مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله کاربردی
جلد۱۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۱۷۷-۱۶۵

آخرین دستاورد های کنترل صنعتی کاربردی

محسن منتظری

دانشیار دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران m_montazeri@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

چکیده: یکی از اجزای بسیارمهم و اساسی در هر پلنت صنعتی از قبیل پالایشگاه، نیروگاه ،کارخانه سیمان، صنایع خودروسازی و ... سیستم کنترل آن می‌باشد، که وظیفه تامین ایمنی، کارایی، بهره برداری بهینه و با راندمان بالا، برآورده کردن الزامات زیست محیطی و پاسخ دادن مناسب به درخواست‌های بهره بردار را بر عهده دارد. با پیشرفت فناوری، طراحی و پیاده‌سازی سیستم های کنترل و تجهیزات مرتبط کاملاً دگرگون شده و از سیستم های کنترل پنیوماتیک و نیمه خودکار به سیستم‌های الکترونیکی و هوشمند ارتقاء یافته به طوری که تحول فناوری تجهیزات کنترلی چندین برابر تجهیزات اصلی مکانیکی پلنت های صنعتی می‌باشد.در این مقاله چند فناوری های جدید به همراه نکات کاربردی مربوطه در تحقق سیستم های کنترل در پلنت های صنعتی از قبیل: ترانسمیتر خبره[۱]، حسگر نرم[۲]،کنترل کننده PIDبا تنظیم خود کارضرایب[۳]، عملگر هوشمند[۴]، شبیه ساز سخت افزار در حلقه[۵]، همزاد دیجیتال[۶]، کاربرد هوش مصنوعی[۷] و یاد گیری ماشین[۸] باختصار مورد بررسی قرار می گیرد. امروزه هنگام کار با سیستم های کنترل صنعتی، آشنایی با این مباحث بسیار ضروری می باشد.

کلمات کلیدی: کنترل صنعتی، فناوری جدید تحقق،ترانسمیتر هوشمند، عملگر هوشمند، PID با تنظیم خودکارضرایب،همزاد دیجیتال، هوش مصنوعی.

The Latest Achievements in Applied Industrial Control

Mohsen Montazeri

Abstract: One of the most important and basic components in every industrial plant such as refinery, power plant, cement factory, automotive industry, etc. is its control system, Which is responsible for ensuring safety, performance, optimal operation with high efficiency, meeting environmental requirements and responding appropriately to user requests. With the advancement of technology, the design and implementation of control systems and related equipment has been completely changed and upgraded from pneumatic and semi-automatic control systems to electronic and intelligent systems so that the evolution of control equipment technology is several times the main mechanical equipment of industrial plants. In this article, some new technologies with related practical points for the implementation of control systems in industrial plants such as: Smart Transmitter, Soft Sensor, Autotuning PID Controller, Intelligent Actuators, Hardware in the loop Simulator, Digital twin, Application of artificial intelligence and Machine Learning are briefly reviewed. Today, when working with industrial control systems, familiarity with these topics is very necessary.

Keywords: Industrial Control, New Technology of Implementation, Smart Transmitter, Intelligent Actuator, Auto-Tuning PID Controller, Digital Twin, Artificial Intelligence.

[1] Smart Transmitter
[2] Soft Sensor
[3] Auto-Tunning PID
[4] Intelligent Actuator
[5] Hardware in the Loop (HIL)
[6] Digital Twin
[7] Artificial Intelligent
[8] Machin Learning

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

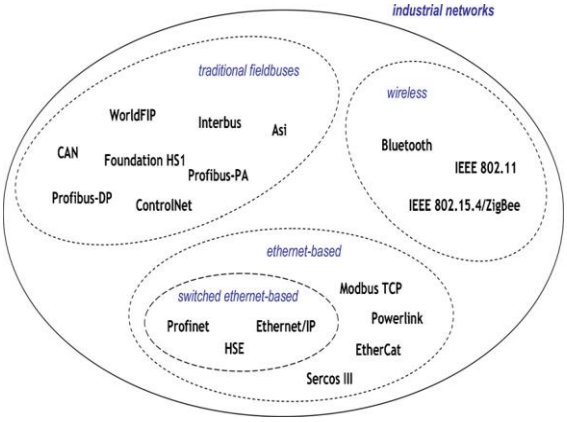
۱- مقدمه (روند پیشرفت فناوری تحقق سیستم‌های کنترل صنعتی)

اولین سیستم‌های کنترل درسطح جهانی و از جمله ایران از نوع سیستم‌های مکانیکی و پنیوماتیکی و دستی بود که در نیروگاه‌هایی و پالایشگاه هایی از قبیل نیروگاه بعثت تهران و پالایشگاه اصفهان پیاده‌سازی شدند. در این سیستم‌ها اندازه‌گیری کمیت‌های فرآیندی و ارسال دستورات در سطح واحد، از طریق سیستم‌های هوای فشرده یا به اصطلاح پنیوماتیکی صورت می گرفت و ثبت و ذخیره داده ها با استفاده از ثبات‌های مکانیکی و به روی کاغذ انجام می‌شد. در نسل‌های بعدی از سیستم‌های الکترونیکی برای کنترل استفاده شد در این روش از سیستم‌های اندازه‌گیری با سیگنال الکترونیکی ازجمله سیگنال‌های ۴-۲۰mA یا ۱-۵ v استفاده‌شده و برای ثبت داده‌ها همچنان از ثبات‌های کاغذی استفاده می‌شود.

در نسل بعد، از کنترل کننده‌های منطقی برنامه پذیر[1] مانند آنچه در نیروگاه‌های ری و نیروگاه شهید رجایی و پالایشگاه تهران وجود دارد، استفاده شد. کنترل کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر در ابتدا برای حل کردن مسائل ناشی از کنترل با رله‌ها پیشنهاد شدند، استفاده از رله حجم زیادی لازم دارد، سیم‌کشی فراوانی می‌خواهد، عیب‌یابی آن مشکل است و به دلیل مکانیکی بودن عمر کوتاه‌تری خواهد داشت؛ اما با ایجاد مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ کنترل پارامترهای آنالوگ نیز میسر شد. این کنترل‌کننده‌ها در انجام کارهای محدود خیلی موفق هستند اما با توجه به محدود بودن تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها در این مبدل‌ها هرچقدر فرایند پیچیده‌تر و بزرگ‌تر شود کنترل کردن آن با یک پردازشگر مرکزی[2] دقت و سرعت خواسته‌شده را نخواهد داشت. برای بالا بردن سرعت، دقت و امنیت سیستم می‌توان کارها را تقسیم کرد طوری که هر پردازنده یک بخش از کل پلنت را کنترل کند. پس می‌توان با بکار گرفتن همزمان چند کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر و مدیریت عملکرد آن‌ها یک سیستم کنترل گسترده ساخت. بدین ترتیب نسل بعدی سیستم‌های کنترل با نام سیستم کنترل گستره[3] شکل گرفتند. این سیستم‌ها در کل اتصال چند کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر است که پردازنده‌های آن‌ها شبکه شده‌اند و یک و یا چند کامپیوتر به عنوان مدیر کارکرد کنترل کننده‌های دیگر را مدیریت می‌کند.

سیستم کنترل فیلد باس[4] جدیدترین فناوری سیستم کنترل در دنیا می‌باشد، که بعد از سیستم های کنترل گسترده به بازار آمده است. در سیستم کنترل گسترده شبکه فقط در سطح مدیریت وجود دارد. اگر تمام ترانسمیترها و عملگرها نیز به عنوان گره‌هایی از شبکه در نظر گرفته شود و شبکه را به درون محوطه برده شود یک شبکه فیلدباس ایجاد شده است. در سیستم فیلدباس هر ترانسمیتر خود یک کامپیوتر است. استاندارد هایی در ارتباط آنالوگ (۴-۲۰mA و یا ۱-۵ v برای سیگنال الکترونیکی و PSI ۳-۱۵ برای سیگنال پنیوماتیکی) جهت انتقال سیگنال کنترل و ابزارهای اندازه‌گیری، از ادوات محوطه به اتاق کنترل وجود دارد؛ اما فیلد باس یک ارتباط دیجیتال با پروتکل خاص خود می‌باشد. یکی از مزایای مهم فیلدباس جدا بودن تجهیزات آنالوگ و دیجیتال آن و پیوند آن‌ها به صورت نرم‌افزاری است، این امر دقیقاً به‌مثابه داشتن دو کنترل‌کننده قدرتمند در کنار هم است که یکی از آن‌ها فقط پارامترهای آنالوگ را کنترل کرده و دیگری تنها پارامترهای دیجیتال را پردازش می‌نماید.

در حقیقت در ادامه این سیر تکاملی، رفته‌رفته ادوات محوطه هوشمندتر شده تا جایی که حتی امکان تشخیص خطا و حتی پیش‌بینی بروز مشکلات احتمالی در سیستم به وجود آمده است. جهت نیل به این هدف و با توجه به حجم داده‌های مبادله شده، نیاز به استفاده از شبکه‌های صنعتی انتقال داده با سرعت بالا بیش‌ازپیش بیشتر شده و باعث به وجود آمدن شبکه‌های متنوع صنعتی گردید، که این شبکه‌ها خود به سه دسته شبکه فیلدباس قدیمی[5] شبکه مبتنی براترنت[6] و شبکه بی سیم[7] [۱]. این طبقه‌بندی در شکل ۱دیده می شود.



شکل ۱ طبقه‌بندی شبکه‌های صنعتی موجود [۱]

در این راستا همچنین می‌توان به استفاده از ترانسمیترهای بدون سیم نیز اشاره کرد. از طرفی با توجه به حساسیت سیستم‌های کنترل، در راستای تأمین امنیت این شبکه‌ها تحقیقات گسترده‌ای در حال انجام است.

