: 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 آن را با مولد  $SUP = (X, \Sigma, \xi, x_0, X_m)$  نشان داد که تشخیص دهنده  $K_S^*$  نام دارد. تشخیص دهنده مولدی است که زبان متناظر آن با  $K_S$  برابر بوده، یعنی  $K_S = L_m(SUP)$  است. چنانچه  $RSUP$  ناظر کاهش یافته (ساده شده) باشد آنگاه  $|SUP| \ll |RSUP|$  بوده و معادل کنترلی  $SUP$  نسبت به  $G$  خواهد بود [۱۸]. یعنی اینکه

$$L_m(G) \cap L_m(RSUP) = L_m(SUP) \quad (1)$$

$$L(G) \cap L(RSUP) = L(SUP) \quad (2)$$

نرمال بودن یک زبان نشان می‌دهد که پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر، کنترل‌ناپذیرند، یعنی امکان غیرفعال کردن آنها وجود ندارد. به عبارت دیگر، زبان  $K$  نسبت به  $(L_m(G), P)$  نرمال نامیده می‌شود اگر  $P^{-1}P(K) \cap K = K$  برقرار باشد. پارانرمال بودن یک زبان نشان می‌دهد که وقوع پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر (کنترل‌ناپذیر یا کنترل‌پذیر) از زبان بسته خارج نمی‌شود. زبان  $K$  نسبت به  $(L(G), P)$  پارانرمال نامیده می‌شود اگر  $\bar{K}(\Sigma - \Sigma_0) \cap L(G) \subseteq \bar{K}$  برقرار باشد. اگر پیش‌آمدهای رؤیت‌ناپذیر، کنترل‌ناپذیر باشند، آنگاه ناظر  $K_S \subseteq E$  نسبت به  $(L(G), P)$  پارانرمال خواهد بود. به منظور توسعه مفهوم پارانرمال بودن در کنترل نظارتی گسترده، یک ویژگی جدید هم‌رؤیت‌پذیری<sup>۱</sup> با نام هم‌پارانرمال بودن<sup>۲</sup> تعریف می‌گردد.

هم‌پارانرمال بودن یک زبان تضمین می‌کند هر سلسله پیش‌آمدی که در  $\bar{K}$  به وسیله یک پیش‌آمد رؤیت‌ناپذیر (نسبت به کانال تصویر  $P_k$ ) تعریف شده در  $L(G)$  دنبال شود، باید در  $\bar{K}$  باقی بماند. یعنی اینکه اگر پیش‌آمدی برای یک کنترل‌کننده قابل مشاهده نبود کنترل‌کننده‌های دیگر با داشتن  $\bar{K}$  تصمیم‌سازگار را برای غیرفعال کردن آن پیش‌آمد اتخاذ نمایند. بر اساس تعریف پارانرمال بودن، ناظری پارانرمال است که پیش‌آمدهای 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  $(L(G), P_k, \Sigma_c^k)$  که  $\Sigma^k \rightarrow \Sigma^* : P_k \rightarrow \Sigma^*$   $\forall k \in \mathcal{K}$  و  $\mathcal{K}$  مجموعه اندیس‌های هر یک از زیرمجموعه‌های مربوط به پیش-آمدهای کنترل‌پذیر است، هم‌پارانرمال نامیده می‌شود، اگر  $\forall k \in \mathcal{K}$   $K = \bigcap_k K_k$  برقرار بوده و  $\exists K_k, \bar{K}_k(\Sigma - \Sigma^k) \cap L(G) \subseteq \bar{K}_k$  باشد [۲۵].  $K_k$  زبانی پارانرمال است که از  $K$  به دست می‌آید. روش ساختن مولدی که زبان متناظر آن  $K_k$  است در زیربخش ۳-۳ توضیح داده شده است.

فرض کنید سیستم  $G$  شامل عوامل  $G^k$  تعریف شده روی پیش‌آمدهای افزاشده  $\Sigma^k (k \in \mathcal{K})$  باشد، بنابراین  $\Sigma = \bigcup \{\Sigma^k, k \in \mathcal{K}\}$  می‌باشد. نماد  $\bigcup$  به معنی اجتماعی از مجموعه‌هاست که دارای عضو مشترک نباشند. فرض کنید  $L_k = L(G^k)$  و  $L_{m,k} = L_m(G^k)$  باشد آنگاه رفتار بسته و نشان‌دار  $G$  به ترتیب  $\{L_k, k \in \mathcal{K}\}$  و  $\{L_{m,k}, k \in \mathcal{K}\}$  خواهد بود. برای سادگی فرض می‌شود که برای هر  $k \in \mathcal{K}$  زیر سیستم  $G^k$  بدون انسداد باشد. به عبارت دیگر  $\bar{L}_{m,k} = L_k$  در این صورت  $G$  الزاماً بدون انسداد است یعنی این که  $\bar{L}_m(G) = L(G)$  است. چنانچه  $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$  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 و مولد  $LOC^k$  روی مجموعه پیش‌آمد  $\Sigma$

<sup>۱</sup>Heuristic Method

<sup>۲</sup>Recognizer

<sup>۱</sup>Coobservability

<sup>۲</sup>Coparanormality

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

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

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

دو مولد  $\mathbf{RSUP} = (Z, \Sigma, \zeta, z_0, Z_m)$  و  $\mathbf{J} = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$  با نگاشت ایزومورفیک  $\theta^*$  ایزومورفیک<sup>۴</sup> هستند اگر نگاشت  $\theta: Z \rightarrow I$  وجود داشته باشد بطوری که

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

در [۱۸] ثابت شده است که  $\mathbf{RSUP}$  معادل کنترلی  $\mathbf{SUP}$  نسبت به  $\mathbf{G}$  می باشد.

