



# Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: [www.arcpe.modares.ac.ir](http://www.arcpe.modares.ac.ir)

Research Paper

## The role of process design engineering in the design and operation of process units in the era of Industry 4.0 and artificial intelligence

Amir Arsalan Sobhani<sup>1</sup>, Mohammad Fakhroleslam<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Process Design Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

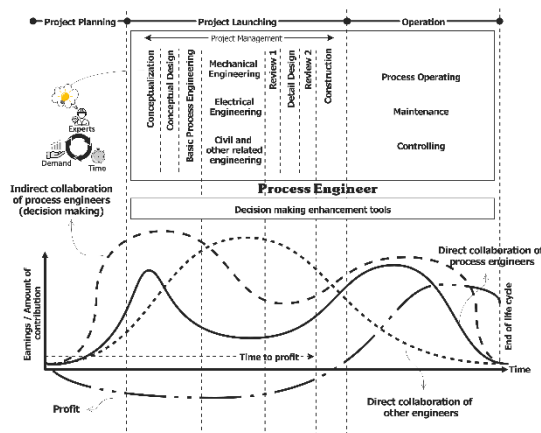
### ARTICLE INFO

Received 2025-06-11  
Accepted 2026-01-21  
Available online 2026-06-06  
ISSN: 2588-5316  
Online ISSN: 2588-5324

#### Keywords:

Design Projects  
Process Design Engineers  
Oil-Gas- Petrochemical Industries  
Decision Making  
Artificial Intelligence Tools

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ABSTRACT

**Research subject:** Chemical process design is one of the foundational pillars for the advancement of oil, gas, and petrochemical industries. The inherent complexity and multidimensional nature of chemical processes have transformed process engineering projects into highly interdisciplinary collaborations. Consequently, beyond the challenges of process design itself, the synchronization and facilitation of cooperation among diverse engineering disciplines are among the core difficulties of such projects. The involvement of process design engineers as experts in chemical engineering is essential to address these challenges through direct engagement, indirect contribution, or overarching supervision.

**Research approach:** This study analyzes the structural framework of chemical process engineering projects, from the ideation phase to the end of the design life cycle, focusing on the complexities of oil, gas, and petrochemical systems. The roles of process design engineers across different project phases are identified and categorized. Their decision-making frameworks are modeled using process systems engineering (PSE) methodologies. To improve interdisciplinary collaboration and data integration, an ontology-based approach is adopted to define foundational concepts and standardize relationships between project components. Additionally, to clarify decision-making mechanisms and better understand the challenges and design stages, visualization techniques are applied to map information structures and depict the decision flows and responsibilities of process design engineers.

**Main results:** The findings demonstrate that process design engineers play a pivotal role in the success of engineering projects at three levels: direct involvement, indirect influence, and supervisory oversight. The role of process design engineers and their decision-making in addressing challenges within oil, gas, and petrochemical projects, across all stages from concept to operation, has been analyzed through the examination of process system characteristics. The application of these analytical tools in enhancing decision-making quality and improving understanding of process systems has been presented. Emerging AI tools significantly enhance the effectiveness of engineering decisions and contribute to cost and time reduction through enabling modeling, simulation, data analysis, and optimized decision-making. Moreover, the application of these tools improves understanding of complex industrial systems and enhances performance under uncertainty.

\* Corresponding author: [fakhroleslam@modares.ac.ir](mailto:fakhroleslam@modares.ac.ir)



## نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

آدرس صفحه: [www.arcpe.modares.ac.ir](http://www.arcpe.modares.ac.ir)

مقاله تحقیقاتی

### نقش مهندسی طراحی فرایند در طراحی و بهره‌برداری واحدهای فرایندی در عصر صنعت ۴.۰ و هوش مصنوعی

امیر ارسلان سبحانی<sup>۱</sup>، محمد فخرالاسلام<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی، گروه طراحی فرایند، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

#### چکیده

**موضوع تحقیق:** طراحی فرایندهای شیمیایی یکی از ارکان اصلی توسعه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی است. پیچیدگی‌های ذاتی فرایندهای شیمیایی و چندبعدی بودن طراحی آن‌ها، پروژه‌های طراحی مهندسی را به همکاری بین رشته‌ای تبدیل کرده است. علاوه بر چالش‌های طراحی فرایندهای شیمیایی، همگام‌سازی و هموارسازی همکاری بین حوزه‌های مختلف مهندسی جزو چالش‌های اصلی پروژه‌های طراحی هستند. حضور مهندسان طراح فرایند، به‌عنوان تخصصی از مهندسی شیمی با ایفای نقش‌های مختلف، برای حل این چالش‌ها ضروری است.

**روش تحقیق:** در این مقاله، با تمرکز بر خصوصیات پیچیده سامانه‌های صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، ساختار پروژه‌های طراحی مهندسی از مرحله ایده‌پردازی تا انتهای طراحی و ساخت و عملیات، تحلیل شده است. نقش مهندسان طراح فرایند در بخش‌های مختلف پروژه تبیین و دسته‌بندی شده، با بهره‌گیری از روش‌های مهندسی سامانه‌های فرایندی، چارچوب تصمیم‌گیری آن‌ها مدل‌سازی شده است. برای بهبود تعامل میان‌رشته‌ای و یکپارچه‌سازی داده‌ها، از رویکرد هستی‌شناسانه به‌منظور تعریف مفاهیم بنیادین و استانداردسازی ارتباط بین اجزای مختلف پروژه استفاده شده است. همچنین برای شفاف‌سازی سازوکار تصمیم‌گیری و درک بهتر از چالش‌ها و مراحل طراحی، تمامی ساختارهای اطلاعاتی بصری‌سازی شده، جریان تصمیمات و نقش‌آفرینی مهندسان طراح فرایند ترسیم شده است.

**نتایج اصلی:** نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مهندسان طراح فرایند بر اساس ماهیت و سطح تصمیم‌گیری، میزان تأثیر بر اهداف پروژه، نوع تعامل با سامانه‌های فرایندی و کاربرد ابزارها و فناوری‌ها، در سه سطح تأثیر/داخلت مستقیم، تأثیر/داخلت غیرمستقیم و نظارت بالاسری در موفقیت پروژه‌های طراحی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. نقش مهندسان طراح فرایند و تصمیم‌گیری آن‌ها در مواجهه با چالش‌های موجود در پروژه‌های صنایع نفت، گاز و پتروشیمی در بخش‌های مختلف از ایده تا بهره‌برداری، به کمک بررسی خصوصیت‌های سامانه‌های فرایندی، تحلیل شده، نحوه به‌کارگیری این ابزار در تقویت کیفیت تصمیم‌گیری و شناخت از سامانه‌های فرایندی ارائه شده است. ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی با فراهم‌سازی امکان مدل‌سازی، شبیه‌سازی، تحلیل داده‌ها و تصمیم‌سازی بهینه، توانسته‌اند اثربخشی تصمیمات مهندسان طراح فرایند را افزایش داده، در کاهش هزینه‌ها و زمان اجرای پروژه‌ها مؤثر باشند. همچنین به‌کارگیری این ابزارها باعث ارتقای سطح شناخت از سامانه‌های پیچیده و بهینه‌سازی عملکرد در مواجهه با عدم قطعیت‌ها شده است.

#### اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

#### کلیدواژه‌ها

پروژه‌های طراحی

مهندسان طراح فرایند

صنایع نفت

گاز و پتروشیمی

ابزارهای هوش مصنوعی

\* نویسنده مسئول: [fakhroslam@modares.ac.ir](mailto:fakhroslam@modares.ac.ir)

## ۱ مقدمه

سامانه‌های صنایع شیمیایی، مجموعه‌ای از سامانه‌های تودرتو (System-of-Systems (SoS) هستند که اجزای آن با پردازش مواد اولیه به کمک عملیات مختلف پیچیده؛ مانند واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های فیزیکی انتقال، 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 بدون آسیب‌های محیط زیستی، برای ایجاد خروجی با ارزش افزوده به کار گرفته می‌شود. مجموع تنوع و تعدد اجزا، تعاملات غیرخطی و پویای اجزا و شرایط و محدودیت‌های ناظر بر این تعاملات باعث پیچیدگی شناخت و پیش‌بینی رفتار این سامانه‌ها می‌شود. از طرفی، تقاضای بازارهای مورد هدف صنایع شیمیایی دائماً در معرض تغییر و رقابت سخت‌تر قرار دارد [۱]. بدیهی است فعالیت پایدار در این شرایط، مستلزم ارتقا و اصلاح دائمی ساختار و عملیات سامانه‌های صنایع شیمیایی است.

الزام ارتقا و اصلاح دائمی سامانه‌های صنایع شیمیایی، شناخت رفتار و ساختارهای پیچیده این سامانه‌ها را بیش‌ازپیش ضروری می‌کند [۲]. دانش مهندسی شیمی متداول (Classic) منحصر در پاسخگویی به نیازهای این سامانه‌ها به کمک اصول اولیه مهندسی واکنش‌های شیمیایی، پدیده‌های انتقال و رفتار ترمودینامیکی و تعادلی مواد است؛ اما با پیشرفت تقاضا و نیازها، ابزار و روش پاسخگویی سنتی کارایی خود را از دست داده، ایجاد و به‌کارگیری فنون نوین ضروری است [۳]. علاوه بر این مسائل مربوط به سامانه‌های صنایع شیمیایی، گاهی منحصر به اصول اولیه دانش مهندسی شیمی نیست و نیازمند بررسی مسائل مدیریتی و لجستیکی و بهره‌گیری از علوم رایانه و اقتصاد نیز هست. بنابراین نیاز است گروهی از مهندسان شیمی به منظور دستیابی به این فنون آموزش داده شوند که این گروه، مهندسی سامانه‌های فرایندی (Process System Engineering (PSE)) نام دارد. PSE به کمک فنون مختلف طراحی مفهومی، طراحی محصول و فرایند، تشدید فرایند (Process Intensification (PI))، طراحی به کمک رایانه (Computer Aided Design (CAD)) و غیره و ابزارهای مختلف شبیه‌سازی، مدل‌سازی، کنترل و بهینه‌سازی، به تجزیه و تحلیل سامانه‌های صنایع شیمیایی و بررسی اجزا، شرایط عملیاتی و تعاملات این اجزا می‌پردازد [۴].

مهندسی سامانه‌های فرایندی، این مهم را در طی دو بخش مختلف ایجاد (طراحی) و تحلیل به انجام می‌رساند [۴]. در هر دو پارادایم فرض بر این است که مدل مناسب فرایند یا محصول در دسترس است که رفتار فرایند 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 کمک مدلی بر اساس آن‌ها است. در مقابل، در مسائل غیرمستقیم یا طراحی، هدف ایجاد فرایند یا محصول به منظور دستیابی به اهداف و مطلوبات است [۴].

علاوه بر تنوع و تعدد گزینه‌های محتمل برای رسیدن به مطلوبات، مسائل غیرمستقیم مسیری پیچیده و چندبعدی است که مستلزم همکاری گروه‌های مختلف مهندسی از جمله مهندسی شیمی، مهندسی طراحی فرایند، مهندسی مکانیک، مهندسی عمران، مهندسی مواد، مهندسی برق و سایر

نقش‌های مدیریتی و اقتصادی است. پیچیدگی مسائل چندبعدی طراحی به‌علاوه پیچیدگی ذاتی سامانه‌های صنایع شیمیایی، نقش مهندسی سامانه‌های فرایندی را پررنگ‌تر و پراهمیت‌تر می‌کند [۵].