در این مقاله، سعی می شود مباحث پیشرفته در کنترل صنعتی که امروزه بکار گرفته می شوند مد نظر قرار گیرند. در این راستا جزییات مباحث پیشرفته در تحقق سیستم های کنترل صنعتی در سه بخش، اجزای یک حلقه کنترل ، سیستم های کنترل، تست و شبیه سازی سیستم های کنترل تحلیل می شوند. در بخش ۲، ویژگی ها و مبانی عملکردی دستاورد های جدید فناوری در تحقق اجزای اصلی هر حلقه کنترل صنعتی از قبیل ترانسمیتر خبره، سنسور نرم، کنترل کننده PID با تنظیم ضرایب بصورت خودکار و عملگر های هوشمند آورده می شود که در درک عملکرد و نحوه کاربرد آنها می تواند بسیار مفید واقع شود. در بخش ۳، تاثیر مباحث جدید

[1] Programmable Logic Controller (PLC)
[2] Central Processing Unit (CPU)
[3] Distributed Control System (DCS)
[4] Field Control System (FCS)
[5] Traditional Fieldbuses
[6] Ethernet Based
[7] Wireless Network

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

کاربردی از قبیل هوش مصنوعی، یاد گیری ماشین، اینترنت اشیا ، کلان داده و همزاد دیجیتال روی عملکرد سیستم های کنترل صنعتی باختصار بررسی می شود. در بخش ۴، اختصاص به آزمایش و شبیه سازی سیستم های کنترل صنعتی و فناوری جدید داده شده است و مباحث سخت افزار در حلقه و همزاد دیجیتال آورده می شوند. در بخش پایانی و جمع بندی، روند پشرفت فناوری های جدید در آینده و الزامات داخل کشور، درسیستم های کنترل صنعتی باختصار تحلیل خواهند شد.

۲- فناوری جدید تحقق اجزای حلقه های کنترل در صنعت

در این بخش آخرین فناوری تحقق سه عنصر مهم در هر حلقه کنترل صنعتی یعنی ترانسمیتر، کنترل کننده و عملگر بررسی می شود.

۲-۱- ترانسمیتر خبره[1]

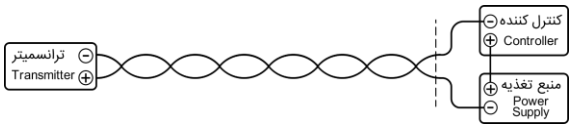
در توسعه و تکامل ترانسمیتر ها ی کلاسیک(شکل ۲) عوامل زیر نقش کلیدی داشته اند:

- نیازهای روز افزون کاربران ودرخواست بهبود عملکرد همراه با کاهش هزینه بهره برداری ترانسمیتر
- تکامل فناوری های مرتبط با آن مانند طراحی به کمک کامپیوتر[2] ، میکروالکترونیک، علم مواد وفناوری ارتباطات

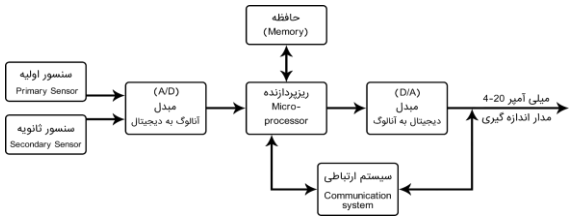
که در این راستا می توان مهمترین عامل پیشرفت در توسعه ترانسمیتر ها را، ظهور پردازنده های کم مصرف و مبدل های آنالوگ به دیجیتال ذکر کرد. که با ارتباط با مدارهای اصلی حسگر، می توانند با توان محدود (معمولا کمتر از ۴۰ میلی وات) در ترانسمیترهای معمولی ۴-۲۰mA بکار گرفته شوند. این امر، دو مسیر مجزا برای بهبود عملکرد ترانسمیترها فراهم کرده است:

- اصلاح ویژگی غیر خطی حسگر کاربردی در ترانسمیتر
- امکان بکار گیری حسگر های دیگر علاوه بر حسگراصلی در جهت بهبود عملکرد حسگر اصلی

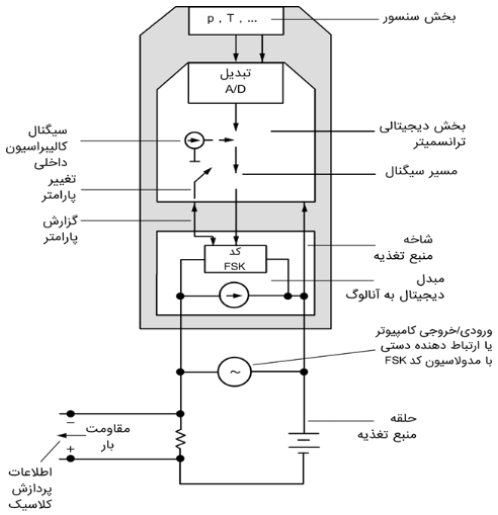
در شکل ۳، مدار یک ترانسمیتر خبره آورده شده است که در آن علاوه بر توانمندی برقراری ارتباط با استفاده از سیگنال استاندارد ۴-۲۰mA ، امکان برقرار ارتباط با سایر تجهیزات بصورت دیجتالی نیز میسر است. که این امر بدنبال خود، علاوه بر توانمندی های متداول کنترلی ، امکان برقراری ارتباطات مدیریتی نیز میسر شده است. این واقعیت که یک ریزپردازنده می تواند در یک ترانسمیتر گنجانده شود فرصتی را برای انتقال از نسلی که در آن فقط سیگنال اندازه گیری از ترانسمیتر به گیرنده منتقل می شود، مانند یک نشانگر یا کنترل کننده، به نسلی که ریزپردازنده در آن نه تنها توابع مبتنی بر ریزپردازنده را که قبلا ذکر شد پیاده سازی می کند، بلکه یک مرکز ارتباطی را مدیریت می کند، فراهم کرده است. این امر باعث می شود که داده های خاص خود ترانسمیتر، مانند نوع، شماره سریال و غیره، در ترانسمیتر ذخیره شوند و از طریق حلقه اندازه گیری که در آن نصب شده است، قابلیت دسترسی داشته باشد. توابع دیگری مانند تنظیم یا بازنشانی پارامتر های کالیبره کردن ترانسمیتر(صفر و دامنه[3])، جزئیات مکان و برنامه، و اجرای روشهای تشخیص عیب و اعلام هشدار در مورد عملکرد نادرست نیز قابل اجرا هستند. اصطلاح هوشمند و یا خبره برای شناسایی چنین ترانسمیتر ها بکار گرفته می شود. درشکل ۴ ساختار داخلی یک نمونه ترانسمیتر فشارخبره نشان داده شده است.



شکل ۲ مدار یک ترانسمیتر *4-20mA* متداول[۳]



شکل ۳ بخش های یک ترانسمیتر خبره با یک مرکز ارتباطی[۳]



شکل ۴ ساختار داخلی یک نمونه ترانسمیتر فشار خبره[۴]

تکامل بعدی که اکنون در حال پذیرش است این است که به جای اتصال ترانسمیترها از طریق مدارهای جداگانه به اتاق کنترل، خروجی های ترانسمیتر هارا روی یک شبکه ارسال کرد. . برای تحقق کامل این مفهوم، یک استاندارد بین المللی لازم است تا اطمینان حاصل شود که ترانسمیتر های ساخته شده توسط سازندگان مختلف قابل تعویض هستند، یعنی می توان یک ترانسمیتر از سازنده دیگری بدون هیچ تغییری به سیستم با یک ترانسمیتر از یک سازنده دیگر را جایگزین کرد. همچنین قابلیت همکاری، یعنی ترانسمیتر از یک سازنده می تواند با یک دستگاه یا میزبان از سازنده

[1] Smart Transmitter
[2] Computer-Aided Design (CAD)
[3] Zero and Span

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

دیگری ارتباط برقرار کند. کار برای توسعه یک استاندارد بین المللی واحد در سال ۱۹۸۵ آغاز شد، اما در دوره میانی، استانداردهای اختصاصی و ملی تدوین شده است که برای تبدیل شدن به استاندارد پذیرفته شده در صنعت رقابت می کنند.



SPECIFICATIONS

Performance: Unless otherwise stated the performance specifications are at 20°C and nominal range, and errors are shown as a percentage of the nominal span.

Accuracy	Better than 0.1% including linearity, repeatability and hysteresis errors
Resolution	≤0.01%
Measuring Span	6.25% to 100% of the nominal span (See the Range Tables)
Over-pressure Limits	(See the Range Tables)
Adjustments	Zero & Span
Zero Adjustment	Digital Calibration ±15%
Linearity Adjustment	8 points within the nominal range
Damping	Digitally adjustable from 0 to 15 sec.
Min. Response Time	0.1 second
Transfer Function	Linear or square root (selectable)
Output Signals	4...20 mA, 2-wire; Digital (Bell 202 Standard FSK) using HART protocol
Fail-safe Output	In case of malfunction the analogue output is forced to the fail-safe state of 3.8 or 23.2 mA (selectable)
Settling Time	120 ms @ 27°C
Thermal Drift	Specified for -10 to 65°C range,
Zero:	±0.1% / 10°K
Span:	±0.1% / 10°K at nominal range
Power Supply	12.5 to 30 VDC with no load
Supply vs. Load	18.25 VDC for up to 250 Ω 24 VDC for up to 500 Ω 30 VDC for up to 760 Ω
Power Supply Effect	Negligible between 12.5 and 30 VDC
Display	4-digit LCD

شکل ۵ مشخصات فنی یک ترانسمیتر هوشمند نمونه[۵]

در شکل ۵ مشخصات فنی یک ترانسمیتر هوشمند نمونه آورده شده است. همانطوریکه دیده می شود علاوه برخروجی سیگنال ۲۰-۴ میلی آمپر، دارای خروجی دیجیتال بصورت پروتکل هارت نیز می باشد. همچنین اثرات منفی تغییرات درجه حرارت روی عملکرد ترانسمیتر خنثی کرده و دارای بازه عملکردی نسبت حداکثر به حداقل ورودی ۱۶:۱ می باشد و در صورت خرابی ترانسمیتر، در حالت ایمن قرار خواهد گرفت. و دارای صحت عملکردی کمتر از یک دهم درصد حتی با وجود خطاهای هیسترزیس، خطی بودن و قابلیت تکرار می باشد. و از نظر پاسخ گذرا ، میزان میرایی آن از صفر تا ۱۵ ثانیه قابل تنظیم بوده و همچنین زمان صعود و زمان نشست بسیار خوبی است. اثرات تغییرات میزان ولتاژ منبع تغذیه روی عملکرد ترانسمیتر بسیار ناچیز می باشد. با توجه به اینکه مشخصات فنی ترانسمیتر های هوشمند به مراتب بهتر از ترانسمیتر های کلاسیک است، امروزه در صنعت این نوع ترانسمیتر های بصورت گسترده استفاده می شوند.