### ۲-۳- مروری بر الگوریتم محلی سازی ناظر

مسئله محلی سازی ناظر یکپارچه با تعریف مجموعه پیش آمدهای فعال شده و مجموعه پیش آمدهای غیرفعال شده در یک حالت دلخواه آغاز می گردد. ابتدا  $D^k: X \rightarrow Pwr(\Sigma)$  مانند زیربخش ۳-۱ تعریف شده، سپس  $D^k(x) = \{\sigma \in \Sigma_c^k \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in Pwr(\Sigma_c^k) [\xi(x_0, \sigma) = x \& \delta(q_0, s\sigma)!])\}$  به صورت مجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر در  $\Sigma_c^k$  است که باید در  $X$  غیرفعال شوند. اگر پیش آمد  $\sigma \in \Sigma_c^k$  در  $D^k(x)$  نباشد آنگاه  $\sigma \in E(x)$  بوده یا این که در هر حالت  $Q$  از سیستم گسسته-پیش آمد متناظر با  $X$  تعریف نشده است.  $M: X \rightarrow \{1, 0\}$  و  $T: X \rightarrow \{1, 0\}$  نیز مانند آنچه در زیربخش ۳-۱ آمده، تعریف می گردد. رابطه باینری سازگاری کنترلی  $R^k$  روی  $X$  تعریف می گردد. برای هر  $x, x' \in X$  گوئیم که  $x, x' \in R^k$  (نسبت به  $\Sigma_c^k$ ) سازگار کنترلی است و نوشته می شود  $(x, x') \in R^k$  اگر شرایط زیر برقرار باشد:

$$E(x) \cap D^k(x') = \emptyset = E(x') \cap D^k(x) \tag{۱۰}$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \tag{۱۱}$$

$|\mathbf{RSUP}| \ll |\mathbf{SUP}|$  به معنی آنست که تعداد حالت های  $\mathbf{RSUP}$  نسبت به تعداد حالت های  $\mathbf{SUP}$  کمتر است. الگوریتم کاهش ناظر با ادغام حالت هایی که سازگار کنترلی<sup>۱</sup> هستند شروع می شود. دو حالت سازگار کنترلی هستند اگر پیش آمدهای فعال شده در یکی از آنها در دیگری غیرفعال نشده و از نظر نشان دار شدن نیز یکسان باشند. تعریف ریاضی این مطلب به صورت زیر است. مجموعه پیش آمدهای فعال شده در حالت  $x$  با  $E(x)$  نشان داده می شود به طوری که  $E: X \rightarrow Pwr(\Sigma)$  و  $E(x) = \{\sigma \in \Sigma \mid \xi(x, \sigma)!\}$  است. مجموعه پیش آمدهای غیرفعال شده در حالت  $x$  با  $D(x)$  نشان داده می شود به طوری که  $D: X \rightarrow Pwr(\Sigma)$  و  $D(x) = \{\sigma \in \Sigma \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in Pwr(\Sigma) [\xi(x_0, s) = x \& \delta(q_0, s\sigma)!])\}$  می باشد.

پرچم<sup>۲</sup> (نشانه)  $M: X \rightarrow \{1, 0\}$  بصورت  $M(x) = 1$  iff  $x \in X_m$  تعریف می شود. یعنی اینکه اگر  $x$  نشان دار باشد آنگاه  $M$  یک خواهد شد. پرچم  $T: X \rightarrow \{1, 0\}$  بصورت  $T(x) = 1$  iff  $(\exists s \in \Sigma^*) \xi(x_0, s) = x$  است.  $\delta(q_0, s) \in Q_m$  به معنی اینکه سلسله پیش آمدی که در  $\mathbf{SUP}$  به حالت  $x$  رسیده است در  $\mathbf{G}$  به یک حالت نشان دار برسد. حال فرض کنید که  $\mathcal{R} \subseteq X \times X$  یک رابطه دودویی برای هر جفت حالت  $x, x' \in X$  در  $\mathbf{SUP}$  باشد. هر جفت حالت  $x, x' \in X$  سازگار کنترلی هستند یعنی اگر  $(x, x') \in \mathcal{R}$

$$E(x) \cap D(x') = E(x') \cap D(x) = \emptyset \tag{۳}$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \tag{۴}$$

به عبارت دیگر می توان گفت هر جفت  $(x, x')$  در  $\mathcal{R}$  قرار دارند اگر مطابق (۳) هیچ پیش آمدی وجود نداشته باشد که در یکی از آنها فعال و در دیگری غیرفعال گردد. همچنین مطابق (۴) هر دو حالت در  $\mathbf{SUP}$  نشان دار بوده یا هر دو نشان دار نباشند. یک پوشش<sup>۳</sup> بصورت  $\mathcal{C} = \{X_i \subseteq X \mid i \in I\}$  از مجموعه حالت های  $X$  پوشش کنترلی روی  $\mathbf{SUP}$  نامیده می شود اگر

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

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

که در آن  $I$  مجموعه اندیس های هر یک از زیرمجموعه حالت های قرار گرفته در یک سلول از پوشش کنترلی می باشد [۱۸].

پوشش کنترلی  $\mathcal{C}$  حالت های  $\mathbf{SUP}$  را در صورتی که سازگار کنترلی باشند در حالت  $(i \in I) X_i$  انباشته<sup>۴</sup> می کند. 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 می توانند از هر حالت قرار گرفته در  $X_i$  با یک گذار  $\sigma$  قابل دسترس باشند، توسط برخی از  $X_j$ ها پوشش داده می شود. با داشتن یک پوشش کنترلی  $\mathcal{C} = \{X_i \subseteq X \mid i \in I\}$  در  $\mathbf{SUP}$ ، یک ناظر القایی<sup>۵</sup> بصورت  $\mathbf{J} = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$  ساخته می شود که در آن شرایط (۷) برقرار باشد [۱۸].

