Problem-Solving Mechanisms in Fourth-Generation Process Systems Engineering: Advancing Solutions with Emerging AI-driven Tools

Amir Arsalan Sobhani[1], Mohammad Fakhroleslam[2*]
[1] M.Sc. of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University
[2] Assistant Professor of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University[1]
* fakhroleslam@modare.ac.ir

Abstract
Process systems are a complex set of components, behaviors, and relationships that make reorganization and, as a result, analyze their challenges and provide appropriate responses difficult. Process Systems Engineering (PSE) uses theories of systems and engineering systems in processes to make a better understand of these systems. In addition, based on sufficient knowledge they examine different response solutions to new challenges of these systems and selects the optimal response among different solution alternatives. The fourth generation of PSE, using emerging tools of the Fourth Industrial Revolution, has taken a step in increasing the depth of this recognition and the quality of its response in the development of oil, gas, and petrochemical smart industries. In this article, first, the comprehensive theory of systems and engineering systems applied on the process approaches based on the characteristics of these systems, and then the scope of activities and the role of process engineering systems as decision-making in solving the challenges of the oil, gas and petrochemical industries are reviewed and updated. In addition, this new mechanism for solving and responding to process challenges by this group of engineers is explained and the role of emerging tools resulting from the Fourth Industrial Revolution in improving the speed and accuracy of this response is discussed. Also, key technologies of the Industrial Revolution 5.0 are discussed and the prerequisites for the next generation of process engineering systems are addressed.
Keywords: PSE, Industry 4.0, Oil and Gas, Petrochemicals, Artificial Intelligence

[1] Tehran, Tarbiat Modares University, Faculty of Chemical Engineering, Process Design Group

سازوکارهای حل مسئله در نسل چهارم مهندسی سیستم‌های فرایندی: ارتقای راه‌حل‌ها با ابزارهای نوظهور مبتنی بر هوش مصنوعی

امیر ارسلان سبحانی[1]، محمد فخرالاسلام[2*]

[1] کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

[2] استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس[1]

[*] fakhroleslam@modare.ac.ir

چکیده

سیستم‌های فرایندی، مجموعه‌ای پیچیده از اجزاء، رفتار و ارتباط هستند که شناخت آن‌ها و در نتیجه تحلیل چالش‌ها و ارائه‌ی پاسخ مناسب را دشوار کرده است. مهندسی سیستم‌های فرایندی (PSE)، با به کارگیری نظریه سیستم‌ها و مهندسی سیستم‌ها در فرایندها به شناخت بهتر لایه‌های مختلف این سیستم‌ها می‌پردازد. همچنین با استفاده از شناخت کافی ایجاد شده، راه‌حل‌های مختلف پاسخگویی به چالش‌های جدید این سیستم‌ها بررسی می‌کند و از بین گزینه‌های مختلف، پاسخ بهینه را انتخاب می‌کند. نسل چهارم PSE، با استفاده از ابزارهای نوظهور انقلاب صنعتی چهارم، در افزایش عمق این شناخت و کیفیت پاسخگویی آن گام موثری در توسعه هوشمند صنایع نفت، گاز و پتروشیمی برداشته است. در این مقاله، ابتدا نظریه جامع سیستم‌ها و مهندسی سیستم‌ها روی سیستم‌های فرایندی، ضمن توجه به ویژگی‌های این نوع از سیستم‌ها پیاده‌سازی شده است و سپس به گستره فعالیت و نقش مهندسی سیستم‌های فرایندی به عنوان هسته تصمیم‌گیری در حل چالش‌های صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بازبینی و به‌روزرسانی شده است. علاوه بر این سازوکار نوین رسیدگی و پاسخگویی به چالش‌های فرایندی توسط این گروه از مهندسان تبیین و نقش ابزارهای نوظهور حاصل از انقلاب صنعتی چهارم در بهبود سرعت و دقت این پاسخگویی بررسی شده است. همچنین فناوری‌های کلیدی انقلاب صنعتی پنجم مورد بحث و به پیش‌نیازهای نسل آینده مهندسی سیستم‌ها فرایندی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: مهندسی سیستم‌های فرایندی، انقلاب صنعتی چهارم، نفت و گاز، پتروشیمی، هوش مصنوعی

---

[1] تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه طراحی فرآیند

۱- مقدمه

صنایع شیمیایی، مجموعه‌ای از سیستم‌های تودرتو[1] هستند که اجزای آن با پردازش مواد اولیه به کمک عملیات‌های مختلف پیچیده مانند واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های فیزیکی انتقال، به صورت مرحله به مرحله، محصول، خدمات یا خروجی نهایی را ایجاد می‌کنند. این مجموعه تحت شرایط عملیاتی بهینه کنترل شده، محدودیت‌های محیط زیستی و تقاضای بازارهای جهانی پتروشیمی، نفت و گاز، در مسیر تولید کارآمد، سودآور و با حداقل آسیب‌های محیط زیستی، برای ایجاد خروجی با ارزش افزوده به کار گرفته می‌شود. مجموع تنوع و تعدد اجزا، تعاملات غیرخطی و دینامیکی اجزا و شرایط و محدودیت‌های ناظر بر این تعاملات باعث پیچیدگی شناخت و پیش‌بینی رفتار این سیستم‌ها می‌گردد. از طرفی، تقاضای بازارهای مورد هدف صنایع شیمیایی دائما در حال تغییر و رقابت سخت‌تر می‌شود. بدیهی است فعالیت پایدار در این شرایط، مستلزم ارتقا و اصلاح دائمی ساختار و عملیات سیستم‌های صنایع شیمیایی است [۱], [۲], [۳] .

الزام ارتقا و اصلاح دائمی در صنایع شیمیایی، شناخت رفتار و ساختارهای پیچیده این سیستم‌ها را بیش از پیش ضروری می‌کند. دانش مهندسی شیمی کلاسیک منحصر در پاسخگویی به نیازهای این سیستم‌ها به کمک اصول اولیه مهندسی واکنش‌های شیمیایی، پدیده‌های انتقال و رفتار ترمودینامیکی و تعادلی مواد می‌باشد اما با پیشرفت تقاضا و نیازها، ابزار و روش پاسخگویی سنتی کارایی خود را از دست می‌دهند و ایجاد و به کارگیری تکنیک‌های نوین نیز ضروری است. علاوه براین مسائل مربوط به سیستم‌های صنایع شیمیایی، گاهی منحصر به اصول اولیه دانش مهندسی شیمی نیستند و نیازمند بررسی مسائلی مانند مدیریت، آماد[2]، کامپیوتر و اقتصادی نیز هستند. بنابراین نیاز است گروهی از مهندسان شیمی در جهت دستیابی به این تکنیک‌ها آموزش داده شوند که این گروه، مهندسی سیستم‌های فرایندی[3] (PSE) نام دارد. در حوزه PSE به کمک تکنیک‌های مختلف طراحی مفهومی، طراحی محصول و فرایند، تقویت فرایند[4] (PI)، طراحی به کمک کامپیوتر[5] (CAD) و غیره و ابزارهای مختلف شبیه‌سازی، مدلسازی، کنترل و بهینه‌سازی، به تجزیه و تحلیل سیستم‌های صنایع شیمیایی و بررسی اجزاء، شرایط عملیاتی و تعاملات این اجزا پرداخته می‌شود [۴].

حل مسائل سیستم‌های صنایع شیمیایی طی دو پارادایم مختلف، سنتز (طراحی) و آنالیز (تحلیل) توسط PSE به انجام می‌رسد. در هر دو پارادایم فرض بر این است که یک مدل مناسب فرایند یا محصول در دسترس است که یا رفتار فرایند و یا خواص محصول را به خوبی توصیف می‌کند. در مسائل مستقیم یا تحلیلی، اطلاعات محصول یا فرایند در دسترس است و هدف پیش‌بینی شاخص‌های عملکردی یا خواص ساختاری محصول به

---

[1] System-of-Systems
[2] Logistic
[3] Process System Engineering (PSE)
[4] Process Intensification (PI)
[5] Computer Aided Design (CAD)

کمک مدل بر اساس آن‌ها است. در مقابل، در مسائل غیرمستقیم یا طراحی، هدف ایجاد فرایند یا محصول به منظور دستیابی به اهداف و مطلوبات است [۵].

تحلیل سیستم‌های صنایع شیمیایی به واسطه تنوع و تعدد اجزاء، رفتار دینامیک و توام با عدم قطعیت، ارتباط پیچیده اجزاء، وابستگی متغیرهای تصمیم‌گیری به یکدیگر و زمان و چندبعدی بودن، مسئله‌ای پیچیده و دشواری است. مسائل تحلیلی عمدتا به وسیله تکنیک‌های کاهش این پیچیدگی‌ها و ایجاد شناخت بیشتر نسبت به رفتار سیستم، پاسخ داده می‌شوند که فرایندی تخصصی در حوزه مهندسی سیستم‌های فرایندی است. ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی، در این مسیر هم به شناخت بیشتر از رفتار تحت عدم قطعیت کمک می‌کند و هم پاسخ‌های نوینی برای چالش‌های همیشگی ارائه می‌دهند. مهندسان طراح فرایند با بهره‌گیری از آن‌ها در جهت ارتقای سطح پاسخگویی و گسترش حوزه پاسخگویی گام‌های موثری بر می‌دارند.

در این مقاله ابتدا با استناد به ویژگی‌های ذاتی سیستم‌های فرایندی، از منظر نظریه جامع و مهندسی سیستم‌ها، گستره‌ی فعالیت‌های مهندسی سیستم‌های فرایندی در مسائل تحلیل بررسی شده است. سپس سازوکار پاسخگویی این حوزه به چالش‌های مدرن صنایع شیمیایی تبیین و چگونگی استفاده از ابزارهای نوظهور انقلاب صنعتی چهارم به جهت سرعت و سهولت این پاسخگویی پرداخته شده است. در نهایت با ایجاد نگرش به آینده‌ی صنایع شیمیایی در انقلاب صنعتی پنجم و پیش‌نیازهای آن، ابزار کلیدی همزاد دیجیتال و پتانسیل‌ها و فرصت‌های آن در حل چالش‌های نوین صنایع سیستم‌های فرایندی بررسی شده است.

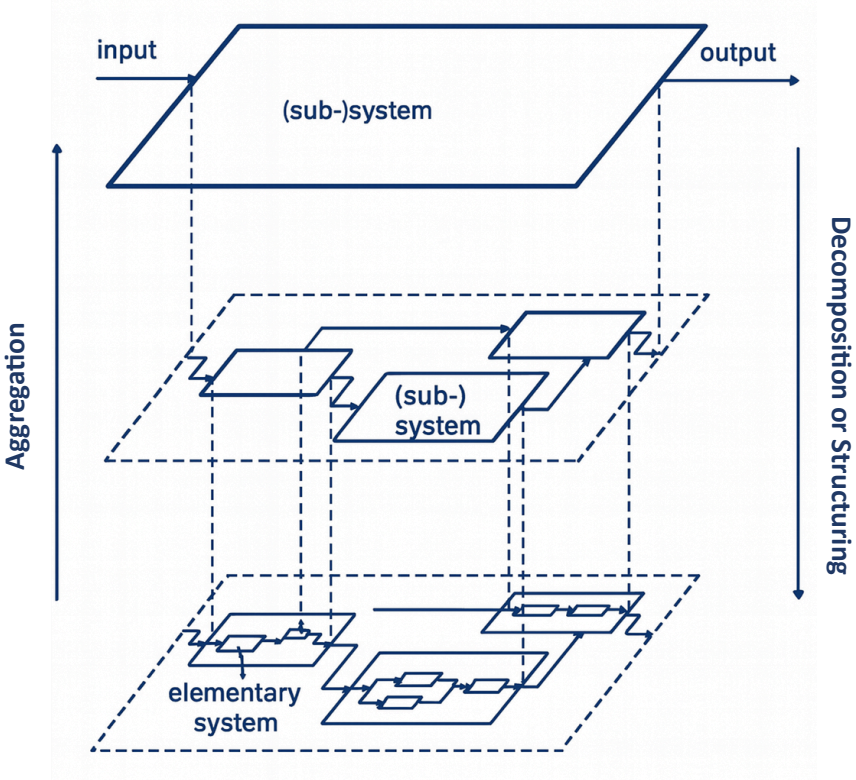
۲- پیچیدگی‌های سیستم‌های فرایندی

در مطالعه پدیده‌های پیچیده، یک سیستم را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از اجزای مرتبط در نظر گرفت، به طوری که رفتارهای جمعی این اجزا، متفاوت از مجموع رفتار فردی هر جزء می‌باشد. این تعریف، که در کارهای بنیادی نظریه‌پردازان سیستم‌ها مانند ون گیچ[1] ریشه دارد، بر تعاملات پیچیده و اغلب غیرخطی بین اجزای تشکیل‌دهنده (چه این اجزا موجودیت‌های مادی باشند و چه ساختارهای انتزاعی) تأکید می‌کند. علاوه بر این، یک سیستم از طریق ورودی‌ها و خروجی‌ها با محیط خود تعامل دارد. ورودی‌ها، تأثیرات محیط بر سیستم را نشان می‌دهند در حالی که خروجی‌ها، اطلاعاتی درباره ویژگی‌ها و وضعیت سیستم ارائه می‌دهند تا رفتار آن را منعکس کنند. سیستم‌ها می‌توانند تجزیه یا تجمیع شوند تا سیستم‌های کوچکتر یا بزرگتری تشکیل دهند. در چنین سیستم‌های پیچیده‌ای با توجه به خواص اجزا و قوانین تعامل آن‌ها، استنباط خواص کل از بررسی انفرادی اجزا کار ساده‌ای نیست. این پیچیدگی چالش‌های قابل توجهی برای تحلیل و طراحی ایجاد می‌کند و نیازمند چارچوب‌هایی است که بتوانند به طور سیستماتیک به روابطی که سیستم را به هم پیوند می‌دهند، رسیدگی کنند [۶].

