



نشریه علمی - پژوهشی

انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - قطب علمی کنترل صنعتی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

فهرست مقالات

- ۱ بهره‌برداری تاب‌آور، رفاهی و اقتصادی نانوشبکه هوشمند
سعید باقری، حسین طالبی، علیرضا فریدونیان
- ۱۳ همزمانسازی بهینه برخط سیستم‌های چندعاملی غیر خطی با دینامیک‌های نامعلوم
فرزانه تاتاری، محمد باقر نقیبی سیستمی
- ۲۹ محلی‌سازی کنترل نظارتی گسسته - پیش‌آمد نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر
وحید سعیدی، علی اکبر افضلیان، داود غرویان
- ۴۳ طراحی بهینه و ساخت حس‌گر ریزسیالی شناسایی مواد و قرائت‌گر خازنی مبتنی بر چرخه حدی
میثم زمانی پدram، منصور محتشمی‌فر، احمد عفیفی
- ۶۳ تشخیص حملات سایبری نفوذ به زیرساخت‌های حیاتی با بکارگیری روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول
فازی عصبی
زینب قاضی، علی دوست محمدی
- ۷۷ شناسایی و مدل‌سازی توربین گاز و بررسی رفتار مدل نسبت به تغییرات فرکانسی شبکه قدرت
علی ربانی، علی کریم پور



مجله کنترل

ISSN (print) 2008-8345

ISSN (online) 2538-3752



نشریه علمی - پژوهشی، انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران - قطب کنترل صنعتی دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی، جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷

پست الکترونیک: control@isice.ir

صاحب امتیاز: انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران

مدیر مسئول: پروفسور ایرج گودرزنیا

سردبیر: پروفسور علی خاکی صدیق - تلفن: ۸۴۰۶۲۳۱۷ - پست الکترونیک: sedigh@kntu.ac.ir

آدرس محل کار: خیابان دکتر شریعتی، پل سیدخندان، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شورای سردبیری: پروفسور علی خاکی صدیق، پروفسور حمید خالوزاده، دکتر علیرضا فاتحی، دکتر مهدی علیاری شوره دلی.

دبیر اجرایی: دکتر مهدی علیاری شوره دلی - تلفن ۸۴۰۶۲۴۰۳ - پست الکترونیک aliyari@kntu.ac.ir

هیأت تحریریه:

پروفسور علی خاکی صدیق (استاد) - پروفسور ایرج گودرزنیا (استاد) - پروفسور حمید خالوزاده (استاد) - پروفسور پرویز جبه دار مارالانی (استاد) -

پروفسور علی غفاری (استاد) - دکتر حمیدرضا مومنی (دانشیار) - پروفسور سید کمال الدین نیکروش (استاد) - پروفسور مسعود شفیعی (استاد) - پروفسور

بهزاد مشیری (استاد)

هیأت مشاوران:

دکتر حمیدرضا مومنی، پروفسور بهزاد مشیری، پروفسور مسعود شفیعی، پروفسور علی خاکی صدیق، پروفسور پرویز جبه

دار مارالانی، پروفسور علی غفاری، پروفسور حمید خالوزاده، پروفسور حمیدرضا تقی راد، دکتر کیوان مسروری، دکتر

محمدتقی بطحایی، دکتر محمدتقی بهشتی، دکتر فرزاد جعفر کاظمی، دکتر رویا امجدی فرد، پروفسور سید علی اکبر

موسویان، پروفسور محمد تشنه لب، پروفسور محمد حایری، پروفسور سید علی اکبر صفوی، پروفسور حسین سیفی، دکتر

علیرضا فاتحی، دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دکتر مسعود علی اکبر گلکار، دکتر ناصر پریز، دکتر مهرداد جوادی،

دکتر جعفر حیرانی نویری، پروفسور فرامرز حسین بابایی، دکتر بیژن معاونی، دکتر مهدی علیاری شوره دلی، دکتر محمد

عاروان، پروفسور محمد توکلی یینا، دکتر فائزه فریور، دکتر موسی آیتی، دکتر محمد مثوری، دکتر رمضان هاوونگی، دکتر

امین رضانی، دکتر عبدالرسول قاسمی، پروفسور محمد فرخی، دکتر یزدان باتمانی.

هیأت مدیره انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق:

مهندس مرتضی محسنی هماگرانی، دکتر فرزاد جعفر کاظمی، مهندس بهروز خلیلی، مهندس محمد حسن موحدی، دکتر سید علی اکبر صفوی، دکتر

حمیدرضا مومنی، مهندس نور محمد رئیسی

مدیر سایت: مهندس نسیم فراهانی

فهرست مقالات

- ۱ بهره‌برداری تاب‌آور، رفاهی و اقتصادی نانوشبکه هوشمند
سعید باقری، حسین طالبی، علیرضا فریدونیان
- ۱۳ همزمانسازی بهینه برخط سیستم‌های چندعاملی غیر خطی با دینامیک‌های نامعلوم
فرزانه تاتاری، محمد باقر نقیبی سیستمی
- ۲۹ محلی‌سازی کنترل نظارتی گسسته-پیش‌آمد نسبت به هر یک از پیش‌آمدهای کنترل‌پذیر
وحید سعیدی، علی اکبر افضلیان، داود غرویان
- ۴۳ طراحی بهینه و ساخت حس‌گر ریزسیالی شناسایی مواد و قرائت‌گر خازنی مبتنی بر چرخه حدی
میثم زمانی پدرام، منصور محتشمی‌فر، احمد عقیفی
- ۶۳ تشخیص حملات سایبری نفوذ به زیرساخت‌های حیاتی با بکارگیری روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه
اول فازی عصبی
زینب قاضی، علی دوست محمدی
- ۷۷ شناسایی و مدل‌سازی توربین گاز و بررسی رفتار مدل نسبت به تغییرات فرکانسی شبکه قدرت
علی ربانی، علی کریم پور

مجله کنترل، مجله‌ای علمی - پژوهشی است که دربرگیرنده تازه‌ترین نتایج تحقیقات نظری و کاربردی در علوم مختلف مرتبط با مهندسی کنترل و ابزار دقیق می‌باشد. مقالات ارسالی به مجله کنترل می‌بایست به زبان فارسی و دارای چکیده انگلیسی باشند. از میان مباحث مورد نظر این مجله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱) مدل‌سازی، شناسایی، شبیه‌سازی، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و پایش عملکرد سیستم‌ها.
- ۲) تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته از قبیل سیستم‌های کنترل خطی و غیرخطی، سیستم‌های کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم و کنترل بهینه، سیستم‌های کنترل هوشمند، سیستم‌های کنترل تصادفی، سیستم‌های کنترل گسسته پیشامد و ترکیبی، سیستم‌های ابعاد وسیع، سیستم‌های کنترل چندمتغیره.
- ۳) مکاترونیک و رباتیک.
- ۴) ابزار دقیق و سیستم‌های ترکیب داده و اطلاعات سنسوری.
- ۵) اتوماسیون صنعتی از قبیل سیستم‌های کنترل گسترده، رابط انسان - ماشین، سیستم‌های ایمنی و تشخیص عیب، تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل کسری، شناسایی، تشخیص و جبران عیب در سیستم‌ها، سیستم‌های کنترل پیچیده، سیستم‌های زمان حقیقی و سیستم‌های کنترل تحت نظارت، کنترل مدل چندگانه.

کاربردهای مورد علاقه مجله "کنترل"، وسیع بوده و می‌تواند در برگیرنده موارد زیر باشد:

- ۱) سیستم‌های هدایت و ناوبری.
- ۲) فرآیندهای صنعتی شامل فرآیندهای شیمیایی و بیوتکنولوژی.
- ۳) تولید و توزیع نیروی برق.
- ۴) انرژی‌های تجدیدپذیر.
- ۵) مهندسی محیط زیست و هواشناسی.
- ۶) سیستم‌های اقتصادی و مالی.
- ۷) سیستم‌های اطلاعاتی، مخابراتی و شبکه‌های صنعتی.
- ۸) مهندسی پزشکی، مهندسی زیستی و سامانه‌های زیستی.
- ۹) نانو کنترل.
- ۱۰) پردازش داده.
- ۱۱) مهندسی خودرو.
- ۱۲) سیستم‌های حمل و نقل.

از کلیه پژوهشگران و کارشناسان فعال در زمینه‌های مرتبط با مهندسی کنترل و ابزار دقیق دعوت بعمل می‌آید تا مقالات و نتایج آخرین دستاوردهای علمی و پژوهشی خود را به این مجله ارسال نمایند. خواهشمند است مقالات خود را به صورت الکترونیکی از طریق سایت مجله www.joc-isice.ir ارسال فرمایید. برای کسب اطلاعات بیشتر و دریافت نحوه تهیه و ارسال مقالات می‌توانید به سایت مجله مراجعه نمایید.

شیوه تدوین

متن مقالات شامل چکیده، بدنه مقاله، مراجع و زیرنویس‌ها باید با فونت ۱۲ B Zar و با فاصله double میان خطوط، در صفحات A4 یک ستونی و تحت نرم‌افزار Word تهیه گردد.

آدرس نویسندگان

آدرس پستی کامل همه نویسندگان همراه با شماره تلفن و دورنگار (فکس) و نشانی پست الکترونیک (email) نویسنده عهده‌دار مکاتبات در برگه مستقلی چاپ و به همراه مقاله ارسال گردد.

چکیده

هر مقاله باید شامل، عنوان (فارسی و انگلیسی)، چکیده (فارسی و انگلیسی) مقاله در حداکثر ۲۰۰ واژه، کلیدواژه (فارسی و انگلیسی) در حداکثر ۵ واژه باشد.

تصاویر و عکس‌ها

در هنگام ارسال مقاله جهت داوری نیازی به ارسال اصل تصاویر و عکس‌ها نمی‌باشد، ولی رونوشت ارسالی باید واضح باشد. پس از تایید مقاله، ارسال اصل تصاویر و عکس‌ها جهت چاپ مقاله ضروری می‌باشد.

مراجع

به کلیه مراجع باید در متن ارجاع داده شده باشد. مراجع باید با شماره مشخص گردند و جزئیات آنها به شرح زیر در پایان مقاله به ترتیب حروف الفبای نویسندگان ظاهر گردد:

مقالات

[شماره مرجع] نام خانوادگی و علامت اختصاری اول نام، سال انتشار یا تاریخ برگزاری، "عنوان مقاله"، نام کامل نشریه یا کنفرانس، شماره مجله یا شماره جلد، شماره صفحات.

کتابها

[شماره مرجع] نام خانوادگی و نام کامل همه نویسندگان، عنوان کتاب، نام مترجم (در صورت وجود)، نام کامل ناشر، سال انتشار.

واحدها

کلیه مقالات باید از واحد استاندارد SI (متریک) در تمام بخشهای مقاله استفاده نمایند. در کنار واحد SI می‌توان از واحد انگلیسی در داخل پرانتز نیز استفاده نمود.

طول مقالات

حداکثر تعداد صفحات مقاله ۱۵ صفحه است که معادل حدود ۷۵۰۰ واژه است. برای چاپ صفحات بیشتر و یا رنگی لازم است هزینه‌ای معادل ۱۰۱۰۰۰۰ ریال (۲۵ دلار آمریکا) برای هر صفحه پرداخت گردد.

فرآیند ارسال مقاله

مقالات قابل چاپ در مجله شامل مقالات کامل پژوهشی، مقالات کوتاه و یادداشتهای پژوهشی است. مقالات ارسالی نباید در هیچ مجله داخلی و یا خارجی چاپ شده باشد و یا در حال داوری باشد.

- برای ارسال مقاله خود به سایت مجله به آدرس www.joc-isice.ir مراجعه نموده و طبق دستورالعمل مندرج در سایت عمل نمایید.
- مقالات جهت داوری به داوران متخصص ارسال می‌گردد. در پایان تایید یا رد هر مقاله توسط هیئت تحریریه مجله انجام خواهد پذیرفت. سردبیر مجله نتیجه داوری را برای نویسنده عهده دار مکاتبات ارسال خواهد نمود.
- در صورتی که نیاز به تصحیح مقاله باشد، تصحیحات باید تنها محدود به موارد ذکر شده باشد. در سایر موارد نویسنده لازم است سردبیر را در جریان هرگونه تغییر و یا تصحیح دیگری قرار دهد. در هر صورت مسئولیت صحت و سقم مطالب بر عهده نویسنده خواهد بود.

حق کپی

در صورت تایید مقاله، نویسندگان لازم است فرم انتقال حق انتشار آن به "انجمن مهندسان کنترل و ابزار دقیق ایران" را تکمیل و به همراه اصل مقاله ارسال نمایند. نویسندگان لازم است موافقت کتبی دارندگان حق کپی بخشهایی از مقاله که از مراجع و منابع دیگر نسخه‌برداری شده است را دریافت و به دفتر مجله ارسال نمایند.

بهره‌برداری تاب‌آور، رفاهی و اقتصادی نانوشبکه هوشمند

سعید باقری^۱، حسین طالبی^۲، علیرضا فریدونیان^۳

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، s.bagheri@mail.kntu.ac.ir

^۲ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، htalebi@mail.kntu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، fereidunian@eed.kntu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۱

ویرایش: ۱۳۹۶/۱۱/۳

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۵

چکیده: امروزه، بدلیل مشکلات تولید انرژی، هزینه زیاد و آلودگی محیط زیست، مدیریت مصرف انرژی الکتریکی از مسایل اصلی پژوهشی دنیا شده است. با پیشرفت شبکه هوشمند، وجود یک سیستم یکپارچه، دقیق و سریع می‌تواند هم رضایت ساکنین را برآورده سازد، و نیز کاهش هزینه را دربر داشته باشد و حالات بهینه عملکرد وسایل را تعیین کند. مفهوم تاب‌آوری برای کاهش قطعی‌های بارهای حساس معرفی شده است. در این پژوهش، یک نانوشبکه نمونه با چندین نوع وسایل متفاوت شامل منابع تولید پراکنده، ذخیره‌ساز و خودرو برقی، و نیز وسایل مصرف‌کننده انرژی در نظر گرفته شده است. کارآرایی روش پیشنهادی با زمانبندی دقیق عملکرد وسایل، در نظرگیری آسایش ساکنین و یافتن حالات بهینه عملکرد و نیز حضور نایقینی‌ها و سناریوسازی‌های دقیق‌تر نشان داده شده است. همچنین، در بخش اصلی پژوهش، تفاوت میان دو حالت در نظرگیری تاب‌آوری و در نظر نگرفتن آن نیز لحاظ شده است و نتایج حاصل با هم مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوشبکه، خانه هوشمند، مدیریت انرژی، تاب‌آوری، بهینه‌سازی هزینه، نایقینی، ابرمکعب لاتین، تولید پراکنده.

Resilient, Comfort and Economic Operation of Smart Nanogrid

Saeed Bagheri and Hossein Talebi, Alireza Fereidunian

Abstract: Nowadays, the management of power consumption has been one of the main concerns for researchers, because of energy generation problems, high cost and environment pollutions. An integrated, fast and accurate system can earn satisfaction of occupants and also cost reduction. Some loads are very vulnerable to natural disasters, thus this interruptions are costly for customers. The resiliency concept is introduced accordingly. The model presented in this research is a Nanogrid, equipped with DGs, batteries and electric vehicle, and power consumer. This research devotes an effort to optimize household energy cost, occupants comfort and Nanogrid resiliency with optimal scheduling of all elements considering uncertainty of distributed energy. If needed, utility can reduce potential peaks occurrence in grid, too. Finally, the performance of the method is discussed by simulation on a typical model. Simulation results under different pricing and weather modes, show effectiveness of proposed model on reducing the quantities of each considered cost functions.

Keywords: Nanogrid, Resilience, energy management, renewable energy sources, uncertainty, stochastic programming.

شرح اختصار		
روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین	LHS	تعداد بازه عملکرد وسیله بعد از آغاز به کار
برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط	MILP	بازه زمانی پایان عملکرد وسیله زام
سیستم مدیریت انرژی خبره	EEMS	متغیر باینری وضعیت عملکرد وسیله زام در بازه tام
قیمت‌گذاری بلادرنگ	RTP	توان مصرفی وسیله زام در بازه زمانی tام
وضعیت شارژ (میزان انرژی ذخیره شده)	SOC	کل توان مصرفی وسایل کنترل زمانی در بازه tام
خودروی الکتریکی	PEV	نرخ زمان تأخیر وسیله زام
بهینه‌سازی ازدحام ذرات	PSO	پارامتر تأخیر
نرخ زمان تأخیر	DTR	دمای اتاق و هوای محیط در بازه زمانی tام
انتظار انرژی تأمین نشده	EENS	دمای تنظیم سیستم سرمایش و گرمایش در بازه زمانی tام
شرح علامت		
مقدار آستانه پیک تقاضا از شبکه	P_{thr}^{peak}	مقدار حاشیه ای دمای عملکرد و ثابت کاهش دما
طول بازه‌ی زمانی	δ	وضعیت عملکرد سیستم سرمایش در بازه زمانی tام
قیمت هر کیلووات ساعت انرژی دریافتی از شبکه بیش‌تر از مقدار آستانه	pdP	ثابت ترمودینامیکی اتاق و ثابت تبادل گرمایی بین انسان و محیط
میانگین سرعت باد	V_{aw}, V_m	تعداد افراد حاضر در اتاق در بازه زمانی tام
سرعت کات‌این و کات‌آف	V_{co}, V_{ci}	ضریب اثرگذاری دمایی سیستم سرمایش
سرعت نامی و سرعت اعمال شده به توربین بادی	V_{aw}, V_r	توان دریافتی سیستم سرمایش در بازه زمانی tام
توان خروجی توربین بادی به ازای سرعت باد v	$P_w(v)$	توان الکتریکی مصرفی در سیستم سرمایش
توان خروجی فتوولتائیک به ازای تابش si	$P_{pv}(si)$	تابع هزینه عملکرد نانوشبکه
بازده سلول‌های خورشیدی	η^{PV}	هزینه نگهداری توربین بادی، سلول خورشیدی و باتری
مساحت کل فتوولتائیک	S^{PV}	مسافت طی شده توسط خودرو برقی (کیلومتر)
توان نامی توربین بادی	P_{rated}	انرژی مصرف شده در خودروی الکتریکی به ازای هر کیلومتر پیمایش
بازده شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی	$\eta_{PEV}^{ch}, \eta_{PEV}^{dch}$	توان سلول‌های خورشیدی و توربین بادی طبق داده‌های پیش‌بینی
انرژی ذخیره شده در خودروی الکتریکی در بازه tام	SOC_t^{PEV}	
توان شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی در بازه زمانی tام	$P_t^{PEV, ch}, P_t^{PEV, dch}$	قیمت خرید و فروش برق از/ به شبکه
توان شارژ/دشارژ خودروی الکتریکی	P_t^{PEV}	توان دریافتی و ارسالی از/ به شبکه بالادست در بازه t
توان مصرفی خودروی الکتریکی توسط لوازم خانگی غیر قابل کنترل زمانی در بازه tام	P_t^{demand, non_sch}	
بازه زمانی آغاز به کار وسیله زام	t_j^{start}	شماره سناریو
شاخص نشان دهنده هر وسیله	j	توان خروجی از توربین بادی و سلول خورشیدی در بازه tام از سناریوی sام
زودترین بازه زمانی آغاز به کار	t^{Est}	احتمال سناریوی sام
دیرترین بازه زمانی پایان عملکرد	t^{LF}	

۱- مقدمه

ساختمان‌های تجاری و مسکونی بیش از ۵۰٪ مصرف انرژی الکتریکی اروپا را به خود اختصاص می‌دهند که عموماً دارای بازده پایین می‌باشند. بر اساس مفهوم خانه‌های هوشمند، این واحدها را می‌توان به گره‌های یک شبکه هوشمند تبدیل کرد که بخش چشم‌گیری از انرژی مصرفی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر، به صورت محلی در ریزشبکه خانه-ها تولید شده و تمامی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به صورت هوشمند مدیریت می‌گردند. با پیشرفت فناوری مخابرات و اطلاعات و نیز تکنولوژی ساخت، مفاهیم و فناوری‌های جامعی برای خانه‌های هوشمند اتخاذ شده است. با این روش، خانه‌های هوشمند یک مشتری فعال در نظر گرفته می‌شوند که با شبکه هوشمند در یک تعامل نزدیک با محیط محلی و سطح بالاتر شبکه هوشمند، مذاکره و همکاری می‌کنند. خانه‌های اخیراً توسعه یافته و وسایل برقی‌شان (گرم‌کننده‌ها، دستگاه تهویه هوا، تجهیزات سرگرمی، وسایل خانگی و...)، راهبرد کنترل و ساختار شبکه موجب ارتقا بازده انرژی و بهبود مدیریت ریزشبکه برق محلی و شبکه دوردست از طریق مدیریت انرژی فعال سمت بار، و جمع‌آوری مقدار زیادی از منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده کم‌قدرت و در نتیجه کاهش چشمگیر استفاده از منابع سنتی، می‌گردد [۱]. خانه هوشمند، نمودی از یک نانوشبکه است. با توجه به تعاریف نانوشبکه و دستاوردهای اخیر در این زمینه، خانه‌های هوشمند یک سیستم مهم در اجزای شبکه می‌باشد. با توجه به اهمیت بحث تاب‌آوری و پیشرفت سیستم‌های خانه هوشمند، اگر بتوان یک نانوشبکه را در برابر رخداد خطا مقاوم کرد، ریزشبکه بالادست می‌تواند به اجزای دیگر شبکه خود برسد و توان را تامین کند. در بحث تاب‌آوری در خانه هوشمند، رخدادهای متفاوتی می‌تواند تاثیرگذار باشد. به دلیل قابلیت کارکرد حالت جزیره‌ای نانوشبکه، می‌توان نانوشبکه را یک بخش مناسب برای افزایش تاب‌آوری در نظر گرفت [۲].

امروزه با وجود تحقیقات و تکنولوژی‌های نوین در زمینه خانه هوشمند، ویژگی‌هایی به خانه هوشمند اضافه شده است که می‌توان به وسیله آن، زیرساخت‌های مناسب را برای سیستم‌های کنترلی به منظور پایش و کنترل مصرف انرژی فراهم آورد [۳]. همچنین مدیریت سمت تقاضا^۱ که روشی برای پیشینه کردن سود برای تولیدکننده و مصرف‌کننده ارایه می‌دهد، که کیفیت انرژی^۲ و پاسخگویی بار^۳ اجزای اصلی این مفهوم هستند و با این دو قسمت می‌توان به دستاوردهای مورد نظر در مدیریت سمت تقاضا دست یافت که این دستاوردها شامل، پیک‌سایی، افزایش پایداری و کاهش هزینه می‌شود [۴].

پژوهش‌های مختلفی در زمینه تاب‌آوری و نانوشبکه انجام شده است که حتی در برخی موارد اسمی از تاب‌آوری به میان نیامده؛ اما در دل خود یک سیستم تاب‌آور ساخته شده و نتایج مفید آن بازگو شده است که همگی در حالات اضطرار بررسی شده‌اند.

در [۵] از یک مفهوم به عنوان "قابلیت باززیستی" استفاده شده است که از نظر مهندسی برق به معنای احتمال ادامه برق‌رسانی می‌باشد که خود

نمودی از تاب‌آور کردن سیستم می‌باشد. این مفهوم وابسته به تولید، تقاضا، ساعت روز و مدت زمان قطعی است. روش برنامه‌ریزی به صورت تصادفی است. وضعیت شارژ (SOC)، میزان حداقلی شارژ باقی‌مانده در باتری را نشان می‌دهد. استراتژی کنترلی آن تنها بر روی باتری است و به سه حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول باتری تا آخرین لحظه دشارژ شود و شارژ آن تنها با تولید محلی باشد. در حالت دوم وقتی شبکه متصل است باتری هیچ‌گاه تا آخر دشارژ نشود و در حالت سوم یک SOC2 پایه برای حالت اضطراری تعیین شود که در صورت لزوم از SOC1 به SOC2 برود. در [۶] آنالیز تاثیر مدیریت انرژی در مواقع خروج تولید، در صورت اتصال خودرو به خانه هوشمند کار شده است. استراتژی استفاده شده مد عملکرد خفیف شده است. در حالت برقرار بودن سیستم کنترلی به صورت عادی کار می‌کند و خودرو اولویت شارژ را دارد. این پژوهش حالات قطع و برق و مدت زمان آن را اولویت قرار داده است. یعنی پس از قطعی برق بایک استراتژی خاص کار می‌کند تا از مرکز دلیل و زمان قطعی را دریافت کند. حال استراتژی‌های دیگر را بر اساس تخمین مدت زمان قطع برق اعمال می‌کند. ارزیابی تاب‌آوری نیز تنها به وسیله مقایسه حالت با خودرو برقی و بدون خودرو برقی انجام شده است. به گونه‌ای که با تحلیل نمودار توان، مشاهده می‌شود که مدت زمان و میزان توان برق‌رسانی در حالت جزیره‌ای با کمی حساسیت بهبود یافته است که این خود نمودی از تاب‌آوری در نانوشبکه می‌باشد.

در [۷] یک مدل از سیستم مدیریت انرژی خانگی مطرح شده است که استراتژی مدیریتی را با هدف افزایش تاب‌آوری نشان می‌دهد.

در مرجع [۸] مسأله زمانبندی منابع انرژی ساختمان با بررسی یک ساختمان کم‌انرژی کاربردی مقایسه شده است. تابع هدف آن، کمینه کردن هزینه کلی برق و گاز طبیعی هنگام عملکرد ساختمان در بازه‌های مختلف زمانی می‌باشد درحالی‌که قید تعادل انرژی و قیود عملکرد پیچیده وسایل و تجهیز تغذیه انرژی نیز رعایت می‌شوند. برنامه پاسخ‌گویی بار یک مسأله بهینه‌سازی چالش برانگیز است. به‌منظور حل این مسأله به‌طور مؤثر، یک رویه ابتکاری در [۹] برای دستیابی به راه‌حلی نزدیک به بهینه با هزینه‌های محاسباتی کم، ارائه شده است. این مرجع در عین حال که کنترل مناسبی برای لوازم خانگی گرمایی ارائه می‌دهد ولی به‌دلیل استفاده از نرخ قیمت-گذاری زمان استفاده و بازه‌های شیبه‌سازی یک ساعته از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. مرجع [۱۰] مفهوم خانه تبادل انرژی صفر را بیان کرده است و بررسی آماری و تحلیلی جامع بر روی چندین خانه در نقاط مختلف دنیا انجام شده است؛ بدین معنی که فرایند هوشمندسازی و بهینه‌سازی مصرف برق، به وسیله جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر، به عنوان جانشینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی و خروج وابستگی خانه‌ها به شبکه برق را بیان می‌کند و تاثیر حضور این مفهوم را به خوبی نشان می‌دهد. که در مرجع [۱۱] بهره‌برداری و مشارکت بهینه سلول خورشیدی، توربین بادی و تولید کوچک برق آبی به عنوان منابع تولید انرژی یک خانه در نظر گرفته شده‌اند که منجر به ارایه شمایی از یک خانه هوشمند انرژی صفر

قرارگیری تاب‌آوری در مساله انجام شده است. تفاوت اصلی این مقاله با سایر مقالات، در نظرگیری تاب‌آوری از سطح جزئی که همان نانوشبکه می‌باشد، است که مجموعه چندین نانوشبکه تاب‌آور، خودبخود ریزشبکه-ای تاب‌آور را در پی دارد.

در بخش ۱ مقدمه و مروری بر ادبیات پیشین انجام شد. در بخش ۲ توضیح مختصری از تاب‌آوری و در بخش ۳ روش کار ساختار شبکه نمونه قابل مشاهده است. همچنین در این بخش در مورد فرمول‌های مورد نیاز شرح داده شده است. بخش ۴ مربوط به نتایج می‌باشد و به بحث و تحلیل آن‌ها پرداخته شده است. و در نهایت در بخش ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری قرار دارد.

۲- تاب‌آوری^۱

خاموشی‌های گسترده با احتمال بسیار پائینی امکان رخ دادن دارند اما هزینه های اقتصادی اجتماعی سنگینی دربردارد. طبق گزارش انجمن اقتصادی کاخ سفید در امریکا، بیشترین دلیل قطعی برق در این کشور بر اثر حوادث جوی است. مطالعات نشان می دهد ضرر مربوط به مشکلات آب و هوایی در شبکه قدرت از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ به ۳۰۰ میلیارد دلار می رسد. در سال ۲۰۱۲ نیز طوفان سندی باعث بی برق شدن حدود ۷/۵ میلیون شهروند در ۱۵ ایالت شد و تنها بخشی از ایالات مرکزی کشور که مجهز به میکروگرید قابل کنترل بود نجات پیدا کردند که اهمیت این مفهوم را می رساند. تاب‌آوری، همانطور که توسط دفتر کابینه دولت انگلستان تعریف شده است عبارت است از: "منابع شبکه و سیستم، برای پیش‌بینی، جذب و انطباق و بازبایی بعد از یک رویداد مخرب است". این تعریف چهار قسمت از تاب‌آوری شبکه را مشخص می کند: تحمل در برابر خطا، پاسخگویی سریع، ترمیم و پایایی [۱۶]. با توجه مرجع [۱۷]، شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک نانوشبکه، نیازمندی نانوشبکه به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به تبع آن می توان یک نانوشبکه تاب‌آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود نانوشبکه بخشی از توان مورد نیازش را تامین نماید. در این پژوهش مفهوم تاب‌آوری به گونه ای دیگر بیان شده است. با توجه به اینکه تاب‌آوری به معنای فراتر از قابلیت اطمینان است، اگر بتوان قابلیت اطمینان را بالاتر از حد نرمال برد، به این معنا است که به سیستمی تاب‌آورتر دست خواهند یافت [۱۸]. بنابراین با توجه به احتمال قطعی برق از شبکه بالادست، اگر بتوان نیازمندی به سیستم بالادست را کاهش داد می توان سیستم را تاب‌آور کرد.

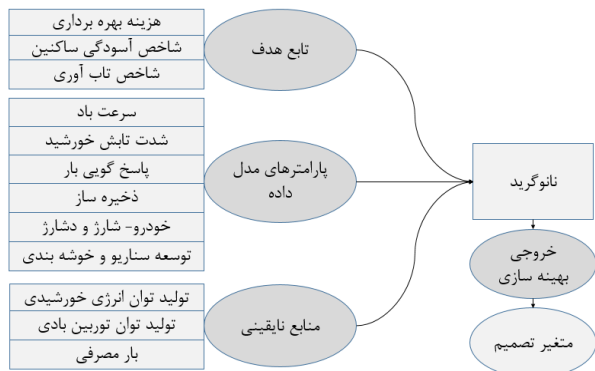
در مفهوم تاب‌آوری، وابستگی شدید به عواقب یک حادثه، تطبیق پذیری سیستم و سرعت بازبایی آن به زمان، فاکتورهای مهمی هستند که باید در بررسی به آن ها توجه شود. همچنین پاسخ دهی سیستم پیش از

کارآمد، چه از نظر عدم آلودگی و چه از نظر هزینه را به خوبی به نمایش می گذارد. همچنین، این پژوهش به وسیله نرم افزار Homer انجام شده است. در [۱۲]، زمانبندی بهینه مصرف انرژی خانه‌های هوشمند با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور کمینه کردن مصرف انرژی پیش‌بینی شده برای یک روز، عملکرد منابع انرژی توزیع شده و لوازم خانگی مصرف کننده برق بر اساس قیمت گذاری بلادرنگ، پنجره زمانی وسایل برقی و خروجی انرژی تجدیدپذیر پیش‌بینی شده، زمانبندی و برنامه‌ریزی شده است. برای کاهش پیک دیماندا از شبکه، طرح قیمت گذاری بار پیک تقاضا نیز اتخاذ شده است. در عین جامع بودن این پژوهش در آن زمانبندی مناسبی برای تخلیه انرژی باقی مانده در باتری خودرویی الکتریکی در ساعات مورد نیاز در نظر گرفته نشده است. در [۱۳] با استفاده از الگوریتم های برنامه‌ریزی خطی، هزینه عملکرد ریزشبکه کمینه شده و وضعیت شارژ باتری بهینه شده است. این مرجع بیشتر به صورت جزئی روی رفتار فرکانس بالای اجزاء به مطالعه پرداخته است. مرجع [۱۴] یک استراتژی مشارکت بهینه جدید را برای یک ژنراتور بادی پیشنهاد داده است که یک تجهیز ذخیره ساز انرژی را برای مشارکت در فرایند تخصیص واحد روز پیشرو بکار می گیرد هر چند از بحث مدیریت انرژی خانه و چگونگی اجرای آن صحبتی به میان نیامده است. مرجع [۱۵] یک سیستم زمانبندی بهینه لوازم خانگی را با یک باتری به عنوان سیستم ذخیره ساز انرژی تحت تعرفه برق زمان استفاده، شرح می دهد. اندازه گیری های مربوط به مصرف توان لوازم خانگی و پروفیل های تقاضا از قبل بدست آمده اند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط با قیود عملیاتی کاربردی تر برای زمانبندی باتری، فرموله و حل شده است. در نهایت نتایج حاصل از شبیه سازی در دو زمینه صرفه جویی در هزینه ها و پیک سایی مورد بررسی قرار گرفته است هرچند در این مرجع از وجود منابع انرژی باد و خورشید در خانه بهره گرفته نشده است.

پژوهش های فراوانی در مورد این موضوع انجام شده است که چند مورد از آن ها در این بخش مرور شد. اما در هیچ کدام از این پژوهش ها، بحث تاب‌آوری به میان نیامده است و یا به صورت خیلی مختصر در مورد آن بحث شده است و تنها از مفهوم سطحی تاب‌آوری به منظور تداوم برق رسانی استفاده شده است؛ همچنین مقالات بسیار کمی در بحث تاب-آوری در یک نانوشبکه ارایه شده است و همچنان خلا در این موضوع احساس می شود.

این پژوهش، بحث تاب‌آوری را در سطح نانوشبکه بیان کرده است. در این مقاله، مساله از نقطه نظر اقتصادی و نیز رفاه ساکنین مورد بررسی قرار می گیرد. نکته قابل توجه این است که بحث تاب‌آور بودن خانه نیز توانمند در نظر گرفته شده که نتایج شبیه سازی با در نظرگیری ناپیچینی ها، بر محوریت تاب‌آور بودن، محاسبه و یک مقایسه با در نظر گرفتن و عدم

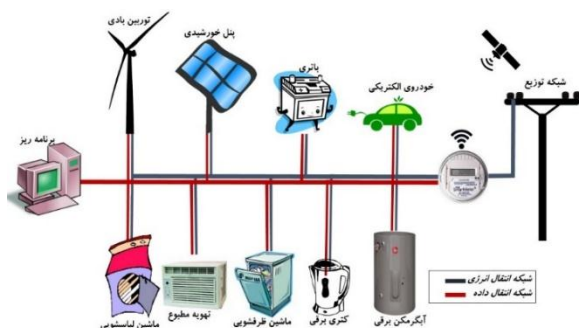
است سیستم ذخیره‌سازی انرژی را شارژ یا دشارژ نماید. شکل (۲) مدل مفهومی این پژوهش را ارائه می‌دهد.



شکل ۲: مدل مفهومی کار مطالعاتی این مقاله

۳-۱- ساختار پیشنهادی

اجزای نانوشبکه‌ای که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، به صورت شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳: اجزای نانوگرید مورد مطالعه

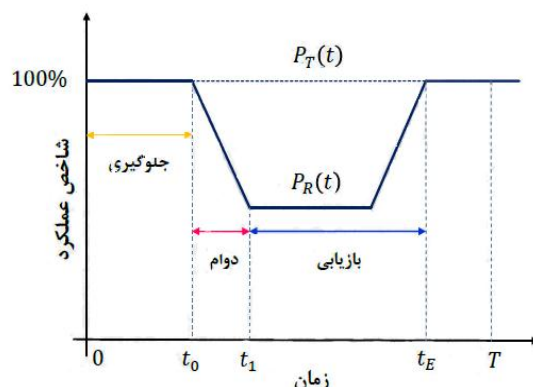
نانوشبکه مورد مطالعه از بخش‌های منابع تولید، شبکه اصلی، لوازم خانگی و کنترل‌کننده تشکیل شده است. کنترل‌کننده نانوشبکه، وظیفه مدیریت انرژی یک خانه هوشمند را بر عهده دارد. بخش‌های اصلی این سیستم کنترل‌کننده عبارتند از: بخش پیش‌بینی، بخش زمان‌بندی و بخش کنترل لحظه‌ای. بخش پیش‌بینی وظیفه جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از جمله سرعت باد، تابش خورشید و دمای هوا را از پایگاه‌های داده‌های هواشناسی معتبر دارد. بخش کنترل لحظه‌ای اطلاعات مربوط به وضعیت عملکرد سایر اجزاء را از طریق سنسورها و شبکه مخابراتی در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌دهد. بخش زمان‌بندی به عنوان بخش تصمیم‌گیری سیستم مدیریت انرژی عمل می‌کند.

۳-۲- فرضیات پژوهش

در این پژوهش، مدل پیشنهادی برای مدیریت انرژی نانوشبکه، برخی فرضیات در عملکرد اجزاء در نظر گرفته شده است. به طور خلاصه، این فرضیات در هریک از بخش‌ها عبارتند از شبکه بالادست، منابع تجدیدپذیر و بارها.

اختلال، پس از آن و در طول حادثه مهم است [۱۹-۲۱]. در شکل ۱ روند تاب‌آوری در یک سیستم قدرت مشخص شده است. شاخص عملکرد، MOP می‌باشد. با وجود اینکه این نمودار در سیستم قدرت تعریف شده است، اما می‌توان روی هر سیستمی اجرا کرد. اما برای ظاهرای این رابطه، بسته به نوع مطالعه، MOP مورد نظر باید انتخاب شود. در شکل ۱، یک نمودار ریاضی وار مشاهده می‌شود که دو تابع $P_T(t)$ و $P_R(t)$ مشخص شده اند که به ترتیب تابع مقدار شاخص عملکرد در حالت عادی و در حالت خطا می‌باشد. در رابطه (۱)، $R(t)$ شاخص اندازه‌گیری تاب‌آوری می‌باشد.

$$R(T) = \frac{\int_0^T P_R(t) dt}{\int_0^T P_T(t) dt} \quad (1)$$



شکل ۱: نمودار مربوط به شاخص تاب‌آوری [۲۲].

با توجه مرجع [۲۲]، شاخص عملکرد عادی و خطا برای یک نانوشبکه، نیازمندی نانوشبکه به شبکه قدرت است. یعنی اگر بتوان محتاج بودن به شبکه قدرت بالادست را کاهش داد، به طبع آن می‌توان یک نانوشبکه تاب‌آور داشت تا در مواقع خطا، نیازمندی کمتری وجود داشته باشد و خود نانوشبکه بخشی از توان مورد نیازش را تامین نماید؛ این بدین معنا است که $P_R(t)$ به $P_T(t)$ نزدیک تر می‌شود، پس $R(t)$ افزایش می‌یابد.

۳-۳- روش

این پژوهش با هدف کمینه کردن هزینه کل یک نانوشبکه که شامل هزینه خرید برق از شبکه توزیع بالادستی، هزینه عملکرد هر یک از اجزاء از قبیل منابع انرژی تولید پراکنده تجدیدپذیر و باتری ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد و بیشینه کردن سود حاصل از فروش انرژی به شبکه توزیع بالادستی در ساعات اوج بار، انجام شده است. نانوشبکه، هم‌چون ریزشبکه، انرژی تولید شده توسط منابع انرژی پراکنده اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را جمع‌آوری کرده و مطابق با فرمان صادر شده از سیستم مدیریت انرژی خانه یا ساختمان، آن را بین مصرف‌کننده‌های خانگی توزیع کرده و ممکن

ساز متصل شده به آن قابلیت شارژ یا دشارژ انرژی را در زمان‌های برنامه‌ریزی شده دارد. علاوه بر آن، نانوشبکه با اتصال به شبکه توزیع بالادستی، امکان تبادل توان دو طرفه دارد.

۴-۱- مدل سازی خرید و فروش

هدف از پاسخگویی بار تنها مصرف برق کمتر در ساعات پیک نیست، بلکه می‌تواند جلوگیری از بروز پیک‌های ناخواسته در ساعات کم‌باری نیز باشد. بنابراین به ازای مقادیر انرژی دریافتی بیش‌تر از مقدار آستانه در هر بازه زمانی t ، جریمه‌ای به هزینه خرید برق از شبکه اضافه می‌شود که از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۲۴]:

$$(p_{t,grid,buy} - p_{thr,peak}) \cdot \delta \cdot pdP \quad (2)$$

رابطه‌ی (۲)، نوع خاصی از قیمت‌گذاری بلادرنگ^۴ می‌باشد.

۴-۲- مدل سازی توربین بادی

برای مدل‌سازی بخش مربوط به توان توربین بادی از تابع احتمالاتی ریلی^۵ استفاده شده است. به صورتی که ابتدا به وسیله تابع ریلی چندین نمونه از داده‌های اولیه باد تولید شده و سپس با استفاده از رابطه (۳)، خروجی توربین بادی قابل محاسبه خواهد بود: [۲۵]

$$P_v(v) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v_{aw} \leq v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(v_{aw} - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})}, P_{rated} & , v_r \leq v_{aw} \leq v_{co}, v_{ci} \leq v_{aw} \leq v_r \\ 0 & , v_{co} \leq v_{aw} \end{cases} \quad (3)$$

۴-۳- مدل سازی پنل خورشیدی

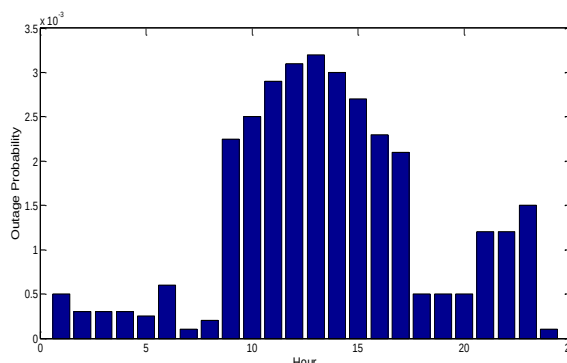
در این بخش نیز مانند تولید توان بادی، ابتدا به وسیله تابع بتا داده‌های اولیه تولید شده و سپس به وسیله رابطه (۴) میزان تولید توان سیستم پنل خورشیدی قابل محاسبه خواهد بود [۲۵]:

$$P_{PV}(si) = \eta^{PV} \times S^{PV} \times si \quad (kw) \quad (4)$$

۴-۴- مدل سازی ذخیره‌ساز و خودرو الکتریکی

برای مدل‌سازی خودروی الکتریکی^۶ و ذخیره‌ساز، از مدل بکار رفته در مرجع [۲۶] استفاده شده است. با توجه به اینکه خودرو نیز نوعی ذخیره‌ساز می‌باشد روابط این دو المان تقریباً به مانند هم هستند. این خودروها از باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌کنند که می‌توانند با اتصال به پریزهای برق موجود در خانه، عمل شارژ و دشارژ را انجام دهند. بنابراین اگر مدیریتی صورت نگیرد، عمل شارژ و دشارژ در مواقع نامناسب می‌تواند اثرات نامطلوب از جمله پرشدگی خطوط روی شبکه بگذارد. در حقیقت یک خودرو برقی همانند سیستم ذخیره‌سازی عمل می‌کند که در ساعاتی از روز حضور ندارد.

در شبکه بالادستی داده‌های مربوط به قیمت برق برای یک روز پیش‌رو، به‌صورت خودکار از طرف شرکت توزیع به کامپیوتر سیستم برنامه‌ریز، ارسال می‌گردد. این داده‌ها شامل قیمت‌های بلادرنگ و قیمت توان پیک دریافتی از شبکه بالادستی، در صورت اعمال قیمت‌گذاری پیک تقاضا از شبکه، می‌باشد که برای بازه‌های زمانی یک ساعته ارائه می‌شوند. همچنین در منابع تجدیدپذیر، داده‌های مربوط به دما، سرعت باد و تابش خورشید برای روز آینده، به‌صورت خودکار توسط برنامه‌ریز از پایگاه‌های پیش‌بینی آب و هوا دریافت می‌گردد. داده‌های تاریخی کاملی نیز درباره میانگین و انحراف استاندارد سرعت باد و تابش خورشید، از قبل در کامپیوتر برنامه‌ریز، ذخیره شده است. بارهای الکتریکی با توجه به روش کنترل آن‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند: بدون قابلیت تنظیم زمان عملکرد، با قابلیت تنظیم زمان عملکرد و با قابلیت تنظیم دمای عملکرد. احتمال قطع برق شبکه بالادست به صورت شکل ۴ است. با استفاده از شکل ۴ می‌توان با کمک تعاملی که مفهوم قابلیت اطمینان با تاب‌آوری دارد سیستم را در تمامی ساعات روز با هدف تاب‌آورتر کردن، بهینه کرد.



شکل ۴: احتمال قطع برق برای هر ساعت در یک روز نمونه [۲۳]

۳-۳- هدف پژوهش

هزینه کل عملکرد نانوشبکه در این پژوهش را می‌توان به دو قسمت اصلی هزینه‌های نگهداری تجهیزات و هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی تقسیم کرد. هزینه خرید انرژی از شبکه بالادستی نیز طبق سازوکار از پیش تعیین شده بین خانه و شرکت توزیع انجام می‌پذیرد. در کنار هزینه عملکرد نانوشبکه، هزینه آسودگی خاطر ساکنین و هزینه تاب‌آوری نانوشبکه در برای وقوع خاموشی، نیز در نظر گرفته می‌شوند.

کمینه سازی:

هزینه آسودگی خاطر ساکنین + هزینه تاب‌آوری انرژی + هزینه عملکرد نانوشبکه

۴- مدل سازی

نانوشبکه در نظر گرفته شده در این پژوهش مجهز به شبکه‌ای است که انرژی تولید شده توسط توربین بادی و سلول‌های خورشیدی را دریافت کرده و بین لوازم خانگی مصرف‌کننده انرژی، توزیع می‌کند. ضمناً ذخیره

بازه را نشان می‌دهد. اما دسته سوم لوازم برقی با تنظیم دمایی می‌باشند که با تنظیم دما می‌توان مصرف برق را کنترل کرد. این وسایل شامل سیستم گرمایشی و سرمایشی خانه، یخچال و فریزر می‌باشد و روابط ریاضی مشابهی بر آن‌ها حاکم است. براساس [۲۴] و [۲۷] روابط مربوط به این دسته وسایل به صورت زیر است.

$$OS_t^{cooler} = \begin{cases} 1, & \theta_t^{room} > \theta_t^{set, cooler} \\ 0, & \theta_t^{room} \leq \theta_t^{set, cooler} - \theta_{margin} \\ OS_{t-1}^{cooler}, & otherwise \end{cases} \quad (14)$$

$$\theta_t^{room} = \theta_{t-1}^{room} + k_{th}^{room} \cdot (\theta_{t-1}^{amb} - \theta_{t-1}^{room}) + k_{human} \cdot n_{occupants} \cdot (t-1) \cdot (\theta_{human} - \theta_{t-1}^{room}) \quad (15)$$

$$+ k_{cooler}^{eff} \cdot \theta_{t-1}^g \cdot OS_{t-1}^{cooler} \\ P_t^{demand, cooler} = OS_t^{cooler} \cdot P^{cooler} \quad (16)$$

۴-۶- نرخ زمان تأخیر^۷

برای نمایش ریاضی آسایش ساکنین طبق [۲۸] یک رابطه در نظر گرفته شده است. ساکنین خانه معمولاً ترجیح می‌دهند تا هر وسیله در یک زمان مشخص به‌منظور اجتناب از قیمت‌های پیک، عملکرد داشته باشد و در عین حال کارشان را قبل از رسیدن به یک زمان مشخص تمام کنند. از این‌رو، پارامتری به نام نرخ زمان تأخیر (DTR) به عنوان شاخصی برای آسودگی خاطر ساکنین در نظر گرفته می‌شود که به‌صورت (۱۷) تعریف می‌گردد [۲۸]:

$$DTR_j = \frac{t_j^{start} - t_j^{Est}}{(t_j^{LF} - t_j^{OD}) - t_j^{Est}} \quad (17)$$

از آن‌جایی که پارامتر تأخیر بزرگتر از ۱ است، به‌صورت نمایی با افزایش DTR_j پیوسته افزایش می‌یابد یعنی هرچه وسیله تأخیر بیش‌تری در عملکرد خود در پنجره زمانی‌اش پیدا کند، مقدار مربوط به هزینه تأخیر آن، افزایش به‌مراتب بیش‌تری پیدا می‌کند. در حقیقت ρ به عنوان پارامتر تأخیر است. برای ساکنین خانه مطلوب است که مقدار رابطه (۱۸) تا جایی که ممکن است و منافع مادی آن‌ها را به خطر نمی‌اندازد، کوچک و کوچک‌تر باشد؛ هرچه این مقدار کوچک‌تر باشد وسایل نزدیک‌تر به زمان تنظیم شده کار می‌کنند.

$$\sum_{j \in J} \rho^{DTR_j} \quad (18)$$

۴-۷- تولید سناریو برای در نظرگیری نایقینی

روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین^۸ (LHS) به‌منظور ترکیب و تولید سناریوهای تولیدات توان باد و خورشید بکار گرفته شده‌است. روش LHS، منافع زیادی از لحاظ افزایش بازده نمونه برداری و زمان اجرای سریع‌تر در مقایسه با روش نمونه برداری مونت کارلو سنتی ارائه می‌دهد [۲۵]. روش LHS به دو گام شامل نمونه‌برداری و ترکیب تقسیم‌بندی شده‌است. در مرحله نمونه‌برداری ۳۰۰۰ نمونه برای نشان دادن طبیعت تصادفی سرعت

$$0 \leq P_t^{PEV, ch} \leq P_{PEV, ch}^{max} \quad (5)$$

$$0 \leq P_t^{PEV, dch} \leq P_{PEV, dch}^{max} \quad (6)$$

$$P_t^{PEV} = \frac{P_t^{PEV, dch}}{\eta_{PEV}^{dch}} = P_t^{PEV, ch} \cdot \eta_{PEV}^{ch} \quad (7)$$

$$SOC_{t+1}^{PEV} = SOC_t^{PEV} + \delta \cdot \eta_{PEV}^{ch} \cdot P_t^{PEV, ch} - \delta \cdot P_t^{PEV, dch} / \eta_{PEV}^{dch} - D_t^{PEV} \cdot C_{PEV} \quad (8)$$

$$SOC_{PEV}^{min} \leq SOC_t^{PEV} \leq SOC_{PEV}^{max} \quad (9)$$

برای یک خودروی الکتریکی، زمان خروج و ورود آن و میزان مسافت طی شده در روز پیش‌رو، توسط کاربر خودرو تعیین می‌گردد. در این ساعات باتری‌های خودرو برای شارژ یا دشارژ در نانوشبکه در دسترس نیستند. بنابراین $P_t^{PEV, ch}$ و $P_t^{PEV, dch}$ در این ساعات صفر هستند [۲۶]. پارامترهای ذخیره‌ساز خودرو مشابه با پارامترهای ذخیره‌ساز تعبیه شده در خانه هوشمند است و تنها ترم آخر رابطه (۷) در آن وجود ندارد و به جای آن رابطه حرارتی سیستم ذخیره‌ساز در نظر گرفته می‌شود.

۴-۵- مدل‌سازی مصرف‌کنندگان انرژی در خانه

تجهیزات خانه از قبیل لوازم خانگی هوشمند، سنسورها و منابع تولید پراکنده از طریق یک شبکه محلی خانگی به هم متصل و مرتبط شده‌اند. الگوریتم زمان‌بندی بار در سیستم مدیریت انرژی خانه، برای ایجاد زمان‌بندی بهینه بار بر اساس اطلاعات اجزاء، تنظیمات مصرف‌کنندگان و مکانیزم قیمت‌گذاری اجرا می‌شود. هسته‌ی عملیاتی زمان‌بندی بار، بهره‌گیری از قابلیت انعطاف بار، مطابق با خروجی‌های منابع انرژی و مکانیزم قیمت‌گذاری، با هدف کمینه‌کردن هزینه انرژی ضمن حفظ راحتی مصرف‌کنندگان می‌باشد. سه دسته وسایل شامل لوازم غیر قابل برنامه‌ریزی، قابل کنترل با تنظیم زمانی و لوازم قابل کنترل با تنظیم دمایی وجود دارد. دسته اول، لوازم غیر قابل برنامه‌ریزی که در مواقع نیاز استفاده می‌شوند. دسته دوم که قابلیت تنظیم زمانی دارند می‌توانند با برنامه مشخص در زمان‌هایی با قیمت مناسب روشن یا خاموش شوند که روابط آن‌ها به صورت زیر می‌باشد.

$$OS_{t,j} = \begin{cases} 0 \text{ or } 1, & t_j^{Est} \leq t \leq t_j^{LF} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

$$OS_{t,j} = \begin{cases} 1, & t_j^{start} \leq t \leq t_j^{start} + t_j^{OD} - 1 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{t,j}^{sch} = \begin{cases} P_j, & OS_{t,j} = 1 \\ 0, & OS_{t,j} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$P_t^{demand, sch} = \sum_{j=1}^J P_{t,j}^{sch} \quad (13)$$

معادله (۱۰) بیان می‌کند که هر وسیله تنها در محدوده‌ی زمانی مشخص خود، یعنی پنجره زمانی‌اش می‌تواند عملکرد داشته باشد. معادله (۱۱) نشان می‌دهد که هر وسیله بعد از شروع عملکرد، تا پایان زمان عملکردش، روشن می‌ماند. معادله (۱۲) نیز توان مصرفی هر وسیله در هر

۵- فرمول‌بندی ریاضی مساله

در این پژوهش با استفاده از روابط مربوط به تابع هزینه که در بخش بعدی قابل مشاهده است و به وسیله روش بهینه‌سازی بهبودیافته الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به حل مساله پرداخته شد و بهینه‌سازی انجام شده است.

