

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

وحید سعیدی^۱، علی اکبر افضلیان^۲، داود غرویانی^۳

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

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، afzalian@sbu.ac.ir

^۳ 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 گذرهای 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-پیش آمد، 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 سیستم های گسسته-پیش آمد^۱ که اولین بار توسط Ramadge و Wonham ارائه شد ابزار مناسبی برای کنترل این دسته از سیستم ها را ارائه می کند. با استفاده از این نظریه می توان کنترل کننده ناظر را به گونه ای 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-پیش آمد بیان می شود، مشخصات کنترلی با حداقل محدودیت برآورده گردد. اهداف کنترلی مختلفی در این نظریه دنبال می شود که مهمترین آنها ایمنی، رسیدن به رفتار مورد نظر و عدم انسداد در رفتار ناظر است. با استفاده از این نظریه می توان 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 حالت ها می باشد که در برخی موارد منجر به انفجار حالت می شود. به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی، رویکردهای مختلفی همچون، پودمانی [۱-۳]، سلسله مراتبی [۴]، ترکیب پودمانی و سلسله مراتبی [۵، ۶] و نیز روش های مبتنی بر اتوماتای غیرقطعی [۷، ۸] در کنترل نظارتی سیستم های گسسته-پیش آمد گزارش شده است. همچنین کنترل نظارتی غیرمتمرکز برای کاهش پیچیدگی در سیستم های گسسته-پیش آمد ابعاد وسیع [۹-۱۱] پیشنهاد شده است. از آنجا که یک ناظر غیرمتمرکز دارای مشاهدات جزئی از سیستم گسسته-پیش آمد 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 زبان های بسته^{۱۰} ارائه شده است، اما موضوع انسداد^{۱۱} ناظر مورد بررسی قرار نگرفته است. تفکیک پذیری^{۱۲} و تفکیک پذیری قوی^{۱۳} (هم زمان بودن^{۱۴}) برای ایجاد کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد بالا به پایین^{۱۵} در [۹] معرفی شده است. اخیراً، روشی برای یافتن زیر زبان تفکیک پذیر یک

مشخصه معرفی شده است [۱۳]. در رویکرد بالا به پایین، کنترل نظارتی گسترده^{۱۶} که با استفاده از الگوریتم محلی سازی ناظر^{۱۷} ساخته می شود، تضمین می کند که بین کنترل کننده های محلی درگیری اتفاق نمی افتد. اگرچه اختیارات کنترلی هر یک کنترل کننده ها محلی است، اما مشاهدات مورد نیاز هر یک از آنها برای تصمیم گیری سازگار به صورت سیستماتیک تعیین می گردد. در ضمن، سنکرون سازی کنترل کننده های محلی با سیستم گسسته-پیش آمد 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 می کند، این روش از مدل اتوماتای ناظر بهره می برد. ۲- به دلیل محدودیت در مشاهدات کنترل کننده های غیرمتمرکز، ممکن است بین آنها درگیری ایجاد شود در حالی که در این روش عدم درگیری بین کنترل کننده های محلی تضمین شده است. اگرچه در کنترل نظارتی غیرمتمرکز با رویکرد پایین به بالا^{۱۸}، با ایجاد هماهنگی-کننده^{۱۹} درگیری بین ناظرهای غیرمتمرکز از بین می رود [۱۵-۱۷].

در این مقاله، الگوریتم محلی سازی ناظر که در [۱۴] ارائه شده است، برای محاسبه کنترل کننده های محلی متناظر با هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر تعمیم^{۲۰} داده می شود. الگوریتم محلی سازی ناظر روشی برای محاسبه کنترل کننده های محلی در سیستم های گسسته-پیش آمدی است که از چند جزء^{۲۱} تشکیل شده باشند. این روش با توسعه الگوریتم کاهش ناظر^{۲۲} نسبت به پیش آمدهای کنترل پذیر در هر یک از اجزاء سیستم ارائه شده است [۱۸]. در این مقاله، نشان داده می شود که ناظر یکپارچه را می توان نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر محلی سازی نمود و کنترل کننده های محلی به دست آورد که عملکرد همزمان آن ها در سیستم گسسته-پیش آمد معادل کنترلی^{۲۳} ناظر یکپارچه باشد. دو روش برای تعمیم محلی سازی ناظر یکپارچه پیشنهاد می گردد، ۱- حلقه نمودن گذرهای غیر از گذری که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می گیرد در حالت هایی از ناظر یکپارچه که گذرها در آن غیرفعال شده اند. سپس ساده سازی ناظر حلقه شده با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر انجام می گیرد. ۲- گذرهای از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده اند، حذف می شوند و ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم

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

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

روشهای ارائه شده در زیربخش های ۳-۳ و ۴-۳ و با انجام تغییراتی در مدل های تغذیه شده به TCT انجام شده است.

در بخش دوم، مفاهیم و تعاریف پایه در نظریه کنترل نظارتی سیستم های گسسته-پیش آمد مرور شده است. در بخش سوم، علاوه بر مرور روش های کاهش ناظر و محلی سازی ناظر، دو روش برای محلی سازی کنترل نظارتی یکپارچه نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر، 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 پیش گیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز، روش ارائه شده در بخش سوم راستی آزمایی شده است. نتیجه گیری از روش ارائه شده در مقاله، در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- کنترل نظارتی سیستم های گسسته-پیش آمد

سیستم گسسته-پیش آمد (وقایع منفصل) یک سیستم گسسته حالت و پیش آمد تحریک^۵ است که تغییر و تحول در حالت های آن به طور کامل به وقوع پیش آمدهای گسسته غیرهمزمان در طول زمان بستگی دارد [۲۰]. پیش آمد، متغیری است که بیان گر تغییر از یک حالت گسسته به حالت گسسته دیگر است که در یک لحظه زمانی اتفاق می افتد. یک زبان^۶ L روی مجموعه پیش آمد Σ مجموعه ای از رشته های با طول محدود (سلسله پیش آمدهای محدود) است که از پیش آمدهای مجموعه Σ ساخته شده باشد، به عبارت دیگر $L \subseteq \Sigma^*$ است. Σ^* اجتماعی از مجموعه تمامی سلسله پیش آمدهای محدود و مجموعه متشکل از پیش آمد تهی (ϵ) است. پیش آمد تهی، بدین معنی است که هیچ پیش آمدی از مجموعه Σ رخ نداده است. یک اتوماتون^۷ با پنج تایی $A = (Y, \Sigma, \eta, y_0, Y_m)$ معرفی می گردد به طوری که $\eta: Y \times \Sigma \rightarrow Y$ است. همچنین Y مجموعه حالت ها، Σ مجموعه پیش آمدها، η تابع گذر حالت، y_0 حالت اولیه و Y_m مجموعه حالت های نشان دار می باشد. یک اتوماتون ابزاری برای معرفی یک زبان مطابق با قواعد تعریف شده است. ساده ترین راه برای معرفی مفهوم اتوماتون، استفاده از گراف جهت دار یا دیاگرام گذر حالت است. اتوماتا جمع اتوماتون هاست. مولد^۸ $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ همان اتوماتون A است که حالت های بن بست آن حذف شده است. حالت هایی بن بست هستند که از آنها گذری برای رسیدن به سایر حالت ها وجود ندارد. در این تعریف δ 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 پیش آمدهایی در Σ^* 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 δ در حالت اولیه q_0 و با سلسله پیش آمد s تعریف شده است. زبان