[1] van Gigch

۲-۱- نظریه جامع سیستم‌ها

نظریه سیستم‌های عمومی[1] (GST)، که توسط لودویگ فون برتالانفی[2] در دهه ۱۹۳۰ معرفی شد، چارچوب مفهومی برای مقابله با این پیچیدگی ارائه می‌دهد. در GST، فرض بر این است که اصول کلی سیستم‌ها، بدون توجه به زمینه خاص آن‌ها اداره می‌شود و رویکرد منطقی-ریاضی برای درک پدیده‌های مختلف را ممکن می‌سازند. با تمرکز بر تجزیه و تجمیع سیستم‌ها به سطوح سلسله‌مراتبی، GST تسهیل‌کننده ساده‌سازی شبکه‌های پیچیده تعاملات است. کلات و مارکارت اشاره می‌کنند که این ساختار سلسله‌مراتبی هم در تحلیل رفتار یک سیستم و هم در ترکیب سیستم‌های جدید با تجزیه پیچیدگی به زیرسیستم‌های قابل مدیریت، کمک می‌کند. از این منظر، نظریه توضیح می‌دهد که چگونه ورودی‌های محیطی بر یک سیستم تأثیر می‌گذارند و چگونه خروجی‌ها وضعیت داخلی آن را منعکس می‌کنند و بدین ترتیب، ابزاری ساختاریافته برای درک تعامل پویا بین اجزای یک سیستم و عملکرد کلی آن فراهم می‌آورد. این ساختار در شکل ۱ ارائه شده است [۵].



شکل ۱. تجزیه و تجمیع سیستم‌ها [۷]

Figure 1. Decomposition and Aggregation of Systems [7]

[1] General System Theory (GST)
[2] van Bertalanffy

شکل ۱، نحوه برخورد GST با پیچیدگی‌های یک سیستم را نمایش می‌دهد که شامل دو بخش است:

الف) تحلیل سیستم‌ها: درک رفتار و تابعیت یک سیستم
ب) سنتز سیستم‌ها: طراحی و ایجاد یک سیستم بر اساس انتظارات

۲-۲- مهندسی سیستم‌ها

در حالی که GST یک پایه نظری فراهم می‌کند، مهندسی سیستم‌ها[1](SE) این بینش‌ها را به روش‌های عملی برای طراحی و مدیریت سیستم‌ها در طول چرخه عمرشان تبدیل می‌کند. زمینه‌ی SE، اطمینان حاصل می‌کند که یک سیستم (شامل سخت‌افزار، نرم‌افزار و عناصر انسانی) از مرحله طراحی تا بهره‌برداری، الزامات مشخص شده را برآورده می‌کند. این رویکرد به ویژه در حوزه‌های فنی، مانند مهندسی شیمی، کاربرد بیشتری دارد، جایی که سیستم‌ها باید تجهیزات فیزیکی، نرم‌افزار عملیاتی و نظارت انسانی را برای دستیابی به نتایج مطلوب یکپارچه کنند. کلات و مارکاردت تأکید می‌کنند که SE از طریق یک فرآیند توسعه ساختاریافته به پیچیدگی می‌پردازد و اهداف متعدد را دنبال می‌کند تا راه‌حل‌های کاربردی و قابل اعتمادی ارائه دهد. با هماهنگی مراحل طراحی و پیاده‌سازی، SE تفکر سیستم‌های انتزاعی را با کاربردهای ملموس پیوند می‌دهد و آن را به ابزاری ضروری برای مهندسی سیستم‌های پیچیده تبدیل می‌کند [۵].

در تکنیک‌های به کار رفته در مهندسی سیستم‌ها، مدل‌سازی به عنوان یک سنگ بنای اصلی برای نمایش و تحلیل سیستم‌های پیچیده مهندسی است. مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از روش‌ها را شامل می‌شود که مدل‌سازی ریاضی یکی از مهم‌ترین آن‌هاست. یک مرجع مهم در این حوزه، کتاب هنگز[2] و کامرون[3] است که راهنمای جامعی برای توسعه مدل‌های ریاضی فرایندها متناسب با کاربردهای مهندسی ارائه می‌دهد [۸].

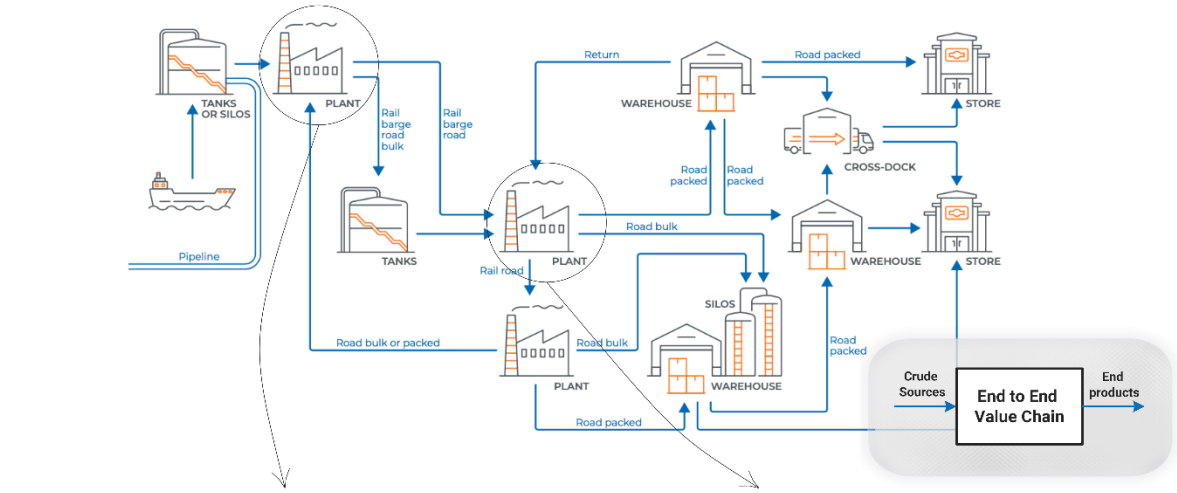
۲-۳- نظریه و مهندسی سیستم‌ها در مهندسی فرایند

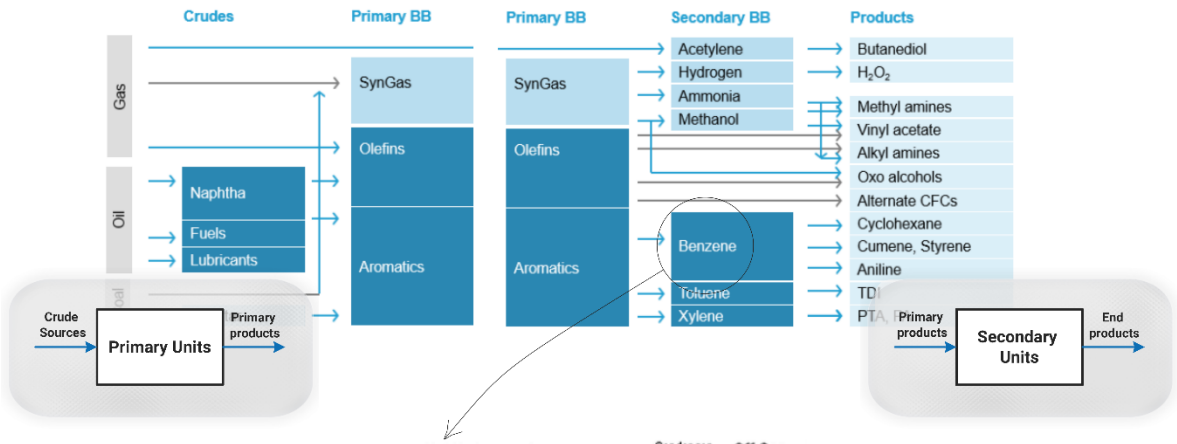
فعالیت‌های حوزه مهندسی سیستم‌های فرایندی، در جهت تبدیل مواد اولیه خام به محصولات با ارزش افزوده یا اصلاح و بهبود مواد مختلف است. این فعالیت‌ها در بزرگترین مقیاس مهندسی شیمی یعنی زنجیره ارزش قابل مشاهده است. در زنجیره ارزش، ورودی‌ها، طی مراحل مختلفی به مواد با ارزش‌افزوده تبدیل می‌شوند تا در نهایت به محصول نهایی تبدیل شود. در این حین، فرایندهای مختلف شیمیایی، مثل واکنش‌ها و فرایندهای فیزیکی مثل انتقال جرم، انتقال حرارت و انتقال مومنتوم توام با یکدیگر اتفاق می‌افتند و با زمان نیز تغییر می‌کنند. همچنین پارامترهای بسیاری وجود دارد که وابستگی شدیدی به یکدیگر و به زمان دارند. این پیچیدگی با اضافه شدن مسائل مالی، زیست محیطی و لجستیکی افزایش می‌یابد. بررسی و شناخت رفتار این نوع سیستم‌ها برای مهندسان شیمی چالش‌برانگیز بوده و هست. یکی از مسیرهای برطرف کردن این پیچیدگی،

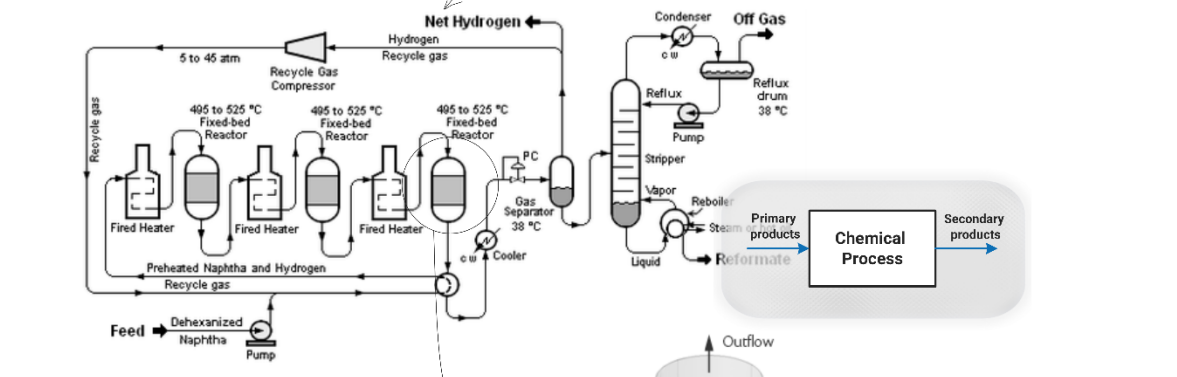
---

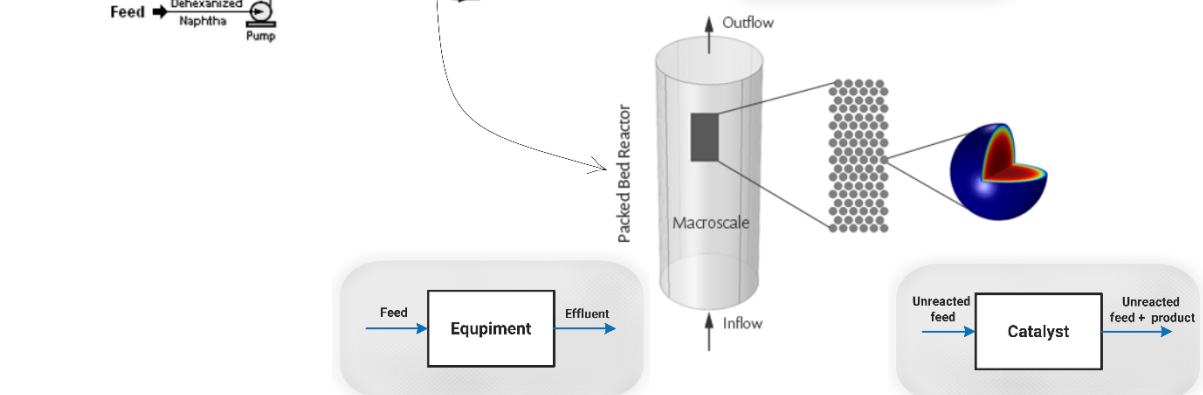
[1] System Engineering (SE)
[2] Hangos
[3] Cameron

استفاده از نظریه سیستم‌ها می‌باشد، که اعمال آن روی یک زنجیره ارزش صنایع شیمیایی به عنوان یک سیستم پیچیده در شکل ۲ ارائه داده شده است.