۲-۲- حسگر نرم

پلتهای صنعتی معمولا دارای تعداد زیادی حسگرهای آنالوگ و دیجیتال می‌باشند. هدف اولیه این حسگرها دریافت اطلاعات از فرایند برای نمایش و کنترل آن می‌باشد. تقریبا از سه دهه پیش محققان شروع به پژوهش بر روی داده های اندازه‌گیری شده و ذخیره شده در صنایع فرایندی برای پیش بینی متغیرهایی که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، نموده اند.

در این مدت، حسگرنرم به عنوان یک ابزار ارزشمند در صنایع و زمینه های کاربردی شناخته شده است. این ابزار مفید برای حل مشکلات متنوعی از قبیل کنترل و پایش بر خط واحدها، ارزیابی سنسورها و استراتژی های تشخیص خطا، مخصوصا در مواردی که ایجاد نسخه پشتیبان برای سیستمهای اندازه‌گیری و یا تخمین نسبتاً دقیقی از متغیرهایی که به دلایلی یا قابل اندازه‌گیری نبوده (ضعف فناوری) و یا نصب سیستمهای اندازه‌گیری مقرون به صرفه نباشد، به کار برده می‌شود. هنگامی که متغیری از فرایند قابل اندازه‌گیری نیست و یا هزینه های گزاف و تجهیزات خاص برای اندازه‌گیری آن متغیر نیاز باشد، معمولا سنسور نرم بکار گرفته می‌شود و حتی سنسور نرم می‌تواند یک سیستم پشتیبان برای سیستم حسگرهای فیزیکی موجود در فرایند باشند و به طور موازی عمل نمایند و در صورت خروج از سرویس حسگر اصلی، وظیفه جمع آوری داده را به عهده می گیرد.

گام های مختلف طراحی حسگر نرم به صورت ذیل خلاصه می گردد:

- جمع آوری داده و فیلتر کردن
- انتخاب ساختار مدل و متغیرها
- شناسایی مدل
- اعتبار سنجی و تصدیق مدل

سنسور نرم به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: مدل استنتاجی[1] و داده استنتاجی[2] ، خانواده مدل استنتاجی بر پایه فیلتر کالمن توسعه یافته و یا رویتگرهای دیگر می‌باشد. روش داده استنتاجی، بر پایه ترکیبی از مدلهای مشهور مانند مدل رگرسیون، حداقل مربعات جزئی، شبکه عصبی و فازی می‌باشد[۶].

۲-۳-کنترل کننده PID با تنظیم ضرایب بصورت خودکار

۲-۳-۱- مقدمه

در صنعت، همواره دنبال روش های هستند که از نظر بهره برداری و کاربرد آسان باشند یکی از این موارد، تنظیم ضرایب کنترل کننده *PID* بصورت خودکار است. زیرا که استفاده از روشهای دستی، ضرورت شناخت بهره بردار با مفاهیم کنترلی از قبیل مفاهیم مدلسازی، استفاده از جدول زیگلر و نیکولز و غیره را ایجاب می کند. در این راستا، روشهای متعددی برای تنظیم خودکار ضرایب کنترل کننده *PID* ارائه شده است که یکی از

[1] Model Driven
[2] Data Driven

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

متداولترین و کاربردی ترین الگوریتم های مطرح در این زمینه، روش فیدبک رله[1] است . در این بخش این روش بررسی خواهد شد.



شکل۶ کنترل کننده PID با تنظیم ضرایب بصورت خودکار[۷]

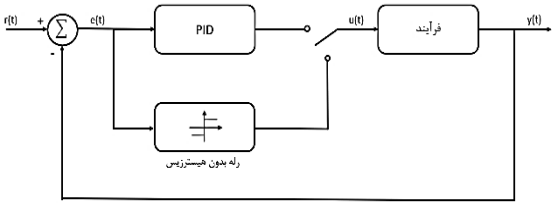
۲-۳-۲-روش فیدبک رله –(A-H)Åström Hägglund

اساس کار روش پاسخ فرکانسی Z-N بر شناسایی نقطه بحرانی پاسخ فرکانسی قرار دارد، اما چنان که آورده شد انجام آزمایش Z-N برای شناسایی نقطه بحرانی با مشکلات قابل توجهی روبرو است. در سال ۱۹۸۴ Astrom و Hagglund با ارائه مقاله‌ای روش نوین و کارآمدی را برای شناسایی

نقطه بحرانی مطرح نمودند که به سرعت مورد استقبال محافل علمی قرار گرفت و پس از مدت اندکی در کنترل‌کننده‌های صنعتی به کار گرفته شد. به عنوان مثال می‌توان از The SATT Control Instruments Autotune نام برد[۸].

ایده اصلی روش A-H استفاده از فیدبک رله برای ایجاد یک نوسان دائم در سیستم است. شکل ۷ ساختار کلی کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهاد شده توسط (A-H) را نشان می‌دهد.

این کنترل‌کننده شامل سه قسمت است که عبارتند از کنترل‌کننده *PID*، رله و یک کلید دو وضعیتی که در لحظه یکی از دو بلوک *PID* یا رله را



شکل۷ روش فیدبک رله

در مدار قرار می‌دهد. هنگامی که رله وارد عمل می‌شود، سیستم حلقه بسته شامل یک عنصر غیرخطی[2] و یک فرآیند است. طبق تئوری‌های کنترل غیرخطی در صورت توالی یک عنصر غیرخطی و یک فرآیند که بصورت یک فیلتر پایین گذر[3] عمل می کند (در کاربردهای متداول در صنعت عموما پلنت های صنعتی بصورت یک فیلتر پایین گذر عمل می کنند) امکان پدیده سیکل حدی[4] وجود خواهد داشت. در پدیده سیکل حدی، در حالت ماندگار متغیرهای فرآیند تنها در یک نقطه تعادل محدود نمی‌شوند، بلکه برروی یک مسیر تعادل به صورت دائمی حرکت می کنند. نوسانات دائم خروجی سیستم، می‌تواند نمونه‌ای از یک سیکل حدی باشد. در این حالت یک سیگنال با فرکانس با یک دامنه مشخص در طول حلقه فیدبک به صورت دائم منتشر شده و سیستم در یک تشدید[5] قرار می گیرد. استفاده از تابع توصیفی[6] رله، تجزیه و تحلیل در مورد امکان پدیده سیکل حدی را تسهیل می کند. تابع توصیفی یک رله با رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$N(a)=\frac{4d}{\pi a} \qquad (۱)$$

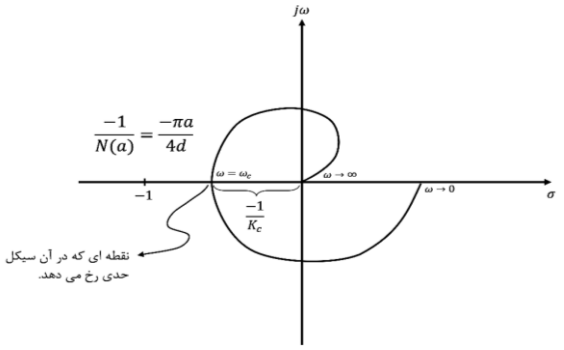
که d دامنه رله و a دامنه سیگنال سینوسی تحریک است. در صورتی که عکس منفی تابع توصیفی رله نمودار نایکویست فرآیند را قطع نماید در محل برخورد آنها پدیده سیکل حدی اتفاق می‌افتد. در مورد رله ساده عکس منفی تابع توصیفی رله قسمت منفی اعداد حقیقی است و با تغییر a از صفر تا بینهایت بین صفر تا منفی بینهایت تغییر می کند. شکل زیر نمودار نایکویست یک فرآیند نوعی و عکس منفی تابع توصیفی رله را نشان می‌دهد.

همانطوریکه از شکل مشخص است محل برخورد دو نمودار همان نقطه بحرانی است که در آزمایش $Z\text{-}N$ بدست می‌آید. دامنه و فرکانس نوسانات ناشی از سیکل حدی طبق روابط زیر تعیین می گردد.

$$G(j\omega_c)=-\frac{1}{N(a)} \qquad (۲)$$

$$K_c=\frac{4d}{\pi a} \qquad (۳)$$

در رابطه بالا d دامنه رله و a دامنه نوسانات در ورودی رله است که با دامنه نوسانات خروجی حول مقدار مرجع برابر است. پریود نوسانات نیز همان پریود نهایی t_c است. بنابراین با تعیین K_c و t_c و با استفاده از جدول $Z\text{-}N$ می‌توان پارامترهای کنترل‌کننده PID را محاسبه نمود.