کاهش ناظر نسبت به مدل گسسته-پیش آمد ساده شده کاهش می یابد. لازم به ذکر است این گذرها شامل گذرهای ایجاد شده از پیش آمد کنترل پذیر که محلی سازی نسبت به آن انجام می پذیرد، نمی باشند. همچنین، در قضیه ۱ ثابت می شود که نتیجه دو روش یکسان است.

اهمیت این روش زمانی مشخص می شود که سیستم گسسته-پیش آمد تنها از یک بخش با تعدادی پیش آمد کنترل پذیر تشکیل شده باشد یا این که برخی از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد دارای چندین پیش آمد کنترل پذیر باشند. چنانچه سیستم گسسته-پیش آمد تنها دارای یک جزء باشد روش معرفی شده در [۱۴] امکان محلی سازی ناظر را ندارد. چنانچه برخی از اجزای سیستم گسسته-پیش آمد بیش از یک پیش آمد کنترل پذیر داشته باشند این روش ممکن است کنترل کننده های محلی با تعداد حالت های کمتری را ایجاد نماید. از مزیت های روش ارائه شده در این مقاله آنست که چون محلی سازی ناظر نسبت به اجزاء^۱ سیستم انجام نمی شود لذا بر خلاف روش ارائه شده در [۱۴] اجزاء سیستم می توانند پیش آمدهای مشترک نیز داشته باشند. با وجود اینکه هر کنترل کننده محلی امکان مشاهده رفتار سایر کنترل کننده ها را دارد، اما هر یک از کنترل کننده های محلی تنها اختیار غیرفعال کردن یک پیش آمد کنترل پذیر را دارد. در ادامه با استفاده از دو مثال کنترل نظارتی مسیر تردد^۲ و کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرج^۳ در ایستگاه تقویت فشار گاز اهمیت روش ارائه شده در این مقاله روشن می گردد. با محلی سازی ناظر یکپارچه مسیر تردد، نشان داده خواهد شد که هر کنترل کننده محلی متناظر با هر پیش آمد کنترل پذیر می تواند به صورت ساده تر و با تعداد حالت ها و پیش آمدهای کمتری نسبت به ناظرهای محلی که نسبت به هر یک از اجزاء^۴ سیستم ساخته شده اند، ایجاد گردد. در محلی سازی ناظر یکپارچه پیش گیری از وقوع سرج نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر، می توان اقدامات کنترلی را به شکل ساده تری به برنامه کامپیوتری تبدیل کرد که بتوان روی سیستم های صنعتی پیاده سازی نمود. به طور مشابه با الگوریتم محلی سازی ناظر [۱۴]، در این روش نیز از عملگر AND در هر یک از کنترل کننده های محلی استفاده می گردد. تمامی مراحل مدل سازی، تبدیل منطق کنترلی به مدل گسسته-پیش آمد، طراحی و کاهش ناظر و نیز محلی سازی ناظر با استفاده از نرم افزار TCT [۱۹] انجام شده است. TCT یک نرم افزار دانشگاهی است که برای طراحی کنترل نظارتی سیستم های گسسته-پیش آمد و موضوعات مرتبط با آن ارائه شده است. این نرم افزار محلی سازی ناظر را تنها نسبت به پیش آمدهای هر یک از اجزای سیستم گسسته-پیش آمد انجام می دهد و قادر نیست محلی سازی ناظر یکپارچه را نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر اجرا نماید. لذا شبیه سازی های ارائه شده در این مقاله، مطابق

^۵Event Driven

^۶Language

^۷Automaton

^۸Generator

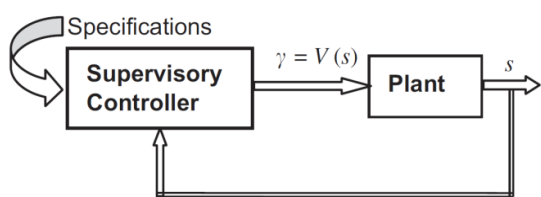
^۱ Components

^۲Guide way

^۳Surge-Avoidance Supervisor

^۴Components

می گردد، به طوری که $\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$ و $P_i^{-1}: Pwr(\Sigma_i^*) \rightarrow$ $i = 1, 2$ است [۲۰]. زبان های L_1, L_2 که $(L_1, L_2) \subseteq \Sigma^* \times \Sigma^*$ باشد، غیر درگیر^۷ نامیده می شوند اگر $\overline{L_1} \cap \overline{L_2} = \overline{L_1} \cap \overline{L_2}$ برقرار باشد. همچنین مولدهای (G_1, G_2) غیر درگیر نامیده می شوند اگر زبان های نشان دار آنها غیر درگیر باشند [۲۱]. درگیری دو زبان L_1, L_2 بدین معنی است که اشتراک آنها (عملکرد همزمان آنها) دچار انسداد شده و هیچ سلسله پیش آمدی برای رسیدن از $\bar{L}_i, i = 1, 2$ وجود نداشته باشد. منظور از کنترل نظارتی یک سیستم گسسته-پیش آمد، غیر فعال کردن برخی از پیش آمدهای کنترل پذیر است. به همین دلیل مجموعه کل پیش آمدها به دو زیرمجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر (Σ_c) و پیش آمدهای کنترل ناپذیر (Σ_u) افراز می شوند. پیش آمدهایی که امکان غیر فعال کردن آنها توسط ناظر وجود دارد، کنترل پذیر و پیش آمدهایی که امکان غیر فعال کردن آنها برای ناظر وجود ندارد، کنترل ناپذیر هستند [۱۷]. زیرمجموعه خاصی از پیش آمدها که باید فعال شوند با مشخص نمودن زیرمجموعه ای از پیش آمدهای کنترل پذیر انتخاب می شوند. چنانچه این مجموعه را با مجموعه پیش آمدهای کنترل ناپذیر که به طور خودکار فعال هستند ملحق کنیم، چنین زیرمجموعه ای از پیش آمدها الگوی کنترلی^۸ نامیده می شود و مجموعه تمامی الگوهای کنترلی به صورت $\Gamma = \{\gamma \in Pwr(\Sigma) | \gamma \supseteq \Sigma_u\}$ معرفی می گردد. کنترل نظارتی سیستم گسسته-پیش آمد G ، با نگاشت V به صورت $V: L(G) \rightarrow \Gamma$ تعریف شده و جفت (G, V) بصورت V/G نوشته می شود. بدین ترتیب G تحت نظارت V می باشد (شکل ۱) [۲۲]. زبان $K \subseteq \Sigma^*$ نسبت به G کنترل پذیر 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 پیش آمد کنترل ناپذیر رخ می دهد [۱۷].