تصمیم‌گیری، انتخاب و پیاده‌سازی راه‌حل‌های پیشنهادی از مهم‌ترین نقش‌های مهندسان طراح فرایند است. سرچنت (۱۹۶۶) آداب و رسوم طراحی فرایند قبل از دهه ۱۹۸۰ را که توسط مهندسان برای تأیید ایده‌های مفهومی در کارخانه‌های آزمایشی، روش‌های اکتشافی و محاسبات دستی انجام می‌شد، گسترش داده، بنیان PSE امروزی را بنا نهاد. فرایند طراحی مهندسی در این دوره اول بر اساس توالی گام‌ها ساختاردهی شده بود - تولید، طراحی تفصیلی، FEED، امکان‌سنجی و مفهوم‌سازی - اما خود فرایند دست‌وپاگیر و تکراری بود. این حرفه توسط انقلاب صنعتی شکل گرفت و رسمیت یافتن طراحی فرایند به‌عنوان یک حرفه در حدود سال ۱۸۸۰ پدیدار شد. از آنجایی که سهم فکری مهندسان طراحی فرایند بر اساس نظریه علمی و تجربه عملی کسب شده بود، ظهور تفکر سامانه‌ای در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، که تا حد زیادی توسط سرچنت و همکارانش رهبری می‌شد، نشان‌دهنده حرکت به سمت رویکردهای رسمی بود که زمینه را برای توسعه نهایی طراحی به کمک رایانه فراهم کرد [۳].

مطالعات فیگنباوم (۱۹۸۱) پتانسیل موج اول هوش مصنوعی را برای طراحی فرایند با استفاده از سامانه‌های خبره برجسته کرد که در دهه ۱۹۸۰ در حال تحقق بود. چنین سامانه‌هایی تلاش می‌کردند "قواعد سرانگشتی" مهندسان را با استفاده از ساختارهای منطقی اگر-آنگاه به کد رایانه‌ای ترجمه کنند. کاربردهای اولیه که در همایش‌های انجمن شیمی آمریکا در این دوره ارائه شدند، توان هوش مصنوعی را به‌عنوان ابزاری برای کمک به تصمیم‌گیری در شناسایی مولکولی و تشخیص عملیاتی نشان داد. با این حال، بیرون کشیدن دانش ضمنی از مهندسان با تجربه دشوار بود و سامانه‌های بعدی شکننده بودند و نمی‌توانستند فراتر از مشکلات محدود و مشخص تعمیم پیدا کنند. ناامیدی از کمبود مهندسی دانش در اواخر دهه ۱۹۸۰ به بروز چیزی که به اصطلاح «زمستان هوش مصنوعی» نامیده می‌شود، کمک کرد. اگرچه این سامانه‌های خبره انتظارات اولیه را برآورده نکردند، اما چارچوب مفهومی را برای ادغام ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری در عمل مهندسی فراهم کردند [۶].

باکس و دراپر (۱۹۹۰) بنیان موج دوم هوش مصنوعی در مهندسی فرایند را بنا نهادند که در دهه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ تحت سلطه یادگیری ماشین و رویکرد مبتنی بر داده بود. این هم‌زمان با انفجار ظرفیت محاسباتی و در دسترس بودن داده‌های بزرگ کارخانه‌ای بود، و از این‌رو الگوریتم‌ها قادر به یادگیری از علایم و بازخوردهای فرایندهای شیمیایی بودند. دانشمندان راه‌حل‌های عملی را در چندین حوزه از تصمیم‌گیری مهندسی ارائه کردند. به‌عنوان مثال، مدل‌های نگه‌داری پیش‌بینانه که با استفاده از داده‌های حسگرها به دست آمده‌اند، زمان خاموش شدن (Shut down) را کاهش دادند که این امر پیامدهایی برای انتخاب‌های طراحی تجهیزات داشت. به همین ترتیب، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری آماری، کارایی انرژی و کنترل کیفیت را در عملکرد فرایند بهبود بخشیدند. تصمیم‌گیری اقتصادی نیز تحت تأثیر قرار گرفت، به‌طوری که تحلیل‌های فنی-اقتصادی بیشتر به بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارزیابی پویا و امکان‌سنجی در

شده است. در نهایت در بخش ۵ نقش و نحوه به‌کارگیری ابزار هوش مصنوعی در توسعه هوشمند صنایع نفت، گاز و شیمیایی خاتمه یافته است.

## ۲ مسائل طراحی در صنایع نفت، گاز و شیمیایی (PGC)

در طراحی فرایند، مهندسان شیمی، فرایندهای شیمیایی را برای تبدیل مواد اولیه به محصولات موردنظر ایجاد (Synthesis) و طراحی (Design) می‌کنند. از طرفی در طراحی محصول، تمرکز بر ایجاد محصولاتی است که نیازهای مشتری را برآورده کنند. طراحی فرایند با محصولات شیمیایی تعریف‌شده آغاز می‌شود که اغلب در مقادیر نمونه اولیه از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی در دسترس هستند. تیم طراحی فرایند با چالش طراحی فرایندهای سودآور مواجه است که محصولات را در مقادیر و کیفیت‌های کافی تولید کنند تا تقاضای پیش‌بینی‌شده مشتریان را برآورده سازند. به‌عبارت‌دیگر، طراحان فرایندهایی را ایجاد می‌کنند تا مواد خام در وضعیت‌های مشخص را به محصول(های) موردنظر در وضعیت مشخص تبدیل کنند (شکل ۱). پس از جمع‌آوری اطلاعات و انجام آزمایش‌ها، در صورت لزوم، گروه مهندسان طراحی فرایند آماده است تا نمودار جریان فرایند اولیه برای تبدیل مواد اولیه به محصولات شیمیایی ارائه دهد. عملیات مختلف پردازش برای انجام واکنش‌های شیمیایی و جداسازی محصولات و محصولات جانبی از یکدیگر و از مواد اولیه واکنش‌نداده استفاده می‌شوند. ترکیب این عملیات به نمودار جریان فرایند به‌عنوان ایجاد فرایند شناخته می‌شود [۹].



شکل ۱ طرح‌واره مسائل ایجاد و طراحی مهندسی فرایند شیمیایی

Figure 1 Schematic of synthesis and design problems in engineering design of a chemical process

سامانه‌های صنایع PGC، نوعی سامانه‌های تولید (Manufacturing Systems) هستند. سامانه‌های تولید، اجزایی ضروری در صنایع هستند و پایداری، کیفیت و کارایی تولید را میسر می‌کنند. باوجود اینکه مدتی است از انقلاب صنعتی چهارم (Industry 4.0) گذشته است و صنایع هوشمند در حال حرکت به سمت انقلاب صنعتی پنجم (Industry 5.0) هستند به‌طوری که به سمت راهبردهای بیشتر انسان‌محور، پایدار و مقاوم حرکت می‌کنند تا به اهداف اجتماعی پاسخ دهند و نگرانی‌های محیط زیستی را مدیریت کنند، اما ادغام و پیاده‌سازی سامانه‌های تولید هوشمند هنوز هم دشوار است. علت این دشواری این است که به‌طور کلی، زنجیره تأمین سنتی که از منابع به مشتری (Source-to-Customer) هدایت می‌شود، دچار تغییرات بسیاری شده است؛ به‌طوری که زنجیره تأمین پویا بر اساس تقاضا (Demand-Dynamic Supply Chain) شکل گرفته است [۱۰].

## ۲-۱ خصوصیت‌های سامانه‌های صنایع PGC

صنایع PGC معمولاً به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی. بخش بالادستی معمولاً شامل اکتشاف، توسعه و تولید نفت خام و گاز طبیعی می‌شود. بخش میانه، همان‌طور که از نامش

مراحل مختلف طراحی مفهومی و مهندسی اولیه (FEED) متکی بودند. بنابراین، نقش مهندس طراحی فرایند، از وابستگی زیاد به مدل‌های ایستا به بهره‌مندی از بینش پیش‌بینی‌کننده و مبتنی بر داده تغییر یافت، که راهبرد طراحی را در برابر عملکرد فنی و همچنین امکان‌سنجی اقتصادی می‌سنجید [۷].

گودفلو (۲۰۱۴) و کایزر (۲۰۲۰) اکنون پیشگام هستند، جایی که هوش مصنوعی مولد، دوقلوهای دیجیتال و ابزارهای یکپارچه در سطح سامانه در حال تحول گردش کار مهندسان طراحی فرایند هستند. هوش مصنوعی مولد همچنین مرزهای طراحی مفهومی را گسترش می‌دهد تا مسیرها و پیکربندی‌های فرایندی جدیدی را پیشنهاد کند که می‌توانند توسط مهندسان ارزیابی و بهینه شوند. درعین‌حال، دوقلوهای دیجیتال اکنون سکوهایی قدرتمندی در طول چرخه عمر از طراحی اولیه تا راه‌اندازی هستند که امکان راه‌اندازی مجازی، آموزش کاربر و نظارت زنده بر عملکرد را فراهم می‌کنند. معماری دوقلوی دیجیتال همچنین تجزیه و تحلیل ایمنی را بهبود بخشیده است، به طوری که ابزارهای هوش مصنوعی مطالعات سنتی HAZOP را با بررسی نظام‌مند نمودارهای فرایند برای شناسایی خطرات، تکمیل می‌کنند. این ترکیب مدل‌سازی مولد، شبیه‌سازی بی‌درنگ و ارزیابی ریسک پشتیبانی‌شده توسط هوش مصنوعی، تغییر پارادایمی در تصمیم‌گیری است: مهندس طراح اکنون جمع‌کننده راه‌حل‌ها در فضای دیجیتالی است که به‌طور مداوم به‌روز می‌شود. با بلوغ فناوری‌ها، نقش مهندس طراحی محصول به‌طور فزاینده‌ای به قضاوت، خلاقیت و یکپارچه‌سازی در سامانه‌های فنی و سازمانی پیچیده بستگی دارد [۸].

پروژه طراحی مهندسی، شامل مراحل و بخش‌های مختلفی است که تصمیم‌گیری باکیفیت، در دقت و صحت هر یک از این مراحل نقش قابل توجهی دارد. ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی، فرصت‌های زیادی را در ایفای نقش بهتر مهندسان طراح فرایند در پروژه‌های مهندسی، ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری و پیاده‌سازی کم‌هزینه‌تر راه‌حل‌های پیشنهادی در دسترس قرار می‌دهند. در این مقاله:

- با تکیه بر شناخت خصوصیت‌های سامانه‌های فرایندی در صنایع شیمیایی و بررسی مسائل طراحی این سامانه‌ها، نقش مهندسان طراح فرایند در تمام طول پروژه طراحی مهندسی از ایده تا انتهای چرخه عمر تبیین شده است؛
- سازوکار ایفای نقش و تصمیم‌گیری مهندسان طراح فرایند در بخش‌های مختلف یک پروژه و ارزش‌های افزوده به‌کارگیری ابزارهای نوین هوش مصنوعی در تقویت شناسایی راه‌حل‌های محتمل و تصمیم‌گیری و انتخاب، پیشنهاد شده است.