شکل۸ نمودار نایکویست یک نمونه پلنت صنعتی

[1] Relay Feedback
[2] Non linear Element
[3] Low Pass Filter
[4] Limit Cycle
[5] Resonance
[6] Descibing Function

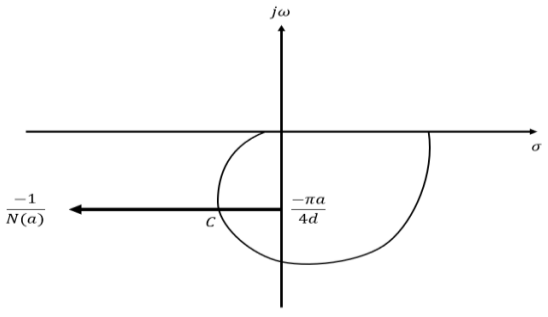
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

توجه کنید که در این روش K_c با نسبت دامنه رله بر دامنه نوسانات متناسب است و لذا دامنه نوسانات خروجی را می‌توان کاملاً توسط دامنه رله کنترل نمود. این امر اجازه می‌دهد، در حالتی که سیستم در حال کار است و خطای کنترل خیلی بزرگ نیست با وارد نمودن رله، در خروجی سیستم حول مقدار مرجع نوسانات کوچک و قابل تحملی ایجاد کرده و با ارزیابی مشخصات این نوسان، پارامترهای کنترل‌کننده را تنظیم نمود. البته تعیین دامنه مناسب برای رله حائز اهمیت است. این دامنه باید به گونه‌ای تعیین شود که اولاً دامنه نوسانات خروجی به قدر کافی کوچک باشد تا در کار سیستم خللی وارد نشود و حتی الامکان اثر نوسانات خروجی قابل اغماض باشد. ثانیاً دامنه این نوسانات به قدر کافی بزرگ باشد تا از نویز و اغتشاشات مختلف موجود در سیستم قابل تشخیص باشد.

۲-۳-۳- استفاده از هیسترزیس در روش فیدبک رله

در بخش قبل استفاده از رله ساده برای شناسایی یک نقطه از پاسخ فرکانسی بررسی شد. با تحلیل تابع توصیفی مشخص شد که فیدبک رله ساده، فرآیندهایی را که نمودار نایکویست آنها قسمت منفی اعداد حقیقی را قطع می‌کنند، به نوسان می‌اندازد. شکل ۹ نمودار نایکویست یک فرآیند نوعی که قسمت منفی اعداد حقیقی را قطع نمی‌کند، نشان می‌دهد. در این فرآیند استفاده از یک رله ساده در فیدبک، سیکل حدی و نوسان دائم ایجاد نمی‌کند. یک روش برای شناسایی نقطه‌ای از پاسخ فرکانسی چنین سیستمی استفاده از هیسترزیس در فیدبک رله است. عکس منفی تابع توصیفی این عنصر غیرخطی طبق رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$-\frac{1}{N(a)} = -\frac{\pi}{4d}\sqrt{a^2-\varepsilon^2} - j\frac{\pi\varepsilon}{4d} \qquad (۴)$$



شکل۹ نمودار نایکویست یک نمونه پلنت صنعتی[۸]

که d دامنه رله، ε مقدار هیسترزیس و a دامنه سیگنال سینوسی تحریک است. بنابراین عکس منفی تابع توصیفی رله همراه با هیسترزیس از دو جزء حقیقی و موهومی تشکیل شده است. جزء موهومی آن به a بستگی ندارد بلکه به ε و d وابسته است و جزء حقیقی آن با تغییرات a از صفر تا بینهایت بین صفر و منفی بینهایت تغییر می‌کند. این بدان معنی است که نمودار این تابع خطی راست و موازی قسمت منفی اعداد حقیقی می‌باشد. در شکل ۹ نمونه‌ای از نمودار این تابع رسم شده است. نقطه c محل برخورد نمودار این تابع با نمودار نایکویست فرآیند بوده و نقطه‌ای است که درآن سیکل حدی رخ می‌دهد. با استخراج اطلاعات مربوط به آن نقطه می‌توان کنترل‌کننده را تنظیم نمود. جدول $Z\text{-}N$ که بر پایه اطلاعات نقطه بحرانی تنظیم شده است دراینجا قابل استفاده نیست و باید از روش $Z\text{-}N$ توسعه یافته استفاده نمود.توجه کنید که با تغییر مقدا هیسترزیس در فیدبک رله و ارزیابی مشخصات سیکل‌های حدی بدست آمده نقاط متعدی از پاسخ فرکانسی سیستم را شناسایی نمود. اگر $\omega = \omega_c$ فرکانس مربوط به نقطه c باشد. خواهیم داشت.

$$G(j\omega_c) = r_c e^{-j\varphi_c} \qquad (۵)$$

$$r_c = \frac{\pi a}{4d} \qquad (۶)$$

$$\varphi_c = 180\, tan^{-1}\left(\varepsilon/\sqrt{a^2-\varepsilon^2}\right) \qquad (۷)$$

بنابراین با محاسبه دامنه نوسان سیکل حدی، محاسبه بهره و فاز پاسخ فرکانسی فرآیند در فرکانس نوسان سیکل حدی به آسانی انجام می‌پذیرد.

۲-٤-عملگر هوشمند

عملگر ها و حسگرها نقش مهمی در سیستم های کنترل خودکار دارند. آنها باید به طور دقیق و با قابلیت اعتماد عمل کنند زیرا مستقیماً بر عملکرد صحیح سیستم کنترل تأثیر می گذارند. در بسیاری از موارد، عملگر ها جریان‌های انرژی، جریان‌های جرمی یا نیروها را به عنوان پاسخی به سیگنال‌های ورودی کم انرژی مانند ولتاژ یا جریان الکتریکی و فشارها یا جریان‌های نیوماتیکی و هیدرولیکی ، کنترل (تنظیم) می کنند. اجزای اصلی معمولاً یک سوئیچ قدرت یا یک شیر، یک تقویت کننده یا موتور الکتریکی، پنیوماتیکی یا هیدرولیکی هستند که گاهی اوقات برای ایجاد یک رفتار استاتیکی و دینامیکی خاص و یک سنسور برای خروجی عملگر مانند موقعیت یا نیرو، بهمراه فیدبک بکارمی روند.

به دلیل حرکت یا تغییرات پیوسته و تقویت توان، محرک ها معمولاً دچار فرسودگی می‌شوند. بنابراین مشخصه های آنها حداقل با گذر زمان تغییر می کند و ممکن است کارایی آن تضعیف شود. خطاها ممکن است ظاهر شده و تا زمانی که خرابی رخ ندهد، گسترش یابند. حسگرهای صنعتی معمولاً وابستگی‌های متفاوتی نسبت به زمان در مقایسه با عملگرها دارند. فرسودگی و کهنگی ممکن است کمتر باشد، بسته به محیط، تبیین یک قانون کلی دشوار است. به نظر می رسد خرابی حسگر به طور تصادفی و ناگهانی رخ می دهد.

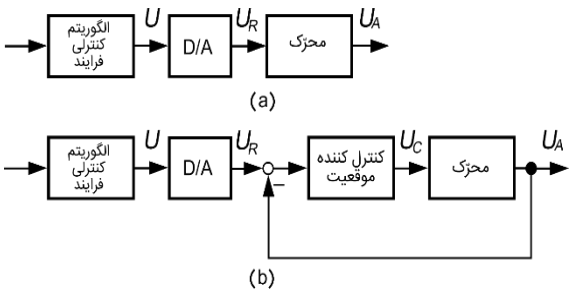
شکل۱۰ طرح یک عملگر کلاسیک بدون و با کنترل موقعیت آنالوگ را نشان می دهد. سیگنال فرمان آنالوگ U_R مقدار مرجع یا کنترل کننده

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

موقعیت است. بسته به نوع عملگر ، انواع عملگر های زیر را می توان در نظر گرفت[۹]:

• عملگر های تناسبی (مانند عملگر های پیزوالکتریک یا الکترومغناطیسی)
• عملگر های انتگرالی(جمع کننده) با سرعت متغیر (مانند سیلندرهای نیوماتیک یا هیدرولیک یا موتورهای DC)
• عملگر های انتگرالی(جمع کننده) با سرعت ثابت (به عنوان مثال، موتورهای AC)
• عملگر های با عملکرد گسسته (به عنوان مثال، موتورهای پله ای)

هدف از کنترل کننده موقعیت بدست آوردن یک موقعیت دقیق، مستقل از اختلالاتی مانند تغییرات ولتاژ منبع تغذیه، اصطکاک شفت و دنده، واکنش برگشتی، یا نیروهای عکس العمل مکانیسم یا وسیله ی کنترل شده است. کنترل‌کننده‌های موقعیت آنالوگ عمدتاً کنترل‌کننده‌های تناسبی خطی(P)، تناسبی-انتگرالی(PI) یا تناسبی-انتگرالی-مشتقی(PID) هستند، بنابراین عملکرد کنترل خیلی قابل قبول نیست زیرا عملگر ها عموما رفتار غیرخطی نشان می‌دهند.