<sup>۱</sup>Induced Supervisor

<sup>۲</sup>Isomorphism

<sup>۳</sup>Isomorphic

<sup>۱</sup>Control Consistent

<sup>۲</sup>flag

<sup>۳</sup>Cover

<sup>۴</sup>Lump

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

الگوریتم محل‌سازی 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 محل‌سازی ناظر نسبت به هر افزاز دلخواه از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر سیستم گسسته-پیش‌آمد، مجموعه پیش‌آمدهای غیرفعال شده در حالت دلخواه  $X$  می‌تواند به صورت  $D(x) = \bigcup_k D^k(x)$  نوشته شود که در آن  $k \in I^k$  و  $I^k$  مجموعه اندیس هر یک از سلول‌های پوشش کنترلی  $C^k$  (متناظر با کنترل‌کننده محلی  $k$ ام) است. در حالت خاص می‌توان افزاز مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر سیستم را به گونه‌ای انجام داد که هر زیرمجموعه تنها دارای یک پیش‌آمد کنترل‌پذیر باشد. لذا می‌توان رابطه (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$E(x') \cap D(x) = E(x') \cap [\bigcup_k D^k(x)] \quad (17)$$

$$= \bigcup_k [E(x') \cap D^k(x)] = \emptyset$$

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

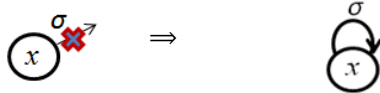
از این رو  $\forall k \in I^k, E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$  خواهد بود. یعنی این که لازم است ناظر یکپارچه رابطه (۱۷) را تأمین نماید. هر چند که الگوریتم کاهش ناظر برای کاهش تعداد حالت‌های ناظر یکپارچه به کار می‌رود، با این حال می‌توان این الگوریتم را برای کاهش تعداد حالت‌های هر کنترل‌کننده محلی نیز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

از آنجا که  $k$ امین مجموعه پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تنها می‌تواند در  $k$ امین کنترل‌کننده 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  $E(x) \cap E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$  و  $D^k(x') = \emptyset$  ساده‌سازی می‌گردد. این بدان معنی است که

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

برقرار بوده، حتی اگر  $E(x') \cap D(x) \neq \emptyset$  باشد. با توجه به مفهوم هم-پارائرمال بودن یک ناظر یکپارچه که در [۲۵] معرفی شده است می‌توان برای محل‌سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر تمامی پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر به‌جز پیش‌آمدی که محل‌سازی نسبت به آن انجام می‌شود، را در حالت‌هایی که غیرفعال شده‌اند به صورت حلقه شده<sup>۱</sup> ایجاد نمود. این وضعیت در شکل ۳ نشان داده شده است.

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



شکل ۳: تبدیل پیش‌آمد کنترل‌پذیر غیرفعال در ناظر یکپارچه به فرم حلقه شده در کنترل‌کننده محلی ( $\sigma \neq \sigma_k$ )

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

$$(\forall i^k \in I^k)(\forall x, x' \in X_{i^k}^k)(x, x' \in R^k) \quad (12)$$

$$(\forall i^k \in I^k, \sigma \in \Sigma) [(\exists j^k \in I^k)(\forall x \in X_{i^k}^k) \xi(x, \sigma) \implies \xi(x, \sigma) \in X_{j^k}^k] \quad (13)$$

$C^k$  پوشش کنترلی متناظر با کنترل‌کننده  $k$ ام روی  $X$  می‌باشد. یک پوشش کنترلی  $C^k$  حالت‌های  $SUP$  را روی سلول‌های  $X_{i^k}^k (i^k \in I^k)$  جمع می‌کند. دو حالت  $x, x'$  به سلول مشترک در  $C^k$  تعلق دارند اگر و تنها اگر 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  $C^k$  روی  $X$  مبتنی بر تنها اطلاعات کنترلی  $\Sigma_c^k$  می‌توان مولد القایی  $J^k = (I^k, \Sigma, \kappa^k, i_0^k, I_m^k)$  را با روابط زیر ایجاد نمود.

- (i)  $i_0^k \in I^k$  such that  $x_0 \in X_{i_0^k}^k$
- (ii)  $I_m^k = \{i^k \in I^k \mid X_{i^k}^k \cap X_m \neq \emptyset\}$
- (iii)  $\kappa^k: I^k \times \Sigma \rightarrow I^k$  with  $\kappa^k(i^k, \sigma) = j^k$ , if  $(\exists x \in X_{i^k}^k) \xi(x, \sigma) \in X_{j^k}^k \& (\forall x' \in X_{i^k}^k) [\xi(x', \sigma) \implies \xi(x', \sigma) \in X_{j^k}^k]$

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

- (i)  $(\forall z \in Z_L)(\exists s \in L(SUP)) \zeta(z_{L,0}, s) = z$
- (ii)  $(\forall z \in Z_L)(\forall \sigma \in \Sigma) [\zeta(z, \sigma) \implies (\exists s \in L(SUP)) [s\sigma \in L(SUP) \& \zeta(z_{L,0}, s) = z]]$
- (iii)  $(\forall z \in Z_{L,m})(\exists s \in L_m(SUP)) \zeta(z_{L,0}, s) = z$

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

- (i)  $\theta: Z_L \rightarrow I$  is a bijection
- (ii)  $\theta(z_{L,0}) = i_0$  and  $\theta(z_{L,m}) = I_m$
- (iii)  $(\forall z \in Z_L)(\forall \sigma \in \Sigma) \zeta_L(z, \sigma) \implies [\kappa(\theta(z), \sigma) \& \kappa(\theta(z), \sigma) = \theta(\zeta_L(z, \sigma))]$
- (iv)  $(\exists i \in I)(\forall \sigma \in \Sigma) \kappa(i, \sigma) \implies [(\exists z \in Z_L) \zeta_L(z, \sigma) \& \theta(z) = i]$

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

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

<sup>1</sup>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  $x' \in \mathcal{R}^k$ ،  $x'$  برقرار است اگر  $E(x') \cap D^k(x) = E(x) \cap D^k(x') = \emptyset$  (۱۸)

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

می توان تعداد حالت های  $\mathbf{S}_k$  را با استفاده از سازگاری کنترلی آنها کاهش داد. پوشش  $\{X_{ik}^k \subseteq X \mid i^k \in I^k\}$  از مجموعه حالت های  $X$  یک پوشش کنترلی روی  $\mathbf{S}_k$  نامیده می شود اگر (۲۰) و (۲۱) برقرار باشد.