TANKS OR SILOS
PLANT
Rail barge road bulk
Rail barge road
Return
WAREHOUSE
Road packed
STORE
CROSS-DOCK
Road packed
Road packed
Pipeline
TANKS
Road bulk
PLANT
Rail road
WAREHOUSE
STORE
SILOS
Road bulk or packed
Road bulk
Road packed
PLANT
WAREHOUSE
Road packed
Crude Sources
End to End Value Chain
End products


Crudes
Primary BB
Primary BB
Secondary BB
Products
Gas
Oil
SynGas
Olefins
Aromatics
Naphtha
Fuels
Lubricants
SynGas
Olefins
Aromatics
Acetylene
Hydrogen
Ammonia
Methanol
Benzene
Toluene
Xylene
Butanediol
H_2O_2
Methyl amines
Vinyl acetate
Alkyl amines
Oxo alcohols
Alternate CFCs
Cyclohexane
Cumene, Styrene
Aniline
TDI
PTA
Crude Sources
Primary Units
Primary products
Primary products
Secondary Units
End products


Net Hydrogen
Hydrogen
Recycle gas
5 to 45 atm
Recycle Gas Compressor
Recycle gas
495 to 525 °C Fixed-bed Reactor
495 to 525 °C Fixed-bed Reactor
495 to 525 °C Fixed-bed Reactor
Fired Heater
Fired Heater
Fired Heater
PC
Gas Separator 38 °C
c w
Cooler
Preheated Naphtha and Hydrogen
Recycle gas
Feed
Dehexanized Naphtha
Pump
Condenser
Off Gas
c w
Reflux
Reflux drum 38 °C
Pump
Stripper
Vapor
Reboiler
Liquid
Reformate
Primary products
Chemical Process
Secondary products


Outflow
Packed Bed Reactor
Macroscale
Inflow
Feed
Equipment
Effluent
Unreacted feed
Catalyst
Unreacted feed + product

شکل ۲. نظریه سیستم‌ها برای یک سیستم پیچیده در مهندسی شیمی

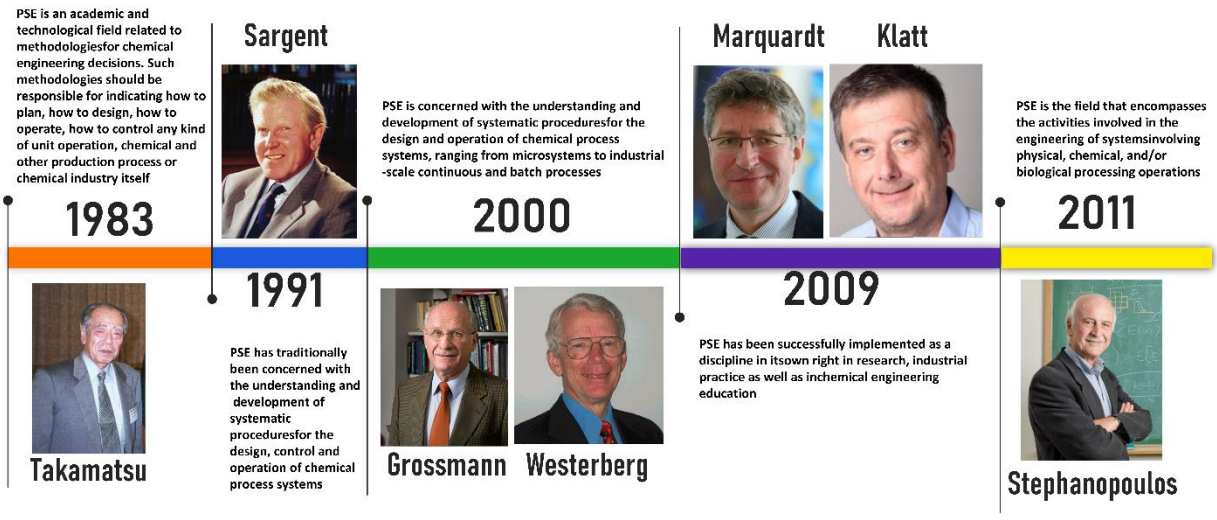
Figure 2. Systems theory for a complex system in chemical engineering

۳- گستره مهندسی سیستم‌های فرایندی و سازوکار پاسخگویی به مسائل

۳-۱- مهندسی سیستم‌های فرایندی و نسل چهارم آن

همانطور که ذکر شد، از این نظریه به جهت سنتز یا تحلیل سیستم‌های مهندسی شیمی در مقیاس‌های ابعادی مختلف استفاده می‌شود. یک سیستم شیمیایی به جهت دستیابی به یک هدف مشخص سنتز می‌شود یا هدف یک سیستم شیمیایی مشخص تحلیل می‌شود. این دو وظیفه از مرحله طراحی تا بهره‌برداری برای سیستم‌های مهندسی شیمی در مقیاس‌های ابعادی مختلف در طول چرخه‌ی عمر آن‌ها حائز اهمیت است. پیچیدگی‌های ذاتی سیستم‌های شیمیایی ذکر شده، انجام این دو وظیفه را دشوار کرده‌است. بنابراین پیاده‌سازی بهینه‌ی این وظایف و مدیریت پیچیدگی آن‌ها نیاز به چارچوب‌های نظامند سنتز و تحلیل سیستم‌های مهندسی شیمی دارد. این چارچوب‌ها به کمک مهندسی سیستم‌های فرایندی، طراحی و به کار گرفته می‌شوند [۵].

یکی از تعاریف گسترده PSE توسط گروسمن و وستربرگ ارائه شده است: مهندسی سیستم‌های فرایندی به بهبود فرایندهای تصمیم‌گیری برای ایجاد زنجیره تأمین شیمیایی مربوط بوده و به کشف، طراحی، تولید و توزیع محصولات شیمیایی در زمینه بسیاری از اهداف متضاد می‌پردازد [۹]. همچنین علاوه بر این تعریف، مجموعه تعاریف PSE در مطالعات مختلف ارائه شده است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.



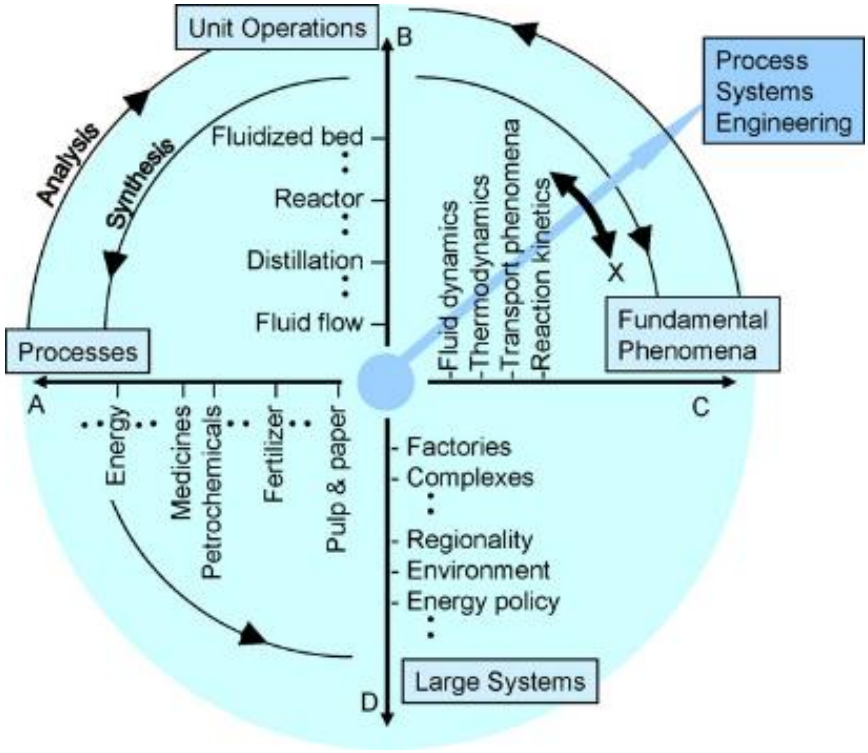
شکل ۳ . تعاریف PSE ارائه شده توسط افراد پیشرو این حوزه در دهه‌های اخیر

Figure 3. PSE definitions provided by leading figures in this field in recent decades

با توجه به تعاریف گسترده PSE در پژوهش‌های مختلف، نحوه پاسخگویی این گروه از مهندسان شیمی به چالش‌های سیستم‌های فرایندی کاملا شفاف نیست. یکی از تعاریف اولیه PSE که سعی در توضیح این نحوه پاسخگویی داشته است، تعریف تاکامتسو در سال ۱۹۸۳ است:

"مهندسی سیستم‌های فرایندی (PSE)، یک حوزه علمی و فناوری است که به روش‌شناسی‌های تصمیم‌گیری مهندسی شیمی مربوط می‌شود. چنین روش‌هایی باید مسئول نشان دادن چگونگی برنامه‌ریزی، طراحی، بهره‌برداری و کنترل هر نوع عملیات واحد، فرایند تولید شیمیایی و سایر فرایندها یا خود صنعت شیمیایی باشند [۷]."

طبق این تعریف، PSE مربوط به حل نظام‌مند و مبتنی بر مدل مشکلات سیستم‌ها در مهندسی شیمی است. تعریف گسترده تاکاماتسو توسط شکل ۴ تأکید شده است که در اینجا از مقاله اصلی او بازنشر شده است. این شکل دارای ابعاد چند مقیاسی است که شامل پدیده‌های فیزیکی در مقیاس میانه، عملیات واحد، کل فرایندها و سیستم اجتماعی-اقتصادی که در آن‌ها گنجانده شده‌اند، می‌باشد. علاوه بر این، دامنه به طور صریح محدود به سیستم‌های فرایند شیمیایی نیست بلکه سیستم‌های انرژی و سیستم‌های زیست‌پزشکی را نیز شامل می‌شود. چشم‌انداز چند مقیاسی که قبلاً توسط تاکاماتسو پیشنهاد شده بود، توسط گروسمن و وستربرگ بیشتر مورد تأکید قرار گرفته است. آن‌ها نقش PSE را به عنوان مجموعه‌ای از روش‌ها و ابزارها برای حمایت از تصمیم‌گیری در ایجاد و بهره‌برداری از زنجیره تأمین شیمیایی که شامل کشف، طراحی، تولید و توزیع محصولات شیمیایی است، تفسیر می‌کنند.