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم تحت نظارت [۲۲]

در کنترل نظارتی سیستم های گسسته-پیش آمد، هنگامی که ناظر نمی تواند همه پیش آمدهای تولید شده به وسیله سیستم را مشاهده کند مفاهیم نرمال بودن^۹ [۲۳، ۱۲]، پارانرمال بودن^{۱۰} [۱۷]، رؤیت پذیری نسبی^{۱۱} [۲۴] و رؤیت پذیری^{۱۲} [۱۲] ناظر با مشاهدات جزئی مطرح می شود.

نشان دار G شامل سلسله پیش آمدهایی است که در $L(G)$ وجود داشته باشد و از حالت اولیه به یک حالت نشان دار ختم شود. یعنی $L_m(G) = \{s \in L(G) | \delta(q_0, s) \in Q_m\}$ برقرار باشد. سلسله پیش آمد^۱ $s' \leq s$ نشان داده می شود. مجموعه بسته^۱ یک زبان L با $\bar{L}$ نشان داده می شود و شامل تمامی پیشوندهای زبان L است. اگر یک زبان با مجموعه بسته اش مساوی باشد ($L = \bar{L}$) آنگاه به آن، زبان بسته می گویند. زبان بسته $\bar{L}$ شامل تمامی پیشوندهای سلسله پیش آمدهای زبان L است. حالت $q \in Q$ دسترس پذیر^۲ است اگر بتوان از حالت اولیه به آن رسید. یعنی $\{\exists s \in L(G) | \delta(q_0, s) = q\}$ برقرار باشد. مولد G دسترس پذیر است اگر همه حالت های آن دسترس پذیر باشد. حالت q هم دسترس پذیر^۳ است اگر دنباله پیش آمدی وجود داشته باشد که آن را به یک حالت نشان دار برساند. یعنی $\{\exists q_m \in Q_m, \exists s \in \Sigma^* | \delta(q, s) = q_m \text{ and } q_m = \delta(q, s)\}$ برقرار باشد. مولدی هم دسترس پذیر است که تمام حالت های آن هم دسترس پذیر باشد. مولد G را مرتب^۴ گویند اگر دسترس پذیر و هم دسترس پذیر باشد. مولد G را بدون انسداد گویند اگر هر حالت دسترس پذیر آن، هم دسترس پذیر نیز باشد. اگر G مرتب باشد می توان نتیجه گرفت که بدون انسداد است [۱۷].

تصویر طبیعی^۵ یک سلسله پیش آمد یا به طور ساده تصویر یک سلسله پیش آمد، زبانی است که روی مجموعه $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$ ساخته شده و با P نشان داده می شود. Σ_0 مجموعه پیش آمدهای رؤیت پذیر می باشد. پیش آمدهای رؤیت ناپذیر نیز پیش آمدهایی هستند که از کانال تصویر عبور نمی کنند. تعریف ریاضی تصویر طبیعی یک سلسله پیش آمد به صورت $P: \Sigma^* \rightarrow \Sigma_0^*$ است که در آن $P(\epsilon) := \epsilon$ و $P(s)P(\sigma) = P(s\sigma)$ for $s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma$ باشد. تعریف تصویر طبیعی را می توان به صورت $P: Pwr(\Sigma^*) \rightarrow Pwr(\Sigma_0^*)$ تعمیم داد. بدین ترتیب برای هر زبان $L \subseteq \Sigma^*$ ، $P(L) := \{P(s) | s \in L\}$ تعریف خواهد شد. در تصویر یک سلسله پیش آمد، پیش آمدهایی که از کانال تصویر (با مدل ریاضی P) عبور نمی کنند، حذف می گردند. بر این اساس، عکس تصویر طبیعی به صورت $P^{-1}: Pwr(\Sigma_0^*) \rightarrow Pwr(\Sigma^*)$ تعریف می گردد، 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^{Σ^*} استفاده شده است، یعنی $Pwr(\Sigma^*)$ تمامی زیرمجموعه های ممکن از مجموعه Σ^* می باشد [۲۱]. ضرب همزمان^۶ دو زبان L_1 و L_2 به صورت $L_1 \parallel L_2$ نشان داده شده و به صورت $L = L_1 \parallel L_2 = (P_1^{-1}L_1) \cap (P_2^{-1}L_2)$ تعریف

^۷Non-conflicting

^۸Control Pattern

^۹Normality

^{۱۰}Paranormality

^{۱۱}Relative Observability

^{۱۲}Observability

^۱Closure

^۲Reachable

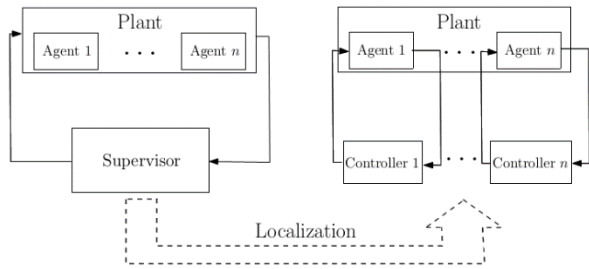
^۳Coreachable

^۴Trim

^۵Natural Projection

^۶Synchronous Product

برای عامل G^k کنترل کننده محلی نامیده می شود. در این صورت LOC^k تنها پیش آمدهای موجود در مجموعه Σ_c^k را غیرفعال می نماید. این در حالیکه است که دامنه مشاهده LOC^k الزاماً محدود به مجموعه پیش آمد Σ^k نمی باشد. در شکل ۲ بلوک دیاگرام ناظر محلی سازی شده نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۲: بلوک دیاگرام ناظر محلی سازی شده [۱۴]

۳- محلی سازی کنترل نظارتی یکپارچه بر اساس الگوریتم کاهش ناظر

الگوریتم محلی سازی ناظر [۱۴]، روشی را برای کاهش تعداد حالت-های ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد ارائه می کند. 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 می دهد. ناظر کاهش یافته دارای مزایایی نسبت به ناظر اصلی بوده، که مهمترین آن کاهش تعداد حالت ها و ساده شدن پیاده سازی ناظر است. این روش، یک روش ذهنی ۳ است یعنی دسته بندی حالت های سازگار کنترلی به گونه ای است که نمی توان 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 محلی سازی ناظر [۱۴] ارائه گردیده است.