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

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

که در آن  $I^k$  مجموعه اندیس های  $\mathbf{S}_k$  را نشان می دهد.

از آنجا که روابط (۱۸) و (۱۹) به روابط ارائه شده برای بیان سازگاری کنترلی در الگوریتم محلی سازی ناظر در [۱۴] شبیه هستند، لذا یک پوشش کنترلی که با روابط (۲۰) و (۲۱) ایجاد می گردد با پوشش کنترلی ایجاد شده در [۱۴] یکسان خواهد بود. بنابراین می توان روابط تکمیلی (۱۴) تا (۱۶) در الگوریتم محلی سازی ناظر را برای کاهش تعداد حالت های هر کنترل کننده محلی به کار برد. واضح است که کنترل کننده محلی ساده شده با این الگوریتم در حالت خاصی که محلی سازی نسبت به یک جزء از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد انجام شود، معادل کنترل کننده محلی ایجاد شده با الگوریتم محلی سازی ناظر در [۱۴] خواهد بود. همان طور که گفته شد این روش به محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد محدود نمی شود. در واقع روش پیشنهاد شده برای توزیع وظایف کنترلی ناظر یکپارچه، بر مبنای ویژگی هم پارانرمال بودن و پس از آن کاهش تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر، می تواند با افزایش دلخواه مجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر انجام شود.

### ۳-۴- ساده سازی مدل سیستم گسسته-پیش آمد نسبت به پیش آمدهای غیر فعال شده در ناظر

با توجه به تعریف مجموعه پیش آمدهای غیر فعال شده  $D(x)$  در الگوریتم کاهش ناظر، می توان محلی سازی ناظر یکپارچه را با ساده سازی مدل سیستم گسسته-پیش آمد انجام داد. طبق تعریف محلی سازی ناظر یکپارچه، چنانچه  $\sigma \in \Sigma_c^k$  یک پیش آمد کنترل پذیر باشد، آنگاه چنین پیش آمدی تنها در کنترل کننده محلی  $k$  امکان غیر فعال شدن را داشته و سایر کنترل کننده های محلی با آن مانند یک پیش آمد کنترل پذیر برخورد می نمایند. برای آنکه مجموعه  $D(x)$  برای کنترل کننده محلی  $k$ م بازنویسی شود، می توان  $\sigma$  را در حالت های مدل گسسته-پیش آمد  $\mathbf{G}$  متناظر با حالت هایی که  $\sigma$  در ناظر یکپارچه غیر فعال شده است، تعریف نشده در نظر گرفت، یعنی اینکه

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

بدین ترتیب مدل گسسته پیش آمد  $\mathbf{G}_R$  به صورت زیر ساده می شود.

$$\mathbf{G}_R = (Q, \Sigma, \delta_R, q_0, Q_m)$$

به طوری که گذرهای غیر فعال شده در ناظر یکپارچه (به جز پیش آمدی که محلی سازی نسبت به آن انجام می شود)، در حالت های متناظر در مدل گسسته-پیش آمد  $\mathbf{G}$  حذف شده باشد. بنابراین گذرهای  $\mathbf{G}_R$  طبق رابطه (۲۲) تعریف می گردد.

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

بر اساس  $\mathbf{G}_R$  تعریف شده، می توان مجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر غیر فعال شده در حالت  $x$  از ناظر یکپارچه را برای سیستم گسسته-پیش آمد  $\mathbf{G}_R$  به صورت زیر تعریف نمود:

$$D^R(x) := \{ \sigma \in \Sigma \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in \Sigma^*) [\xi(x_0, s) = x \& \delta_R(q_0, s \sigma)!] \} \quad (۲۳)$$

از طرفی مجموعه پیش آمدهای فعال شده در حالت  $x$  بر اساس تعریف زیر بخش ۳-۱ به صورت  $E(x) = \{ \sigma \in \Sigma \mid \xi(x, \sigma)! \}$  تعریف شده است. چنانچه این تعریف نسبت به گذرهای تعریف شده در سیستم  $\mathbf{G}_R$  بازنویسی شود تغییری در آن به وجود نمی آید. چون گذرهای فعال زیرمجموعه گذرهای سیستم  $\mathbf{G}$  بوده و طبق رابطه (۲۲) چنین گذرهایی در سیستم  $\mathbf{G}_R$  حذف نمی شوند.

همچنین از آنجا که حالت های سیستم  $\mathbf{G}_R$  همان حالت های سیستم  $\mathbf{G}$  هستند لذا در تعاریف  $M$  و  $T$  در رابطه (۴) نیز تغییری ایجاد نمی شود. بنابراین کفایت ثابت شود که اگر به جای  $D^k$  از  $D^R$  استفاده گردد، شرط اول سازگاری کنترلی (۱۰) برقرار خواهد بود. قضیه ۱ به اثبات این موضوع می پردازد.

قضیه ۱: چنانچه  $D^k(x)$  مجموعه پیش آمدهای غیر فعال شده در حالت  $x$  توسط کنترل کننده محلی  $k$ م در (۱۰) باشد و  $D^R(x)$  طبق (۲۳) تعیین شده باشد، آنگاه  $D^R(x) = D^k(x)$  است.