ساختار بخش‌های پیش‌رو در این مقاله به این صورت است که در بخش ۲، با بررسی خصوصیت‌های سامانه‌های صنایع نفت، گاز و شیمیایی، به مشخصات و مراحل مسائل طراحی پرداخته شده است و چارچوب‌های پاسخگویی به چالش‌های مربوط به این مسائل ارائه شده است. در بخش ۳، شرح و ساختار پروژه طراحی مهندسی از ایده تا آخر چرخه عمر ارائه شده است و در تمام مراحل نقش مهندسان طراح فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، در بخش ۴، نقش‌های متفاوت مهندسان طراح فرایند در بخش‌های مختلف پروژه‌های مهندسی توصیف‌شده در بخش ۳، توضیح داده

شده‌اند و قادر به تولید در مقیاس بزرگ هستند. طراحی سامانه تولید (MSD) به فرایندی اشاره دارد که سازوکارهای پیکربندی و عملکرد سامانه تولید را با نیازهای بازار هماهنگ می‌کند. تطبیق سامانه‌های تولید با نیازهای روز بازار، نیازمند کارهای سازمانی و اکتشافی قابل توجهی است، اما می‌تواند بهره‌وری، کارایی و ارائه خدمات و محصولات به مشتریان را بهبود بخشد. طراحی سامانه تولید نه تنها بر بهره‌وری تولید و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد؛ بلکه به برنامه‌ریزی راهبردی و توسعه پایدار صنایع نیز کمک می‌کند [۱۴].

طراحی سامانه‌های تولید دارای چارچوب تفکر-مدل‌سازی-فرایند-تسهیل‌کننده (TMPE) است که شامل چهار بخش، تفکر طراحی، مدل‌سازی سامانه، فرایندهای طراحی و تسهیل‌کننده‌های طراحی است. این بخش‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر به صورت خلاصه در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. تفکر طراحی شامل تفکر سامانه‌ای، مبتنی بر دانش قبلی، متمرکز بر بهبود عملکرد، مبتنی بر ماژول و محاسباتی MSD است. مدل‌سازی سامانه پایه‌گذار MSD است. فرایند طراحی باید شامل طراحی عملکرد، طراحی ساختار، طراحی رفتار، طراحی کنترل، طراحی هوش و طراحی مبتنی بر عملکرد باشد [۱۴].

طراحی سامانه تولید، به فرایند مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی جنبه‌های مختلف سامانه تولیدی، از جمله چیدمان سامانه، جریان تولید، سامانه جابه‌جایی مواد، روش‌های تولید، انعطاف‌پذیری سامانه و راهبردهای عملیاتی، اشاره دارد. بنابراین، طراحی فرایند شیمیایی، MSD است که بر مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی تبدیل مواد اولیه به محصولات با ارزش از طریق فرایندهای شیمیایی، فیزیکی یا زیستی تمرکز دارد؛ از جمله طراحی چیدمان‌های فرایند، جریان‌های مواد و انرژی، عملیات واحد، انعطاف‌پذیری فرایند و راهبردهای عملیاتی برای اطمینان از کارایی، ایمنی و پایداری در سامانه‌های تولید مواد شیمیایی.

مهندسی فرایندهای شیمیایی به درک و توسعه رویه‌های منظم سامانه‌ای برای طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های فرایند شیمیایی، از ریزسامانه‌ها تا فرایندهای پیوسته و ناپیوسته صنعتی، می‌پردازد. در فرایندهای شیمیایی زنجیره تأمین با مجموعه‌ای از مواد شیمیایی آغاز می‌شود که صنعت باید آن‌ها را در سطح مولکولی ایجاد و شناسایی کند. گام‌های بعدی این مولکول‌ها را به خوشه‌ها، ذرات و فیلم‌ها تجمیع می‌کنند - به عنوان سامانه‌های تک‌فازی و چندفازی که در نهایت به شکل مخلوط‌های کلان درمی‌آیند. در انتقال از شیمی به مهندسی، به طراحی و تحلیل واحدهای تولیدی پرداخته می‌شود که در یک فرایند شیمیایی ادغام شده و به نوبه خود بخشی از مجموعه‌ای با فرایندهای متعدد می‌شوند. در نهایت، این مجموعه بخشی از یک شرکت تجاری است که تحت تأثیر ملاحظات تجاری قرار دارد. این روند در شکل ۳ قابل مشاهده است.

باتوجه به موارد اشاره شده، سامانه تولید مواد شیمیایی، فرایند شیمیایی و طراحی سامانه‌های تولید مواد شیمیایی در واقع طراحی فرایندهای شیمیایی است که بر پایه دانش مهندسی شیمی و به کمک ابزارهای مختلف، به منظور رفع نیازهای زنجیره تأمین، به طراحی، کنترل و بهینه‌سازی در ابعاد و اقسام مختلف می‌پردازد. چارچوب پاسخگویی به این نیازها به کمک طراحی فرایندهای شیمیایی در شکل ۴ ارائه شده است.

پیداست، شامل تأسیسات و فرایندهایی است که بین بخش‌های بالادستی و پایین‌دستی قرار دارند. فعالیت‌های میان‌دستی می‌توانند شامل فراوری، ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل نفت خام و گاز طبیعی باشند. حمل‌ونقل بخش بزرگی از فعالیت‌های میان‌دستی است و می‌تواند شامل استفاده از خطوط لوله، ناوگان کامیون‌ها، کشتی‌های نفت‌کش و واگن‌های ریلی باشد. فعالیت‌های پایین‌دستی معمولاً شامل پالایش/پردازش هیدروکربن، بازاریابی و توزیع می‌شود. در طبقه‌بندی دیگری، صنعت نفت به پنج بخش تقسیم می‌شود: بالادستی، پایین‌دستی، خط لوله، دریایی و خدمات و تأمین. شرکت‌هایی که در هر دو بخش بالادستی و پایین‌دستی فعالیت دارند، به عنوان شرکت‌های یکپارچه شناخته می‌شوند [۱۱]. بر اساس این طبقه‌بندی، سامانه‌های صنایع PGC را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد:

- اکتشاف، توسعه و تولید؛
- فرایندهای فراوری هیدروکربن (پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های پتروشیمی)؛
- ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و توزیع؛
- خرده‌فروشی یا بازاریابی؛

طیف سامانه‌های صنایع PGC بر اساس مقیاس‌های زمانی و ابعادی در شکل ۲ ارائه شده است. با وجود تنوع در سامانه‌های صنایع PGC و کاربرد وسیع آن‌ها، سامانه‌هایی در مقیاس تجهیز، واحد و کارخانه (میان‌دستی) در مهندسی شیمی اهمیت ویژه‌ای دارند و در شاخه طراحی فرایند توجه به خصوصی از صنعتگران و محققان را به خود جلب کرده است. برخلاف سامانه‌های در مقیاس بسیار کوچک یا بسیار بزرگ، در این سامانه‌ها، مهندسان طراحی فرایند حضور پررنگ‌تری داشته، اقدامات، وابستگی شدیدی به تصمیم‌گیری این گروه دارد.

سامانه‌های پیوسته (فرایند) معمولاً سامانه‌های بزرگ‌مقیاسی هستند که از صدها هزار قطعه سخت‌افزاری تشکیل شده‌اند. در حالی که هر کدام فرایندی منحصربه‌فرد است، همه فرایندها از تجهیزات شامل واکنشگاه‌ها، پمپ‌ها، گرم‌کن‌ها یا همزن‌ها تشکیل شده‌اند و عناصر کنترل معمولاً شیرها هستند. مهم‌ترین عوامل فرایندی دما، جریان، فشار، سطح و ترکیب درصد هستند. فرایندها سامانه‌های بسته‌ای هستند که در آن‌ها عملیات به طور داخلی توسط عوامل فرایندی وابسته به یکدیگر هدایت می‌شوند. به عنوان مثال، دمای خروجی مایع مبدل حرارتی به موقعیت شیر بخار، فشار تأمین بخار، جریان مایع، ظرفیت حرارتی مایع و بسیاری از عوامل دیگر بستگی دارد. در این سامانه‌ها سطح خودکار کردن بالا است و در طول عملیات، بیشتر فرایندهای تولید به طور خودکار انجام می‌شوند و وظیفه اصلی کاربرها کنترل نظارتی است [۱۲]. خصوصیت‌های این سامانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

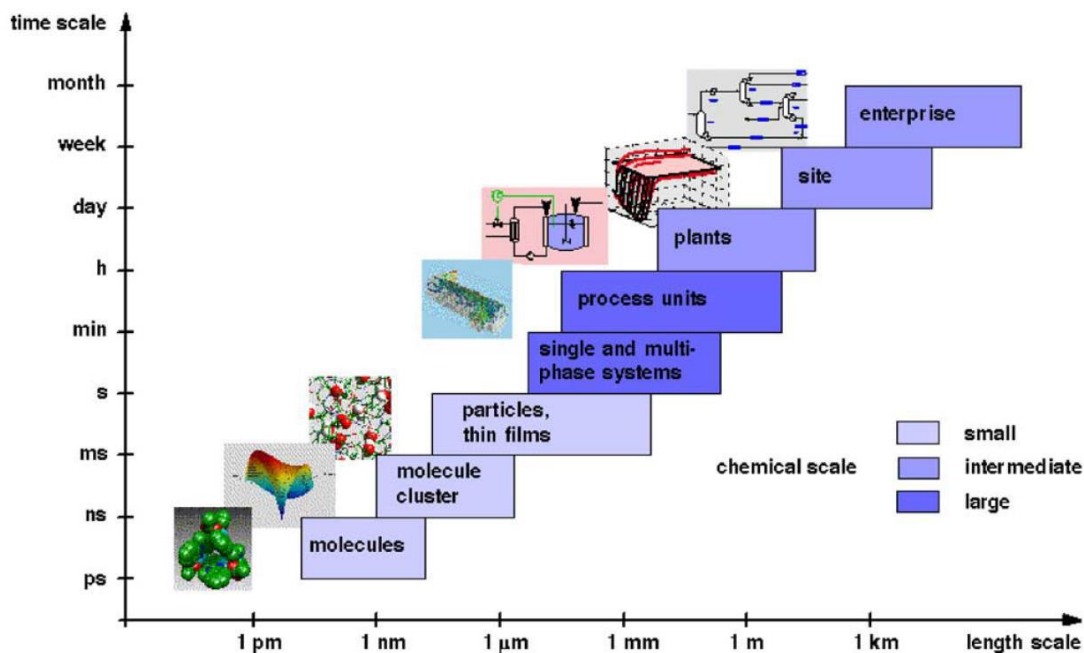
## ۲-۲ ضرورت، اهمیت و چگونگی طراحی سامانه‌های صنایع PGC

طراحی سامانه‌های تولید ((Manufacturing System Design (MSD)، به عنوان سنگ بنای برنامه‌ریزی بلندمدت و گسترش پایدار در صنایع، نقش مهمی را در تطابق صنایع با زنجیره تأمین پویا دارد. سامانه تولید، مجموعه‌ای از اجزایی مانند کاربرها، ماشین‌آلات، مواد و فناوری است که در سطوح مختلف به صورت زیرسامانه‌های فیزیکی و اطلاعاتی سازماندهی