۵-۱- تابع هدف نهایی مساله

تابع هدف بهینه‌سازی نهایی، مجموع وزن‌دار سه تابع هزینه تعریف شده است. همچنین قیود نیز باید رعایت شوند تا بهترین پاسخ یافته شود.

$$\min : w_1 \cdot F_1(NOC) + w_2 \cdot F_2(DTR) + w_3 \cdot F_3(EENS) \quad (20)$$

که در آن $w_1, w_2, w_3 \in [0,1]$ و $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ رابطه (۲۰)، w_1, w_2, w_3 ضرایب وزنی هستند که اهمیت هر یک از توابع هزینه و میزان تأثیرگذاری آنها را بر تابع هدف نهایی تعیین می‌کنند.

۵-۲- تابع هزینه عملکرد نانوشبکه

برای یافتن تابع هدف باید مساله براساس هزینه چینی شود و روابط به یک تابع هزینه برسد و سپس آن بهینه شود. تمامی اجزای سیستم دارای هزینه عملکرد و تعمیرنگهداری می‌باشند که به صورت رابطه (۲۰) آمده است که به دلار می‌باشد.

$$NOC = \sum_{t=1}^T \left[\delta(m^{wt} P_t^{wt} + m^{pv} P_t^{pv} + m^{batt} P_t^{batt} + b_t P_t^{grid, buy} - q_t P_t^{grid, sell}) \right] + \sum_{s=1}^S \pi_s \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\delta \left(m^{wt} P_{s,t}^{wt} + m^{pv} P_{s,t}^{pv} + m^{batt} P_{s,t}^{batt} + b_t P_{s,t}^{grid, buy} - q_t P_{s,t}^{grid, sell} \right) \right] \right\} \quad (21)$$

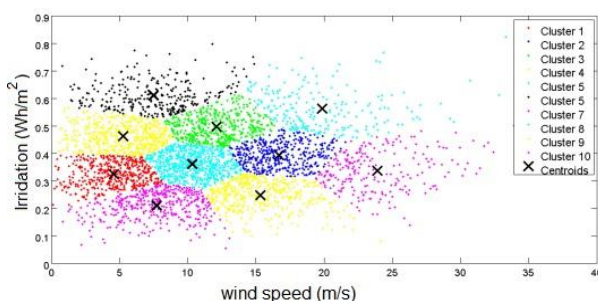
که شامل هزینه عملکرد توربین باتری به ازای میزان تولید توان، هزینه عملکرد پل خورشیدی، باتری و اختلاف توان‌های خریداری شده و فروخته شده از/به شبکه می‌باشد.

۵-۳- قیود مساله

قیود این مساله از دو قسمت اساسی تشکیل می‌شود: قیود عملکرد اجرا که هر جزء بسته به محدودیت‌های خودش باید عملکرد مناسبی داشته باشد که در روابط قبل اعمال شده‌اند و نیز قید تعادل انرژی که روابط آن به صورت (۲۵) می‌باشد. همچنین P_t^{demand} خود از مجموع میزان مصارف تمامی سه دسته وسایل برقی پیش‌تر ذکر شده، می‌باشد که در رابطه (۲۶) بیان گردیده است.

باد و تابش خورشید تولید شده‌است. برای این هدف تابع توزیع تجمعی سرعت باد و تابش خورشید به ۳۰۰۰ بازه با احتمال‌های برابر $1/3000$ تقسیم شده‌است. حال برای هر بازه زمانی ۳۰۰۰ زوج داده سرعت باد و شدت تابش خورشید در اختیار است. با توجه به تعداد بالای سناریوها، زمان اجرای برنامه نیز به شدت افزایش می‌یابد. این یک چالش است، زیرا برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته انرژی و تقاضا، اپراتور مجبور است تاجانی که ممکن است سریع تصمیم بگیرد. بنابراین به منظور کاهش زمان محاسبات، از روش الگوریتم خوشه‌بندی K-means^۹ برای مرتب کردن سناریوهای اصلی سرعت باد و تابش خورشید داخل دسته‌هایی بر اساس تشابه و فاصله بین آن‌ها انتخاب شده‌است. این روش براساس رویه تکراری بنا شده که مرکز ثقل هر دسته به عنوان مقدار میانگین سرعت باد و تابش خورشید اختصاص داده شده به هر دسته تعریف شده‌است [۲۵].

مرکز ثقل برای هر دسته، یک سناریو را که شامل ۲ مقدار متفاوت مثلاً مقادیر میانگین سرعت باد و تابش خورشید است، نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز یک نمونه خوشه‌بندی و تعیین مرکز ثقل خوشه‌های سناریوهای سرعت باد و شدت تابش خورشید هستند. تعداد سناریوهای موجود در هر دسته تقسیم بر تعداد کل سناریوهای اصلی، احتمال هر سناریو را نشان می‌دهد.



شکل ۵: سناریوهای سرعت باد و تابش خورشید و خوشه‌بندی آن‌ها برای ساعت ۳ بعد از ظهر یک روز نمونه‌ای

۴-۸- فرمول‌بندی تاب‌آوری

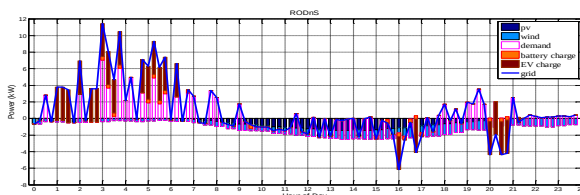
با توجه به [۱۹]، با در نظرگیری تعریف و مفهوم تاب‌آوری ذکر شده، می‌بایست حالت عملکرد در زمان بحران نزدیک به حالت عملکرد در زمان عادی کارکرد سیستم شود. در یک نانوشبکه تداوم برق‌رسانی اهم موضوع است که به وسیله این کار با در نظر گرفتن شاخص انتظار انرژی تأمین نشده توسط شبکه بالادستی، به عنوان تابع هزینه تاب‌آوری، انجام می‌شود؛ که معیار مناسبی برای این نزدیک‌سازی دو حالت عملکرد خواهد بود. $EENS^{۱۰}$ شاخص انتظار انرژی تأمین نشده توسط شبکه بالادستی است. این شاخص، امید ریاضی انرژی تأمین نشده نانوشبکه در زمان قطعی برق می‌باشد که مقدار آن از رابطه (۱۹) بدست می‌آید و در آن p_t^{outage} احتمال قطع برق (ناپایایی شبکه بالادستی) در هر بازه زمانی است:

$$EENS = \sum_{t=1}^T \delta(p_t^{outage} \times P_t^{grid, buy}) \quad (kwh) \quad (19)$$

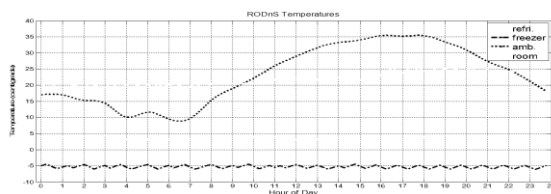
هزینه بهتر بودند، بررسی می‌شود. هر یک حالت‌های شبیه‌سازی در این بخش، در موارد زیر با هم تفاوت دارند. در بخش قیمت‌گذاری دو حالت -با در نظرگیری پیک تقاضا از شبکه (P) و -بدون در نظرگیری پیک تقاضا از شبکه (R)، در بحث زمان آغاز به کار وسایل دو حالت -زودترین زمان آغاز به کار (E) و -زمان آغاز به کار بهینه (O)، همچنین در بحث نرخ زمان تأخیر نیز دو حالت -در نظرگیری نرخ زمان تأخیر (Dy) و -بدون در نظرگیری نرخ زمان تأخیر (Dn) و در پایان، یک روز -تابستانی (S) و -زمستانی (W) مطالعات انجام شده است.

۶-۲- مقایسه تعادل توان در حالات مختلف

شکل‌های ۶ و ۷ تعادل توان در بخش تولید و تعادل دما را در این بخش نشان می‌دهند که یکی از این حالت‌ها می‌باشد.



شکل ۶: نمودار تعادل توان الکتریکی برای حالت RODnS (بدون در نظرگیری پیک تقاضا از شبکه/زمان آغاز به کار بهینه/بدون در نظرگیری نرخ زمان تأخیر/فصل تابستان)



شکل ۷: پروفیل دما برای حالت RODnS؛ (خط‌ممتد: دمای اتاق)، (خط‌چین: دمای داخل یخچال)، (نقطه‌خط: دمای داخل فریزر)، (نقطه‌چین: دمای محیط بیرون)

منحنی توان الکتریکی دریافتی از شبکه بالادستی در نمودارهای تعادل توان الکتریکی مربوط به حالت‌هایی که تنها از نرخ قیمت‌گذاری بالادرنگ (که در ابتدای نام آن‌ها از حرف «R» استفاده شده است) استفاده کرده‌اند، دارای افت و خیزهای فراوان است زیرا در این حالت‌ها، زمان‌بندی وسایل خانه و زمان‌بندی شارژ خودروی الکتریکی و باتری به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه‌های زمانی با قیمت انرژی کم، توان مورد نیاز نانوشبکه از شبکه بالادستی خریداری شود. این امر ضمن کاهش هزینه‌ها، باعث اعمال پیک‌های ناخواسته به شبکه می‌شود. ولی با اعمال نرخ قیمت‌گذاری پیک تقاضا از شبکه، پروفیل توان دریافتی از شبکه مسطح‌تر می‌شود. با مقایسه حالت‌های تابستان می‌توان دریافت که تولید انرژی بادی و خورشیدی در ساعات ۹ الی ۱۷ باعث شده است که تقاضای انرژی از شبکه بالادستی صفر و در بیش‌تر اوقات منفی شود. این بدان معنی است که نانوشبکه در این ساعات با فروش برق به شبکه در حال سودآوری است. در کنار آن

$$P_t^{demand} = P_t^{wt} + P_t^{pv} + P_t^{grid, buy} + P_t^{batt, dch} - P_t^{grid, sell} - P_t^{batt, ch} \quad (25)$$

$$+ P_t^{PEV, dch} - P_t^{PEV, ch}, \quad \forall t$$

$$P_t^{demand} = P_t^{demand, non-sch} + P_t^{demand, sch} + P_t^{demand, cooler} + P_t^{demand, heater} + P_t^{demand, refri} + P_t^{demand, freezer} \quad (26)$$

۵-۴- نرمالیزه‌سازی

برای این که تابع هزینه بتواند وارد تابع هدف بهینه‌سازی شود، باید نرمالیزه گردد. عمل نرمالیزه کردن، برای هم مقیاس کردن توابع هزینه موجود در تابع هدف نهایی انجام می‌شود.

$$F_1(NOC) = \frac{NOC}{NOC_{max}} \quad (27)$$

$$F_2(DTR) = \frac{\sum_{j \in J} \rho^{DTR_j}}{\left(\sum_{j \in J} \rho^{DTR_j} \right)_{max}} \quad (28)$$

$$F_3(EENS) = \frac{EENS}{(EENS)_{max}} \quad (29)$$

در (۲۷)، (۲۸) و (۲۹)، F_1 تابع نرمالیزه هزینه عملکرد، F_2 تابع آسایش ساکنین و F_3 نرمالیزه‌شده تاب‌آوری می‌باشد.

۶-۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارایه نتایج و تفسیر نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. داده‌های اولیه شامل مقادیر میانگین سرعت باد و انحراف استاندارد آن، میانگین تابش خورشید و انحراف استاندارد آن و دمای هوا در هر ساعت از مرجع [۲۹] دریافت شده است. این اطلاعات برای شهر آبردين از ایالت آیداهو در آمریکا، برای یک روز تابستانی و یک روز زمستانی در سال ۲۰۱۵ می‌باشد. توربین بادی نیز از کتابخانه نرم‌افزار Homer و پنل خورشیدی به مساحت ۱۲ متر مربع با بازده ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. همچنین محدودیت پیک تقاضا به ازای ۵ کیلووات در ۱۰ دلار بسته شده است. اطلاعات لوازم برقی از [۲۴] و [۲۷] استخراج شده‌اند. پنجره زمانی ۱۵ دقیقه‌ای می‌باشد و روند بهینه‌سازی به روش حالت ابتکاری ازدحام ذرات انجام داده شده است. همچنین ضرایب وزنی تابع هدف به صورت برابر در نظر گرفته شده‌اند؛ یعنی هر سه پارامتر تابع هدف از یک درجه اهمیت برخوردار هستند.

۶-۱- حالت‌های مطالعه

با توجه به روش قیمت‌گذاری، زمان آغاز به کار وسایل، نرخ زمان تأخیر و روز مورد مطالعه، مجموعاً ۱۶ حالت شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. ابتدا نتایج بدون در نظر گرفتن تابع هزینه تاب‌آوری، بدست آمده، سپس اثر تابع هزینه تاب‌آوری روی دو مورد از حالت‌هایی که از لحاظ

۶-۴- بررسی اثر در نظر گیری تاب‌آوری روی دو حالت RODnS و PODyS

برای بررسی اثر شاخص تاب‌آوری بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شبیه‌سازی روی دو حالت RODnS و RODyS (که بهترین نتایج را از نظر هزینه برای فصل تابستان داشته‌اند)، با در نظر گیری وزن مناسب برای تابع هزینه تاب‌آوری انجام شده است. حالت‌هایی که در آن شاخص انتظار انرژی تأمین نشده به تابع هدف اضافه شده‌اند، با پسوند with ENS مشخص شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با در نظر گیری شاخص تاب‌آوری در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول هزینه عملکرد نانوشبکه، درصد زمان تأخیر، انتظار انرژی تأمین نشده و شاخص پایایی انرژی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

نام حالت	هزینه عملکرد نانوشبکه	درصد زمان تأخیر	انتظار انرژی تأمین نشده (KWh)	کل انرژی تأمین نشده (KWh)	شاخص پایایی انرژی EIR
RODnS	-۰/۹۰۱۷	۲۲/۶۱	-۰/۰۲۴۴	۳۶/۱۲۸۸	-۰/۹۹۹۳۵۲
RODyS	-۰/۰۵۲۳	-۰/۹۲	-۰/۰۲۲۰	۳۶/۳۸۶۶	-۰/۹۹۹۳۹۵
RODnS_with ENS	-۰/۶۲۶۳	۱۵/۶۲	-۰/۰۱۲۹	۴۰/۴۴۲۹	-۰/۹۹۹۶۸۰
RODyS_with ENS	۱/۵۵۵۳	۳/۲۸	-۰/۰۱۲۱	۳۱/۲۷۸۰	-۰/۹۹۹۶۱۴

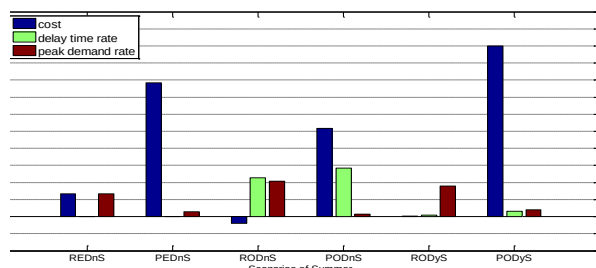
جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با در نظر گیری شاخص تاب‌آوری و بدون در نظر گیری شاخص تاب‌آوری برای حالت‌های RODnS و RODyS

نتایج حاصل از جدول ۱ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن شاخص مربوط به انتظار انرژی تأمین نشده و اضافه کردن آن به عنوان تابع هزینه تاب‌آوری سیستم به تابع هدف نهایی مسئله، هرچند هزینه حدود یک دلار افزایش پیدا می‌کند ولی شاخص‌های انتظار انرژی تأمین نشده و پایایی انرژی بهبود پیدا کرده‌اند. این افزایش هزینه به دلیل افزایش تاب‌آوری است. در حالت تاب‌آور عملکرد سیستم‌های ذخیره سنگین‌تر شده و نیاز به انعطاف بیشتری خواهند داشت؛ به طوری که کلیدزنی باتری‌ها و جابجایی زمان روشن شدن وسایل تنظیم زمانی و نیز تغییر زمان روشن و خاموش شدن وسایل دمایی، با هدف افزایش شاخص تاب‌آوری است که منجر به شیفت بار به سمت زمان‌هایی که برق گرانتر است، می‌باشد. با در نظر گرفتن تابع هزینه تاب‌آوری، شاخص پایایی انرژی بهبود پیدا کرده است. این بهبود بیشتر در اثر انتقال برخی از مصارف انرژی به ساعات احتمال قطعی کم‌تر و دشارژ انرژی باتری و خودروی الکتریکی در ساعات با تقاضای انرژی بیش‌تر از شبکه، رخ می‌دهد. با تامل بیشتر در نتایج به این مهم دست می‌ایم که کم‌ترین هزینه مربوط به حالت RODnS است، زیرا تابع هدف تنها هزینه انرژی نانوشبکه بوده است. همچنین کم‌ترین درصد زمان تأخیر مربوط به حالت RODyS بوده است، زیرا نرخ زمان تأخیر در تابع هدف در نظر گرفته شده است. بیش‌ترین میزان شاخص پایایی انرژی مربوط به حالت RODnS_with ENS بوده است که در آن تابع هزینه تاب‌آوری نیز در تابع هدف نهایی مسئله در نظر گرفته شده است.

انتقال بارهای موجود در خانه از این ساعات به ساعات دیگر به این امر کمک فراوان می‌کند. بهینه‌سازی، بازه‌های دشارژ خودروی الکتریکی و باتری را به ساعات بیشترین قیمت انتقال داده و سودآوری به‌همراه داشته یا از هزینه‌ها می‌کاهد.

۶-۳- مقایسه تمام حالت‌ها از نظر هزینه، پیک توان، درصد زمان تأخیر و نسبت پیک دریافتی به مجموع انرژی

همان‌طور که از نمودار شکل ۷ و مقایسه حالت‌های RODnS و REDnS پیداست، حالت RODnS به‌خوبی توانسته است از هزینه‌ی نانوشبکه بکاهد. منفی شدن میله‌ی مربوط به هزینه در حالت RODnS نشان می‌دهد که این حالت نه تنها هزینه‌ای را به خانه تحمیل نمی‌کند بلکه اندکی سود نیز به همراه دارد. در عین حال در این حالت مقدار درصد زمان تأخیر آن و نیز پیک تقاضای توان از شبکه نسبت به سایر حالت‌ها، بالاتر است، بنابراین نمی‌تواند آسودگی خاطر کافی را برای ساکنین خانه تأمین کند. در مقایسه با RODnS، حالت RODyS که بخش تابع هزینه مربوط به زمان تأخیر را با وزن مشخصی وارد تابع هدف نموده است، توانسته است ضمن افزایش ناچیزی در هزینه نانوشبکه (حدوداً ۰/۴٪)، مقدار درصد نرخ زمان تأخیر را تا حدود زیادی کاهش دهد (حدوداً ۲۲٪) و از این طریق رضایت خاطر ساکنین خانه را نیز فراهم آورد. بنابراین این مقایسه اثر بخشی مدل ارائه شده در این پژوهش برای کاهش نرخ زمان تأخیر وسایل را نشان می‌دهد. بنابراین دخالت دادن بخش مربوط به نرخ زمان تأخیر به تابع هدف نهایی در حالت شبیه‌سازی RODyS، مقدار قابل قبولی را برای هزینه انرژی نانوشبکه و نرخ زمان تأخیر لوازم خانگی (هزینه آسودگی خاطر ساکنین)، با مصالحه بین آن‌ها بدست می‌آورد.

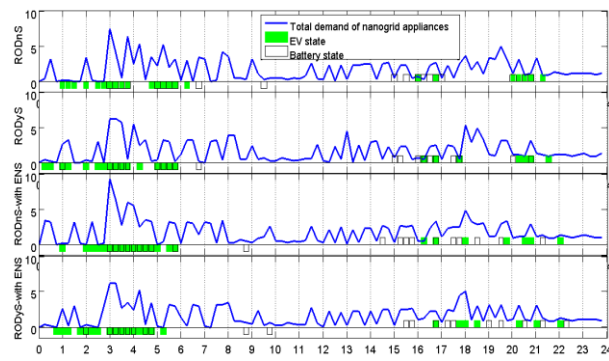


شکل ۸: نمودار مقایسه‌ای بین هزینه (ستون آبی)، نرخ زمان تأخیر (ستون سبز) و نرخ تقاضای پیک (ستون قهوه‌ای) برای حالت‌های تابستان

مقایسه بین حالت‌های RODnS و PODnS، و حالت‌های RODyS و PODyS و حالت‌های REDnS و PEDnS به ترتیب کاهش‌های ۱۹، ۱۵ و ۱۱ درصدی را در میزان پیک انرژی دریافتی از شبکه نشان می‌دهد و این امر اثر بخشی نرخ قیمت گذاری پیک تقاضا از شبکه را بر مدل ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که با وجود اعمال نرخ زمان تأخیر به تابع هدف، بهینه‌سازی کارایی خودش را از دست نداده است و ضمن کاهش هزینه‌های نانوشبکه، آسایش خاطر ساکنین را با کم کردن درصد زمان تأخیر وسایل فراهم می‌کند.

مراجع

- [1] Vc. Gungor, D. Sahin, T. Koack, S. Ergut.C. Bucella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart Grid and Smart Homes Key Players and Pilot Projects", IEEE Industrial Electronics magazine, December 2012.
- [2] Momoh, J., "Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control", In Power Systems Conference and Exposition, PSCE'09. IEEE/PES, March 2009.
- [3] H. Morsali, S. M. Shekarabi, K. Ardekani, H. Khayami, A. Fereidunian, M. Ghassemian, H. Lesani., "Smart Plugs for Building Energy Management System", 2nd Iranian Conf. on Smart Grid, ICSG 2012.
- [4] M. Kojury-Naftchali, A. Fereidunian, H. Lesani, "Identifying susceptible consumers for demand response and energy efficiency policies by time-series analysis and supplementary approaches", 24th Iranian Conf. on Elec. Engineering, ICEE 2016.
- [5] Ghasemieh H, Haverkort BR, Jongerden MR, Remke A. Energy resilience modelling for smart houses. In 2015 45th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks 2015 Jun 22 (pp. 275-286). IEEE.
- [6] Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. Structural Safety, 48, 15-24.
- [7] امینی فر. فرخ، "درآمدی بر مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت"، سخنرانی علمی، پژوهشگاه نیرو، سالن فردوسی، ۹۵/۷/۲۶
- [8] Roche R, Berthold F, Gao F, Wang F, Ravey A, Williamson S. A model and strategy to improve smart home energy resilience during outages using vehicle-to-home. In Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International 2014 Dec 17 (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Marrone S, Gentile U. Finding Resilient and Energy-saving Control Strategies in Smart Homes. Procedia Computer Science. 2016 Dec 31;83:976-81.
- [10] Guan, X., Xu, Z. and Jia, Q.S., "Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid," IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, pp. 243-252, 2010.
- [11] Huang, Y., Tian, H. and Wang, L., "Demand response for home energy management system,"



شکل ۹: مقایسه پروفیل دیمانند کل لوازم خانگی نانوشبکه، شارژ و دشارژ

خودروی الکتریکی و باتری، در حالت‌های RODnS، RODyS، RODnS—

RODyS—with ENS و with ENS

شکل ۹، دیمانند کل لوازم خانگی نانوشبکه، وضعیت‌های شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و باتری را در هر یک از چهار حالت بالا نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل پیداست، در دو حالت اول که تابع هزینه تاب‌آوری در نظر گرفته نشده است، تمرکز دشارژ خودروی الکتریکی و باتری، بیش‌تر در زمان‌هایی است که قیمت برق بالا بوده و فروش انرژی برای نانوشبکه سودآوری دارد، یعنی ساعات ۱۶ الی ۱۷ و ۲۰ الی ۲۱. برای دو حالت آخر یعنی با در نظرگیری تابع هزینه تاب‌آوری در تابع هدف نهایی مسئله، مشاهده می‌شود که دشارژ خودروی الکتریکی و باتری، بیش‌تر، در زمان‌هایی انجام می‌شود که دیمانند لوازم خانگی، بالاتر است و بدین صورت، وابستگی نانوشبکه به دریافت توان از شبکه بالادستی، کم‌تر می‌شود. بنابراین در صورت وقوع خاموشی، مقدار باری که در نانوشبکه از دست می‌رود، کم‌تر شده و در نتیجه، پایایی انرژی آن بیش‌تر می‌شود.

۷- تحلیل و نتیجه‌گیری

این پژوهش اثر برنامه‌ریزی در زمانبندی و سیستم‌دهایی را با مقایسه در نظر گرفتن تاب‌آوری و در نظر نگرفتن آن، به‌خوبی به نمایش گذاشت. ضمن در نظرگیری نایقینی‌ها در منابع تولید پراکنده و تولید سناریوهای مختلف به روش‌های جدید بهترین حالات را در سناریوسازی انجام داده و به تابع هدف نهایی وارد شود. همچنین به زمان‌های بهینه شارژ و دشارژ باتری و خودرو دست یافته شد و بهترین حالات بر اساس هزینه مشخص شده‌است. فاکتور مهمی که رضایتمندی ساکنین را در بر می‌گیرد، در نظر گرفته شد تا بر اساس آن با کمترین هزینه بهترین حالات ممکن استفاده ساکنین از وسایل و همچنین در تعیین بهینه دمای سیستم‌های حرارتی و برودتی نانوشبکه ارایه شد. با مقایسه در نظر گرفتن هزینه تاب‌آوری و در نظر نگرفتن آن مشاهده می‌شود که با وجود افزایش کمی در هزینه، مقدار انتظار انرژی تامین نشده تقریباً به نصف کاهش و شاخص‌های پایایی بهبود داشته‌اند. این بدین معنا است که با اندکی افزایش هزینه در برنامه‌ریزی می‌توان از هزینه‌های اضافی در آینده جلوگیری کرد.

- [۲۱] باقری، س، فریدونیان، ع، "نانوشبکه هوشمند تاب‌آور با سیستم مدیریت انرژی خطی و در نظر گیری عدم قطعیت" ششمین کنفرانس بین المللی سیرد، ایران، تهران ۱۳۹۶
- [۲۲] Clark-Ginsberg. A, Stanford University, "What's the Diffrence between Reliability and Resilience", Online: https://ics-cert.us-cert.gov/sites/default/files/ICSJWG-Archive/QNL_MAR_16/reliability%20and%20resilience%20pdf.pdf, March 2017.
- [۲۳] لیموزاده، ا، درخشنده، س، ی، «برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره در ریزشبکه‌ها با لحاظ نمودن قیود قابلیت اطمینان»، کنفرانس ملی فناوری، داده و انرژی با رویکرد مهندسی برق و کامپیوتر ۱۳۹۴.
- [24] Zhang, Di, Nilay Shah, and Lazaros G. Papageorgiou. "Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid." *Energy Conversion and management* 74 (2013): 209-222.
- [25] Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S. and Siano, pp., "Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid," *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 1118-1127, 2014.
- [26] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M. and Aminifar, F., and Farrokh Aminifar. "Load commitment in a smart home." *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 45-54, 2012.
- [27] Tarasak, pp., Chai, C.C., Kwok, Y.S. and Oh, S.W., "Demand Bidding Program and Its Application in Hotel Energy Management." *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 821-828, 2014.
- [28] Zhao, Z., Lee, W.C., Shin, Y. and Song, K.B., "An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, pp. 1391 - 1400, 2013.
- [29] AgriMet, "AgriMet Weather Data." [Online]. Available: <http://www.usbr.gov/pn/agriment/wxdata.html>
- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 73, pp. 448-455, 2015.
- [۱۲] محمد خلیل زاده، علیرضا فریدونیان، سیدمحمد تقی بطحایی، "خانه-های تبادل انرژی صفر: بررسی آماری و ارزیابی مقایسه اقتصادی انرژی"، دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی ۱۳۹۴.
- [13] M. H. Amrollahi, S.M.T. Bathaee, A. Fereidunian, A. Bahramiazar, "Integration of Renewable Energy Sources in Zero Energy Biuldings", Conf. and exhibition on Elec. Distribution Cired, 2014.
- [14] Shirazi, E., Zakariazadeh, A. and Jadid, S., "Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment," *Energy Conversion and Management*, Vol. 106, pp. 181-193, 2015.
- [15] Chakraborty, S., Weiss, M.D. and Simoes, M.G., "Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 1, pp. 97-109, 2007.
- [16] Dukpa, A., Duggal, I., Venkatesh, B. and Chang, L., "Optimal participation and risk mitigation of wind generators in an electricity market," *IET renewable power generation*, Vol. 4, No. 2, pp. 165-175, 2010.
- [17] Setlhaolo, D. and Xia, X., "Optimal scheduling of household appliances with a battery storage system and coordination," *Energy and Buildings*, Vol. 94, pp. 61-70, 2015.
- [18] Gholami. A, Aminifar. F, Shahidehpour. M, "Frontlines against the Darkness", *IEEE Electrification Magazine*, 1 march 2016.
- [19] Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. *Structural Safety*, 48, 15-24.
- [۲۰] باقری، س، فریدونیان، ع، "مدیریت انرژی نانوشبکه‌های هوشمند با رویکرد تاب‌آوری"، پنجمین کنفرانس بین المللی سیرد، ایران، تهران ۱۳۹۵

⁶ Electrical vehicle

⁷ Delay time rate

⁸ Latin Hypercube Sampling

⁹ K-means clustering

¹⁰ Exception of energy not supplied

¹ Demand side management

² Energy efficiency (EE)

³ Demand response (DR)

⁴ Real time

⁵ Rayleigh

همزمانسازی بهینه برخط سیستم های چندعاملی غیر خطی با دینامیک های نامعلوم

فرزانه تاتاری^۱، محمد باقر نقیسی سیستانی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه مهندسی برق، دانشگاه سمنان، ftatari@semnan.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، mb-naghibi@um.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱

ویرایش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۹

دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۱

چکیده: در این مقاله، الگوریتم بهینه توزیع شده تطبیقی برخط برای همزمانسازی عامل های غیرخطی یک سیستم چندعاملی با دینامیک های نامعلوم به عامل رهبر بر اساس تکنیک های برنامه ریزی پویای تقریبی و شناساگرهای شبکه های عصبی ارایه شده است. الگوریتم پیشنهاد شده به یادگیری حل برخط معادلات همیلتون-جاکوبی ترویج شده^۱ (CHJ) تحت دینامیک های نامعلوم پرداخته است. هر عامل جهت یادگیری سیاست بهینه محلی از ساختار عملگر-نقاد بهره برده و دینامیک نامعلوم هر عامل نیز با به کارگیری یک تقریبگر شبکه عصبی، تقریب زده شده است. شناسایی دینامیک های نامعلوم با استفاده از قانون تکرار تجربیات انجام شده است به طوری که از اطلاعات ثبت شده به همراه داده های لحظه ای برای انطباق وزن های شبکه عصبی شناساگر دینامیک عامل ها، استفاده شده است. در حالی که وزن های تقریبگرهای دینامیک و شبکه های عملگر-نقاد به صورت همزمان در حال انطباق هستند، کرانداری تمامی سیگنال های حلقه بسته توسط تئوری لیاپانوف تضمین شده است. در انتها صحت الگوریتم پیشنهاد شده با ذکر نتایج شبیه سازی، نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی پویای تقریبی، تقریبگرهای عملگر-نقاد، سیستم های چندعاملی، کنترل بهینه توزیع شده، همزمانسازی.

Online optimal Synchronization of Nonlinear Multi-agent Systems under Unknown Dynamics

Farzaneh Tatari, Mohammad-B. Naghibi-S.

Abstract: In this paper an online optimal distributed algorithm is introduced for multi-agent systems synchronization under unknown dynamics based on approximate dynamic programming and neural networks. Every agent has employed an actor-critic structure to learn its distributed optimal policy and the unknown dynamics of every agent is identified by employing a neural network approximator. The unknown dynamics are identified based on the experience replay technique where the recorded data and current data are used to adopt the approximators weights. The introduced algorithm learns the solution of coupled Hamilton-Jacobi equations under unknown dynamics in an online fashion. While the weights of the identifiers and actor-critic approximators are being tuned, the boundedness of the closed loop system signals are assured using Lyapunov theory. The effectiveness of the proposed algorithm is shown through the simulation results.

Keywords: Actor-critic approximators; Approximate dynamic programming; Multi-agent systems; Optimal distributed control; Synchronization.

^۱ Coupled Hamilton-Jacobi

۱- مقدمه

سیستم های چندعاملی متشکل از چندین عامل همسان یا غیرهمسان می باشند که این عامل ها با همکاری یا رقابت با یکدیگر به حل یک مسئله می پردازند. استفاده از کنترل همکارانه جهت هماهنگ کردن رفتار عامل های خودمختار در محیط های با پهنای ارتباطی پایین امری چالش برانگیز است. تا کنون بیشتر مطالعات کنترل همکارانه بر روی رهیافت های متمرکز^۱، تمرکز داشته اند که همه عامل ها نیاز دارند تا به طور پیوسته با یک عامل مرکزی در ارتباط باشند. استفاده از این روش باعث ایجاد ترافیک ارتباطی سنگین، تاخیر و از دست رفتن اطلاعات می شود. بعلاوه عامل مرکزی نیازمند دارا بودن منابع محاسباتی کافی است تا داده ها را پردازش کرده و سیگنال پاسخ را تولید کند. مشکلات روش های متمرکز نیاز به رهیافت توزیع شده^۲ را ایجاد می کند. در کنترل توزیع شده سیستم های چند عاملی، به طراحی قانون کنترلی ساده برای هر عامل با استفاده از اطلاعات همسایگان^۳ پرداخته می شود به طوری که سیستم چندعاملی توزیع شده بتواند به رفتار جمعی (اجماع) دست پیدا کند.

در مسئله اجماع یا همزمانسازی پیرو-رهبر با طراحی کنترل مناسب برای عامل ها، متغیر حالت همه عامل ها به حالت یک عامل کنترلی یا رهبر [۱-۳] همگرا می شود. حل مسئله اجماع پیرو-رهبر^۴ (ردیابی همکارانه) در کنترل همکارانه سیستم های چندعاملی خطی [۴،۵] و غیرخطی [۶،۷] تحت گرافهای ارتباطی با توپولوژی ثابت و متغیر با زمان، مورد بررسی قرار گرفته اند که در تمام آنها دینامیک سیستم کاملاً معین بوده و روش های به کار رفته برون خط می باشند و معیار بهینگی برای تعیین کنترل مناسب در نظر گرفته نشده است. بخشی از مسائل کنترل همکارانه سیستم های چندعاملی را کنترل بهینه همکارانه این سیستم ها تشکیل می دهد. اکثر تکنیک های به کار رفته برای حل مسئله اجماع در کنترل بهینه همکارانه سیستم های چندعاملی، برون خط می باشند [۸،۹] و در اکثر این روش ها سعی می شود به نحوی از حل معادلات پیچیده هامیلتون جاکوبی ترویج شده^۵ (CHJ) اجتناب شود.

نظریه بازی های دیفرانسیلی شامل ترکیبی از مشخصه های تئوری بازی [۱۰] و تئوری کنترل بهینه می باشد [۱۱]. در نتیجه می توان گفت، بازی های دیفرانسیلی تعمیم مسائل کنترل بهینه هستند که بیش از یک بازیکن یا عامل در بازی نقش دارند [۱۲،۱۳]. تئوری بازی دیفرانسیلی راهکار مناسبی برای مدل کردن مسائل تصمیم گیری چند عاملی برای سیستم های دیفرانسیلی در تعامل می باشد [۱۴]. در این بازی ها هر عامل مستقل از دیگران، به بهینه سازی شاخص عملکرد خود می پردازد تا سیاست بهینه

خود را تعیین کند و نتیجه آن حل تعادل نش^۵ بازی می باشد. پیدا کردن راه حل نش بازی، وابسته به حل معادلات پیوسته CHJ می باشد، حل این معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی بسیار مشکل بوده و یا حتی در مواردی فاقد حل تحلیلی همه جایی می باشند. حل معادلات همیلتون-جاکوبی ترویج شده به صورت برون خط انجام شده است [۱۴-۱۶]. اما مزایای استفاده از سیاست های کنترلی بهینه برخط این است که شرایطی را برای سیستم های چند عاملی فراهم می کند تا عامل ها بتوانند اهداف و معیارهای بهینگی خود را به صورت برخط تغییر دهند و بتوانند سیاست متناسب با موقعیت جدید را محاسبه نمایند.

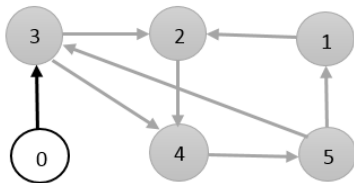
یادگیری تقویتی^۶ شاخه ای از یادگیری ماشین است که در آن، یک یا چندین عامل به صورت زمان-حقیقی برای رسیدن به یک هدف خاص که همان استراتژی بهینه است، با محیطی که ممکن است برای عامل ها شناخته شده نباشد، تعامل می نمایند [۱۷]. این عامل ها استراتژی بهینه را بر اساس تجربیاتی که در جهت پیشینه کردن مجموعه پاداش خود کسب می کنند، یاد می گیرند. در یادگیری تقویتی با استفاده از مقدار اسکالر شاخص عملکرد، که سیگنال تقویت یا پاداش نامیده می شود، فرآیند آموزش به عامل ها در محیط های غیرقطعی و پیچیده انجام می شود.

می توان از روشهای یادگیری تقویتی برای حل برخط مسائل کنترل بهینه همکارانه توزیع شده و بازی های گرافی دیفرانسیلی^۷ استفاده نمود. در بازی های گرافی دیفرانسیلی، دینامیک خطا و اندیس عملکرد هر عامل بستگی به عامل های همسایه اش دارد و یا به عبارت دیگر بستگی به ساختار گراف ارتباطی شبکه دارد. در بازی های گرافی دیفرانسیلی هدف یافتن مجموعه ای از سیاست های کنترلی قابل قبول برای سیستم چندعاملی است که منجر به همزمان سازی عامل ها، تضمین پایداری سیستم حلقه بسته و حداقل شدن تابع هزینه هر عامل در جهت رسیدن به تعادل نش، شود. برای پیاده سازی روش های یادگیری تقویتی برخط نیاز به استفاده از تئوری تقریب^۸ داریم، به این منظور از برنامه ریزی پویای تقریبی^۹ (ADP) استفاده می شود [۱۸]. برنامه ریزی پویای تقریبی کلاسی از الگوریتم هاست که راه حل های برخط تقریبی را برای مسائل کنترل بهینه فراهم می آورد. ADP با استفاده از نمایش تقریبی تابع ارزش و کنترلگر و به کارگیری اصل بهینگی بلمن که اساس برنامه ریزی پویا می باشد، روشی را برای تعلیم برخط ساختارهای تقریبیگر ارزش و کنترلگر فراهم می آورد [۱۹].

از روش تکرار سیاست و ساختارهای عملکرد-نقاد برای کنترل بهینه برخط بازی های دیفرانسیلی مجموع غیر صفر استفاده شده است [۲۰-۲۲]. به منظور اجتناب از اطلاعات متمرکز که در این مقاله ها استفاده شده است،

^۶ Reinforcement Learning^۷ Differential graphical games^۸ Approximation theory^۹ Approximate Dynamic programming^۱ Centralized^۲ Distributed^۳ Leader-follower consensus^۴ Coupled Hamilton-Jacobi^۵ Nash Equilibrium Solution

مفاهیم مربوط به گرافها: توپولوژی تبادل اطلاعات بین N عامل، توسط گراف $Gr(V, \Sigma)$ توصیف می شود. $V = \{1, 2, \dots, N\}$ مجموعه گره های گراف است که نماینده N عامل می باشد، $\Sigma \subseteq V \times V$ مجموعه شاخه های گراف و $(i, j) \in \Sigma$ به معنی وجود یک شاخه از گره i به گره j می باشد. توپولوژی یک گراف معمولاً توسط ماتریس همسایگی آن $E = [e_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ نمایش داده می شود به طوری که اگر $(j, i) \in \Sigma$ آنگاه $e_{ij} = 1$ و در غیر این صورت $e_{ij} = 0$ می باشد. $N_i = \{j : (j, i) \in \Sigma\}$ مجموعه همسایگان گره i است، به عبارت دیگر مجموعه گره ها با شاخه هایی است که به گره i وارد می شوند. $i_{N_i} = \{j : (i, j) \in \Sigma\}$ نیز نشان دهنده مجموعه ای از عامل ها هستند که عامل i در همسایگی آنها می باشد. $d_i = \sum_{j \in N_i} e_{ij}$ درجه-واردشونده^۳ گره i می باشد که مجموع عناصر سطر i ام E می باشد. مسیر، دنباله ای از گره های به هم متصل در یک گراف است و یک گراف را متصل گویند اگر مسیری بین هر دو گره دلخواه آن وجود داشته باشد. معمولاً گره رهبر توسط اندیس صفر نشان داده می شود و اطلاعات از رهبر به عامل هایی که رهبر در همسایگی آنهاست، فرستاده می شوند. شکل ۱ نمونه ای از گراف ارتباطی یک سیستم چندعاملی را نشان میدهد.



شکل ۱: گراف ارتباطی یک سیستم چندعاملی

۱-۲- تشریح مسئله

دینامیک N عامل که بر روی گراف ارتباطی Gr با یکدیگر در تعامل هستند را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$\dot{x}_i = f_i(x_i) + g_i(x_i) u_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

در معادلات فوق $x_i \in \mathbb{R}^n$ حالت قابل اندازه گیری عامل i ام، $f_i(x_i) \in \mathbb{R}^n$ دینامیک داخلی سیستم، $g_i(x_i) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ دینامیک ورودی سیستم و $u_i \in \mathbb{R}^m$ ورودی کنترلی عامل i ام می باشد. توابع $f_i(x_i)$ و $g_i(x_i)$ ، $i = 1, \dots, N$ ، لیپشیتز محلی هستند و بر روی یک مجموعه فشرده تعریف شده اند. به علاوه سیستم (۱)

در [۲۳] بازی های گرافی دیفرانسیلی برای سیستم های خطی با دینامیک معین معرفی شده و با به کارگیری ساختارهای عملگر-نقاد به حل برخط معادلات CHJ پرداخته شده است. مرجع [۲۴] یک روش تکرار سیاست توسعه یافته برخط را برای حل تقریبی برخط معادلات CHJ برای بازی های گرافی دیفرانسیلی خطی زمان پیوسته معرفی کرد که در آن تنها دینامیک داخلی برای هر عامل نامعلوم می باشد. تاتاری و همکارانش در [۲۵]، برای حل برخط مسئله همزمانسازی عامل ها در بازی های گرافی دیفرانسیلی خطی با دینامیک کاملاً نامعلوم، از ساختارهای عملگر-نقاد و تقریبگرهای محلی به ترتیب برای تقریب سیاست های بهینه بازیکنان و شناسایی دینامیک عامل ها به صورت زمان حقیقی استفاده کرده اند. بازی های گرافی دیفرانسیلی غیرخطی برای سیستم های زمان پیوسته در [۲۶] معرفی شدند که الگوریتم ارایه شده در این مرجع تضمین پایداری حلقه بسته و همگرایی سیاست ها به نقطه تعادل نش را تضمین می کند. در [۲۷، ۲۸] همزمانسازی عامل ها به رهبر به صورت بازی گرافی دیفرانسیلی با استفاده از یادگیری تقویتی برون-سیاست^۱ که نیازمند به مدل سیستم نمی باشد، انجام شده است. به علاوه در این مراجع، عامل ها دارای دینامیک خطی داخلی یکسان می باشند و برای به روزرسانی وزن های شبکه های عصبی نقاد و عملگر از قوانین استاندارد گرادیان نزولی استفاده شده است. در حالی که در مقاله پیش رو، عامل ها دارای دینامیک غیرخطی و کاملاً متمایز می باشند و برای حل مسئله از روش های یادگیری تقویتی بر-سیاست^۲ استفاده شده است. که با حل مسئله همزمانسازی، دینامیک نامعین هر یک از عامل ها نیز شناسایی می شود. در این مقاله نیز برای به روزرسانی وزن های شبکه های عصبی نقاد و عملگر برای هر یک از عامل ها به ترتیب از قوانین استاندارد گرادیان نزولی و قوانین غیر استاندارد استفاده می شود.

با توجه به مطالعات انجام شده تا کنون مطالعه ای بر روی حل بهینه برخط بازی های گرافی دیفرانسیلی غیرخطی تحت دینامیک نامعلوم انجام نشده است. بنابراین نوآوری اصلی این مقاله معرفی یک الگوریتم یادگیری توزیع شده بهینه برای حل بازی های گرافی دیفرانسیلی غیرخطی با دینامیک نامعلوم است. در اینجا هر بازیکن از تقریبگرهای عملگر و نقاد به ترتیب برای یادگیری ارزش بهینه و سیاست کنترلی بهینه استفاده می کند. به طور همزمان با پیاده سازی ساختار عملگر-نقاد، دینامیک غیرخطی نامعلوم هر عامل به صورت برخط با استفاده از شبکه های عصبی شناساگر که از تکنیک تکرار تجربیات بهره می برند شناسایی می شود. نشان داده می شود که الگوریتم پیشنهاد شده به حل معادلات CHJ همگرا می شود و سیاست های کنترلی بهینه به دست آمده به صورت تقریبی به حل تعادل نش بازی همگرا می شوند. کرانداری همه سیگنال های حلقه بسته نیز با استفاده از نظریه لیاپانوف تضمین می گردد.

^۳ In-degree

^۱ Off-policy

^۲ On-policy

$$\nabla V_i^T [\sum_{j \in N_i} e_{ij}(f(x_i) - f(x_j)) + e_{i0}(f(x_i) - f(x_0)) + (d_i + e_{i0})g_i(x_i)u_i - \sum_{j \in N_i} e_{ij}g_j(x_j)u_j] + \frac{1}{2}Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2}u_i^T R_{ii}u_i + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij}u_j = 0 \quad (۷)$$

که در آن $\nabla V_i = \frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} \in \mathbb{R}^n$. حل رابطه (۷) روشی دیگر برای ارزیابی انتگرال نامحدود (۶) برای پیدا کردن ارزش مربوط به سیاست های فیدبکی، موجود می باشد. برای دینامیک (۴) و شاخص عملکرد (۵)، همیلتونین مربوطه به صورت زیر به دست می آید.

$$H_i(\delta_i, \nabla V_i, u_i, u_{N_i}) \equiv \nabla V_i^T [\sum_{j \in N_i} e_{ij}(f(x_i) - f(x_j)) + e_{i0}(f(x_i) - f(x_0)) + (d_i + e_{i0}) \times g_i(x_i)u_i - \sum_{j \in N_i} e_{ij}g_j(x_j)u_j] + \frac{1}{2}Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2}u_i^T R_{ii}u_i + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij}u_j \quad (۸)$$

با استفاده از اصل بهینگی بلمن، کنترل فیدبک بهینه u_i^* ، به صورت زیر به دست می آید.

$$u_i^* = u_i^*(V_i^*) = -(d_i + e_{i0})R_{ii}^{-1}g_i^T(x_i)\nabla V_i^* \quad (۹)$$

با جاگذاری سیاست های کنترلی (۹) در (۷)، معادلات CHJ پیوسته برای سیستم های غیرخطی به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} &\nabla V_i^{*T} [\sum_{j \in N_i} e_{ij}(f(x_i) - f(x_j)) + e_{i0}(f(x_i) - f(x_0)) - (d_i + e_{i0})^2 g_i(x_i)R_{ii}^{-1}g_i^T(x_i)\nabla V_i^* \\ &- \sum_{j \in N_i} e_{ij}(d_j + e_{j0})g_j(x_j)R_{jj}^{-1}g_j^T(x_j)\nabla V_j^*] \\ &+ \frac{1}{2}Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2}(d_i + e_{i0})^2 \nabla V_i^{*T} g_i(x_i)R_{ii}^{-1} \times \\ &g_i^T(x_i)\nabla V_i^* + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0})^2 \nabla V_j^{*T} \times \\ &g_j^T(x_j)R_{jj}^{-1}R_{ij}R_{jj}^{-1}g_j^T(x_j)\nabla V_j^* = 0 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

متناظر با هر گره یک معادله CHJ وجود دارد، بنابراین حل بازی گرافی دیفرانسیلی N نفره با سیستم غیرخطی، مستلزم حل N معادله دیفرانسیل CHJ ذکر شده می باشد. از آنجایی که حل معادلات دیفرانسیل CHJ (۱۰) در حالت کلی بسیار مشکل می باشد و نامعلوم بودن دینامیک های $f_i(x_i)$ و $g_i(x_i)$ برای هر عامل i این پیچیدگی را افزایش می دهد، با استفاده از روش های تقریبی به شناسایی و حل این بازی ها می پردازیم.

پایدارپذیر است. فرض می شود که دینامیک های $f_i(x_i)$ و $g_i(x_i)$ برای $i = 1, \dots, N$ نامعلوم هستند. دینامیک عامل رهبر نیز به صورت زیر بوده که در آن $x_0 \in \mathbb{R}^n$ حالت رهبر می باشد

$$\dot{x}_0 = f_0(x_0) \quad (۲)$$

هدف مسئله، همزمان سازی حالت همه عامل ها به حالت رهبر ضمن شناسایی دینامیک های نامعلوم می باشد و طراحی پروتکل های کنترل محلی تنها با استفاده از اطلاعات عامل های همسایه می باشد. خطای ردیابی محلی $\delta_i \in \mathbb{R}^n$ به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\delta_i = \sum_{j \in N_i} e_{ij}(x_i - x_j) + e_{i0}(x_i - x_0) \quad (۳)$$

با مشتق گیری از (۱) و استفاده از (۲) و (۳)، دینامیک خطای ردیابی محلی به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \sum_{j \in N_i} e_{ij}(\dot{x}_i - \dot{x}_j) + e_{i0}(\dot{x}_i - \dot{x}_0) = \\ &\sum_{j \in N_i} e_{ij}(f(x_i) - f(x_j)) + e_{i0}(f(x_i) - f(x_0)) \\ &+ (d_i + e_{i0})g_i(x_i)u_i - \sum_{j \in N_i} e_{ij}g_j(x_j)u_j \end{aligned} \quad (۴)$$

به منظور رسیدن به اجماع با استفاده از قوانین کنترلی محلی بهینه، تابع ارزش متناظر با گره i به صورت زیر می باشد

$$V_i(\delta_i(t)) = \frac{1}{2} \int_t^\infty (Q_i(\delta_i) + u_i^T R_{ii}u_i + \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij}u_j) d\tau \quad (۵)$$

که در آن $Q_i(\delta_i) > 0$ معمولا تابعی غیر خطی می باشد و ماتریس های وزن $R_{ii} > 0, R_{ij} > 0$ ، ثابت و متقارن هستند. سیاست های نقطه تعادل نش $u_i^* \in \Omega_i, i \in N$ برای بازی گرافی دیفرانسیلی با N بازیکن، مجموعه استراتژی های $\{u_1^*, u_2^*, \dots, u_N^*\}$ هستند که $V_i^* = V_i(\delta_i(0), u_i^*, u_{N_i}^*) \leq V_i(\delta_i(0), u_i, u_{N_i}^*)$ به ازای همه $u_i^* \in \Omega, i \in N$ برقرار باشد [۱۴ و ۲۳].

هدف بازی گرافی دیفرانسیلی یافتن مقادیر ارزش بهینه، $\forall \delta_i(t)$ به صورت زیر می باشد

$$V_i(\delta_i(t)) = \min_{u_i} \frac{1}{2} \int_t^\infty \left(Q_i(\delta_i) + u_i^T R_{ii}u_i + \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij}u_j \right) d\tau \quad (۶)$$

وقتی V_i محدود می شود، با مشتق گرفتن از (۵)، معادله لیاپانفی به شکل معادله بلمن زیر با شرط اولیه $V_i(0) = 0$ به دست می آید.

توابع فعالیت سیگموئید، تانژانت هیپربولیک و دیگر توابع فعالیت استاندارد شبکه عصبی برقرار می باشد. مراجع [۲۶، ۲۳، ۲۰] به صورت مشابه این فرض را لحاظ کرده اند.