اثبات: اثبات این قضیه در دو مرحله قابل انجام است: الف-  $D^R(x) \subseteq D^k(x)$   
ب-  $D^k(x) \subseteq D^R(x)$

الف- روند اثبات را می توان به صورت زیر آغاز نمود.

$$\forall \sigma \in D^R(x) \Rightarrow \sigma \in \{ \sigma \in \Sigma \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in \Sigma^*) [\xi(x_0, s) = x \& \delta_R(q_0, s \sigma)!] \}$$

چنانچه  $\sigma \in \Sigma - \Sigma_c^k, \sigma \in D(x)$  باشد  $\neg \delta_R(q_0, s \sigma)!$  است. همچنین  $\sigma \notin D^R(x) \Rightarrow \sigma \notin D^k(x)$  برقرار است. لذا لازم است  $\sigma \in \Sigma_c^k$  بوده و می توان نوشت:

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

ب- روند اثبات را می توان به صورت زیر آغاز نمود.

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

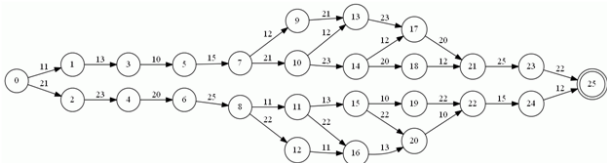
بر اساس رابطه (۱۰)، چنانچه  $\sigma \in \Sigma_c^k$  باشد  $\delta(q_0, s \sigma) = \delta_R(q_0, s \sigma)$  است. لذا می توان نوشت:

$$\sigma \in \{ \sigma \in \Sigma \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in \Sigma^*) [\xi(x_0, s) = x \& \delta_R(q_0, s \sigma)!] \} = D^R(x)$$

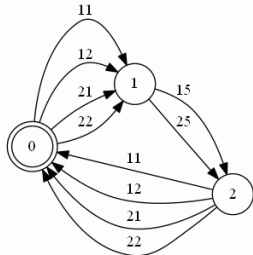
بدین ترتیب اثبات قضیه کامل می شود.

شکل ۶: مدل گسسته-پیش‌آمد سیستم **G**

به منظور جلوگیری از تصادم، لازم است کنترل چراغ‌های راهنمایی تضمین کند که خودروهای  $V_1, V_2$  در هیچ بخشی از مسیر به صورت همزمان تردد نمی‌کنند. چنین منطق کنترلی را می‌توان با اجرای دستور  $E = \text{mutex}(V_1, V_2, [(1,1), (2,2), (3,3), (4,4)])$  روی مدل سیستم گسسته-پیش‌آمد ایجاد نمود. برای طراحی ناظر نرمال از دستور  $\text{SUP} = \text{supnorm}(G, E, [13,23])$  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  $\text{supreduce}$  در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که تعداد حالت‌ها شدیداً کاهش یافته به طوری که از ۲۶ حالت در ناظر یکپارچه به ۳ حالت در ناظر کاهش یافته رسیده است. دستور  $\text{supreduce}$  از اطلاعات جدول داده‌های کنترلی<sup>۱</sup> 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  $\Sigma_{u0} = \{13,23\}$



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	۲۵	۱۸	۲۱
۴	۱۵	۱۹	۱۱

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

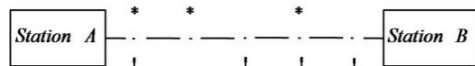
روش ارائه شده در این مقاله برای هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر یا هر افزایش از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر قابل انجام است. لذا در مقایسه با روش ارائه شده در [۱۴]، این روش برای محل‌سازی ناظر انعطاف‌پذیرتر خواهد بود. به عبارت دیگر ممکن است کنترل‌کننده‌های محلی به دست آمده با روش جاری به تعداد حالت‌های کمتری 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.

#### ۴- مثال‌هایی از محل‌سازی کنترل نظارتی یکپارچه

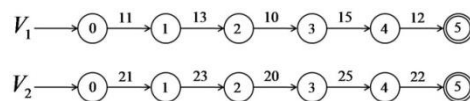
به منظور راستی‌آزمایی روش ارائه شده در این مقاله، محل‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد<sup>۱</sup> و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرچ<sup>۲</sup> در ایستگاه تقویت فشار گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- محل‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد

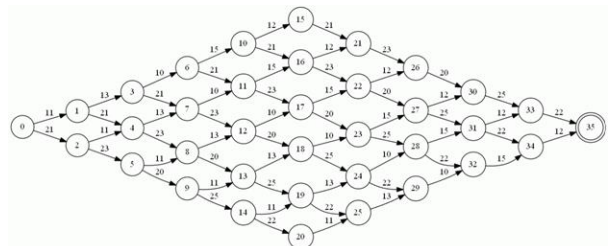
مسیر ترددی را با دو ایستگاه A و B مطابق شکل ۴ در نظر بگیرید. مسیری که ایستگاه‌های A و B را به هم متصل می‌کند شامل ۴ بخش که برخی از آنها دارای چراغ راهنمایی و یا تشخیص دهنده عبور هستند، تشکیل شده است [۱۷]. دو خودرو  $V_1, V_2$  به طور همزمان از مسیر استفاده می‌کنند.  $V_i, i = 1, 2$  ممکن است در حالت صفر (در ایستگاه A)، حالت z (هنگام تردد از بخش‌های  $z = 1, \dots, 4$ ) یا حالت ۵ (در ایستگاه B) قرار داشته باشند. مولد  $V_i, i = 1, 2$  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 به صورت  $G = \text{sync}(V_1, V_2)$  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

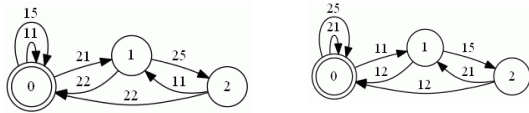


<sup>۱</sup>Control Data

<sup>۲</sup>Guide way

<sup>۳</sup>Surge-Avoidance Supervisor

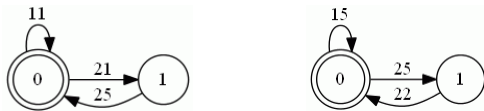
این پیش آمد در حالت های ۱، ۳ و ۵ غیر فعال می گردد. این حالت ها به ترتیب متناظر با حالت های ۱، ۳ و ۶ در **G** هستند.