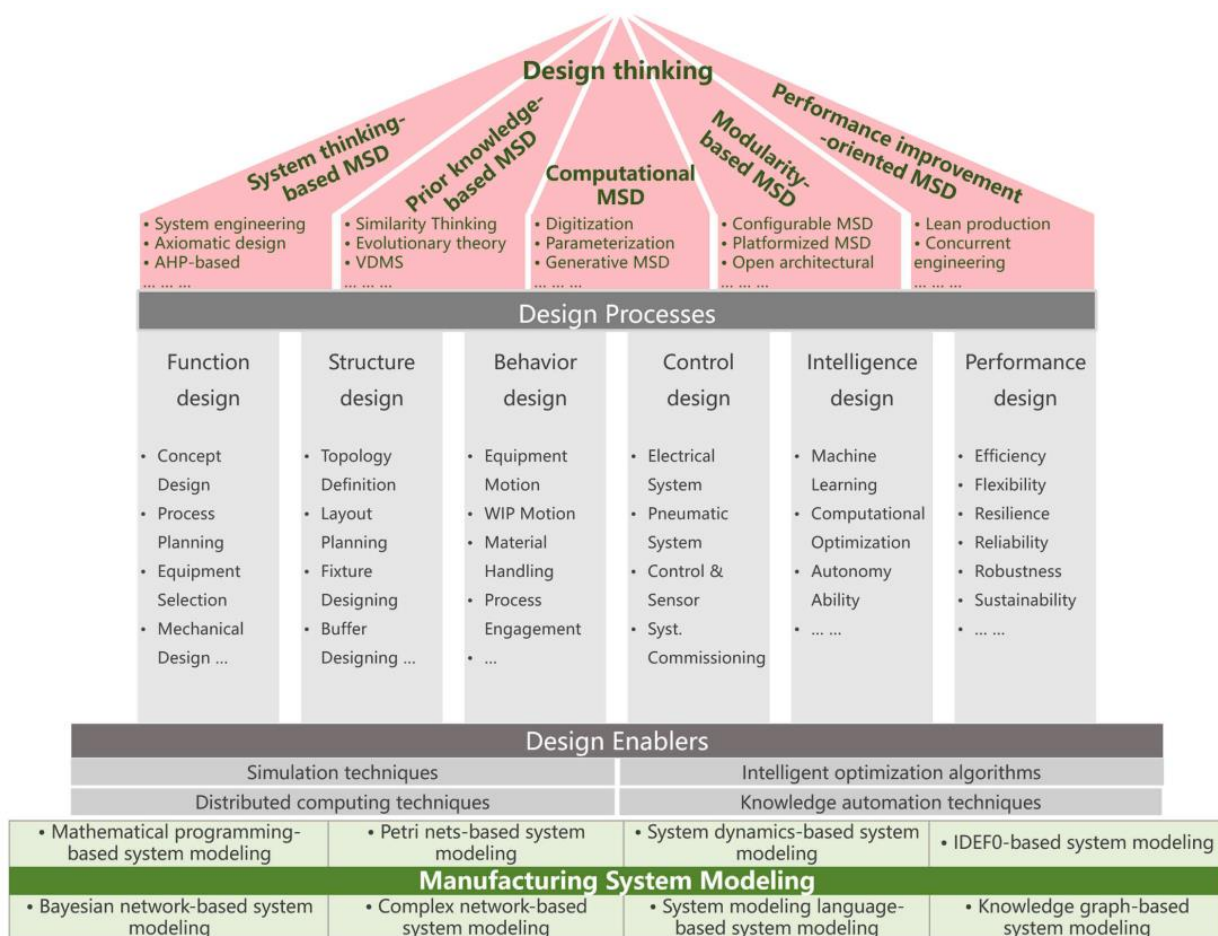
جدول ۱ خصوصیت سامانه‌های صنایع PGC [۱۲]

**Table 1** Characteristics of PGC systems [12]

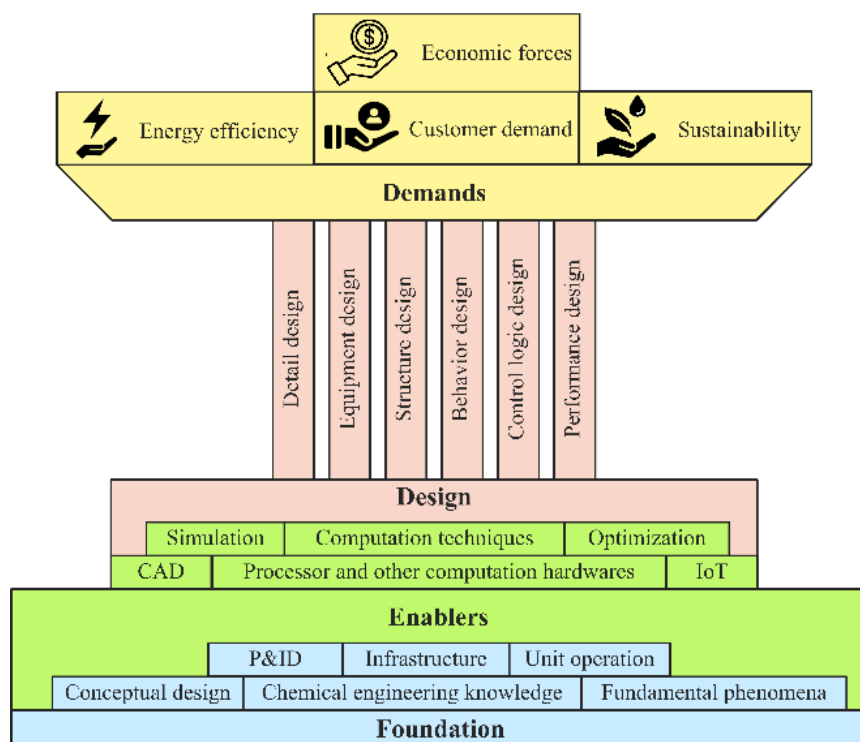
Aspect	PGC Industries Process
<b>System Overview</b>	
Scale	Large
Equipment	General purpose equipment
Components	Reactors, pumps, heaters, agitators, valves
System type	Central
Distributed processes	Tightly coupled, plant-wide control
Compensation/redundancy	Present
Process parameters	Temperature, flow, pressure, level, weight
System characteristics	Closed, internally driven
Automation level	High
Safety importance	High
Goals/priorities	Change frequently
<b>Complex Interaction</b>	
System complexity	High
Source of complexity	Parameter interactions, common connections
Designer understanding	Not fully understood
<b>Production process</b>	
Unit operations	Distillation, crystallization, reactions
Impact type	Indirect
Element impact	Similar
Speed	Slow but precise timing
Time criticality	Nonlinear changes, delays
Pausing production	Problematic (loses batch)
Pausing process	Impossible
Options	Quantitative and qualitative
<b>Materials and Products</b>	
Product form	Fluids/masses
Product value	High
Product diversity	Low (continuous), high (batch)
Variability handling	Different recipes, same equipment
Process variation impact	High (narrow operating ranges)
Variability sources	Raw material properties
<b>Failures and Abnormal Situations</b>	
Consequences	Economic & safety risks
Frequency	Rare major accidents, frequent minor issues
Prevention	Safety barriers, protection layers
Typical faults	Overpressure, leaks
Fault impact	Affects entire product
Fault detection	Product parameter deviations
Fault recovery	Difficult (loses batch)
Fault propagation	Forward and backward
Aspect	Process Industries
Perceivability	Not directly perceivable (parameter readings and alarms)
SOPs	Available only for known faults
<b>Information Available to Operator</b>	
Type of information	Control room: indirect, field: direct
Information limits	No sensors, not transferred to control room, not relevant, uncertain validity, noise, presentation in HMI, mismatches between information sources
HMI	Inconsistent, separate parameters, little information about function



شکل ۲ مقیاس زمانی و فضایی فرایندهای صنایع PGC [۱۳]  
 Figure 2 Time and spatial scale of PGC processes [13]



شکل ۳ چارچوب TMPE طراحی سامانه تولید [۱۴]  
 Figure 3 TMPE framework of design of a manufacturing system [14]



شکل ۴ چارچوب طراحی فرایندهای شیمیایی با توجه به نیازهای زنجیره تأمین  
**Figure 4** Design of chemical process framework according to supply chain needs

به صورت سفارشی تولید می‌کنند، با زمان‌های تولید و تحویل بسیار کوتاه. صنعت فراوری معمولاً محصولات واسطه‌ای تولید می‌کند که یا بیشتر پردازش می‌شوند یا برای تولید محصولات خاص استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، صنعت پلاستیک بسیاری از پلیمرها و درجات مختلفی را برای کاربردهای مختلف تولید می‌کند. تولید پلیمری خام با مراحل مختلفی از اصلاح، شکل‌دهی، قالب‌گیری و سرهم‌بندی دنبال می‌شود قبل از اینکه پلیمر به محصول نهایی برای مصرف‌کننده تبدیل شود. در نتیجه، بیشتر تولیدکنندگان فرایندها رابطه‌ای دور از دسترس با کاربران نهایی محصولات نهایی دارند. هر مرحله دارای رفتارهای پویا، موجودی، عدم قطعیت و عوامل تجاری خاص خود است. به منظور اینکه صنعت فرایندهای شیمیایی بتواند پاسخگوتر و چابک‌تر شود، نیاز خواهد بود که با ارتباطی که بین تمام بخش‌های زنجیره تأمین برقرار می‌شود، هوش تولید مبتنی بر فناوری اطلاعات (IT) را ادغام کند. برقراری این ارتباط و یکپارچگی، چالش‌های تجاری و فنی متعددی را به همراه دارد [۱۶].

به طور کلی، تولید هوشمند به دنبال دستیابی به هوشمندی در سطح کارگاه، شرکت و حتی کل زنجیره تأمین است. سطح کارگاه بر روی کارگران تولید، ماشین‌ها، مواد و محیط تمرکز دارد؛ سطح سازمان به برنامه‌ریزی منابع و هماهنگی بین بخش‌ها مربوط می‌شود؛ و سطح زنجیره تأمین تعامل و همکاری سازمان را بهینه می‌کند. برای هر سطح، چهار نوع مشکل رایج وجود دارد، یعنی شناسایی، تحلیل، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری، که به ترتیب به «چه اتفاقی می‌افتد»، «چرا این اتفاق افتاده است»، «چه اتفاقی خواهد افتاد» و «چه اقداماتی باید انجام شود» مربوط می‌شوند. مشکلات مربوط به سطح واحد عملیاتی در جدول ۲ آورده شده است [۱۷].

مطالعات مروری مختلفی بر چالش‌های تولید هوشمند صورت گرفته است

**۲-۳ ضرورت، اهمیت و چگونگی طراحی سامانه‌های صنایع PGC**  
 در سال‌های اخیر، به‌ویژه از سال ۲۰۱۳ که مفهوم انقلاب صنعتی ۴ مطرح شد، تولید هوشمند (Smart Manufacturing) به موضوعی داغ تبدیل شده است. انتشارات در زمینه ساخت و تولید هوشمند نیز به‌طور چشمگیری در حال افزایش هستند. ائتلاف رهبری تولید هوشمند (SMLC) تعریف جامعی برای تولید هوشمند (SM) ارائه کرده است: دسترسی به داده‌های صحیح در شکل صحیح، افراد صحیح با دانش صحیح، فناوری صحیح و عملیات صحیح، در هر زمان و هر مکانی که در طول کل زنجیره تولید به آن‌ها نیاز باشد. استفاده از داده‌ها با SM رویکرد تولید را با فناوری‌های پیشرفته حسگر، مدل‌سازی، کنترل، خودکارسازی و بهینه‌سازی تغییر می‌دهد. معیارهای تولید برای SM شامل کیفیت محصول، اقتصاد، پایداری/انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی/کارایی، ایمنی و عملکرد نیروی کار است. SM فناوری‌های عملیاتی (OT) را با فناوری اطلاعات (IT) ترکیب می‌کند تا اهداف تولید را با افزودن سکوها، مدولارسازی و استانداردها، خودکارسازی و مدیریت انسان در حلقه، تحلیل داده‌ها، داشبوردها، داده‌های زمان واقعی و فناوری‌های ابری، اشتراک‌گذاری داده‌ها، مقیاس‌بندی زیرساخت و امنیت اطلاعات محقق کند. شیوه‌های کسب‌وکار SM با استفاده گسترده از دارایی‌های داده‌ای در سطح سازمان، زنجیره ارزش و زنجیره تأمین و همچنین نیروی کار (کارگران هوشمند) که می‌توانند از این محیط جدید تولید بهره‌برداری کنند، تحریک می‌شوند. سامانه تولید هوشمند سامانه قابل‌تنظیم مجدد، انعطاف‌پذیر، چابک و مقاوم است که دارای عملکردهای خودحسگری، خودآموزی و خودسازگاری در ابعاد مختلف، مانند بهینه‌سازی فرایند، برنامه‌ریزی تولید، کنترل کیفیت و مدیریت عملیات است [۱۵]. بسیاری از زنجیره‌های تأمین که محصولات داخلی تولید می‌کنند، اکنون

جدید هوش مصنوعی مبتنی بر داده‌های کلان، یادگیری ماشین و قدرت ابررایانه سامانه فناوری با توان تغییر جهانی است که تمام جنبه‌های تولید و زندگی در جامعه انسانی را تغییر می‌دهد و به‌طور غیرقابل‌برگشتی دامنه و پارادایم مسئله تحقیق علمی را تغییر می‌دهد. به اقتضای این تغییر، نحوه پاسخگویی مهندسان طراحی فرایندهای شیمیایی نیز به نیازهای جدید دستخوش تغییراتی شده است که این تغییرات در شکل ۵ قابل‌مشاهده است.