سیستم (۴) می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\dot{x}_i = \varphi_{f_i g_i}^* z(x_i, u_i) + \varepsilon_{f_i g_i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

که در آن $\varphi_{AB_i}^* = [\theta_i^* \quad \psi_i^*]$ و بردار رگرسیون است و $z(x_i, u_i) = [\xi_i^T \quad u_i^T \zeta_i^T]^T$ با استفاده از فرض ۱ داریم $\varepsilon_{f_i g_i} = \varepsilon_{f_i} + \varepsilon_{g_i}$ که $\|\varepsilon_{f_i g_i}\| \leq \bar{\varepsilon}_{f_i g_i}$ ، $\bar{\varepsilon}_{f_i g_i} = \bar{\varepsilon}_{f_i} + \bar{\varepsilon}_{g_i}$ و $\|\varepsilon_{f_i}\| \leq \bar{\varepsilon}_{f_i}$ ، بنابراین $\varepsilon_{f_i g_i}$ کراندار است. دینامیک (۱۲) می تواند به صورت زیر نوشته شود $i = 1, \dots, N$

$$\dot{x}_i = -Ax_i + \varphi_{f_i g_i}^* z(x_i, u_i) + Ax_i + \varepsilon_{f_i g_i}, \quad (13)$$

که در آن $A = aI_{n \times n}$ ، $a > 0$

لم ۱- [۳۰] حل سیستم (۱۳) به صورت زیر قابل بازنویسی است

$$x_i = \varphi_{f_i g_i}^* h_i(x_i) + al_i(x_i) + \varepsilon_{x_i} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{h}_i(x_i) &= -ah_i(x_i) + z(x_i, u_i), \\ h_i(0) &= 0, \quad h_i(x_i) \in \mathcal{R}^{k_{\theta_i} + k_{\psi_i}} \\ \dot{l}_i(x_i) &= -Al_i(x_i) + x_i, \quad l_i(0) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن $h_i(x_i) = \int_0^t e^{-a(t-\tau)} z(x_i(\tau), u_i(\tau)) d\tau$ معادل بردار رگرسیون فیلتر شده $z(x_i, u_i)$ می باشد، $x_i(0)$ حالت اولیه سیستم و $l_i(x_i) = \int_0^t e^{-A(t-\tau)} x_i(\tau) d\tau$ ، $\varepsilon_{x_i} = e^{-At} x_i(0) + \int_0^t e^{-A(t-\tau)} \varepsilon_{f_i g_i} d\tau$ می باشد. ■

جهت ایجاد قانون تطبیق برای هر عامل i ، ابتدا رابطه (۱۴) را به سیگنال نرمالایز کننده $n_{s_i} = 1 + h_i^T h_i + l_i^T l_i$ تقسیم می کنیم و داریم

$$(16)$$

$$\bar{x}_i = \varphi_{f_i g_i}^* \bar{h}_i(x_i) + al_i(x_i) + \bar{\varepsilon}_{x_i}$$

ملاحظه ۱- بنا به وجود جملات تزویج شده در معادلات CHJ، روش هایی که تا کنون برای حل تقریبی برخط معادلات هامیلتون جاکوبی بلمن^۱ HJB معرفی شده [۲۹-۳۱] را نمی توان مستقیماً برای حل معادلات CHJ بازی های گرافی دیفرانسیلی توسعه داد و حل برخط تقریبی این معادلات از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. بعلاوه حل تقریبی برخط معادلات CHJ برای بازی های گرافی دیفرانسیلی غیر خطی، به علت وجود دینامیک های غیرخطی و نامعلوم در سیستم چند عاملی، متفاوت و پیچیده تر از حل موجود در [۲۶، ۲۵] خواهد بود.

برای ادامه نیاز به ذکر تعریف زیر داریم.

تعریف ۱ (تحریک پایا^۲ (PE))- سیگنال برداری کراندار $\bar{X}_i(t)$ ، $i = 1, \dots, N$ روی بازه $[t, t + T_i]$ تحریک پایا می باشد [۳۱] اگر وجود داشته باشند $\gamma_{i+N} > 0$ و $T_i > 0$ ، $\gamma_i > 0$ به طوری که برای هر t ،

$$\gamma_i I \leq \int_t^{t+T_i} \bar{X}_i(\tau) \bar{X}_i^T(\tau) d\tau \leq \gamma_{i+N} I$$

۳- شناسایی سیستم چند عاملی غیرخطی با استفاده از شبکه های عصبی

با الهام از [۳۰]، شناساگرهای شبکه عصبی برای مدل کردن دینامیک نامعلوم عامل ها به کار گرفته می شوند. با فرض اینکه دینامیک $f_i(x_i)$ و $g_i(x_i)$ ، $i = 1, \dots, N$ عامل ها پیوسته بوده و روی یک مجموعه فشرده تعریف شده اند از N شناساگر شبکه عصبی برای تقریب آنها به صورت زیر استفاده می شود

$$\begin{aligned} f_i(x_i) &= \theta_i^* \xi_i(x_i) + \varepsilon_{f_i}, \\ g_i(x_i) &= \psi_i^* \zeta_i(x_i) + \varepsilon_{g_i}, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن $\theta_i^* \in \mathcal{R}^{n \times k_{\theta_i}}$ و $\psi_i^* \in \mathcal{R}^{n \times k_{\psi_i}}$ وزن های نامعلوم شبکه های عصبی هستند و $\xi_i \in \mathcal{R}^{k_{\theta_i}}$ و $\zeta_i \in \mathcal{R}^{k_{\psi_i} \times m}$ توابع پایه شبکه عصبی هستند. ε_{f_i} و ε_{g_i} خطای تقریب شبکه های عصبی هستند.

فرض ۱- برای تقریبگرهای شبکه های عصبی به صورت استاندارد فرض می شود که خطای شبکه عصبی و گرادیان آن روی مجموعه فشرده Ω کراندار هستند و توابع فعالیت شبکه عصبی و گرادیان آنها نیز کراندار هستند.

ملاحظه ۲- فرض ۱ از جمله فرض های استاندارد در ادبیات شبکه های عصبی می باشد [۲۹، ۳۱، ۳۲]. به عنوان مثال قسمت اول فرض ۱ برای

^۲ Persistently Exciting

^۱ Hamilton-Jacobi Bellman

توجه شود که در قانون تنظیم (۲۰) جمله آخر به خطاهای تخمین زده شده قبلی و رگرسیون فیلترشده نرمالایز شده عامل i بستگی دارد. با استفاده از قانون تنظیم (۲۰) در صورتی که شرط رتبه Z_i برقرار باشد، کران خطای وزن های شناسایی و خطای تخمین حالت عامل i به ناحیه کوچکی نزدیک صفر میل می کند.

به منظور برآورده کردن شرط PE، باید تعداد داده های مستقل خطی موجود در Z_i برابر با بعد پایه عدم قطعیت $h_i(x_i)$ در رابطه (۱۵) باشد که به آن شرط رتبه Z_i گوئیم.

ملاحظه ۳- با استفاده از قانون آموزش گرادیان همزمان در رابطه (۲۰)، شرط محافظه کارانه PE حذف و به جای آن همگرایی پارامترهای شبکه شناساگر با برقراری شرط رتبه Z_i تضمین می شود.

تعریف ۲ (پایداری کراندار نهایی یکنواخت (UUB)) - سیگنال وابسته به زمان $\mathcal{G}(t)$ کراندار نهایی یکنواخت گفته می شود اگر مجموعه فشرده $\Omega \subset R^n$ وجود داشته باشد به طوری که برای همه $\mathcal{G}(0) \in \Omega$ یک کران β و زمان $T(\beta, \mathcal{G}(0))$ وجود داشته باشد به طوری که برای همه $t \geq t_0 + T$ داشته باشیم $\|\mathcal{G}(t)\| \leq \beta$ [۲۹].

قضیه ۱- سیستم (۱۲) را در نظر بگیرید. قانون تنظیم وزن های شبکه عصبی عامل i را مطابق با (۲۰) در نظر بگیرید. آنگاه در صورت برقراری شرط رتبه Z_i ، خطای تقریب مدل (خطای تخمین وزن های شناساگر) کراندار نهایی یکنواخت ($\|\tilde{\varphi}_{f_i g_i}\| \leq b_{\tilde{\varphi}_{f_i g_i}}$) می باشد.

اثبات قضیه ۱- مشابه مرجع [۳۰] انجام می شود.

■

با استفاده از (۱۲)، سیستم (۴) می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\theta_i^* \zeta_i^*(x_i) - \theta_j^* \zeta_j^*(x_j)) + e_{i0} \times \\ &(\theta_i^* \zeta_i^*(x_i) - \theta_0^* \zeta_0^*(x_0)) + (d_i + e_{i0}) \psi_i^* \zeta_i^*(x_i) u_i \\ &- \sum_{j \in N_i} e_{ij} \psi_j^* \zeta_j^*(x_j) u_j + \varepsilon_{T_i}, \\ \varepsilon_{T_i} &= \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\varepsilon_{f_i} - \varepsilon_{f_j}) + e_{i0} (\varepsilon_{f_i} - \varepsilon_{f_0}) \\ &+ (d_i + e_{i0}) \varepsilon_{g_i} u_i - \sum_{j \in N_i} e_{ij} \varepsilon_{g_j} u_j, i=1, \dots, N, j \in N_i \end{aligned} \quad (22)$$

خطای تقریب دینامیک خطای محلی عامل می باشد. با استفاده از فرض ۱ و $\|\varepsilon_{f_i}\| \leq \bar{\varepsilon}_{f_i}$ و $\|\varepsilon_{g_i}\| \leq \bar{\varepsilon}_{g_i}$ داریم $\|\varepsilon_{T_i}\| \leq \bar{\varepsilon}_{T_i}$. سیستم (۲۲) می تواند به صورت زیر نوشته شود $i=1, \dots, N$

که در آن $\bar{x}_i = \frac{x_i}{n_{s_i}}, \bar{h}_i = \frac{h_i}{n_{s_i}}, \bar{l}_i = \frac{l_i}{n_{s_i}}, \bar{\varepsilon}_{x_i} = \frac{\varepsilon_{x_i}}{n_{s_i}}$ به ترتیب شکل نرمالایز شده $x_i, h_i, l_i, \varepsilon_{x_i}$ می باشند. بر اساس لم ۱ و (۱۶)، تخمین حالت عامل i ام به صورت زیر می باشد.

$$\hat{x}_i = \hat{\varphi}_{f_i g_i} \bar{h}_i(x_i) + a \bar{l}_i(x_i), i=1, \dots, N \quad (17)$$

که در آن $\hat{\varphi}_{f_i g_i} = [\hat{\theta}_i, \hat{\psi}_i] \in \mathcal{R}^{n \times (k_{\theta_i} + k_{\psi_i})}$ مقادیر تخمین زده شده ماتریس $\varphi_{f_i g_i}^*$ مربوط به عامل i در زمان t می باشد. خطای تخمین حالت برای هر عامل i به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} e_i(t) &= \hat{x}_i - \bar{x}_i = \tilde{\varphi}_{f_i g_i}(t) \bar{h}_i(x_i(t)) - \bar{\varepsilon}_{x_i}, \\ \tilde{\varphi}_{f_i g_i}(t) &= \hat{\varphi}_{f_i g_i}(t) - \varphi_{f_i g_i}^*(t) \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن $\tilde{\varphi}_{f_i g_i}(t) = [\tilde{\theta}_i, \tilde{\psi}_i]$ خطای تخمین پارامتر برای عامل i در زمان t می باشد به طوری که $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i^*$ ، $\tilde{\psi}_i = \hat{\psi}_i - \psi_i^*, i=1, \dots, N$ آموزش وزن های شبکه های عصبی شناساگر از تکنیک تکرار تجربیات [۳۰] که مبتنی بر استفاده از داده های ثبت شده قبلی به همراه داده های فعلی است، استفاده می شود. به این منظور، بردار داده های ذخیره شده در زمان های قبلی $t_1, \dots, t_{p_i}$ ، برای هر عامل i ، $i=1, \dots, N$ به صورت زیر تعریف می شود.

$$Z_i = [\bar{h}_i(x_i(t_1)), \dots, \bar{h}_i(x_i(t_{p_i}))] \quad (19)$$

به این ترتیب با استفاده از (۱۹)، قانون آموزش وزن های شبکه عصبی شناساگر عامل i به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\varphi}}_{f_i g_i}(t) &= -\Gamma_i \bar{h}_i(x_i(t)) e_i^T(t) \\ &- \Gamma_i \sum_{k=1}^{p_i} \bar{h}_i(x_i(t_k)) e_i^T(t_k), i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (20)$$

به طوری که p_i اندازه حافظه یا اندازه بردار داده های ذخیره شده قبلی برای هر عامل i و $\Gamma_i > 0$ ، $i=1, \dots, N$ ماتریس نرخ یادگیری مثبت معین می باشد و t نشان دهنده زمان فعلی است. بعلاوه $e_i(t_k)$ خطای تخمین حالت عامل i برای k امین داده ذخیره شده در زمان t_k می باشد که به صورت زیر تعریف می شود

$$\begin{aligned} e_i(t_k) &= \hat{x}_i(t_k) - \bar{x}_i(t_k) = \\ &\tilde{\varphi}_{f_i g_i}(t) \bar{h}_i(x_i(t_k)) - \bar{\varepsilon}_{x_i}(t_k), k=1, \dots, p_i. \end{aligned} \quad (21)$$

شبکه عصبی نقاد $W_i \in \mathbb{R}^{K^i}$, $i=1, \dots, N$ وجود دارند به گونه

ای که حل V_i برای (۷) و $\nabla V_i = \frac{\partial V_i}{\partial \delta_i}$ بر روی مجموعه فشرده

Ω به صورت زیر تقریب زده می شوند، $i=1, \dots, N$.

$$V_i = W_i^T \sigma_i(\delta_i) + \omega_i(\delta_i), \quad (26)$$

$$\nabla V_i = \nabla \sigma_i^T W_i + \nabla \omega_i, \quad (27)$$

که در آن $\sigma_i(\delta_i) \in \mathbb{R}^{K^i}$ بردارهای پایه توابع فعالیت شبکه

عصبی هستند، $K^i, i=1, \dots, N$ تعداد نرون های لایه مخفی،

$\omega_i(\delta_i)$ خطای تقریب شبکه های عصبی می باشد،

$$\nabla \omega_i = \frac{\partial \omega_i}{\partial \delta_i} \quad \text{و} \quad \nabla \sigma_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \delta_i}, \quad \nabla V_i = \frac{\partial V_i}{\partial \delta_i}$$

تعداد نرون های لایه مخفی $K^i \rightarrow \infty$ ، خطای تقریب به طور

یکنواخت $\omega_i \rightarrow 0$ و $\nabla \omega_i \rightarrow 0$ و $\sigma_i(\delta_i)$ تشکیل یک

مجموعه پایه مستقل می دهد [۳۲، ۳۳]. بر مبنای فرض ۱، روی مجموعه

فشرده Ω داریم $\|\nabla \omega_i\| \leq b_{\nabla \omega_i}$ ، $\|\omega_i\| \leq b_{\omega_i}$ ، $\forall i$

$$\|\nabla \sigma_i\| \leq b_{\nabla \sigma_i} \quad \text{و} \quad \|\sigma_i\| \leq b_{\sigma_i}.$$

با به کارگیری شبکه های عصبی تقریبگر توابع ارزش، که شبکه

های عصبی نقاد نامیده می شوند (معادلات (۲۶) و (۲۷))، و سیاست

های فیدبکی u_i و u_{N_i} ، هامیلتونین (۸) به صورت زیر به دست می

آید.

$$H_i(\delta_i, W_i, u_i, u_{N_i}) = W_i^T \nabla \sigma_i[\varphi_i^* z_i(\delta_i, \delta_j, u_i, u_{N_i})] + \varepsilon_{T_i} + \frac{1}{2} Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2} u_i^T R_{ii} u_i + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij} u_j = e_{B_i} \quad (28)$$

$$e_{B_i} = -(\nabla \omega_i)^T \times \quad (29)$$

$$[\varphi_i^* z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i}) + \varepsilon_{T_i}], \quad i=1, \dots, N$$

e_{B_i} خطای باقی مانده ناشی از تقریب شبکه های عصبی می باشند.

تحت فرض ۱، این خطاهای باقی مانده روی مجموعه فشرده Ω کراندار

$$\text{هستند،} \quad \sup_{x \in \Omega} \|e_{B_i}\| \leq \bar{e}_i, \quad i=1, \dots, N.$$

فرض ۲- مشابه [۲۰] فرض می شود که برای یک مجموعه فشرده

$$\Omega \subset \mathbb{R}^n \quad \text{و} \quad i=1, \dots, N$$

الف) $f_i(x_i) \leq b_f \|x_i\|$ (ب) $g_i(x_i)$ توسط یک ثابت

مشخص کراندار است $\|g_i(x_i)\| \leq b_{g_i}$ (ج) وزن های شبکه های

عصبی نقاد توسط ثابت های مشخص کراندار هستند $\|W_i\| < W_{i \max}$

در واقع وزن های ایده آل $W_i, i=1, \dots, N$ و φ_i^* ، نامعلوم

می باشند و باید به صورت زمان حقیقی تقریب زده شوند. بنابراین،

$$\dot{\delta}_i = \varphi_i^* z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i}) + \varepsilon_{T_i}, \quad (23)$$

که در آن بردار رگر سور

$$z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i}) = [z_{e_{ij} \xi_i}^T, z_{-e_{ij} \xi_j}^T, e_{i0} \xi_i^T,$$

$$-e_{i0} \xi_0^T, (d_i + e_{i0})(\xi_i u_i)^T, z_{-e_{ij} \xi_j u_j}^T]^T \in \mathbb{R}^{d^i}$$

$$z_{e_{ij} \xi_i} = \{e_{ij} \xi_i \mid j \in N_i\}, \quad z_{-e_{ij} \xi_j} = \{-e_{ij} \xi_j \mid j \in N_i\},$$

$$z_{-e_{ij} \xi_j u_j} = \{-e_{ij} \xi_j u_j \mid j \in N_i\}$$

$$\text{Card}(z_{-e_{ij} \xi_j u_j}) = \text{Card}(z_{-e_{ij} \xi_j}) = \text{Card}(z_{e_{ij} \xi_i}) = \|N_i\|,$$

$$d^i = \sum_{j \in N_i} (k_{\theta_i} + k_{\theta_j}) + k_{\theta_i} + k_{\theta_0} + k_{\psi_i} + \sum_{j \in N_i} k_{\psi_j}$$

می باشد و $\varphi_i^* = [\varphi_{\theta_i}^*, \varphi_{\theta_j}^*, \theta_i^*, \theta_0^*, \psi_i^*, \varphi_{\psi_j}^*] \in \mathbb{R}^{n \times d^i}$

ماتریس وزن های نامعلوم می باشد، $\varphi_{\theta_i}^* = [\theta_i^*, \dots, \theta_i^*]$

$$\varphi_{\theta_j}^* = \{\theta_j^* \mid j \in N_i\}, \quad \varphi_{\psi_j}^* = \{\psi_j^* \mid j \in N_i\}$$

$$\text{Card}(\varphi_{\theta_i}^*) = \text{Card}(\varphi_{\theta_j}^*) = \text{Card}(\varphi_{\psi_j}^*) = \|N_i\|$$

و $\|N_i\|$ نشان دهنده تعداد عامل های همسایه بازیکن i می باشد.

می توان تقریب (۲۳) را به صورت زیر نوشت $i=1, \dots, N$

$$\dot{\delta}_i = \hat{\varphi}_i z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i}) + \varepsilon_{T_i}, \quad (24)$$

$$\hat{\varphi}_i = [\hat{\varphi}_{\theta_i}, \hat{\varphi}_{\theta_j}, \hat{\theta}_i, \hat{\theta}_0, \hat{\psi}_i, \hat{\varphi}_{\psi_j}] \in \mathbb{R}^{n \times d^i}$$

تخمین زده شده برای ماتریس φ_i^* مربوط به عامل i می باشد که در

$$\hat{\varphi}_{\theta_i} = \{\hat{\theta}_i \mid j \in N_i\}, \quad \hat{\varphi}_{\psi_j} = \{\hat{\psi}_j \mid j \in N_i\}$$

$$\hat{\varphi}_i = [\hat{\theta}_i, \dots, \hat{\theta}_i], \quad \text{به صورت زیر تعریف}$$

می شود و از قضیه ۱ نتیجه می شود که کراندار نهایی یکنواخت می باشد

$$(\|\tilde{\varphi}_i\| \leq b_{\tilde{\varphi}_i}).$$

$$\tilde{\varphi}_i(t) = \hat{\varphi}_i(t) - \varphi_i^*(t). \quad (25)$$

۴- حل برخط همزمانسازی سیستم چندعاملی

غیر خطی با دینامیک های نامعلوم

در این بخش، الگوریتم عملگر-نقاد برای یادگیری حل بهینه برخط

بازی های گرافایی دیفرانسیلی غیرخطی زمان پیوسته دارای دینامیک

نامعلوم، ارایه می گردد.

$$-۴-۱ \quad \text{تقریب توابع هزینه عامل های غیرخطی توسط}$$

شبکه های عصبی نقاد

بر اساس قانون تقریب مرتبه بالای وایرشتراس [۳۲-۳۴]، مجموعه

$$\sigma_i(\delta_i): \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{K^i}, \quad i=1, \dots, N$$

به طوری که $\nabla \sigma_i(0) = 0$ ، $\sigma_i(0) = 0$ و وزن های ثابت

اثبات لم ۲- با توجه به محدودیت صفحات حذف شده است.

۴-۲- تقریب سیاست های کنترلی عامل های غیر خطی با

استفاده از شبکه های عصبی عملگر

سیاست های کنترلی ایده آل با در نظر گرفتن

$V_i(\delta_i) = W_i^T \sigma_i, i=1, \dots, N$ ، به صورت زیر به دست می آید

$$u_i = -(d_i + e_{i0}) R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i. \quad (34)$$

با به کارگیری شبکه های عصبی عملگر، تخمین سیاست های

کنترلی بهینه به صورت زیر نوشته می شود

$$\hat{u}_i = -(d_i + e_{i0}) R_{ii}^{-1} (\hat{\psi}_i \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T \hat{W}_{i+N} \quad (35)$$

که مقدار تخمین زده شده از وزن ایده آل شبکه عصبی

$\hat{W}_i$ و $\hat{\psi}_i$ مقادیر تخمین زده از وزن های ایده آل

$\psi_i^*, i=1, \dots, N$ می باشد. خطاهای تخمین شبکه های عصبی

نقاد و عملگر به ترتیب در روابط (۳۶) و (۳۷) تعریف شده است

$$\tilde{W}_i = W_i - \hat{W}_i \quad (36)$$

$$\tilde{W}_{i+N} = W_i - \hat{W}_{i+N} \quad (37)$$

با استفاده از (۳۳) و توجه به این که ورودی های کنترلی از رابطه

(۳۵) داده می شوند، قانون تنظیم شبکه های عصبی نقاد برای هر عامل

i ، به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_i = & -\alpha_i \frac{\hat{B}_{i+N}}{(1 + \hat{B}_{i+N}^T \hat{B}_{i+N})^2} [\hat{B}_{i+N}^T \hat{W}_i \\ & + \frac{1}{2} Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2} (d_i + e_{i0})^2 \hat{W}_{i+N}^T \hat{D}_i \hat{W}_{i+N} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0})^2 \hat{W}_{j+N}^T \hat{E}_j \hat{W}_{j+N}] \end{aligned} \quad (38)$$

به این ترتیب، برای تضمین پایداری سیستم حلقه بسته و همگرایی

سیاست های کنترلی به تعادل نش، قوانین تنظیم شبکه های عصبی

عملگر به فرم غیر استاندارد به صورت زیر انتخاب می شوند

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_{i+N} = & -\alpha_{i+N} \{ (S_i \hat{W}_{i+N} - F_i \hat{W}_i) - \hat{D}_i \hat{W}_{i+N} \times \\ & \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \hat{W}_i - \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j \hat{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{j+N}^T}{2m_{s_j}} \hat{W}_j \} \end{aligned} \quad (39)$$

که در آن $S_i \in \mathbb{R}^{K_i \times K_i}$ و $F_i \in \mathbb{R}^{K_i \times K_i}$ ماتریس های

مثبت معین قطری هستند و

خروجی شبکه های عصبی نقاد $\hat{V}_i(\delta_i)$ و معادلات بلمن تقریبی می توانند به ترتیب به صورت زیر نوشته شوند.

$$\hat{V}_i = \hat{W}_i^T \sigma_i(\delta_i) \quad (30)$$

$$\begin{aligned} e_{H_i} = & \hat{W}_i^T \nabla \sigma_i(\hat{\phi}_i [z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i})]^T) \\ & + \frac{1}{2} Q_i(\delta_i) + \frac{1}{2} u_i^T R_{ii} u_i + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} u_j^T R_{ij} u_j \end{aligned} \quad (31)$$

که در آن $\hat{\phi}_i = [\hat{\phi}_{\theta_i}, \hat{\phi}_{\theta_j}, \hat{\theta}_i, \hat{\theta}_0, \hat{\psi}_i, \hat{\phi}_{\psi_j}]$ و $\hat{W}_i$ به

ترتیب مقادیر تخمین زده شده از ϕ_i^* و W_i برای $i=1, \dots, N$

می باشند. اکنون مسئله پیدا کردن تابع ارزش برای هر عامل به تنظیم

پارامترهای شبکه های عصبی نقاد $\hat{W}_i$ تبدیل شده است به گونه ای

که خطای اختلاف زمانی e_{H_i} حداقل شود. تابع هدف زیر را در نظر بگیرد.

$$E_i = \frac{1}{2} e_{H_i}^T e_{H_i} \quad (32)$$

قوانین تنظیم وزن های شبکه عصبی نقاد با استفاده از الگوریتم

گرادیان نزولی نرمالایز شده به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_i = & -\alpha_i \frac{\partial E_i}{\partial \hat{W}_i} = -\alpha_i e_{H_i} \frac{\partial e_{H_i}}{\partial \hat{W}_i} = \\ & -\alpha_i \frac{\hat{B}_i}{(1 + \hat{B}_i^T \hat{B}_i)^2} e_{H_i} = -\alpha_i \frac{\bar{B}_i}{m_{s_i}} e_{H_i} \end{aligned} \quad (33)$$

که در آن

$$m_{s_i} = 1 + \hat{B}_i^T \hat{B}_i, \bar{B}_i = \frac{\hat{B}_i}{1 + \hat{B}_i^T \hat{B}_i},$$

$$\hat{B}_i = \nabla \sigma_i(\hat{\phi}_i [z_i(x_i, x_j, u_i, u_{N_i})]),$$

برای $\alpha_i > 0, i=1, \dots, N$ نرخ یادگیری و $(1 + \hat{B}_i^T \hat{B}_i)^2$

نرمالایزسازی به کار گرفته شده است.

لم ۲- $(u_i, u_{N_i}), \forall i$ را به عنوان یک مجموعه سیاست

فیدبکی کراندار قابل قبول در نظر بگیرید و (۳۳) را به عنوان قانون تنظیم

شبکه های عصبی نقاد و (۲۰) را برای تنظیم وزن های شبکه عصبی

شناساگر در نظر بگیرید و فرض کنید که $\bar{B}_i$ تحریک پایا باشد.

آنگاه برای خطاهای تقریب کراندار، خطای پارامترهای نقاد به صورت

نمایی به مجموعه باقی مانده زیر همگرا می شود.

$$\eta_{i_1} e^{-\eta_{i_2} t} + \frac{\alpha_i}{m_{s_i} \eta_{i_2}} b_{\nabla \sigma_i} \|W_i\| \times$$

$$(\|z_i(x_i, x_j, u_i, u_j)_{j \in N_i}\| b_{\hat{\phi}_i} + \bar{\varepsilon}_{T_i}) + \frac{\alpha_i}{m_{s_i} \eta_{i_2}} \bar{e}_i$$

$$\dot{L}(t) = \sum_{i=1}^N \{ \dot{V}_i(t) \} \quad (41)$$

$$\underbrace{\dot{L}_i(t)}_{-\tilde{W}_i^T \alpha_i^{-1} \dot{\tilde{W}}_i} + \underbrace{\dot{L}_{i+N}(t)}_{-\tilde{W}_{i+N}^T \alpha_{i+N}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{i+N}} \}$$

اولین جمله (۴۱) با استفاده از (۲۸)، (۱۸) و (۳۴)-(۳۷) و انجام پاره ای از محاسبات به صورت زیر به دست می آید

$$\sum_{i=1}^N \dot{V}_i(t) = \sum_{i=1}^N \{ \dot{L}_{V_i} - \frac{1}{2} Q_i(\delta_i) + W_i^T \frac{\partial \sigma_i}{\partial \delta_i} \times$$

$$\{ -(d_i + e_{i0})^2 (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) R_{ii}^{-1} \times$$

$$((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i + (d_i + e_{i0})^2 \times$$

$$(\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) R_{ii}^{-1} ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T \tilde{W}_{i+N}$$

$$+ \sum_{j \in N_i} e_{ij} ((d_j + e_{j0}) (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) R_{jj}^{-1} \times$$

$$((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j$$

$$-(d_j + e_{j0}) (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) R_{jj}^{-1} \times$$

$$((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T \tilde{W}_{j+N} \} \} + \sum_{i=1}^N \omega_{i0} \quad (42)$$

که در آن

$$\sum_{i=1}^N \omega_{i0} = \sum_{i=1}^N \{ \frac{\partial \omega_i}{\partial \delta_i} [\sum_{j \in N_i} e_{ij} (f_i(x_i) - f_j(x_j))$$

$$+ e_{i0} (f_i(x_i) - f_0(x_0)) - (d_i + e_{i0})^2 g_i(x_i) \times$$

$$R_{ii}^{-1} (\hat{\psi}_i \zeta_i)^T \frac{\partial \sigma_i}{\partial \delta_i} \hat{W}_{i+N} + \sum_{j \in N_i} e_{ij} (d_j + e_{j0}) \times$$

$$g_j(x_j) R_{jj}^{-1} (\hat{\psi}_j \zeta_j)^T \frac{\partial \sigma_j}{\partial \delta_j} \hat{W}_{j+N}] \},$$

$$\dot{L}_{V_i} = -W_i^T \frac{\partial \sigma_i}{\partial \delta_i} [-(d_i + e_{i0})^2 (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) \times$$

$$R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i + \sum_{j \in N_i} e_{ij} \times$$

$$(d_j + e_{j0}) (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j})^T \times$$

$$\nabla \sigma_j^T W_j] - \frac{1}{2} (d_i + e_{i0})^2 W_i^T \nabla \sigma_i (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) \times$$

$$R_{ii}^{-T} (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0})^2 \times$$

$$W_j^T \nabla \sigma_j (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} \times$$

$$(\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j})^T \nabla \sigma_j^T W_j + e_{B_i},$$

ثابت مثبت b_δ به اندازه کافی بزرگ وجود دارد به قسمی که

$$\hat{E}_j = \frac{\partial \sigma_j}{\partial \delta_j} (\hat{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} (\hat{\psi}_j \zeta_j)^T \frac{\partial \sigma_j}{\partial \delta_j}^T,$$

$$\hat{D}_i = \nabla \sigma_i (\hat{\psi}_i \zeta_i) R_{ii}^{-T} (\hat{\psi}_i \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T,$$

$$\hat{B}_{i+N} = \nabla \sigma_i (\hat{\phi}_i [z_i(x_i, x_j, u_{i+N}, u_{-(i+N)})]),$$

$$u_{-(i+N)} = \{u_{j+N} \mid j \in N_i\},$$

$$m_{s_{i+N}} = 1 + \hat{B}_{i+N}^T \hat{B}_{i+N}, i_{N_i} = \{j : (i, j) \in \Sigma\},$$

$$\bar{B}_{i+N} = \frac{\hat{B}_{i+N}}{1 + \hat{B}_{i+N}^T \hat{B}_{i+N}}, i = 1, \dots, N.$$

لم ۳ (نامساوی یونگ) - برای هر دو بردار x و y و هر $\varepsilon > 0$ ، رابطه زیر برقرار می باشد [۳۵]

$$x^T y \leq \varepsilon \frac{\|x\|^2}{2} + \frac{\|y\|^2}{2\varepsilon}$$

۴-۳ تحلیل همگرایی و پایداری

در ادامه قضایایی که پایداری حلقه بسته و همگرایی برخط به پاسخ تقریبی بهینه بازی چندعاملی گرافی غیر خطی با دینامیک های نامعلوم را تضمین می کند مطرح شده است.

قضیه ۲ (پایداری سیستم حلقه بسته و همگرایی شبکه های عصبی عملگر-نقاد) - سیستم دینامیکی (۲۲) با وزن های نامشخص θ_i^* ، ψ_i^* و $\psi_j^* \mid_{j \in N_i}, i = 1, \dots, N$ و تعاریف بازی گرافی دیفرانسیلی چندعاملی را در نظر بگیرید. در حالی که شرط رتبه Z_i برقرار است، وزن های شبکه عصبی شناساگر از رابطه (۲۰) به روزرسانی می شود. ورودی های کنترلی از رابطه (۳۵) داده می شوند و قانون تنظیم شبکه عصبی نقاد برای عامل i با رابطه (۳۸) ارایه می شود و قانون تنظیم شبکه عصبی عملگر متناظر با عامل i از رابطه (۳۹) داده می شود. $\bar{B}_{i+N}, \forall i$ تحریک پایا می باشد و فرض های ۱ و ۲ برقرار می باشد. آنگاه با به کارگیری تعداد کافی نرون برای شبکه های عصبی، حالت های خطای سیستم حلقه بسته $\delta_i(t)$ و خطای شبکه عصبی نقاد $\tilde{W}_i, i = 1, \dots, N$ و خطای شبکه عصبی عملگر $\tilde{W}_{i+N}, i = 1, \dots, N$ کراندار نهایی یکنواخت هستند.

اثبات قضیه ۲ - پیش از انجام اثبات لازم به ذکر است که در مواقع مورد نیاز، $\theta_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}$ و $\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}$ به ترتیب به عنوان شکل های معادل توابع f_i و g_i استفاده می شوند. تابع لیاپانوف و مشتق این تابع را به ترتیب به صورت زیر در نظر بگیرید

$$L(t) = \sum_{i=1}^N \{ V_i(t) \} \quad (40)$$

$$\underbrace{\frac{1}{2} \tilde{W}_i^T \alpha_i^{-1} \tilde{W}_i}_{L_i(t)} + \underbrace{\frac{1}{2} \tilde{W}_{i+N}^T \alpha_{i+N}^{-1} \tilde{W}_{i+N}}_{L_{i+N}(t)} \}$$

$$\begin{aligned}
c_j &= (d_j + e_{j0}), \quad c_i = (d_i + e_{i0}), \\
D_i &= c_i^2 \nabla \sigma_i(\psi_i^* \zeta_i) R_{ii}^{-T} (\psi_i^* \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T, \\
\tilde{D}_i &= c_i^2 \nabla \sigma_i(\tilde{\psi}_i \zeta_i) R_{ii}^{-T} (\tilde{\psi}_i \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T, \\
E_j &= c_j^2 \nabla \sigma_j(\psi_j^* \zeta_j) R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T, \\
\tilde{E}_j &= c_j^2 \nabla \sigma_j(\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} (\tilde{\psi}_j \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T, \\
\hat{D}_i &= \tilde{D}_i + D_i + c_i^2 \nabla \sigma_i(\tilde{\psi}_i \zeta_i) R_{ii}^{-T} (\psi_i^* \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T \\
&\quad + c_i^2 \nabla \sigma_i(\psi_i^* \zeta_i) R_{ii}^{-T} (\tilde{\psi}_i \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T, \\
\hat{E}_j &= \tilde{E}_j + E_j + c_j^2 \nabla \sigma_j \tilde{\psi}_j \zeta_j R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} \zeta_j^T \psi_j^{*T} \times \\
&\quad \nabla \sigma_j^T + c_j^2 \nabla \sigma_j \psi_j^* \zeta_j R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} \zeta_j^T \tilde{\psi}_j^T \nabla \sigma_j^T.
\end{aligned}$$

با توجه به اینکه $\hat{D}_i, \hat{E}_j, i=1, \dots, N, j \in N_i$ کراندار هستند. بنابراین

$$\frac{1}{4} W_i^T D_i W_i, \frac{1}{4} W_i^T \hat{D}_i W_i, \frac{1}{4} W_j^T E_j W_j, \frac{1}{4} W_j^T \hat{E}_j W_j$$

که در $i=1, \dots, N, \dot{L}_i(t)$ ظاهر می شوند نیز به صورت زیر کراندار هستند و در (۴۵) $k_{O_j}, k_{H_i}, k_{G_i}, k_{S_j}, k_{Y_j}, k_{N_i}$ ثابت های اسکالر هستند.

$$\begin{aligned}
\left\| \frac{1}{2} W_i^T D_i W_i \right\| &\leq k_{H_i}, \quad \left\| \frac{1}{2} W_i^T \hat{D}_i W_i \right\| \leq k_{G_i}, \\
\left\| \frac{1}{2} W_j^T E_j W_j \right\| &\leq k_{S_j}, \quad \left\| \frac{1}{2} W_j^T \hat{E}_j W_j \right\| \leq k_{Y_j}, \quad (\text{۴۵}) \\
\left\| \hat{D}_i \right\| &\leq k_{N_i}, \quad \left\| \hat{E}_j \right\| \leq k_{O_j}.
\end{aligned}$$

با استفاده از (۴۵) ، (۳۷) و نامساوی یونگ (لم ۳) و فرض های ۱ و ۲، $\dot{L}_i(t)$ به صورت زیر در می آید

$$\begin{aligned}
\dot{L}_i(t) &\leq \dot{L}_{-i} + \tilde{W}_{i+N}^T \hat{D}_i \tilde{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
&\quad + \sum_{j \in N_i} \tilde{W}_{j+N}^T \hat{E}_j \tilde{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \quad (\text{۴۶})
\end{aligned}$$

که در آن

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N \|\omega_{i0}\| &\leq \sum_{i=1}^N \{b_{\nabla \omega_i} b_f b_\delta \|\delta_i\| + b_{\nabla \omega_i} \times \\
&\quad (d_i + e_{i0})^2 \|g_i(x_i)\| \sigma_{\min}(R_{ii}) (\|\psi_i^* \zeta_i\| \\
&\quad + \|\tilde{\psi}_i \zeta_i\|) b_{\nabla \sigma_i} (\|W_i\| + \|\tilde{W}_{i+N}\|) + b_{\nabla \omega_i} \times \\
&\quad \sum_{j \in N_i} e_{ij} (d_j + e_{j0}) \|g_j(x_j)\| \sigma_{\min}(R_{jj}) \times \\
&\quad b_{\nabla \sigma_j} (\|\tilde{\psi}_j \zeta_j\| + \|\psi_j^* \zeta_j\|) (\|W_j\| + \|\tilde{W}_{j+N}\|)\} \\
\text{، برای دومین جمله } \dot{L}_i &= -\sum_{i=1}^N \tilde{W}_i^T \alpha_i^{-1} \dot{\tilde{W}}_i, \quad \dot{L} \\
\text{با استفاده از (۲۸)، (۳۴)، (۳۸)، (۱۸) و } g_i &= \psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i} \text{ داریم} \\
\dot{L}_i &= -\tilde{W}_i^T \alpha_i^{-1} \dot{\tilde{W}}_i = \tilde{W}_i^T \frac{B_{i+N}}{(1 + B_{i+N}^T B_{i+N})^2} \times \\
&\quad \{W_i^T \nabla \sigma_i(\tilde{\varphi}_i z_i(x_i, x_j, u_{i+N}, u_{-i+N})) \\
&\quad - B_{i+N}^T \tilde{W}_i + \frac{1}{2} (W_i - \tilde{W}_{i+N})^T \hat{D}_i (W_i - \tilde{W}_{i+N}) \\
&\quad + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (W_j - \tilde{W}_{j+N})^T \hat{E}_j (W_j - \tilde{W}_{j+N}) \quad (\text{۴۳}) \\
&\quad - W_i^T \frac{\partial \sigma_i}{\partial \delta_i} ((d_i + e_{i0})(\psi_i^* \zeta_i)(u_i - \hat{u}_i)) \\
&\quad - \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\psi_j^* \zeta_j)(u_j - \hat{u}_j)) - W_i^T \nabla \sigma_i \varepsilon_{T_i} \\
&\quad + \varepsilon_{L_i} + e_{B_i},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{L_i} &= -\frac{1}{2} (d_i + e_{i0})^2 W_i^T \nabla \sigma_i(\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) \times \\
&\quad R_{ii}^{-T} (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i \\
&\quad - \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0})^2 W_j^T \nabla \sigma_j(\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) \times \\
&\quad R_{jj}^{-T} R_{ij} R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j})^T \nabla \sigma_j^T W_j, \quad (\text{۴۴})
\end{aligned}$$

که در آن برای $i=1, \dots, N$ داریم

$$\begin{aligned}
\dot{L}(t) \leq & \dot{L}_{-} V_i + \sum_{i=1}^N \left\{ \dot{L}_{-} i + \tilde{W}_{i+N}^T \hat{D}_i \times \right. \\
& \tilde{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i - \tilde{W}_{i+N}^T \hat{D}_i W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i \\
& + \tilde{W}_{i+N}^T \hat{D}_i W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i - \frac{k_{N_i}}{2} W_i \tilde{W}_{i+N} \times \\
& \left. \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i + \sum_{j \in N_i} \tilde{W}_{j+N}^T \hat{E}_j \tilde{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i \right. \\
& - \sum_{j \in N_i} \tilde{W}_{j+N}^T \hat{E}_j W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i + \sum_{j \in N_i} \tilde{W}_{j+N}^T \times \\
& \left. \hat{E}_j W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \right\} + \sum_{i=1}^N L_{W_{i+N}}, \\
\sum_{i=1}^N L_{W_{i+N}} = & - \sum_{i=1}^N \tilde{W}_{i+N}^T \alpha_{i+N}^{-1} \dot{\hat{W}}_{i+N} \\
& + \sum_{i=1}^N \tilde{W}_{i+N}^T \hat{D}_i \hat{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \hat{W}_i \\
& + \underbrace{\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \tilde{W}_{j+N}^T \hat{E}_j \hat{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{j+N}^T}{2m_{s_j}} \hat{W}_j}_{\sum_{i=1}^N \tilde{W}_{i+N}^T \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j \hat{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{j+N}^T}{2m_{s_j}} \hat{W}_j}
\end{aligned} \quad (47)$$

اکنون با استفاده از $L_{W_{i+N}}$ ، $\dot{\hat{W}}_{i+N}$ به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{W}}_{i+N} = & -\alpha_{i+N} \{ (S_i \hat{W}_{i+N} - F_i \hat{W}_i) - \hat{D}_i \hat{W}_{i+N} \times \\
& \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} \hat{W}_i - \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j \hat{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{j+N}^T}{2m_{s_j}} \hat{W}_j \} \quad (48)
\end{aligned}$$

با به کارگیری (48) در (47)، با جملات زیر جایگزین می شود.

$$\begin{aligned}
& \tilde{W}_{i+N}^T S_i W_i - \tilde{W}_{i+N}^T S_i \tilde{W}_{i+N} \\
& - \tilde{W}_{i+N}^T F_i W_i + \tilde{W}_{i+N}^T F_i \tilde{W}_i \quad (49)
\end{aligned}$$

از آنجایی که $Q_i(\delta_i) > 0, i=1, \dots, N$ وجود دارد
 $\forall i, q_i > 0$ به طوری که $\delta_i^T q_i \delta_i < Q_i(\delta_i)$ ، بنابراین
 $-\delta_i^T q_i \delta_i > -Q_i(\delta_i)$

$\dot{L}$ به صورت زیر نوشته می شود

$$\begin{aligned}
\dot{L}_{-} i = & -r_i \tilde{W}_i^T \bar{B}_{i+N} \bar{B}_{i+N}^T \tilde{W}_i + \left\| \tilde{W}_i^T \frac{\bar{B}_{i+N}}{m_{s_{i+N}}} \right\| \times \\
& (a_i + k_{r_i}) + \frac{\varepsilon}{2} a_{i_2} \delta_i^T \delta_i - \frac{k_{N_i}}{2} W_i \tilde{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
& - \frac{k_{N_i}}{4} \tilde{W}_{i+N} W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i - \sum_{j \in N_i} \frac{k_{O_j}}{4} W_j \tilde{W}_{j+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
& - \sum_{j \in N_i} \frac{k_{O_j}}{4} \tilde{W}_{j+N}^T W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i + (d_i + e_{i_0})^2 W_i^T \nabla \sigma_i \times \\
& (\tilde{\psi}_i \zeta_i) R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T (\tilde{W}_{i+N} - W_i) \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
& - W_i^T \tilde{D}_i W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i + W_i^T \tilde{D}_i \tilde{W}_{i+N} \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
& + W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j_0}) e_{ij} (\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T \times \\
& (W_j - \tilde{W}_{j+N}) \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i + W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j_0}) e_{ij} \times \\
& (\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-1} (\tilde{\psi}_j \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T (W_j - \tilde{W}_{j+N}) \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i \\
& + (e_{B_i} + \varepsilon_{L_i} - W_i^T \nabla \sigma_i \varepsilon_{T_i}) \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i - W_i^T \nabla \sigma_i [\psi_i^* \zeta_i \times \\
& (d_i + e_{i_0}) (- (d_i + e_{i_0}) R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i - (d_i + e_{i_0}) \times \\
& R_{ii}^{-1} (\varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i + (d_i + e_{i_0}) R_{ii}^{-1} ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \times \\
& \nabla \sigma_i^T W_i - (d_i + e_{i_0}) R_{ii}^{-1} ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T \tilde{W}_{i+N}) \\
& - \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) (- (d_j + e_{j_0}) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j \\
& - (d_j + e_{j_0}) R_{jj}^{-1} (\varepsilon_{g_j})^T \nabla \sigma_j^T W_j + (d_j + e_{j_0}) R_{jj}^{-1} \times \\
& ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j - (d_j + e_{j_0}) R_{jj}^{-1} \times \\
& ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T \tilde{W}_{j+N})] \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} \tilde{W}_i,
\end{aligned}$$

$$\left\| W_i^T \nabla \sigma_i \left(\sum_{j \in N_i} e_{ij} (\tilde{\theta}_i \xi_i - \tilde{\theta}_j \xi_j) + e_{i_0} (\tilde{\theta}_i \xi_i - \tilde{\theta}_0 \xi_0) \right) \right\| \leq$$

$$a_i + a_{i_2} \|\delta_i\|, \quad k_{T_i} = k_{G_i} + \sum_{j \in N_i} k_{Y_j}, \quad r_i = 1 - \frac{a_{i_2}}{\varepsilon m_{s_{i+N}}}.$$

با استفاده از جملات (42)، (46)، (18) و (35) - (37)، (41) به صورت زیر در می آید

$$m_{44}^i = - \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i, \quad d_1^i = b_{\nabla \omega_i} b_f b_\delta,$$

$$d_2^i = \frac{\bar{B}_{i+N}}{m_{s_i}} (a_{i_1} + k_{T_i}) - (d_i + e_{i0})^2 W_i^T \nabla \sigma_i (\tilde{\psi}_i \zeta_i) \times$$

$$R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - W_i^T \tilde{D}_i W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}}$$

$$- W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0}) e_{ij} (\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j)^T \times$$

$$\nabla \sigma_j^T W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0}) e_{ij} (\tilde{\psi}_j \zeta_j) \times$$

$$R_{jj}^{-1} (\tilde{\psi}_j \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - W_i^T \nabla \sigma_i [\psi_i^* \zeta_i \times$$

$$-(d_i + e_{i0}) R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i})^T \nabla \sigma_i^T W_i + (d_i + e_{i0}) \times$$

$$R_{ii}^{-1} ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i - \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) \times$$

$$-(d_j + e_{j0}) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j})^T \nabla \sigma_j^T W_j$$

$$+ (d_j + e_{j0}) R_{jj}^{-1} ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j] \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}}$$

$$+ (e_{B_i} + \varepsilon_{L_i} - W_i^T \nabla \sigma_i \varepsilon_{T_i}) \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}},$$

$$d_3^i = -W_i^T \nabla \sigma_i (d_i + e_{i0})^2 (\psi_i^* \zeta_i + \varepsilon_{g_i}) R_{ii}^{-1} \times$$

$$((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T - \hat{D}_i W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i$$

$$+ W_i^T S_i - W_i^T F_i + b_{\nabla \omega_i} (d_i + e_{i0})^2 \|g_i(x_i)\| \times$$

$$\sigma_{\min}(R_{ii}) (\|\psi_i^* \zeta_i\| + \|\tilde{\psi}_i \zeta_i\|) b_{\nabla \sigma_i} \|\tilde{W}_{i+N}\|,$$

$$d_4^i = W_i^T \nabla \sigma_i (\sum_{j \in N_i} e_{ij} ((d_j + e_{j0}) (\psi_j^* \zeta_j + \varepsilon_{g_j}) \times$$

$$R_{jj}^{-1} ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T)) - \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j W_j \times$$

$$\frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i + b_{\nabla \omega_i} \sum_{j \in N_i} e_{ij} (d_j + e_{j0}) \|g_j(x_j)\| \times$$

$$\sigma_{\min}(R_{jj}) b_{\nabla \sigma_j} (\|\tilde{\psi}_j \zeta_j\| + \|\psi_j^* \zeta_j\|) \|\tilde{W}_{j+N}\|,$$

$$\dot{L}(t) = \sum_{i=1}^N \{C_i - \tilde{Z}_i^T M_i \tilde{Z}_i + D_i \tilde{Z}_i\}, \quad (5.0)$$

$$\tilde{Z}_i = [\delta_i, \tilde{W}_i, \tilde{W}_{i+N}, \tilde{W}_{j+N}]^T$$

$$, D_i = [d_1^i, d_2^i, d_3^i, d_4^i] \quad \text{که در آن}$$

$$, M_i = \begin{bmatrix} m_{11}^i & m_{12}^i & m_{13}^i & m_{14}^i \\ m_{21}^i & m_{22}^i & m_{23}^i & m_{24}^i \\ m_{31}^i & m_{32}^i & m_{33}^i & m_{34}^i \\ m_{41}^i & m_{42}^i & m_{43}^i & m_{44}^i \end{bmatrix}$$

$$m_{12}^i = m_{13}^i = m_{14}^i = m_{41}^i = m_{31}^i$$

$$= m_{21}^i = 0, \quad m_{34}^i = m_{43}^i = 0,$$

$$m_{11}^i = \frac{1}{2} q_i - \frac{\varepsilon}{2} a_{i_4} I, \quad m_{22}^i = r_i \bar{B}_{i+N} \bar{B}_{i+N}^T,$$

$$m_{23}^i = -\frac{1}{4m_{s_{i+N}}} \hat{D}_i W_i \bar{B}_{i+N}^T + \frac{k_{N_i}}{2} W_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}}$$

$$- \frac{1}{2} (d_i + e_{i0})^2 W_i^T \nabla \sigma_i (\tilde{\psi}_i \zeta_i) R_{ii}^{-1} (\psi_i^* \zeta_i)^T \times$$

$$\nabla \sigma_i^T \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - \frac{1}{2} W_i^T \tilde{D}_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}}$$

$$- \frac{1}{2} W_i^T \nabla \sigma_i (\psi_i^* \zeta_i) (d_i + e_{i0}) R_{ii}^{-1} \times$$

$$((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - \frac{1}{2} F_i = m_{32}^{i^T},$$

$$m_{24}^i = -\frac{1}{4} \sum_{j \in N_i} \hat{E}_j W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} k_{O_j} \times$$

$$W_j \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} - \frac{1}{2} W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0}) e_{ij} \times$$

$$(\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-1} (\psi_j^* \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_i}} - \frac{1}{2} W_i^T \times$$

$$\nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} (d_j + e_{j0}) e_{ij} (\tilde{\psi}_j \zeta_j) R_{jj}^{-1} (\tilde{\psi}_j \zeta_j)^T \times$$

$$\nabla \sigma_j^T \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_i}} - \frac{1}{2} W_i^T \nabla \sigma_i \sum_{j \in N_i} e_{ij} (\psi_j^* \zeta_j) \times$$

$$(d_j + e_{j0}) R_{jj}^{-1} ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{m_{s_{i+N}}} = m_{24}^{i^T},$$

$$m_{33}^i = -\hat{D}_i \frac{\bar{B}_{i+N}^T}{2m_{s_{i+N}}} W_i + S_i,$$

$$\|\tilde{Z}_i\| > \frac{D_{i\max}}{2\sigma_{\min}(M_i)} + \sqrt{\frac{D_{i\max}^2}{4\sigma_{\min}^2(M_i)}\|\tilde{Z}_i\| + \frac{C_{i\max}}{\sigma_{\min}(M_i)}} \equiv B_{\tilde{Z}_i} \quad (53)$$

مشاهده می شود که اگر (۵۳) از یک کران مشخص فراتر رود، آنگاه $\dot{L}$ منفی خواهد بود. بنابراین مطابق با توسعه لیپانوف استاندارد، تحلیل های بالا نشان می دهد که حالت خطاهای محلی و خطای وزن ها کراندار نهایی یکنواخت هستند [۳۶]. شرط (۵۳) برقرار است اگر نرم هر قسمت از $\tilde{Z}_i$ از کران $B_{\tilde{Z}_i}$ فراتر رود، یعنی $\delta_i > B_{\tilde{Z}_i}$ ، $\tilde{W}_{j+N} > B_{\tilde{Z}_i}$ ، $\tilde{W}_{i+N} > B_{\tilde{Z}_i}$ ، $\tilde{W}_i > B_{\tilde{Z}_i}$ به این ترتیب اثبات کامل می گردد. ■

قضیه ۳ (همگرایی به تعادل نش)- در نظر بگیرید که تمام شرایط و فرض های قضیه ۲ برقرار باشد، آنگاه الف) شبکه عصبی نقاد و عملگر به پاسخ معادله CHJ تقریبی همگرا می شوند یا به عبارت دیگر وزن های تخمین $\hat{W}_i$ به وزن های بهینه W_i همگرا می شوند. ب) مجموعه ورودی های $\hat{u}_i, i=1, \dots, N$ به حل تعادل نش تقریبی بازی گرافی دیفرانسیلی برای سیستم های خطی با دینامیک نامعلوم همگرا می شوند. اثبات قضیه ۳- اثبات یک نتیجه مستقیم از قضیه ۲ می باشد. ■

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش برای ارزیابی روش معرفی شده، الگوریتم پیشنهادی به یک مثال شبیه سازی اعمال می گردد. یک سیستم چندعاملی دارای ۵ گره، مطابق با شکل ۱ را در نظر بگیرید. وزن های اتصال و وزن یال ها، ۱ در نظر گرفته شده اند. دینامیک عامل ها به صورت زیر می باشد.

$$\dot{x}_0 = \begin{pmatrix} p_1 x_{02} \\ p_2 x_{01} + p_3 x_{02} + p_4 x_{02} x_{01}^2 \end{pmatrix},$$

$$\dot{x}_i = f_i(x_i) + g_i(x_i) u_i = \begin{pmatrix} p_1 x_{i2} \\ p_2 x_{i1} + p_3 x_{i2} + p_4 x_{i2} x_{i1}^2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p_{i+4} x_{i1} x_{i2} \end{bmatrix} u_i,$$

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix}, i=1, 2, \dots, 5.$$

بردار پارامترهای سیستم چندعاملی $P = [p_1, p_2, \dots, p_9]$ نامعلوم است، به طوری که مقادیر واقعی پارامترها برابر با $P = [1, -1, 0.5, -0.5, -0.8, 1, 0.5, -0.2, 1.4]$ در نظر گرفته شده اند. در الگوریتم شناساگرهای شبکه های عصبی، $a = 40$ ، $p = 1000$ ، $\Gamma = 70$ و ثابت نمونه برداری برابر

$$C_i = \dot{L}_{V_i} - W_i^T \nabla \sigma_i \{ (d_i + e_{i0})^2 (\psi_i^* \zeta_i) R_{ii}^{-1} \times ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i + (d_i + e_{i0})^2 (\varepsilon_{g_i}) \times R_{ii}^{-1} ((\tilde{\psi}_i + \psi_i^*) \zeta_i)^T \nabla \sigma_i^T W_i) - \sum_{j \in N_i} e_{ij} \times ((d_j + e_{j0}) (\psi_j^* \zeta_j) R_{jj}^{-1} ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j + (d_j + e_{j0}) (\varepsilon_{g_j}) R_{jj}^{-1} ((\tilde{\psi}_j + \psi_j^*) \zeta_j)^T \nabla \sigma_j^T W_j) \} + b_{\nabla \sigma_i} (d_i + e_{i0})^2 \|g_i(x_i)\| \sigma_{\min}(R_{ii}) (\|\psi_i^* \zeta_i\| + \|\tilde{\psi}_i \zeta_i\|) b_{\nabla \sigma_i} \|W_i\| + b_{\nabla \sigma_i} \sum_{j \in N_i} e_{ij} (d_j + e_{j0}) \times \|g_j(x_j)\| \sigma_{\min}(R_{jj}) b_{\nabla \sigma_j} (\|\tilde{\psi}_j \zeta_j\| + \|\psi_j^* \zeta_j\|) \|W_j\|,$$

و $C_i \leq C_{i\max}$ و $D_i \leq D_{i\max}$ که ثابت های $C_{i\max}$ و $D_{i\max}$ اسکالر می باشند. پارامترهای تنظیم باید به گونه ای انتخاب شوند به طوری که ماتریس M_i مثبت معین باشد.

$$M_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} q_i & 0 & 0 \\ 0 & I & M_{23}^i \\ 0 & M_{32}^i & M_{33}^i \end{bmatrix}, M_{23}^i = \begin{bmatrix} m_{23}^i & m_{24}^i \end{bmatrix}, \quad (51)$$

$$M_{32}^i = \begin{bmatrix} m_{32}^i \\ m_{42}^i \end{bmatrix}, M_{33}^i = \begin{bmatrix} m_{33}^i & 0 \\ 0 & m_{44}^i \end{bmatrix}$$

برای مثبت معین بودن M_i باید ویژگی های زیر برقرار باشند:

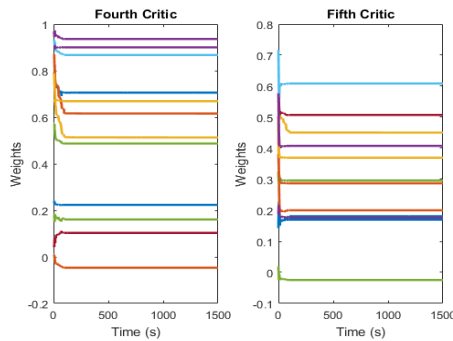
الف) $q_i > 0$. ب) $I > 0$. ج) مکمل شور^۱ برای I ، $D_{22}^i = I - M_{23}^i M_{33}^{i-1} M_{32}^i > 0$ مناسب S_i و F_i می تواند برقرار باشد. پ) مکمل شور برای M_{33}^i ، $D_{33}^i = M_{33}^i - M_{32}^i I^{-1} M_{23}^i > 0$ ، مناسب S_i و F_i می تواند برقرار باشد.