۳-۱- مروری بر الگوریتم کاهش ناظر

الگوریتم کاهش ناظر مولدی را ایجاد می کند که معادل کنترلی ناظر یکپارچه نسبت به سیستم می باشد. چنانچه ناظر $K_S \neq \emptyset$ باشد می توان 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 می دهد که پیش آمدهای رؤیت پذیر، کنترل ناپذیرند، یعنی امکان غیرفعال کردن آنها وجود ندارد. به عبارت دیگر، زبان K نسبت به $(L_m(G), P)$ نرمال نامیده می شود اگر $P^{-1}P(K) \cap L_m(G) = K$ برقرار باشد. پارانرمال بودن یک زبان نشان می دهد که وقوع پیش آمدهای رؤیت ناپذیر (کنترل پذیر یا کنترل ناپذیر) از زبان بسته خارج نمی شود. زبان K نسبت به $(L(G), P)$ پارانرمال نامیده می شود اگر $\bar{K}(\Sigma - \Sigma_o) \cap L(G) \subseteq \bar{K}$ برقرار باشد. اگر پیش آمدهای رؤیت ناپذیر، کنترل ناپذیر 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 هم رؤیت پذیری^۱ با نام هم پارانرمال بودن^۲ تعریف می گردد.

هم پارانرمال بودن یک زبان تضمین می کند هر سلسله پیش آمدی که در $\bar{K}$ به وسیله یک پیش آمد رؤیت ناپذیر (نسبت به کانال تصویر P_k) تعریف شده در $L(G)$ دنبال شود، باید در $\bar{K}$ باقی بماند. یعنی اینکه اگر پیش آمدی برای یک کنترل کننده قابل مشاهده نبود کنترل کننده های دیگر با داشتن $\bar{K}$ تصمیم سازگار را برای غیرفعال کردن آن پیش آمد اتخاذ نمایند. بر اساس تعریف پارانرمال بودن، ناظری پارانرمال است که پیش آمدهای کنترل پذیر آن رؤیت پذیر باشند. با توجه به این گزاره، می توان مجموعه ای از کنترل کننده های محلی را به گونه ای ایجاد نمود که هر یک تنها پیش آمدهای کنترل پذیر (قابل غیرفعال کردن) مربوط به خود را مشاهده کنند.

زبان K نسبت به $(L(G), P_k, \Sigma_c^k)$ که $\forall k \in P_k: \Sigma^* \rightarrow (\Sigma^k)^*$ مجموعه اندیس های هر یک از زیرمجموعه های مربوط به پیش آمدهای کنترل پذیر است، هم پارانرمال نامیده می شود، اگر $\forall k \in P_k: K = \bigcap_k K_k, \exists K_k, \bar{K}_k(\Sigma - \Sigma^k) \cap L(G) \subseteq \bar{K}_k$ باشد [۲۵]. K_k زبانی پارانرمال است که از K به دست می آید. 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 پیش آمدهای افزاز شده $\Sigma^k (k \in \mathcal{K})$ باشد، بنابراین $\Sigma = \bigcup \{\Sigma^k, k \in \mathcal{K}\}$ می باشد. نماد $\bigcup$ به معنی اجتماع از مجموعه هاست 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 نشان دار G به ترتیب $\{L_k, k \in \mathcal{K}\}$ و $\{L_{m,k}, k \in \mathcal{K}\}$ خواهد بود. برای سادگی فرض می شود 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 پیش آمدهای $\Sigma_c^k = \Sigma^k \cap \Sigma_c$ و $\Sigma_u^k = \Sigma^k \cap \Sigma_u$ ایجاد شده و مولد LOC^k روی مجموعه پیش آمد Σ

^۱Heuristic Method

^۲Recognizer

^۱Coobservability

^۲Coparanormality

$$\begin{aligned}
 (i) i_0 &= \text{some } i \in I \text{ with } x_0 \in X_i \\
 (ii) I_m &= \{i \in I | X_i \cap X_m \neq \emptyset\} \\
 (iii) \kappa: I \times \Sigma &\rightarrow I \text{ with } \kappa(i, \sigma) = j \text{ provided} \\
 &\text{for such choice of } j \in I, \\
 (\exists x \in X_i) \xi(x, \sigma) &\in X_j \& (\forall x' \in X_i) [\xi(x', \sigma)! \Rightarrow \\
 &\xi(x', \sigma) \in X_j]
 \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned}
 (i) (\forall z \in Z) (\exists s \in L(SUP)) \zeta(z_0, s) &= z \\
 (ii) (\forall z \in Z) (\forall \sigma \in \Sigma) [\zeta(z, \sigma)! \Rightarrow \\
 (\exists s \in L(SUP)) [s\sigma \in L(SUP) \& \zeta(z_0, s) &= z]] \\
 (iii) (\forall z \in Z_m) (\exists s \in L_m(SUP)) \zeta(z_0, s) &= z
 \end{aligned} \quad (8)$$

دو مولد $RSUP = (Z, \Sigma, \zeta, z_0, Z_m)$ و $J = (I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ با
نگاشت ایزومورفسم θ ایزومورفیک^۵ هستند اگر نگاشت $\theta: Z \rightarrow I$ وجود
داشته باشد بطوری که

$$\begin{aligned}
 (i) \theta: Z &\rightarrow I \text{ is a bijection} \\
 (ii) \theta(z_0) &= i_0 \text{ and } \theta(Z_m) = I_m \\
 (iii) (\forall z \in Z) (\forall \sigma \in \Sigma) \zeta(z, \sigma)! \Rightarrow \\
 [\kappa(\theta(z), \sigma)! \& \kappa(\theta(z), \sigma) &= \theta(\zeta(z, \sigma))] \\
 (iv) (\exists i \in I) (\forall \sigma \in \Sigma) \kappa(i, \sigma)! \Rightarrow &[(\exists z \in Z) \\
 \zeta(z, \sigma)! \& \theta(z) &= i]
 \end{aligned} \quad (9)$$