چندین مطالعه منتشر شده‌اند که یادگیری ماشین را در زمینه انقلاب صنعتی چهارم مورد بحث قرار می‌دهند. باین‌حال، مطالعات قبلی به‌طور جامع روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی که در بخش‌های مختلف صنعتی استفاده شده‌اند را پوشش نمی‌دهند. شکاف واضحی در تحقیقات درباره چگونگی استفاده صنایع مختلف از هوش مصنوعی برای دستیابی به انقلاب صنعتی چهارم، نگرانی‌هایی که با آن‌ها مواجه شده‌اند و راه‌حل‌های احتمالی که اتخاذ کرده‌اند، وجود دارد. مقاله حاضر این شکاف را با برجسته‌کردن مسائل و نگرانی‌های مواجه‌شده در بخش‌های مختلف صنعتی پر می‌کند. به بحث درباره راه‌حل‌های احتمالی که معرفی شده‌اند می‌پردازد و فرصت‌هایی که برای پذیرش راه‌حل‌های موجود و مسیرهای تحقیقاتی آینده برای توسعه نسل بعدی راه‌حل‌ها به وجود آمده‌اند را شناسایی می‌کند. این کار با بررسی کاربردهای خاص هوش مصنوعی صنعتی (IAI) در چندین بخش صنعتی، با مرورهای گسترده‌تر انقلاب صنعتی تکمیل می‌شود. این مرور هدف دارد تا به کارشناسان صنعتی که به دنبال پذیرش انقلاب صنعتی چهارم هستند، درباره نگرانی‌های رایج و راه‌حل‌های بالقوه IAI که ممکن است برای رفع این نگرانی‌ها اتخاذ شوند، اطلاع‌رسانی کند. جنبه متمایز دیگر این مقاله این است که برای مخاطبان گسترده‌ای نوشته شده است که ممکن است دانش تخصصی در زمینه فناوری‌های IAI و کاربردهای آن‌ها نداشته باشند. بنابراین، بحث در مورد فناوری‌های IAI در چارچوب یک خط لوله IAI ارائه شده است که در آن فناوری‌های مختلف هوش مصنوعی می‌توانند برای رسیدگی به نگرانی‌های مربوط به جمع‌آوری داده‌ها، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر نتایج به کار گرفته شوند. این بحث با واژه‌نامه فنی که برخی از مفاهیم و فناوری‌های اصلی هوش مصنوعی که پایه‌گذار این خط لوله هستند را معرفی می‌کند، پشتیبانی می‌شود [۱۹].

بر اساس گزارشی از مؤسسه تحقیق و مشاوره آکومن (Acumen Research and Consulting) هند منتشر شده در نوامبر ۲۰۲۳ با عنوان (اندازه بازار هوش مصنوعی در صنایع شیمیایی - صنعت جهانی، سهم، تحلیل، روندها و پیش‌بینی ۲۰۲۳ - ۲۰۳۲) و گزارشی از شرکت مشاوره و تحقیق بازار پولاریس (Polaris Market Research & Consulting) یونان منتشر شده در اکتبر ۲۰۲۴ با عنوان (اندازه بازار هوش مصنوعی در صنایع شیمیایی، سهم، روندها، گزارش تحلیل صنعت - بر اساس مؤلفه؛ کاربرد تجاری؛ کاربر نهایی و بر اساس منطقه؛ پیش‌بینی بخش، ۲۰۲۴-۲۰۳۲)، اندازه بازار هوش مصنوعی (AI) در صنایع شیمیایی در سال ۲۰۲۲ معادل ۱/۲ میلیارد دلار بود و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۲ به اندازه بازار ۱۷/۹ میلیارد دلار دست یابد و از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۲ با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) ۳۱/۲ درصد رشد کند [۲۱و۲۰].

که به‌طور بین‌المللی برای کشورهایی که دارای صنایع تولید پیشرفته هستند، مشترک است. از این اشتراک مشخص است که در قلب چالش تولید هوشمند، PSE قرار دارد. تخصص PSE که از دهه ۱۹۶۰ نقش اساسی در تسهیل فراوری و تولید شیمیایی پیشرفته ایفا کرده است، در دستیابی به تولید هوشمند در پالایشگاه‌های نفت و کارخانه‌های پتروشیمی با دربرگیری پیشرفت‌های زیر در واحد فراوری، کارخانه، شرکت و زنجیره تأمین نقش کلیدی خواهد داشت [۱۸]:

- حسگرها و ابزارهای پیشرفته؛
- بهینه‌سازی و کنترل نمودار جریان در زمان واقعی تحت عدم قطعیت؛
- طراحی مولکولی سبز برای محصولات با ارزش افزوده بالا؛
- تحلیل‌های کلان‌داده قابل‌تنظیم برای بهینه‌سازی، نظارت و مدیریت فرایند؛
- سکوه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پیشرفته و
- فناوری‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی پیش‌بینی‌کننده.

پروژه طراحی مهندسی برای واحدی فرایندی می‌تواند به‌عنوان مجموعه‌ای از فعالیت‌های طراحی و مهندسی پیچیده، چندمرحله‌ای و میان‌رشته‌ای توصیف شود که شامل مشارکت‌های وابسته به یکدیگر از مهندسان شیمی، مکانیک و برق است. ابزارهای مختلفی برای کمک با اهداف مختلف ایجاد شده است، اما این ابزارها دارای معناشناسی و ساختارهای متفاوتی هستند که به‌دلیل تفاوت‌های خاص در نحو و معناشناسی نهفته در نمایش‌های داده‌ای اختصاصی، این وضعیت منجر به دشواری‌های همکاری بین رشته‌های مهندسی و دستیابی به اهداف مربوط می‌شود.

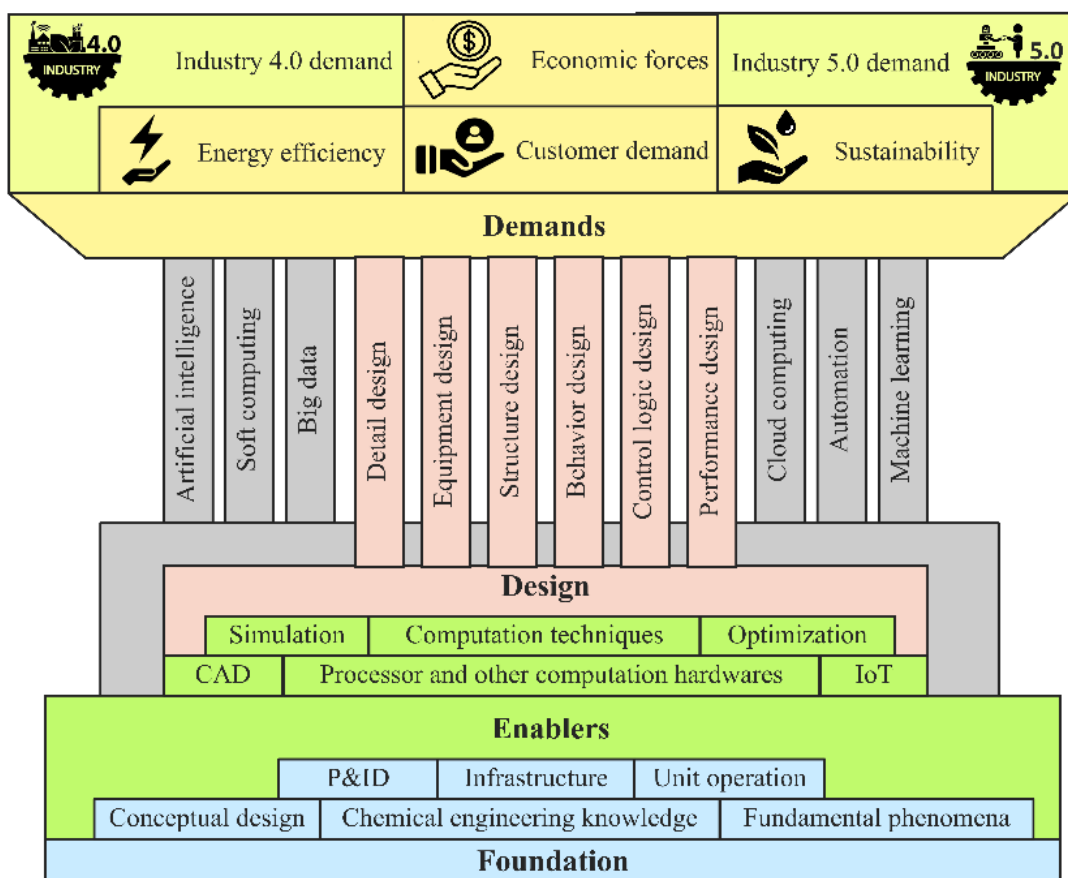
بخش نفت و گاز به‌طور قابل‌توجهی به بیش از نیمی از تأمین انرژی اولیه بشریت کمک می‌کند. باین‌حال، از مجموع ۳۶۵ پروژه کلان نفت و گاز در جهان، ۷۳٪ از پروژه‌ها تأخیر در زمان‌بندی گزارش شده و ۶۴٪ از پروژه‌ها با افزایش هزینه مواجه شدند. یکی از عوامل اصلی شکست این پروژه‌ها مدیریت، عدم یکپارچگی میان‌رشته‌ای و اختلال در تصمیم‌گیری و ردوبدل اطلاعات میان بخش‌های مختلف است. مهندسی سامانه‌های فرایندی به کمک ابزارهای مختلف با تصمیم‌گیری مؤثر، یکپارچه‌سازی و هموارسازی مسیر تبادل اطلاعات بین بخش‌های مختلف سامانه تولید، دستیابی به هماهنگی و درنهایت اهداف کلان پروژه‌های مهندسی، در طی کل طول عمر پروژه را ممکن می‌سازد [۵].