اکنون برای (۵۰) داریم

$$\dot{L} < \sum_{i=1}^N \{ -\|\tilde{Z}_i\|^2 \sigma_{\min}(M_i) + D_{i\max} \|\tilde{Z}_i\| + C_{i\max} \} \quad (52)$$

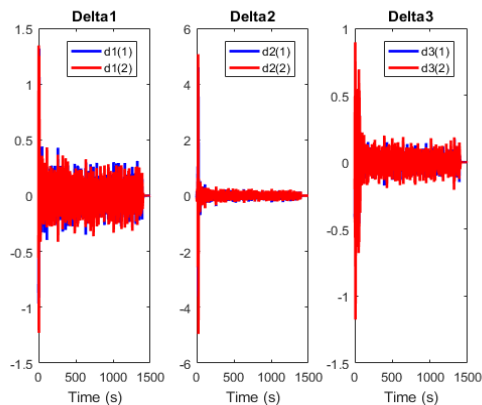
که $\sigma_{\min}(M_i)$ کوچکترین مقدار ویژه M_i را نشان می دهد. با کامل کردن مربعات، مشتق لیپانوف منفی خواهد بود اگر

^۱ Schur Complement



شکل ۳. همگرایی وزن های شبکه های نقاد عامل های غیرخطی ۴ و ۵

شکل ۴ خطای ردیابی محلی برای عامل ها را نشان می دهند که پس از حذف نویز ورودی ها در ثانیه ۱۴۰۰، خطای ردیابی عامل ها تقریباً به صفر همگرا شده اند (خطای ردیابی، عامل های ۱، ۲ و ۳ به عنوان نمونه آورده شده اند). با توجه به همگرایی خطا به صفر در شکل های مذکور، همزمان سازی همه عامل ها به رهبر نشان داده شده است.



شکل ۴. خطای ردیابی عامل های غیرخطی ۱، ۲ و ۳

نتایج نشان می دهد که الگوریتم کنترل بهینه توزیع شده پیشنهادی برای همزمانسازی سیستم های چندعاملی غیر خطی زمان پیوسته با دینامیک نامعلوم، به حل تقریبی بهینه همگرا شده است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم کنترل بهینه توزیع شده برخطی بر اساس تکنیک برنامه ریزی پویای تقریبی برای حل بهینه برخط مسئله همزمانسازی سیستم های چندعاملی غیرخطی دارای دینامیک نامعلوم ارایه شده است. حین تقرب سیاست های بهینه، دینامیک نامعلوم عامل ها نیز به طور همزمان شناسایی گردید. الگوریتم یادگیری توزیع شده، با استفاده از ساختار شبکه های عصبی عملگر-نقاد جهت تقرب سیاست های بهینه بازیکنان ارایه شد. برای شناسایی دینامیک نامعلوم عامل ها، شناساگرهای شبکه های عصبی به صورت همزمان در کنار شبکه های عملگر-نقاد برای هر عامل به کار گرفته شده اند. کراندارای سیگنال های حلقه بسته توسط پایداری لیاپانوف اثبات شده و نشان داده شد که سیاست های به دست

با ۰.۰۰۱ ثانیه می باشد. برای $i, j = 1, \dots, 5$ ، در نظر بگیرید

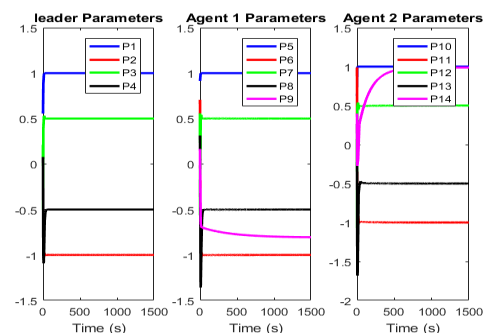
$$Q_i(\delta_i) = \delta_i^T Q_{ii} \delta_i = \delta_i^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \delta_i,$$

در الگوریتم به $R_{ii} = 10, R_{ij} = 1, (i \neq j, j \in N_i)$ کار رفته، پارامترهای طراحی به صورت $S_i = F_i = 100I$ و $i = 1, \dots, 5, \alpha_i = 1$ دسترس برای هر عامل، $\delta_i = [\delta_{i1}, \delta_{i2}]^T, i = 1, \dots, 5$ باشد که توسط گراف ارتباطی محدود شده است. توابع فعالیت شبکه های عصبی دینامیک خطای عامل ها به صورت

$$\sigma_i = [\delta_{i1}^2, \delta_{i1}\delta_{i2}, \delta_{i2}^2, \delta_{i1}^3, \delta_{i1}^2\delta_{i2}, \delta_{i1}\delta_{i2}^2, \delta_{i2}^3, \delta_{i1}^4, \delta_{i1}^3\delta_{i2}, \delta_{i1}^2\delta_{i2}^2, \delta_{i1}\delta_{i2}^3, \delta_{i2}^4],$$

انتخاب می شوند. هر $\sigma_i, i = 1, \dots, 5$ شامل توان های δ_{i1} و δ_{i2} از درجه ۴ می باشد. توجه شود که یک نویز مجموع سینوسی کوچک از ابتدا تا ثانیه ۱۴۰۰ به ورودی های کنترلی اضافه می شود تا شرط تحریک پایا بودن تضمین شود. الگوریتم یادگیری توزیع شده بهینه معرفی شده در قضیه ۲ برای حل مسئله اجماع، به بازی گرافی دیفرانسیلی غیرخطی تحت دینامیک نامعلوم اعمال شده است. شکل ۲ نشان می دهد که چگونه پارامترهای نامعلوم سیستم چندعاملی (پارامترهای رهبر، عامل های ۱ و ۲ به عنوان نمونه آورده شده اند) به مقادیر واقعی خود همگرا می شود، به گونه ای که نهایتاً پارامترهای سیستم چندعاملی به مقادیر زیر همگرا می گردد.

$$P = [1, -1, 0.5, -0.5, -0.79, 0.98, 0.45, -0.21, 1.37]$$



شکل ۲. همگرایی پارامترهای عامل های غیرخطی ۱ و ۲ و عامل رهبر
۳ نیز همگرایی وزن های شبکه های نقاد را نمایش می دهد (وزن های شبکه های نقاد، عامل های ۴ و ۵ به عنوان نمونه آورده شده اند).

- of Intelligent Control,” Ed. D.A. White and D.A. Sofge, New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [19] Vrabie D., Pastravanu O., Lewis F. L., Abu-Khalaf M., 2009, “Adaptive optimal control for continuous-time linear systems based on policy iteration,” *Automatica*, 45(2), 477–484.
- [20] Vamvoudakis K., Lewis F.L., 2011, “Multi-player non-zero-sum games: online adaptive learning solution of coupled Hamilton-Jacobi equations,” *Automatica*, 47, 1556–1559.
- [21] Vrabie D., Lewis F., 2010, “Integral Reinforcement Learning for Online Computation of Feedback Nash Strategies of Nonzero-Sum Differential Games,” 49th IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, GA, USA.
- [22] Vrabie D., Lewis F.L., 2011, “Integral reinforcement learning for finding online the feedback Nash equilibrium of Nonzero-sum differential games,” *Advances in Reinforcement Learning*, Intech, 2011.
- [23] Vamvoudakis K. G., Lewis F. L., Hudus G. R., 2012, “Multi-agent differential graphical games: Online adaptive learning solution for synchronization with optimality,” *Automatica*, 48, 1598–1611.
- [24] Abouheaf M. I., Lewis F. L., 2013, Multi-Agent Differential Graphical Games: Nash Online Adaptive Learning Solutions, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy.
- [25] Tatari F., Naghibi-Sistani M. B., Vamvoudakis K. G., 2017, “Distributed Optimal Synchronization Control of Linear Networked Systems under Unknown Dynamics,” *Proc. American Control Conference*, 668–673, Seattle, WA.
- [26] Tatari F., Naghibi-S M., 2015, “Distributed Optimal Control of Nonlinear Differential Graphical Games based on Reinforcement Learning,” *Journal of Control*, 8 (4), 15–30.
- [27] J. Li, H. Modares, T. Chai, F. L. Lewis, L. Xie, 2017, “Off-policy reinforcement learning for synchronization in multiagent graphical games,” *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 28(10), 2434 - 2445.
- [28] Kyriakos G. Vamvoudakis, 2017 “Q-learning for continuous-time graphical games on large networks with completely unknown linear system dynamics,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27(16), 2900–2920.
- [29] Vamvoudakis K., Lewis F. L., 2011, “Online actor-critic algorithm to solve continuous-time infinite horizon optimal control problem,” *Automatica*, 46, 787–788.
- [30] Modares H., Lewis F.L., Naghibi-Sistani M.B., 2013, “Adaptive Optimal Control of Unknown Constrained-Input Systems Using Policy Iteration and Neural Networks,” *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, 24(10), 1513–1525.
- [31] Zhang H., Cui L., Luo Y., 2013, “Near-optimal control for nonzero-sum differential games of continuous-time nonlinear systems using single-network ADP,” *IEEE Trans. Cybern.*, 43, 206–216.
- [32] Abu-Khalaf M., Lewis F. L., 2005, “Nearly optimal control laws for nonlinear systems with saturating actuators using a neural network HJB approach,” *Automatica*, 41, 779–791.
- [33] Finlayson B. A., “The method of weighted residuals and variational principles,” New York: Academic Press, 1990.
- آمده تعادل نش تقریبی بازی را نتیجه می دهند. صحت الگوریتم پیشنهاد شده نیز در شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت.
- ## مراجع
- [1] Hong Y., Hu J., Gao L., 2006 “Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology,” *Automatica*, 42 (7), 1177–1182.
- [2] Ren W., Moore K., Chen Y., 2007, “High-order and model reference consensus algorithms in cooperative control of multivehicle systems,” *J. Dynam. Syst., Meas., Control*, 129(5), 678–688.
- [3] Wang X., Chen G., 2002, “Pinning control of scale-free dynamical networks,” *Physica A*, 310(3–4), 521–531.
- [4] Wu Y., Meng X., Xie L., Lu R., Su H., Wu Z. G., 2017, “An input-based triggering approach to leader-following problems,” *Automatica*, 75, 221–228.
- [5] Zhang D., Xu Z., Wang Q. G., Zhao Y. B., 2017, “Leader-follower H_∞ consensus of linear multi-agent systems with aperiodic sampling and switching connected topologies,” *ISA Transactions*, 68, 150–159.
- [6] Wang B., Wang J., Zhang B., Lin H., Li X., Wang H., 2016, “Leader-follower consensus for multi-agent systems with three-layer network framework and dynamic interaction jointly connected topology,” *Neurocomputing*, 207 (26), 231–239.
- [7] Han T., Guan Z., Chi M., Hu B., Li T., Zhang X., 2017, “Multi-formation control of nonlinear leader-following multi-agent systems,” *ISA Transactions*, DOI: 10.1016/j.isatra.2017.05.003.
- [8] Semsar-Kazerouni E., Khorasani K., 2009, “Multi-agent team cooperation: A game theory approach,” *Automatica*, 45, 2205–2213.
- [9] Mao D., He Y., Ye X., Yu M., 2011, “Inverse optimal stabilization of cooperative control in networked multi-agent systems,” *Control and Decision Conference (CCDC)*, 1031 - 1037.
- [10] Tijss S., “Introduction to Game Theory,” India: Hindustan Book Agency, 2003.
- [11] Isaacs R., “Differential Games,” New York, Wiley, 1965.
- [12] Tolwinski B., Havrie A., Leimann G., 1986, “Cooperative equilibrium in differential games,” *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 119, 182–202.
- [13] Esparza L. G., Torres G. M., Saynes Torres L. M., 2013, “A brief introduction to differential games,” *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 4(1), 396–411.
- [14] Başar T., Olsder G. “Dynamic Non-cooperative Game Theory,” 2nd edition, Classics in Applied Mathematics. SIAM: Philadelphia, 1999.
- [15] Freiling G., Jank G., Abou-Kandil H., 2002, “On global existence of Solutions to Coupled Matrix Riccati equations in closed loop Nash Games,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(2), 264–269.
- [16] Gajic Z., Li T., 1988, “Simulation results for two new algorithms for solving coupled algebraic Riccati equations,” Third Int. Symp. On Differential Games. Sophia, Antipolis, France.
- [17] Sutton R., Barto A., “Reinforcement Learning—An Introduction,” Massachusetts: Cambridge, MIT Press, 1998.
- [18] Werbos P., “Approximate dynamic programming for real-time control and neural modeling Handbook

- [34] Hornik K., Stinchcombe M., White H., 1990, "Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multi layer feedforward networks," *Neural Networks*, 3(5), 551–560.
- [35] Hardy G., Littlewood J., Polya G., "Inequalities," 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1989.
- [36] Khalil H. K., "Nonlinear systems," Prentice-Hall, 1996.

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 سیستم های گسسته-پیش آمد افزایش تعداد حالت ها باعث پیچیدگی محاسباتی شده و پیاده سازی ناظر را نیز مشکل می سازد. محلی سازی ناظر یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت های ناظر نسبت به هر یک از اجزای سیستم بوده، به طوری که عملکرد همزمان کنترل کننده های محلی در سیستم گسسته-پیش آمد معادل کنترلی ناظر یکپارچه باشد. در این مقاله برای ساده نمودن پیاده سازی کنترل نظارتی روی سیستم های صنعتی، محلی سازی ناظر نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر معرفی شده است. دو روش برای تعمیم روش موجود محلی سازی ناظر پیشنهاد شده است: در روش اول گذرهای غیر از گذری که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می گیرد، در تمامی حالت هایی از ناظر یکپارچه که آن گذرها غیرفعال شده اند، حلقه می گردند. در روش دوم گذرهایی از سیستم گسسته-پیش آمد که در ناظر یکپارچه غیرفعال شده اند، غیر از گذر کنترل پذیری که محلی سازی ناظر نسبت به آن انجام می شود، حذف شده و مدل ساده تری ایجاد می گردد. پس از انجام هر یک از دو روش فوق، ناظر یکپارچه با استفاده از الگوریتم کاهش ناظر ساده می گردد. روش های معرفی شده نسبت به روش موجود انعطاف پذیرتر بوده و ممکن است منتهی به تعداد حالت های کمتری گردند. همچنین ثابت می شود که نتیجه دو روش معرفی شده یکسان است.

کلمات کلیدی: الگوریتم کاهش ناظر، سیستم های گسسته-پیش آمد، محلی سازی 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

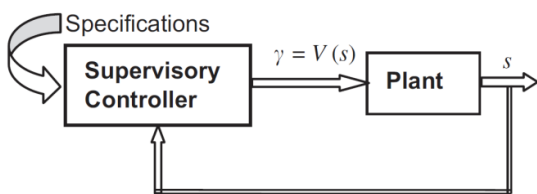
سیستم گسسته-پیش آمد (وقایع منفصل) یک سیستم گسسته حالت و پیش آمد تحریک^۵ است که تغییر و تحول در حالت های آن به طور کامل به وقوع پیش آمدهای گسسته غیرهمزمان در طول زمان بستگی دارد [۲۰]. پیش آمد، متغیری است که بیان گر تغییر از یک حالت گسسته به حالت گسسته دیگر است که در یک لحظه زمانی اتفاق می افتد. یک زبان^۶ 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 $L(G) = \{s \in \Sigma^* | \delta(q_0, s) \neq \emptyset\}$ 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-پذیری 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 مزایای 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^۹ 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 خود کار 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 $s' \leq s$ نشان پیشوند دنباله s نامیده می شود اگر $s = s's''$ باشد و با نماد $s' \leq s$ 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 $L \subseteq \Sigma^*$ ، $P(L) := \{P(s) | s \in L\}$ ، $L \subseteq \Sigma^*$ 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

^۹Non-conflicting

^۸Control Pattern

^۹Normality

^{۱۰}Paranormality

^{۱۱}Relative Observability

^{۱۲}Observability

^۱Closure

^۲Reachable

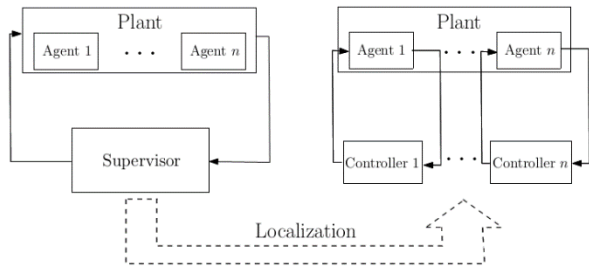
^۳Coreachable

^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 حالیست 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 پذیر (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 پذیر، 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 پذیر (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 اجتماعی 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 ایزومورفیک 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 ۱-۳ تعریف شده، سپس
 $D^k(x) = \{\sigma \in \Sigma_c^k \mid \neg \xi(x, \sigma)! \& (\exists s \in Pwr(\Sigma_c^k) \text{ به صورت } [\xi(x_0, \sigma) = x \& \delta(q_0, s\sigma)!])\}$
پیش آمدهای کنترل پذیر در Σ_c^k است که باید که 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 ۱-۳ 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.

برچم^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. برچم
 $T: X \rightarrow \{1, 0\}$ 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

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

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

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
 $J = \{X_i \subseteq X \mid i \in I\}$ در SUP ، یک ناظر القایی^۵ بصورت
 $(I, \Sigma, \kappa, i_0, I_m)$ 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 زیر مجموعه 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 $\{ \sigma \in \Sigma_c^k \mid \neg \xi_k(x, \sigma) \wedge (\exists s \in \Sigma^*) [\xi_k(x_0, s) = x \wedge \delta(q_0, s, \sigma)] \}$

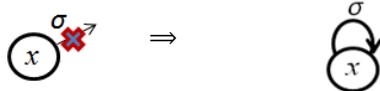
از این رو $\forall k \in I^k, E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$ خواهد بود. یعنی این که لازم است ناظر یکپارچه رابطه (۱۷) را تأمین نماید. هر چند که الگوریتم کاهش ناظر برای کاهش تعداد حالت های ناظر یکپارچه به کار می رود، با این حال می توان این الگوریتم را برای کاهش تعداد حالت های هر کنترل کننده محلی نیز به 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 $E(x) \cap E(x') \cap D^k(x) = \emptyset$ به صورت (۳) لذا رابطه (۳) به صورت $D^k(x') = \emptyset$ 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 $C^k = \{X_{ik}^k \subseteq X \mid i^k \in I^k\}$ باشد. C^k یک پوشش کنترلی روی X نسبت به Σ_c^k نامیده می شود اگر شرایط زیر برقرار باشد:

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

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

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.

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

حال می توان مجموعه ای 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 $L_m(J) := \bigcap \{L_m(J^k) \mid k \in \mathcal{K}\}$ 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

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

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.

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

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 $x, x' \in \mathcal{R}^k$ ، x' و x 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.

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

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

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

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

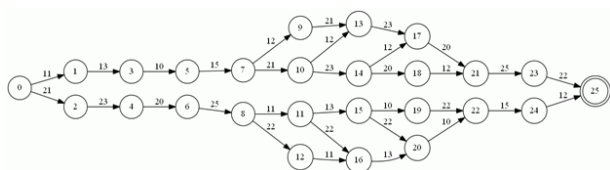
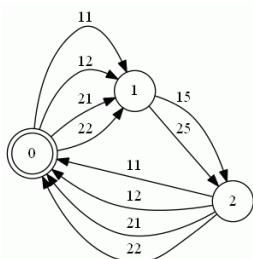
بر اساس رابطه (۱۰)، چنانچه $\sigma \in \Sigma_c^k$ باشد $\delta(q_0, s \sigma) = \delta(q_0, s \sigma)$ است. لذا می توان نوشت:

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

بدین ترتیب اثبات قضیه کامل می شود.

شکل ۶: مدل گسسته-پیش آمد سیستم G

به منظور جلوگیری از تصادم، لازم است کنترل چراغ های راهنمایی تضمین کند که خودروهای V_1, V_2 در هیچ بخشی از مسیر به صورت همزمان تردد نمی کنند. چنین منطق کنترلی را می توان با اجرای دستور $E = \text{mutex}(V_1, V_2, [(1,1), (2,2), (3,3), (4,4)])$ روی مدل سیستم گسسته-پیش آمد ایجاد نمود. برای طراحی ناظر نرمال از دستور $\text{SUP} = \text{supnorm}(G, E, [13,23])$ استفاده می گردد. چنین ناظری که در شکل ۷ نشان داده شده است، پیش آمدهای ۱۳ و ۲۳ را غیرفعال نمی کند. بنابراین مشاهده پیش آمدهای 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 می گردد که تعداد حالت ها شدیداً کاهش یافته به طوری که از ۲۶ حالت در ناظر یکپارچه به ۳ حالت در ناظر کاهش یافته رسیده است. دستور supreduce از اطلاعات جدول داده های کنترلی^۳ که با استفاده از دستور SA قابل مشاهده است، برای کاهش تعداد حالتها استفاده می کند. این جدول فهرست پیش آمدهای کنترل پذیری را که در برخی حالت ها غیرفعال شده اند، نشان می دهد (جدول ۱).

شکل ۷: ناظر نرمال مسیر تردد $\Sigma_{u0} = \{13,23\}$ 

شکل ۸: ناظر نرمال کاهش یافته برای مسیر تردد

جدول ۱: جدول داده های کنترلی ناظر نرمال مسیر تردد

حالت	پیش آمد غیرفعال شده	حالت	پیش آمد غیرفعال شده
۱	۲۱	۵	۲۱
۲	۱۱	۶	۱۱
۳	۲۵	۱۸	۲۱
۴	۱۵	۱۹	۱۱

کنترل کننده های محلی که با استفاده از الگوریتم localize ایجاد شده اند در شکل ۹ نمایش داده شده اند. الگوریتم localize هر یک از کنترل کننده های محلی را بر اساس کاهش حالت های ناظر یکپارچه نسبت به پیش آمدهای غیرفعال شده در آن

روش ارائه شده در این مقاله برای هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر یا هر افزایی از پیش آمدهای کنترل پذیر قابل انجام است. لذا در مقایسه با روش ارائه شده در [۱۴]، این روش برای محلی سازی ناظر انعطاف پذیرتر خواهد بود. به عبارت دیگر ممکن است کنترل کننده های محلی به دست آمده با روش جاری به تعداد حالت های کمتری منتهی شوند. به ویژه در شرایطی که سیستم گسسته-پیش آمد از یک جزء تشکیل شده باشد یا این که برخی از اجزای سیستم گسسته-پیش آمد دارای چند پیش آمد کنترل پذیر باشند. در مثال ۴-۱ ارائه شده برای کنترل نظارتی مسیر تردد، تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی بدست آمده نسبت به هر یک از پیش آمدهای کنترل پذیر، در مقایسه با تعداد حالت های کنترل کننده محلی به دست آمده با روش ارائه شده در [۱۴]، کمتر است.

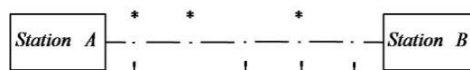
۴- مثال هایی از محلی سازی کنترل نظارتی

یکپارچه

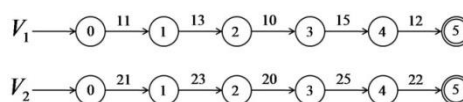
به منظور راستی آزمایی روش ارائه شده در این مقاله، محلی سازی کنترل نظارتی مسیر تردد^۱ و کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرج^۲ در ایستگاه تقویت فشار گاز مورد بررسی قرار می گیرد.

۴-۱- محلی سازی کنترل نظارتی مسیر تردد

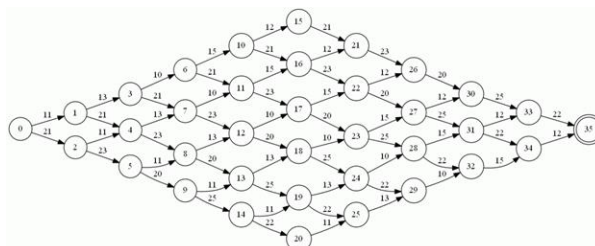
مسیر ترددی را با دو ایستگاه A و B مطابق شکل ۴ در نظر بگیرید. مسیری که ایستگاه های A و B را به هم متصل می کند شامل ۴ بخش که برخی از آنها دارای چراغ راهنمایی و یا تشخیص دهنده عبور هستند، تشکیل شده است [۱۷]. دو خودرو V_1, V_2 به طور همزمان از مسیر استفاده می کنند. $V_i, i = 1, 2$ ممکن است در حالت صفر (در ایستگاه A)، حالت ۱ (هنگام تردد از بخش های $j = 1, \dots, 4$) یا حالت ۵ (در ایستگاه B) قرار داشته باشند. مولد $V_i, i = 1, 2$ در شکل ۵ نشان داده شده است. پیش آمدهای فرد کنترل پذیر بوده و پیش آمدهای زوج کنترل ناپذیرند. مدل گسسته-پیش آمد مسیر تردد در اثر قرار گرفتن خودروها در هر یک از بخش های مسیر به صورت $G = \text{sync}(V_1, V_2)$ محاسبه شده و مولد آن مطابق شکل ۶ به دست می آید. توضیحات مربوط به دستور sync و سایر دستورات TCT که در این بخش استفاده شده، در پیوست مقاله ارائه شده است.



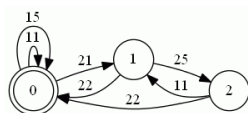
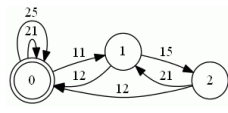
شکل ۴: شماتیک یک مسیر تردد



شکل ۵: مدل گسسته-پیش آمد هر خودرو

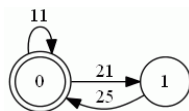
^۳Control Data^۱Guide way^۲Surge-Avoidance Supervisor

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.

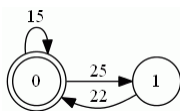
الف - کنترل کننده محلی V_1 ب - کنترل کننده محلی V_2

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

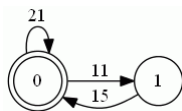
همچنین نتیجه محلی سازی با روش های ارائه شده در بخش ۳-۳ و ۳-۴ یکسان بوده و مطابق شکل ۱۰ خواهد بود. قضیه ۱ نیز در تأیید همین موضوع ارائه شده است.



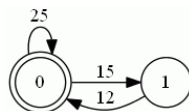
الف - پیش آمد ۱۱



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

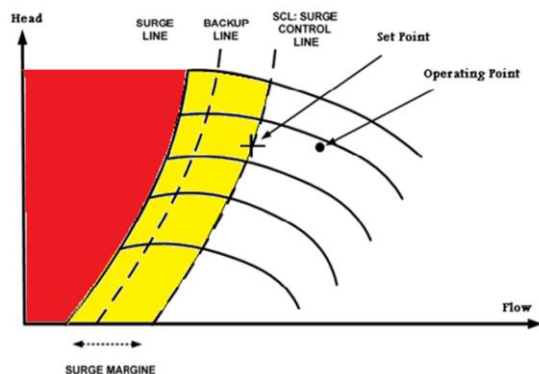
عامل کنترلی ایجاد می کند مثلاً برای ایجاد کنترل کننده محلی V_1 تنها پیش آمدهای ۱۱ و ۱۵ در جدول ۱ غیر فعال فرض می گردد. از آنجا که تعداد حالت های هر یک از کنترل کننده های محلی با تعداد حالت های ناظر کاهش یافته برابر است، ناظر نرمال طراحی شده طبق معیار تعریف شده در [۱۴] قابل محلی سازی نیست (تعداد حالت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

^۱Discharge

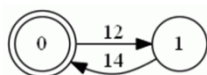
^۱Stable Operating Region

^۲Suction

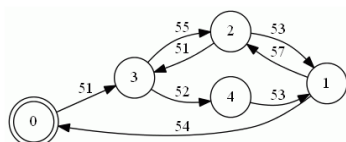
شیر کنارگذر اصلی ترین تجهیز برای جلوگیری از وقوع سرج در ایستگاه تقویت فشار گاز می باشد، به طوری که با تأمین حداقل دبی گاز در کمپرسور نقطه کار را در سمت راست خط SCL حفظ کند. یک مدل گسسته-پیش آمد برای شیر کنارگذر همراه با کنترل کننده PI در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در زمانی که نقطه کار در سمت راست SCL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

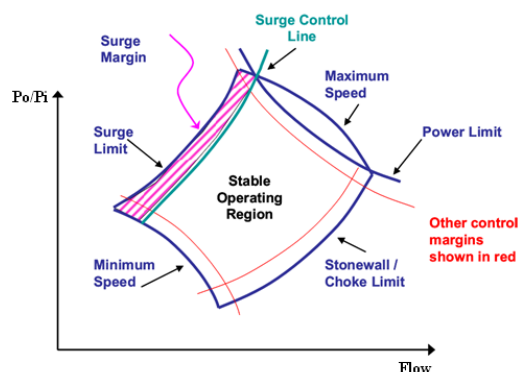


شکل ۱۵: مدل گسسته-پیش آمد از شیر کنارگذر همراه با کنترل کننده PI

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).

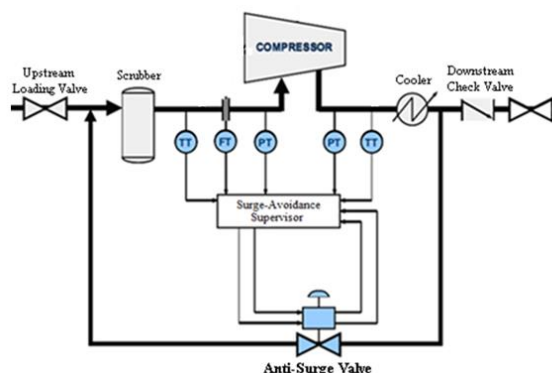
جدول ۲: جدول داده های کنترلی ناظر پیش گیری از وقوع سرج

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.



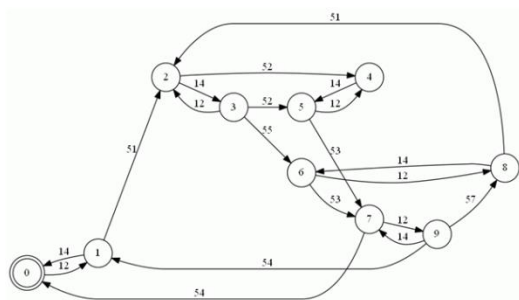
شکل ۱۲: شماتیک یک ایستگاه تقویت فشار گاز تحت کنترل نظارتی پیش گیری از وقوع سرج

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.

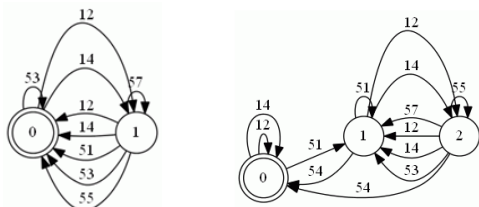
^۲Surge-Avoidance

^۱Anti-Surge Control

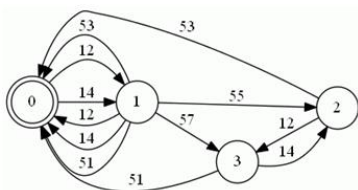
۲	۵۵	۷	۵۷
۴	۵۳	۸	۵۳



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



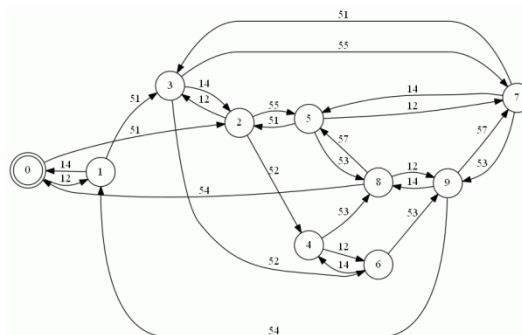
شکل ۲۱: کنترل کننده محلی متناظر با هر یک از پیش آمدهای ۵۷ و ۵۵

۵- نتیجه گیری

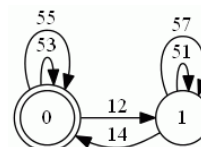
محلی سازی کنترل نظارتی یکپارچه روشی برای کاهش تعداد حالت‌ها نسبت به هر یک از عامل‌های کنترلی می‌باشد. روشی که در [۱۴] برای محلی سازی کنترل نظارتی ارائه شده است بر مبنای کاهش ناظر یکپارچه نسبت به هر یک از اجزاء سیستم گسسته-پیش آمد می‌باشد. چنانچه فرایند تحت نظارت تنها از یک جزء تشکیل شده باشد، محلی سازی 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 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- گذرهایی 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 گذرهایی 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.

طراحی بهینه و ساخت حس گر ریزسیالی شناسایی مواد و قرائت گر خازنی مبتنی بر چرخه حدی

میثم زمانی پدرام^{۱*}، منصور محتشمی فر^۲، احمد عفیفی^۳

^{۱*} استادیار دانشکده مهندسی برق، گروه مهندسی میکاترونیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، mzpedram@kntu.ac.ir

^۲ مربی مجتمع برق و کامپیوتر، گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، moh1965@mut.ac.ir

^۳ دانشیار مجتمع برق و کامپیوتر، گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، afifi@mut.ac.ir

^۴ محقق مجتمع برق و کامپیوتر، گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۲/۵ ویرایش اول: ۱۳۹۶/۷/۱۵ ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

چکیده: در این تحقیق، با استفاده از ساختارهای میکروفلوئید و فن زیست فناوری، سامانه تشخیص گر مواد مخدر طراحی و ساخته شده است. اندازه گیر خازنی با استفاده از شبیه سازی چندفیزیکی به صورت بهینه طراحی شده است و پس از استخراج اندازه های بهینه، با استفاده تکنولوژی میکروالکترونیک ساخته شده است. در این نوع حسگر، آپتامرهای معین بر روی سطوح خازن پوشش دهی می گردد و با عبور سیال از کانال تعبیه شده، ماده ی مذکور در میان رشته های آپتامر درگیر می شود و سبب تغییر اندازه خازن می گردد. در این پروژه الگوریتم قرائت خازنی نوین مبتنی بر استفاده از چرخه ی حدی سیستم غیرخطی بیان شده است. این متد نوین با ایجاد یک مدل غیرخطی مجازی در کنار ساختار خازنی و ایجاد چرخه حدی تلقینی، ظرفیت خازنی به صورت لحظه ای را اندازه گیری می کند.

کلمات کلیدی: حسگر تشخیص مواد، ریز سیال، قرائت گر نوین خازنی، چرخه حدی.

An Optimal Design and Fabrication of Microfluidic Material Detection Sensor and Limit Cycle Based Readout System

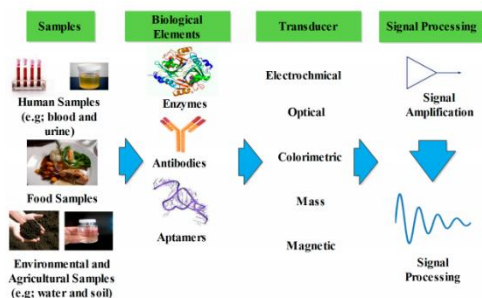
Maysam Zamani Pedram, Mansour Mohtashamifar, Ahmad Afifi

Abstract: In this Study, according to microfluidic structure and bio inspired techniques, a material detection sensor has been designed and fabricated based on micro fabrication method. The capacitive sensing has been designed numerically and optimized by a familiar multi physics software. In this type of sensor, a defined aptamer has been coated on the capacitor electrode surface and by flowing the fluid through the microchannel, the targeted material would be involved between the aptamer string structure and it makes a change in capacitor value. In this research, a novel readout system based on limit cycle has been introduced and implemented. In this method, a virtual nonlinear dynamic has been supposed beside the real system and makes the whole system behave in a limit cycle (LC). By measuring LC frequency and amplitude, capacitor value is estimated.

Keywords: Material Detection Sensor, Microfluidic, Novel Capacitor Readout, Limit Cycle

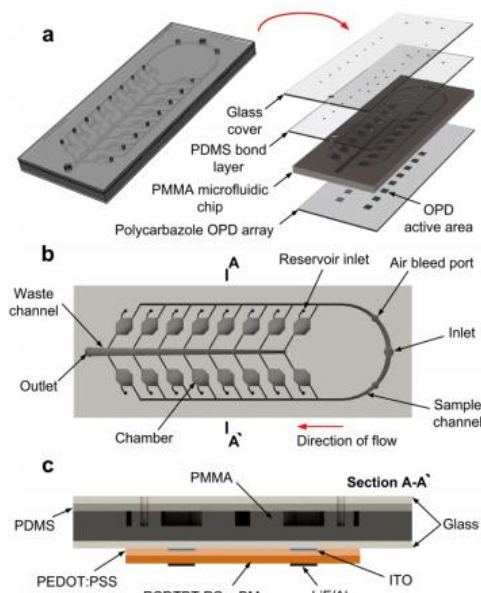
۱- مقدمه

استفاده از فلئورسنت از دیگر مواردی است که به صورت روش های ترکیبی ریزسیال و نوری عنوان می شود. در این روش فلئورسنت به مواد معین چسبیده می شود و حضور فلئورسنت به معنای وجود ماده مورد نظر است [۳۰].



شکل ۱: جدول روش های مختلف شناسایی بر پایه ریز سیال

در کنار کاربردهای تشخیصی این نوع حسگرها، می توان جهت مشخصه یابی پارامترهای فیزیکی نیز استفاده شوند. در [۳۱] نمونه ای از بیوسنسر جهت تشخیص باکتری بیان طراحی شده است. در این حسگر بر اساس ریزسیال و پردازش نوری، متناسب با غلظت مختلف، میزان ولتاژ (آمپر) تشخیص گر نوری در بازه های متنوع خروجی می دهد. از این حسگر در تشخیص نوع سلول در رنج وسیع و گسترده نیز قابل استفاده و طراحی است. شکل ۲ شماتیک ساختار میکروسازه را نشان می دهد و شکل ۳ نمودار خروجی جریان-زمان در غلظت های مختلف را نشان می دهد.



شکل ۲: تصویر شماتیک از حس گر ریزسیالی تشخیص گر باکتری و ویروس

اهمیت سامانه های میکروفلوئیدی از فرایندهای شیمیایی شروع گردید. در آن زمان، در ابتدا با نام اختصاری μ TAS^۱ به چنین ساختارهایی انتصاب شده بود [۲، ۱]. در آن برهه، تحقیقات بسیاری در این زمینه برای کاربردهای شیمیایی و بیوشیمیایی صورت گرفت. پس از گذشت چند سال و گسترش این حوزه، نام های ریزسیال^۲ و آزمایشگاه رو چیپ^۳ نیز در کنار نام اختصاری پیشین قرار گرفت. پژوهشگران این حوزه، ساختارهای میکروفلوئیدی خود را با کمک فناوری های ساخت سامانه های میکرو الکترومکانیک و به کمک مواد سازگار با ترجمان های^۴ بدن، میکرو کانال هایی در ابعاد میکرومتر ایجاد نموده و بر اساس تحلیل های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی به یکدیگر مرتبط می سازند [۳-۵]. ساختارهای میکروفلوئید کاربردهای بسیاری در علم پزشکی از جمله شناسایی انواع سلول ها بخصوص سلول های سرطانی، مشابه سازی ترجمان های داخلی بدن از جمله ریه، زبان، کلیه و غیره دارند [۶-۱۰]. به طور کلی در شناسایی مواد، با استفاده از ساختارهای ممز^۵ به روش های نوری، مقاومتی، ارتعاشی و طیف سنجی پژوهش های صورت گرفته است [۱۱-۲۰]. در این میان استفاده از آپتامرها در تشخیص و شناسایی مواد حوزه ی قابل توجهی را به خود اختصاص داده است. آپتامرها اولین بار در سال ۱۹۹۰ گزارش شدند. آپتامرها سکانس های الیگونوکلوئیدی خاصی هستند (۳۰ تا ۱۰۰ نوکلئوتید) که لیگاند های خاصی را تشخیص می دهند و با مولکول های هدف متنوعی از یون های کوچک گرفته تا پروتئین های بزرگ با میل و اختصاصات بالایی با ثابت های تجزیه عموماً از میکرومولار تا محدوده های پایین تر از پیکومولار که در مقایسه با آنتی بادی ها حتی بهتر است [۲۱]، پیوند برقرار می کنند. با توجه به اختصاصیت و تمایل بالای آپتامرها به اهدافشان به عنوان جایگزین مصنوعی برای آنتی بادی ها محسوب می شوند [۲۲].

اخیرا کارهای جدیدی بر روی حسگرهای ریزسیالی صورت گرفته است. این حسگرها بر مبنای ترکیب ساختار ریزسیال به همراه قرائت گر مقاومتی، نوری و جداسازی سانتریفیوژی انجام می گیرد. از آنجایی که اغلب حسگرها در کاربردهای بایو زیستی مورد استفاده قرار می گیرند لذا استفاده از یک ماده واسطه جهت مبدل و یا تفکیک مواد لازم است. شکل ۱ به صورت خلاصه، مراحل تفکیکی روش های مختلف شناسایی و متد قرائت را حسگرهای ریز سیالی نشان می دهد [۲۳]. در تکنیک های نوری متمرکز، با ایجاد یک حفره و عبور ریز سیال از مسیری که نور به صورت عمودی بر محور آن تابانده می شود، تغییر ویژگی های سیگنال نور دریافتی در خروجی بیانگر ابعاد اندازه و نوع ماده است [۲۴-۲۶]. می توان با استفاده از تکنولوژی نانو، پراکندگی نور را جهت اندازه گیری افزایش داد [۲۷-۲۹].

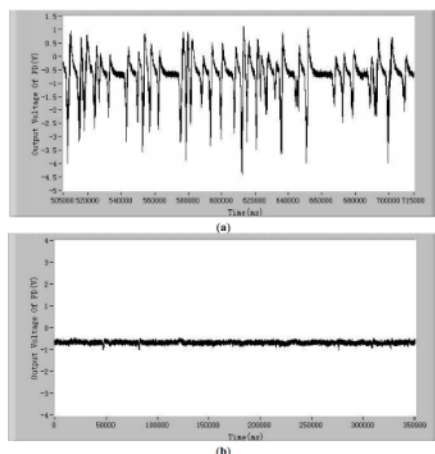
^۴ Organ

^۵ MEMS

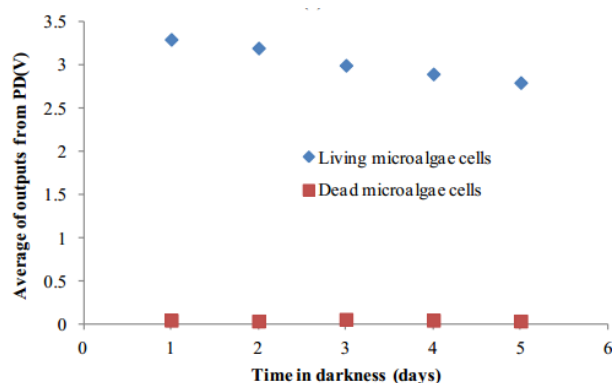
^۱ miniaturized total chemical analysis systems

^۲ Microfluidics

^۳ Lab on a chip

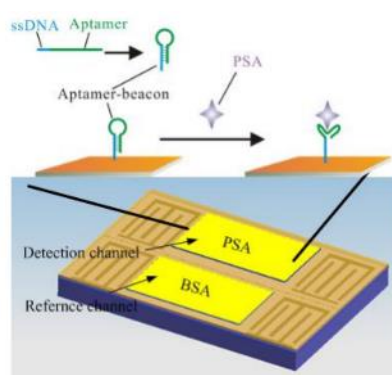


شکل ۵: نمودار خروجی تشخیص گر نوری بر اساس زمان و برای دو سلول زنده (الف) و مرده (ب)

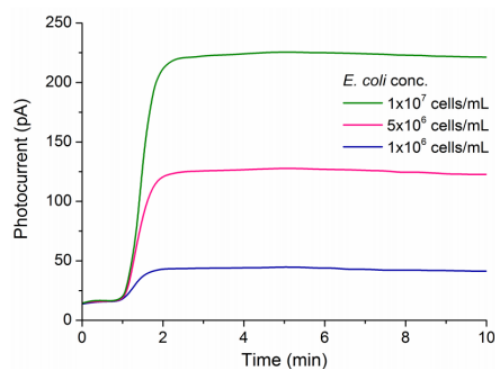


شکل ۶: نمودار میانگین خروجی سلول زنده و مرده بر اساس گذر زمان (روز)

در [۳۴] حسگر تشخیص آنتی ژن پروستات طراحی و ساخته شده است. این حسگر بر مبنای ساختار ریزسیالی و آپتامر، تشخیص شیمیایی آنتی ژن مربوطه را انجام می دهد (شکل ۷).

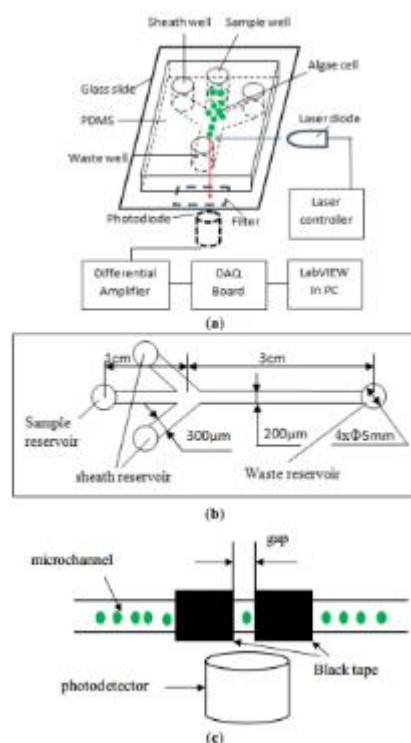


شکل ۷: میکرو ساختار حسگر تشخیص آنتی ژن پروستات
در [۳۵] یک حسگر آپتامری و ریزسیالی بر مبنای تغییر امپدانس خروجی جهت تشخیص ویروس آنفلوآنزا معرفی شده است.



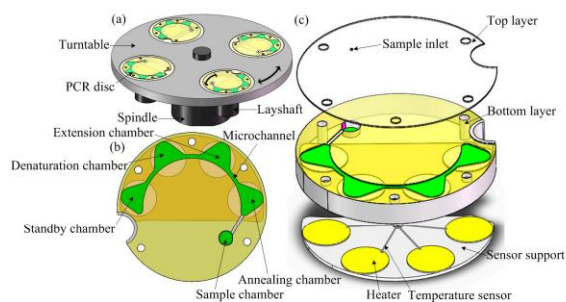
شکل ۸: نمودار تشخیص سلول در غلظت های مختلف ویروس مشخص بر اساس جریان خروجی فتودینکتور

در [۳۲] حسگر تشخیص سلول زنده ی جلبک ساخته شده است. در این سلول بر اساس ساختار ریزسیالی و میزان پراکندگی نور در اثر جذب نور سلول زنده و مرده ی جلبک، تشخیص داده می شود. در شکل ۴، شماتیک ساختاری نحوه ی تشخیص سلول نشان داده شده است. در [۳۳] نیز با استفاده از روشی مشابه، تشخیص گر سلول سرطانی طراحی و ساخته شده است.