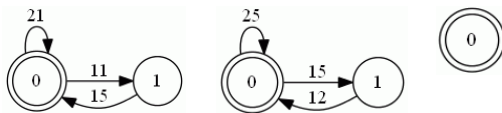
الف- کنترل کننده محلی  $V_1$       ب- کنترل کننده محلی  $V_2$

شکل ۹: کنترل کننده های محلی متناظر با هر یک از عامل ها

همچنین نتیجه محلی سازی با روش های 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- پیش آمد ۱۱      ب- پیش آمد ۱۵



ج- پیش آمد ۲۱      د- پیش آمد ۲۵      و- پیش آمدهای ۲۳ و ۱۳

شکل ۱۰: کنترل کننده های محلی متناظر با هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر

## ۲-۴- محلی سازی کنترل نظارتی پیش گیری 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 می شود. از آنجا که جریان گاز در خطوط لوله با افت فشار همراه است از ایستگاه های تقویت فشار در فواصل مختلف و بسته به توپوگرافی زمین برای جبران افت فشار استفاده می گردد. 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 بهره برداری از یک کمپرسور در ناحیه پایدار<sup>۱</sup>، لازم است فشار مسیرهای مکش<sup>۲</sup> و تخلیه<sup>۳</sup> و نیز سرعت کمپرسور در محدوده عادی عملکرد قرار داشته باشند (شکل ۱۱) [۲۷].

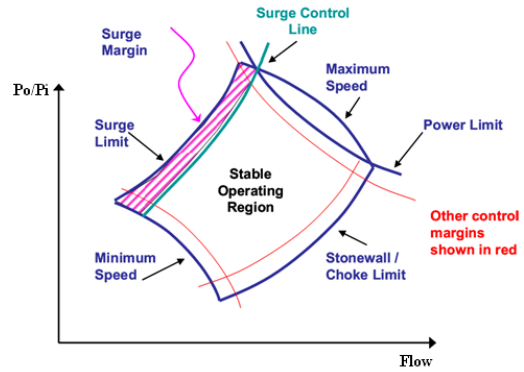
عامل کنترلی ایجاد می کند مثلاً برای ایجاد کنترل کننده محلی  $V_1$  تنها پیش آمدهای ۱۱ و ۱۵ در جدول ۱ غیر فعال فرض می گردد. از آنجا که تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی با تعداد حالت های ناظر کاهش یافته برابر است، ناظر نرمال طراحی شده طبق معیار تعریف شده در [۱۴] قابل محلی سازی نیست (تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی باید از تعداد حالت های ناظر کاهش یافته کمتر باشد). این در حالی است که با روش ارائه شده در بخش ۳-۳ می توان این ناظر را نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر محلی سازی نمود. بر اساس جدول ۱ تنها پیش آمدی غیر فعال فرض خواهد شد که محلی سازی نسبت به آن انجام می گیرد، مثلاً برای محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد ۲۱، این پیش آمد تنها در حالت های ۱، ۳ و ۵ غیر فعال می گردد. همچنین برای محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد ۱۱، این پیش آمد تنها در حالت های ۱، ۳ و ۶ غیر فعال می گردد. اگرچه کاهش تعداد حالت های ناظر به صورت دستی فرایندی پیچیده و گاه غیر ممکن است با این وجود در این مثال سازگاری کنترلی حالت های صفر و ۲ در الگوریتم های کاهش ناظر یکپارچه، محلی سازی ناظر نسبت به  $V_2$  و محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد کنترل پذیر ۲۱ مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به شکل ۷ و جدول ۱ واضح است که  $E(2) = \{11, 21\}$ ،  $D(0) = \emptyset$  و  $E(0) = \{23\}$ ،  $D(2) = \{11\}$  برقرار است. لذا  $E(0) \cap D(2) = \{11\}$  بوده یعنی حالت های صفر و ۲ در پوشش کنترلی ناظر کاهش یافته سازگار کنترلی نیستند. از طرفی  $E(0) = \{11, 21\}$ ،  $D^2(0) = \emptyset$  و  $E(2) = \{11\}$ ،  $D^2(2) = \{23\}$  بوده  $E(0) \cap D^2(2) = \{11\}$  است. بنابراین حالت های صفر و ۲ در پوشش کنترل کننده محلی  $V_2$  نیز سازگار کنترلی نیستند. این درحالیست که برای ایجاد پوشش کنترلی در محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد ۲۱ مجموعه پیش آمدهای فعال شده و مجموعه پیش آمدهای غیر فعال شده در حالت های صفر و ۲ به صورت  $E(0) = \{11, 21\}$ ،  $D^{21}(0) = \emptyset$  و  $E(2) = \{23\}$ ،  $D^{21}(2) = \emptyset$  و  $E(0) \cap D^{21}(2) = \emptyset$  و  $E(2) \cap D^{21}(0) = \emptyset$  به دست آمده است. بنابراین حالت های صفر و ۲ در پوشش کنترل کننده محلی مربوط به پیش آمد ۲۱ سازگار کنترلی بوده و می توانند با هم در یک سلول انباشته شوند. این روش حداقل اطلاعات لازم را برای تصمیم گیری ناظر به منظور غیر فعال کردن هر پیش آمد ارائه می کند. کنترل کننده های محلی ایجاد شده در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. مشاهده می شود در این روش تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی به حداکثر ۲ حالت کاهش یافته و پیاده سازی آن روی سیستم های صنعتی ساده تر خواهد بود. از آنجا که پیش آمدهای ۱۳ و ۲۳ اثری بر رفتار کنترلی ناظر ندارند (در هیچ حالتی غیر فعال نمی شوند) گذار آنها در شکل ۱۰- و نشان داده نشده است. همچنین، می توان دید که عملکرد همزمان کنترل کننده های محلی در **G** معادل کنترلی ناظر نرمال یکپارچه نشان داده شده در شکل ۷ می باشد. روش دوم برای ایجاد کنترل کننده های محلی نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر بر اساس حذف پیش آمدهای کنترل پذیر (غیر از پیش آمدی که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می شود) در حالت هایی از سیستم گسسته-پیش آمد است که متناظر با حالتی در ناظر یکپارچه هستند که در آن حالت غیر فعال شده اند، یعنی این که آن حالت با سلسله پیش آمدی قابل دسترس است که حالت متناظر در ناظر، با آن سلسله پیش آمد قابل دسترس باشد. مثلاً برای ایجاد کنترل کننده محلی نسبت به پیش آمد ۲۱