با توسعه فناوری هوش مصنوعی و شاخه آن یادگیری عمیق، مدل‌سازی کارخانه‌های شیمیایی پالایشگاه‌ها اکنون به تحول هوشمندانه‌ای وارد شده است. در حال حاضر، تصمیم‌گیری‌های تولید و کنترل متغیرها در کارخانه‌های شیمیایی و پالایشگاه‌ها هنوز به‌شدت به فرایندهای دستی وابسته هستند، که دستیابی به عملکرد بهینه را دشوار می‌سازد. باین‌حال، با توسعه اولیه حوزه پتروشیمی، مقدار زیادی داده‌های تولید جمع‌آوری شده است. هوش مصنوعی می‌تواند برای استخراج کامل داده‌های صنعتی استفاده شود و عملیات و تصمیمات بهینه‌تری را فراهم کند. برای تصفیه فرایندهای شیمیایی، یادگیری ماشین به‌دلیل دقت، سادگی و انعطاف‌پذیری، قابلیت زیادی برای کاربردها در تقریب تابع، پیش‌بینی عددی، همبستگی داده‌ها، شبیه‌سازی فرایند و بهینه‌سازی طراحی نشان می‌دهد. علاوه بر این، نسل

جدول ۲ مروری بر بخشی از مشکلات فرایند تولید هوشمند در سطح واحد عملیاتی [۱۷]

Table 2 Review of part of design problems of smart manufacturing at unit operation scale [17]

Detection	Analysis	Prediction	Decision-making
<ul style="list-style-type: none"> <li>Operation inspection</li> <li>Bottleneck detection</li> <li>Material identification</li> <li>Production monitoring</li> <li>Product defect detection</li> <li>Worker/tool/part detection</li> <li>Equipment failure detection</li> <li>Energy consumption detection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bottleneck analysis</li> <li>Equipment diagnosis</li> <li>Defect pattern extraction</li> <li>Energy consumption analysis</li> <li>Equipment performance analysis</li> <li>Rules extraction for process design</li> <li>Manufacturing failure mode analysis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tool allocation</li> <li>Tool path planning</li> <li>Equipment selection</li> <li>Shop-floor scheduling</li> <li>Assembly optimization</li> <li>Logistics optimization</li> <li>Production line balancing</li> <li>Production process control</li> <li>Production process planning</li> <li>Sensor network optimization</li> <li>Human-machine collaboration</li> <li>Energy consumption optimization</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tool allocation</li> <li>Tool path planning</li> <li>Equipment selection</li> <li>Shop-floor scheduling</li> <li>Assembly optimization</li> <li>Logistics optimization</li> <li>Production line balancing</li> <li>Production process control</li> <li>Production process planning</li> <li>Sensor network optimization</li> <li>Human-machine collaboration</li> <li>Energy consumption optimization</li> </ul>



شکل ۵ چارچوب طراحی فرایندهای شیمیایی باتوجه به نیازهای جدید زنجیره تأمین  
Figure 5 Chemical processes design framework according to new supply chain needs

### ۳ روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱ شرح و تحلیل ساختار پروژه‌های طراحی مهندسی شیمی

هر پروژه اساساً مجموعه‌ای از فعالیت‌های مرتبط، افراد، فناوری، منابع، فرایندهای کاری و سایر دارایی‌ها است که در پی هدف مشترکی گرد هم آمده‌اند. هدف ممکن است شامل یکی از موارد زیر باشد:

- ✓ محصول فیزیکی (فرایند یا محصول شیمیایی)
- ✓ خدمات (ارائه راه‌حل برای یک چالش عملیاتی)
- ✓ ارزش (مثلاً دستیابی به حاشیه سود موردنظر یا برآورده کردن برنامه تولید نفت و گاز)

و ارزش تابعی از چهار عامل اصلی هر پروژه است:

- ✓ ظرفیت (Capability)
- ✓ پایداری (Suitability)
- ✓ عملکرد (Performance)
- ✓ بهره‌وری (Productivity)

بر اساس تعریف <sup>®</sup>PMBOK، پروژه همکاری موقت برای تولید محصول، ارائه خدمت یا خلق ارزش منحصربه‌فرد تعریف می‌شود. موقت بودن به معنای داشتن شروع مشخص و پایان قطعی است. منحصربه‌فرد، به این معنی است که پروژه از نظر ویژگی‌ها با سایر پروژه‌ها متفاوت است [۲۲]. طبق این تعریف، پروژه طراحی مهندسی شیمی به‌عنوان مجموعه‌ای از فعالیت‌های طراحی و مهندسی پیچیده، چندمرحله‌ای و بین‌رشته‌ای توصیف می‌شود که شامل مشارکت‌های وابسته به یکدیگر از مهندسان شیمی، مکانیک، عمران و برق است. رقابت شدید بازار، نیاز به زمان کوتاهی برای هر پروژه فرایند شیمیایی دارد و فضای خیلی زیادی برای اشتباه یا طراحی معیوب باقی نمی‌گذارد. مراحل پیش رو در پروژه مهندسی از ایده تا انتهای چرخه عمر فرایند در شکل ۶ نشان داده شده است.

#### ۳-۲ چالش‌های پروژه‌های طراحی، نقش‌ها و سطوح تصمیم‌گیری

مقیاس هر پروژه و ارتباطات نزدیک متعدد بین نهادها و فرایندهای درون و بین رشته‌ها، نیاز به سامانه مهندسی یکپارچه را به چالشی بزرگ تبدیل کرده است و از این‌رو، مهندسان از رشته‌های مختلف در محیط طراحی و مهندسی، به همکاری با یکدیگر نیاز دارند تا به‌طور مؤثر و کارآمد کار کنند. به‌دلیل عدم وجود زیرساخت مشترک برای همکاری، دو مشکل فوری برای پژوهشگران مهندسی اطلاعات وجود دارد. اولاً، سازوکارهای مشخصی برای انتقال اطلاعات از حوزه‌ای به حوزه دیگر وجود ندارد؛ به‌عنوان مثال، از حوزه طراحی فرایند شیمیایی به طراحی مکانیکی. به همین دلیل، انتقال اطلاعات خسته‌کننده و مستعد خطا است. مشکل مشابهی وجود دارد زمانی که اطلاعات بازخورد از حوزه مهندسی پایین‌دست به حوزه بالادست منتقل می‌شود. دوم، مشکلات پرهزینه معمولاً به‌دلیل عدم پیش‌بینی ملاحظات مهندسی پایین‌دستی در مراحل اولیه طراحی مفهومی رخ می‌دهند [۵].

به‌عنوان مثال، بدون پشتیبانی اطلاعات همکاری یکپارچه، طراحی فرایند مفهومی به‌دلیل محدودیت‌های تجهیزات در مرحله طراحی اولیه قابل اجرا نخواهد بود و بدون دوره‌های بازنگری که به‌دلیل روش فعلی تغذیه اطلاعات منفصل ضروری هستند، دقیق نخواهد بود. همچنین تأیید و تغییر مدل‌های طراحی بین‌رشته‌ای طبق روش‌های فعلی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است.

به‌عنوان مثال، عوامل عملیاتی فرایند طراحی، دماها و فشارها، محرک‌های اصلی برای مرحله طراحی و مهندسی مکانیکی پایین‌دست هستند. با این حال، این عوامل عملیاتی به طراحی مکانیکی و انتخاب تجهیزات یا اجزای مناسب با ملاحظات اقتصادی و ایمنی وابسته یا به‌شدت مرتبط هستند. در حال حاضر، تغییرات این عوامل محرک منجر به تلاش‌های قابل توجهی در بازطراحی پروژه می‌شود. در طول فرایند طراحی مکانیکی، اقلام تجهیزات معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شوند: اقلام تجهیزات اختصاصی (PE) و اقلام تجهیزات غیراختصاصی (NPE). برای آن اقلام NPE، مانند پمپ‌ها و کمپرسورها، برای مالکان یا شرکت‌های تأمین مهندسی و ساخت (EPC) به‌صرفه‌تر است که آن‌ها را از محصولات آماده خریداری کنند به‌جای اینکه آن‌ها را به‌صورت سفارشی طراحی کنند. اقلام تجهیزات آماده را می‌توان به‌صورت دسته‌ای تأمین و تولید کرد. به‌عنوان مثال، مخزنی آماده که بزرگ‌تر از نیاز، حجم داشته باشد معمولاً کمتر از مخزن سفارشی با اندازه دقیق نیاز حجم، هزینه دارد. در مقایسه با اقلام NPE، اقلام PE نیاز به همکاری بیشتری بین مهندسان فرایند شیمیایی و مکانیکی دارند. برای حفظ یکپارچگی داده‌ها، بر اساس ورودی مهندسی فرایند شیمیایی، مهندسان مکانیک اقلام PE را به‌صورت چرخه‌ای طراحی می‌کنند. پس از تعیین طراحی بخش PE، خواص مکانیکی یا مشخصات جدید بخش PE باید برای به‌روزرسانی عوامل در مدل فرایند شیمیایی استفاده شوند. مدل فرایند جدید باید توسط مهندسان مکانیک بیشتر تأیید شود. در رویه فعلی صنعت، چنین کارهای دوره‌ای به‌صورت دستی توسط مهندسان در شرکت‌های EPC انجام می‌شود. این کار دشوار، زمان‌بر و مستعد خطا است. بسیاری از خطاها سخت قابل تشخیص هستند که اغلب منجر به مشکلات در مراحل آزمایش و حتی بهره‌برداری می‌شوند. برای طراحی محیط همکاری مهندسی چندرشته‌ای، نیاز است که ارتباطات بین نهادهای مهندسی مختلف از حوزه‌های مختلف به‌طور صریح و یکنواخت نمایان شوند و همچنین روش انتشار منظم سامانه‌ای برای تغییرات طراحی پیش‌بینی شده متعدد وجود داشته باشد [۵].