شکل۱۰ عملگر کنترلی کلاسیک، (a) کنترل موقعیت پیشخور (b) کنترل موقعیت آنالوگی فیدبک[۹]

کنترل کننده موقعیت همچنین خطاهای عملگر را تا حد معینی پنهان می کند. اگر خطاهای یک عملگر به اندازه کافی بزرگ باشد، ممکن است به طور غیرمستقیم توسط متغیرهای نظارت شده مانند جریان منبع تغذیه یا انحراف موقعیت در کنترل کننده موقعیت یا بوسیله بازرسی شناسایی شوند. عوامل مختلفی بر عملکرد عملگر ها اثر دارند که قطعا بر عملکرد حلقه کنترل از نظر دقت، دینامیک، محدوده موقعیت‌یابی و غیره نیز تاثیر گذار می باشد. از این عوامل میتوان به موارد زیر اشاره کرد:
مانند رفتار ورودی/خروجی استاتیک ، اثرات غیرخطی (اصطکاک، واکنش برگشتی، هیسترزیس)، و پارامترهای فرآیند متغیر (با زمان) حائز اهمیت هستند. که از این نظر در جدول ۱ هر یک از عملگر های متداول ارزیابی شده اند. دیده می شود عواملی مانند اصطکاک، ویژگی های غیر خطی و پارامترهای فرآیند متغیر به ویژه در درایوهای الکترومغناطیسی، نیوماتیکی و هیدرولیک وجود دارد. آنها عملکرد کلی کنترل موقعیت در یک حلقه بسته را محدود کرده و یا موجب تاخیرشان می شوند، به خصوص اگر تأثیر آنها زیاد باشد (مانند عملگر ها با قیمت پایین).

جدول۱ عوامل موثر بر عملکرد عملگر ها[۹]

مشخصه ← نوع عملگر ↓	خطی استاتیکی	اثرات غیر خطی: اصطکاک	اثرات غیر خطی: واکنش-برگشتی	اثرات غیر خطی: هیسترزیس	پارامترهای متغیر فرآیند: داخلی[a]	پارامترهای متغیر فرآیند: خارجی[b]
موتور DC/AC با تغذیه	+	0-	0-	0		0-
موتور پله ای با تغذیه	+	0-	0-	0-		0-
آهنربای الکتریکی	0-	-		-	0	0-
سیلندر پنوماتیکی	-	--		-	-	0
سیلندر هیدرولیکی		-			-	0
محرک مبتنی بر پیزو	0		-	-		-

+ : خوب ، قابل صرف نظر.
0 : متوسط ، رایج.
- : بد ، قابل توجه.
a: ناشی از فیزیک درونی (پارامترهای وابسته به موقعیت و غیره)
b: ناشی از اثرات خارجی (ویژگی منبع انرژی پشتیبان مختلف، ویژگی‌های حرارتی و غیره)

بنابراین استفاده از کنترل کننده ای متداول برای این نوع عملگر ها برای مقابله با این محدودیت های اصلی، کافی نیست. لذا، ترکیب سخت‌افزار عملگر، میکروکنترلر و نرم‌افزار کنترل پیچیده برای بهبود دینامیک و همچنین ویژگی‌های استاتیکی عملگرها و افزودن عملکردهای هوشمندتر دیگر از مباحث مورد توجه است. بهبود عملکرد محرک ها از نظر موارد زیر همواره مد نظر بهره برداران می باشد:

• قابلیت اطمینان و در دسترس بودن بیشتر
• دقت بیشتر در موقعیت یابی
• موقعیت‌یابی سریعتر بدون بالازدگی[1]
• ساخت ساده تر و به صرفه تر (هزینه کمتر)

طراحی و ساخت عملگر های های کلاسیک به استاندارد بسیار بالایی رسیده است. اگر تعداد قطعات تولید شده زیاد باشد، قیمت نسبتاً پایین است. از این رو نمی‌توان انتظار تغییر چشمگیری داشت. با این حال، از اصول عملگر جدید و ادغام میکروالکترونیک می توان اثرات جدیدی را انتظار داشت. محرک های جدید، به عنوان مثال، پیزوالکتریک و مغناطیسی و یا واکنش های الکتروشیمیایی هستند. تأثیر قوی‌تری ممکن است از ادغام میکروالکترونیک در عملگرهای (کلاسیک) حاصل شود زیرا قیمت میکروکنترلرها اکنون به اندازه کافی پایین است. پس نه تنها کنترل کننده موقعیت آنالوگ میتواند جایگزین شود، بلکه بسیاری از کارکردهای دیگر نیز میتوانند لحاظ گردند. با گذشت زمان، این امر ممکن است به محرک های هایی با ویژگی های "هوشمندتر" منجر شود.
تعاریف متفاوتی از عملگر هوشمند تاکنون داده شده است. به عنوان مثال یک تعریف ازکنترل هوشمند را سطح سلسله مراتبی بعد از کنترل تطبیقی

[1] Overshoot

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

و کنترل یادگیرنده در نظر میگیرد تا بوسیله این آموزش، جایگزین ذهن انسان در تصمیم گیری، برنامه ریزی استراتژی های کنترل و یادگیری توابع جدید شود. و یا سیستم‌های کنترل هوشمند را به عنوان سیستم‌هایی تعریف می‌کند که مفاهیم کنترل سنتی را با قابلیت‌های تشخیصی و پیش‌بینی عیب زمان واقعی ادغام می‌کنند. همچنین تعریف ساده تر از یک سیستم کنترل هوشمند، سیستمی است که توانایی درک، استدلال و یادگیری پیرامون فرآیندها را دارد.

بهتر است در استفاده از واژه هوش برای کنترل خودکار احتیاط کرد. در مقایسه با یک اپراتور انسانی بسیار باهوش نباید انتظار زیادی داشت. در اینجا، فقط درجه بسیار پایینی از "هوش" با توانایی مدلسازی، استدلال و یادگیری در مورد محرک و کنترل آن مد نظر می باشد. شکل ۱۱ ماژول های مختلف تبادل کننده اطلاعات یک محرک هوشمند درجه پایین را نشان می دهد که شامل موارد زیر است :

• کنترل در سطوح مختلف

خود تنظیم و کنترل تطبیقی (غیرخطی)

بهینه سازی عملکرد دینامیکی (سرعت در مقابل دقت)

نظارت و تشخیص عیب

• دانش محور

دانش تحلیلی

تخمین پارامتر و حالت (مدل های عملگر)

روش های طراحی کنترلر

دانش استنتاجی

ویژگی های عادی (ذخیره رفتار آموخته شده)

• مکانیسم تداخل

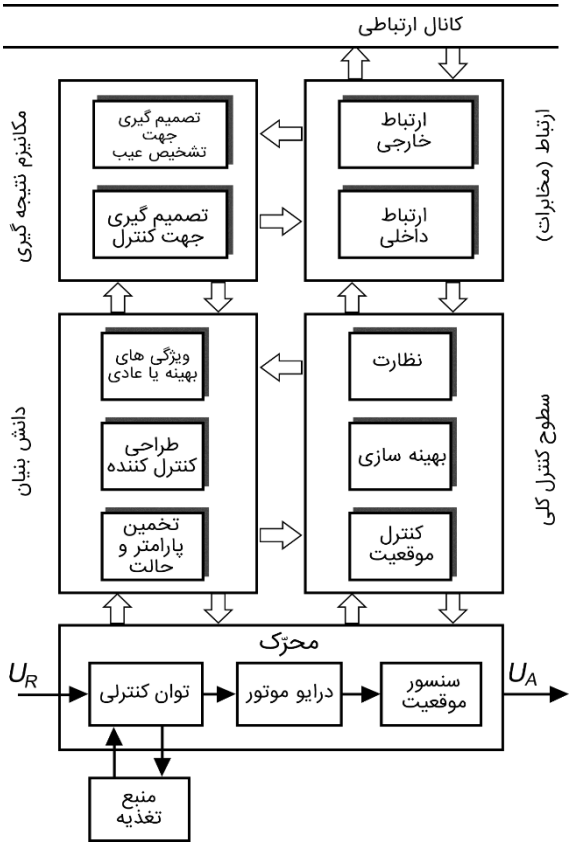
تصمیم گیری جهت کنترل (تطبیقی).

تصمیم گیری جهت تشخیص عیب

• ارتباط (تبادل داده)

داخلی: اتصال ماژول ها و پیام ها

خارجی: با سایر عملگرها و سیستم اتوماسیون



شکل۱۱ ساختار یک عملگر هوشمند (درجه پایین) [۹]

از این رو عملگر های «هوشمند» ،کنترل‌کننده را عمدتاً با رفتار غیرخطی تطبیق می‌دهد (انطباق) و پارامترهای کنترل‌کننده آن را بسته به موقعیت و بار ذخیره می‌کند (یادگیری) ، بر همه عناصر مربوطه نظارت کرده و برای درخواست تعمیر و نگهداری، تشخیص عیب را انجام می‌دهد (نظارت). یا در صورت بروز شکست، بصورت ایمن[1] شکست می‌خورد (تصمیم‌گیری در مورد اقدامات).

۳- سیستم های کنترل صنعتی جدید و روند پیشرفت فناوری در این حوزه

[2] Safe

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

سال ها است که استفاده از سیستم های کنترل گسترده و کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر در پلنت های صنعتی پیشرفته به امری عادی بدل شده است و این دو نقشی اساسی در کنترل پلنت های صنعتی داشته و دارند، اما باید به این نکته توجه داشت که فناوری همچنان در حال توسعه است. سیستم‌های امروزی شروع به ترکیب هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای توسعه سیستم کنترل های صنعتی کرده‌اند[۱۰].