<sup>۱</sup>Discharge

<sup>۱</sup>Stable Operating Region

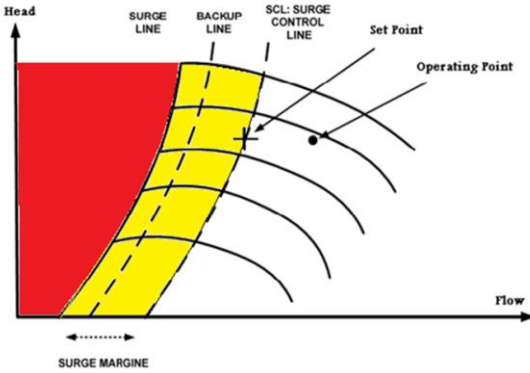
<sup>۲</sup>Suction

شیر کنارگذر اصلی‌ترین تجهیز برای جلوگیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز می‌باشد، به طوری که 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 زمانی که 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.

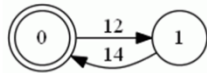


شکل ۱۱: ناحیه عملکرد کمپرسور در بهره‌برداری ایمن [۲۷]

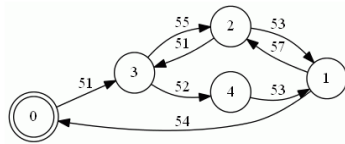
برای تحقق این اهداف دو نوع کنترل مورد نیاز است: کنترل فشار و کنترل دبی برای هر کمپرسور که به ترتیب توسط کنترل سرعت کمپرسورها و کنترل میزان باز و بسته شدن شیر کنارگذر هر کمپرسور تأمین می‌گردد. در شکل ۱۲ نمودار شماتیکی کنترل حداقل دبی برای پیش‌گیری از وقوع سرج نشان داده شده است. پدیده سرج، به معنی نوسان 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" گزارش شده است [۲۸، ۲۹] که برخی از آن‌ها از روش‌های کنترل زمان تحریک و برخی دیگر از روش‌های کنترل پیش‌آمد تحریک و به صورت تجربی استفاده نموده‌اند. روش "پیش‌گیری از وقوع سرج" 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 محل‌سازی 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 ۱۳: ناحیه سرج واقعی کمپرسور (سمت چپ Surge Line) و ناحیه سرج فرضی برای ایجاد منطق کنترلی (ناحیه بین SCL و Surge Line)



شکل ۱۴: مدل گسسته-پیش‌آمد عبور نقطه کار از خط سرج

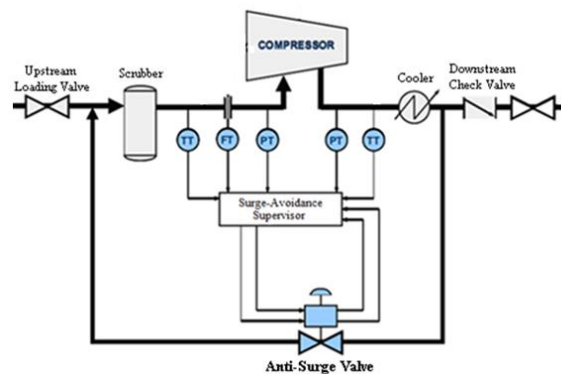


شکل ۱۵: مدل گسسته-پیش‌آمد از شیر کنارگذر همراه با کنترل‌کننده PI

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 محل‌سازی آن بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۴] امکان‌پذیر نیست و نمی‌توان محل‌سازی 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 پیش‌آمدهای محل‌سازی 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 غیر فعال شده	حالت	پیش‌آمد غیر فعال شده
۰	۵۱	۶	۵۱



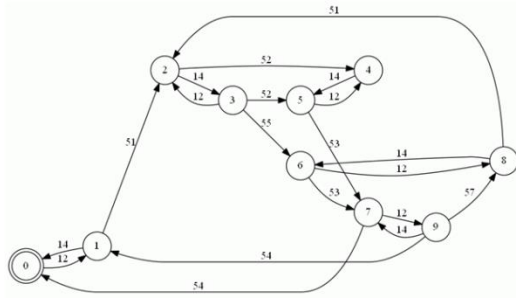
شکل ۱۲: شماتیک یک ایستگاه تقویت فشار گاز تحت کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج

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.