در [۱۸] ثابت شده است که $RSUP$ معادل کنترلی SUP نسبت به 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
 $D^k(x) = \{\sigma \in \Sigma_c^k \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in Pwr(\Sigma_c^k) \\ \xi(x_0, \sigma) = x \& \delta(q_0, s\sigma)!)\}$ تعریف می گردد. $D^k(x)$ مجموعه
پیش آمدهای کنترل پذیر در Σ_c^k است که باید در X غیرفعال شوند. اگر پیش آمد
 $T: X \rightarrow \{1, 0\}$ نیز مانند آنچه در زیربخش ۳-۱ آمده، تعریف می گردد. رابطه
باینری سازگاری کنترلی R^k روی X تعریف می گردد. برای هر $x, x' \in X$
گوییم که $x, x' \in R^k$ (نسبت به Σ_c^k) سازگار کنترلی است و نوشته می شود $(x, x') \in R^k$
اگر شرایط زیر برقرار باشد:

$$E(x) \cap D^k(x') = \emptyset = E(x') \cap D^k(x) \quad (10)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \quad (11)$$

$|SUP| \ll |RSUP|$ به معنی آنست که تعداد حالت های $RSUP$ نسبت به
تعداد حالت های SUP کمتر است. الگوریتم کاهش ناظر با ادغام حالت هایی که
سازگار کنترلی^۱ 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^۲ (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 $(\exists s \in \Sigma^*) \xi(x_0, s) =$
 $x \& \delta(q_0, s) \in Q_m$ تعریف می شود. یعنی اینکه سلسله پیش آمدی که در
 SUP به حالت x رسیده است در G به یک حالت نشان دار برسد. حال فرض کنید
که $\mathcal{R} \subseteq X \times X$ یک رابطه دودویی برای هر جفت حالت $x, x' \in X$ سازگار کنترلی هستند یعنی
در SUP باشد. هر جفت حالت $x, x' \in X$ سازگار کنترلی هستند یعنی
 $(x, x') \in \mathcal{R}$

$$E(x) \cap D(x') = E(x') \cap D(x) = \emptyset \quad (3)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \quad (4)$$

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 SUP نشان دار بوده یا هر دو نشان دار
نباشند. یک پوشش^۳ بصورت $\mathcal{C} = \{X_i \subseteq X \mid i \in I\}$ از مجموعه حالت های
 X پوشش کنترلی روی SUP نامیده می شود اگر

$$(\forall i \in I) X_i \neq \emptyset \& (\forall x, x' \in X_i) (x, x') \in \mathcal{R} \quad (5)$$

$$(\forall i \in I) (\forall \sigma \in \Sigma) (\exists j \in I) [(\forall x \in X_i) \xi(x, \sigma)! \Rightarrow \xi(x, \sigma) \in X_j] \quad (6)$$

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 SUP را در صورتی که سازگار کنترلی باشند در
حالت X_i ($i \in I$) انباشته^۴ 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 σ 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 SUP ، یک ناظر القایی^۵ بصورت $J =$
 $(I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ ساخته می شود که در آن شرایط (۷) برقرار باشد [۱۸].

^۵Induced Supervisor

^۶Isomorphism

^۷Isomorphic

^۱Control Consistent

^۲flag

^۳Cover

^۴Lump

۳-۳- ایجاد کنترل کننده های محلی با استفاده از حلقه نمودن گذرهای غیر فعال شده در ناظر

الگوریتم محلی سازی ناظر در زیربخش ۳-۲ کنترل کننده های محلی را نسبت به پیش آمدهای کنترل پذیر هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد ایجاد می نماید. به منظور تعمیم الگوریتم محلی سازی ناظر نسبت به هر افزاز دلخواه از پیش آمدهای کنترل پذیر سیستم گسسته-پیش آمد، مجموعه پیش آمدهای غیر فعال شده در حالت دلخواه X می تواند 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 سلول های پوشش کنترلی C^k (متناظر با کنترل کننده محلی k ام) است. در حالت خاص می توان افزاز مجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر سیستم را به گونه ای انجام داد که هر زیرمجموعه تنها دارای یک پیش-آمد کنترل پذیر باشد. لذا می توان رابطه (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

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

که در آن $\neg \xi_k(x, \sigma) \& (\exists s \in \Sigma^*) [\xi_k(x_0, s) = x \& \delta(q_0, s\sigma) = x]$

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 حالت های ناظر یکپارچه به کار می رود، با این حال می توان این الگوریتم را برای کاهش تعداد حالت های هر کنترل کننده محلی نیز به کار برد.

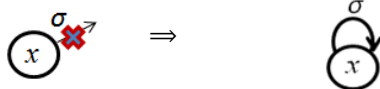
از آنجا که k امین مجموعه پیش آمدهای کنترل پذیر تنها می تواند در k امین کنترل کننده محلی غیر فعال شود، برای هر جفت حالت (x, x') در k امین کنترل کننده محلی می توان نوشت $\forall j \neq k, E(x') \cap D^j(x) = E(x) \cap D^j(x) = \emptyset$ و به صورت (۳) $E(x) \cap E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$

$D^k(x') = \emptyset$ ساده سازی می گردد. این بدان معنی است که

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

برقرار بوده، حتی اگر $E(x') \cap D(x) \neq \emptyset$ باشد. با توجه به مفهوم هم-پارائتمال بودن یک ناظر یکپارچه که در [۲۵] معرفی شده است می توان برای محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر تمامی پیش آمدهای کنترل پذیر به جز پیش آمدی که محلی سازی نسبت به آن انجام می-شود، را در حالت هایی که غیر فعال شده اند به صورت حلقه شده^۱ ایجاد نمود. این وضعیت در شکل ۳ نشان داده شده است.

با تبدیل پیش آمدهای کنترل پذیر غیر فعال به فرم حلقه شده (مطابق شکل ۳)، محلی سازی SUP نسبت به σ_k با ایجاد اتوماتای S_k نسبت به هر یک از پیش آمدهای σ_k صورت می پذیرد. بدیهی است پیش آمد σ_k (پیش آمد کنترل پذیری که محلی سازی نسبت به آن انجام می گیرد) به صورت حلقه شده تبدیل نخواهد شد چون کنترل کننده محلی اختیار غیر فعال کردن آن را دارد.