سیستم های کنترل گسترده های امروزی قابلیت‌های جدیدی مانند مدیریت ناوگان، عیب‌یابی تجهیزات، پایش عملکرد، کنترل هشدار در هنگام بروز خطا، و اولویت‌بندی هشدارها را در خود جای داده‌اند که اقدامات انجام شده در هنگام بروز خطا در سیستم را کاهش می‌دهند. به دلیل پیشرفت در قدرت محاسبات، با کاهش ابعاد سخت‌افزاری، پردازش‌ها بسیار سریع‌تر و کارآمدتر انجام می‌شود. در سیستم کنترل های قدیمی‌تر برای هر کار خاصی یک زیرسیستم اختصاصی ارائه می‌شد. با این حال، فناوری یکپارچه‌ای تحت عنوان خدمات اجزای تعبیه شده[1] در سیستم های کنترل گسترده های اخیر، زیر سیستم‌ها را حذف می‌کند، شیءگرا است و قابلیت اطمینان داده را حفظ می‌کند. یکی دیگر از قابلیت‌های این سیستم های مدرن، انعطاف‌پذیری در اتصال به شبکه‌های داخلی و خارجی است. پیاده‌سازی معماری ابر برای ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، روشی ایمن برای ذخیره‌سازی داده‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها بر اساس آن فراهم کرده است. یکی دیگر از قابلیت‌های سیستم های کنترل گسترده های جدید این است که می‌توانند به صورت بر خط به‌روز شده وبسته های امنیتی بسته‌های امنیتی جدید را بدون خاموش کردن واحد دریافت کنند. به دلیل افزایش اهمیت داده‌ها و افزایش حملات سایبری، افزایش چشمگیری در برنامه‌های پیشگیری از حملات سایبری مشاهده شده است. سخت‌افزار فعلی با بسته‌های امنیتی جدیدی که از سرور مرکزی دریافت می‌کند، به صورت بر خط و بدون نیاز به هیچ‌گونه خاموشی به‌روز می‌شود. این سیستم های امروزی همچنین از قابلیت مراکز خبره از راه دور[2] برخوردارند. این مراکز دسترسی به متخصصان واجد شرایط را برای تشخیص و رفع خطاها فراهم می‌کند. این قابلیت ازآنجاکه به عنوان یک لایه پیشگیرانه برای کاهش احتمال وقوع شرایط اضطراری عمل می‌کند، محبوبیت زیادی در بین شرکت‌های صنعتی پیدا کرده است.

نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در صنعت همچنان در مراحل آغازین خود قرار دارد. به عنوان مثال، انرژی‌های تجدید پذیر یکی از حوزه‌هایی در صنعت است که تا حدودی از قدرت هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، مدل‌سازی پیش‌بینانه و علم داده استفاده می‌کند و این باعث کاهش هزینه‌ها، پیش‌بینی‌های بهتر و درآمدزایی بیشتر شده است.هوش مصنوعی و یادگیری ماشین قابلیت‌های زیر را نسبت به سیستم‌های فعلی ارائه می‌دهند:

۱-قدرت محاسباتی بهتر: قدرت محاسباتی بهتر این اجازه را به سیستم می‌دهد تا با استفاده از مجموعه داده‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر، تجزیه و تحلیل سریع‌تر، دقیق‌تر و قابل‌اطمینان‌تری انجام دهد.

۲-الگوریتم‌های پیشرفته: الگوریتم‌های جدید و پیشرفته، تجهیزات را به روشی بهتر آموزش می‌دهند تا عملکرد بهتری داشته باشند و از هر تکرار یاد بگیرند.

۳-کلان داده و سیستم‌های تراکنش ترکیبی/پردازش همراه با تجزیه و تحلیل[3] کلان داده : این سیستم‌های در کاربردهای به هنگام و در لحظه قدرت بیشتری دارند و قابلیت‌های تصمیم‌گیری را بهینه می‌کنند. برخی از کاربردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در آینده نزدیک:

۱- پیش‌بینی درخواست های مصرف کننده : از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای یادگیری میزان تقاضا و تولید و پیش‌بینی میزان عرضه و تقاضا در لحظه، برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

۲- بهینه‌سازی عملکرد: بهینه‌سازی بهره‌وری تولید به صورت به هنگام و در لحظه، با پایش و بهینه‌سازی عملکردتجهیزات پلنت صنعتی انجام می‌شود که منجر به افزایش میزان تولید تا حدود ۲۰٪ می‌شود.

۳- تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه: استفاده از روش ها مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بازرسی تجهیزات، به این صورت که با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق ، سیستم آموزش دیده و برای شناسایی نقص در تجهیزات و پیش‌بینی خرابی به کار گرفته می‌شود. این امر باعث افزایش میزان دسترسی‌پذیری واحدها می‌شود.

۴- مدیریت تقاضا: الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سیستم را برای درک میزان عرضه و تقاضای تولید آموزش می‌دهند و مدیریت تجهیزات نمونه کار ها[4] ذخیره‌سازی را برای پشتیبانی از شبکه تعلیم می‌دهند. برنامه‌های پاسخگویی درخواست مصرف کننده را می‌توان بر اساس نتایج این تجزیه و تحلیل‌ها طراحی کرد.

۵- بهبود عملکرد تجهیزات. روند عملکرد تجهیزات را می‌توان برای درک رفتار تجهیزات مورد مطالعه قرار داد و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند اپراتور را برای انجام اقدامات لازم برای حفظ عملکرد در سطح مطلوب تعلیم دهند.

۶- تشخیص عیب از راه دور. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند سیستم را با توجه به داده‌های عملیاتی نرمال و غیر نرمال آموزش دهند و در این صورت امکان تشخیص عیب به سیستم داده می‌شود.

۷- پشتیبانی میدانی از راه دور

۸-خطر و انطباق: هوش مصنوعی نقشی اساسی در امنیت سایبری ایفا می‌کند، زیرا از انواع حملات سایبری درس گرفته و سیستم را برای هوشیاری در برابر حملات سایبری آینده آماده می‌کند. سیستم توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین آموزش دیده و به راحتی می‌تواند تهدیدهای آینده را شناسایی کند و به اپراتورها اجازه می‌دهد اقدامات لازم را انجام دهند.

[1] Embedded Component Services
[2] Remote Expert Centers
[3] Hybrid Transaction/Analytics Processing (HTAP)
[4] Portolio

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

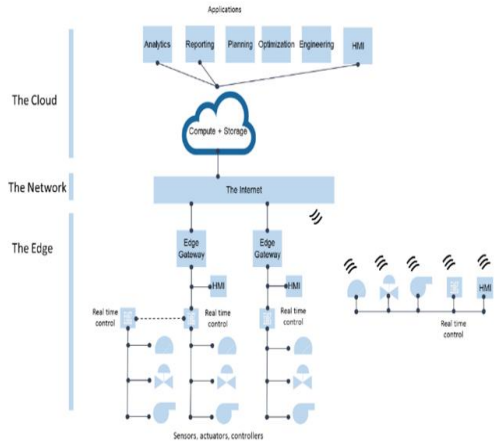
۹- مدیریت ناوگان: الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سیستم را برای درک عملکرد سطح ناوگان و پایش و تشخیص عیب تجهیزات برای اطمینان از عملکرد مناسب ناوگان آموزش می‌دهند.

همانطور که در بخش اول، اشاره شد؛ مفهوم انقلاب صنعتی چهارم بسرعت در حال پیشرفت و فراگیری است. در صنعت و کنترل صنایع نیز مفاهیم جدیدی در حال پر رنگ شدن هستند. در ادامه برای اشاره به بعضی از این مفاهیم به توصیف اینترنت اشیا صنعتی[1](IIOT) ، کلان داده[2] و همزاد دیجیتال[3] پرداخته میشود.

اینترنت اشیا صنعتی به حسگرها، عملگرها وسایر تجهیزاتی اطلاق می شود که با کامپیوترهای صنعتی شبکه شوند. در واقع اینترنت اشیا صنعتی یک تحول جدید در کنترل توزیع یافته است و بدلیل وجود و پیشرفت فناوری هایی چون سیستمهای سایبر فیزیک[4] و امنیت سایبری، رایانش ابری[5] ، رایانش لبه ای[6] ، تحلیل کلان داده[7] ، رباتیک پیشرفته و رایانش شناختی[8] امکان رشد یافته است. سیستمهای سایبر فیزیک، فناوری پایه برای بستر اینترنت اشیا و اینترنت اشیای صنعتی است، چراکه امکان اتصال ماشینهای فیزیکی که قبلا متصل نبودند را بهم فراهم می‌آ ورد. با رایانش ابری سرویسهای فناوری اطلاعات و منابع می توانند در اینترنت بارگذاری و بازیابی شوند و لازم نیست به یک سرور متصل باشند. رایانش لبه‌ای یک الگوی رایانش توزیع یافته است که ذخیره داده کامپیوتری را نزدیکتر به محل کاربری آن در نظر می گیرد. در واقع بر خلاف رایانش ابری، رایانش لبه‌ای در ذخیره و تحلیل داده بصورت غیرمتمرکز طراحی می‌شود. اینترنت اشیا صنعتی نیاز به ترکیب رایانش ابری و لبه‌ای دارد. با پیشرفت قدرت پردازنده ها و پیشرفت تئوریهای تحلیل، مفاهیمی چون مدیریت هشدار ها و کاربرد روشهای پیشرفته تر آنالیز داده ها نیز در سیستمهای کنترل توزیع یافته بیشتر دیده می‌شود. در واقع در این خصوص باید بصورت دقیقتر به مفهوم کلان داده ها پرداخت. در سال‌های اخیر با نرخ بالای نفوذ حسگرها، ادوات دیجیتال و اینترنت اشیا در انواع کسب‌وکارهای عمومی و صنعتی مواجه هستیم که این امر سبب رشد سریع‌تر داده‌های اخذشده و فراهم شدن کلان داده‌ها شده است.بنابراین تشکیل کلان داده‌ها و تحلیل آن‌ها، منجر به تغییرات زیادی در چگونگی انجام کارها و اخذ تصمیمات شده و بسیاری از صنایع را تحت تأثیر خود قرار داده است.

کلان داده دارای مشخصات زیر می‌باشد:

- حجم بسیار بالایی دارد؛ اندازه‌ای در حدود ترابایت یا حتی بیشتر. ازاین‌رو به فضای ذخیره‌سازی نیازمندیم. بنابراین زیرساخت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری باید مرتباً ارتقا پیدا کنند تا پاسخگوی حجم زیاد داده باشند.