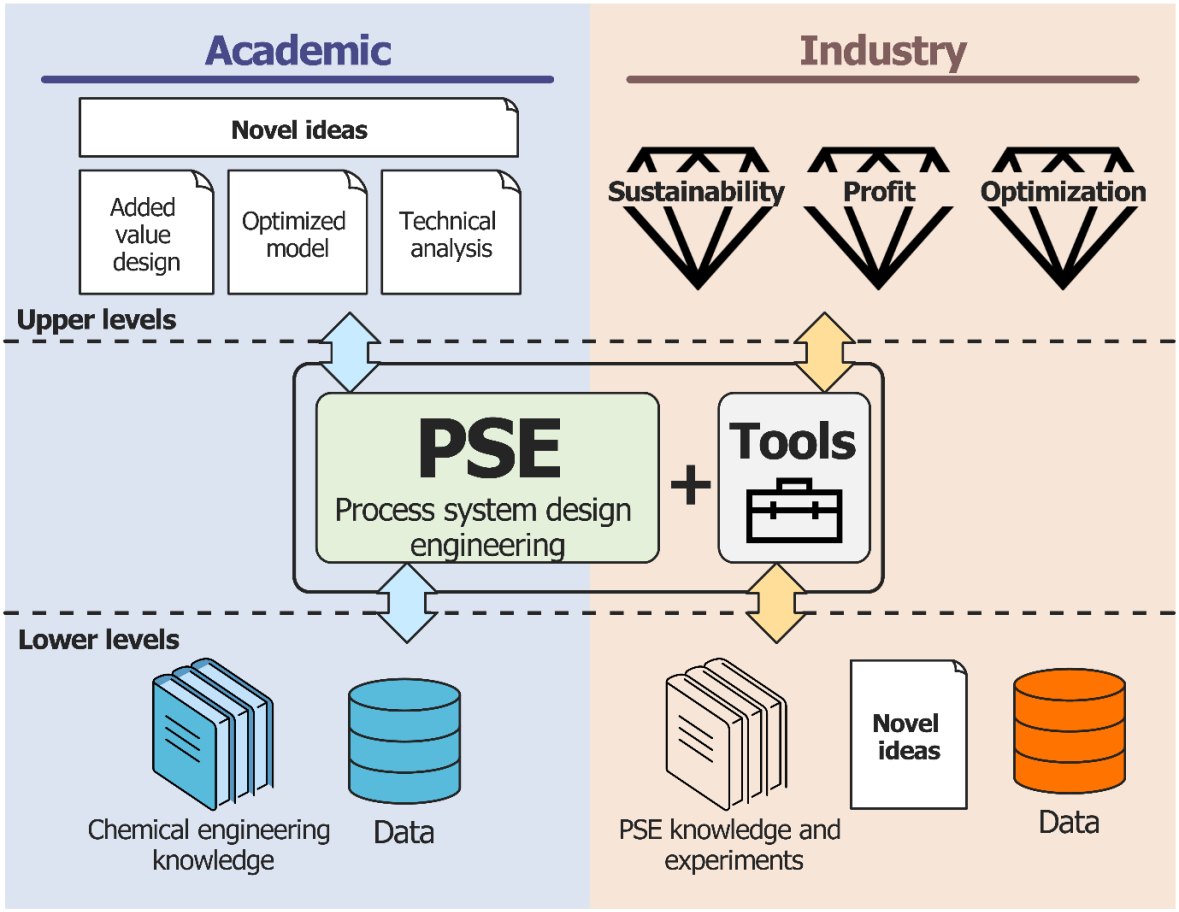


شکل ۴. طرح پیشنهادی تاکاماتسو برای تبیین ماهیت مهندسی سیستم‌های فرایندی [۷]

Figure 4. Takamatsu's proposed framework for elucidating the nature of process systems engineering [7]

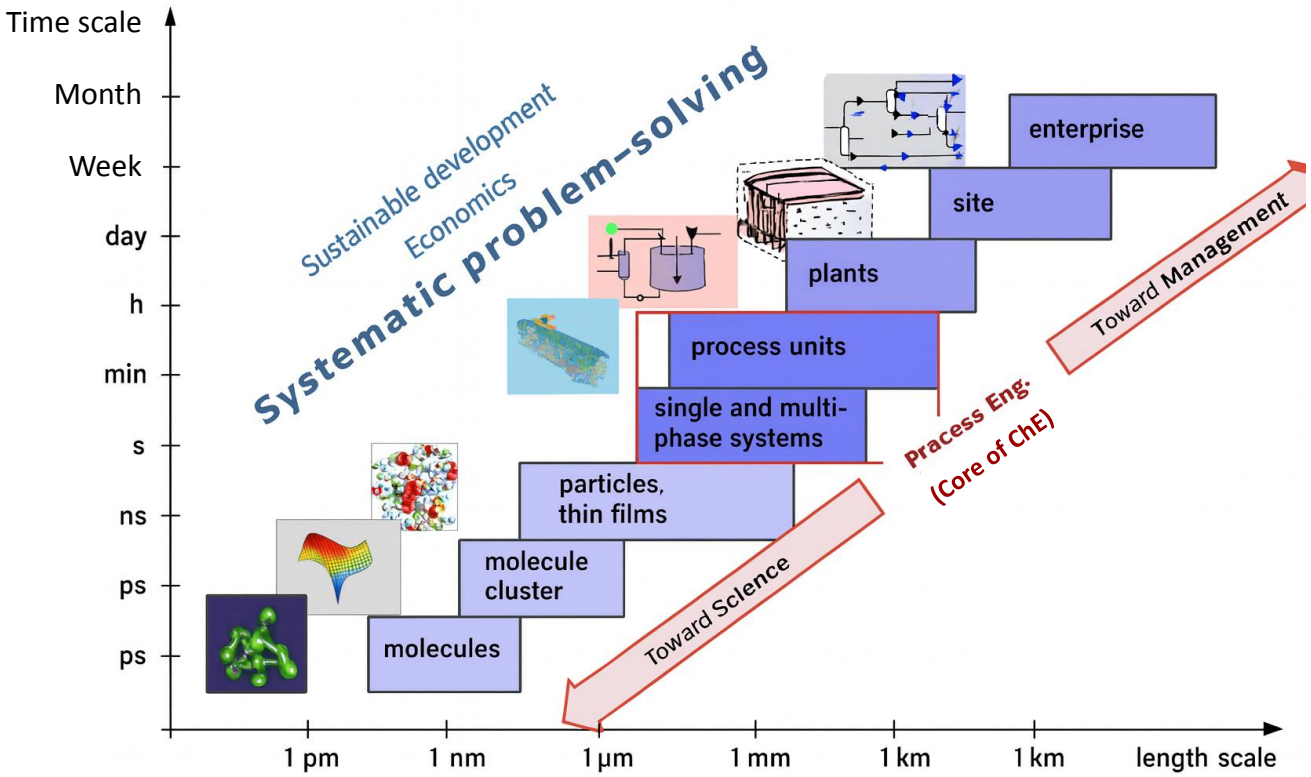
۳-۲- سازوکار پاسخگویی مهندسی سیستم‌های فرایندی به چالش‌های جدید

طبق تعریف تاکاماتسو، PSE درباره تصمیم‌گیری منطقی در تمام سطوح و مقیاس‌های زمانی و ابعادی است، با درک سیستم‌های پیچیده با استفاده از یک دیدگاه کل‌نگر و چارچوب تفکر سیستمی PSE حوزه وسیع‌تری است که مهندسی فرایند به کمک کامپیوتر(CAPE) را به عنوان یک زیرحوزه مهم در بر می‌گیرد، جایی که فناوری‌های محاسباتی و اطلاعاتی نقش اساسی در یافتن راه‌حل‌هایی برای مشکلات طراحی پایدار، کنترل و بهره‌برداری از فرایندهای شیمیایی ایفا می‌کنند. اما پیچیدگی توضیح گستره PSE تنها چالش این تعاریف نیست و علاوه بر آن نحوه پاسخگویی و مدیریت چالش‌های سیستم‌های فرایندی نیز تبیین نشده است. جهت رفع چالش اول و تبیین گستره‌ی مهندسی سیستم‌های فرایندی، ابتدا می‌بایست به نحوه جای‌گیری این حوزه در تعامل با لایه‌های پایینی (ابزارها، داده، اطلاعات و دانش پایه) و لایه‌های بالایی (اطلاعات با ارزش افزوده و بهینه‌سازی) مهندسی شیمی در صنعت و دانشگاه رسیدگی شود. این تعامل در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین، این تعامل برای تمام سیستم‌های مهندسی شیمی در مقیاس‌های ابعادی مختلف صدق می‌کند. گستره زمانی و ابعادی سیستم‌های مهندسی شیمی در شکل ۶ ارائه شده است [۱۰].



شکل ۵. نحوه تعامل PSE بین سطوح پایینی و سطوح بالایی در دو بخش صنعت و دانشگاه

Figure 5. The interaction of PSE between lower and upper levels in the two sectors of industry and academia



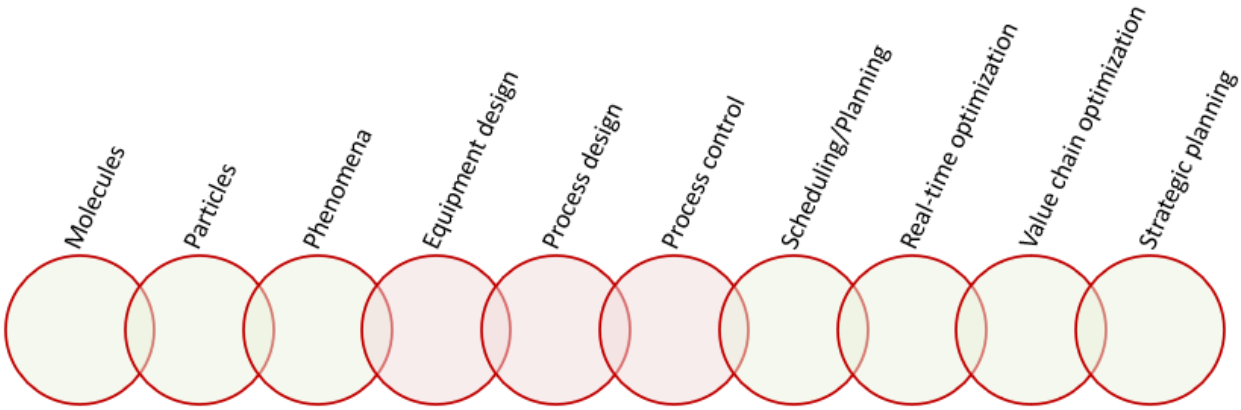
شکل ۶. مقیاس‌های زمانی و مکانی فعالیت های آموزشی و پژوهشی در مهندسی شیمی از مقیاس مولکولی تا دارایی های کلان [۱۱]

Figure 6. Temporal and spatial scales of educational and research activities in chemical engineering from the molecular scale to macro assets [11]

مطابق این شکل حوزه تخصص مهندسی سیستم‌های فرایندی در ناحیه مقیاس متوسط (دستگاه‌ها و واحدهای مهندسی) است و هرچقدر که سیستم مورد بررسی از این مقیاس بزرگتر شود به سمت حوزه تخصص مدیریت و از این مقیاس کوچک‌تر به سمت حوزه علوم پایه نزدیک‌تر می‌شویم. با وجود سلسه مراتب نشان داده شده در این شکل، هر سیستمی در هر جای مقیاس به صورت کامل ایزوله و مستقل نیست و با سیستم‌های پایین دست و بالا دست خود ارتباط دارند. ابتدا تصور می‌شود این ارتباط مابین مقیاس‌های مختلف ابعادی به روش نشان داده شده در شکل ۷ است.

اگر هر یک از حوزه‌های تخصص به صورت یک دایره درنظر گرفته شوند، از شکل ۶ استنباط می‌شود که متخصصین در هر حوزه ارتباط کمی با حوزه‌های قبل و بعد خود دارند و هیچ اشرافی بر حوزه‌های تخصصی فراتر از آن ندارند. با این استنباط حوزه تخصص مهندسی سیستم‌های فرایندی ارتباط کمی با پدیده‌های فیزیکی و برنامه‌ریزی دارند و به طور کل از حوزه‌ای در مقیاس اجزای کوچکتر بی‌اطلاع است. به عنوان مثال اگر سیستم مورد نظر در مهندسی سیستم‌های فرایندی یک راکتور کاتالیستی باشد، اشراف این حوزه محدود

به اندکی پدیده‌های انتقال مثل سیالات و واکنش کاتالیستی و اندکی از طراحی فرایند می‌شود. در صورت اگر چالشی در حوزه‌های پایین‌تر، مثلا در سطح اجزای کاتالیست ایجاد شود، متخصصین در حوزه دستگاه و فرایند اطلاعی از روند حل این چالش ندارند و کلا باید مسئله را به یک متخصص در آن حوزه واگذار کنند که با این دید پرداختن به مشکلات در سطح زنجیره ارزش و برنامه بسیار دشوار می‌شوند.