شکل ۳: تبدیل پیش آمد کنترل پذیر غیر فعال در ناظر یکپارچه به فرم حلقه شده در کنترل کننده محلی ($\sigma \neq \sigma_k$)

فرض کنید I^k مجموعه اندیس های هر یک از سلول های $C^k = \{X_{ik}^k \subseteq X | i^k \in I^k\}$ باشد. C^k یک پوشش کنترلی روی X نسبت به Σ_C^k نامیده می شود اگر شرایط زیر برقرار باشد:

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

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

C^k پوشش کنترلی متناظر با کنترل کننده k ام روی X می باشد. یک پوشش کنترلی C^k حالت های SUP را روی سلول های $X_{ik}^k (i^k \in I^k)$ تجمع می کند. 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 دسترسی هستند سازگار کنترلی باشند. با ایجاد یک پوشش کنترلی C^k روی X مبتنی بر تنها اطلاعات کنترلی Σ_C^k می توان مولد القایی $J^k = (I^k, \Sigma, \kappa^k, i_0^k, I_m^k)$ را با روابط زیر ایجاد نمود.

$$(i) i_0^k \in I^k \text{ such that } x_0 \in X_{i_0^k}^k \\ (ii) I_m^k = \{i^k \in I^k | X_{i^k}^k \cap X_m \neq \emptyset\} \\ (iii) \kappa^k: I^k \times \Sigma \rightarrow I^k \text{ with } \kappa^k(i^k, \sigma) = j^k, \text{ if } \\ (\exists x \in X_{i^k}^k) \xi(x, \sigma) \in X_{j^k}^k \& (\forall x' \in X_{i^k}^k) \\ [\xi(x', \sigma) \Rightarrow \xi(x', \sigma) \in X_{j^k}^k] \quad (14)$$

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

$$(i) (\forall z \in Z_L) (\exists s \in L(\text{SUP})) \xi(z_{L,0}, s) = z \\ (ii) (\forall z \in Z_L) (\forall \sigma \in \Sigma) [\zeta(z, \sigma) \Rightarrow \\ (\exists s \in L(\text{SUP})) [s\sigma \in L(\text{SUP}) \& \xi(z_{L,0}, s) = z]] \\ (iii) (\forall z \in Z_{L,m}) (\exists s \in L_m(\text{SUP})) \xi(z_{L,0}, s) = z \quad (15)$$

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

$$(i) \theta: Z_L \rightarrow I \text{ is a bijection} \\ (ii) \theta(z_{L,0}) = i_0 \text{ and } \theta(z_{L,m}) = I_m \\ (iii) (\forall z \in Z_L) (\forall \sigma \in \Sigma) \zeta_L(z, \sigma) \Rightarrow \\ [\kappa(\theta(z), \sigma) \& \kappa(\theta(z), \sigma) = \theta(\zeta_L(z, \sigma))] \\ (iv) (\exists i \in I) (\forall \sigma \in \Sigma) \kappa(i, \sigma) \Rightarrow \\ [(\exists z \in Z_L) \zeta_L(z, \sigma) \& \theta(z) = i] \quad (16)$$

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

از آنجا که روش ارائه شده در [۱۴]، محلی سازی ناظر را نسبت به اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد انجام می دهد، در ادامه دو روش برای تعمیم محلی سازی ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر و با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر ارائه شده است.

¹Self-looped

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

$$E(x') \cap D^k(x) = E(x) \cap D^k(x') = \emptyset \quad (18)$$

$$T(x) = T(x') \Rightarrow M(x) = M(x') \quad (19)$$

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

$$(\forall i^k \in I^k)(\forall x, x' \in X_{ik}^k)(x, x' \in R^k) \quad (20)$$

$$(\forall i^k \in I^k, \sigma \in \Sigma) [(\exists j^k \in I^k)(\forall x \in X_{jk}^k) \xi(x, \sigma) \Rightarrow \xi(x, \sigma) \in X_{jk}^k] \quad (21)$$

که در آن 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.

۴-۳- 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 ناپذیر برخورد می نمایند. برای آنکه مجموعه $D(x)$ برای کنترل کننده محلی k بازنویسی شود، می توان σ را در حالت های مدل گسسته-پیش آمد $\mathbf{G}$ متناظر با حالت هایی که σ 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.

$$\delta_R(q, \sigma) := \begin{cases} \delta(q, \sigma) & \text{if } \sigma \in \Sigma_c^k \text{ or } \sigma \notin D(x) \\ \text{not defined} & \text{if } \sigma \in \Sigma - \Sigma_c^k, \sigma \in D(x) \end{cases} \quad (22)$$

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:

$$D^R(x) := \{\sigma \in \Sigma \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in \Sigma^*) [\xi(x_0, s) = x \& \delta_R(q_0, s \sigma)!]\} \quad (23)$$

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 کافیت 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 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 $\sigma \in \Sigma_c^k \Rightarrow \sigma \notin D^R(x)$ زیرا 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.

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

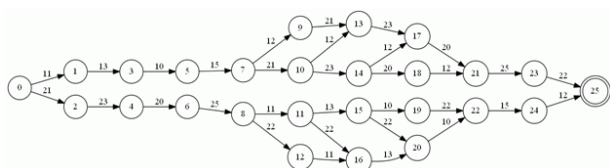
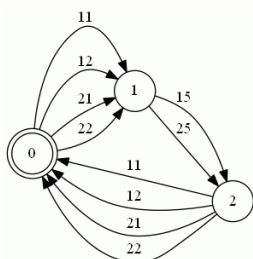
بر اساس رابطه (۱۰)، چنانچه $\sigma \in \Sigma_c^k$ باشد $\delta(q_0, s \sigma) = \delta_R(q_0, s \sigma)$ است. لذا می توان نوشت:

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

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 ۱۳ و ۲۳ را غیرفعال نمی‌کند. بنابراین مشاهده پیش‌آمدهای ۱۳ و ۲۳ تأثیری بر رفتار ناظر ندارد. ناظر نرمال کاهش یافته با استفاده از دستور supreduce در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد 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 $\Sigma_{u0} = \{13,23\}$


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 افزایی 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 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.