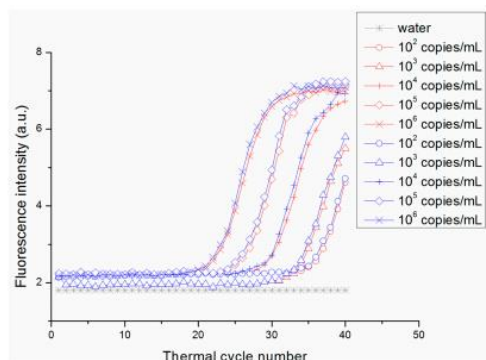


شکل ۹: ساختار کلی تشخیص سلول زنده و مرده

در شکل ۵ نمودار ولتاژ خروجی تشخیص گر نوری بر اساس عبور سلول زنده و مرده نشان داده شده است. همچنین به طور کلی شکل ۶ نیز بیان گر میانگین ولتاژ سلول زنده و مرده است.

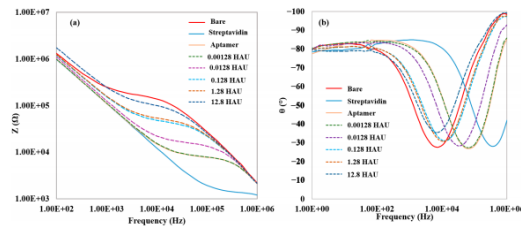


شکل ۱۱: ساختار دیسکی میکروسازه به همراه ورود و خروج سیال



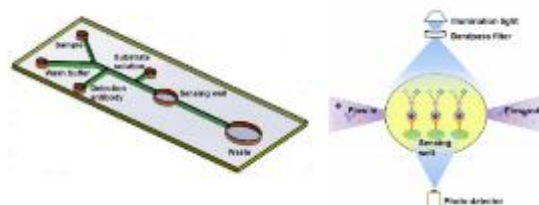
شکل ۱۲: نمودار خروجی بر حسب شدت فلوروسنت در میزان غلظت های اولیه متفاوت

در این پروژه با بکارگیری آپتامر و ترکیب آن با ساختار ریزسیالی، در جهت تشخیص مواد مخدر شیشه و کوکائین سعی می شود. تحلیل و آنالیز ساختار ریزسیالی و ترکیب آن با زیست فناوری، این امکان را در آینده فراهم می سازد تا به کمک فرایند میکرو ماشین کاری به همراه فن های ساخت ریزسیالی، محصول باهدف شناسایی مواد ساخته شود که کاربردهای بسیار در سطوح مختلف دارد. بعلاوه ساختار ریزسیالی این امکان را فراهم می نماید تا به راحتی بتوان یک ماده ی مشخص در یک سیال بررسی گردد و وجود یا عدم وجود آن به صورت یک سیگنال معین تعیین شود. در این آزمایش دو ماده کوکائین و شیشه مورد بررسی قرار گرفته اند. الگوریتم مورد استفاده در این سامانه شامل حوزه های مهندسی برق، مکانیک به همراه زیست فناوری است. در حقیقت، با استفاده از ریز سیال و آپتامرهای پوشیده شده بر سطح الکترودهای طراحی شده، ظرفیت خازنی تغییر کرده و با تغییر ظرفیت خازن، میزان غلظت ماده مورد نظر استخراج می شود. نوآوری این مقاله، در کنار طراحی بهینه ساختار ریز سیالی و محاسبه ی ظرفیت خازنی به صورت معادلات ریاضی، قرائت ظرفیت خازن با استفاده از دانش پایه مهندسی کنترل است. در این روش به صورت الکترونیکی مدار معادل خازنی را در داخل یک حلقه ی بسته با فیدبک منفی و کنترل کننده غیرخطی قرار داده و به صورت تلقینی ساختار حلقه بسته در یک چرخه ی حدی گرفتار می گردد. با عنایت به تسلط به معادلات چرخه حدی و اندازه گیری فرکانس نوسان و دامنه نوسان، پارامترهای داخلی سیستم که در این مسئله خازن و مقاومت معادل است بدست می آیند.

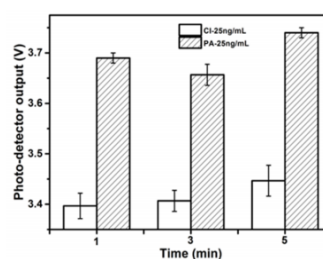


شکل ۱۳: نمودار خروجی بر اساس امپدانس و فرکانس

در [۳۶] یک حسگر ریزسیالی جهت شناسایی آلرژی غذایی طراحی شده است. روش شناسایی آلرژی مبتنی بر آزمون ایمونوسوربت است که آنزیم آن در آزمایشگاه مربوطه ساخته شده است. نحوه ی شناسایی آن بدین صورت است که سیال (حاوی مایع و مواد غذایی) از یک سمت وارد حسگر شده و در یک محل ترکیبات با آنزیم مربوطه انجام می گیرد و از سوی دیگر خارج می شود. در محل ترکیبات آنزیم مربوطه با مولکول های مورد نظر وارد ترکیب شده و ساختار متفاوتی را روی بستر میکروسازه ایجاد می کنند. اعمال سیگنال نوری به محل تجمعات و دریافت سیگنال فرکانسی و تشخیص فرکانسی منتج به حضور ماده ی مورد نظر را فراهم می سازد. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب ساختار ریزسیالی-نوری تشخیص گر و خروجی حسگر را نشان می دهند.



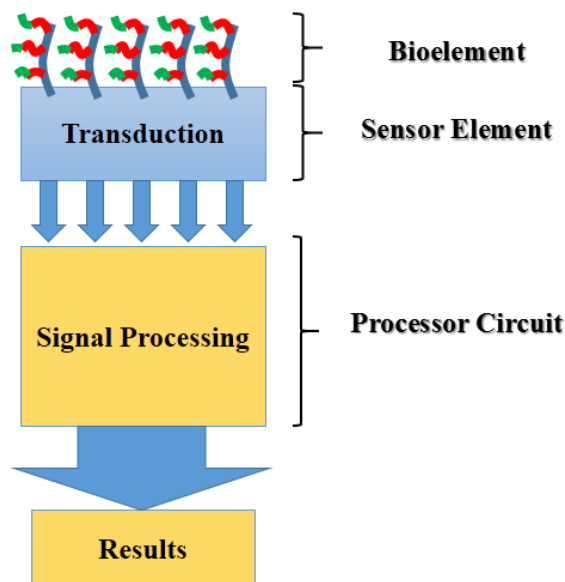
شکل ۹: ساختار ریزسیالی تشخیص گر به همراه روش شناسایی نوری ماده



شکل ۱۰: خروجی ولتاژ دیتکتور نوری در حضور مواد مورد نظر

در [۳۷] بر مبنای ریزسیال و ساختار دورانی هپاتیت نوع ب توسط فلوروسنت شناسایی و تشخیص داده می شود. سرعت تشخیص آن نسبت به نمونه ی تجاری آن سریع تر است و در ظرف مدت ۳۰ دقیقه فرآیند شناسایی به اتمام می رسد. نمونه ی تجاری این سامانه، به طریقی مشابه در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه فرآیند تشخیص را نهایی می کند. شکل ۱۱ ساختار دیسکی میکروسازه، به همراه مکان ورود و خروج سیال را نشان می دهد. شکل ۱۲ نیز نمودار شدت خروجی فلوروسنت بر حسب میزان غلظت اولیه ویروس مورد نظر را نشان می دهد.

ج) پردازشگر الکترونیک: پردازشگر الکترونیک یا سیگنال که به طور کلی مسئول نشان دادن نتایج هستند.

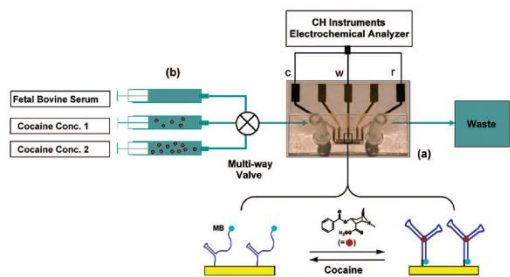


شکل ۱۳: نمای کلی یک بیوسنسر

هیبریداسیون دئوکسی ریبونوکلئیک اسیدها و یا ریبونوکلئیک اسیدها به عنوان یکی از پرکاربردترین پذیرنده های زیستی در فناوری بیوسنسرها و بیوچپها مورد استفاده واقع شده اند، شکل اساسی بیوسنسرها مبتنی بر DNA اغلب اشاره به حس گرهای ژنی دارد.

۳- طراحی و ساخت حسگر

به طور کلی در این حسگر قصد بر شناسایی مواد و تشخیص وجود و یا عدم وجود از یک ماده مورد نظر در یک سیال است. با توجه به شکل ۱۴ پرواضح است که در این ساختار میکروکانالی، سیال وارد می شود و از طرف دیگر خارج می شود. با وجود آپتامرها بر روی سطح الکترودها تنها ماده مورد نظر بر روی سطح الکترودها می ماند و در نتیجه ظرفیت خازن به علت تغییر دی الکتریک بین دو صفحه خازن زیاد می شود. میزان افزایش ظرفیت خازن در حقیقت ارتباط با میزان غلظت ماده مورد نظر در سیال مربوطه را دارد.



شکل ۱۴: ساختار حسگر بر مبنای آپتامر جهت تشخیص ماده مخدر کوکائین

در ادامه و در بخش دوم، حسگرهای مبتنی بر آپتامر توضیح داده می شود. در این بخش مواد موردسنجش نیز از جمله شیشه و کوکائین به اختصار توضیح داده می شود. در بخش سوم طراحی و ساخت یک حسگر مبتنی بر ساختار خازنی و ریزسیال توضیح داده شده است. در این بخش به علاوه روش ساخت میکرو ساختار نیز به صورت خلاصه توضیح داده شده است. در بخش چهارم الگوریتم نوین قرائت خازنی شرح داده شده است و در بخش پنجم نیز نتایج آزمایش بیان شده است.

۲- حسگرهای مبتنی بر آپتامر

بشر آنالیزهای زیستی را از گذشته تاکنون با استفاده از سلولهای عصبی، چشایی، لامسه و غیره تشخیص داده اند. از آنجایی که موجودات زنده یکی از کارآمدترین ماشینها هستند، دانشمندان برای ایجاد نسخه هایی مشابه خصوصاً در موارد تشخیص از آنها الگوبرداری می کنند. لذا آنها با به کارگیری عناصر پذیرنده زیستی وسایل جدید آنالیز شیمیایی را که اغلب دارای قدرت انتخاب بالایی برای سامانه های تشخیص بیولوژیک هستند، توسعه داده اند. این عناصر در ترکیب با روشهای مختلف انتقال، به توسعه و گسترش سریع زمینه های آنالیز زیستی کمک کرده و فناوری های مرتبط به عنوان بیوسنسرها و بیوچپها شناخته می شوند. به بیوسنسرها مبتنی بر آپتامر، آپتاسنسور گفته می شود. تشخیص هدف، توسط آپتامرها می تواند به وسیله روش های مختلفی ارزیابی شود که از جمله عناصر تبدیل کننده سیگنال می توان به الکترودهای الکتروشیمی، اجزای گرمایی، نیمه رساناها، ترکیبات نوری (مانند فیبر نوری و پلاسمای سطح) قطعات پیزو الکتریک و... اشاره نمود. آپتاسنسورها با روش های متنوعی از جمله بیوسنسرها الکتروشیمیایی، بیوسنسرها نوری و بیوسنسرها حساس به جرم ساخته می شوند.

بیوسنسرها وسایل تحلیل کننده ای هستند که از ترکیب و به هم آمیختن اجزای بیولوژیک و مبدل های فیزیکی و شیمیایی تشکیل می شوند یک بیوسنسر می تواند به صورت یک ابزار محاسباتی فشرده و یا یک واحد پیوسته بیولوژیک یا یک عنصر حسگر زیستی مرتبط با مبدل تعریف شود. به طور اختصاصی یک بیوسنسر از سه جز تشکیل شده است (شکل ۱۳):

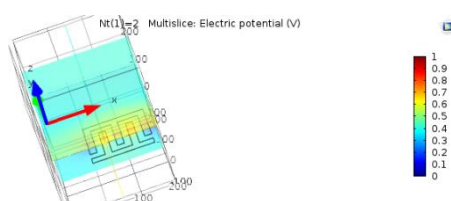
الف) عنصر بیولوژیک حساس: عنصر بیولوژیک حساس (مواد بیولوژیک مانند بافت ها و...) که می تواند توسط مهندس بیولوژیک ایجاد شوند. در حقیقت اساس شناسایی و سنجش ترکیبات در این دستگاه ها اتصال ویژه آنالیت مورد اندازه گیری به حس گر، توسط عناصر بیولوژیک حساس است که عامل اصلی گزینش در بیوسنسرها محسوب می شوند که عمدتاً در چند گروه تقسیم بندی می شوند: آنتی بادی ها، آنزیم ها، اسید نوکلئیک، ساختارهای سلولی، سلول ها و...

ب) عنصر مبدل یا آشکارساز: عنصر مبدل یا آشکارساز که سیگنال ایجاد شده از برهمکنش آنالیت با عنصر بیولوژیک را به سیگنال دیگری که قابل اندازه گیری است تبدیل می کند.

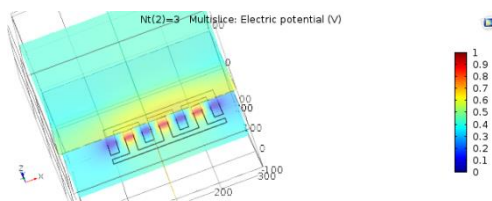
خازنی ایجاد شده حائز اهمیت هستند. یافتن این پارامترهای فیزیکی، نیازمند حل عددی همزمان فیزیک‌های مکانیک، سیالات، الکترو استاتیک است. لذا علت استفاده از نرم افزار کامسول نیز دقیقاً به جهت قابلیت پیاده سازی چند محیط فیزیکی همزمان بر بستر مدل میکرو سازه است. همچنین با پیاده سازی حسگر به صورت پارامتری و استفاده نموده قابلیت انحراف دادن به پارامترها به صورت جداگانه، تاثیر عوامل و پارامترهای مختلف طراحی بر روی خازن خروجی بررسی شده است. و در نهایت نیز با استفاده از بشینه سازی حساسیت خازن به پارامترهای طراحی، مقادیر میکرو سازه جهت ساخت به روش میکرو ماشین کاری استخراج می شود.

ب. تاثیر پارامتر تعداد شانه ها

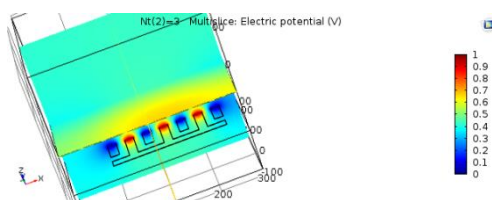
در این قسمت تاثیر تعداد شانه ها بر روی ظرفیت خروجی بررسی می شود. در این شبیه سازی، تعداد شانه های خازن، از ۲ به بالا افزایش می یابد و نمودار تغییرات خازن بر حسب افزایش شانه ها بیان می شود. شکل ۱۷ الی شکل ۲۵ توزیع پتانسیل الکتریکی فیما بین شانه های خازنی را نمایش می دهند. در این اشکال تعداد شانه ها از ۲ الی ۶ تغییر نموده است و توزیع پتانسیل الکتریکی را به صورت سه بعدی به تصویر می کشانند. نماهای مختلفی برای توزیع پتانسیل الکتریکی جهت وضوح بالاتر بیان شده است. از آنجایی که طرح به صورت الکتروهای شانه ای است، حداکثر پتانسیل الکتریکی در فضای بین الکتروها اتفاق می افتد و رنگ اشکال با افزایش تعداد شانه ها در فضای بین شانه ها نمایش داده می شود.



شکل ۱۷: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۲ شانه



شکل ۱۸: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۳ شانه-نمای ۱

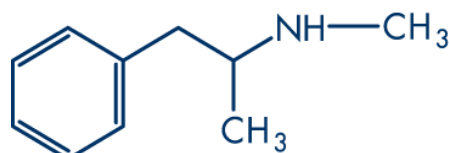


شکل ۱۹: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۳ شانه-نمای ۲

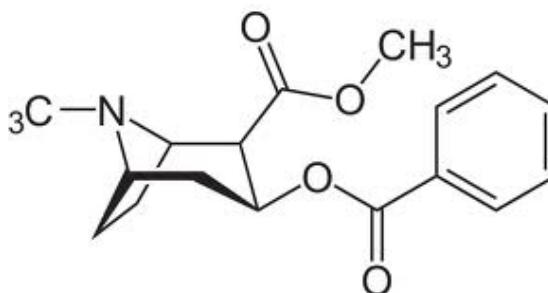
ساختار در نظر گرفته شده در این حس گر به صورت یک میکروفلوئید تک کاناله است که تنها جهت تشخیص وجود یک ماده ی خاص در سیال مورد استفاده قرار می گیرد. این ساختار می تواند به عنوان شناساگر مواد مختلف از جمله مواد مخدر و یا شناساگر سلول های مورد نظر در خون مانند سلول سرطانی استفاده شود. در این حس گر سنجش مواد مت آمفتامین و کوکائین مدنظر قرار گرفته شده است.

۳-۱ مواد مورد سنجش

در این پژوهش دو ماده مت آمفتامین و کوکائین مورد بررسی قرار گرفته اند. مت آمفتامین و آمفتامین از نظر ساختاری به گروهی از داروها به نام آمین های sympathomimetic (SMAs) متعلق است که محرک قوی سیستم عصبی مرکزی است (شکل ۱۵). کوکائین از گیاه کوکا به دست می آید. کوکا آلکالوئید اصلی برگ کوکا است که از برگ های بوته ای به نام (Ergthroxglom Coca) به دست می آید و مرکز اصلی رویش آن کشورهای امریکای جنوبی است. مصرف این مواد می تواند باعث افزایش هوشیاری، سرخوشی و کاهش اشتها شوند. لذا در بسیار از نقاط دنیا مورد مصرف قرار می گیرند. کوکائین به شکل نمک هیدرو کلراید قابل حل در آب $C_{17}H_{21}NO_4 \cdot HCl$ با وزن مولکولی 339.81 g/mol به طریق خوراکی، استنشاقی و تزریقی مورد سوء مصرف قرار می گیرد. (شکل ۱۶).



شکل ۱۵: فرمول ساختاری مت آمفتامین

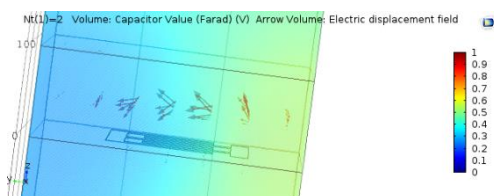


شکل ۱۶: فرمول ساختاری کوکائین

۳-۲ شبیه سازی بهینه و ساخت عنصر مبدل

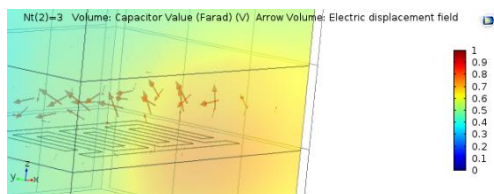
ا. شبیه سازی بهینه حسگر

شبیه سازی ساختار ممز، در اصل بررسی رفتار تمامی فیزیک های حاکم بر کل سیستم است. در این شبیه سازی ساختاری مشابه با آنچه در واقعیت رخ می دهد در نرم افزار کامسول پیاده سازی می گردد و در ادامه با تعریف فیزیک های مختلف و متناسب با ساختار و تعریف شرایط مرزی مسئله اقدام به شبیه سازی آن می شود. در شبیه سازی انجام گرفته چند پارامتر فیزیکی از جمله فشار سیال در میکرو کانال، سرعت سیال به همراه تغییرات



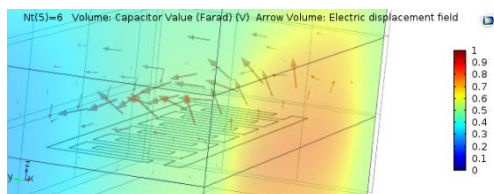
شکل ۲۶: تصویر مربوط میدان الکتریکی توزیع شده در فضای بین شانه های برای

تعداد ۲ شانه-نمای ۱



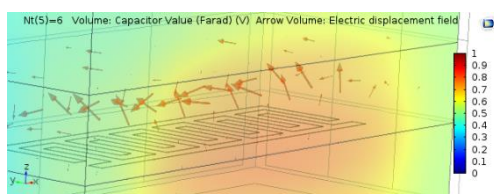
شکل ۲۷: تصویر مربوط میدان الکتریکی توزیع شده در فضای بین شانه های برای

تعداد ۲ شانه-نمای ۲



شکل ۲۸: تصویر مربوط میدان الکتریکی توزیع شده در فضای بین شانه های برای

تعداد ۶ شانه-نمای ۱



شکل ۲۹: تصویر مربوط میدان الکتریکی توزیع شده در فضای بین شانه های برای

تعداد ۶ شانه-نمای ۲

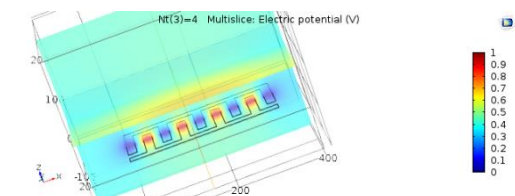
شکل ۳۰: نتایج تمامی شبیه سازی ها برای تمامی حالت ها را در نرم افزار نمایش می دهد. در این گزارش میزان زمان اجرا برای هر حالت در حدود ۴۷ دقیقه عنوان شده است.

Complete mesh consists of 746345 domain elements, 81281 boundary elements, and 2740 edge elements.
Formed union of 4 solid objects.
Finalized geometry has 5 domains, 52 boundaries, 124 edges, and 80 vertices.
Number of degrees of freedom solved for: 1750001.
Number of degrees of freedom solved for: 2473157.
Number of degrees of freedom solved for: 3193173.
Number of degrees of freedom solved for: 3914702.
Number of degrees of freedom solved for: 4635132.
Solution time (Study 1): 2809 s. (46 minutes, 49 seconds)
Saved file: Cap.mph
Saved file: Cap.mph

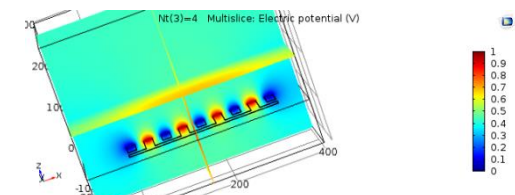
شکل ۳۰: تصویر مربوط به زمان سوئیف دادن و حل کل معادلات بر اساس تعداد

حوزه ها، لبه ها و دیواره ها

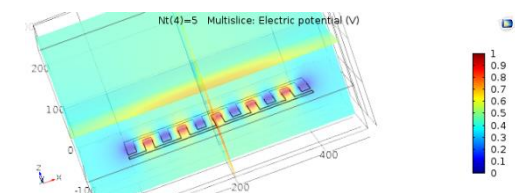
شکل ۳۱: نمودار تغییرات خازن بر حسب تعداد شانه ها را نشان می دهد. بر اساس این آزمون، تعداد شانه ها رابطه ای کاملاً خطی با تغییرات خازن دارد و این موضوع روابط ریاضی عنوان شده در فصل مربوط به محاسبات خازنی را صحت گذاری می نماید. لذا حساسیت خازن نسبت به تعداد شانه ها همواره عددی ثابت است.



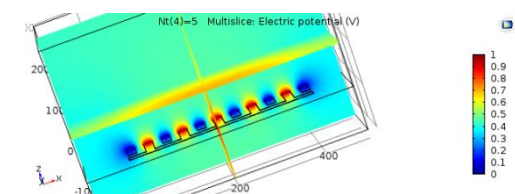
شکل ۳۰: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۴ شانه-نمای ۱



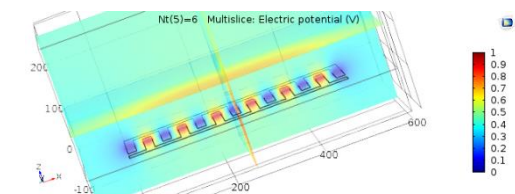
شکل ۳۱: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۴ شانه-نمای ۲



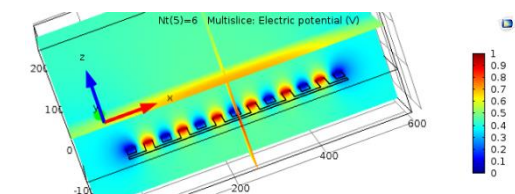
شکل ۳۲: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۵ شانه-نمای ۱



شکل ۳۳: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۵ شانه-نمای ۲

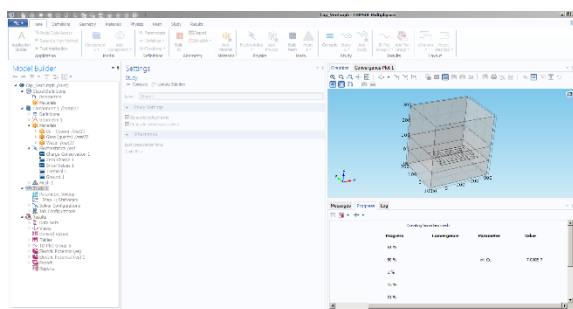


شکل ۳۴: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۶ شانه-نمای ۱



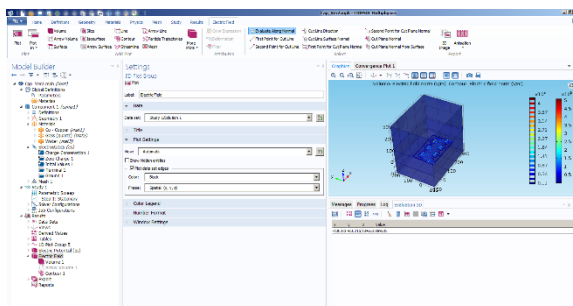
شکل ۳۵: تصویر مربوط توزیع پتانسیل الکتریکی برای تعداد ۶ شانه-نمای ۲

در کنار پتانسیل الکتریکی، توزیع میدان الکتریکی و بردار میدان الکتریکی نیز حائز اهمیت است. در واقع اندازه ی خازن ناشی از میزان شدت بردار میدان الکتریکی فیما بین الکترودها خواهد بود. در شکل ۲۶ الی شکل ۲۹، توزیع میدان الکتریکی در نماهای مختلف برای تعداد شانه های مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۳۵: تصویر مربوط به شروع شبیه سازی برای حالتی که تغییرات پارامترهای

شکلی الکترونها

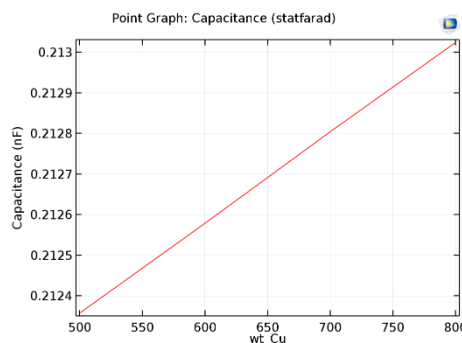


شکل ۳۶: تصویر مربوط به اتمام شبیه سازی و خروجی میدان و پتانسیل الکتریکی

توزیع شده

شکل ۳۷: نمودار تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ارتفاع الکتروند

لایه نشانی شده را نمایش می دهد. با عنایت به این شکل، هرچه ارتفاع لایه افزایش داده شود، ظرفیت خازنی نیز افزایش می یابد.



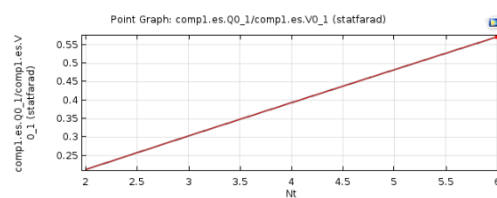
شکل ۳۷: نمودار تغییرات مقدار خازنی بر حسب تغییرات ابعادی الکتروند (با

فرض یک شکل بودن تمامی شانه ها) (واحد محور افقی= میکرومتر، واحد محور

عمودی= پیکو فاراد)

شکل ۳۸: نمودار تغییرات خازن شانه ای بر حسب تغییرات عرض

الکترونها را نشان می دهد. با توجه به این شکل هرچه عرض الکترونها بیشتر باشد، میدان الکتریکی قوی تر شده و لذا ظرفیت خازن افزایش می یابد.

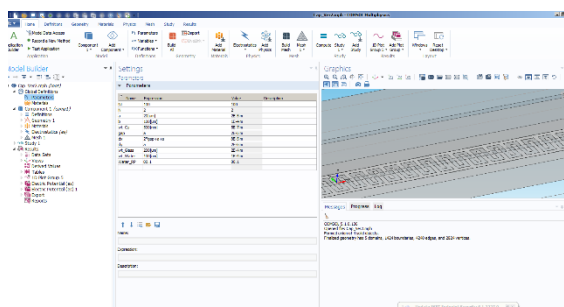


شکل ۳۹: نمودار مربوط به تغییرات میزان خازن شانه ای بر حسب تغییرات تعداد

شانه ها

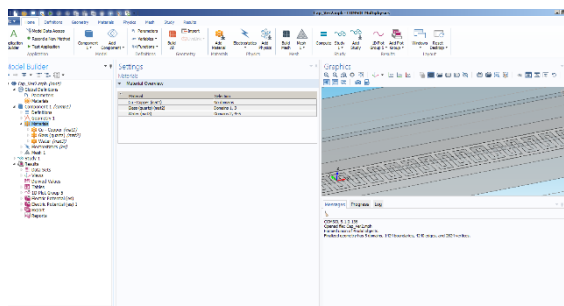
ت. تاثیر پارامتر عرض/طول شانه ها

در این فصل، پارامترهای طولی و عرضی الکترونها مورد توجه قرار می گیرند. با توجه به پیکره بندی به صورت متغیر پایه، قابلیت تغییرات و ایجاد انحراف بر روی مقادیر مختلف خازنی به ازای تغییرات پارامترها وجود دارد. لذا در این بخش با تغییرات بر روی متغیرها، میزان تغییرات خازنی مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۳۲ الی شکل ۳۶ مراحل اجرا و پیکره بندی را نمایش می دهند.

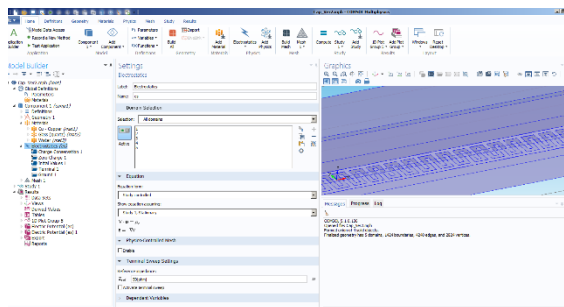


شکل ۳۲: تصویر پیکره بندی جهت ایجاد تغییر در پارامترهای ساختاری

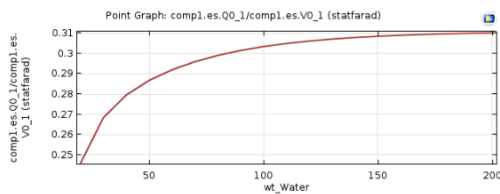
الکترونها



شکل ۳۳: تصویر مربوط به انتخاب الکترونها (مربوط به ماده مورد نظر)

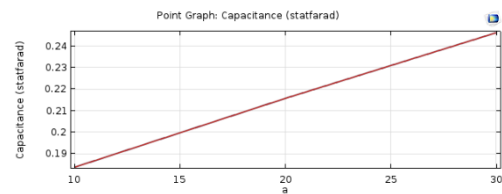


شکل ۳۴: تصویر مربوط به انتخاب فیزیک مورد نظر جهت انجام شبیه سازی



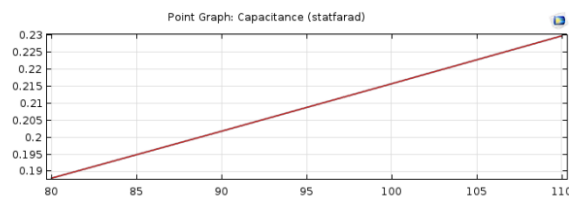
Number of degrees of freedom solved for: 2472899.
 Number of degrees of freedom solved for: 2472356.
 Solution time (Study 1): 6670 s. (1 hour, 51 minutes, 10 seconds)

شکل ۴۱: نمودار تغییرات خازنی بر حسب تغییرات ارتفاع کانال به همراه زمان شبیه سازی برای هر مرحله (واحد محور افقی=میکرومتر، واحد محور عمودی=پیکو فاراد)



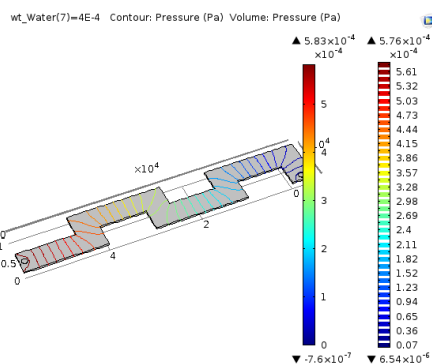
شکل ۳۸: نمودار تغییرات خازنی بر حسب تغییرات عرض الکترودها (واحد محور افقی=میکرومتر، واحد محور عمودی=پیکو فاراد)

شکل ۳۹: نمودار تغییرات خازن شانه ای بر حسب تغییرات عرض الکترودها را نشان می دهد. با توجه به این شکل هر چه طول الکترودها بیشتر باشد، میدان الکتریکی قوی تر شده و لذا ظرفیت خازن افزایش می یابد.



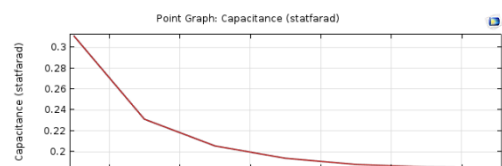
شکل ۳۹: نمودار تغییرات خازنی بر حسب تغییرات طول الکترودها (واحد محور افقی=میکرومتر، واحد محور عمودی=پیکو فاراد)

ج. تاثیر پارامتر ارتفاع کانال با سرعت و فشار وارده در این بخش، تاثیر پارامترهای کانال بر روی فشار و سرعت توزیع شده در طول کانال استخراج می شود. لذا بر اساس فایل پیشین سه نوع متغیر ارتفاع کانال، سرعت ورودی و پهنای کانال مورد توجه قرار می گیرد. با تغییر این پارامترها، میزان تاثیرات سرعت توزیعی سیال در طول کانال و میزان فشار بیشینه بر روی جداره های کانال استخراج می شود. شکل ۴۲ و شکل ۴۳ تصاویر توزیع فشار و سرعت سیال در طول کانال را برای ارتفاع کانال ۴۰۰ میکرون نمایش می دهند.

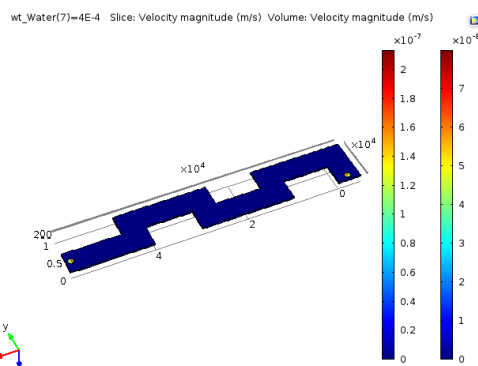


شکل ۴۲: تصویر کنتور و توزیع سه بعدی فشار به ازای ارتفاع کانال ۴۰۰ میکرون

شکل ۴۰ بیان گر نمودار تغییرات مقدار خازنی بر حسب تغییرات فاصله بین الکترودها است. هر چه فاصله بین الکترودها افزایش یابد ظرفیت خازنی کاهش می یابد لذا تا جایی که می توان بایستی فاصله بین الکترودها کاهش یابد.



شکل ۴۰: نمودار تغییرات خازنی بر حسب تغییرات فاصله بین صفحات (واحد محور افقی=میکرومتر، واحد محور عمودی=پیکو فاراد)

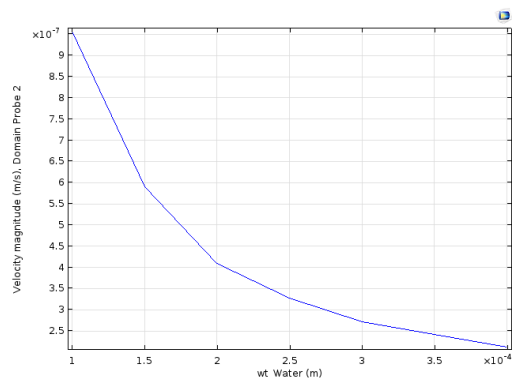


شکل ۴۳: تصویر کنتور و توزیع سه بعدی سرعت سیال به ازای ارتفاع کانال ۴۰۰ میکرون

ث. تاثیر پارامتر ارتفاع کانال

در این بخش نیز همانند بخش های پیشین، با تغییر ارتفاع کانال، تغییرات خازن بررسی شده است. مطابق با شکل ۴۱، میزان خازن خروجی بر حسب تغییرات ارتفاع کانال بیان شده است. با توجه به این شکل، هر چه ارتفاع کانال بیشتر شود ظرفیت خازن قابل اندازه گیری بیشتر می شود تا جایی که ظرفیت خازن به اشباع می رود. علت این امر در این است با توجه به ابعاد و اندازه ها و میزان ولتاژ تحریک سازی تا حد ۲۰۰ میکرون ارتفاع، تمامی خطوط میدان از داخل سیال عبور کرده به الکترودها سمت دیگر می رسد لذا تغییر محیط و تضعیف سیگنال میدان الکتریکی ناشی از تغییرات ماده در این حالت صورت نمی گیرد. لذا با توجه به این امر ارتفاع کانال مورد نیاز بایستی تقریباً از ۱۵۰ میکرون به بالا باشد تا تمامی خطوط میدان از سیال عبور نمایند.

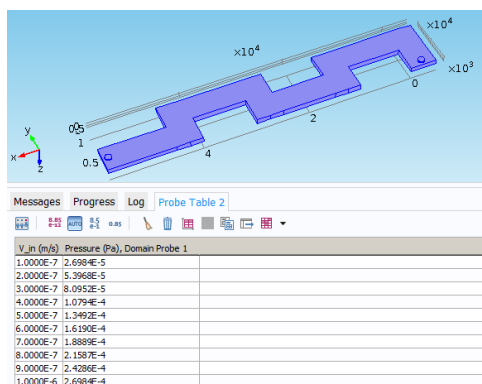
شکل ۴۴ و شکل ۴۵ به ترتیب جدول تغییرات فشار بیشینه بر حسب تغییرات ارتفاع کانال و نمودار تغییرات فشار بیشینه در طول کانال بر حسب



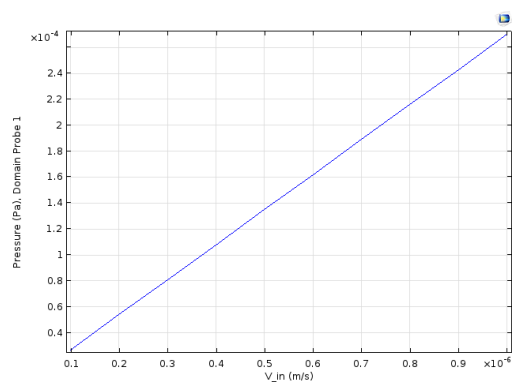
شکل ۴۷: نمودار سرعت بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات ارتفاع کانال های

ح. تاثیر پارامتر سرعت ورودی سیال بر فشار و توزیع سرعت سیال در کانال

در این بخش نیز تغییرات سرعت ورودی سیال را مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۴۸ الی شکل ۵۱ گویای این واقعیت هستند. با توجه به این اشکال، با افزایش سرعت ورودی سیال، میزان بیشینه سرعت توزیعی در طول سیال و همچنین فشار توزیعی بیشینه افزایش می یابد.

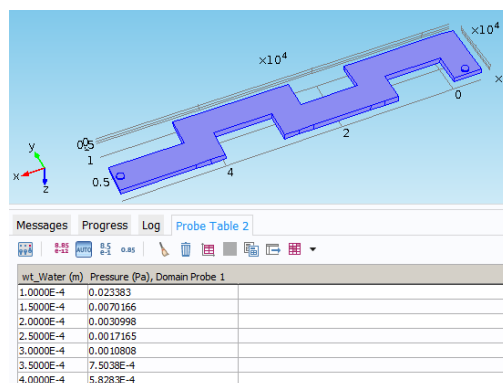


شکل ۴۸: تصویر جدول فشار بیشینه به ازای سرعت مختلف ورودی کانال

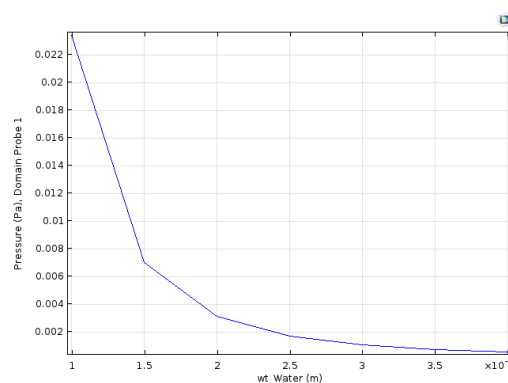


شکل ۴۹: نمودار فشار بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات سرعت ورودی کانال

ارتفاع مانال را نمایش می دهند. مطابق با این دیاگرام ها هرچه ارتفاع کانال افزایش یابد، فشار وارده بر دیوار کاهش می یابد.

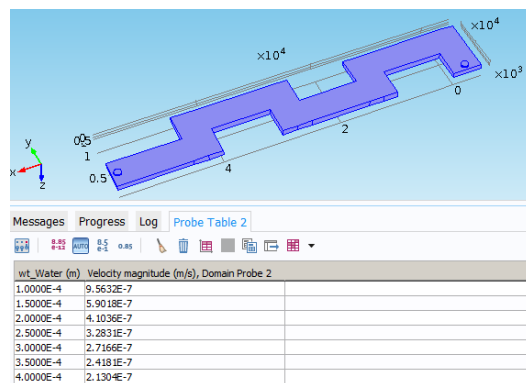


شکل ۴۴: تصویر جدول فشار بیشینه به ازای ارتفاع کانال های مختلف

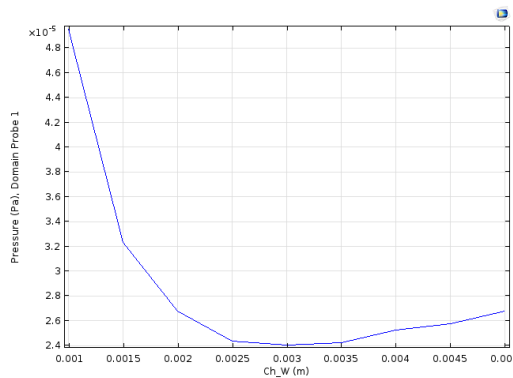


شکل ۴۵: نمودار فشار بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات ارتفاع کانال های

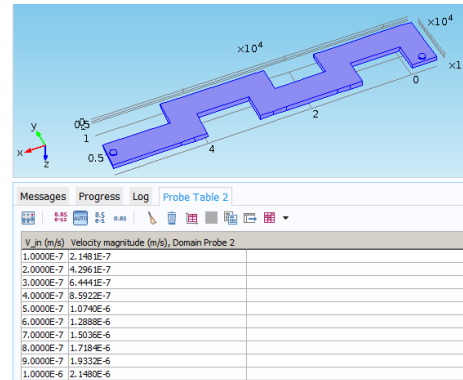
شکل ۴۶ و شکل ۴۷ به ترتیب جدول تغییرات سرعت بیشینه توزیع شده در طول کانال را بر حسب تغییرات ارتفاع کانال و نمودار تغییرات سرعت بیشینه در طول کانال بر حسب ارتفاع مانال را نمایش می دهند. مطابق با این دیاگرام ها هرچه ارتفاع کانال افزایش یابد، سرعت وارده بر دیوار کاهش می یابد.



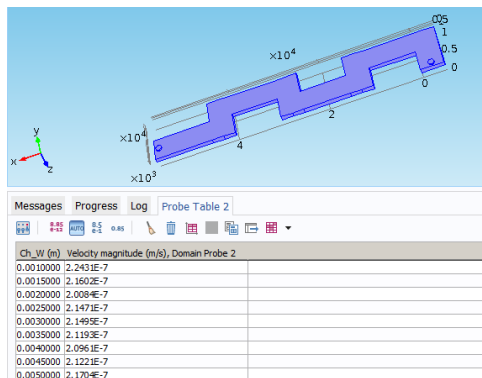
شکل ۴۶: تصویر جدول سرعت بیشینه به ازای ارتفاع کانال های مختلف



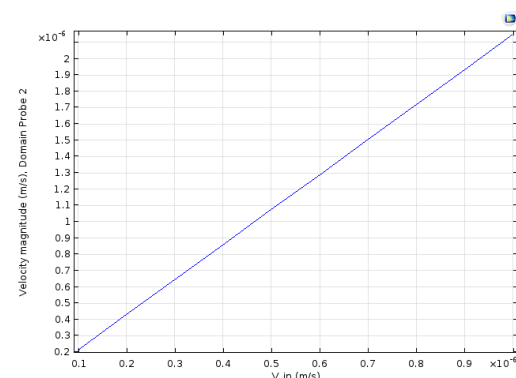
شکل ۵۳: نمودار فشار بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات پهنای کانال



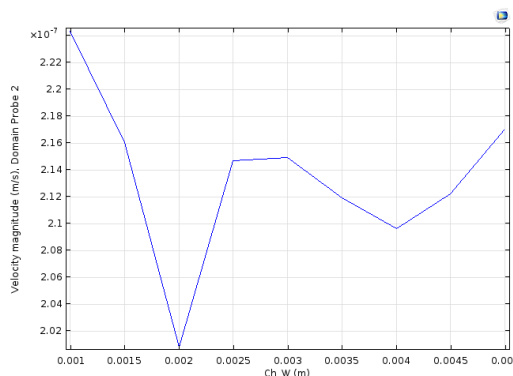
شکل ۵۰: تصویر جدول سرعت بیشینه به ازای سرعت مختلف ورودی کانال



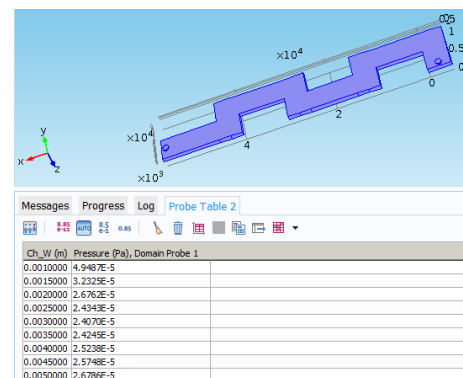
شکل ۵۴: تصویر جدول سرعت بیشینه به ازای پهنای مختلف کانال



شکل ۵۱: نمودار سرعت بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات سرعت ورودی کانال



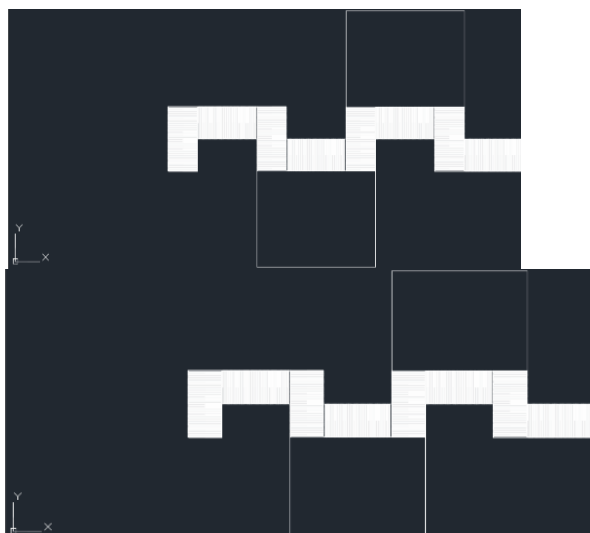
شکل ۵۵: نمودار سرعت بیشینه ایجاد شده در کانال به ازای تغییرات پهنای کانال



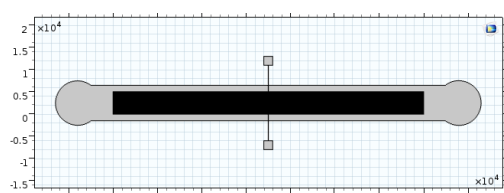
شکل ۵۲: تصویر جدول فشار بیشینه به ازای پهنای مختلف کانال

د. بهینه سازی طراحی و استخراج طرح بهینه بر مبنای محدودیت های ساخت در آزمایشگاه

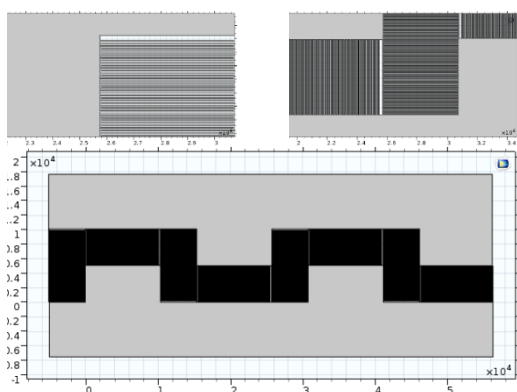
در این قسمت با توجه به نتایج بدست آمده در بخش های پیشین، مقادیر بهینه جهت طراحی و ساخت استخراج می گردد. در بهینه سازی یکی از مواردی که مورد توجه قرار می گیرد این است که بهینه بودن به چه معیاری مد نظر قرار گیرد. معیارهای متفاوت، جواب های متفاوت را در پی خواهد داشت. به طور جامع برای یک مسئله امکان دارد اگر سرعت پاسخ بالاتر باشد جواب بهتر باشد و در یک مسئله دیگر اگر حساسیت بالاتر باشد پاسخ بهتری دریافت شود. در تعریف تابع هزینه که مورد مطالعه باید قرار گیرد هدف از تعریف تابع بسیار حائز اهمیت است و در واقعیت تعریف تابع هزینه مسبب شکل دادن به مسئله بهینه سازی می شود. پیش



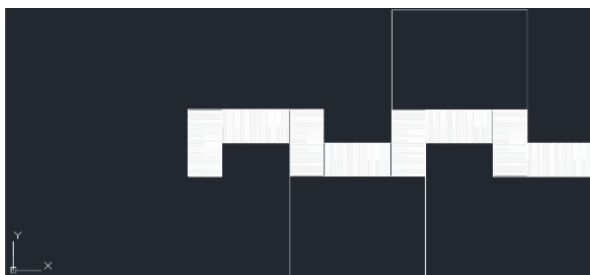
شکل ۵۸: مربوط به خروجی فایل های dxf جهت چاپ بر روی شیشه جهت استفاده نهایی به عنوان ماسک است.