شکل ۷. ساختار سلسله مراتبی فعالیت های آموزشی و پژوهشی مهندسان شیمی در مقیاس های مختلف در ده سطح از طراحی مولکولی در مقیاس مولکولی تا برنامه ریزی استراتژیک در مقیاس کلان

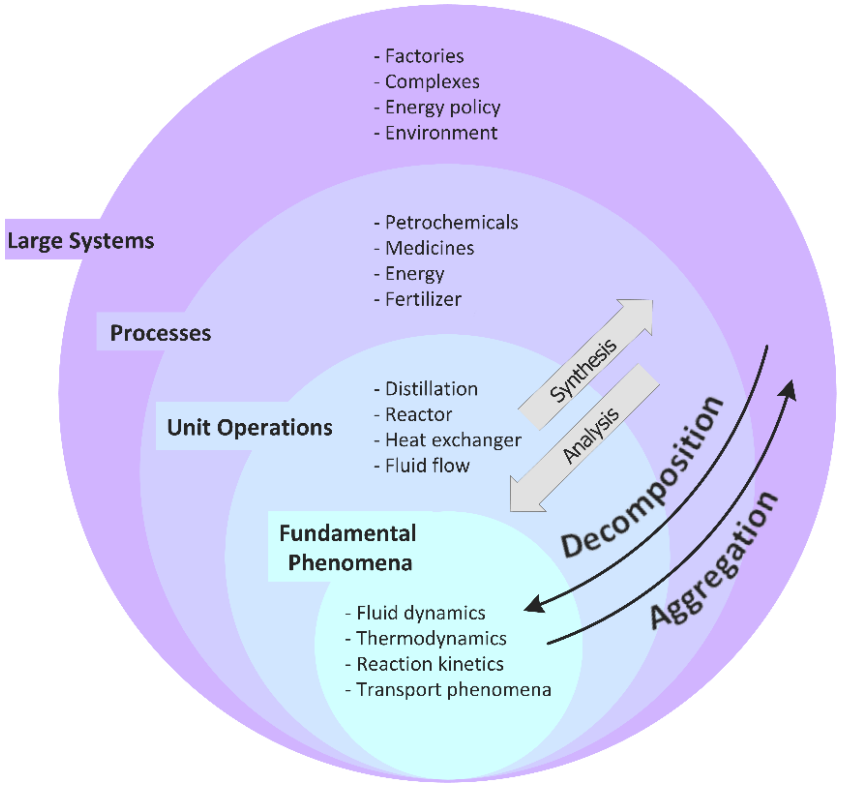
Figure 7. Hierarchical structure of educational and research activities of chemical engineers at various scales in ten levels from molecular design at the molecular scale to strategic planning at the macro scale

در واقع تعامل‌های حوزه‌های مختلف دارای سلسله مراتبی هستند که از یک ساختار لایه‌لایه پیروی می‌کنند که با نزدیک شدن به لایه‌های درونی، مقیاس سیستم‌های مورد بررسی کوچک‌تر و به حوزه علوم پایه نزدیک‌تر می‌شود و از طرف دیگر، با دور شدن از مرکز، مقیاس سیستم‌ها افزایش یافته و حوزه‌های تخصصی مدیریت و برنامه‌ریزی پررنگ‌تر می‌شوند. اما همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، این ارتباط در هر مقیاس ابعادی با سایر ابعاد کاملا قطع نمی‌شود اما لایه‌های بالاتر مشارکت محدودتری از لایه‌های پایینی را دربر می‌گیرند.

شکل ۸. دیدگاه پوست پیازی برای فعالیت های آموزشی-پژوهشی مهندسان شیمی در مقیاس های مختلف

Figure 8. Onion skin perspective for educational-research activities of chemical engineers at different scales

به کمک این دیدگاه شکل ۴ که نیازمند تحلیل جهت درک گستره اصلی مهندسی سیستم‌های فرایندی می‌باشد به صورت شکل ۹ ساده سازی شده است تا درک ساده‌تر و واضح‌تری از گستره مهندسی سیستم‌های فرایندی ایجاد کند.



شکل ۹. بازبینی طرح پیشنهادی تاکاماتسو برای تبیین ماهیت مهندسی سیستم‌های فرایندی

Figure 9. Review of Takamatsu's proposed design to elucidate the nature of process systems engineering

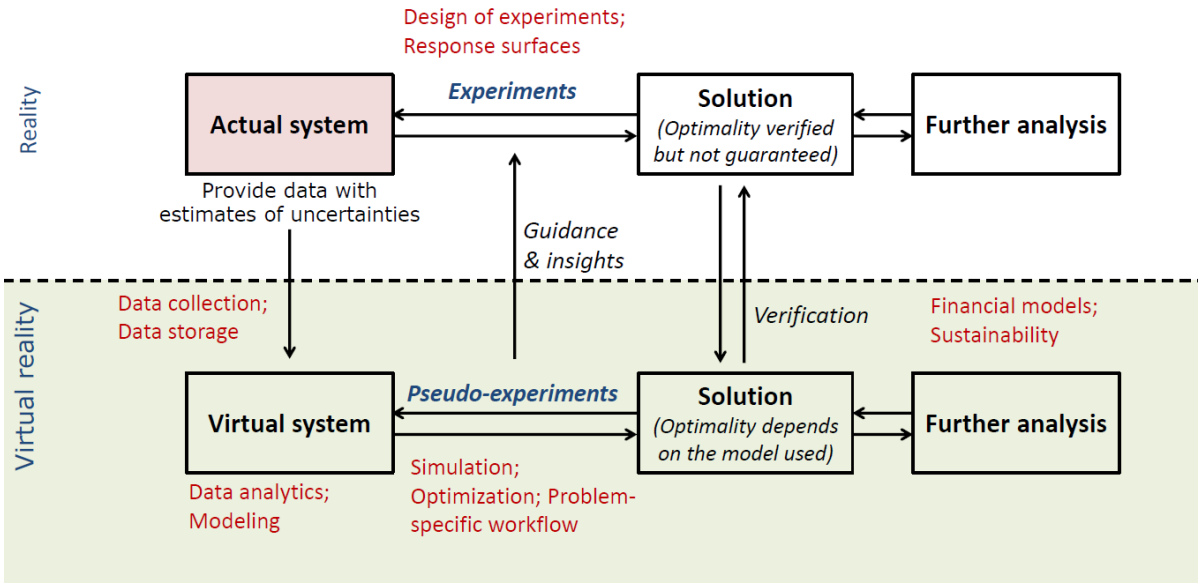
سسیستم‌های فرایندی در هر مقیاسی، به منظور اهداف متفاوتی ایجاد یا توسعه داده می‌شوند. این اهداف در طی زمان و با تغییر شرایط مختلف مانند شرایط اجتماعی، محیط زیستی، سیاسی، افزایش جمعیت و غیره دائما در حال تغییر و پیچیده‌تر شدن هستند. این پیچیدگی، چالش‌های جدی‌تری را ایجاد می‌کنند و طبیعی است که تکنیک‌ها و روش‌های سنتی برای حل مشکلات و چالش‌های ساده‌تر، پاسخگوی این چالش‌ها نخواهند بود. بنابراین ضروری است، مهندسان شیمی، در جهت ارتقای سطح و پتانسیل این تکنیک‌ها گام بردارند. مهندسان فرایند به عنوان گروهی از مهندسان شیمی به جهت ایجاد و توسعه‌ی روش‌ها و تکنیک‌های پاسخگویی به چالش‌های جدید صنایع نفت و گاز، داروسازی، بیولوژی، پلیمر و نانوفناوری آموزش داده می‌شوند. سازوکار کلی این پاسخگویی به چالش‌های سیستم‌های فرایندی در شکل ۱۰ ارائه شده است. طبق این سازوکار، در تجزیه و تحلیل محصول یا فرایند، دو رویکرد حل چالش‌ها وجود دارد. رویکرد اول (رویکرد واقعی) رویکرد رایج حل مبتنی بر آزمایش را نشان می‌دهد، در حالی که رویکرد دوم (رویکرد مجازی) رویکرد معمول حل سیستم‌های مبتنی بر کامپیوتر را نشان می‌دهند، که شامل سه جزء اصلی زیر می‌باشد:

الف) داده‌ها و مدل‌ها برای نمایندگی سیستم تحت بررسی با مجموعه‌ای از معادلات ریاضی

ب) حل‌کننده‌های عددی برای شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی؛

ج) روش یا الگوریتم مورد نیاز برای حل چالش

این سه مورد، ارکان اصلی برای حل مسئله با رویکرد مجازی هستند. در این سازوکار، فضای واقعی که جزء اصلی آن سیستم فرایندی واقعی است و نماینده مجازی آن (مدل)، در دو فضای جدا با هم در تبادل داده و اطلاعات هستند. از سیستم فرایندی واقعی، داده‌های پردازش نشده خارج و راه‌حل‌ها معتبر ناشی از پردازش این داده‌ها وارد می‌شود و پاسخ سیستم به آن‌ها پایش می‌شود. به کمک تحلیل بازخوردها از اعمال این راه‌حل‌ها، مدل و راه‌حل‌ها و به دنبال آن چالش سیستم واقعی به شکل بهینه حل می‌گردد.



شکل ۱۰. سازوکار کلی حل چالش‌های سیستم‌های فرایندی توسط مهندسان فرایند

Figure 10. Overall mechanism for solving challenges in process systems by process engineers

در هر دو رویکرد، مهندسان فرایند، به کمک دانش مهندسی شیمی و تخصص در ایجاد تکنیک‌ها به کمک ابزارهای مختلف، از طریق به کارگیری پیوسته این تکنیک‌ها، دریافت بازخورد و اصلاح و توسعه‌ی تکنیک‌ها به حل چالش‌های سیستم‌های فرایندی در مقیاس‌های مختلف زمانی و ابعادی می‌پردازند. کیفیت پاسخ ارائه شده، علاوه بر کیفیت به کارگیری ابزارها، به شرایط حاکم بر سیستم بستگی دارد و هرچقدر شرایط و محدودیت‌های لحاظ شده، پیچیده‌تر و وسیع‌تر باشد، پیدا کردن پاسخ بهینه نیازمند تلاش بیشتری است. در جدول ۱، خلاصه‌ای از اصلی‌ترین تکنیک‌های مهندسی فرایند، ابزارهای مورد نیاز و خروجی مورد انتظار به کارگیری این روش‌ها آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ی اصلی‌ترین تکنیک‌های مهندسی فرایند، ابزارهای مورد نیاز و خروجی آن‌ها
Table 1. Summary of the main process engineering techniques, required tools, and their outputs

Technique / Method	Tool	Output(s)
Modeling	First-principles and data driven techniques	System's model, Extracted data
Synthesis	Process and product synthesis	Molecules composition, material and process flowsheets
Design	Process and product design	Define optimized specifications of product-process
Optimization	Mathematical programming techniques	Optimized solutions
Control theory	Process control strategies and algorithms	Control structures and controller design
Numerical analysis, Statistical analysis and Computer science	Simulation and data analysis	Behavior perception, uncertainty perception and smart systems

این سازوکار، از اولین مطالعات در حوزه مهندسی فرایند برای حل چالش‌های مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است و در گذر زمان پیشرفته‌تر شده است. تی.جی.ویلیامز در سال ۱۹۶۱، در کتاب خود با عنوان "مهندسی سیستم‌ها برای صنایع فرایندی"، سازوکار مشابهی برای حل مشکلات سیستم‌های فرایندی مختلف ارائه داده است. سه مورد از فناوری‌های تسهیل کننده مسیر شکل‌گیری مهندسی سیستم‌های فرایندی در آن سال، ظهور علم مهندسی شیمی به عنوان یک رویکرد ریاضی‌محور پیچیده، وجود روش‌های تحلیلی برای ارائه راه‌حل‌هایی برای مسائل فرموله‌شده به زبان ریاضی (تحلیل عددی، برنامه‌ریزی ریاضی، نظریه بهینه‌سازی، دینامیک سیستم‌ها، نظریه کنترل) و دسترسی به کامپیوترها برای پیاده‌سازی این روش‌ها، به‌دست آوردن راه‌حل‌های مربوطه و امکان‌پذیر کردن تحلیل آن‌ها می‌باشد. از آنجایی که این فناوری‌ها همزمان با انقلاب صنعتی سوم فراهم شد، مهندسی سیستم‌های فرایندی در آن سال‌ها (از ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰) اولین نسل مهندسی سیستم‌های فرایندی یا PSE 3.0 نامیده می‌شود [۱۲]. این فناوری‌ها در گذر زمان پیشرفته‌تر شدند و با ورود به عصر دیجیتالی شدن، صنایع، ابزارها، نیازها و تکنیک‌ها رشد فزاینده‌ای داشتند که این رشد از انقلاب صنعتی چهارم تا به امروزه ادامه داشته است. سه مورد از مهم‌ترین فناوری‌های این انقلاب، وجود مقادیر بی‌سابقه‌ای از داده‌ها که جمع‌آوری و ذخیره می‌شوند (داده‌های کلان)، دسترسی به روش‌های تحلیلی پیشرفته برای پردازش حجم‌های بزرگ داده‌های مختلف، به صورت زمان واقعی و بلوغ فناوری‌های جدید (حسگرهای هوشمند، ارتباطات توزیع‌شده، خدمات ابری، محاسبات با کارایی بالا) که دامنه‌ای از امکانات مختلف برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و کاوش داده‌ها را فراهم می‌کنند. مهندسی سیستم‌های فرایندی در حال تجربه دومین نسل از تکنیک‌ها و ابزارها به جهت حل چالش‌های فرایندی است که به آن PSE 4.0 یا مهندسی سیستم‌های فرایندی داده‌محور[1] (DC-PSE) گفته می‌شود. به واسطه‌ی این جهش در ابزارها و تکنیک‌ها،

[1] Data-Centric Process System Engineering (DC-PSE)

مقیاس چالش‌های قابل حل، گسترده‌تر و تصمیم‌گیری و پاسخگویی سریع‌تر و بهینه‌تر اتفاق می‌افتد. دو نسل PSE در مقایسه با انقلاب‌های صنعتی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است

شکل ۱۱. سیر زمانی انقلاب‌های صنعتی مختلف و نسل‌های مهندسی سیستم‌های فرایندی

Figure 11. Timeline of various industrial revolutions and generations of process systems engineering

در هر دو نسل PSE 3.0 و PSE 4.0، همواره یکی از مهم‌ترین تخصص‌های مهندسان فرایند، به کارگیری ابزارهای سنتی و نوظهور مختلف به جهت توسعه و به روزرسانی این تکنیک‌ها می‌باشد که در بخش بعدی، شرح داده شده است.