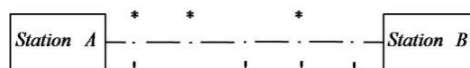
۴- مثال‌هایی از محلی‌سازی کنترل نظارتی

یکپارچه

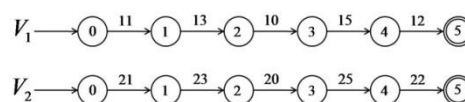
به منظور راستی‌آزمایی روش ارائه شده در این مقاله، محلی‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد^۱ و کنترل نظارتی پیش‌گیری از وقوع سرج^۲ در ایستگاه تقویت فشار گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- محلی‌سازی کنترل نظارتی مسیر تردد

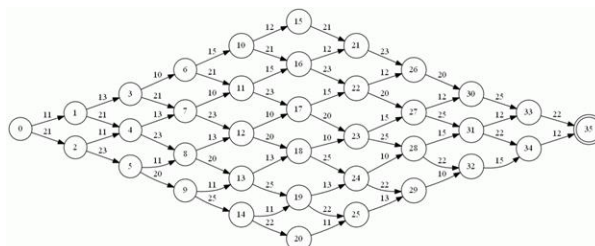
مسیر ترددی را با دو ایستگاه A و B مطابق شکل ۴ در نظر بگیرید. مسیری که ایستگاه‌های A و B را به هم متصل می‌کند شامل ۴ بخش که برخی از آنها دارای چراغ راهنمایی و یا تشخیص دهنده عبور هستند، تشکیل شده است [۱۷]. دو خودرو V_1, V_2 به طور همزمان از مسیر استفاده می‌کنند. $V_i, i = 1, 2$ ممکن است در حالت صفر (در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



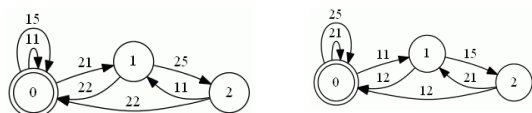
شکل ۵: مدل گسسته-پیش‌آمد هر خودرو


^۳Control Data

^۱Guide way

^۲Surge-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.

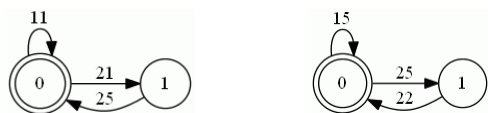


الف - کنترل کننده محلی V_1

ب - کنترل کننده محلی V_2

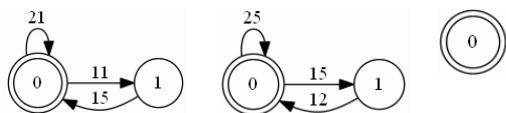
شکل ۹: کنترل کننده های محلی متناظر با هر یک از عامل ها

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 ردف 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^۱، لازم است فشار مسیرهای مکش^۲ و تخلیه^۳ و نیز سرعت کمپرسور در محدوده عادی عملکرد قرار داشته باشند (شکل ۱۱) [۲۷].

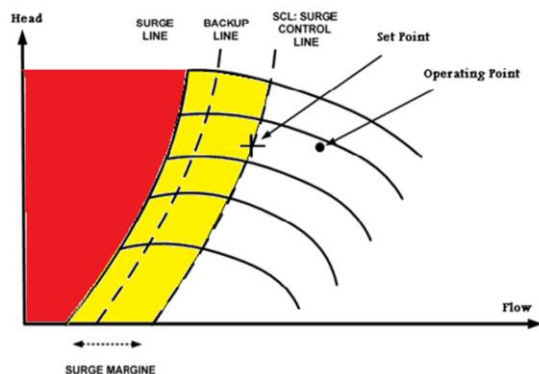
عامل کنترلی ایجاد می کند مثلاً برای ایجاد کنترل کننده محلی V_1 تنها پیش آمدهای ۱۱ و ۱۵ در جدول ۱ غیر فعال فرض می گردد. از آنجا که تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی با تعداد حالت های ناظر کاهش یافته برابر است، ناظر نرمال طراحی شده طبق معیار تعریف شده در [۱۴] قابل محلی سازی نیست (تعداد حالت 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 ۴، ۶ و 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 $E(0) = \{11, 21\}$ ، $D(0) = \emptyset$ و $E(2) = \{11\}$ ، $D(2) = \{23\}$ 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 و $E(0) \cap D^2(2) = \{11\}$ 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 و از سوی دیگر $M(0) = M(2) = 0$ 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 پیش آمد 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

^۲Discharge

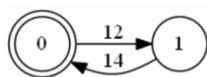
^۱Stable Operating Region

^۳Suction

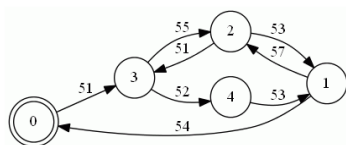
شیر کنارگذر اصلی ترین تجهیز برای جلوگیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز می باشد، به طوری که با تأمین حداقل دبی گاز در کمپرسور نقطه کار را در سمت راست خط SCL حفظ کند. یک مدل گسسته-پیش آمد برای شیر کنارگذر همراه با کنترل کننده PI در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در زمانی که نقطه کار در سمت راست SCL قرار دارد کنترل کننده PI وظایف کنترلی را به عهده دارد. در شکل ۱۵ پیش آمد 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. پیش آمدهای فرد، کنترل پذیر و پیش آمدهای زوج کنترل ناپذیرند.



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-پیش آمد عبور نقطه کار از خط سرج

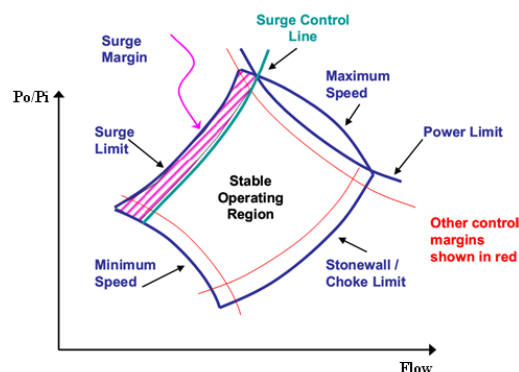


شکل ۱۵: مدل گسسته-پیش آمد از شیر کنارگذر همراه با کنترل کننده PI

با داشتن مدل گسسته-پیش آمد ایستگاه تقویت فشار گاز و منطق کنترلی در شکل های ۱۶ و ۱۷، ناظر یکپارچه طراحی شده مطابق شکل ۱۸ به دست می آید. از آنجا که این ناظر تنها یک عامل کنترلی (شیر کنارگذر) دارد، لذا محلی سازی آن بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۴] امکان پذیر نیست و نمی توان محلی سازی را با استفاده از دستور localize در TCT انجام داد. این در حالی است که بر اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله، می توان ناظر یکپارچه را به منظور کاهش تعداد حالت ها، نسبت به هر یک از پیش آمدها محلی سازی نمود. این کار با استفاده از روش ارائه شده در بخش ۳-۴ و با تغییراتی که مطابق قضیه ۱ در مدل گسسته-پیش آمد (شکل ۱۶) صورت می گیرد، قابل انجام است. به همین منظور از جدول داده های کنترلی ناظر یکپارچه استفاده می شود (جدول ۲).