#### ۳-۳ جایگاه، ضرورت و اهمیت مهندسان طراحی فرایند در پروژه

##### طراحی مهندسی

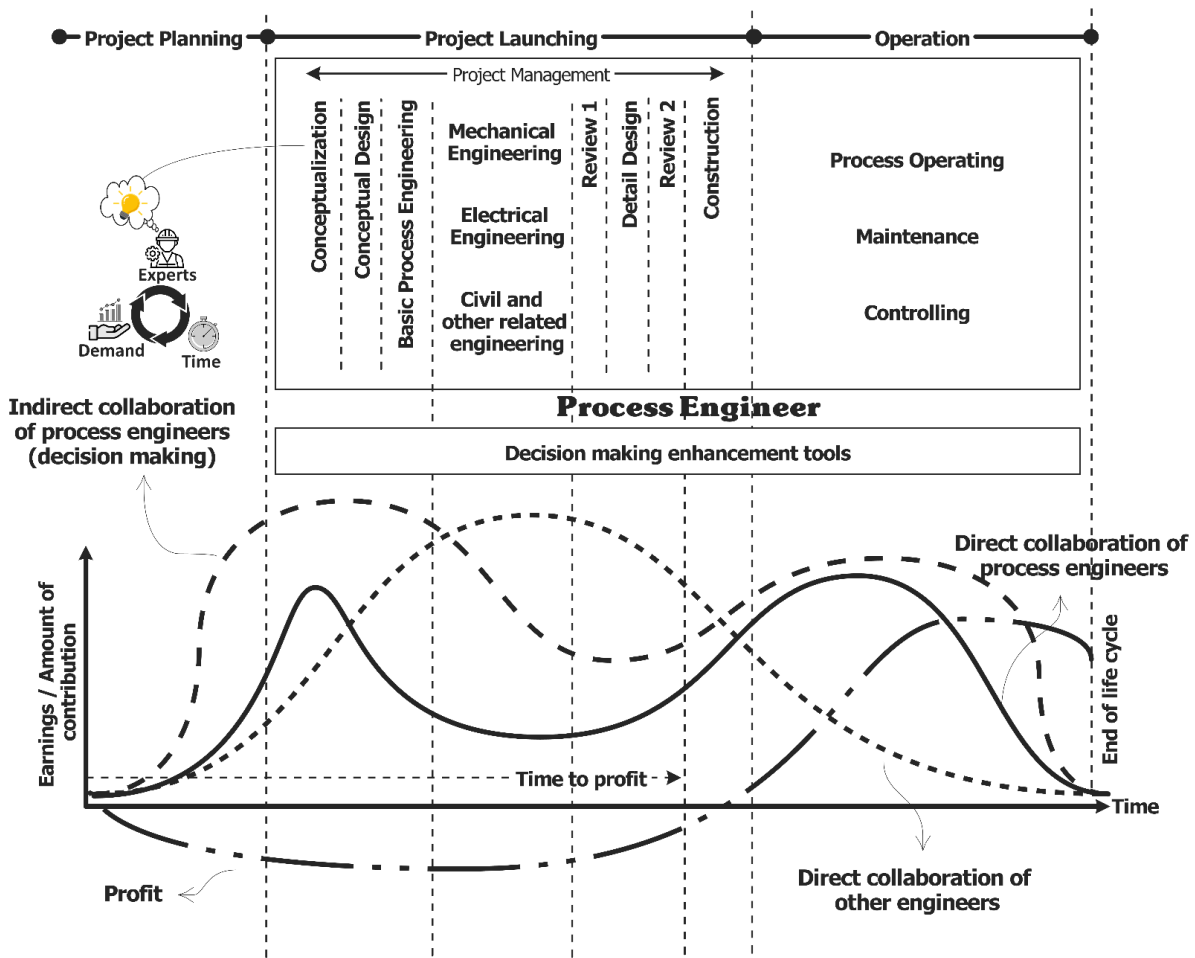
تاکنون تلاش‌های تحقیقاتی کمی برای توسعه محیط مهندسی طراحی چندرشته‌ای به‌منظور ارتباط بین حوزه‌های مختلف مهندسی گزارش شده است، با وجود قابلیت عظیم برای بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌ها. بیشتر پژوهشگران هنوز عمدتاً به مشکلات خاص حوزه توجه دارند؛ آن‌ها بر طراحی فرایند شیمیایی یا طراحی مکانیکی اقلام تجهیزات فرایند تمرکز کرده‌اند. مسئله تعامل‌پذیری سامانه بدون چارچوب یکپارچه و نمایش صریح ارتباطات پیچیده باقی‌مانده است. در واقع هر فرایند مهندسی و تولید (E&C)، مجموعه‌ای پیچیده از فعالیت در زمینه‌های مختلف است که ذات این پیچیدگی باعث دشواری تعامل‌پذیری در هر پروژه می‌شود. یکی از مهم‌ترین اقدامات در جهت مرتفع کردن این دشواری، یکپارچه‌سازی اطلاعات ردوبدل شده بین رشته‌های مهندسی مختلف است. این اقدام باعث افزایش درک و دقت تمام گروه‌های همکار در پروژه و صرفه‌جویی در هزینه و وقت می‌شود.

بر کل سامانه ارزیابی می‌شود. این امر نه تنها از بروز خطاهای طراحی جلوگیری می‌کند، بلکه زمان بازنگری‌های مکرر را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، این رویکرد با استفاده از ابزارهای پیشرفته شبیه‌سازی و مدیریت داده‌ها، امکان تحلیل‌های مختلف را فراهم می‌سازد. برای مثال، در طراحی واکنشگاه‌های شیمیایی، مهندسی سامانه‌های فرایندی می‌تواند تأثیر تغییرات دما، فشار یا کاتالیزور را بر عملکرد کلی واحد بررسی کند و بهترین گزینه را از نظر فنی و اقتصادی انتخاب کند. این قابلیت، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس که تصمیم‌گیری‌های مهندسی تأثیر مستقیمی بر ایمنی، بهره‌وری و سودآوری دارند، حیاتی است.

در نهایت، مهندسی سامانه‌های فرایندی با تسهیل ارتباط بین ذی‌نفعان پروژه، از جمله مهندسان، مدیران و سرمایه‌گذاران، به بهبود تصمیم‌گیری‌های کلان کمک می‌کند. این رویکرد با ارائه گزارش‌های فنی شفاف و مبتنی بر داده‌های یکپارچه، امکان ارزیابی ریسک‌ها و مزایای گزینه‌های مختلف طراحی را فراهم می‌آورد. بنابراین، می‌توان گفت که مهندسی سامانه‌های فرایندی نه تنها به حل چالش‌های فنی می‌پردازد، بلکه به‌عنوان پلی بین جنبه‌های مهندسی، اقتصادی و مدیریتی پروژه‌های طراحی مهندسی عمل می‌کند.

مهندسی سامانه‌های فرایندی به‌عنوان رویکردی (Approach) چندرشته‌ای، نقش محوری در حل چالش‌های پیچیده پروژه‌های طراحی مهندسی شیمی ایفا می‌کند. این حوزه با ارائه چارچوبی ساختاریافته، امکان یکپارچه‌سازی اطلاعات و تسهیل تعامل بین رشته‌های مختلف مهندسی، از جمله طراحی فرایند، مکانیک، کنترل و ایمنی را فراهم می‌سازد. در پروژه‌های طراحی مهندسی و راهبری کارخانه، به‌ویژه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، پیچیدگی ذاتی فرایندها و تنوع تجهیزات موردنیاز، لزوم رویکرد منظم سامانه‌ای را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. مهندسی سامانه‌های فرایندی با مدل‌سازی جامع و نمایش صریح ارتباطات بین اجزای مختلف، به کاهش ناسازگاری‌های طراحی، بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌های پروژه کمک شایانی می‌کند.

یکی از مهم‌ترین کاربردهای مهندسی سامانه‌های فرایندی، ایجاد زبان مشترک بین نظام‌های مهندسی مختلف است. به‌عنوان مثال، در طراحی واحد تقطیر، مهندس شیمی بر محاسبات تعادل فازی و انرژی تمرکز دارد، در حالی که مهندس مکانیک به تحلیل تنش‌های وارده بر تجهیزات می‌پردازد. مهندسی سامانه‌های فرایندی با ارائه مدل‌های یکپارچه، تضمین می‌کند که تغییرات در بخشی به‌صورت خودکار به سایر بخش‌ها منتقل شده، اثرات آن



شکل ۶ میزان مشارکت رشته‌های مختلف در پروژه مهندسی از ایده تا انتهای چرخه عمر  
**Figure 6** Contribution of different disciplines in an engineering project from idea to end of life-cycle

#### ۴ تحلیل نقش مهندسان طراحی فرایند و سازوکار پاسخگویی

##### به چالش‌ها در مراحل مختلف پروژه

موفقیت پروژه زمانی تضمین می‌شود که گستره (Scope) آن کاملاً واضح شده باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته نمونه گستره پروژه موفق شامل موارد زیر خلاصه می‌شود:

- ۱- جزئیات در مورد معلومات و اصول فناوری‌های استفاده شده
- ۲- نمودارهای PFD و P&ID دقیق
- ۳- ریز جزئیات قابل فهم نمودارها (شامل انتقال، اتصال، تغییرات، هشدارها و ...) برای تمام گروه‌های مشغول در پروژه
- ۴- فهرست دستگاه‌های موردنیاز و اطلاعات مربوط به آن‌ها
- ۵- فهرست اطلاعات ایزاردقیق
- ۶- فهرست پیوست (Tie-in)
- ۷- ریز جزئیات لوله‌کشی
- ۸- تشریح و توصیف نقش هر گروه و توجیه مسئولیت‌ها
- ۹- اطلاعات موقعیتی از محل پروژه و الزامات مربوط
- ۱۰- اهداف مرحله‌ای (Milestones) مهمی که باید به آن‌ها رسید و برنامه‌ای برای رسیدن به آن‌ها
- ۱۱- خلاصه‌ای از استانداردها و ابزارهای مهندسی
- ۱۲- توصیف تمام مطلوبات و فعالیت‌های هر بخش تا جای امکان
- ۱۳- تعیین مطالعاتی که باید صورت بگیرد
- ۱۴- تخمین و برنامه‌ریزی مالی و حقوقی
- ۱۵- برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه

به‌طور کلی نقش مهندسان طراحی فرایندهای شیمیایی در موارد فوق به سه سطح دخالت مستقیم، دخالت غیرمستقیم و نظارت بالاسری تقسیم می‌شود. قبل از پرداختن به هر یک از این نقش‌ها، ابتدا برای یکپارچه‌سازی ادبیات مورداستفاده بین گروه‌های مختلف دخیل در پروژه، ضروری است برخی از مفاهیم پرکاربرد در مهندسی طراحی فرایندهای شیمیایی تعریف شوند [۵]:

**تابع (Function):** تبدیلی در جریان‌های مواد از حالت‌های ورودی به حالت‌های خروجی که فرایند شیمیایی موردانتظار قادر به دستیابی به آن است.

**فرایند ابتدایی (Elementary Process):** واکنش شیمیایی پایه برای تبدیل مجموعه‌ای از ترکیبات ورودی به مجموعه خروجی موردانتظار.

**فرایند واحد (Unit Process):** مرحله فرایندی که شامل «فرایند ابتدایی» جریان‌ها از مجموعه‌ای از ترکیب‌های خوراک به مجموعه‌ای از جریان‌های خروجی با واحد پایه‌ای ظرف واکنش دهنده است.

**فرایند مدولار (Modular Process):** مجموعه‌ای از «فرایندهای واحد» که به‌طور مستقیم با انجام عملکرد تبدیل شیمیایی از مجموعه‌ای مشخص از جریان‌های ورودی به مجموعه دیگری از جریان‌های خروجی با ترکیب‌های موردانتظار و با مازول عملیاتی خودپشتیبانی شده با استقلال شناخته شده به طور عمومی مرتبط هستند. به دلیل ماهیت عمومی این مفهوم، «فرایند مدولار» می‌تواند شامل «فرایند مدولار» دیگری هم باشد. بنابراین، سازوکاری تودرتو برای «فرایند مدولار» وجود دارد تا سامانه پردازش

سلسله‌مراتبی برای کارخانه یا پروژه مقیاس پذیر تشکیل دهد. فرایند عملیاتی (Operational Process): فرایندی در مقیاس صنعتی که محصولات و فرآورده‌های شیمیایی موردانتظار را از طریق «تبدیل شیمیایی منظم سامانه‌ای و جداسازی فیزیکی مواد» تولید می‌کند.

**عملیات ابتدایی (Elementary Operation):** بنیادی‌ترین فرایند فیزیکی (غیرشیمیایی) در زمینه‌ای که به‌طور عملی قابل مقیاس‌پذیری است و برای تغییر حالت فیزیکی مواد اولیه به کار می‌رود.

**عملیات واحد (Unit Operation):** یک یا چند «عملیات ابتدایی» مرتبط، که مجموعه‌ای از عملکردهای نسبتاً خوشه‌ای را ارائه می‌دهند که فرایندهای درمان فیزیکی جریان‌ات خوراک با واحد تجهیزات مکانیکی هستند، مانند: آماده‌سازی واکنش‌دهنده‌ها، جداسازی و تصفیه محصولات، بازیافت واکنش‌دهنده‌های تبدیل نشده و کنترل انتقال انرژی به داخل یا خارج از واکنشگاه شیمیایی.