۴- نقش ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی در تسریع و تسهیل مسیر توسعه

ابزارها نقش بسزایی در پیدا کردن راه‌حل بهینه برای چالش‌ها و نیازمندی‌های سیستم‌های فرایندی در مقیاس‌های ابعادی و زمانی مختلف دارند. این ابزارها ممکن است مشخصا برای کاربردهای مهندسی فرایندی ایجاد شده باشند یا به صورت ابزارهای بین‌رشته‌ای توسعه داده شده‌اند و مهندسی فرایند از آن برای حل

چالش‌ها استفاده می‌کنند. ابزارها نیز باید به اقتضای نیازمندی‌ها و چالش‌های فرایندی که دائما درحال تغییر هستند، به روز رسانی و توسعه داده شوند و به علاوه مهندسان فرایند به نحوه به کارگیری آن‌ها مسلط شوند و دائم دانش به کارگیری خود را به روزرسانی کنند.

۴-۱- نحوه به کارگیری این ابزارها به منظور ارتقای کیفیت پاسخگویی به چالش‌های جدید

سیستم‌های فرایندی در هرمقیاسی، دارای سه مشخصه‌ی اصلی ساختار، رفتار و ارتباط(بین اجزای خود و یا با اجزای سیستم‌های دیگر) هستند. مجموعه‌ی این سه مشخصه باعث ایجاد پیچیدگی در شناخت این سیستم‌ها می‌شود و هرچقدر که این مشخصه‌ها پیچیده‌تر، یا شرایط مفروض واقعی‌تر و یا سیستم گسترده‌تر باشد، این شناخت پیچیده‌تر نیز می‌شود. پیچیدگی بالای سیستم‌های فرایندی و به دنبال آن، دشواری شناخت آن‌ها مانع از ایجاد آگاهی نسبت به مشخصه‌های آن‌ها و پیش‌بینی پاسخ آن‌ها در برابر شرایط متفاوت می‌شود. به واسطه‌ی این دشواری، تشخیص راه‌حل مناسب برای پاسخ به نیاز سیستم غیرممکن و یا بسیار بغرنج می‌شود. در چنین موقعیتی، تشخیص محل و علت ایجاد چالش نیز سخت خواهد شد.
مهندسان فرایند با دانش مهندسی شیمی خود، نسبت به سه مشخصه اصلی سیستم‌ها و طبیعت لایه‌لایه‌ای سیستم‌های فرایندی آگاه هستند و به کمک آن می‌توانند محل، علت و راه‌حل احتمالی چالش ایجاد شده در سیستم‌های فرایندی را تشخیص دهند و لیستی از گزینه‌های محتمل برای پاسخگویی به نیازهای سیستم‌های فرایندی را آماده کنند. در واقع آن‌ها به کمک تخصص خود با برقراری ارتباط بین چالش‌های ایجاد شده و مشخصه‌های سیستم‌های فرایندی، پیدا کردن این گزینه‌ها را راحت‌تر می‌کنند. ابزارها در هر دو بخش، شناخت بیشتر نسبت به مشخصه‌های سیستم‌های فرایندی و انتخاب بهینه از بین گزینه‌های راه‌حل، کمک شایانی را به متخصصین مهندسی فرایند می‌کنند. اما پیش از پرداختن به نحوه کمک‌رسانی این ابزارها، ابتدا به مفهوم پاسخگویی مهندسان فرایند به چالش‌های فرایندی پرداخته می‌شود.

همانطور که اشاره شد، در طی زمان، سیستم‌های فرایندی نیازمند توسعه و رفع چالش‌های فنی، محیط‌زیستی و یا اقتصادی به منظور حرکت به سمت پایداری بیشتر است. برای حل این چالش‌ها و نزدیک‌تر شدن به پایداری بیشتر ممکن است وابسته به شرایط، پیچیدگی سیستم و عدم قطعیت، گزینه‌های زیادی وجود داشته باشد. انتخاب از بین این گزینه‌ها و تشخیص راه‌حل بهینه وظیفه‌ی پراهمیت مهندسان فرایند است. بهینه بودن یک راه حل وابسته به شرایط تغییر می‌کند، اما راه‌حل‌های بهینه دارای خصوصیات مشترکی است که عبارتند از:

۱- هزینه‌های اقتصادی و محیط زیستی حداقل باشد.
۲- پیاده‌سازی آن از لحاظ فنی، امکان‌پذیر باشد.
۳- مسیر به کار بستن آن، گام به گام مشخص باشد.

۴- ارزش افزوده پس از به کارگیری، تخمین زده شده باشد و در واقعیت نزدیک به مقدار تخمینی باشد.
۵- پیش‌بینی‌های لازم و تعابیر ضروری درنظر گرفته شده باشد.
۶- ناپایدار و وابسته به یک شرایط بسیار خاص نباشد.

متخصصین مهندسی فرایند، با آزمودن گزینه‌های مختلف، هر یک از آن‌ها را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهند و پس از لحاظ کردن تمام موارد فوق و درنظر گرفتن شرایط خاص، گزینه بهینه را پیشنهاد می‌دهند.

ابزارها در چند قسمت، در دستیابی به پاسخ بهینه به مهندسان فرایند کمک می‌کنند.

- بخش اول: کمک در شناخت مشخصه‌های سیستم‌ها و ارتباط آن‌ها با نیازمندی‌ها و چالش‌ها به منظور درک مکان و علت چالش و نیازمندی در ساختار لایه‌لایه‌ای پیچیده سیستم‌ها: ابزارها می‌توانند در درک و شناخت رفتار ناشناخته سیستم‌ها موثر واقع شوند. آن‌ها با تبدیل داده به اطلاعات و تحلیل این اطلاعات به کمک مهندسی فرایند، علل وقوع رفتارها و الگوی پاسخگویی آن‌ها به ورودی‌های مختلف، بهتر درک و برای پاسخ به آن‌ها، اطلاعات مفیدی را در اختیار مهندسان فرایند قرار می‌دهند.
- بخش دوم: کمک در یافتن گزینه‌های پاسخگویی منطقی‌تر به چالش‌ها و نیازمندی سیستم‌ها: ابزارها همچنین می‌توانند برای حل نیازهای سیستم‌های فرایندی، گزینه‌های بیشتری را در اختیار مهندسی فرایند قرار دهند، تا با ایجاد دید گسترده‌تری نسبت به پاسخ‌های ممکن، تمام موارد ضروری را در نظر گرفته باشند تا از دست رفتن احتمالات بهینه‌تر جلوگیری شود.
- بخش سوم: کمک در ایجاد معیارهای حذف گزینه‌های نامرتبط و ایجاد تکنیک برای سنجش گزینه‌های مختلف: به علاوه، ابزارها با دردسترس قرار دادن معیارهای مختلف حذف گزینه‌های نامناسب از بین گزینه‌های احتمالی پاسخ به چالش و آزمون‌ها و تکنیک‌های مختلف (مدل‌سازی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و غیره) جهت راستی‌آزمایی گزینه‌های مختلف به منظور دستیابی به پاسخ بهینه، حائز اهمیت هستند.

مهندسان فرایند در راستای کمک به ارتقای سطح دانش فرایندی خود از ابزارهای مختلف استفاده می‌کنند و این نحوه استفاده به چند دلیل به طور بهینه توسط مهندسان فرایند انجام می‌شود. از علل این ادعا می‌توان به پایه دانش مهندسی شیمی و تخصص در شناخت مشخصه‌های اصلی سیستم‌های فرایندی، خصوصا دستگاه‌ها، واحدها و فرایندهای شیمیایی می‌توان اشاره کرد. همچنین، تشخیص و چگونگی به‌کارگیری این ابزار، به نحوی که پاسخگوی نیازهای و چالش‌های سیستم‌های فرایندی باشد، توسط مهندسان فرایند صورت می‌گیرد. به علاوه، استفاده از هر ابزاری دارای خروجی‌هایی است که بدون تفسیر آن‌ها به کمک دانش فرایندی توسط مهندسان فرایند، بی‌معنا هستند.

۴-۲- دسته‌بندی ابزارهای سنتی و نوظهور هوش مصنوعی

در این مقاله، ابزارهای مورد استفاده در نسل اول مهندسی فرایند(PSE 3.0)، ابزارهای سنتی و ابزارهای مربوط به نسل دوم مهندسی فرایند(PSE 4.0)، ابزارهای نوظهور نامیده می‌شود. سه رکن اصلی ابزارهای سنتی، دانش مهندسی شیمی، کامپیوترها و نظریه‌ها و روش‌های ریاضیاتی و سه رکن اصلی ابزارهای نوظهور، داده، فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم و تکنیک‌های تحلیل فرایندها است. گاهی ابزار با نرم‌افزار معادل درنظر گرفته می‌شوند، در حالی که نرم‌افزارها نوعی ابزارها هستند و ابزارها طیف وسیعی از نرم‌افزارها و تکنیک‌های مختلف را شامل می‌شود. در نسل اول مهندسی فرایند، مدلسازی با استفاده از نظریه‌های ریاضیاتی، یکی از ابزارهای مهم تلقی می‌شد. با پیشرفت فناوری و قدرت پردازش کامپیوترها، حل معادلات حاصل از مدلسازی با سرعت بیشتری اتفاق افتاد و منجر به توسعه‌ی ابزارهای مدلسازی و شبیه‌سازی زیادی مانند نرم‌افزارهای فلوئنت شد. دهه‌ها پیشرفت در شبیه‌سازی و مدلسازی منجر به ایجاد داده‌های کلان و به وجود آمدن یکی از مهم‌ترین ارکان انقلاب صنعتی چهارم شد. امروزه نیز با پیشرفت فناوری‌های یادگیری ماشین، ابزارهای قدرتمندی در پردازش این داده‌ها و جهشی در روند پاسخگویی به چالش‌ها و نیازهای سیستم‌های فرایندی ایجاد شده است. شرح ابزارهای سنتی مورد استفاده در مهندسی سیستم‌های فرایندی در جدول ۲ و ابزارهای نوظهور در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. شرح ابزارهای سنتی مهندسی سیستم‌های فرایندی [۴]

Table 2. Description of Traditional Tools in Process Systems Engineering [4]

Tool Purpose	Brief Description	Tool Name
Process simulator [۱۳]	Steady state simulation, optimization	**Aspen Plus** **HYSYS** **CHEMCAD** **PROMS** **ProMax** **UNISIM**
	Dynamic simulation, optimization	**PROMS** **Aspen Dynamics** **Unisim** **gPROMS**
	Process synthesis, design, intensification	**PRO/II**
Integrated systems	Modeling, simulation, optimization	**IDAES**
	Superstructure-based optimization	**Super-O**
	Integrated tool for process control	**ProcACD**
	Process synthesis, design, intensification	**ProCAFD**
	Product synthesis-design	**OptCAMD (ProCAPD)**
	Modeling, simulation, optimization	**PyoSIM**