شکل ۵۶: طرح و ماسک مربوط به میکرو کانال تک کانال با الکترودهای شانه ای ساده



شکل ۵۷: طرح و ماسک مربوط به میکرو کانال تک کانال با الکترودهای شانه ای و منحنی شکل



شکل ۵۸: طرح نهایی ماسک ها در فرمت dxf

از شروع به کار متناسب با نمودارهای بدست آمده حساسیت تغییرات پارامترها رو میزان خازن خروجی بیان می شود (۱) الی (۴):

$$S_a = \frac{0.24 - 0.19}{30 - 10} = 0.0025 \frac{pf}{\mu m} \quad (۱)$$

$$S_b = \frac{0.23 - 0.19}{110 - 80} = 0.0025 \frac{pf}{\mu m} \quad (۲)$$

$$S_{cu_w} = \frac{0.213 - 0.2124}{800 - 500} = 2 \times 10^{-3} \frac{nf}{nm} \quad (۳)$$

$$S_{N_t} = \frac{0.6 - 0.1}{6 - 2} = 0.125 \frac{pf}{unit} \quad (۴)$$

همچنین مطابق شکل ۴۰ هرچه فاصله بین الکترودها کاهش یابد، ظرفیت خازن افزایش می یابد اما با توجه به محدودیت ساخت حداقل فاصله بین الکترودها در طول زیاد بایستی در حدود ۵۰ میکرون باشد تا ساخت تکرار پذیر باشد. لذا به صورت ریاضی به صورت (۵) تعریف می شوند:

$$C_{Eq} = aS_a + bS_b + cu_w S_{cu_w} + N_t S_{N_t} \quad (۵)$$

$$X = \left(\frac{N_t}{2} - 1 \right) (2a + 2a_{gap})$$

و مسئله ی بهینه سازی به صورت (۶) تعریف می شود:

$$J = \text{Max}(C_{Eq}) \quad (۶)$$

$$\text{Sub.to} \begin{cases} C_{Eq} > 100 \mu f \\ X < 6500 \mu f \\ a = a_{gap} > 50 \mu m \\ b < 2.5 cm \end{cases}$$

با توجه به محدودیت ساخت، کمینه میزانی که می توان با تکرارپذیری بالا ساخت اتخاذ می گردد. لذا $a = a_{gap} = 50 \mu m$ قرار داده می شود. همچنین با توجه به آنکه ابعاد لام قابل استفاده بیشتر از ۳ اینچ نیستند، لذا طول کلی نیز در حدود ۶٫۴ سانتی متر طول لام است. که البته می توان به صورت ماریچ چیده شود تا شانه های خازن در طول افزایش یابند. لذا با انتخاب $N_t = 800$ شانه و $b = 5mm$ تمامی شرایط مسئله ارضا می گردد و خازن نیز در رنج قابل اندازه گیری و قرار می گیرد. لذا در (۷) مقدار خازن در حالت آزاد را تخمین می زند.

$$C_{Eq} = aS_a + bS_b + cu_w S_{cu_w} + N_t S_{N_t} \quad (۷)$$

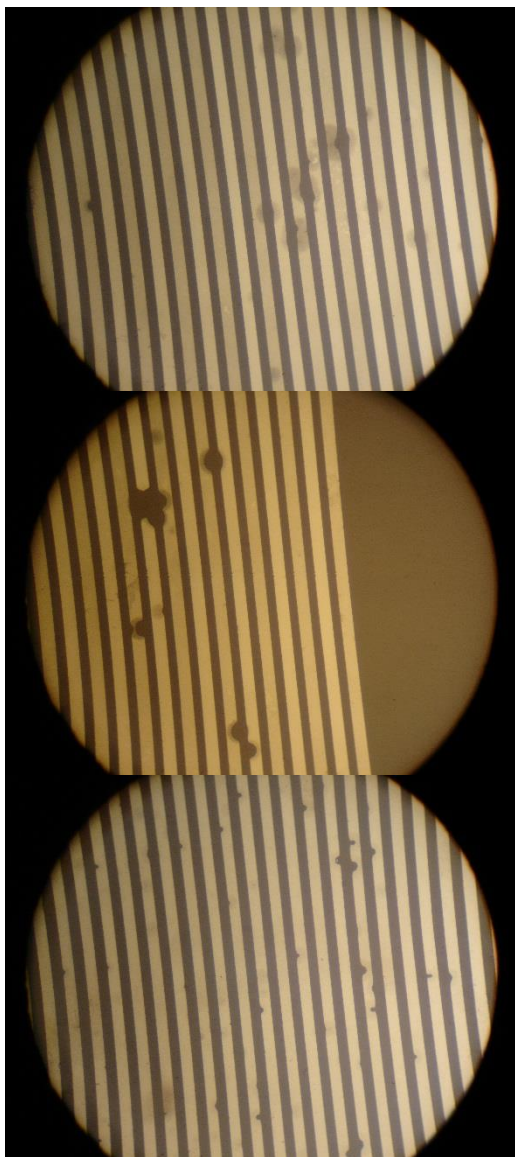
$$C_{Eq} = 50 \times 0.0025 + 5000 \times 0.0025 + 800 \times 0.125$$

$$C_{Eq} = .125 + 12.5 + 100 \approx 113 pf$$

همچنین مطابق با شکل ۴۱، حداقل ارتفاع کانال جهت توزیع کامل میدان الکتریکی ۱۵۰ میکرومتر است که در مراحل ساخت رعایت خواهد گشت.

د. طراحی ماسک

شکل ۵۶ مربوط به ساختار دارای یک کانال و الکترودهای شانه ای به صورت ردیف پشت سرهم و با فاصله و پهنای ۵۰ میکرومتر است. شکل ۵۷ همانند الکترودهای ساده است اما برای اینکه ظرفیت خازن افزایش داده شود الکترودها به صورت منحنی پشت سرهم قرار گرفته شده است.



شکل ۴۰: تصاویر از ساخت الکترودهای مربوط به شانه‌های ساده

ز. مدار الکترونیک پردازش سیگنال

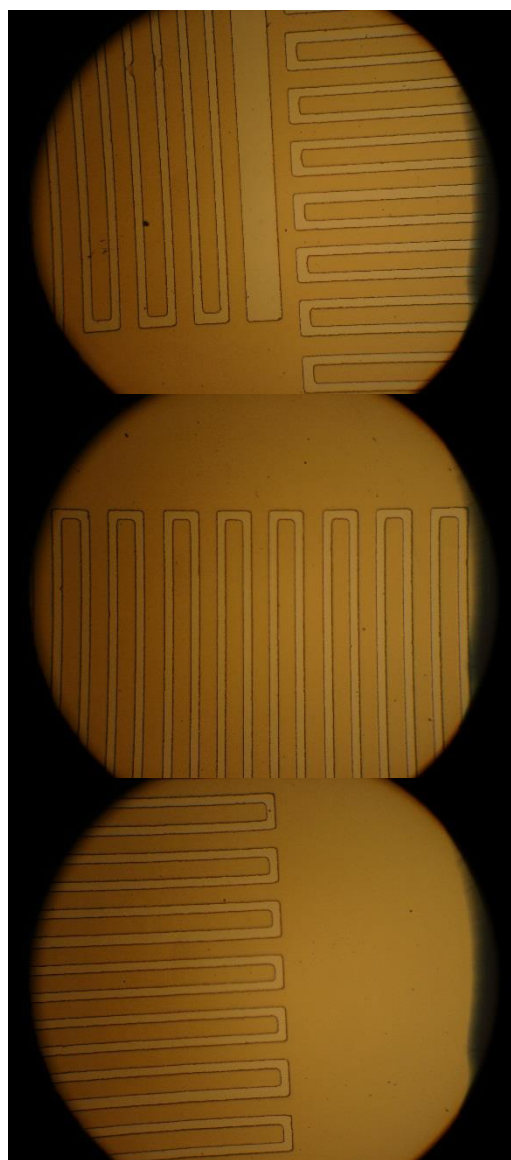
با استفاده از یک مدار ساده الکترونیکی دارای خروجی آنالوگ جهت اعمال ولتاژ دلخواه و مبدل آنالوگ به دیجیتال جهت قرائت ولتاژ و ذخیره‌سازی، مدار الکترونیکی ساده‌ای طراحی می‌گردد. در داخل پردازشگر این مدار، الگوریتم قرائت گر نوین خازنی مبتنی بر چرخه‌ی حدی تعبیه شده است که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

ر. مراحل ساخت

به‌طور کلی برای پیاده‌سازی طرح مربوط به بایستی مراحل زیر سپری

شود:

- ابتدا ماسک‌های مربوط به شکل کانال و الکترودها استخراج شود.
- بروی شیشه لایه نشانی کروم طلا انجام می‌شود.
- طرح مربوط به الکترودها بر اساس ماسک مربوطه روی شیشه طرح داده می‌شود.
- سپس روی الکترودها آبتامر مربوط به کوکائین و شیشه را مجزا پوشش دهی می‌شود.
- میکرو کانال نیز با استفاده از ماسک مربوط به میکرو کانال نیز ساخته می‌شود.



شکل ۵۹: ساختار ایجاد شده در فرایند لیتوگرافی مربوط به الکترودهای شانه‌ای و منحنی شکل

در شکل ۶۲ a، b نشان داده می‌شود، با فرض مقدار یکسان برای δC و δR در هر شاخه، ولتاژ V فرستاده شده روی ترکیب موازی در حال حاضر این نتیجه را می‌دهد $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = nI_1$
با توجه به تبدیل لاپلاس^۵ $I_1(s) = V(s)/(\delta R + 1/\Delta C_s S)$ و در نتیجه $I(s) = nI_1(s) = V(s)/(\delta R/n + 1/n\delta C_s S)$
به عبارت دیگر، با توجه به فرض ذکر شده و $I_1(0) = I_2(0) = \dots = I_n(0) = 0$ ، خازن و مقاومت به ترتیب برابر $R \approx \delta R/n$ و $C_s \approx n\delta C_s$ که الکتروده به n المنت متناهی^۶ تقسیم می‌شود. بر اساس این موضوع، الکترودهای متصل با تعداد زیادی باریکه حاصل تعداد زیادی خازن معادل و یک مقاومت کوچک است. مدار معادل که در شکل ۶۲ نشان داده شده است برای تحقق الکتروده خازنی از طریق پروسه‌ی CMOS به دست می‌آید.

در این بخش یک روش نوین جهت قرائت خازنی ارائه می‌شود. در این روش بر اساس چرخه‌ی حدی و دینامیک دستگاه‌های غیرخطی پارامترهای سیستم که در اصل ظرفیت خازنی است، تخمین زده می‌شود. در این روش، سیستم را به کمک یک دینامیک غیرخطی مجازی، مجبور به قرارگیری در داخل چرخه حدی می‌شود. در اصل شرایطی ایجاد می‌شود تا سیستم در داخل چرخه‌ی حدی قرار گیرد. با توجه به آنکه خروجی سیستم در حال مشاهده است، لذا فرکانس و دامنه‌ی نوسان قابل اندازه‌گیری است. به عبارت دیگر دو پارامتر فرکانس نوسان و دامنه نوسان از جمله متغیرهایی هستند که توسط یک مدار الکتریکی قابل اندازه‌گیری و مشاهده است. با داشتن دینامیک سیستم و دینامیک سیستم غیرخطی مجازی و متغیرهای چرخه حدی، پارامترهای سیستم خطی که در اصل خازن اندازه‌گیر است، به دست می‌آید. با توجه به منابع سامانه‌های غیرخطی [۳۸]، برای به دست آوردن چرخه‌ی حدی بایستی برای سیستم غیرخطی تابع توصیفی استخراج شود. سپس با استفاده از (۱۰) و هم‌نهشت سازی دو طرف رابطه، پارامترهای سیستم استخراج شود. برای محاسبه‌ی تابع توصیفی معمولاً چهار فرض زیر را اختیار می‌کنیم:

- ۱- تنها یک بخش غیرخطی در سیستم وجود دارد.
- ۲- بخش غیرخطی تغییرناپذیر با زمان است.
- ۳- اگر سیگنال سینوسی با فرکانس f به بخش غیرخطی اعمال شود در خروجی فرکانس غالب همان فرکانس f باشد.
- ۴- تابع غیرخطی یک تابع فرد است.

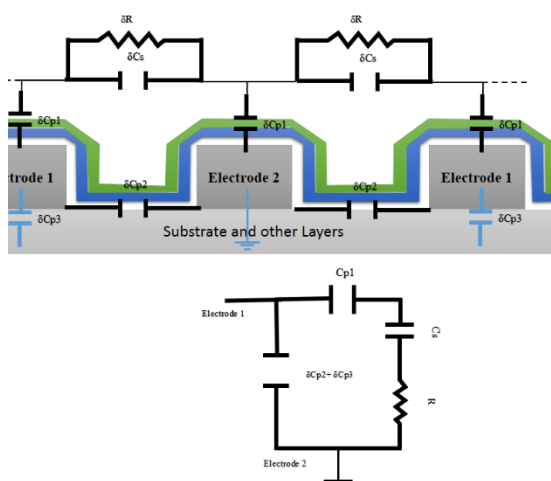
سیکل حدی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک سیستم غیرخطی است. سیکل حدی در برخی از دستگاه‌ها از جمله اسلاتورها می‌تواند بسیار مطلوب باشد. در بعضی دیگر از دستگاه‌ها، سیکل حدی باعث استهلاك قطعات شده و از کارایی سیستم می‌کاهد. با وجود این یافتن شکل موج دقیق یک سیکل حدی معمولاً ضروری نیست. ممکن است با اثبات وجود سیکل



شکل ۶۱: مدار الکترونیکی جهت قرائت خازنی

۴- مدل سازی و روش قرائت خازنی

حس گر خازنی با الکترودهای به هم متصل^۱ در بالای تراشه‌ی CMOS به منظور تشخیص تغییرات لحظه‌ای ظرفیت در الکترودهای سنجشی که آن‌ها با خازن‌های پارازیتی بزرگ مرتبط اند پیاده‌سازی می‌شود. این خازن‌های پارازیتی و مدل مدار تعادل نمونه در شکل ۶۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر می‌بینید، ویژگی‌های خازن و مقاومت مورد تجزیه با خازن موازی C_s و مقاومت R مدل سازی شده است. خازن‌های پارازیتی در سراسر لایه‌ی تحت تأثیر C_{p1} ، در بین الکترودها C_{p2} و در بین لایه‌های زیرین سیلیسیم و الکترودها C_{p3} در این مدل نشان داده شده‌اند. در حقیقت R و C_s می‌توانند از ترکیب موازی تعداد زیادی المنت‌های^۲ کوچک به دست آیند. ($\delta C_s, \delta R$).



شکل ۶۲: (a) خازن‌های پارازیتی ایجاد شده بر روی تراشه‌ی CMOS δC و δR به ترتیب خازن با پارازیت جزئی^۳ و مقاومت هستند. و (b) مدار معادل^۴ کل میکرو ساختار است.

^۴ equivalent

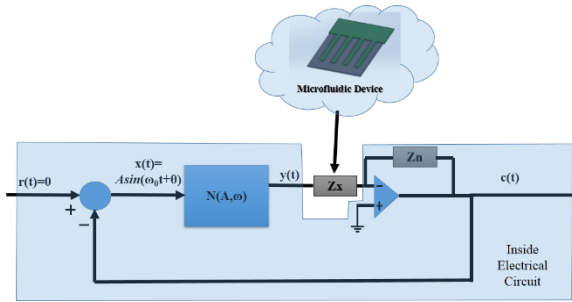
^۵ Laplace

^۶ finite

^۱ interdigitate

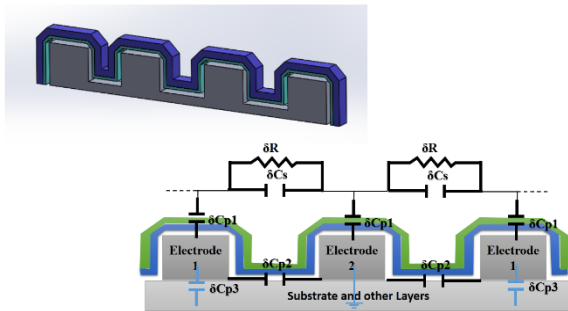
^۲ Elements

^۳ partial



شکل ۶۵: ساختار قرارگیری حس گر در مدار الکتریکی

مجدد یادآوری می گردد مدل الکتریکی حس گر خازنی به صورت
شکل ۶۶ است:



شکل ۶۶: مدل تعریف شده در فضای فرکانسی

بر اساس مدل تعریف شده در شکل ۶۲، معادله بین ورودی و خروجی
در فضای فرکانس را می توان به راحتی استخراج نمود.

$$Z_n = \frac{1}{R_n C_n s + 1} \quad (12)$$

$$Z_x = R_x + \frac{1}{C_x s}$$

که بر اساس معادله فوق تابع تبدیل در حوزه فرکانس به صورت (۱۳)
به دست می آید:

$$G(j\omega) = \frac{c(j\omega)}{y(j\omega)} = -\frac{Z_n}{Z_x} = -\frac{C_x j\omega}{(R_n C_n + R_x C_x) j\omega + 1 - R_x R_n C_x C_n \omega^2} \quad (13)$$

$$G(j\omega) = -\frac{j C_x \omega (1 - R_x R_n C_x C_n \omega^2) + C_x (R_n C_n + R_x C_x) \omega^2}{(R_n C_n + R_x C_x)^2 \omega^2 + (1 - R_x R_n C_x C_n \omega^2)^2}$$

بر اساس دینامیک موجود در سیستم، تابع غیرخطی مورد نیاز جهت
ایجاد چرخه حدی مجازی، تابع دو وضعیتی (بَنگ بَنگ) است لذا با تقاطع
تابع توصیفی و دینامیک سیستم رابطه زیر به دست می آید:

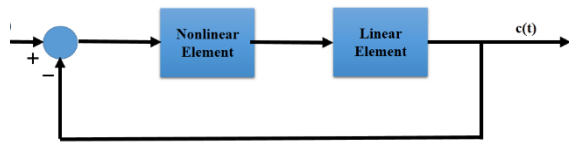
$$\left\{ \begin{aligned} (1 - R_x R_n C_x C_n \omega^2) = 0 &\rightarrow R_x C_x = \frac{1}{R_n C_n \omega^2} \\ \frac{C_x}{(R_n C_n + R_x C_x)} = \frac{\pi A}{4D} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\rightarrow C_x = \frac{\pi A (R_n^2 C_n^2 \omega^2 + 1)}{4D R_n C_n \omega^2}$$

که در (۱۴)، تابع توصیفی یک سیستم دو وضعیتی همانند (۱۵) بیان
می شود.

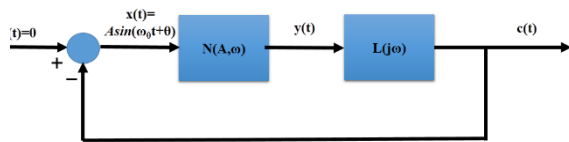
$$N(A) = \frac{4D}{\pi A} \quad (15)$$

حدی یا یافتن تقریبی دامنه ی نوسان و فرکانس آن، بتوان به تحلیل و درک
مناسبی از رفتار سیستم در حوزه ی نوسان دست یافت. سیستم شکل ۶۳ را
در نظر بگیرید:



شکل ۶۳: سیستم متشکل از دو بخش خطی و غیرخطی با ورودی صفر

اگر برای قسمت غیرخطی، تابع توصیفی مناسبی استخراج شود و
قسمت خطی نیز با تابع تبدیل مربوطه نشان داده شود، شکل ۶۳ به صورت
شکل ۶۴ قابل بیان است.



شکل ۶۴: سیستم نوسانی بیان گر بخش غیرخطی توسط تابع توصیفی

معادلات سیستم بالا را می توان در ماتریس (۸) به صورت ساده

بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} N(A, \omega) & -1 \\ 1 & L(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(j\omega) \\ Y(j\omega) \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

که پاسخ آن را می توان به کمک (۹) به دست آورد.

$$\begin{vmatrix} N(A, \omega) & -1 \\ 1 & L(j\omega) \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$1 + N(A, \omega) L(j\omega) = 0$$

ابتدایی ترین روش حل معادله ی وجود سیکل حدی، روش محاسبات
جبری است. مجموعه جواب دامنه و فرکانس نوسانات می توانند به صورت
ضمنی و یا صریح از (۱۰) به دست می آیند:

$$real: \quad Re[L(j\omega)] = Re\left[-\frac{1}{N(A, \omega)}\right] \quad (10)$$

$$imaginary: \quad Im[L(j\omega)] = Im\left[-\frac{1}{N(A, \omega)}\right]$$

در روش ترسیمی، معادله ی وجود سیکل حدی را به صورت (۱۱)
بازنویسی می کنیم:

$$L(j\omega) = -\frac{1}{N(A, \omega)} \quad (11)$$

برای دو طرف معادله ی بالا می توان نمودار قطبی مجزا رسم کرد.
نقاطی که در آن دو نمودار باهم تقاطع داشته باشند نشان دهنده ی وجود
یک سیکل حدی در سیستم خواهد بود. حال در اینجا قصد بر استخراج
پارامترهای مدل ارائه شده در شکل ۶۲ است. برای این کار مدل ممز را در
داخل ساختار شکل ۶۵ قرار داده می شود.

که در آن، D, A به ترتیب بیان گر دامنه نوسان و میزان حد اشباع است. با توجه به اینکه خروجی سیستم همان ولتاژ است و اندازه گیری می شود، لذا در این داده خروجی فرکانس و دامنه نوسان به راحتی قابل اندازه گیری هستند. حل معادله ی فوق، به صورت (۱۶) به صورت صریح قابل بیان است.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_x = \frac{\pi A (R_n^2 C_n^2 \omega^2 + 1)}{4D R_n C_n \omega^2} \\ R_x = \frac{1}{R_n C_n C_x \omega^2} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} C_x = \frac{\pi A (R_n^2 C_n^2 \omega^2 + 1)}{4D R_n C_n \omega^2} \\ R_x = \frac{4D}{\pi A (R_n^2 C_n^2 \omega^2 + 1)} \end{array} \right\} \quad (16)$$

(۱۸)

شایان ذکر است در (۱۶)، مقادیر R_x, C_x مربوط به مشخصات حس گر و مقادیر R_n, C_n مربوط به مدار الکتریکی ساخته شده هستند و به صورت از پیش تعیین شده در مدار الکتریکی قرار داده می شوند. به علاوه مقادیر A, ω نیز در هنگام نمونه برداری اندازه گیری می شوند. شکل ۶۷، مدار و ساختار ریزسیالی را در هنگام قرائت خازنی نشان می دهد.

تفکیک پذیری برای حس گر تشخیص گر شیشه و کوکائین در (۱۷) و (۱۸) محاسبه شده است.

$$R = \frac{100 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{445nf - 119pf} \cong \frac{50 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{217nf - 119pf} \cong \frac{10 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{46nf - 119pf}$$

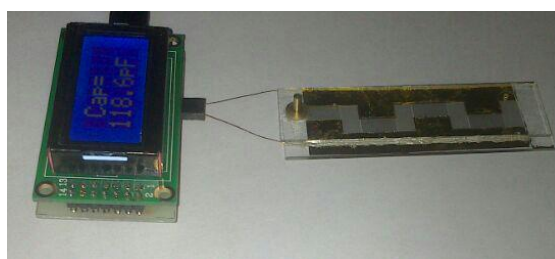
$$R \cong 0.000218 \frac{\mu\text{mol}}{Lpf} \cong 0.0327 \frac{\text{ppm}}{nf}$$

$$R = \frac{100 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{1100nf - 119pf} \cong \frac{50 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{440nf - 119pf} \cong \frac{10 \frac{\mu\text{mol}}{L}}{540nf - 119pf}$$

$$R \cong 0.000185 \frac{\mu\text{mol}}{Lpf} \cong 0.005 \frac{\text{ppm}}{nf}$$

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، بر مبنای ساختارهای ریزسیال و همچنین فن زیست فناوری، گامی در جهت طراحی و ساخت سامانه تشخیص گر مواد مخدر طراحی برداشته شده است. ابتدا طرح مورد نظر در نرم افزار شبیه ساز چند فیزیکی کامسول پیاده سازی و سپس بر مبنای حالت هایی که در واقعیت پیش بینی می شود، فیزیک و پارامترهای مختلف نیز در هنگام شبیه سازی مد نظر قرار می گیرند. بر اساس تغییر پارامترها و همچنین تعیین توابع هزینه و حساسیت به ازای تغییر پارامترهای موثر در ساخت ریز سیال، حالت بهینه پارامترها استخراج می شوند. با استفاده از پارامترهای مستخرج در بخش طراحی بهینه و با کمک فن میکروالکترونیک، ریزسیال مذکور ساخته می شود و بر روی سطح الکترودهای خازنی حس گر نیز آپتامرهای مورد نظر پوشش دهی می گردند. در کنار بخش میکروالکترونیک، قرائت گر خازنی مبتنی بر چرخه ی حدی در این مقاله معرفی و پیاده سازی می گردد. در این روش نوین با ایجاد یک مدل غیرخطی مجازی در صورت ساختار خازنی و ایجاد چرخه حدی تلقینی، ظرفیت خازنی به صورت لحظه ای اندازه گیری می شود. نتایج شبیه سازی و پیاده سازی عملی گویای عملکرد مناسب این روش اندازه گیری است.



شکل ۶۷: مدار و ساختار ریزسیالی ساخته شده در هنگام انجام آزمایش

۵- نتایج و مشخصات فنی حسگر

در این آزمون، میکرو کانال مارپیچ مورد آزمایش انجام می گیرد، مطابق با آزمون قبلی مجدد سنجش انجام می شود، در این آزمایش برای غلظت های ۱۰۰، ۵۰ و ۱۰ میکرو مول بر لیتر برای هر دو ماده شیشه و کوکائین انجام می شود که نتایج به شرح جداول جدول ۱ و جدول ۲ هستند. همچنین برگه مشخصه ی حسگر به صورت جدول ۳ بیان می گردد.

جدول ۱: جدول نتایج اندازه گیری برای حالت کوکائین

کوکائین با غلظت ۱۰ میکرو مول بر لیتر	کوکائین با غلظت ۵۰ میکرو مول بر لیتر	کوکائین با غلظت ۱۰۰ میکرو مول بر لیتر	در حالت آزاد
۱۱۰ نانو فاراد	۵۴۰ نانو فاراد	۱۰۱ میکرو پیکوفاراد	۱۱۹ پیکوفاراد

جدول ۲: جدول نتایج اندازه گیری برای حالت شیشه

شیشه با غلظت ۱۰ میکرو مول بر لیتر	شیشه با غلظت ۵۰ میکرو مول بر لیتر	شیشه با غلظت ۱۰۰ میکرو مول بر لیتر	در حالت آزاد
۴۶ نانو فاراد	۲۱۷ نانو فاراد	۴۴۵ نانو پیکوفاراد	۱۱۹ پیکوفاراد

جدول ۳: مشخصات فنی حسگر طراحی شده

واحد	مقدار	پارامترهای ساخت میکرو سازه
میکرو متر	5000	طول الکترودها
میکرو متر	50	عرض الکترودها
میکرو متر	50	فاصله الکترودها
-	800	تعداد شانه ها
-	مس-طلا	پوشش
نانومتر	100	ارتفاع پوشش
میکرو متر	200	ارتفاع کانال
		پارامترهای مکانیکی
میکرو متر بر ثانیه	0.1	سرعت ورودی سیال
پاسکال	فشار هوا	فشار خروجی
میکرو متر	200	ارتفاع کانال
میکرو متر	5000	پهنای کانال
میکرو متر بر ثانیه	0.4	بیشینه سرعت توزیعی
پاسکال	0.0031	بیشینه فشار توزیعی
		پارامترهای الکتریکی
ولت	0-10	ولتاژ ورودی
مگاهرتز	8	فرکانس پردازنده
	اتمگا ۸	نوع پردازنده
	آری	نمایشگر
*	خازنی-چرخه حدی	متد قرائت
		پارامترهای کنترلی
میلی ثانیه	800	زمان سکون
میلی ثانیه	720	زمان پاسخ دهی
هرتز	1.388888889	پهنای باند

مراجع

- [13] Pamula, V.K. and R.B. Fair. Detection of dissolved TNT and DNT in soil with a MEMS explosive particle detector. in AeroSense 2000. 2000. International Society for Optics and Photonics.
- [14] Rajic, S., et al. Ultraresponsive thermal sensors for the detection of explosives using calorimetric spectroscopy (CalSpec). in AeroSense'99. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- [15] Pamula, V.K. and R.B. Fair. Detection of nanogram explosive particles with a MEMS sensor. in AeroSense'99. 1999. International Society for Optics and Photonics.
- [16] Pinnaduwa, L., et al., Explosives: A microsensor for trinitrotoluene vapour. Nature, 2003. 425(6957): p. 474-474.
- [17] Pinnaduwa, L., et al., A sensitive, handheld vapor sensor based on microcantilevers. Review of Scientific Instruments, 2004. 75(11): p. 4554-4557.
- [18] Li, X., et al. Four-cantilever trace explosive sensors with dual SAMS functionalized for specific-sensing improvement and nonspecific-adsorption depression. in Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International. 2007. IEEE.
- [19] Miller, R.A., et al., A MEMS radio-frequency ion mobility spectrometer for chemical vapor detection. Sensors and Actuators A: Physical, 2001. 91(3): p. 301-312.
- [20] Senesac, L.R., et al., Micro-differential thermal analysis detection of adsorbed explosive molecules using microfabricated bridges. Review of Scientific Instruments, 2009. 80(3): p. 035102.
- [21] Jenison, R.D., et al., High-resolution molecular discrimination by RNA. Science, 1994. 263(5152): p. 1425-1429.
- [22] Stoltenburg, R., C. Reinemann, and B. Strehlitz, SELEX—a (r) evolutionary method to generate high-affinity nucleic acid ligands. Biomolecular engineering, 2007. 24(4): p. 381-403.
- [23] Lee, H., et al., Various on-chip sensors with microfluidics for biological applications. Sensors, 2014. 14(9): p. 17008-17036.
- [24] Gao, Y., et al., Plasmonic interferometric sensor arrays for high-performance label-free
- [1] Weigl, B.H. and P. Yager, Tech. Sight. Science, 1999. 283(5400): p. 346-347.
- [2] van den Berg, A. and T. Lammerink, Micro total analysis systems: microfluidic aspects, integration concept and applications, in Microsystem technology in chemistry and life science. 1998, Springer. p. 21-49.
- [3] Nie, Z., et al., Electrochemical sensing in paper-based microfluidic devices. Lab on a Chip, 2010. 10(4): p. 477-483.
- [4] Cheng, S. and Z. Wu, A Microfluidic, Reversibly Stretchable, Large-Area Wireless Strain Sensor. Advanced Functional Materials, 2011. 21(12): p. 2282-2290.
- [5] Huang, C.-J., et al., Integrated microfluidic systems for automatic glucose sensing and insulin injection. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007. 122(2): p. 461-468.
- [6] Saadi, W., et al., A parallel-gradient microfluidic chamber for quantitative analysis of breast cancer cell chemotaxis. Biomedical microdevices, 2006. 8(2): p. 109-118.
- [7] Chen, J., J. Li, and Y. Sun, Microfluidic approaches for cancer cell detection, characterization, and separation. Lab on a Chip, 2012. 12(10): p. 1753-1767.
- [8] Maheswaran, S., et al., Detection of mutations in EGFR in circulating lung-cancer cells. New England Journal of Medicine, 2008. 359(4): p. 366-377.
- [9] Yung, T.K., et al., Single-molecule detection of epidermal growth factor receptor mutations in plasma by microfluidics digital PCR in non-small cell lung cancer patients. Clinical Cancer Research, 2009. 15(6): p. 2076-2084.
- [10] Fujii, T., PDMS-based microfluidic devices for biomedical applications. Microelectronic Engineering, 2002. 61: p. 907-914.
- [11] Thundat, T., et al., Vapor detection using resonating microcantilevers. Analytical Chemistry, 1995. 67(3): p. 519-521.
- [12] Fair, R.B., V.K. Pamula, and M. Pollack. MEMS-based explosive particle detection and remote particle stimulation. in AeroSense'97. 1997. International Society for Optics and Photonics.

- H5N1 avian influenza virus. *Sensors*, 2015. 15(8): p. 18565-18578 .
- [36] Weng, X., G. Gaur, and S. Neethirajan, Rapid Detection of Food Allergens by Microfluidics ELISA-Based Optical Sensor. *Biosensors*, 2016. 6(2): p. 24.
- [37] Miao, B., et al., Centrifugal Microfluidic System for Nucleic Acid Amplification and Detection. *Sensors*, 2015. 15(11): p. 27954-27968.
- [38] Khalil, H.K. and J. Grizzle, *Nonlinear systems*. Vol. 3. 1996: Prentice hall New Jersey.
- biomolecular detection. *Lab on a Chip*, 2013. 13(24): p. 4755-4764.
- [25] Anker, J.N., et al., Biosensing with plasmonic nanosensors. *Nature materials*, 2008. 7(6): p. 442-453.
- [26] Lee, S.H., et al., Linewidth-Optimized Extraordinary Optical Transmission in Water with Template-Stripped Metallic Nanohole Arrays. *Advanced Functional Materials*, 2012. 22(21): p. 4439-4446.
- [27] Lim, C., et al., Optofluidic platforms based on surface-enhanced Raman scattering. *Analyst*, 2010. 135(5): p. 837-844.
- [28] Park, T., et al., Highly sensitive signal detection of duplex dye-labelled DNA oligonucleotides in a PDMS microfluidic chip: confocal surface-enhanced Raman spectroscopic study. *Lab on a Chip*, 2005. 5(4): p. 437-442.
- [29] Strehle, K.R., et al., A reproducible surface-enhanced Raman spectroscopy approach. *Online SERS measurements in a segmented microfluidic system. Analytical Chemistry*, 2007. 79(4): p. 1542-1547.
- [30] Arpali, S.A., et al., High-throughput screening of large volumes of whole blood using structured illumination and fluorescent on-chip imaging. *Lab on a Chip*, 2012. 12(23): p. 4968-4971.
- [31] Matos Pires, N.M. and T. Dong, Microfluidic biosensor array with integrated poly (2, 7-carbazole)/fullerene-based photodiodes for rapid multiplexed detection of pathogens. *Sensors*, 2013. 13(12): p. 15898-15911.
- [32] Wang, J., et al., A label-free microfluidic biosensor for activity detection of single microalgae cells based on chlorophyll fluorescence. *Sensors*, 2013. 13(12): p. 16075-16089.
- [33] Chiu, T.-K., et al., Development of a microfluidic-based optical sensing device for label-free detection of circulating tumor cells (CTCs) through their lactic acid metabolism. *Sensors*, 2015. 15(3): p. 6789-6806.
- [34] Zhang, F., et al., A microfluidic love-wave biosensing device for PSA detection based on an aptamer beacon probe. *Sensors*, 2015. 15(6): p. 13839-13850.
- [35] Lum, J., et al., An impedance aptasensor with microfluidic chips for specific detection of

تشخیص حملات سایبری نفوذ به زیرساخت‌های حیاتی با بکارگیری

روش شبکه پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی

زینب قاضی^۱، علی دوست محمدی^۲

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، z.ghazi@aut.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، dad@aut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳

ویرایش: ۱۳۹۶/۶/۶

دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۲

چکیده: تقاضای روزافزون برای دست یافتن به سیستم‌هایی با امنیت و قابلیت اطمینان بالاتر، توسعه مدل‌ها، آنالیز و طراحی روش‌های مناسب را ضروری ساخته است. طراحی کنترلر جهت تشخیص حملات سایبری نفوذ، از اهداف این مقاله است. جهت طراحی کنترلری که قادر باشد حملات نفوذ را به دقت و در کوتاهترین زمان ممکن تشخیص دهد، در این مقاله نظریه شبکه پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی بکار گرفته شده است. پایداری سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی، به ازای هر گونه شرایط موجود در شبکه ارتباطی و پارامترهای ورودی اثبات شده است. جهت ارزیابی عملکرد کنترلر، مجموعه داده استاندارد DARPA مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، نرخ گزارشات مثبت نادرست اندک، نرخ تشخیص مناسب و همچنین سرعت همگرایی بسیار بالای کنترلر پیشنهادی را تایید می‌نماید.

کلمات کلیدی: زیرساخت‌های حیاتی، حملات سایبری، سیستم‌های تشخیص نفوذ، شبکه پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی.

Cyber intrusion detection on critical infrastructures using fuzzy neural first order hybrid Petri net

Z. Ghazi and A. Doustmohammadi

Abstract: Due to the growing demand to achieve more secure and reliable systems, development of models, analysis and design of appropriate procedures seems to be necessary. The aim of this paper is designing a controller in order to detect cyber intrusion. In this paper fuzzy neural first order hybrid Petri net is used to design a controller that is capable of detecting cyber intrusions accurately as soon as possible. The stability of the proposed intrusion detection system has been proven for any network conditions and input parameters. To evaluate controller performance, DARPA standard data set is used. The simulation results confirm proper detection rate, low of false positive rate, and also surprisingly high convergence speed.

Keywords: critical infrastructures, cyber attacks, intrusion detection systems, fuzzy neural first order hybrid Petri net.

۱- مقدمه

سیستم‌های کنترل، سیستم‌هایی هستند که فرآیندهای فیزیکی را کنترل و هدایت می‌کنند. تبادل اطلاعات در اکثر این سیستم‌ها، بر پایه علم کامپیوتر و فناوری اطلاعات می‌باشد. سیستم‌های کنترلی در زیر ساخت‌های حیاتی^۱ سیستم‌های حساسی هستند که هرگونه اختلال در آن‌ها می‌تواند پیامدهای جبران ناپذیری برای سیستم فیزیکی تحت کنترل و افراد مرتبط با آن داشته باشد. کشورهای مختلف با توجه به ضرورت‌ها و اولویت‌های خود، تعاریف متنوعی از زیرساخت و زیرساخت حیاتی ارائه می‌نمایند. تعاریف مختلف می‌تواند باعث ایجاد مصادیق متفاوت گردد. انرژی، آب آشامیدنی و سیستم‌های مربوط به تصفیه، مخابرات، راکتورها، مواد و پسماندهای هسته‌ای، سدها و ... را می‌توان از زیرساخت‌های حیاتی برشمرد.

با افزودن قابلیت‌های جدید، هوشمندسازی شبکه و بکارگیری امکانات مخابراتی روز دنیا در زیرساخت‌های حیاتی، ساختارهای شبکه‌های هوشمند می‌توانند بسیار کارآتر و بهبود پذیرتر جهت اداره و عملکرد گردند. این مسائل هر چند فواید بسیاری از جهت کارایی در شبکه‌ها دارند، اما ریسک‌های بزرگ و چالش‌های دشواری در مقوله حفاظت در برابر حملات امنیتی سایبری به وجود خواهند آورد. با توجه به مقیاس وسیع شبکه‌های زیرساخت‌های حیاتی، منطقی به نظر می‌رسد که آسیب پذیری سیستم‌های ارتباطی این شبکه‌ها نیز به همین میزان گسترده باشد. بنابراین تمامی کارشناسان اذعان دارند که شاخه امنیت سایبری در زیرساخت‌های حیاتی بسیار با اهمیت بوده و نیازمند توجه و تحقیقات بسیار است.

حملات سایبری می‌تواند با انگیزه‌های متفاوتی انجام گیرد از جمله: چالش‌های ذهنی و فکری، نشان دادن خود و یافتن رقیب، تست کردن امنیت سیستم، بدست آوردن پول، انتقام، تروریسم. حملات سایبری انواع مختلفی دارند که می‌توان به برخی موارد از قبیل: حمله دسترسی به منابع، حمله صحت اطلاعات، حملات پروتکل، حملات مسیر یابی^۲، نفوذ^۳، بدافزار، تزریق داده‌های نادرست^۴ اشاره نمود [۱]. رویدادهای اخیر از جمله استاکس‌نت، الزاماتی در خصوص پرداختن به حملات سایبری پیچیده و اثرات بسیار مخرب آنها بر زیرساخت‌های حیاتی را ضروری ساخته است. برای دستیابی به این هدف با توجه به مزایای قابل توجه نظریه شبکه‌پتری، به نظر می‌رسد بکارگیری این ابزار مفید واقع خواهد شد. تمرکز این مقاله بر تشخیص حملات نفوذ می‌باشد. به طور کلی تشخیص نفوذ به دو نوع مختلف دسته بندی می‌گردد: تشخیص سوء استفاده^۵، تشخیص غیرمعارف^۶.

در نوع اول تشخیص بر مبنای خصوصیات شناخته شده حملات است. داده جدید با پایگاه دانش حملات مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در صورت تطابق به عنوان حمله تشخیص داده می‌شود. از مزایای این روش نرخ گزارشات مثبت نادرست (FPR) کم می‌باشد. با این حال این روش قابلیت شناسایی حملات ناشناخته را ندارد. در نوع دوم یا همان تشخیص غیرمعارف، رفتار متعارف و نرمال سیستم تعریف می‌شود و در صورت عدم تطابق داده‌های ثبت شده با رفتار نرمال سیستم، به عنوان حمله سایبری گزارش خواهد شد. هر چند این روش قابلیت شناسایی حملات ناشناخته را دارد، اما FPR در این روش بالا بوده که این امر خصوصاً در کنترل زیرساخت‌های حیاتی یک مشکل بزرگ محسوب می‌شود [۲]. در این مقاله روشی جهت تشخیص نفوذ بر مبنای تشخیص غیرمعارف مبتنی بر نظریه شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی^۷ پیشنهاد شده است که نه تنها نرخ تشخیص مناسبی ایجاد خواهد نمود، بلکه بر اساس نتایج شبیه‌سازی زمان همگرایی و FPR بسیار کمی خواهد داشت.

تشخیص نفوذ اولین بار توسط [۳] مطرح گردید. پس از آن مطالعات بسیاری بر روی این حوزه متمرکز گردید [۵،۴]. در حوزه تشخیص نفوذ بر اساس روش تشخیص سوء استفاده تحقیقات بسیاری متمرکز شده است. از جمله روش‌های مورد استفاده در این حوزه می‌توان به تطبیق الگو اشاره نمود [۷،۶]. روش‌های تطبیق الگو، از جمله روش‌های رایج جهت ارتقا امنیت تبادل داده هستند. روش‌های ارائه شده در این حوزه، معرفی و مقایسه آنها در [۸] گردآوری شده است. استخراج داده فرآیندی جهت شناسایی داده‌های معتبر و استخراج الگوی قابل فهم از آن‌هاست، که بر این اساس قادر خواهیم بود رفتارهای مشکوک را شناسایی نماییم [۹-۱۱]. الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری از بهینه‌سازی جستجوی سناریوی حمله، در زمان پردازش منطقی زیرمجموعه‌ای از حملات بالقوه را فراهم می‌نماید [۱۲،۱۳]. در [۱۴] با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم فازی، روشی جهت تشخیص برخط نفوذ ارائه شده است. از شبکه‌پتری رنگی می‌توان به عنوان ابزاری برای تعریف ویژگی‌های رفتارهای مخرب و همچنین تشخیص آن‌ها نام برد [۱۷-۱۵].

برخی روش‌های موجود در حوزه تشخیص غیرمعارف بر مبنای روش طبقه بندی^۸ است [۱۸-۲۰]. طبقه بندی یکی از محبوب‌ترین روش‌های تشخیص نفوذ است. در این روش الگوریتمی برای یافتن شباهت بین نمونه‌ها جهت ساخت خوشه ارائه می‌شود، به گونه‌ای که نمونه‌های متعلق به یک خوشه دارای ویژگی‌های مشابهی باشند. اگرچه در این روش نمونه‌های جدید به خوبی تشخیص داده می‌شوند، اما پیش بینی با دقت کمی صورت می‌پذیرد. [۲۱] با افزودن کمیت‌های فازی الگوریتمی بر پایه طبقه بندی جهت تشخیص حملات نفوذ پیشنهاد داده است که قادر است

^۵ Misuse detection^۶ Anomaly detection^۷ fuzzy neural first order hybrid Petri net^۸ Clustering^۱ Critical infrastructure System^۲ Routing attack^۳ Intrusion^۴ False Data Injection

تحلیل خواهد شد. اثبات پایداری مدل پیشنهادی به ازای هر شرط اولیه ای در بخش ۶ ارائه گردیده است. در نهایت بخش ۷ مقاله، حاوی مطالب جمع بندی است.

۲- شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول

ایده شبکه‌پتری در سال ۱۹۶۲ توسط کارل آدام پتری ارائه گردید [۳۶]. در کنار شبکه‌پتری گسسته، ایده شبکه‌پتری پیوسته جهت مدل‌سازی سیستم‌ها و سیگنال‌های پیوسته در سال ۱۹۸۷ مطرح شد [۳۷]. در مدل شبکه‌پتری هیبرید که در سال ۱۹۹۱ ارائه شده است، به صورت همزمان از شبکه‌پتری پیوسته برای مدل کردن جریان‌های پیوسته و از شبکه‌پتری عادی برای مدل کردن وقایع گسسته استفاده شده است [۳۸]. شبکه‌پتری ترکیبی قادر است سیستم‌های دارای دو دینامیک همزمان پیوسته و رویداد گسسته را به خوبی مدل نماید [۳۹]. این ابزار در عین حال که صورت نمایش گرافیکی جذاب و قابل درکی دارد، قادر است تحلیل‌های آنالیتیکی دقیقی نیز از سیستم ارائه دهد [۴۰، ۴۱]. در این مقاله شبکه‌پتری هیبرید مرتبه اول مورد استفاده قرار گرفته است [۴۲]. در این روش دینامیک پیوسته سیستم توسط مدل‌های سیال^۲ مرتبه اول توصیف می‌گردد. در این مدل فلوهای پیوسته نرخ قطعه‌ای ثابت داشته و محتوای سیال هر جایگاه پیوسته به صورت خطی با زمان تغییر می‌کند. استفاده از این روش در عین داشتن دقت مطلوب، سرعت عملکرد بالا، که از جمله نیازهای حیاتی سیستم‌های تشخیص نفوذ است را مسیر می‌سازد. برخی مزایای بکارگیری FOHPN در تشخیص نفوذ در ادامه ذکر شده است:

- شبکه‌پتری ابزاری قدرتمند، گرافیکی و جذاب است که بکارگیری آن در مدل‌سازی سبب می‌شود که اپراتور ارتباط گرافیکی و مؤثری با محیط برنامه نویسی برقرار نماید و درک مناسبی از مدل، ساختار و اجزای سیستم داشته باشد.
- ریاضیات و محاسبات نظریه شبکه‌پتری در مقایسه با سایر ابزارها تا حدود زیادی ساده و قابل فهم بوده و این امر اجرای برنامه را نسبت به سایر ابزارها به مراتب سریعتر می‌نماید. تشخیص نفوذ در کوتاهترین زمان یک الویت مهم در زیرساخت‌های حیاتی است.
- کنترل نمودن سیستمی که توسط شبکه‌پتری مدل شده است، ساده‌تر بوده و قانون کنترل صراحتاً قابل محاسبه و اعمال خواهد بود.
- مانیتور سیستم و تشخیص خطا با بکارگیری نظریه شبکه‌پتری قابل پیاده سازی، مؤثر و کارا می‌باشد. خطا در ابزار شبکه‌پتری به عنوان یک حالت ممنوع قابل تعریف بوده و از این رو تشخیص خطا به نحو مطلوبی امکان پذیر است.

کارایی را به نسبت روش‌های طبقه بندی موجود بهبود ببخشد. شبکه عصبی در حوزه تشخیص غیرمتعارف به صورت گسترده بکار گرفته شده است و از مزایای آن می‌توان از نرخ تشخیص مناسب نام برد [۲۴-۲۲]. الگوریتم فازی با وزن‌های تصادفی جهت تشخیص نفوذ در [۲۵] بکار گرفته شده است، که توان محاسباتی و یادگیری بالایی ایجاد نموده است. الگوریتم ژنتیک [۲۶، ۲۷] و ویولت [۲۸] از دیگر راهکارهای مورد استفاده در تشخیص غیرمتعارف می‌باشند. در [۲۹] روش PSO^۱ برای ایجاد وزن‌ها بکار گرفته شده است تا مجموعه‌ای از طبقه بندی‌ها را با دقت بیشتری ایجاد نماید. الگوریتم مبتنی بر اطلاعات متقابل، ویژگی مطلوب برای طبقه بندی را به صورت تحلیلی انتخاب می‌نماید. الگوریتم انتخابی مبتنی بر اطلاعات متقابل می‌تواند ویژگی‌های خطی و غیر وابسته به داده‌ها را نیز بررسی نماید [۳۰]. امروزه تحقیقات محدودی بر تشخیص حملات سایبری با استفاده از ایده شبکه‌پتری، متمرکز شده است. در [۳۱] از شبکه‌پتری رنگی جهت طراحی درخت خطا و ارائه و پیاده سازی سیستم‌های تشخیص نفوذ مبتنی بر عامل‌ها، استفاده شده است. همچنین ایده شبکه‌پتری تصادفی تعمیم یافته برای مدل‌سازی حملات و تهدیدات در سیستم اسکادا بکار گرفته شده است [۳۲]. توماس چن و همکاران، توانایی شبکه‌پتری در مدل‌سازی حملات سایبری-فیزیکی به شبکه‌های هوشمند را نشان داده‌اند [۳۳].

از آنجایی که زیرساخت‌های حیاتی سیستم‌هایی ترکیبی از دینامیک‌های پیوسته و رخداد گسسته هستند [۳۴]، بکارگیری هر روش پیوسته و یا رخداد گسسته جهت مدل‌سازی و تشخیص خطا (خطای فیزیکی و یا سایبری) بخشی از دینامیک سیستم را در نظر نگرفته و قادر نخواهد بود همزمان دینامیک‌های پیوسته و رخداد گسسته و ارتباطات مابین آن‌ها را مدل نماید. از این رو امروزه مدل‌سازی و تشخیص خطا بر اساس روش‌های ترکیبی در زیرساخت‌های حیاتی مورد توجه قرار گرفته است [۳۵، ۳۴]. در این مقاله، روش شبکه‌پتری ترکیبی فازی عصبی جهت تشخیص نفوذ در زیرساخت‌های حیاتی پیشنهاد شده است، که علاوه بر در نظر گرفتن همزمان دینامیک‌های پیوسته و رخداد گسسته و ارتباطات مابین آن‌ها، قادر است حملات نفوذ را در کوتاهترین زمان و با دقت بالا تشخیص دهد. عملکرد روش پیشنهادی با اعمال به مجموعه داده استاندارد DARPA (تنها پایگاه داده معتبر جهت تشخیص حملات نفوذ) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پایداری سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی، به ازای هر گونه شرایط موجود در شبکه ارتباطی و پارامترهای ورودی اثبات شده است.

در ادامه این مقاله ابتدا در بخش ۲ مروری کوتاه بر نظریه شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول (FOHPN) ارائه خواهد شد. بخش ۳ روش پیشنهادی شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی در تشخیص نفوذ شرح داده خواهد شد. جهت ارزیابی عملکرد، روش پیشنهادی به داده‌های استاندارد DARPA اعمال شده است. پردازش اولیه و استخراج مولفه‌های اصلی داده‌ها در بخش ۴ شرح داده شده است. بخش ۵ نتایج شبیه سازی ارائه و

^۲ Fluid^۱ Particle Swarm Optimization

تعاریف را می‌توان برای گذرهای ورودی و خروجی یک جایگاه نیز نوشت. بیان گرافیکی شبکه‌پتری ترکیبی در شکل ۱ نشان داده شده است.



گذر گسسته گذر پیوسته جایگاه گسسته جایگاه پیوسته

شکل ۱: جایگاه‌ها و گذرهای تشکیل دهنده شبکه‌پتری هیبرید
تابع $T_d: T_d/T_i \rightarrow R^+$ زمان مرتبط با گذرهای گسسته زمانی را نشان می‌دهد. در این نظریه به هر $t_i \in T_D$ یک تاخیر آتش کردن ثابت $\delta_i = D(t_i)$ متناظر می‌گردد. به هر گذر زمانی با توزیع نمایی $t_i \in T_E$ یک نرخ آتش کردن متوسط $\lambda_i = D(t_i)$ نسبت داده می‌شود. $1/\lambda_i$ تاخیر آتش کردن متوسط است، که λ_i پارامتر مربوط به توزیع نمایی متناظر می‌باشد.

تابع سرعت‌های آتش کردن گذرهای پیوسته به صورت $R_o^+ = R^+ \cup \{\infty\}$ تعریف می‌شود که داریم: $C: T_c \rightarrow R_o^+ \times R_o^+$.
برای هر گذر پیوسته $t_i \in T_c$ داریم $C(t_i) = (V_i', V_i)$ ، $V_i' \leq V_i$.
می‌نیم سرعت آتش کردن (mfs) و V_i ماکزیمم سرعت آتش کردن (MFS) می‌باشد. عبارت C_{xy} ، که $x, y \in \{c, d\}$ مرتبط با T_y و P_x است. حالت فعال بودن یک گذر پیوسته، سرعت فایر کردن آنی^۷ (IFS) قابل قبول آن گذر v_i را تعریف می‌نماید. ماتریس تلاقی در یک شبکه به فرم $A(p, t) = Post(p, t) - Pre(p, t)$ تعریف می‌شود. برای ماتریس تلاقی داریم:

$$A = \begin{bmatrix} A_{cc} & A_{cd} \\ A_{dc} & A_{dd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{xy} = Post(P_i, t_j) - Pre(P_i, t_j),$$

$$P_i \in P_x, t_j \in T_y, x, y \in \{c, d\}$$

نشانه‌گذاری^۸ تابعی است که به هر جایگاه گسسته مقداری غیرمنفی از نشانه^۹ (که با نقاط مشکی رنگ نمایش داده می‌شود) و به هر جایگاه پیوسته مقداری سیال نسبت می‌دهد m_p نشانه‌گذاری جایگاه p می‌باشد. مقدار نشانه‌گذاری در زمان τ با $m(\tau)$ نمایش داده می‌شود. نمادهای m^c و m^d متناظر با مقدار نشانه‌گذاری P_c و P_d هستند.

۳- روش پیشنهادی شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول

فازی عصبی در تشخیص نفوذ

- نمایش عملکرد موازی^۱، همزمان^۲ و متقارن^۳ در مدل شبکه‌پتری بسیار آسان و قابل درک است.
- پارامترهای تشخیص نفوذ هر دو ماهیت پیوسته و گسسته را دارا هستند. FOHPN یک ابزار مناسب برای مدل کردن این دینامیک‌ها و ارتباطات بین آنهاست.

شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول به صورت $(N, m(\tau_0))$ تعریف می‌شود که N یک سیستم FOHPN با شرایط اولیه^۴ $m(\tau_0)$ است. یک سیستم FOHPN بصورت $N = (P, T, Pre, Post, m_0)$ بوده که در آن P مجموعه محدودی از $|P|$ جایگاه^۵ بصورت $P = P_d \cup P_c$ می‌باشد. P_d بیانگر مجموعه جایگاه‌های گسسته و P_c بیانگر مجموعه جایگاه‌های پیوسته است. $T = T_c \cup T_d$ مجموعه محدودی از $|T|$ گذر^۵ است، که در آن T_c مجموعه گذرهای پیوسته و T_d مجموع گذرهای گسسته متشکل از گذرهای آنی T_i ، گذرهایی با زمان حقیقی T_i و گذرهایی با زمان تصادفی T_s است. همانند شبکه‌پتری عادی در شبکه‌پتری ترکیبی نیز رابطه $T \cap P = \emptyset$ برقرار می‌باشد. فرمول‌بندی یک سیستم FOHPN مشابه [۴۲] در نظر گرفته شده است. در این بخش به اختصار نظریه شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول بیان گردیده، جزئیات فرمول بندی در [۴۲] شرح داده شده است.

توابع تلاقی Pre و $Post$ بصورت زیر تعریف می‌شوند. تابع Pre ($Post$) بیانگر وزن کمان^۶ ورودی به (خروجی از) هر گذر است. که داریم: $R_o^+ = R^+ \cup \{0\}$.

$$Pre: \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbb{N} \\ P_c \times T \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \end{cases} \quad Post: \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbb{N} \\ P_c \times T \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \end{cases} \quad (1)$$

$Pre(P_i, t_j)$ بیانگر وزن کمانی است که جایگاه i -ام را به گذر j -ام متصل می‌نماید و $Post(P_i, t_j)$ بیانگر وزن کمانی است که گذر j -ام را به جایگاه i -ام متصل می‌کند. نماد $\bullet t$ مجموعه جایگاه‌هایی است که کمان ورودی به گذر t دارند. $\bullet t = \bullet t \cap P_d$ (د) مجموعه جایگاه‌های گسسته متعلق به $\bullet t$ و $\bullet t = \bullet t \cap P_c$ (c) مجموعه جایگاه‌های پیوسته متعلق به $\bullet t$ است. $\bullet t$ بیانگر مجموعه جایگاه‌هایی از شبکه است که از گذر t به آنها وارد می‌شود. $t^{(d)} = \bullet t \cap P_d$ جایگاه‌های گسسته و $t^{(c)} = \bullet t \cap P_c$ مجموعه جایگاه‌های پیوسته متعلق به $\bullet t$ است. همین

^۶ Arc

^۷ Instantaneous firing speed

^۸ Marking

^۹ Token

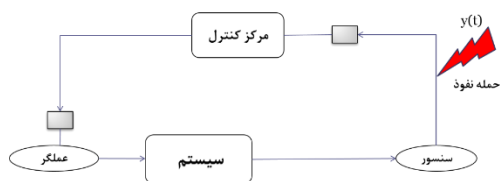
^۱ Parallel

^۲ Synchronic

^۳ Concurrent

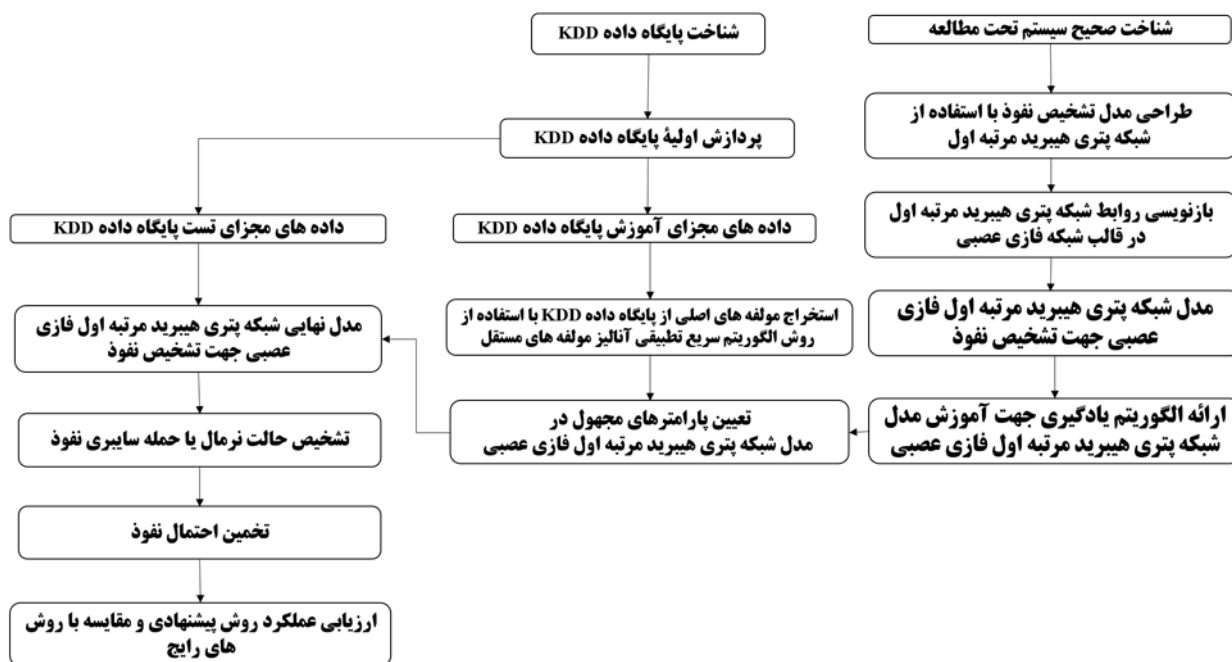
^۴ Place

^۵ Transition

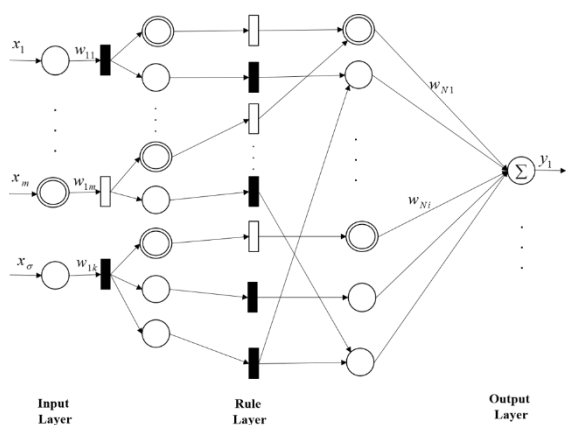


شکل ۲: نمایش حملات نفوذ به کنترلر از طریق سنسور

از این رو تشخیص حملات سایبری نفوذ در سیستم‌های کنترل به صورت زمان حقیقی و در زمان کوتاه اهمیت بسیاری دارد و از جمله اهداف این مقاله است. الگوریتم شکل ۳ گام‌های عملکردی در مقاله را نمایش می‌دهد. گام‌های عملکردی به سه فاز کلی تقسیم می‌گردند: طراحی مدل شبکه پتری ترکیبی فازی عصبی، پردازش پایگاه داده و استخراج مولفه‌های اصلی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با اعمال به پایگاه داده تست.



شکل ۳: الگوریتم نمایش گام‌های عملکردی



شکل ۴: ساختار پیشنهادی شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی

همانگونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، حملات سایبری می‌تواند با هدف ایجاد اختلال در عملکرد سنسور طراحی شوند و یا مستقیماً کنترل کننده را مورد تهاجم قرار دهند. در هر حالت با نفوذ به اطلاعات و تزریق داده‌های نادرست، اطلاعاتی که کنترلر بر اساس آن تصمیم‌گیری و عمل می‌نماید، مخدوش گردیده و بدیهی است که کنترل کننده با تحلیل این اطلاعات نادرست، عملکرد صحیحی نخواهد داشت و ممکن است این تصمیمات کنترلر، اثرات مخرب جبران ناپذیری به سیستم تحمیل نماید.

در ادامه این بخش مراحل طراحی مدل تشخیص نفوذ با استفاده از مدل شبکه پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی تشریح می‌گردد. پردازش پایگاه داده و استخراج مولفه‌های اصلی در بخش ۴ و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با اعمال پایگاه داده تست در بخش ۵ ارائه شده است.

شبکه FOHPN با سه لایه که در شکل ۴ نمایش داده شده است را در نظر بگیرید. مدل پیشنهادی دارای سه لایه است: لایه ورودی، لایه قانون، لایه خروجی.

t_j مجموعه گذرهای لایه j ام از مدل شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی است که می‌تواند پیوسته یا گسسته باشد $j = 1, 2, \dots, n$. وزن کمان‌های لایه j ام به صورت $w_1^j, w_2^j, \dots, w_g^j$ در نظر گرفته شده است. جهت تعریف رفتار نرمال و حملات در مدل پیشنهادی، می‌توان به ازای هر حالت وزن به خصوصی تعریف نمود. در این حالت یک مدل شبکه‌پتری هیبرید مرتبه اول با ابعاد بسیار بالا خواهیم داشت، که عملکرد مطلوبی ندارد. ایده مطرح شده در این مقاله استفاده از روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی جهت تشخیص حملات نفوذ است. در ادامه مفاهیم شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول به گونه‌ای بازنویسی می‌گردد که بتواند بر فرمول بندی فازی عصبی انطباق یابد.

دینامیک مدل FOHPN با وقوع رخداد ماکرو^۱ تغییر می‌یابد. ابتدا فرمول بندی برای گذرهای گسسته شرح داده خواهد شد. رخداد ماکرو با آتش کردن گذر گسسته رخ می‌دهد. این امر باعث تغییر نشانه‌گذاری گسسته یا فعال/غیرفعال شدن گذر پیوسته می‌گردد. مدل پیشنهادی این مقاله جهت تشخیص نفوذ به گونه‌ای است که هر گاه گذر گسسته فعال گردد، تنها نشانه‌گذاری گذرهای گسسته تغییر پیدا می‌کند.

فرض کنید $\sigma(k)$ بردار شمارش آتش کردن^۲ در زمان k باشد. رفتار میکرو در مدل FOHPN در طول دوره ماکرو k ام بدین صورت تعریف خواهد شد.

$$m^d(k+1) = m^d(k) + C_{dd} \cdot \sigma(k+1) \quad (3)$$

$$m^c(k+1) = m^c(k)$$

با انجام فرآیند فازی سازی، ورودی قطعی^۳ X_i به ورودی‌هایی فازی با تابع عضویت انطباق یافته گوسین با تعریف زیر تبدیل می‌گردد.

$$\mu_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{s_{ij}^2}\right) \quad (4)$$

S_{ij} و C_{ij} به ترتیب مرکز و عرض تابع عضویت می‌باشند. در این صورت برای آتش کردن گذر گسسته داریم:

$$t_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } \mu_{ij} > d_{th} \\ 0 & \text{if } \mu_{ij} < d_{th} \end{cases} \quad (5)$$

d_{th} یک مقدار آستانه است که بر اساس [۴۳] داریم:

$$d_{th} = \frac{\alpha_{th} \exp(-\beta_{th} E_{th})}{1 + \exp(-\beta_{th} E_{th})} \quad (6)$$

$$X^j = W^T M = \sum_{i=1}^g m(p_i^j) \prod_i^{\sigma} \mu_{ij} w_i^j \quad (7)$$

$$Y(X^j) = F(X^j) = F(W^T M)$$

m نشانه‌گذاری شبکه است که از (۳) قابل محاسبه است. σ تعداد ورودی‌های شبکه پیشنهادی است. X, W, Y, M به ترتیب بردارهای ورودی، خروجی، وزن کمان و نشانه‌گذاری می‌باشند. برای گذرهای پیوسته در مدل پیشنهادی شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی، فرمول بندی مشابهی می‌توان نوشت. سرعت آتش کردن آبی گذر $t_i \in T_c$ در زمان τ با $v_i(\tau)$ نمایش داده می‌شود. نشانه‌گذاری جایگاه پیوسته با این فرض که هیچ گذر گسسته ای آتش نکند و تمامی سرعت‌ها پیوسته باشند، به فرم زیر تغییر می‌نماید.

$$m(\tau + d\tau) = m(\tau) + w.v(\tau)d(\tau) \quad (8)$$

$$\frac{m(\tau + d\tau) - m(\tau)}{d(\tau)} = w.v(\tau)$$

از این رو داریم:

$$\frac{dm(\tau)}{d\tau} = \sum_{t_i \in T_c} C(p, t_i).v_i(\tau) \quad (9)$$

رخداد ماکرو همچنین زمانی روی می‌دهد که جایگاه پیوسته تهی گردد. در نظر بگیرید τ_k, τ_{k+1} زمان‌های وقوع رخداد ماکرو باشند. این بازه زمانی ماکرو پریود (Δ_k) نامیده می‌شود. در این مقاله فرض شده است که در طول یک ماکرو پریود گذرهای پیوسته، IFS ثابتی دارند.

فرض کنید τ_0 زمان اولیه و $\tau_k (k > 0)$ زمانی است که رخداد ماکرو اتفاق می‌افتد. $v(\tau_k)$ بردار IFS در طول ماکرو پریود Δ_k است. $\sigma(\tau_k)$ بردار شمارش آتش کردن در زمان τ_k است. میکرو مدل FOHPN در طول ماکرو پریود k ام به صورت زیر نتیجه می‌شود [۴۲]:

$$m^c(\tau) = m^c(\tau_k) + C_{cc}.v(\tau_k).(\tau - \tau_k) \quad (10)$$

$$m^d(\tau) = m^d(\tau_k)$$

خروجی لایه j ام مدل FOHPN در این حالت نیز به فرم $Y(X^j) = F(X^j) = F(W^T M)$ می‌تواند نوشته شود.

^۲ Crisp input

^۱ Macro event

^۳ Firing count vector

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{i\beta}^j} = \frac{\partial E(n)}{\partial Y(n)} * \frac{\partial Y(n)}{\partial w_{i\beta}^j} = \quad (۱۶)$$

$$\sum_{n=1, \dots, q} \|Y(n) - \bar{Y}(n)\| * \frac{\partial F(X^j)}{\partial X^j} * \frac{\partial X^j}{\partial w_{i\beta}^j}$$

پیش از این نیز اشاره شد که در شبکه FOHPN برای گذر گسسته با احتساب لایه ورودی و خروجی $k+2$ لایه داریم که به صورت $0, \dots, k+1$ شماره گذاری شده است. تعداد جایگاه‌های ورودی r و تعداد جایگاه‌های خروجی L در نظر گرفته شده است. در سایر لایه‌ها N جایگاه داریم.

$$\frac{\partial F(X^j)}{\partial X^j} = \frac{\zeta^j}{1 + \exp(-b(X^j - \lambda^j))} + \quad (۱۷)$$

$$\frac{\zeta^j X^j b * \exp(-b(X^j - \lambda^j))}{[1 + \exp(-b(X^j - \lambda^j))]^2}$$

$$\frac{\partial X^j}{\partial w_{i\beta}^j} = m(p_i^j) \prod_i^\sigma \mu_{ij}$$

الگوریتم ۱ برای حداقل کردن خطای روش انتشار معکوس ارائه خواهد شد.

الگوریتم ۱:

گام ۰: قرار دهید $\rho = P$ ، $\kappa = 0$ و $error = \varepsilon$. مقدار ماکزیمم ایک‌ها است).

گام ۱: تمامی وزن‌ها و پارامترهای از پیش تعیین شده می‌بایست مقدار دهی اولیه شوند.

گام ۲: محاسبه خروجی هر لایه از شبکه توسط فرمول (۱۲).

گام ۳: محاسبه خطای انتشار لایه خروجی $\Delta_i^j(n)$ به صورت رو به عقب $j = k+1, k, \dots, 1$.

$$\Delta_i^{k+1}(n) = [y_i(n) - \bar{y}_i(n)] \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=z_i^{k+1}} \quad (۱۸)$$

گام ۴: محاسبه ترم خطای انتشار مربوط به لایه‌های میانی با استفاده از رابطه زیر:

$$\Delta_i^j(n) = \sum_{\varphi=1}^{N^{j+1}} \Delta_\varphi^{j+1} w_{\varphi i}^j \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=z_i^j} \quad (۱۹)$$

$$z_i^j(n) = \sum_{\alpha=1}^{N^{j-1}} x_\alpha^{j-1}(n) w_{i\alpha}^{j-1} \prod_i^\alpha \mu_{ij}$$

گام ۵: به روز نمودن وزن‌ها، C_{ij} و S_{ij} با بکارگیری روابط زیر.

m نشانه گذاری پیوسته و $F = v(t)$ می‌باشد. روش انتشار معکوس^۱، در این مقاله جهت محاسبه وزن کمان‌های مدل شبکه‌پتری پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

شبکه پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی با k لایه پنهان را در نظر بگیرید. با احتساب لایه ورودی و خروجی $k+2$ لایه داریم که به صورت $0, \dots, k+1$ شماره گذاری شده است. تعداد جایگاه‌های ورودی r و تعداد جایگاه‌های خروجی L در نظر گرفته شده است. در سایر لایه‌ها N جایگاه داریم.

$$Y(n) = [y_1^{k+1}(n), \dots, y_L^{k+1}(n)]^T \quad (۱۱)$$

$$X^\circ(n) = [x_1^\circ(n), \dots, x_r^\circ(n)]^T$$

n نشانه‌دهنده زمان آموزش است. برای خروجی لایه j ام می‌توان نوشت:

$$\bar{y}_i^{j+1}(n) = F\left(\sum_{\beta=1, \dots, N^j} w_{i\beta}^j \prod_i^\beta \mu_{ij} x_\beta(n)\right) \quad (۱۲)$$

$$\bar{Y}(n) = [\bar{y}_1^{k+1}(n), \dots, \bar{y}_L^{k+1}(n)]^T$$

$w_{i\beta}$ وزن کمان بین جایگاه‌های i و β در لایه‌های مختلف است. جهت محاسبه وزن کمان‌ها در مدل پیشنهادی، با استفاده از q جفت داده آموزش ورودی و خروجی، می‌بایست یک بهینه سازی انجام شود. وزن کمان‌ها بایستی به گونه ای تعیین گردد که خطا حداقل گردد. تابع هزینه خطای مربعی جمعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{n=1, \dots, q} \|Y(n) - \bar{Y}(n)\|^2 = \sum_{n=1, \dots, q} E(n) \quad (۱۳)$$

با استفاده از مفهوم گرادیان داریم:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{i\beta}^j} = \sum_{t=1, \dots, q} \frac{\partial E(n)}{\partial w_{i\beta}^j} \quad (۱۴)$$

با داشتن مقادیر مناسب نرخ آموزش γ داریم:

$$w_{i\beta}^j(\kappa+1) = w_{i\beta}^j(\kappa) - \gamma \frac{\partial E(n)}{\partial w_{i\beta}^j}. \quad (۱۵)$$

وزن‌های جدید با انجام محاسبات برای همه نمونه‌های آموزش قابل محاسبه خواهند بود. یکبار طی این مراحل برای همه نمونه‌ها یک دوره^۲ نامیده می‌شود. قبل از شروع اولین ایک‌ها تعداد قوانین فازی، وزن‌های اولیه، مرکز و عرض اولیه تابع‌های عضویت و سایر پارامترهای تعریف شده در روش پیشنهادی، بایستی مقدار دهی شوند. این مقادیر می‌توانند به صورت تصادفی انتخاب شوند. البته انتخاب هوشمندانه این مقادیر در کاهش زمان همگرایی موثر خواهد بود. برای محاسبه $\frac{\partial E(n)}{\partial w_{i\beta}^j}$ داریم:

در همه مقالات این حوزه در بخش آموزش “10% KDD” مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد نمونه‌های هر حمله در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱: مجموعه داده تشخیص نفوذ 99 KDD 10% [۴۴]

تعداد نمونه‌ها	حمله	تعداد نمونه‌ها	دسته بندی
280790	smurf	391458	DOS
107201	neptune		
2203	back		
979	teardrop		
264	pod		
21	land		
1020	warezclient	1126	R2I
53	guess_passwd		
20	warezmaster		
12	imap		
8	ftp_write		
7	multihop		
4	Phf		
2	Spy	52	U2R
30	buffer_overflow		
10	rootkit		
9	loadmodule		
3	perl	4107	Probe
1589	satan		
1247	ipsweep		
1040	portsweep		
231	nmap	97277	Normal

بر اساس [۴۵] در مجموعه داده 99 KDD داده‌های تکراری بسیاری ثبت شده است که بکارگیری این داده‌ها در بحث آموزش تنها باعث اتلاف زمان می‌گردد. از آنجا که بحث زمان در تشخیص حملات سایبری حیاتی است، داده‌های مجزا و متفاوت از این پایگاه داده استخراج شده است. تعداد داده‌های مجزا در هر طبقه بندی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$w_{i\beta}^{j-1}(\kappa+1) = w_{i\beta}^{j-1}(\kappa) + \gamma \sum_{n=1}^q \Delta_i^j(n) x_{\beta}^{j-1}(n) \prod_i^{\alpha} \mu_{ij}. \quad (20)$$

$$c_{ij}(\kappa+1) = c_{ij}(\kappa) - \gamma_c \frac{\partial E}{\partial c_{ij}}.$$

$$s_{ij}(\kappa+1) = s_{ij}(\kappa) - \gamma_s \frac{\partial E}{\partial s_{ij}}.$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij}} = (Y(n) - \bar{Y}(n)) m(p_i^j) \prod_i^{\sigma} \mu_{ij} \frac{(x_i - c_{ij})}{s_{ij}^2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial s_{ij}} = (Y(n) - \bar{Y}(n)) m(p_i^j) \prod_i^{\sigma} \mu_{ij} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{s_{ij}^3}$$

گام ۶: پس از هر اپیک ترم خطا (۱۳) می‌بایست محاسبه گردد. در صورتی که $error > \varepsilon$ یا $\kappa < P$ باشد $\kappa = \kappa + 1$ برو به گام ۱. در غیر اینصورت برو به گام ۷.

گام ۷: پایان.

۴- پردازش مجموعه داده استاندارد DARPA

مجموعه داده‌های ارزیابی DARPA توسط آزمایشگاه‌های MIT Lincoln تهیه شده است. هر ارتباط ثبت شده به صورت نرمال یا حمله با ذکر نوع دقیق حمله مشخص شده است. هر ارتباط ثبت شده از ۱۰۰ بایت تشکیل شده است. داده‌های تست ثبت شده در بازه دو هفته جمع‌آوری شده اند و حدود دو میلیون داده است. داده‌های 99 KDD که جهت آموزش بکار می‌رود، به صورت تقریبی از ۴,۹۰۰,۰۰۰ بردار داده تشکیل شده است. هر یک از بردارها از ۴۱ پارامتر شامل فاصله، نوع پروتکل، سرویس، پرچم^۱، بایت‌های ورودی و... تشکیل شده است که بر حسب نرمال یا حمله برچسب زده شده اند. از آنجا که این پارامترها برخی پیوسته و برخی ماهیت گسسته دارند، شبکه‌پتری ترکیبی قادر است خصوصیات شبکه را مدل نماید. اطلاعات جامع در خصوص این مجموعه داده در [۴۴] موجود است. حملات به ۴ دسته تقسیم بندی می‌شوند:

- Denial of service (DOS): وقتی مهاجم تلاش می‌کند کاربر معتبر را از استفاده از سرویس منع کند.
- Remote to Local (R2L): مهاجم نام کاربری بر روی سیستم قربانی ندارد، ولی تلاش می‌کند به آن دسترسی پیدا کند.
- User to Root (U2R): مهاجم دسترسی محلی به سیستم قربانی دارد و سعی می‌نماید امتیازات فوق العاده ای برای خود ایجاد نماید.
- Probe: مهاجم تلاش می‌کند از میزبان هدف اطلاعات حیاتی بدست آورد.

^۱ Flag

معیارهای نرخ تشخیص (DR^*) و نرخ مثبت نادرست (FPR^*) ملاک ارزیابی عملکرد سیستم‌های تشخیص نفوذ است [۴۸،۴۷]. جهت محاسبه معیار نرخ تشخیص در ساختار شبکه پیشنهادی داریم:

$$P_{i,j}^{DR} = \frac{M_{i,j}^{ID}}{N_j} \quad (21)$$

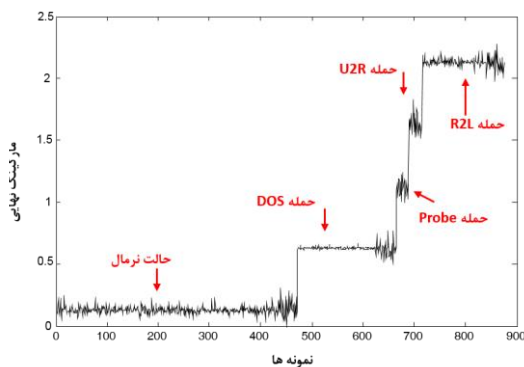
$$P_{i,j}^{FPR} = \frac{F_{i,j}^{alarm} - M_{i,j}^{ID}}{F_{i,j}^{alarm}}$$

$$P_{i,j}^{ND} = 1 - P_{i,j}^{DR}$$

$P_{i,j}^{DR}$ احتمال تشخیص صحیح حمله از نوع j توسط سیستم تشخیص نفوذ i ام است. $M_{i,j}^{ID}$ تعداد حملات صحیح تشخیص داده شده از نوع j توسط سیستم تشخیص نفوذ i ام می‌باشد. N_j تعداد کل حملات از نوع j وارد شده به سیستم تحت مطالعه است.

احتمال تشخیص $P_{i,j}^{FPR}$ ثبت نادرست حمله از نوع j توسط سیستم تشخیص نفوذ i ام است. $F_{i,j}^{alarm}$ تعداد کل هشدارهای حمله از نوع j توسط سیستم تشخیص نفوذ i ام می‌باشد. این مقدار در مدل شبکه‌پتری، متناظر است با نشانه‌گذاری جایگاه خروجی مرتبط با حمله j ام (p_j^{DR}) یا نرخ آتش نمودن گذرهای p_j^{DR} .

شکل ۵ تشخیص حملات با بکارگیری روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول عصبی را نمایش می‌دهد. استفاده از این سیستم تشخیص نفوذ شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول عصبی [۴۹] بدون در نظر گرفتن الگوریتم فازی، اگرچه نرخ تشخیص مطلوبی خواهد داشت، اما نرخ مثبت نادرست در این روش تا حدودی نامطلوب است. میزان نرم خطا با بکارگیری این روش ۰،۴۷ می‌باشد. بالا بودن نرخ مثبت نادرست اثرات مخربی بر سیستم خواهد داشت، زیرا با گزارش حمله نادرست توسط سیستم تشخیص نفوذ، عملکرد سیستم تحت کنترل مختل می‌گردد.



شکل ۵: نمایش تشخیص حملات با بکارگیری روش شبکه‌پتری

ترکیبی مرتبه اول عصبی

شکل ۶ تشخیص حملات با بکارگیری روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی را نمایش می‌دهد. میزان نرم خطا با استفاده از این روش ۰،۱۸۳ می‌باشد. با بکارگیری الگوریتم فازی نه تنها نرخ تشخیص حملات

جدول ۲: نمایش تعداد داده‌های مجزا در مجموعه KDD 99

دسته بندی	Normal	Probe	U2R	R2L	DOS
داده‌های مجزای آموزش	2996	11656	52	995	45927
داده‌های مجزای تست	9711	1106	37	2199	5741

جهت استخراج داده‌های مستقل در بحث آموزش، الگوریتم سریع تطبیقی آنالیز مولفه‌های مستقل^۱ (FastAdaptiveOgICA) در این مقاله بکار گرفته شده است. این الگوریتم سیگنال چند متغیره را به سیگنال‌های مستقل غیرگوسی^۲ تبدیل می‌نماید [۳۲]. پایگاه داده تشخیص نفوذ KDD 99 توزیع غیرگوسی دارد. از این رو الگوریتم‌های ICA می‌توانند در استخراج مولفه‌های اصلی مؤثر واقع شوند. کاهش ابعاد داده قادر است پیچیدگی این مسئله را کاهش دهد و نقش مهمی در افزایش کارایی به خصوص در تشخیص نفوذ زمان حقیقی ایفا می‌نماید.

الگوریتم FastAdaptiveOgICA نه تنها سریع، تطبیقی و تکرار شونده با الگوریتم شبکه عصبی است، بلکه با سرعت همگرایی و کارایی بالا سیگنال‌های گوسین را تفکیک می‌نماید. جزئیات فرمول بندی این الگوریتم به تفصیل در [۴۶] شرح داده شده است. جدول ۳ تعداد داده‌های آموزش پس از استخراج مولفه‌های اصلی را نمایش می‌دهد.

جدول ۳: نمایش تعداد داده‌های مجموعه KDD 99 پس از استخراج مولفه‌های اصلی

	Normal	Probe	U2R	R2L	DOS
ابعاد قبل از اعمال ICA	2996	11656	52	995	45927
ابعاد کاهش یافته	138	132	30	86	138

۵- ارزیابی روش پیشنهادی و نتایج شبیه سازی

جهت ارزیابی عملکرد، روش شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی که در بخش ۳ به تفصیل ارائه گردید، به پایگاه داده (پس از استخراج مولفه‌های اصلی که در بخش ۴ شرح داده شد) اعمال گردیده و نتایج شبیه سازی توانایی روش پیشنهادی در تشخیص انواع حملات نفوذ را تایید می‌نماید. ۴۱ پارامتر تعریف شده در پایگاه داده که پیش از این به آن اشاره گردید، معیار تشخیص حالت نرمال یا حمله قرار خواهند گرفت. جزئیات و تعریف دقیق این پارامترها در [۴۴] شرح داده شده است. این پارامترها به عنوان شرایط اولیه به شبکه پیشنهادی اعمال گردیده و نشانه‌گذاری نهایی شبکه بیانگر عملکرد در حالت نرمال یا تشخیص هر یک از حملات نفوذ است.

^۲ Detection Rate

^۴ False Positive Rate

^۱ Fast Adaptive Independent Component Analysis

^۲ non-Gaussian

سیستم را تضمین خواهد نمود. همانگونه که نشان داده شده است، روش تشخیص نفوذ مبتنی بر شبکه‌پتری پیشنهادی، از سریعترین روش مورد مقایسه، ۱۳ برابر در تشخیص حملات سریعتر عمل کرده است. این امر با توجه به سادگی ریاضیات نظریه شبکه‌پتری و توانایی عملکرد موازی و همزمان امری مورد انتظار به نظر می‌رسد. روش شبکه‌پتری ترکیبی فازی عصبی که در این مقاله جهت تشخیص حملات سایبری نفوذ در زیرساخت‌های حیاتی پیشنهاد گردید، قادر است همزمان دینامیک‌های پیوسته و رخداد گسسته و ارتباطات آن‌ها را مدل نماید. این خصوصیت در کنار سرعت عملکرد مناسب، برتری روش پیشنهادی در قیاس با روش‌های مرسوم است. در صورت مدلسازی ترکیبی زیرساخت‌های حیاتی در کنار الگوریتم‌های تشخیص خطای ترکیبی است که مدلی جامع خواهیم داشت که در برگیرنده تمامی خصوصیات این ابرسیستم‌ها خواهد بود.

۶- اثبات پایداری مدل پیشنهادی

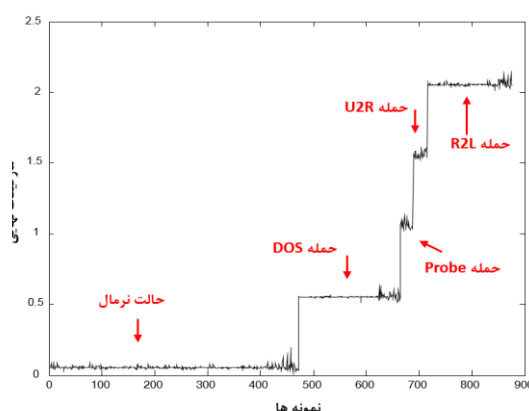
اثبات پایداری و کراندار بودن شبکه‌پتری ترکیبی همچنان به عنوان یک چالش پیش روی محققان است. در این مقاله با استفاده از هم ارزی شبکه‌پتری ترکیبی تک نرخ (single-rate) با ترکیبی اتوماتا (skewed clocks hybrid automata)، مدل پیشنهادی ترکیبی شبکه‌پتری مرتبه اول با یک مدل شبکه‌پتری گسسته هم ارز گردیده است. سپس با بکارگیری قضایای اثبات کراندار شبکه‌پتری گسسته، کراندار مدل پیشنهادی نشان شده است [۵۴].

جدول ۴: مقایسه نتایج عملکرد روش پیشنهادی

	Normal		DOS		Probe		U2R		R2L		زمان اجرا (s)
	DR	FPR	DR	FPR	DR	FPR	DR	FPR	DR	FPR	
Fuzzy neural FOHPN	98.1	0.4	100	0.3	99.6	0.35	99.0	0.2	96.2	0.15	0.1237
back propagation neural FOHPN Feedforward [49]	98.2	2.9	100	1.6	99.5	1.2	99.0	0.6	96.2	0.4	0.1228
BPNN [50]	79.8	-	97.5	-	99.1	-	34.5	-	98.9	-	2.50
RBF [51]	-	-	98.8	1.6	98.0	1.6	-	-	97.2	1.6	1.60
HPCANN [52]	-	-	100	0.7	100	0.5	-	-	97.2	0.6	-
MLP [53]	-	-	99.9	-	99.8	-	99.9	-	40	-	3.0

بدون از دست دادن کلیت فرض شده است $\{w_i\}$ ها یک مجموعه اول هستند و w_i ها هیچ فاکتور مشترکی ندارند.
ساختار یک شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول به گونه ای است که در هر گام مجموعه IFSهای مجاز $S(N, m) = \{v\}$ یک مجموعه یکتا است. این مجموعه صرف نظر از نشانه گذاری همواره یکسان می‌باشد.
با در نظر گرفتن $C(t_c) = (v', v)$ نتایج ذکر شده در حوزه خصوصیات HPN همواره برقرار است. در این حالت $S(N, m)$ یک

مناسب است، بلکه نرخ مثبت نادرست به میزان قابل قبولی کاهش یافته است. این امر با توجه به خصوصیات نظریه فازی قابل پیش بینی به نظر می‌رسد.



شکل ۶: نمایش تشخیص حملات با بکارگیری سیستم تشخیص نفوذ در جدول ۴ نتایج عملکرد روش پیشنهادی بر اساس دو معیار ذکر شده و همچنین سرعت تشخیص، با برخی روش‌های تشخیص نفوذ مورد مقایسه قرار گرفته است.

مقایسه روش پیشنهادی (جدول ۴)، نرخ تشخیص حملات مناسب سیستم تشخیص نفوذ را در مقایسه با روش‌های مشابه نشان می‌دهد. نرخ مثبت نادرست در این روش به میزان قابل قبولی کاهش یافته است. سرعت تشخیص حملات سایبری یکی از مهمترین معیارها در عملکرد سیستم‌های تشخیص نفوذ است. تشخیص حملات در کوتاهترین زمان ممکن، امنیت

تعریف ۱ [۵۴]: شبکه‌پتری ترکیبی تک نرخ، شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول است به گونه ای که داشته باشیم:

(۲۲)

$$\begin{aligned}
 T_c &= \{t_c\}, \\
 \bullet t_c &= \phi, \\
 C(t_c) &= (v, v'), v \in \mathbb{N}^+, \\
 \forall i \mid p_i \in P_c : Post(p_i, t_c) &= w_i \in \mathbb{N}^+
 \end{aligned}$$

$x(n \times 1)$ از مقادیر مثبت صحیح وجود داشته باشد به گونه ای که داشته باشیم $x^T A \leq 0$.

با در نظر گرفتن ماتریس تلاقی مدل شبکه‌پتری مرتبه اول پیشنهادی، بردار $x(n \times 1)$ برابر است با

$$x = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x^T A = \begin{bmatrix} -1 & \dots & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

با استناد به قضیه ۲ مدل شبکه‌پتری مرتبه اول پیشنهادی جهت تشخیص نفوذ، کراندار ساختاری است. در صورتی که یک شبکه‌پتری کراندار ساختاری باشد، بدین معنی است که به ازای هر نشانه‌گذاری اولیه، کراندار خواهد بود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی به ازای هر شرایطی موجود در شبکه ارتباطی و هر مقداری در پارامترهای ورودی تعریف شده، کراندار و پایدار خواهد بود.

۸- نتیجه‌گیری

زیرساخت‌های حیاتی در هر کشور از جمله آسیب‌پذیرترین سیستم‌ها در برابر حملات سایبری بوده و بیشترین حملات به شبکه‌های ارتباطی در زیرساخت‌های حیاتی، با هدف مختل نمودن عملکرد این سیستم‌ها طراحی می‌گردند. تشخیص حملات سایبری با دقت بالا و در کوتاهترین زمان، از مهمترین اهداف طراحی سیستم‌های کنترل می‌باشد. در این مقاله کنترلر شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول فازی عصبی جهت تشخیص حملات نفوذ پیشنهاد گردید. ارزیابی عملکرد، نه تنها نرخ تشخیص مناسب این روش را تایید می‌نماید، بلکه نشان می‌دهد که نرخ مثبت نادرست و زمان تشخیص حملات نفوذ در این روش به میزان چشمگیری کاهش یافته است. همچنین، اثبات پایداری مدل پیشنهادی بدون در نظر گرفتن شرایط موجود در شبکه ارتباطی و پارامترهای ورودی ارائه گردید.

مراجع

- [1] M. Govindarasu, A. Hahn, P. Sauer, Cyber-Physical Systems Security for Smart Grid, Future Grid Initiative White Paper, PSERC Publication, May 2012.
- [2] Depren, Ozgur, et al. "An intelligent intrusion detection system (IDS) for anomaly and misuse detection in computer networks." Expert systems with Applications 29.4, pp. 713-722, 2005.
- [3] J.P. Anderson, Computer security threat monitoring and surveillance, Technical Report, James P. Anderson Co., Fort Washington, PA, 1980.
- [4] Liao, Hung-Jen, et al, Intrusion detection system: A comprehensive review, Journal of Network and Computer Applications, 36.1, pp. 16-24, 2013.

سگمنت است و نشانه‌گذاری همه جایگاه‌های پیوسته ممکن است با نرخ‌های متفاوت افزایش یابد، اما نرخ‌های مرتبط با جایگاه‌های متفاوت، همواره یکسانند. از آنجایی که شبکه‌پتری ترکیبی تک‌نرخ با ترکیبی اتوماتا (skewed clocks hybrid automata) هم ارز است، خصوصیات شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول قابل تصمیم‌گیری خواهد بود. با در نظر گرفتن این هم ارزی و دنبال نمودن نظریه‌ها و قضایای مربوطه، مدل شبکه‌پتری گسسته معادل با مدل ترکیبی شبکه‌پتری مرتبه اول پیشنهادی بدست آمده، از این رو پایداری و کراندار بودن مدل پیشنهادی در این مقاله قابل ارزیابی خواهد بود.

قضیه ۱ [۵۴]: یک شبکه‌پتری ترکیبی مرتبه اول به صورت $N = (P, T, Pre, Post, C)$ را در نظر بگیرید، شبکه‌پتری گسسته هم ارز با N را می‌توان بدین صورت می‌توان تعریف نمود. شبکه $P/T = (P', T', Pre', Post')$ به گونه ای است که $P' = P$ همه جایگاه‌های N را شامل می‌شود، با این تفاوت که همه گسسته هستند.

$T' = T$ همه گذرهای N را شامل می‌شود، با این تفاوت که همه گسسته هستند.

$$Pre'(p, t) = \lfloor Pre(p, t) \rfloor,$$

$$Post'(p, t) = \lfloor Post(p, t) \rfloor$$

[•] نماد بخش صحیح است. جزییات و اثبات این قضیه در [۵۰] شرح داده شده است.

بر اساس قضیه ۱، شبکه‌پتری گسسته هم ارز با مدل شبکه‌پتری مرتبه اول پیشنهادی دارای ماتریس تلاقی زیر می‌باشد.

$$A_{51 \times 41} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \ddots & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} 39 \\ 11 \end{array} \right\}$$

استنباط ۱: مدل شبکه‌پتری مرتبه اول پیشنهادی جهت تشخیص نفوذ، کراندار ساختاری^۱ است.

قضیه ۲ [۵۵]: فرض کنید $A(n \times m)$ ماتریس تلاقی یک شبکه‌پتری گسسته باشد. این شبکه‌پتری کراندار ساختاری است اگر و تنها اگر بردار

- [17] Helmer, Guy, et al, Software fault tree and coloured Petri netbased specification, design and implementation of agent-based intrusion detection systems, *International Journal of Information and Computer Security*, 1.1, pp. 109-142, 2007.
- [18] Horng, Shi-Jinn, et al, A novel intrusion detection system based on hierarchical clustering and support vector machines, *Expert systems with Applications*, 38.1, pp. 306-313, 2011.
- [19] Ahmed, Mohiuddin, Abdun Naser Mahmood, and Jiankun Hu. "A survey of network anomaly detection techniques." *Journal of Network and Computer Applications* 60, pp. 19-31, 2016.
- [20] XU, Yan-qun, Bin ZHANG, and Xiao-tie QIN, Clustering intrusion detection model based on grey fuzzy K-mean clustering, *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 1, 019, 2013.
- [21] Pandeewari, N., and Ganesh Kumar. "Anomaly detection system in cloud environment using fuzzy clustering based ANN." *Mobile Networks and Applications* 21.3, pp. 494-505, 2016.
- [22] Goh, Jonathan, et al. "Anomaly Detection in Cyber Physical Systems Using Recurrent Neural Networks." *High Assurance Systems Engineering (HASE)*, IEEE 18th International Symposium on., 2017.
- [23] C. Bitter, J. North, D. A. Elizondo, T. Watson, An Introduction to the Use of Neural Networks for Network Intrusion Detection, *Computational Intelligence for Privacy and Security*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, SCI 394, 524, 2012.
- [24] Roy, Sanjiban Sekhar, et al. "A Deep Learning Based Artificial Neural Network Approach for Intrusion Detection." *International Conference on Mathematics and Computing*. Springer, Singapore, 2017.
- [25] Ashfaq, Rana Aamir Raza, et al. "Fuzziness based semi-supervised learning approach for feed-forward neural network. In *Computer intrusion detection system*." *Information Sciences* 378, pp. 484-497, 2017.
- [26] Li, Wei, Using genetic algorithm for network intrusion detection, *Proceedings of the United States Department of Energy Cyber Security Group*, pp. 1-8, 2004.
- [27] Srinivasu, P., and P. S. Avadhani, Genetic Algorithm based Weight Extraction Algorithm for Artificial Neural Network Classifier in Intrusion Detection, *Procedia Engineering*, 38, pp. 144-153, 2012.
- [28] Lu, Wei, and Ali A. Ghorbani, Network anomaly detection based on wavelet analysis, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 4, 2009.
- [29] Aburomman, Abdulla Amin, and Mamun Bin Ibne Reaz. "A novel SVM-kNN-PSO ensemble method for intrusion detection system." *Applied Soft Computing* 38, pp. 360-372, 2016.
- [5] Modi, Chirag, et al, A survey of intrusion detection techniques in cloud, *Journal of Network and Computer Applications*, 36.1, pp. 42-57, 2013.
- [6] Dagar, Vishwajeet, Vatsal Prakash, and Tarunpreet Bhatia. "Analysis of pattern matching algorithms in network intrusion detection systems." *Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA)(Fall)*, *International Conference on. IEEE*, 2016.
- [7] S. Antonatos, K.G. Anagnostakis, and E.P. Markatos, Generating realistic workloads for network intrusion detection systems, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes* 29, no. 1, 207215, 2004.
- [8] Gharaee, Hossein, Shokoufeh Seifi, and Nima Monsefan. "A survey of pattern matching algorithm in intrusion detection system." *Telecommunications (IST)*, 2014 7th International Symposium on. *IEEE*, 2014.
- [9] Sahasrabuddhe, Atmaja, et al. "Survey on Intrusion Detection System using Data Mining Techniques.", 2017.
- [10] Buczak, Anna L., and Erhan Guven. "A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18.2, pp. 1153-1176, 2016.
- [11] Denatious, D. K., John, A., Survey on data mining techniques to enhance intrusion detection, In *Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, *International Conference IEEE*, pp.1-5, 2012.
- [12] Kshirsagar, Vivek K., Sonali M. Tidke, and Swati Vishnu, Intrusion Detection System using Genetic Algorithm and Data Mining: An Overview, *International Journal of Computer Science and Informatics ISSN (PRINT)*, pp. 2231-5292, 2012.
- [13] Goyal, Mayank Kumar, and Alok Aggarwal, composing signatures for misuse intrusion detection system using genetic algorithm in an offline environment, *Advances in Computing and Information Technology*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 151-157, 2012.
- [14] Desai, Anuja S., and D. P. Gaikwad. "Real time hybrid intrusion detection system using signature matching algorithm and fuzzy-GA." *Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT)*, *IEEE International Conference on*, 2016.
- [15] S. Kumar, Classification and detection of computer intrusions, Ph.D. thesis, Purdue University, 1995.
- [16] Dolgikh, A., Nykodym, T., Skormin, V., Antonakos, J., Baimukhamedov, M., Colored Petri nets as the enabling technology in intrusion detection systems, In *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE IEEE*, pp. 1297-1301, 2011.

-
- [45] Tavallaee, Mahbod, et al, A detailed analysis of the KDD CUP 99 data set, Proceedings of the Second IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defence Applications, 2009.
- [46] Ye, Yalan, et al, A fast and adaptive ICA algorithm with its application to fetal electrocardiogram extraction, Applied Mathematics and Computation, 205.2, pp. 799-806, 2008.
- [47] Mitchell, Robert, and Ing-Ray Chen. "A survey of intrusion detection techniques for cyber-physical systems." ACM Computing Surveys (CSUR) 46.4: 55, 2014.
- [48] Buczak, Anna L., and Erhan Guven. "A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection." IEEE Communications Surveys & Tutorials 18.2, pp. 1153-1176, 2016.
- [49] Z. Ghazi, A. Doustmohammadi, Intrusion detection in cyber-physical systems based on Petri net, accepted in journal of information technology and control.
- [50] Haddadi, F., Khanchi, S., Shetabi, M., & Derhami, V. (2010, April). Intrusion detection and attack classification using and Network Technology (ICCNT), pp. 262-266, IEEE 2010.
- [51] Z. Chunlin, J. Ju, K. Mohamed, Intrusion detection using hierarchical neural networks, Pattern Recognition Lett. 26 (6), pp. 779–791, 2005.
- [52] Liu, Guisong, Zhang Yi, and Shangming Yang. "A hierarchical intrusion detection model based on the PCA neural networks." Neurocomputing 70.7, pp. 1561-1568, 2007.
- [53] Jawhar, Muna Mhammad T., and Monica Mehrotra. "Design network intrusion detection system using hybrid fuzzy-neural network." International Journal of Computer Science and Security 4.3, pp. 285-294, 2010.
- [54] Balduzzi, Fabio, et al. "Decidability results in First-Order Hybrid Petri Nets." Discrete Event Dynamic Systems 11.1-2, pp. 41-57, 2001.
- [55] Alan A. Desrochers and Robert Y. Al-Jaar, Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems; Modeling, Control, and Performance Analysis IEEE Press, ISBN 0-87942-295-5, 1995.
- [30] Ambusaidi, Mohammed A., et al. "Building an intrusion detection system using a filter-based feature selection algorithm." IEEE transactions on computers 65.10, pp. 2986-2998, 2016.
- [31] G. Helmer, J. Wong, M. Slagell, V. Honavar, L. Miller, Y. Wang, X. Wang and N. Stakhanova, Software fault tree and coloured Petri net-based specification, design and implementation of agent-based intrusion detection systems, Int. J. Information and Computer Security, Vol. 1, No. 1/2, 2007.
- [32] C. Wooi Ten, C. Ching Liu, and M. Govindarasu, Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2008.
- [33] T. M. Chen, J. Carlos Sanchez-Aarnoutse, and J. Buford, Petri Net Modeling of Cyber-Physical Attacks on Smart Grid, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 2, NO. 4, 2011.
- [34] Heracleous, Constantinos, et al. "Hybrid systems modeling for critical infrastructures interdependency analysis." Reliability Engineering & System Safety 165, pp. 89-101, 2017.
- [35] Ghazi, Z., and A. Doustmohammadi. "Fault detection and power distribution optimization of smart grids based on hybrid Petri net." Energy Systems 8.3, pp. 465-493, 2017.
- [36] Petri, C.A., Kommunikation mit Automaten. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIMNr. 2, 1962.
- [37] David, R. and Alla, H., Continuous Petri nets. 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets Zaragoza, 1987.
- [38] Le Bail, J., Alla, H., and David, R. Hybrid Petri nets. European Control Conference Grenoble, pp. 1472–1477, 1991.
- [39] G.W. Brams, Réseaux de Petri, Vol I et II, Masson, Paris, 1983.
- [40] P. J. Hawrylak, M. Haney, M. Papa, and J. Hale, Using Hybrid Attack Graphs to Model Cyber-Physical Attacks in the Smart Grid, IEEE 2012.
- [41] T. Murata, Petri nets: properties, analysis and applications, Proceedings IEEE, vol.77, no. 4, pp 541-580, 1989.
- [42] F. Balduzzi, A. Giua, and G. Menga, First-Order Hybrid Petri Nets: A Model for Optimization and Control, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 16.4, pp. 382-399, 2000.
- [43] Wai, Rong-Jong, and Chia-Ming Liu., Design of dynamic petri recurrent fuzzy neural network and its application to path-tracking control of nonholonomic mobile robot, IEEE transactions on Industrial Electronics 56, no.7, pp. 2667-2683, 2009.
- [44] <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html>

شناسایی و مدل سازی توربین گاز و بررسی رفتار مدل نسبت به تغییرات فرکانسی شبکه قدرت

علی ربانی^۱، علی کریم پور^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه فردوسی مشهد، Rabbany.ali.en@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه فردوسی مشهد، Karimpor@um.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۴/۷ ویرایش اول: ۱۳۹۶/۸/۲۰ ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

چکیده: در شبکه قدرت توان تولیدی باید سریعاً مصرف شود تا بتوان فرکانس شبکه را ثابت نگه داشت. بنابراین توان تولیدی شبکه در هر لحظه بایستی با توان مصرفی شبکه برابر باشد. افزایش و یا کاهش توان مصرفی شبکه، درخواست افزایش و یا کاهش توان تولیدی شبکه را در پی دارد و در صورتی که این درخواست به وسیله واحدهای تولیدی در شبکه قدرت تأمین نگردد یک اختلاف توانی ایجاد خواهد شد که سبب انحراف فرکانس شبکه، از مقدار نامی آن می گردد. این فرآیند تنظیم توان شبکه را کنترل فرکانس می نامند. در ایران، سهم عمده کنترل فرکانس بر عهده توربین های گازی می باشد. با افزایش نصب توربین های گازی در کشور، پاسخ توربین های گازی به تغییرات فرکانس شبکه مورد توجه و اهمیت بیشتری قرار گرفته است. به منظور مطالعه پاسخ فرکانسی این سیستم ها، مدل مناسبی از توربین گاز مورد نیاز است. در این مقاله به شناسایی مدل یک توربین گاز پرداخته شده است. پس از مدل سازی، رفتار مدل در برابر خطاهایی که از شبکه قدرت به توربین گاز اعمال می گردد، توسط نرم افزار متلب مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: توربین گاز، گاورنر، شناسایی سیستم، مدل سازی.

Identification and Modeling of Gas Turbine and Response Investigation of the Model to the Frequency Variation of Grid Power

A.Rabbani, A.Karimpor

Abstract: On the grid power, the generation power should be used immediately to maintain the grid frequency constant. Therefore, grid generation power at any moment must be equal to the grid consumption power. Increasing or decreasing grid consumption power leads to the request for an increase or decrease in grid generation power; and if this request is not provided by the units in the grid generation power, a power difference will be created causing the grid frequency deviation from its nominal value. This grid power control process is called frequency control. In Iran, the main component of frequency control is provided by gas turbines. As gas turbines have been more installed in the country, the response of gas turbines to grid frequency variations has become more and more important. In order to study the frequency response of these systems, an appropriate gas turbine model is required. In this paper, the frequency model of a gas turbine has been identified. After modeling, the model's response against the errors applied to the gas turbine from the grid power is investigated by MATLAB software.

Keywords: Gas Turbine, Governor, System Identification, Modeling.

۱- مقدمه

تاکنون مدل‌های زیادی برای توربین‌های گازی ارائه شده است. پیچیده‌ترین مدل، مدل ترمودینامیکی است از این مدل می‌توان برای مطالعه خصوصیات مکانیکی و رفتار ترمودینامیکی توربین گاز استفاده نمود. در [۷-۱] بر روی مدل ترمودینامیکی توربین گاز تحقیق شده است. یکی دیگر از مدل‌های مطرح در توربین گاز مدل روئن است، این مدل در [۱۳-۸] بررسی شده است مزیت این مدل، بررسی هم‌زمان تغییرات حلقه‌های کنترلی گاورنر می‌باشد.