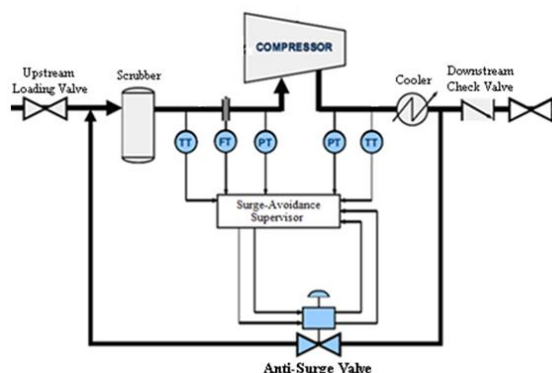
جدول ۲: جدول داده های کنترلی ناظر پیش گیری از وقوع سرج

حالت	پیش آمد غیر فعال شده	حالت	پیش آمد غیر فعال شده
۰	۵۱	۶	۵۱



شکل ۱۱: ناحیه عملکرد کمپرسور در بهره برداری 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 می گردد. در شکل ۱۲ نمودار شماتیکی کنترل حداقل دبی برای پیش گیری 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 می شود. پیش گیری از وقوع سرج با استفاده از باز و بسته نمودن پیوسته شیر کنارگذر کمپرسور انجام می شود. روش های مختلفی برای "کنترل غلبه بر وقوع سرج" گزارش شده است [۲۸، ۲۹] که برخی از آنها از روش های کنترل زمان تحریک و برخی دیگر از روش های کنترل پیش آمد تحریک و به صورت تجربی استفاده نموده اند. روش "پیش گیری 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 پیش آمدهای کنترل پذیر محلی سازی می گردد. از آنجا که هدف این مقاله مدل سازی گسسته-پیش آمد ایستگاه تقویت فشار گاز و طراحی کنترل نظارتی برای پیش گیری از وقوع سرج نیست، توضیحات کامل در [۳۰] ارائه شده است.



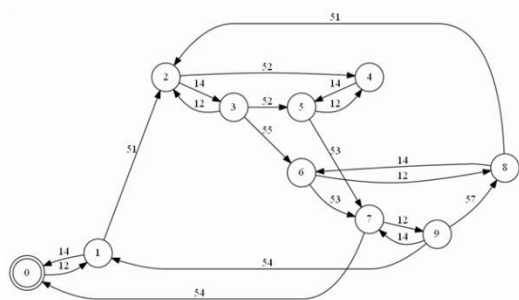
شکل ۱۲: شماتیک یک ایستگاه تقویت فشار گاز تحت کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرج

برای ایجاد منطق کنترلی، خط SCL بر اساس نسبت فشار و دبی کمپرسور در ناحیه عملکرد آن ایجاد می گردد (شکل ۱۳). مدل گسسته-پیش آمد پیش گیری از وقوع سرج که بر اساس عبور از خط SCL ساخته می شود، دارای دو حالت و دو پیش آمد کنترل ناپذیر است (شکل ۱۴). پیش آمد ۱۲ نشان دهنده عبور نقطه کار کمپرسور از خط SCL به سمت چپ و پیش آمد ۱۴ عبور از SCL به سمت راست می باشد.

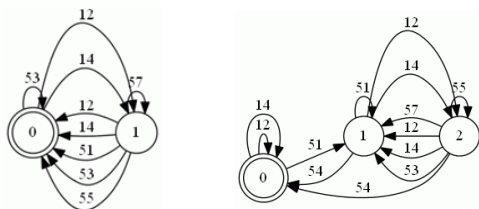
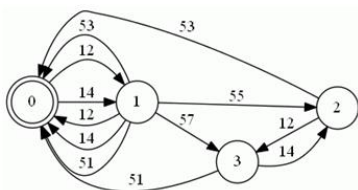
^۲Surge-Avoidance

^۱Anti-Surge Control

۲	۵۵	۷	۵۷
۴	۵۳	۸	۵۳



شکل ۱۸: کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرج

شکل ۱۹: کنترل کننده محلی متناظر با شکل ۲۰: کنترل کننده محلی پیش آمد ۵۱
متناظر با پیش آمد ۵۳

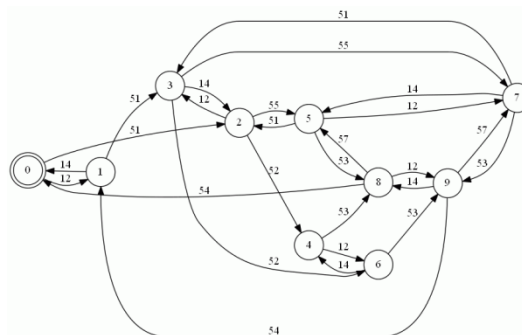
شکل ۲۱: کنترل کننده محلی متناظر با هر یک از پیش آمدهای ۵۵ و ۵۷

۵- نتیجه گیری

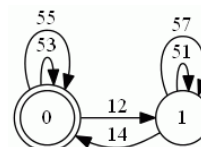
محلی سازی کنترل نظارتی یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت‌ها نسبت به هر یک از عامل‌های کنترلی می‌باشد. روشی که در [۱۴] برای محلی سازی کنترل نظارتی ارائه شده است بر مبنای کاهش ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد می‌باشد. چنانچه فرایند تحت نظارت تنها از یک جزء تشکیل شده باشد، محلی سازی 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 گذرهای غیر از گذری که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می‌گیرد در هر حالتی از ناظر یکپارچه که گذر در آن غیر فعال شده است. ۲- گذرهای از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیر فعال 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 سرج که در آن غیر فعال شده‌اند، حذف (تعریف نشده) گردند. مثلاً حالت ۷ در 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 گذرهای از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیر فعال شده‌اند ولی کنترل کننده محلی اختیار غیر فعال 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 ۵۵ و ۵۷ 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 سرج



شکل ۱۷: مشخصه پیش گیری از وقوع سرج

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 ۵۵ و ۵۷ 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.

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-پیش آمد استفاده می شود.
Mutex	برای حذف کردن برخی از حالت ها از یک مشخصه استفاده می شود.
Supcon	برای طراحی ناظر با مشاهدات کامل استفاده می شود.
Supnorm	برای طراحی ناظر نرمال با مشاهدات جزئی استفاده می شود.
Supreduce	برای کاهش ناظر و به دست آوردن کنترل کننده ای با تعداد حالت کمتر استفاده می شود.
Localize	برای محلی سازی ناظر نسبت به اجزای سیستم گسسته--پیش آمد استفاده می شود.
SA	برای مشاهده جدول داده های کنترلی یک ناظر استفاده می شود.

- [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, 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.