شکل ۱۲ اینترنت اشیا صنعتی

- نرخ تولید داده از کسری از ثانیه تا دقیقه متغیر است و رویکردهای اندازه‌گیری و اکتساب داده بلادرنگ و در لحظه باید در نظر گرفته شوند.
- داده‌های تولید شده در فرمت‌های مختلفی از قبیل متن، تصویر، ویدئو، صفحات گسترده[9] و پایگاه‌های داده هستند.

یکی از کاربرد های مفهوم کلان داده در شبکه برق است. بخصوص با ظهور شبکه هوشمند و جایگزینی تدریجی آن با شبکه سنتی، صنعت برق شاهد افزایش روزافزون تعداد بایت‌های مختلف است. با یک رویکرد دقیق و مقیاس‌پذیر می‌توان گفت تحلیل داده‌ها به سرعت به نقطه‌ی کانونی درک موقعیت‌های واقعی در شبکه‌ی برق تبدیل می‌شود. کاربردهای تحلیل کلان داده در شبکه‌ی برق را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد.این دسته‌ها عبارت‌اند از:

- تحلیل سازمانی
- تحلیل کلان داده‌های بهره‌برداری
- تحلیل عملیات و تعامل مشتری
- تحلیل داده‌های امنیت سایبری

چنانچه صحبت از امنیت سایبری به میان آمد، باید اشاره کرد که روشهای تامین امنیت سایبری بسیار مورد توجه و در حال پیشرفت هستند. در محصولات برخی شرکتها، از کاربرد همزاد دیجیتال برای تامین امنیت سایبری اشاره شده است. در ادامه بطور خلاصه مفهوم همزاد دیجیتال را توضیح داده می شود، این مفهوم با توضیحات بیشتر در بخش فناوری آزمایش و شبیه سازی بحث خواهد شد.

همزاد دیجیتالی کپی دیجیتالی از یک محصول فیزیکی است که هم‌زمان با طراحی اولیه محصول ایجاد شده و توسعه می‌یابد. درواقع همزاد دیجیتالی بازتاب‌دهنده وضعیت فعلی شیء مورد نظر است. یک همزاد دیجیتالی با دو هدف خلق می‌شود: هدف اول این است که هرگونه تغییر، اصلاح و توسعه قبل از ساخت محصول اصلی بر روی همزاد دیجیتالی آن

[1] Industrial Internet of Things
[2] Big DATA
[3] Digital Twin
[4] Cyber Physical Systems
[5] Cloud Computing
[6] Edge Computing
[7] Big Data Analysis
[8] Cognitive Computing
[9] spreadsheets

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

آزمایش شود تا هزینه‌های عملیاتی تولید کاهش یابد. برای نمونه یک مدل سه‌بعدی خودرو که با نرم‌افزار CAD طراحی شده است، می‌تواند برای آزمایش های مختلف نظیر مقاومت هوا استفاده شود. البته پیش از این نیز شبیه‌سازی و آزمایش طرح اولیه یک محصول در صنعت متداول بوده است؛ پس سؤال این است که چه چیزی یک همزاد دیجیتالی را متمایز و کارآمدتر از یک مدل کامپیوتری می‌سازد؟ پاسخ به این سؤال در هدف دوم از ساخت همزاد دیجیتالی خلاصه می‌شود؛ این‌که همزاد دیجیتال با تعبیه حسگرهایی در سیستم فیزیکی ساخته می شود،به این ترتیب وضعیت فعلی سیستم فیزیکی به‌طور لحظه‌ای و بلادرنگ در همزادش بازتاب داده میشود. همزاد دیجیتال علاوه بر شکل، از نظر موقعیت، وضعیت و حرکت هم به دستگاه اصلی شبیه است. هزاران حسگر در طول فرآیند تولید فیزیکی کار گذاشته می‌شوند که هر کدام داده‌های جنبه خاصی از تولید را جمع‌آوری می‌کنند. مانند شرایط محیطی، خصوصیات رفتاری ماشین و کاری که در حال انجام است. تمامی این داده ها به صورت پیوسته به همزاد دیجیتال منتقل شده و توسط آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال حسگرهای دما که در بخش‌های مختلف یک دستگاه مکانیکی نصب شده‌اند، اطلاعاتی را از دمای دستگاه در حال کار فراهم می‌سازند که عیناً در همزاد دیجیتالی قابل مشاهده است. درنتیجه عیب‌یابی آن دستگاه ساده‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود و در پی آن هزینه‌های خرابی تجهیزات کاهش خواهد یافت. بنا به ویژگیهای نامبرده کاربردهای مختلفی برای همزادهای دیجیتال متصور است که در بخش بعد مفصلتر توضیح داده می شود. شاید بتوان اهداف جدید درکنترل صنعتی را به عناوین تمرکززدایی[1]، کربن زدایی[2] و دیجیتال سازی[3] خلاصه نمود.

٤-کاربرد سیستم های آزمایش و شبیه‌سازی[4] جدید در کنترل صنعتی

شایان ذکر است که امروزه با فناوری و با روی کار آمدن شبیه ساز های مانند همزاد دیجیتال، دیگر مفهوم شبیه سازهای آموزشی و مهندسی را نمی‌توان به طور قطع از یکدیگر جدا دانست. در ادامه با توضیح مفاهیم آزمایشگاه های سخت افزار در حلقه و همزادهای دیجیتال به بررسی این روشهای آزمایش خواهیم پرداخت.

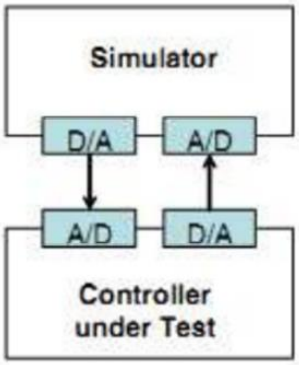
٤-١-شبیه ساز سخت افزار در حلقه

رهیافت ترکیب شبیه‌سازی و آزمایش عملیاتی را شبیه‌سازی سخت افزار در حلقه HIL می‌نامند. شبیه‌سازی HIL نوعی از انواع شبیه‌سازی زمان‌حقیقی است. تفاوت عمده بین شبیه‌سازی HIL با سایر روش‌های شبیه‌سازی زمان‌حقیقی، وجود بخشی از سیستم واقعی به صورت فیزیکی در حلقه شبیه‌سازی است. در واقع نکته مهم در شبیه‌سازی HIL ایجاد تمامی سیگنال‌های مورد نیاز برای بخش فیزیکی است به صورتی که بخش فیزیکی این تصور را داشته باشد که در حال کار با پلنت واقعی است.روش HIL مزایای روش‌های سنتی تست را یکجا دارد: هزینه کم روش‌های شبیه‌سازی نرم‌افزاری در مقایسه با روش‌های آزمایش با تجهیز واقعی و همچنین امکان انجام تست‌های آزمایشگاهی پیچیده با حفظ ایمنی که به صورت سنتی تنها با شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بررسی می‌شد. و علاوه بر این امکان انجام آزمایش خطاهای محتمل در شرایط واقعی را دارا می‌باشد. ممکن است طراح بخواهد بخش های مختلف یک سیستم را به صورت مجزا آزمایش کند تا مطمئن شود که همه عناصر به همان صورتی که قرار بوده است کار می‌کنند. بطور مثال در طراحی و ساخت سیستم‌های الکترونیک قدرت هم شبیه‌سازی HIL به دو نوع شبیه‌سازی HIL بخش کنترل و شبیه‌سازی HIL بخش قدرت تقسیم بندی می‌شوند. در شبیه‌سازی HIL بخش کنترل در صورتی که مدل دینامیکی استفاده شده در شبیه‌سازی به اندازه کافی دقیق باشد و نمایش مناسبی از سیستم واقعی ارائه دهد، حتی می‌توان از این روش برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده نیز استفاده کرد. از دیگر مزایای روش تست HIL می‌توان به امکان تست طراحی‌های پیچیده اشاره کرد. با افزایش پیچیدگی سیستم و سخت افزارهای مرتبط، پیچیدگی سیستم کنترل نیز افزایش خواهد یافت. شبیه‌سازیHIL روشی است که به میزان بسیار زیادی در فرآیندهای توسعه و تست سیستم‌های پیچیده استفاده می شود.

٤-١-١-شبیه ساز سخت افزار در حلقه، بخش کنترل صنعتی

شبیه‌سازی HIL کنترل شامل آزمایش یک تجهیز به کمک پورت‌های داده آن است. در این تکنیک سیگنال‌های دیجیتال (و یا سیگنال های آنالوگ تبدیل شده به سیگنال‌های دیجیتال) ما بین سیستم تحت آزمایش و شبیه‌ساز HIL در حال مبادله است. این فرآیند در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این تکنیک امکان تست عملکردهای کنترلی یک تجهیز را فراهم می‌کند. برخی از کاربردهای این تکنیک عبارتند از:

- ارزیابی کنترل‌کننده‌های صنعت فضایی
- ارزیابی کنترل‌کننده‌های الکترونیکی صنعت خودرو
- ارائه تجهیزات و عملکردهای جدید
- ژنراتورهای سیستم نیروگاه بادی
- خودروهای برقی و هایبرید



شکل۱۳ شبیه ساز CHIL

[1] Decentralization
[2] Decarbonization
[3] Digitalization
[4] Simulation and Test Systems

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

در حال حاضر بسیاری از سازندگان سخت افزار کنترلی PLC امکان برقراری ارتباط PLC با نرم افزارهای شبیه‌سازی بلادرنگ (مانند MATLAB در مد XPC، LABVIEW و..) به منظور ایجاد آسان شبیه‌ساز HIL کنترلی را به عنوان قابلیتی مهم و جدید بر محصول خود را مطرح می‌کنند.