مدل دیگر برای شبیه‌سازی توربین گاز، مدل IEEE می‌باشد. این مدل به دو بخش تقسیم می‌شود یک بخش مربوط به کنترل توربین گاز و بخش دیگر نیز به خصوصیات ترمودینامیکی توربین گاز دلالت دارد. گنجاندن محاسبات خنک کاری پره‌های توربین در معادلات توربین یکی از مزایای این مدل است. در این مدل برخلاف مدل روئن دمای ورودی توربین در بالاترین مقدار ممکن نگه‌داشته می‌شود که این عمل باعث انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. این مدل در [۱۴-۱۹] مورد بررسی قرار گرفته است.

در [۲۱-۱۸] مدل توربین گاز بر اساس مدل GAST ارائه شده است این مدل برای مدل‌سازی توربین گاز، زمانی که حلقه کنترل دما فعال می‌باشد و یا شرایطی که نوسان فرکانس حول فرکانس کاری داریم دقت لازم را ندارد.

مدل GGOV1 یک مدل عمومی برای همه واحدهای حرارتی می‌باشد از مدل توسعه یافته می‌توان برای نمایش توربین گاز با پارامترهای مناسب در بلوک‌های کنترلی مختلف استفاده کرد. بسیاری از مدل‌های GAST که قبلاً در سیستم‌ها استفاده می‌گردید با مدل GGOV1 جایگزین شده‌اند که جزئیات آن در [۱۹-۲۲] ارائه شده است.

بر اساس [۲۳-۲۸] محققان مدل روئن را تغییر داده و از این مدل برای بررسی کنترل فرکانس در تعدادی ناحیه با وجود چند توربین استفاده نموده‌اند. در این مدل‌ها محدودیت‌های کنترل سوخت و ویژگی‌های توربین گاز در نظر گرفته نشده است. که به عنوان اشکالی در این مدل-سازی وارد می‌باشد.

در این تحقیق از یک مدل جهت بررسی رفتار توربین گاز در شرایط تغییرات فرکانس، با اعمال محدودیت‌های کنترل سوخت و ویژگی‌های توربین گاز استفاده گردیده است. اعمال این محدودیت‌ها سبب می‌گردد تا رفتار مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر گردد. این مدل شامل ۲ بخش، توربین گاز و سیستم کنترل گاورنر می‌باشد که بخش توربین گاز مدل توسط تست‌های شناسایی و بخش گاورنر نیز از نرم‌افزار گاورنر استخراج می‌گردد.

۲- بررسی فیزیکی توربین گاز

هر توربین گاز شامل یک کمپرسور برای فشرده کردن هوا، یک محفظه احتراق برای مخلوط کردن هوا با سوخت و محترق کردن آن و یک توربین برای تبدیل انرژی گازهای داغ به انرژی مکانیکی است. بخشی از انرژی مکانیکی توربین، صرف چرخاندن کمپرسور و باقی انرژی، برای ژنراتور صرف می‌گردد. مشخصات توربین گاز مورد بررسی در شرایط ایزو [۲۹] در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات توربین گاز مورد بررسی در شرایط ایزو	
نسبت فشار	۱ به ۱۱
دمای ورودی توربین (درجه سانتی گراد)	۱۱۴۹
دمای خروجی توربین (درجه سانتی گراد)	۵۴۰
دبی هوای ورودی (کیلوگرم بر ثانیه)	۵۱۰
توان مصرفی کمپرسور (کیلووات)	۱۶۶۶۹۳
توان تولیدی توربین (کیلووات)	۳۲۷۱۵۳
توان خالص خروجی (کیلووات)	۱۵۸۱۹۸
دبی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)	۹/۲
راندمان (%)	۳۴/۵۱

۳- انتخاب روش تخمین پارامترهای توربین گاز

برای تخمین پارامترهای یک سیستم، روش‌های متنوعی از جمله تابع همبستگی^۱، تخمین حداکثر احتمال^۲ و روش خطای تخمین^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش تابع همبستگی، برای سیستم‌های حلقه بسته مناسب نمی‌باشد همچنین به نوبت بسیار حساس می‌باشد.

در روش تخمین حداکثر احتمال، ساختار و پارامترهای مدل باید از قبل مشخص بوده و مشخصات نوبت موجود در سیستم نیز تعیین شده باشد که بزرگترین ضعف این روش می‌باشد و عموماً توصیه نمی‌گردد.

روش خطای تخمین، برای ساختارهای مختلف خطی و غیرخطی در حوزه زمان و فرکانس قابل به کارگیری می‌باشد و مقاومت بیشتری در برابر نویزهای اندازه‌گیری دارد، همچنین برای شناسایی حلقه بسته مناسب است. لذا در این تحقیق از این روش برای شناسایی پارامترهای توربین گاز استفاده گردیده است.

^۳ Prediction Error Method^۱ Correlation Method^۲ Maximum Likelihood Estimation

$$G(S) = \frac{K_P}{T_P S + 1} \quad (1)$$

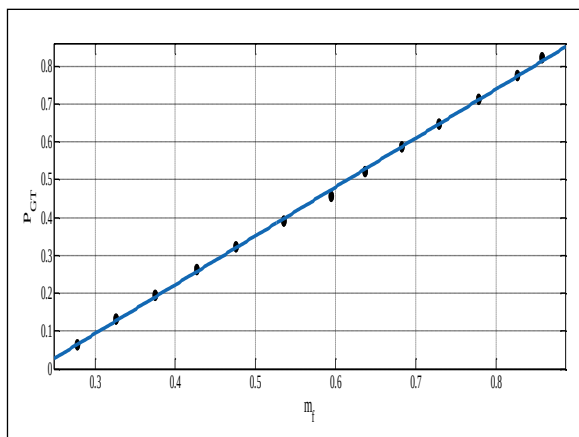
$$K_P = 1.25, T_P = 3.1308 \text{ Second}$$

۳-۲ تابع توان توربین گاز

رابطه توان تولیدی برای توربین گاز طبق مرجع [۱۱] در شرایط سنکرون بودن توربین با شبکه، به فرم رابطه (۲) می‌باشد. در این رابطه توان کل تولیدی از ضرب فلوی سوخت با ضریب ثابت B محاسبه می‌گردد، پس از کسر نمودن مقدار ثابت A که معرف توان مصرفی کمپرسور می‌باشد، توان خالص تولیدی محاسبه می‌گردد. با نمونه‌برداری از توان تولیدی و فلوی سوخت گاز مصرفی توربین گاز، از زمان سنکرون شدن به شبکه تا حداکثر توان تولیدی، تابع توان توربین گاز محاسبه می‌گردد. نمودار توان تولیدی نسبت به فلوی سوخت گاز در شکل ۱ نشان داده شده است. تابع توان تخمین زده شده توربین گاز از نمودار شکل ۱ در رابطه (۳) ارائه شده است.

$$P_{GT} = A + B \dot{m}_f \quad (2)$$

$$P_{GT} = -0.2943 + 1.292 \dot{m}_f \quad (3)$$



شکل ۱: نمودار برازش شده تابع توان خروجی توربین گاز

روابط (۲) و (۳) بیانگر توان تولیدی توربین است که معمولاً قابل دسترس نمی‌باشد در اینجا توان خروجی ژنراتور اندازه‌گیری شده و با تقسیم بر راندمان ژنراتور (راندمان ثابت فرض شده است) توان مورد نظر در رابطه ۳ به دست می‌آید. برای مدل توربین گاز علاوه بر مدل‌سازی تابع توان، دمای خروجی توربین گاز نیز باید محاسبه گردد تا بتوان یک مدل مناسب از توربین گاز ارائه نمود. در این مدل جهت جلوگیری از مدل‌سازی دمای خروجی که متأثر از زاویه پره‌های هدایتگر هوای ورودی^۱ می‌باشد و تأثیر آن در عملکرد حلقه توان، از روش دیگری استفاده شده است. راه حل مذکور استفاده از گشتاور مکانیکی می‌باشد این بخش در شکل ۲

شناسایی پارامترهای توربین گاز، شامل شیر کنترل سوخت، تابع توان توربین گاز و زمان شتاب رتور توربین گاز می‌باشد. دینامیک این بخش شامل تأخیرهای ناشی از انتقال گاز داغ خروجی اگزوز، تأخیر محفظه احتراق و تأخیر کمپرسور در توربین گاز می‌باشد که به علت کم بودن [۳۰] از مدل کردن آن‌ها می‌توان اغماض کرد.

۳-۱ شیر کنترل سوخت

در تعیین توان خروجی توربین گاز پارامترهایی از جمله فشار هوا، دمای محیط، فشار خروجی کمپرسور، کیفیت سوخت و موقعیت شیر کنترل سوخت تأثیرگذار می‌باشند. بر طبق [۲۹] به ازای هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع از سطح دریا در نیروگاه‌های گازی حدود ۱ درصد (در صورت ثابت بودن سایر شرایط محیطی) و با زیاد شدن دما از ۱۵ درجه سانتی‌گراد، به ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما، ۷ درصد میزان توان خروجی کاهش می‌یابد لذا کاهش توان به دلیل نصب توربین در ارتفاع ۱۴۴۰ متری از سطح دریا برابر با ۲۲/۸۸ مگاوات می‌باشد با در نظر گرفتن سایر شرایط محیطی نصب و استفاده از منحنی‌های اصلاح توان [۲۹] حداکثر توان تولیدی توربین گاز برابر با ۱۳۰ مگاوات می‌باشد. تست‌های شناسایی توربین در دمای محیطی ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام گردیده است.

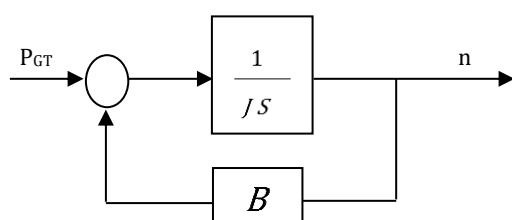
بر طبق [۲۹] توان پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم در یک فشار خاص روند نزولی را آغاز می‌کند. لذا در طراحی توربین گاز تعداد مراحل کمپرسور را به گونه‌ای انتخاب می‌نمایند که کمپرسور بتواند نسبت فشار بهینه را تأمین نماید. با توجه به اینکه تعداد طبقات کمپرسور ثابت می‌باشد لذا در شناسایی در نظر گرفتن تغییرات این پارامتر ضرورتی ندارد.

در رابطه با کیفیت سوخت گاز مصرفی، پس از نصب توربین گاز با استفاده از تست کارایی که بر پایه معادلات ترمودینامیکی استوار می‌باشد، از ترکیب مناسب سوخت با هوا و احتراق کامل آن در محفظه احتراق اطمینان حاصل می‌گردد. در توربین مورد بررسی تست‌های شناسایی پس از انجام تست کارایی و با فرض ثابت بودن ضرایب گاز انجام گردیده است.

از مجموعه عوامل تأثیرگذار در توان تولیدی توربین گاز تنها وضعیت شیر کنترل سوخت در اختیار سیستم کنترل گاورنر می‌باشد، لذا گاورنر با تنظیم شیر کنترل سوخت توان مورد تقاضای توربین گاز را تولید می‌نماید. خروجی گاورنر، ورودی برای شیر کنترل سوخت می‌باشد، خروجی شیر کنترل سوخت نیز فلوی سوخت ($\dot{m}_f$) برای تعیین توان تولیدی می‌باشد. با اعمال فرمان باز و بسته به شیر کنترل سوخت و نمونه‌برداری از فیدبک موقعیت شیر کنترل سوخت و با استفاده از بخش شناسایی نرم‌افزار متلب، مدل سیستم که با توجه به پاسخ سیستم یک مدل مرتبه اول است به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

^۱ Inlet Guide Vane (IGV)

در رابطه (۵)، P_L ، P_{GT} و n در سیستم پریونیت بوده و به توان خالص تولیدی، بار الکتریکی شبکه و سرعت رتور اشاره دارد. ممان اینرسی رتور بر مبنای عملیات موتوری ژنراتور محاسبه می گردد [۳۱]، در این شرایط در حالتی که هیچ گونه سوختی به توربین گاز تزریق نمی گردد، با تبدیل ژنراتور سنکرون به موتور سنکرون، توسط سیستم راه انداز سرعت چرخش رتور توربین گاز را به ۶۰۰ دور بر دقیقه می رسانیم و در حین شتاب گیری توربین گاز، از توان مصرفی ژنراتور و سرعت رتور توربین گاز نمونه برداری می کنیم. طبق مرجع [۳۱] در شرایط راه اندازی مدل توربین گاز به فرم شکل ۴ می باشد.



شکل ۴: مدل توربین گاز جهت محاسبه ممان اینرسی رتور [۳۱]

در این شرایط توسط بخش شناسایی نرم افزار متلب مقدار ممان اینرسی رتور $J = 24851 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$ محاسبه گردید. پس از محاسبه ممان اینرسی رتور، زمان شتاب رتور طبق رابطه (۶) محاسبه می گردد. در این رابطه J ممان اینرسی بر واحد $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ و ω_n نیز سرعت نامی رتور در واحد rad/s و n نیز مقدار توان خالص توربین در نقطه کار طراحی شده بر حسب وات می باشد. این زمان برای توربین مذکور طبق رابطه (۷) با توجه به مقدار محاسبه شده ممان اینرسی و توان تولیدی طبق جدول ۱ برابر با ۱۵/۴۲ ثانیه می باشد.

$$\tau = \frac{J \times \omega_n^2}{P_n} \quad (6)$$

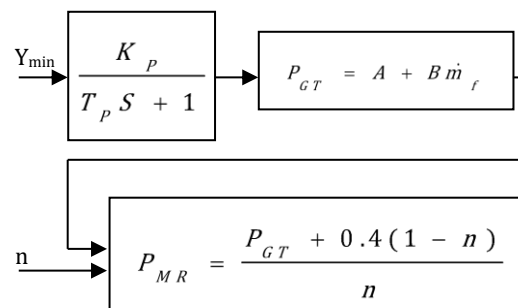
$$\tau = \frac{J \times \omega_n^2}{P_n} = \frac{24851 \times (100\pi)^2}{159 \times 10^6} = 15.42 \text{ second} \quad (7)$$

پس از محاسبه بلوک شیر کنترل سوخت، تابع توان توربین گاز و زمان شتاب رتور توربین گاز، سایر بلوک هایی که در مدل نهایی توربین گاز مورد استفاده قرار می گیرند در واقع توابع موجود در گاورنر می باشند، که باید از نرم افزار گاورنر استخراج گردند.

جدول ۲: مشخصات پارامترهای تخمین زده شده در بخش توربین گاز

PARAM	DESCRIPTION	VALUE	UNIT
K_p	Control Valve Correction	1.25	#
T_p	Control Valve Time Constant	3.1308	sec
A	Gas Turbine Constant	-0.2943	#
B	Gas Turbine Constant	1.292	#
τ	Acceleration Time	15.42	sec

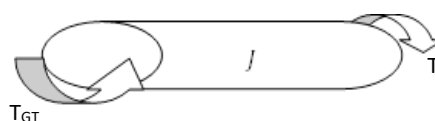
توسط بلوکی که P_{GT} را به P_{MR} تبدیل می کند نشان داده شده است. ورودی این بلوک توان تولیدی توربین گاز و خروجی آن نیز گشتاور مکانیکی می باشد در بازه عملکرد ۹۴ درصد تا ۱۰۴ درصد سرعت نامی توربین گاز رابطه بین توان تولیدی و گشتاور مکانیکی خطی بوده که رابطه اش با سرعت در بلوک مذکور مشخص شده است. علت استفاده از مقدار عددی ۰/۴ در بلوک مذکور این است که در توربین گاز مورد بررسی، پره های هدایتگر هوای ورودی تقریباً از ۰/۴ پریونیت توان تولیدی شروع به باز شدن می کنند.



شکل ۲: بلوک دیاگرام تابع توربین و بلوک تبدیل کننده توان تولیدی به گشتاور مکانیکی

۳-۳ محاسبه زمان شتاب رتور

هنگامی که توربین گاز از طریق ژنراتور به شبکه قدرت متصل می باشد، بار الکتریکی، در سمت ژنراتور به رتور اعمال می گردد. در شکل ۳ گشتاور الکتریکی اعمالی به رتور ژنراتور از سوی بار الکتریکی شبکه و توربین گاز نشان داده شده است.



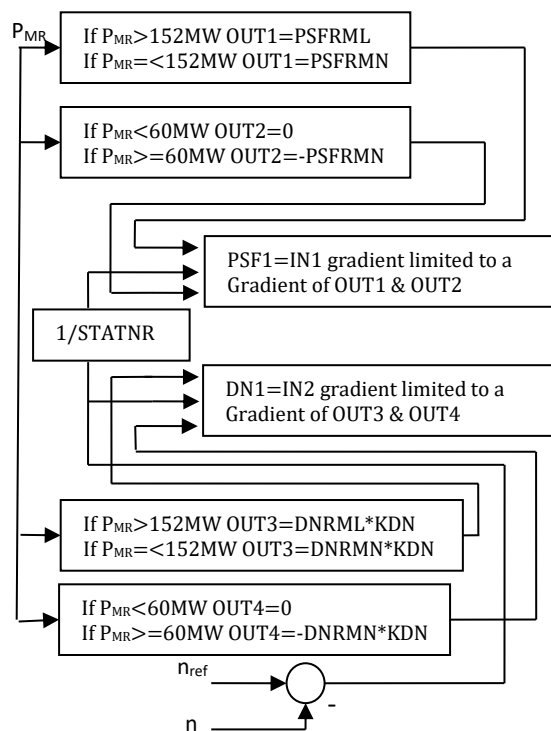
شکل ۳: رتور صلب

اگر رتور توربین را یک جسم صلب در نظر بگیریم بر اساس قانون دوم نیوتن داریم

$$T_{GT} - T_L = J \dot{\omega} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، J ممان اینرسی رتور و ω نیز سرعت زاویه ای رتور می باشد با ضرب معادله در ω و پریونیت نمودن، رابطه (۴) به فرم رابطه (۵) قابل بازنویسی می باشد.

$$P_{GT} - P_L = \frac{J \omega_n^2}{P_n} n \dot{n} \quad (5)$$



شکل ۶: بلوک دیاگرام محدود کننده نرخ افزایش و کاهش بار برای مؤلفه استاتیکی و دینامیکی

۴-۲ رد بار^۳

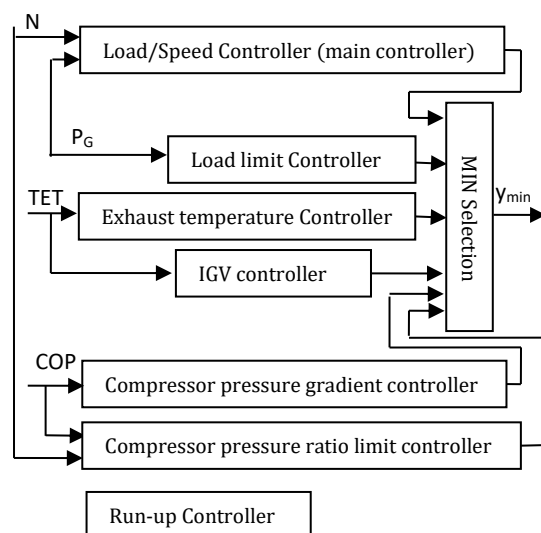
یکی از مهم‌ترین وظایف گاورنر، کنترل سرعت توربین در شرایط قطع ناگهانی از شبکه قدرت می‌باشد [۳۶]. با کاهش توان تولیدی، سرعت رتور توربین افزایش می‌یابد و گاورنر باید حداقل مقدار سوخت را برای نگه داشتن شعله انتخاب نماید. اگر گاورنر قادر به کنترل سرعت توربین نباشد، سیستم حفاظت، فرمان خروج اضطراری^۴ توربین را صادر می‌کند. وظیفه بلوک رد بار که با LAW در نرم‌افزار گاورنر بیان شده است، کنترل عملکرد توربین در شرایط رد بار می‌باشد. این بلوک شامل ۲ بخش، بلوک تشخیص دهنده رد بار و بلوک مؤثر در اعمال رد بار به مؤلفه استاتیکی و دینامیکی می‌باشد.

۴-۲-۱ بلوک تشخیص دهنده رد بار

این بلوک در شکل ۷ نشان داده شده است. توان تولیدی از طریق یک فیلتر پایین گذر با ثابت زمانی ۶۵ میلی‌ثانیه وارد یک مشتق گیر جهت محاسبه نرخ تغییرات می‌گردد در صورتی که نرخ تغییرات بار برابر با ۸۰ مگاوات باشد و این کاهش به اندازه ۲ دهم ثانیه ادامه داشته باشد گاورنر آن را به عنوان رد بار در نظر می‌گیرد و خروجی بلوک LAW فعال می‌گردد.

۴-۳ شناسایی پارامترهای گاورنر

در شکل ۵ نمای کلی از حلقه‌های گاورنر یک توربین گاز نشان داده شده است [۳۲]. مهم‌ترین حلقه‌های کنترلی گاورنر، حلقه کنترلی بار/سرعت و حلقه کنترلی دما می‌باشند. چهارچوب اصلی مدل گاورنر عبارت است از الگوریتمی که در آن کنترل کننده بار/سرعت قرار دارد و بخشی از این الگوریتم، شیب تغییرات بار را به ازای تغییر فرکانس شبکه تعیین می‌کند. به عبارت دیگر در زمان به وجود آمدن یک انحراف در فرکانس واقعی شبکه (n) در مقایسه با یک فرکانس مرجع (n_{ref}) و مطابق با یک دروپ از پیش تعیین شده مقداری که بر حسب مگاوات باید به ست پوینت کنترل بار اضافه شود محاسبه شده و نهایتاً به شیر کنترلی سوخت اعمال می‌گردد، این تغییر بار نباید از حداکثر شیب مجاز تجاوز نماید. در [۳۳-۳۵] بررسی کلی تری از گاورنر ارائه گردیده است.



شکل ۵: نمای کلی حلقه‌های کنترلی گاورنر یک توربین گاز [۳۲]

۴-۱ محدودیت نرخ افزایش و کاهش بار

تغییرات فرکانس نسبت به مقدار مرجع که با توجه به دروپ بر روی توان تولیدی واحد تأثیر می‌گذارد از دو مسیر مؤلفه استاتیکی^۱ و مؤلفه دینامیکی^۲ بر کنترل کننده بار/سرعت اعمال می‌شود. این دو مؤلفه توسط بلوک دیاگرام شکل ۶، محدود می‌گردند.

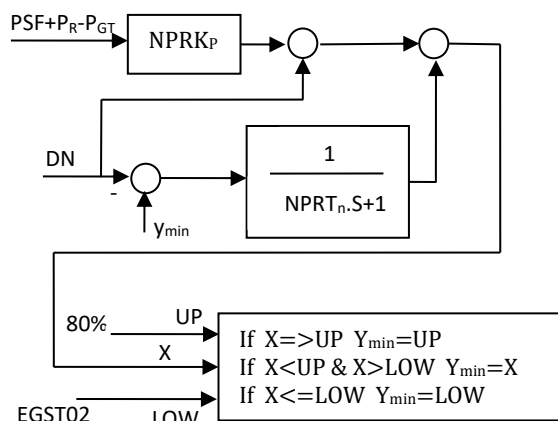
^۳ Load Rejection

^۴ Trip

^۱ Frequency Dependent Load Set point (PSF)

^۲ Speed Control Difference (DN)

از بسته شدن کامل شیر کنترل سوخت و خاموش شدن شعله در مواقع رد بار می‌باشد.



شکل ۹: بلوک دیاگرام کنترل بار/سرعت

۴-۴ بلوک محاسبه کننده سرعت توربین

این بلوک مشخص کننده اختلاف سرعت رتور توربین گاز با فرکانس شبکه می‌باشد. در شرایط پایدار سرعت رتور با فرکانس شبکه برابر می‌باشد ولی در شرایط گذرا این دو با هم اختلاف پیدا می‌کنند اساس عملکرد این بلوک طبق مدارک شرکت سازنده [۳۷] بر اساس رابطه (۸) می‌باشد.

$$P_{GT-REAL} = P_{L-REAL} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = P_{L-REAL} + J \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\lambda)$$

در این رابطه $\frac{1}{2} J \omega^2$ به انرژی چرخشی رتور اشاره می‌کند. با پیرویت کردن پارامترهای توان و سرعت در رابطه (۸) و استفاده از تغییر

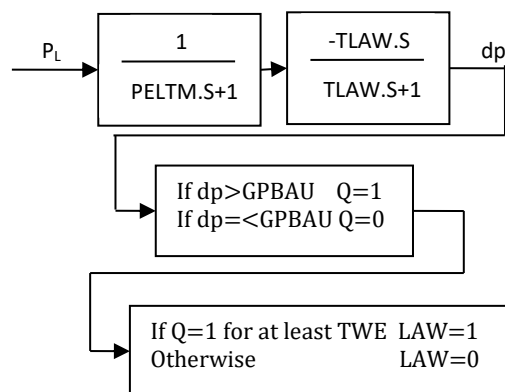
متغیر $\tau = \frac{J \omega^2}{P_n}$ رابطه (۸) به فرم رابطه (۹) بازنویسی می‌گردد. با توجه

به رابطه (۹) بلوک دیاگرام محاسبه کننده سرعت توربین به فرم شکل ۱۰ نمایش داده می‌شود. در جدول ۳ پارامترهای استخراج شده از نرم‌افزار گاورنر ارائه شده است.

$$P_{GT} = P_L + \tau \cdot n \cdot \dot{n} \quad (9)$$

جدول ۳: پارامترهای استخراج شده از نرم‌افزار گاورنر

PARAM	DESCRIPTION	VALUE	UNIT
DNRML	RAMP FREQ.INFL.ON YNPR SLOW	0.0200	%/s
DNRMN	RMP FREQ.INFL.ON YNPR NORMAL MODE	0.1500	%/s
PSFRML	RAMP FREQ.INFL.LOAD SETP.NORM.SLOW	0.0400	%/s
PSFRMN	RAMP FREQ.INFL.PSFN NORMAL MODE	0.3000	%/s

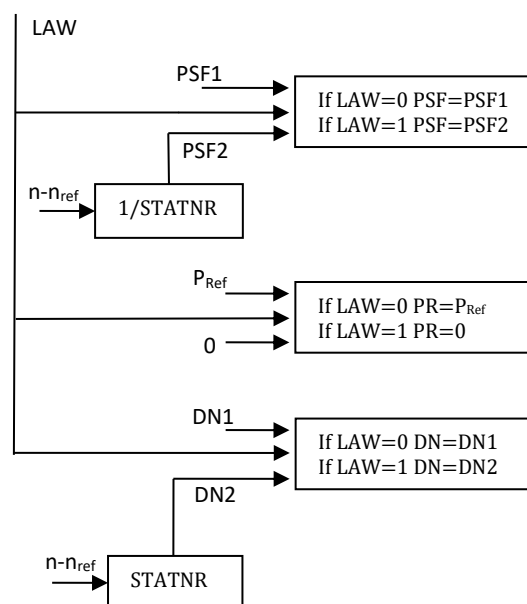


شکل ۷: بلوک دیاگرام تشخیص دهنده رد بار

۴-۲-۲ تأثیر رد بار در مؤلفه استاتیکی و

دینامیکی

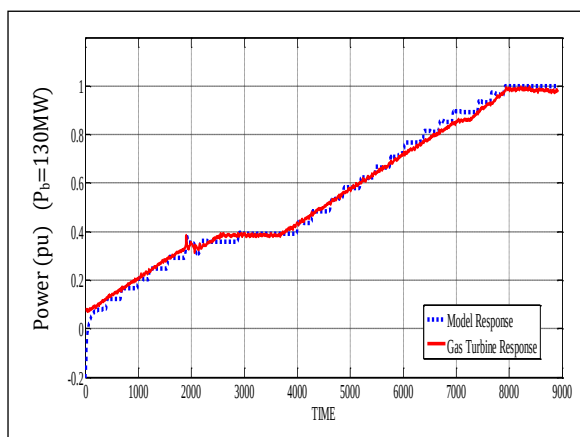
پس از آنکه رد بار تشخیص داده شد باید در مقادیر مؤلفه استاتیکی و دینامیکی تغییراتی حاصل گردد نحوه اعمال این تغییرات در شکل ۸ نشان داده شده است.



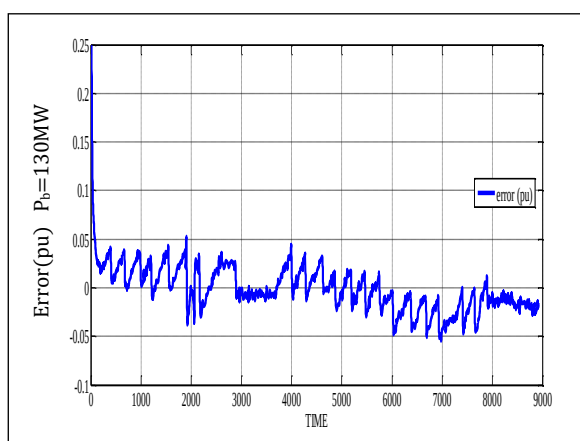
شکل ۸: تأثیر رد بار بر مؤلفه استاتیکی و دینامیکی

۴-۳ کنترل بار / سرعت

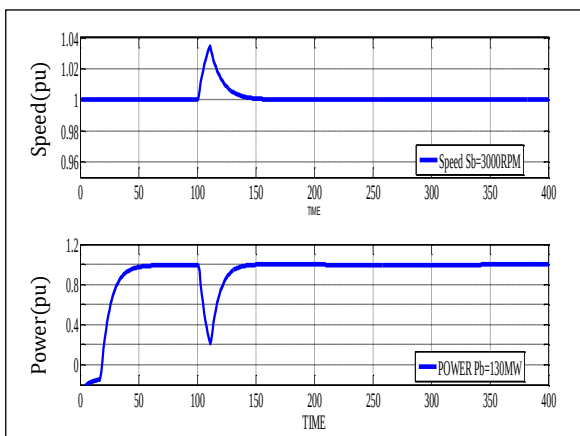
بلوک دیاگرام کنترل بار/سرعت در شکل ۹ نشان داده شده است، این کنترلر، یک کنترلر تناسبی-انتگرالی می‌باشد که در آن ضریب بخش تناسبی با NPRK_P و ضریب بخش انتگرال گیر با NPRt_n مشخص گردیده است. خروجی کنترلر PI قبل از اعمال به شیر کنترل سوخت باید وارد یک محدود کننده گردد، خروجی این محدود کننده خروجی گاورنر است هدف از محدودیت بسته شدن شیر کنترل سوخت، جلوگیری



شکل ۱۲: پاسخ صحت سنجی مدل با داده‌های برداشت شده از توربین گاز

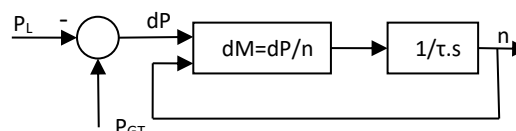


شکل ۱۳: خطای صحت سنجی مدل توربین گاز



شکل ۱۴: پاسخ مدل توربین گاز به شرایط ردبار

KDN	SPEED/LOAD CONTROLLER SPEED GAIN	5.0000	#
TWE	WAITING TIME	200.0000	ms
GPBAU	LIM VAL LOAD JUMP For OPR MODE CHANGE	80/159	#
TLAW	FILTER TIME FOR LOAD REJECTION DETECT	2.0000	S
PELTM	LOAD MEAS.TIME CONST. 63%OF FINAL VAL	65.0000	ms
STATNR	DROOP SPEED CONTROLLER	5.0000	%
EGST02	MIN. POSITION TO KEEP FLAMES BURNING	7.0000	%
NPRK _p	SPEED/LOAD CONTROLLER P GAIN	0.1000	#
NPRT _n	SPEED/LOAD CONTROLLER I-ACTION TIME	1.0000	S

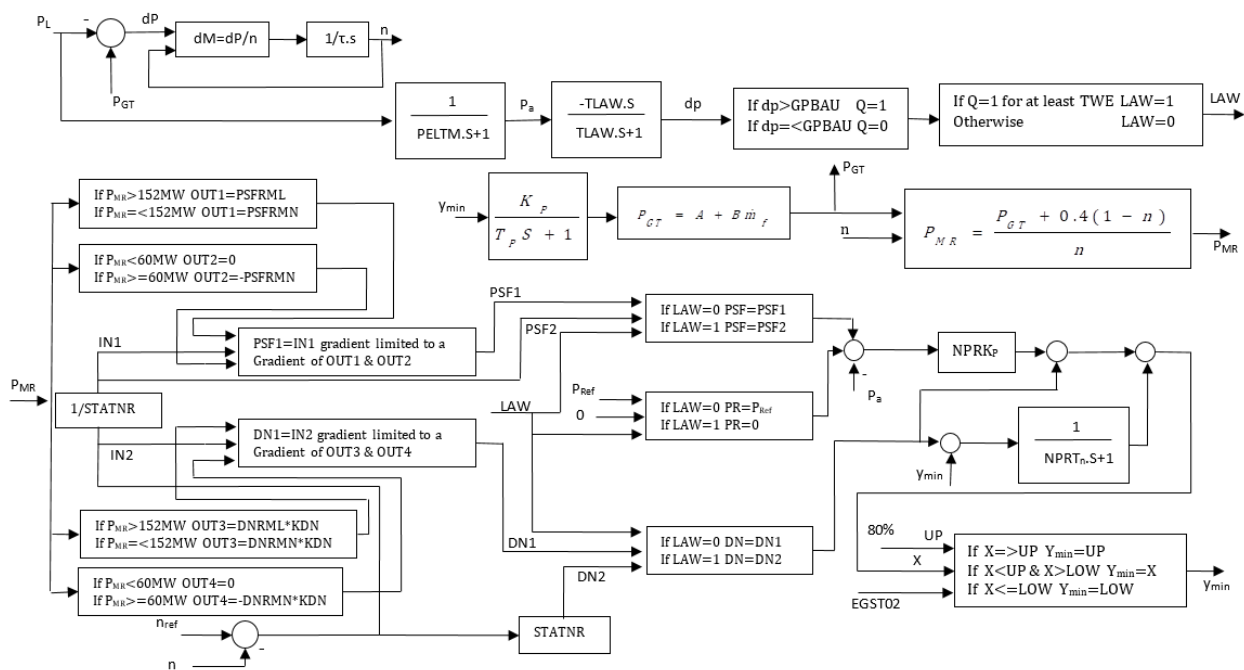


شکل ۱۰: بلوک دیاگرام محاسبه کننده سرعت توربین

۵- مدل نهایی توربین گاز

در شکل ۱۱ مدل نهایی توربین گاز که شامل ۲ بخش توربین و گاورنر می‌باشد، نشان داده شده است. پارامترهای توربین در مدل توسط تست‌های شناسایی و پارامترهای مربوط به گاورنر نیز از نرم‌افزار گاورنر استخراج گردیده‌اند. این مدل توسط داده‌های واقعی که از عملکرد توربین گاز مورد مطالعه در شرایط کاری برداشت شده است مورد صحت سنجی قرار گرفت. نتایج صحت سنجی مدل در شکل ۱۲ و خطای صحت سنجی مدل نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بررسی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با دقت خوبی با داده‌های واقعی همخوانی دارد. با توجه به مبنای ۱۳۰ مگاوات برای پریونیت نمودن پاسخ‌ها، خطای شبیه‌سازی طبق رابطه (۱۰) برای توان تولیدی مدل توربین گاز برابر با مقدار ۱/۹۶ درصد محاسبه گردید که از نظر کمی مقدار مناسبی برای مدل شناسایی شده می‌باشد. پاسخ مدل در شرایط ردبار، با اعمال یک خطای ۰/۸ پریونیتی به مدل در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_{real}(K) - y_{simulated}(K))^2}{\sum_{k=1}^N (y_{real}(K))^2}} \times 100 \quad (10)$$

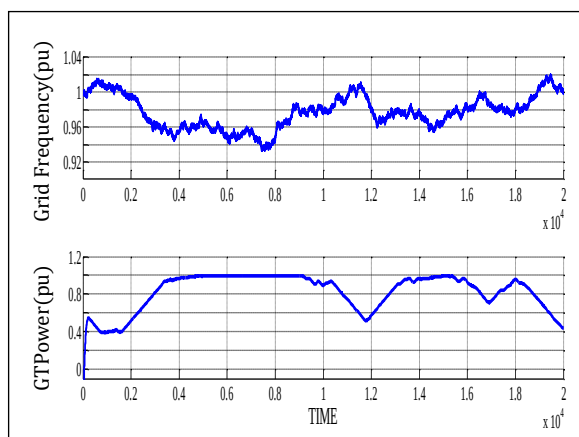


شکل ۱۱: مدل نهایی توربین گاز

به تغییرات فرکانس در شکل ۱۶ و ۱۵ برای توان تولیدی ۵۰ و ۸۰ درصد توان نامی ارائه شده است.

۳. توان تولیدی ۱۰۰ درصد توان نامی

اگرچه کنترل فرکانس در شرایط توان نامی امکان پذیر است اما به علت فعال بودن کنترلر دمای خروجی اگزوز، این کنترلر مانع از افزایش توان تولیدی، در هنگام افت فرکانس می گردد. لذا تغییرات توان تولیدی تنها در شرایط نیاز به کاهش توان تولیدی (افزایش فرکانس شبکه) مجاز می باشد. این شرایط در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: پاسخ کنترل فرکانس توربین گاز به تغییرات فرکانس شبکه با

$P_{ref}=50\%$

۶- محدوده مجاز توان تولیدی برای کنترل

فرکانس

در این بخش پاسخ مدل شناسایی شده، به تغییرات فرکانس شبکه مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه سازی تغییرات فرکانس شبکه از یک نویز سفید با قدرت ۰/۰۰۱dbw استفاده شده است. این نویز سبب می گردد تا سرعت توربین گاز که متناسب با فرکانس شبکه است در محدوده ۹۴ تا ۱۰۴ درصد سرعت نامی باقی بماند. در این شرایط رابطه توان تولیدی با گشتاور مکانیکی توربین گاز به صورت خطی برقرار است. شرایط کنترل فرکانس برای توربین گاز مورد بررسی به ۳ حالت کلی زیر تقسیم می گردد.

۱. توان تولیدی بین صفر تا ۵۰ درصد توان نامی

در این بازه توان تولیدی، تغییرات توان اثر نسبتاً زیادتری روی دمای خروجی توربین دارد و این موضوع باعث می شود هنگام پاسخ سریع به نوسانات فرکانس، تغییرات دمایی زیاد باشد و لذا استرس بر توربین و قطعات را افزایش می دهد. به همین علت کنترل فرکانس در این بازه توان تولیدی مجاز نمی باشد.

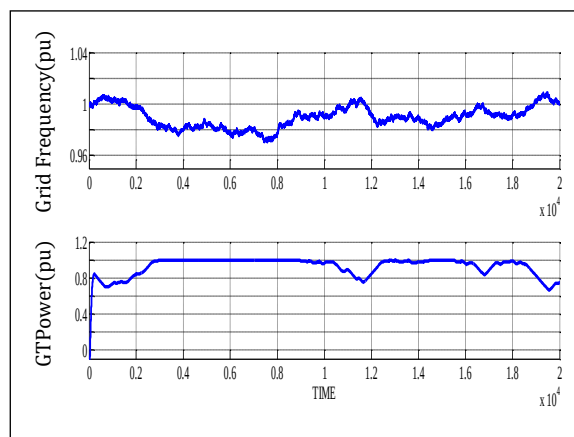
۲. توان تولیدی بین ۵۰ تا ۹۶ درصد توان نامی

در این حالت پره های هدايتگر هوای ورودی توربین با تنظیم خود در جهت ثابت ماندن نسبت سوخت به هوا در طول تغییرات سریع توان تولیدی، دمای گاز داغ خروجی اگزوز را تنظیم می کند. این محدوده توان تولیدی، بازه مناسب برای کنترل فرکانس می باشد پاسخ مدل در این شرایط

نتایج شبیه‌سازی، بیانگر پاسخ مناسب مدل توربین گاز به تغییرات فرکانس شبکه و تخمین مناسب، استفاده از گشتاور مکانیکی به‌جای حلقه کنترلی دما در مدل نهایی توربین گاز با اعمال محدودیت‌های کنترل سوخت و ویژگی‌های توربین گاز می‌باشد.

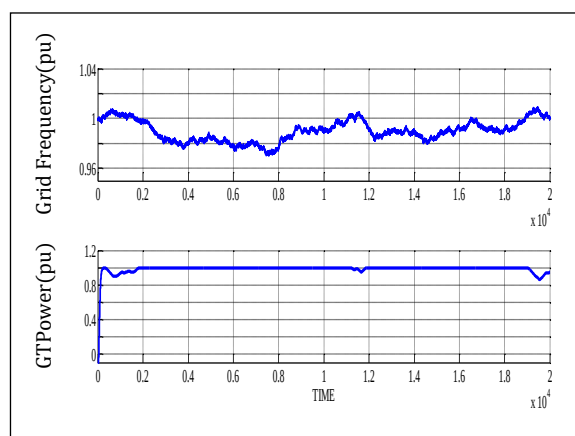
مراجع

- [1] Cohen H, Rogers G, and Saravanamuttoo H, Gas Turbine Theory, 4th ed. Reading, MA: Addison Wesley Longman, 1996.
- [2] Crosa G, Pittaluga F, Trucco A, Beltrami F, Torelli A, and Traverso F, 1998, "Heavy-duty gas turbine plant aerothermo dynamic simulation using simulink," ASME J. Eng. Gas Turbines and Power, vol.120, pp. 550–556.
- [3] Ricketts B. E, 1997, "Modeling of a gas turbine: A precursor to adaptive control," presented at the IEE Colloquium on Adaptive Controllers inPractive,Coventry,U.K.,pp.7/1–7/5,unpublished.
- [4] Ailer P, Santa I, Szederkenyi C, and Hangos K. M, 2001, "Nonlinear model-building of a lower power gas turbine," Periodica PolytechnicaSer. Transp. Eng, vol. 29, no. 1, pp. 117–135.
- [5] Schobeiri M. T, Attia M., and Lippke C, 1994, "GETRAN: A generic, modularly structured computer code for simulation of dynamic behavior of aero- and power generation gas turbine engines," ASME J. Eng. Gas Turbines and Power, vol. 116, pp. 483–494.
- [6] Kim J. H, Song T. W, Kim T. S, and Ro S. T, 2001, "Model development and simulation of transient behavior of heavy duty gas turbines," ASMEJ. Eng. Gas Turbines and Power, vol. 123, pp. 589–594.
- [7] Hannett L. N and Khan A. H, Feb. 1993, "Combustion turbine dynamic model validation from tests," IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 1, pp.152–158.
- [8] Hajagos L. M and Berube G. R, Jan. 28–Feb. 1, 2001, "Utility experience with gas turbine testing and modeling," presented at the Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, vol.1.
- [9] Nagpal M, Moshref A, Morison G. K, and Kundur P, Jan. 28–Feb. 1, 2001, "Experience with testing and modeling of gas turbines," presented at the IEEE Power Engineering Society General Meeting, Columbus, vol. 2.
- [10] Rowen W. I, 1992, "Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service," presented at the Int.



شکل ۱۶: پاسخ کنترل فرکانس توربین گاز به تغییرات فرکانس شبکه با

$P_{ref}=80\%$



شکل ۱۷: پاسخ کنترل فرکانس توربین گاز به تغییرات فرکانس

شبکه با $P_{ref}=100\%$

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل توربین گاز جهت بررسی رفتار توربین گاز در شرایط کنترل فرکانس، با استفاده از تست‌های استاندارد، شناسایی و مدل‌سازی گردید. در این مدل‌سازی محدودیت‌های کنترل سوخت و ویژگی‌های توربین گاز در مدل لحاظ گردید، همین امر سبب می‌گردد تا پاسخ سیستم به تغییرات فرکانس شبکه به شرایط بهره‌برداری نزدیک‌تر باشد. با توجه به اینکه تعداد زیادی از این نوع توربین‌های گازی در بخش‌های مختلف کشور نصب گردیده‌اند نحوه شناسایی و مدل‌سازی این نوع توربین گاز و بررسی پاسخ آن به تغییرات فرکانس شبکه قدرت می‌تواند برای ارزیابی نقاط ضعف و قوت شبکه مفید واقع گردد. با استفاده از مدل به دست آمده و اعمال خطاهای فرکانسی می‌توان از مناسب بودن زمان پاسخ و میزان مشارکت توربین‌های گازی در شرایط کنترل فرکانس اطمینان حاصل نمود و در صورتی که سرعت و یا میزان مشارکت مناسب نباشد می‌توان با تغییر پارامترها در گاورنر به مقادیر مورد نیاز شبکه رسید.

- Turbine Governor Modeling for the WECC, WECC Modeling & Validation Work Group.
- [22] Balamurugan S, Janarthanan N, Vijaya Chandrakala K.R.M, 2016, "Small and large signal modeling of heavy duty gas turbine plant for load frequency control," *Electrical Power and Energy Systems* 79, 84–88.
- [23] Ramakrishna KSS, Sharma Pawan, Bhatti TS, 2010, "Automatic generation control of interconnected power system with diverse sources of power generation". *Int J Eng, Sci Technol*, 51–65.
- [24] Ramakrishna KSS, Bhatti TS, 2008, "Automatic generation control of single area power system with multisource power generation". *J Power Energy*, 1–11.
- [25] Singh Parmer KP, Majhi S, Kothari DP, 2014, "LFC of an interconnected power system with multi source power generation in deregulated power environment". *Int J Electr Power Energy System*, 77–86.
- [26] Kazuyoshi K, Atsushi K, Yasuyuki T, 2003, "Modeling combined-cycle power plant for simulation of frequency excursions". *IEEE Trans Power System*, 724–9.
- [27] Kiat Y.S, Jovica M, Michael H.F, 2008, "Overview and comparative analysis of gas turbine model for system stability studies". *IEEE Trans Power System*, 108–18.
- [۲۸] حقیقی خوشخو رامین، آشنایی با اصول طراحی نیروگاه‌های حرارتی، انتشارات شیوه، ۱۳۸۹
- [29] Bank Tavakoli M.R, Vahidi B, Gawlik W, AUGUST 2009, "An Educational Guide to Extract the Parameters of Heavy Duty Gas Turbines Model in Dynamic Studies Based on Operational Data" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 24, NO. 3
- [۳۰] کراری مهدی، دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲
- [31] Balaghi Enalou H, Abbasi Soreshjani E, 2014, "A Detailed Governor-Turbine Model for Heavy-Duty Gas Turbines with a Careful Scrutiny of Governor Features" *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [32] Massucco S, Pitto A, and Silvestro F, Aug. 2011, "A gas turbine model for studies on distributed generation penetration into distribution networks," *IEEE Trans. Power System*, vol. 26, no. 3, pp. 992–999.
- Gas Turbine and Aero engine Congr. and Expo, Cologne, Germany.
- [11] Working Group, on Prime Mover and Energy Supply Models, Aug. 1994, "Dynamic models for combined cycle plants in power system studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1698–1708.
- [12] Working Group, on Prime Mover and Energy Supply Models, May 1991, "Dynamic models for fossil fueled steam units in power system studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 753–761.
- [13] Working Group, on Prime Mover and Energy Supply Models, Feb. 1992, "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 167–179.
- [14] Suzaki S, Kawata K, Sekoguchi M, and Goto M, Jan 23–27, 2000 "Mathematical model for a combined cycle plant and its implementation in an analogue power system simulator," presented at the IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, , vol. 1.
- [15] Hannett L. N, Jee G, and Fardanesh B, Feb. 1995, "A governor/turbine model for a twin-shaft combustion turbine," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 133–140.
- [16] Pereira L, Undrill J, Kosterev D, Davies D, and Patterson S, May 2003, "A new thermal governor modeling approach in the WECC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 819–829.
- [17] Undrill J and Garmendia A, Jan. 28–Feb. 1, 2001, "Modeling of combined cycle plants in grid simulation studies," presented at the IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Columbus, OH, vol. 2, unpublished.
- [18] Pereira L, May–Jun. 2005, "New thermal governor model development: Its impact on operation and planning studies on the Western Interconnection," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 62–70.
- [19] Pereira L, Kosterev D, Davies D, and Patterson S, Feb. 2004, "New thermal governor model selection and validation in WECC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 517–523.
- [20] Pereira L, Kosterev D, Patterson S, and Davies D, Jun. 6–10, 2004, "New thermal governor model selection and validation in the WECC," presented at the Power Eng. Soc. General Meeting, vol. 2.
- [21] Pereira L, Undrill J, Kosterev D, Davies D, and Patterson S, Oct. 11, 2002, New Thermal

-
- [33] Iliescu S. St, Făgărășan I, Popescu V, and Soare C, 2008, "Gas turbine modeling for load-frequency control," U.P.B. Sci. Bull.,ser.C,vol. 70, no. 4.
- [34] Hajagos L. M and Bérubé G. R, Jan. 28–Feb. 1 2001, "Utility experience with gas turbine testing and modeling," presented at the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, USA, vol.1.
- [35] ISO 3977-8, Gas Turbines Procurement Part 8, 2002, Inspection, Testing, Installation and Commissioning.
- [36] Siemens Gas Turbine Manual. "AGS Number: E+L3CC-001-02".



Journal of Control

ISSN (print) 2008-8345

ISSN (online) 2538-3752



A Joint Publication of the Iranian Society of Instrument and Control Engineers and the Industrial Control Center of Excellence of K.N. Toosi University of Technology, Vol. 12, No. 3, Fall 2018.

Publisher: Iranian Society of Instrumentation and Control Engineers

Managing Director: Prof. Iraj Goodarznia

Editor-in-Chief: Prof. Ali Khaki-Sedigh

Tel: 84062317

Email: sedigh@kntu.ac.ir

Assistant Editor: Prof. Hamid Khaloozadeh, Dr. Alireza Fatehi, Dr. Mahdi Aliyari Shoorehdeli

Executive Director: Dr. Mahdi Aliyari Shoorehdeli, Tel: 84062403, Email: aliari@kntu.ac.ir

Editorial Board:

Prof. A. Khaki-Sedigh, Prof. I. Goodarznia, Prof. H. Khaloozadeh, Prof. P. Jabedar-Maralani, Prof. A. Ghafari, Dr. H.R. Momeni (Associate Prof), Prof. S.K. Nikraves, Prof. M. Shafiee, Prof. B. Moshiri.

Advisory Board:

Dr. H.R. Momeni, Prof. B. Moshiri, Prof. M. Shafiee, Prof. A. Khaki-Sedigh, Prof. P. Jabedar-Maralani, Prof. A. Ghaffari, Prof. H. Khaloozadeh, Prof. H.R. Taghirad, Dr. K. Masroori, Dr. M.T. Bathaei, Dr. M.T. Hamidi-Beheshti, Dr. F. Jafarkazemi, Dr. R. Amjadifard, Prof. S.A. Moosavian, Prof. M. Teshnelab, Prof. M. Haeri, Prof. S.A. Safavi, Prof. H. Seyfi, Dr. A. Fatehi, Prof. M.R. Akbarzadeh- Toutounchi, Prof. M. Golkar, Prof. N. Pariz, Dr. M. Javadi, Dr. J. Heirani-Nobari, Prof. F. Hossein- Babaei, Dr. B. Moaveni, Dr. M. Aliyari Sh., Dr. M. Arvan , Prof. M. Tavakoli-Bina, Dr. F. Farivar, Dr. M. Ayati, Dr. M. Mansouri, Dr. R. Havangi, Dr. A. Ramezani, Dr. A. Ghasemi, Prof. M. Farrokhi, Dr. Y. Batmani.

Website Manager: Nasibeh Farahani



Contents

- | | |
|--|-----------|
| Resilient, Comfort And Economic Operation Of Smart Nanogrid | 1 |
| Saeed Bagheri, Hossein Talebi and Alireza Fereidunian | |
| Online Optimal Synchronization of Nonlinear Multi-agent Systems under Unknown Dynamics | 13 |
| Farzaneh Tatari, Mohammad-B. Naghibi-S. | |
| Localization of DES Supervisory Control with Respect to Each Controllable Event | 29 |
| Vahid Saeidi, Ali Akbar Afzalian and Davood Gharavian | |
| An Optimal Design and Fabrication of Microfluidic Material Detection Sensor and Limit Cycle Based Readout System | 43 |
| Maysam Zamani Pedram, Mansour Mohtashamifar and Ahmad Afifi | |
| Cyber Intrusion Detection on Critical Infrastructures Using Fuzzy Neural First Order Hybrid Petri Net | 63 |
| Zeinab Ghazi and Ali Doustmohammadi | |
| Identification and Modeling of Gas Turbine and Response Investigation of the Model to the Frequency Variation of Grid Power | 77 |
| Ali Rabbani and Ali Karimpor | |