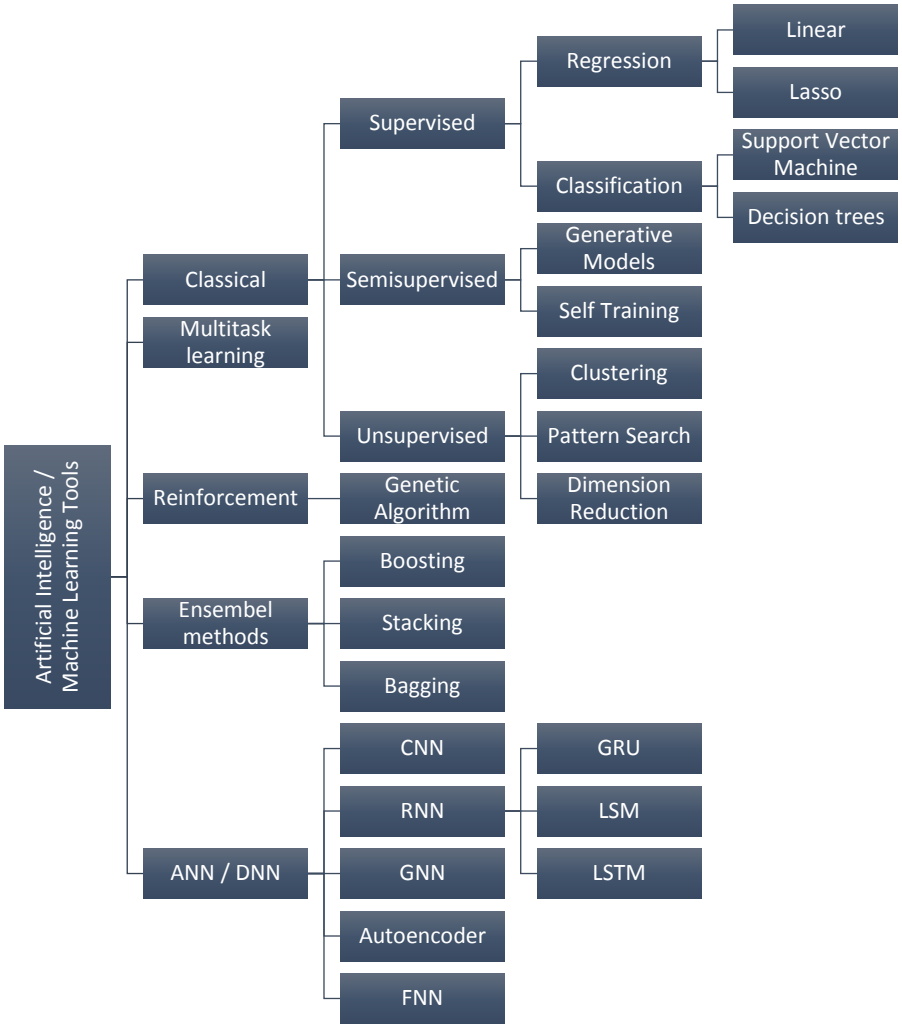
	Model-based process control & optimization Model-based risk analysis	**ProcaPD** **PAROC** **TECSMART**
Equation solving	DAE solver	**ACADO** **CasADi** **DAEPACK** **Dyos** **PyoMO-dae** **OpenModelica** **Dymola**
Optimization [۱۴]	Global (Deterministic)	**Software packages:** - **BARON** - **ANTIGONE** - **SCIP (global branch-and-bound)** - **GloMIQO** - **SHOT** - **MAiNGO** - **EAGO**
		Methods: - **Branch-and-bound** - **Outer-approximation-based global methods** - **Convex relaxation (αBB ، McCormick envelopes)**
	Local	**Software packages:** - **IPOPT (continuous NLP)** - **KNITRO** - **DICOPT (local MINLP)** - **SBB (local MINLP)**
		Methods: - **Sequential Quadratic Programming (SQP)** - **Interior-Point** - **Nonlinear Branch-and-bound with local search**
Modelling [۱۵]	Modelling, equation-solver, optimization	**ALAMO** **ARGONAUT**

	Aspen Custom Modeller **CAMS** **gPROMS** **Jump** **Matlab** **MoT** **Simulink** **Scilab** **Pyomo** **xcos**
3D modeling	**ANSYS-Fluent** **COMSOL** **OpenFOAM**

جدول ۳. شرح ابزارهای نوظهور مهندسی سیستم‌های فرایندی

Table 3. Description of Emerging Tools in Process Systems Engineering

Tool Purpose	Brief Description	Tool
Predictive Modeling	Trained AI to predict processes or outcomes bases on process or model data	**For all purposes, process system engineer can select among all emerging tools according to taxonomy of figure 12 based on circumstances, constrains and limitations. [۱۰], [۱۷]**
Optimization	Trained AI to optimize a process for target parameters based on previous data or in real time process	
Control	Trained AI to set and adapt process parameters reach desired target parameters	
Fault Detection [۱۶], Identification, Diagnosis and Prognosis	Detect anomalies from normal process state and assign them to their respective origins	



شکل ۱۲. دسته‌بندی انواع ابزارهای نوظهور

Figure 12. Classification of Emerging Tools

۵- چشم‌انداز نسل آینده مهندسی سیستم‌های فرایندی (PSE 5.0)

۵-۱- زمینه‌سازی و پیش‌نیاز ورود به نسل پنج مهندسی سیستم‌های فرایندی

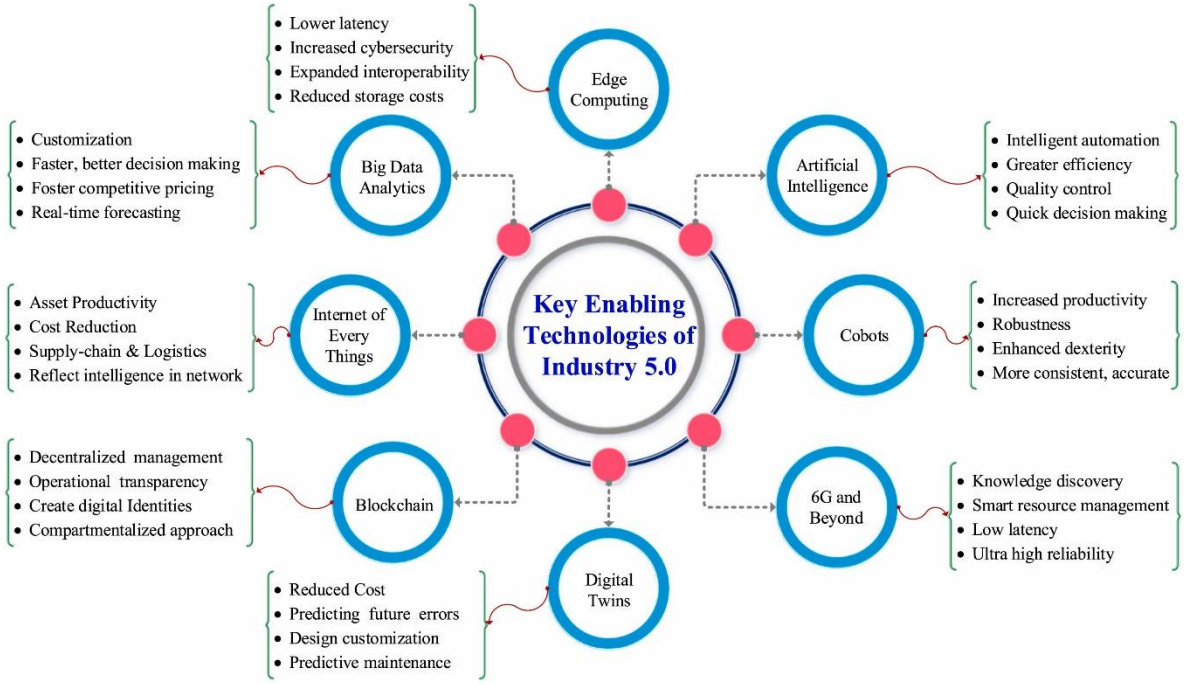
از سال ۲۰۱۷، تلاش‌های اولیه مطالعات دانشگاهی برای معرفی انقلاب صنعتی پنجم به وجود آمد. در سال ۲۰۲۱، کمیسیون اروپا به طور رسمی خواستار انقلاب صنعتی پنجم شد، پس از بحث‌هایی که بین شرکت‌کنندگان از سازمان‌های تحقیقاتی و فناوری و همچنین نهادهای تأمین مالی در سراسر اروپا در دو کارگاه مجازی که توسط اداره رفاه از اداره کل تحقیقات و نوآوری در تاریخ‌های ۲ و ۹ ژوئیه ۲۰۲۰ برگزار شد، و با انتشار رسمی سندی با عنوان "انقلاب صنعتی ۵: به سوی صنعتی پایدار، انسان‌محور و مقاوم در اروپا" در تاریخ ۴ ژانویه ۲۰۲۱ ارکان این انقلاب را معرفی کرد [۱۸] ,[۱۹].

انقلاب صنعتی پنجم، قدرت صنعت را برای دستیابی به اهداف اجتماعی فراتر از شغل‌ها، به عنوان یک تأمین‌کننده مقاوم رفاه، با در نظر گرفتن به مرزهای سیاسی، اجتماعی، محیطی زیستی و اقتصادی در تولید و قرار دادن رفاه کارگر صنعتی در مرکز فرآیند تولید، معرفی شده است. انقلاب صنعتی پنجم با هدایت تحقیق و نوآوری به سمت انتقال به یک صنعت پایدار[1]، انسان‌محور[2] و مقاوم[3]، پارادایم موجود انقلاب صنعتی چهارم را تکمیل می‌کند. مشخص است که انقلاب صنعتی پنجم نتیجه توافق کمیسیون اروپا بر نیاز به ادغام بهتر اولویت‌های اجتماعی و زیست‌محیطی اروپا در نوآوری فناوری و تغییر تمرکز از فناوری‌های فردی به یک رویکرد سیستماتیک است. با توجه به این که پیشرفت‌های فناوری نحوه ایجاد، تبادل و توزیع ارزش را تغییر می‌دهند، نیاز فوری به طراحی این فناوری‌ها به گونه‌ای که از ارزش‌های اجتماعی آینده حمایت کنند، وجود دارد. ظهور این تغییرات و سوالات مرتبط با نوآوری فناوری نیازمند این است که صنعت موقعیت و نقش خود را در جامعه دوباره بررسی کند [۲۰].

صنایع شیمیایی برای ورود به انقلاب صنعتی پنجم نیاز به گسترش هوشمندسازی در تمام طول چرخه عمر این صنایع دارد که شامل طراحی هوشمند، تولید هوشمند، بازاریابی و لجستیک هوشمند، عملیات و خدمات و تعمیرات هوشمند و بازیافت و بازتولید هوشمند می‌شود. لازمه‌ی این گسترش، به‌کارگیری موثر و گسترده‌ی ابزارهای نوظهور و فرصت‌هایی است که انقلاب صنعتی چهارم در اختیار قرار داده است. مهندسان فرایند در هر یک از این زمینه‌ها، با تسلط بر فناوری‌های کلیدی، توسعه‌ی پایدار روش‌ها و تکنیک‌های پیشرفته و جهش مجدد در ارتقای سطح صنایع شیمیایی در هر دو حوزه‌ی صنعت و دانشگاهی می‌شود. شکل ۱۳ فناوری‌های ضروری برای ورود به انقلاب صنعتی پنچم نمایش داده است.