٤-٢-همزاد دیجیتال

همزاد دیجیتال عموما به صورت یک کپی دیجیتال از مفهوم فیزیکی جاندار یا بی‌جان تعریف می‌شود.. کاربرد این مفهوم پس از بوجود آمدن اینترنت اشیا(IOT) از نظر هزینه ها مناسب و قابل پیاده سازی شد.

٤-٢-١- نحوه کارکرد همزاد دیجیتال

گام اول و مهمترین گام در ساخت و ایجاد یک همزاد دیجیتال به کمک متخصصین علوم داده و ریاضیات کاربردی انجام می‌شود. هدف موضوع مذکور، تحقیق ماهیت فیزیکی مدل‌شونده و استفاده از داده‌ها و روابط ریاضی برای ساخت یک مدل ریاضی است. تفاوت این مدل با مدلسازی‌ها و شبیه‌سازی‌های دیگر در این است که به گونه‌ای درست می‌شود که بتواند از حسگر ها داده بگیرد و خود را شبیه همزاد فیزیکی‌اش کند. توجه شود که میزان دقت در شباهت یک همزاد دیجیتال و همزاد فیزیکی‌اش بنا به کاربرد می‌تواند متفاوت باشد.

در اینجا می‌توان به تفاوت این فن‌آوری با فن‌آوری واقعیت افزوده[1] دقیق شد. در فناوری واقعیت افزوده مدل‌ها براساس داده‌های جمع‌آوری شده با دقت بالا ساخته می‌شوند در حالیکه فناوری همزاد دیجیتال با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرها مرتب به روز رسانی می‌شود. به مرور زمان بنا به کاربرد فناوری همزاد دیجیتال به سه نوع مختلف تقسیم شده است.

- نمونه اولیه همزاد دیجیتال[2]
- نمونه همزاد دیجیتال[3]
- تجمیع همزاد دیجیتال[4]

فناوری نمونه اولیه همزاد دیجیتال شامل طراحی‌ها، آنالیزها و فرایندها برای تحقق یک محصول فیزیکی است. در واقع این فنآوری پیش از وجود محصول فیزیکی وجود دارد. نمونه همزاد دیجیتال ، همزاد دیجیتالی هر جز سازنده یک ماهیت فیزیکی است و تجمیع همزاد دیجیتال برآیند نمونه همزاد دیجیتال ها بوده و اطلاعاتش می‌تواند برای بهینه سازی، تشخیص و پیش‌بینی و یادگیری راجع به ماهیت فیزیکی مدل‌شونده بکار رود.

٤-٢-٢- کاربرد های همزاد دیجیتال

از کاربردهای آن می‌توان از مزارع بادی و نیروگاه‌ها برای تامین امنیت سایبری، پیش‌بینی عیب و بهسازی راندمان تا کشاورزی و تست موبایل هوشمند و...مثال‌های زیادی عنوان کرد.

٥-جمع بندی و نتیجه‌گیری(تحلیل روند پیشرفت فنا وری سیستم های کنترل صنعتی و الزامات داخل کشور)

با توجه به مباحث مطروحه در این مقاله و روند سریع پیشرفت فناوری در سیستم های کنترل صنعتی، به منظور بکار گیری صحیح این فناوری ها در سیستم های کنترل صنعتی در کشور، ذکر موارد زیرضروری به نظر می رسد.

در پیاده سازی هر سیستم کنترل صنعتی می بایست به دو مولفه اساسی آن همواره توجه داشت ، بخش عملکردی[5] و بخش فناوری اجرا[6] (سخت افزارو نرم افزار). در بخش عملکردی سیستم‌های کنترل صنعتی توجه به موارد زیر ضروری است:

- آشنایی کامل به فرآیند عملکردی پلنت صنعتی به طور کامل و به صورت جزئی که در طراحی سیستم کنترل پلنت صنعتی بسیار مهم و اساسی می‌باشد و می‌توان گفت گام اصلی در طراحی سیستم کنترل پلنت صنعتی است که در آن ارتباط کلیه اجزاء پلنت صنعتی از نظر کمی و کیفی آمده است و در تهیه شبیه ساز سیستم کنترل پلنت صنعتی که یکی از الزامات طراحی سیستم کنترل صنعتی قبل از اعمال سیستم طراحی‌شده به پلنت صنعتی واقعی می‌باشد بکار می‌آید. لازمه این امر داشتن دانش فنی در زمینه طراحی فرآیند پلنت صنعتی ، و همچنین دانش فنی در زمینه طراحی تجهیزات مکانیکی و الکتریکی، مباحث شیمی و خوردگی و ... می‌باشد.
- آشنایی با نحوه طراحی سیستم‌های کنترل در قالب لاجیک‌نویسی و ساختارهای و الگوریتم های کنترلی مختلف
- طراحی سیستم‌های حفاظت و آشنایی با مباحث قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی در سیستم‌های کنترل صنعتی
- روش‌های مختلف اندازه‌گیری کمیت‌های غیر الکتریکی و الکتریکی با در نظر گرفتن الزامات پلنت صنعتی از قبیل خطا، قابلیت تکرار و ...
- نحوه بکارگیری و طراحی انواع محرک‌ها از قبیل طراحی سیستم‌های پنیوماتیکی، هیدرولیکی و الکتریکی و عناصر نهایی کنترل

طراحی سیستم کنترل پلنت صنعتی در بخش عملکردی خاص هر صنعت بوده ولی در بخش فناوری اجرا کاملاً با سایر صنایع مشترک می‌باشد. از سوی دیگر اعم فعالیت‌های تحقیق و توسعه بر روی بخش نرم‌افزاری سیستم‌های کنترل صنعتی صورت می‌گیرد و به نحوی که در دهه‌های گذشته تنها دو نسل از سخت‌افزار سیستم‌های کنترلی زیمنس تحت عناوین **S7** و **S5** تولید گردیده است درصورتی‌که در نقطه مقابل در همین بازه زمانی ۴ نسل از نرم‌افزار سیستم‌های کنترلی رونمایی شده است. نسل‌های متوالی نرم‌افزارهای سیستم‌های کنترلی از جوانب مختلف مانند رابط کاربری، ساختار بلادرنگ، پایگاه داده، ماژول‌ها و کتابخانه‌های کارا، امنیت و توان مقابله با نفوذپذیری ارتقاء پیدا نموده‌اند.

[1] Augmented Reality (AR)
[2] Digital Twin Prototype (DTP)
[3] Digital Twin Instance (DTI)
[4] Digital Twin Aggregate (DTA)
[5] Functional
[6] Implementation

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]

در این راستا با توجه به افق روشن و درآمد درخور توجه، به دلیل وجود تقاضا برای سیستم‌های با عملکرد بالا و امنیت تضمین‌شده، سرمایه‌گذاری‌های کلانی توسط شرکت‌های مربوطه در حوزه تحقیق و توسعه این نرم‌افزارها صورت می‌گیرد ازجمله تحقیقات و فعالیت‌های انجام‌گرفته در سال‌های اخیر می‌توان به ظهور کنترل پیش‌بین بر پایه مدل و کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در فرایندهای صنعتی اشاره کرد [۱۲].

لذا پیشنهاد می شود به بخش عملکردی سیستم های کنترل صنعتی توجه بیشتری شود تا کشور بتواند همگام با کشور های صنعتی درطراحی و پیاده سازی سیستم های کنترل صنعتی پیشرو باشد.

مراجع

[1] Multiple vulnerabilities in ABB 800xA DCS." https://ics-cert.kaspersky.com/news/2020/04/30/abb-vulnerabilities.

[2] E. Kovacs. "Flaws in ABB DCS Allow Hackers to Cause Disruption in Industrial Environments." https://nimbus-t.com/flaws-in-abb-dcs-allow-hackers-to-cause-disruption-in-industrial-environments

[3] C.L. Albert and D.A. Coggan, "Fundamentals of Industrial Control, Practical Guides for Measurement and Control ", Second Edition, Instrument Society of America (ISA), *1996.*

[4] Frank Jovic, "Expert Systems in Process Control ", First Edition, Chapman & Hall, *1992*

[5] https://www.indumart.com.

[6] P. Kadlec, B. Gabrys, S. Strandt, Data-driven Soft Sensors in the process industry, Comput. Chem. Eng. 33 (2009) 795–814.

[7] https://www.shimaden.com.

[8] Cheng-Ching, Yu, "Autotuning of PID Controllers, A Relay Feedback Approach ", Second Edition, Springer -Verlog London Limited, *2006.*

[9] M.M. Gupta and N.K. Sinha, "Intelligent Control System, Theory and Applications ", IEEE Press, *1996.*

[10] A.Larson. "The POWER Interview: How Modern Control System Technology Is Changing Power Plant Operation." https://www.powermag.com/the-power-interview-how-modern-control-system-technology-is-changing-power-plant-operation.

[11] jburke. "'Intelligent' Controller For Gas Turbines Announced." https://dieselgasturbine.com/intelligent-controller-for-gas-turbines-announced.

[12] "Multiple vulnerabilities in ABB 800xA DCS." https://ics-cert.kaspersky.com/news/2020/04/30/abb-vulnerabilities.

[13] Sirkka-Liisa Ja¨msa¨-Jounela. "Future trends in process automation" Annual Reviews in Control 31 (2007) 211–220.

[14] S. Neil. "Pigler Automation Tests Siemens 'Next-Gen DCS." https://www.automationworld .com/products/control/article/13743028/pigler-automation-tests-siemens-nextgen-dcs.

[15]https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electrical-digital-twin-market-192874390.html.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61186/joc.17.2.165]