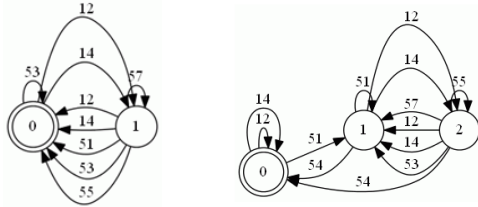
<sup>۲</sup>Surge-Avoidance

<sup>۱</sup>Anti-Surge Control

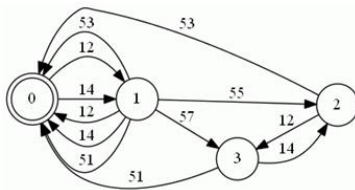
۲	۵۵	۷	۵۷
۴	۵۳	۸	۵۳



شکل ۱۸: کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرچ



شکل ۱۹: کنترل کننده محلی متناظر با شکل ۲۰: کنترل کننده محلی متناظر با پیش آمد ۵۳



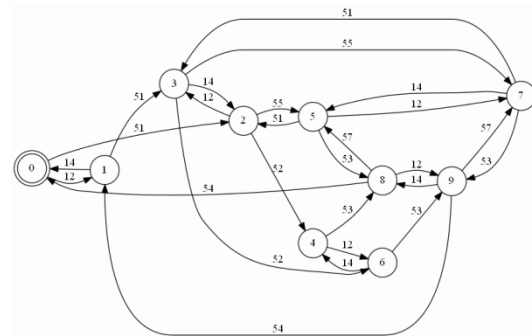
شکل ۲۱: کنترل کننده محلی متناظر با هر یک از پیش آمدهای ۵۷ و ۵۵

### ۵- نتیجه گیری

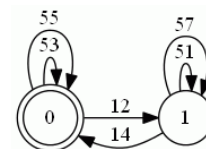
محلی سازی کنترل نظارتی یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت‌ها نسبت به هر یک از عامل‌های کنترلی می‌باشد. روشی که در [۱۴] برای محلی سازی کنترل نظارتی ارائه شده است بر مبنای کاهش ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد می‌باشد. چنانچه فرایند تحت نظارت تنها از یک جزء تشکیل شده باشد، محلی سازی با این روش، امکان پذیر نیست. در این مقاله، با انجام تغییراتی در الگوریتم کاهش ناظر روش محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر ارائه شده است. دو روش برای انجام این کار معرفی شده است: ۱- حلقه نمودن گذرهایی غیر از گذری که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌گیرد در هر حالتی از ناظر یکپارچه که گذر در آن غیرفعال شده است. ۲- گذرهایی از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند، حذف می‌شوند و ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر نسبت به سیستم گسسته-پیش آمد ساده شده کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش آمد کنترل پذیری که محلی سازی 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-پیش آمدی ارائه شده که دارای چندین جزء باشند، روش ارائه شده در این مقاله نسبت به آن جامع تر است. یعنی این که نه تنها قابلیت تعمیم برای محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر را دارد بلکه امکان محلی سازی نسبت به مجموعه پیش-آمدهای هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد را نیز دارد.

### مراجع

مثلاً برای محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد ۵۱ لازم است پیش آمدهای نشان داده شده در جدول ۲ به جز پیش آمد ۵۱ در حالت‌هایی از سیستم گسسته-پیش آمد متناظر با حالت‌های ناظر پیش گیری از وقوع سرچ که در آن غیرفعال شده‌اند، حذف (تعریف نشده) گردند. مثلاً حالت ۷ ناظر، متناظر با حالت ۸ در سیستم گسسته-پیش آمد است لذا پیش آمد ۵۷ در این حالت حذف می‌گردد. حالت ۶ در ناظر در اثر وقوع پیش آمدهای (از چپ به راست) ۵۳، ۵۵، ۱۴، ۵۱، ۱۲ ایجاد شده است، در مدل گسسته-پیش آمد با وقوع این سلسله پیش آمد حالت ۸ ایجاد می‌گردد. نتیجه محلی سازی ناظر نسبت به پیش آمد ۵۱ مطابق شکل ۱۹ به دست می‌آید. نتیجه محلی سازی ناظر نسبت به سایر پیش آمدهای کنترل پذیر در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. بنابراین می‌توان گفت، محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر پیش آمد کنترل پذیر، با حذف گذرهایی از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده‌اند ولی کنترل کننده محلی اختیار غیرفعال کردن آنها را ندارد و کاهش ناظر یکپارچه نسبت به مدل گسسته-پیش آمد ساده شده با استفاده از دستور *supreduce* قابل انجام است. لازم به ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش آمد کنترل پذیری که محلی سازی نسبت به آن انجام می‌پذیرد، نمی‌باشد. پیاده سازی کنترل کننده‌های محلی که عملکرد همزمان آنها در سیستم گسسته-پیش آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه است، ساده تر از پیاده سازی ناظر یکپارچه خواهد بود. از آنجا که کنترل کننده‌های محلی متناظر با پیش آمدهای ۵۷ و ۵۵ یکسان هستند، نتیجه الگوریتم محلی سازی برای هر دو پیش-آمد در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- مدل گسسته-پیش آمد ایستگاه تقویت فشار گاز برای پیش گیری از وقوع سرچ



شکل ۱۷: مشخصه پیش گیری از وقوع سرچ

همچنین ناظر کاهش یافته با استفاده از دستور *supreduce* معادل کنترل کننده محلی به دست آمده در شکل ۲۱ است. بنابراین محلی سازی ناظر نسبت به پیش-آمدهای ۵۷ و ۵۵ برای پیاده سازی ساده تر منطق کنترلی نسبت به این پیش آمدها مؤثر نبوده است.

- [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.
- [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. 1<sup>st</sup> 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, New York, 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.

### پیوست

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

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 محل‌سازی ناظر نسبت به اجزای سیستم گسسته--پیش‌آمد استفاده می‌شود.
SA	برای مشاهده جدول داده‌های کنترلی یک ناظر استفاده می‌شود.