---

[1] sustainable
[2] human-centered
[3] resilient



شکل ۱۳. فناوری‌های کلیدی ملزوم برای ورود به انقلاب صنعتی پنجم [۲۱]

Figure 13. Key technologies required for entering the Fifth Industrial Revolution [21]

۵-۲- همزاد دیجیتال به عنوان کلیدی‌ترین فناوری PSE 5.0

به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از چشم‌انداز انقلاب صنعت پنجم، ابزارها و فناوری‌های زمان واقعی می‌توانند مراحل مختلف چرخه عمر محصول را با نظارت و تنظیم فرآیندها در زمان واقعی خودکار و بهینه‌سازی کنند و به حداکثر رساندن کارایی، کاهش ضایعات، بهبود کیفیت و بهینه‌سازی کل طول زنجیره ارزش صنایع شیمیایی کمک کنند. یکی از مهم‌ترین فناوری‌هایی که به این مهم جامه عمل می‌پوشد، همزاد دیجیتال است. همزاد دیجیتال[1] (DT)، یک فناوری کلیدی برای انقلاب صنعتی-اجتماعی پنجم است که اتصال بهنگام بین فضای سایبری و فضای فیزیکی را امکان‌پذیر می‌سازد و تعامل فیزیکی-دیجیتالی در حال عملیات را شکل می‌دهد. به عنوان یک نسخه دیجیتال از سیستم‌های فیزیکی، یک DT می‌تواند با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از محیط واقعی در مراحل مختلف چرخه عمر محصول یا سیستم، نظارت، کنترل یا تصمیم‌گیری را بهبود ببخشد. امکانات DT فرصتی فوق‌العاده برای پیاده‌سازی ملزومات انقلاب صنعتی پنجم فراهم می‌آورد. در جدول ۴ فرصت‌هایی که همزاد دیجیتال برای ورود به انقلاب صنعتی پنجم فراهم می‌کند، بیان شده است [۲۲].

[1] Digital Twin (DT)

جدول ۴. فرصت‌های ناشی از به کارگیری همزاد دیجیتال در صنایع شیمیایی برای ورود به انقلاب صنعتی پنجم [۲۲]

Table 4. Opportunities arising from the use of digital twins in the chemical industry for entering the fifth industrial revolution [22]

Industry 5.0 Pillar	Digital Twin Opportunities
Human-centric	• simulate workplace designs to identify hazards and improve ergonomics • optimize schedules and workflows to reduce workloads and stress • create virtual environments for skill practice and training • provide customized training for each employee • enable shared spaces for collaboration and idea exchange • offer insights into system performance for optimization decisions • ensure ethical use of DTs • apply human DTs for specific industry roles • study DT adoption, usability, and human-DT cooperation balancing free will with automation
Sustainability	• reduce resource consumption through optimized production plans • plan and execute renewable energy systems and eco-friendly processes • use renewable energies and sustainable manufacturing materials • monitor and manage full product lifecycle from inception to disposal • conduct cost-benefit analysis and provide incentives for SA-DT priorities, addressing economic sustainability gap • develop new frameworks to measure DT rigor in representing reality • perform longitudinal studies on medium- to long-term industry implications of DT use • create interfaces between industry DTs and external stakeholders • implement and manage DT fleets
Resilience	• monitor performance systems and detect disruptions proactively • simulate different response scenarios • conduct research on secure DT operation • evaluate scalability of DTs for fleets and supply chains • build resilient and trustworthy DT infrastructure • use DTs as heritage systems to preserve industry practices and cultural relevance

این جدول نشان می‌دهد که چگونه فناوری همزاد دیجیتال فرصت‌هایی را در سه رکن اصلی انقلاب صنعتی پنجم یعنی انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری ایجاد می‌کنند. در رکن انسان‌محوری، همزاد دیجیتال رفاه، ایمنی و توانمندسازی اپراتورها را افزایش می‌دهند. آن‌ها امکان شبیه‌سازی شرایط محیط کار را برای شناسایی خطرات و بهبود، بهینه‌سازی عملیات و ارائه آموزش مجازی فراگیر که برای اوپراتورهای خاص شخصی‌سازی شده است، فراهم می‌کنند. همزاد دیجیتال همچنین از طریق فضاهای اطلاعاتی مشترک، امکان همکاری بهتر را فراهم می‌کنند و تصمیم‌گیری آگاهانه را با اوپراتورها، مهندسان و مدیرانی که بینش‌های بلادرنگ در مورد عملکرد سیستم دارند، امکان‌پذیر می‌سازند. توجه ویژه‌ای به ملاحظات اخلاقی، توسعه ادغام دوقلوی انسان-

دیجیتال برای نقش‌های خاص و مطالعات پذیرش کاربر به منظور اطمینان از اینکه همزاد دیجیتال عامل انسانی را افزایش می‌دهند و جایگزین آن نشده است.

این جدول اکنون برای رکن پایداری، توضیحاتی در مورد چگونگی کمک همزاد دیجیتال به صنایع در کاهش مصرف، طراحی فرآیندهای تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست برای تولید و مدیریت چرخه عمر محصول از زمان ایجاد تا دفع آن ارائه می‌دهد. پایداری اقتصادی به عنوان حوزه‌ای کمتر توسعه یافته و نیازمند تجزیه و تحلیل هزینه، فایده و انگیزه برای استقرار پایدار DT است. سایر نیازهای تحقیقاتی شامل چارچوب‌هایی برای تعیین میزان دقت و صحت عملکرد یک DT در نمایش واقعیت، مطالعات بلندمدت در مورد پیامدهای DT و تعاملات مؤثر با ذینفعان خارجی است. همزادهای دیجیتال تحت رکن تاب‌آوری، از طریق نظارت بر عملکرد در زمان واقعی، تشخیص زودهنگام اختلال و شبیه‌سازی سناریوهای پاسخ، استحکام صنعتی را تقویت می‌کنند. سایر نیازهای مطرح‌شده مربوط به زیرساخت‌های DT امن، مقیاس‌پذیر و قابل اعتماد، به ویژه در ناوگان‌های بزرگ یا زنجیره‌های تأمین است و به مفاهیم «همزاد دیجیتال میراثی[1]» اشاره دارد که دانش صنعت و شیوه‌های تولید فرهنگی را برای استفاده در آینده حفظ می‌کنند.

۶- نتیجه‌گیری

در گذر زمان، صنایع نفت، گاز و پتروشیمی با افزایش تقاضا و همزمان کاهش منابع تجدیدناپذیر، همواره درگیر چالش‌هایی در طراحی و عملیات بوده است. از یک طرف رقابت شدید در بازارهای هدف این صنایع در سطح جهانی و از طرف دیگر، افزایش نگرانی‌های محیط زیستی ذی‌نفعان این صنایع را مکلف به حل سریع و دقیق این چالش‌ها کرده است.

مهندسی سیستم‌های فرایندی یک حوزه تخصصی است که با استناد به دانش کلاسیک مهندسی شیمی و با به کارگیری تکنیک‌های مهندسی سیستم‌ها، شناخت مناسبی از ویژگی‌های رفتاری سیستم‌های فرایندی و چالش‌های آن‌ها دارند. پیدا کردن راه‌حل بهینه برای حل این چالش‌ها از مهم‌ترین نقش‌های مهندسان فرایند است.

امروزه فناوری‌های حاصل از انقلاب صنعتی چهارم مانند اینترنت اشیاء، کلان داده، اتوماسیون، هوش مصنوعی و غیره، ابزارهای پرکاربردی را در دسترس قرار داده است. مهندسی سیستم‌های فرایندی با به کارگیری این ابزارها در قالب تکنیک‌های مهندسی، روند پاسخگویی به چالش‌های سیستم‌های فرایندی را منقلب کرده است و منجر به هوشمندسازی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی گردیده است.

ارتباط موثر بین فناوری، دانش کلاسیک و تکنیک‌های مهندسی، نسل آینده مهندسی سیستم‌های فرایندی را آماده برای تحول دیجیتال صنایع سیستم‌های فرایندی و ورود به نسل پنجم انقلاب صنعتی می‌سازد. یکی از مهم‌ترین فناوری‌ها در تحقق این اهداف، همزاد دیجیتال است. این فناوری با برقراری ارتباط پیوسته بین

[1] heritage digital twin

دنیای واقعی و مجازی، علاوه بر هوشمندی، اعمال خودکار این راه‌حل‌ها روی سیستم‌های فرایندی را ممکن می‌سازد.

مراجع

[1] Mour, A., Kenley, C. R., Davendralingam, N., & DeLaurentis, D. (2013). Agent□Based Modeling for Systems of Systems. *INCOSE International Symposium*, *23*(1), 973–987. https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2013.tb03067.x

[2] Baldwin, W. C., & Sauser, B. (2009). Modeling the Characteristics of System of Systems. *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*.

[3] Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, J. (2008). System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward. *IEEE Systems Journal*, *2*(4), 484–499. https://doi.org/10.1109/JSYST.2008.2007163

[4] Pistikopoulos, E. N., Barbosa-Povoa, A., Lee, J. H., Misener, R., Mitsos, A., Reklaitis, G. V., Venkatasubramanian, V., You, F., & Gani, R. (2021). Process systems engineering – The generation next? *Computers & Chemical Engineering*, *147*, 107252. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107252

[5] Klatt, K.-U., & Marquardt, W. (2009a). Perspectives for process systems engineering—Personal views from academia and industry. *Computers & Chemical Engineering*, *33*(3), 536–550. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.09.002

[6] Leng, J., Zhu, X., Huang, Z., Li, X., Zheng, P., Zhou, X., Mourtzis, D., Wang, B., Qi, Q., Shao, H., Wan, J., Chen, X., Wang, L., & Liu, Q. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, *73*, 349–363. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.010

[7] Takamatsu, T. (1983). The nature and role of process systems engineering. *Computers & Chemical Engineering*, *7*(4), 203–218. https://doi.org/10.1016/0098-1354(83)80012-X

[8] Hangos, K. M., & Cameron, I. T. (2001). Process modelling and model analysis. *Academic Press*.

[9] Grossmann, I. E., & Westerberg, A. W. (2000). Research challenges in process systems engineering. *AIChE Journal*, *46*(9), 1700–1703. https://doi.org/10.1002/aic.690460902

[10] Srinivasan, K., Puliyanda, A., Thosar, D., Bhakte, A., Singh, K., Addo, P., Srinivasan, R., & Prasad, V. (2025). Artificial intelligence and machine learning at various stages and scales of process systems engineering. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *103*(3), 1004–1035. https://doi.org/10.1002/cjce.25525

[11] Martín, M., & Adams Ii, T. A. (2019). Challenges and future directions for process and product synthesis and design. *Computers & Chemical Engineering*, *128*, 421–436. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.022

[12] Reis, M. S., & Saraiva, P. M. (2021). Data-centric process systems engineering: A push towards PSE 4.0. *Computers & Chemical Engineering*, *155*, 107529. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107529

[13] Armyoon, Amin; Vaziri Yazdi, Seyed Ali; Honarvar, Bijan; Fazaeli, Reza; and Esfandiari, Nadia. (2024). Optimization of Operational Conditions for Amino Acid Extraction Using Supercritical Carbon Dioxide. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *23*(135), 74–89. doi: 10.22034/ijche.2023.404055.1328. (IN PERSIAN)

[14] Ahmadi, Seyed Hossein, and Khosrojerdy, Mohammad Javad. (2025). Data Driven Fault Detection in the Gas Refining Process: A Case Study Using Support Vector Machine Regression and Gaussian Process. (e219388). *Iranian Chemical Engineering Journal*, (), e219388. doi: 10.22034/ijche.2025.495041.1482. (IN PERSIAN)

[15] Shiri,A. and Fakhroleslam,M. (2025). Surrogate Model Development for Rapid Simulation and Analysis of Linepack Dynamics in Gas Transmission Networks During Peak Consumption. (e235714). *Iranian Chemical Engineering Journal*, (), e235714 doi: 10.22034/ijche.2025.541217.154. (IN PERSIAN)

[16] Zahedi, Gholamreza, and Karami, Zohreh. (2008). Simulation of a Delayed Coking Unit Using an Artificial Neural Network. (e112070). *Iranian Chemical Engineering Journal*, *7*(38), e112070. (IN PERSIAN)

[17] Paredes, R., & Reis, M. S. (2025). Causality in Process Systems Engineering: Fundamentals, Applications, and Emerging Trends. *Computers & Chemical Engineering*, *203*, 109345. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109345

[18] Chiang, L. H., Braun, B., Wang, Z., & Castillo, I. (2022). Towards artificial intelligence at scale in the chemical industry. *AIChE Journal*, *68*(6), e17644. https://doi.org/10.1002/aic.17644

[19] Feise, H. J., & Schaer, E. (2021). Mastering digitized chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*, *34*, 78–86. https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.11.011

[20] Leng, J., Guo, J., Xie, J., Zhou, X., Liu, A., Gu, X., Mourtzis, D., Qi, Q., Liu, Q., Shen, W., & Wang, L. (2024). Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part I): Design thinking and modeling methods. *Journal of Manufacturing Systems*, *76*, 158–187. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.07.012

[21] Maddikunta, P. K. R., Pham, Q.-V., B, P., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, *26*, 100257. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257

[22] Barata, J., & Kayser, I. (2024). How will the digital twin shape the future of industry 5.0? *Technovation*, *134*, 103025. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103025