**عملیات مدولار (Modular Operation):** مجموعه‌ای از عملیات واحد برای تحقق تغییرات حالت‌های فیزیکی از جریان ورودی مشخص به مجموعه خروجی با حالت‌های موردانتظار با استقلال معقول در عملکردهای عملیاتی و تکمیل تجهیزات خودپشتیبانی شده.

**عملیات کمکی (Auxiliary Operation):** سامانه‌ای متشکل از گروهی از عملیات فیزیکی سازمان‌یافته که فرایندهای عملیاتی را تسهیل و پشتیبانی می‌کند.

**عملیات کارخانه (Plant Operation):** مجموعه‌ای از «فرایندهای عملیاتی» متصل که توسط «عملیات کمکی» در محیطی کارخانه‌ای پشتیبانی می‌شوند.

#### ۴-۱ حوزه ایفای نقش با اثر مستقیم مهندسان طراحی فرایند

برخی از بخش‌های پروژه تحت مسئولیت و نظارت مستقیم مهندسان طراحی فرایند قرار می‌گیرند که شامل ایده‌پردازی، طراحی محصول و فرایند، تشریح و توصیف گستره فرایند، برنامه‌ریزی پروژه، تخمین هزینه‌ها، میزان توان و انرژی موردنیاز و ایجاد نقشه‌های فرایندی است. در این نوع فعالیت‌های مهندسان طراحی فرایند، خروجی هر مرحله باید به‌صورت یکپارچه برای سایر گروه‌های مهندسی توصیف شوند تا با افزایش شفافیت، بدون نیاز به انجام فعالیت‌های تکراری در کمترین زمان ممکن و با کمترین هزینه اهداف پروژه دنبال شوند. پس از تعریف پروژه، مهندسان طراحی فرایند می‌بایست به کمک دانش فرایندی خود داده‌های موجود را تبدیل به اطلاعات سودمند کنند و در هر بخش به ارزش این اطلاعات اضافه کنند. ضمن انجام هر فعالیت تحت دخالت مستقیم مهندسان طراحی فرایند، در هر مرحله باید بازخوردی واضح دریافت شود تا از روند و مسیر پیشرفت پروژه آگاهی و قدم‌های بعدی نیز پیش‌بینی شوند. این مراحل در شکل ۷ نمایش داده شده است.

#### ۴-۲ حوزه ایفای نقش با اثر غیرمستقیم مهندسان طراحی فرایند

علاوه بر گروه فعالیت‌هایی که نیازمند دخالت مستقیم مهندسان طراحی فرایند هست، گروه دیگری از فعالیت‌ها مستلزم استفاده از دانش دیگر بخش‌های مهندسی است. در این مسیر به‌علت گستردگی ابزار، اطلاعات و

گروه‌های دخیل در پروژه، نیاز به اقداماتی در جهت هموارسازی ارتباط بین بخش‌های مختلف است که این وظیفه را مهندسان طراحی فرایند برعهده دارند. در واقع آن‌ها به کمک ابزارها و دانش فرایندی و اطلاعات کامل از گستره پروژه، سرعت بالایی در تشخیص مسیر صحیح پیشرفت اهداف و نیازمندی‌ها دارند که با استفاده از دانش و تجربه سایر گروه‌ها رسیدن به اهداف پروژه را تسهیل می‌کنند. همانند نوع فعالیت‌های مستقیم، این نوع فعالیت‌ها نیز نیازمند بازخورد مداوم از تمام گروه‌ها است. مهندسان طراحی فرایند ضمن بررسی کامل و دقیق این بازخوردها تغییرات موردنیاز را در نیازمندی‌ها و گام‌های پروژه ایجاد می‌کنند و راهنمایی‌های ضروری را به این گروه‌ها باز می‌گردانند.

#### ۳-۴ حوزه ایفای نقش با نظارت بالاسری مهندسان طراحی فرایند

به‌غیر از دو گروه فعالیت‌هایی که نیازمند دخالت مستقیم و غیرمستقیم مهندسان طراحی فرایند دارند، برخی از اقدامات می‌بایست تحت نظارت این گروه مهندسی صورت بگیرد و در دو مرحله بازبینی کلی در طی مسیر پروژه از تکمیل خواسته‌های پروژه اطمینان حاصل کنند. همچنین در همگام‌سازی و یکپارچه‌سازی تمام دستاوردهای پروژه، مهندسان طراحی فرایند گزارشی کاملی از تمام اطلاعات و ملزومات و هشدارها برای ساخت و مراحل بعدی عملیات تهیه و ارائه می‌دهند.

پرداختن به تمام جزئیات مورد بحث در پروژه مهندسی هدف این مطالعه نیست و این دسته‌بندی صرفاً برای ایجاد دیدی کلی نسبت به نقش مهندسان طراحی فرایند در پروژه مهندسی و ساخت (E&C) است، اما نکته‌ای که اشاره به آن ضروری است این است که پیشرفت صنایع هوشمند و پیچیدگی زیاد برای دستیابی به اهداف چندگانه در محیطی بسیار رقابتی صنایع شیمیایی، زمان را تبدیل به یکی از ارزشمندترین منابع، بیش‌ازپیش کرده است و امروزه از ایده‌هایی استقبال گسترده می‌شود که علاوه بر کاهش هزینه‌ها تا سرحد امکان، پردازش، ایجاد و دستیابی به هدف نهایی این ایده‌ها به‌سرعت اتفاق بیفتد. بدیهی است که رسیدن به این اهداف چه توسط گروه مهندسان طراحی فرایند و چه سایر گروه‌های مهندسی بدون ابزارها عملاً غیرممکن خواهد بود.

#### ۴-۴ سازوکار پاسخگویی مهندسان طراحی فرایند به چالش‌های طراحی سامانه‌های مهندسی

در حوزه‌های سه‌گانه ایفای نقش در پروژه طراحی مهندسی، مهندسانی طراح فرایند سازوکار منحصر به فردی به‌منظور پاسخگویی مستقیم یا غیرمستقیم به تمام چالش‌ها دارند. همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، پروژه طراحی متشکل از مراحل کوچک بسیاری است که می‌بایست در مسیر دستیابی به هدفی مشخص با موفقیت گذرانده شوند و هر مرحله اثرگذار بر مراحل بعدی و اثرپذیر از مراحل قبلی است. بنابراین طی کردن اصولی و درست هر مرحله از اهمیت خاصی برخوردار است. از منظرهای مختلف، وظایف مهندسان طراحی فرایند دارای دسته‌بندی‌های مختلفی است، اما به‌طور کلی اگر پروژه را مجموعه‌ای از مراحل تعیین شده با بی‌شمار گزینه محتمل عبور از یک مرحله به مرحله بعد در نظر بگیریم، مهم‌ترین وظایف مهندسان طراحی فرایند تعریف مسئله (Problem Definition)،

طراحی راه‌حل (Solution Design)، تصمیم‌گیری (Decision Making) و به‌کارگیری راه‌حل (Solution Implementation) است. فرایند تصمیم‌گیری به‌طور کلی فرایندی چندبعدی است که مهندسان طراحی فرایند با اتکا بر دانش مهندسی شیمی خود، به کمک فنون، روش‌ها و اصول مهندسی سامانه‌های فرایندی و با استفاده از ابزارها در بخش‌های مختلف پروژه طراحی مهندسی آن را به کار می‌گیرد. ابزارها نقش بسیار پررنگی در کمک به ایفای هرچه کامل‌تر نقش‌های مهندسان طراحی فرایند داشته‌اند که کمک به شناخت بیشتر سامانه‌های صنایع PGC، پیش‌بینی بهتر رفتارهای توأم با عدم قطعیت این سامانه‌ها و کمک در امر مهم تصمیم‌گیری بخشی از نقش آن‌ها است. درباره این ابزارها در بخش بعدی بحث شده است.

باتوجه به یگانگی اصول اولیه تصمیم‌گیری در بخش‌های مختلف، این وظیفه در برخی از جزئیات ممکن است صورت‌های مختلفی داشته باشد. در فرضیه بالا که پروژه را به‌صورت مجموعه‌ای از مراحل و گزینه‌های محتمل در نظر گرفته شد، تصمیم‌گیری در ایجاد این مراحل یا گزینه‌ها و تصمیم‌گیری به جهت انتخاب بین گزینه‌های محتمل برای ایجاد مراحل و یا انتخاب مسیر عبور بین مراحل انجام می‌شود. در حوزه ایفای نقش با اثر مستقیم، مهندسان طراحی فرایند باید باتوجه به اطلاعات در دسترس، هدف مطلوب و قید و شرط‌های حاکم، گام‌های پیشبرد پروژه را با دقت و صحت کافی تعریف و پیاده‌سازی کند. بدین منظور، برای هر گام ممکن است گزینه‌های زیادی وجود داشته باشد، که مهندسان طراحی فرایند از بین این گزینه‌ها باید گزینه بهینه را انتخاب، به‌طور دقیق تعریف و به‌درستی به گروه‌های مختلف ابلاغ کند. همچنین در هر گام، مسیرهای مختلفی برای رسیدن به گام بعدی وجود دارد که مهندس طراح می‌بایست مسیر بهینه را از بین راه‌حل‌های محتمل انتخاب کند.

گزینه فوق برای سایر حوزه‌های مهندسی نیز ممکن است رخ دهد، بنابراین در حوزه ایفای نقش با اثر غیرمستقیم، مهندسان طراحی فرایند انتخاب‌های سایر حوزه‌های مهندسی را روی تطابق با اهداف پروژه مورد بررسی و در صورت نیاز معیارهای مشخصی با هدف سهولت در تصمیم‌گیری ایجاد می‌کند.

در حوزه ایفای نقش با نظارت بالاسری، مهندسان طراحی فرایند کل این تصمیم‌گیری در ایجاد و انتخاب‌ها را از تمام حوزه‌های مهندسی جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و با اهداف پروژه تطبیق می‌دهد تا در صورت نیاز، پیش از گام بعدی، اصلاحات انجام و از صحت و دقت مسیر پیشرفت پروژه اطمینان حاصل کند. این سازوکار برای هر سه حوزه در شکل ۸ نمایش داده شده است.

#### ۵ استفاده از ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی در توسعه

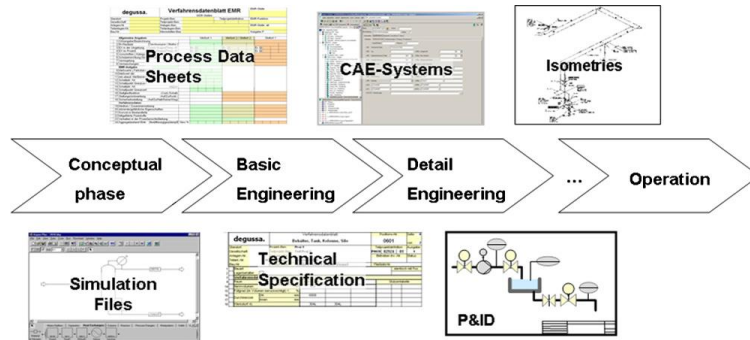
##### هوشمند صنایع PGC

##### ۵-۱ نقش ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی در توسعه هوشمند

همواره مدل‌سازی ریاضی برای مهندسان در درک و طراحی فرایندها بسیار ارزشمند و کاربردی بوده است. اوکتاو لونسپیل حتی معتقد بود که مدل‌سازی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین توسعه‌های مهندسی شیمی به شمار می‌رود. در دنیای پرشتاب امروزی، با وجود چالش‌های پیچیده در دنیای مهندسی، توانایی پیش‌بینی نتایج برخی از پدیده‌ها و فرایندها ضروری است،

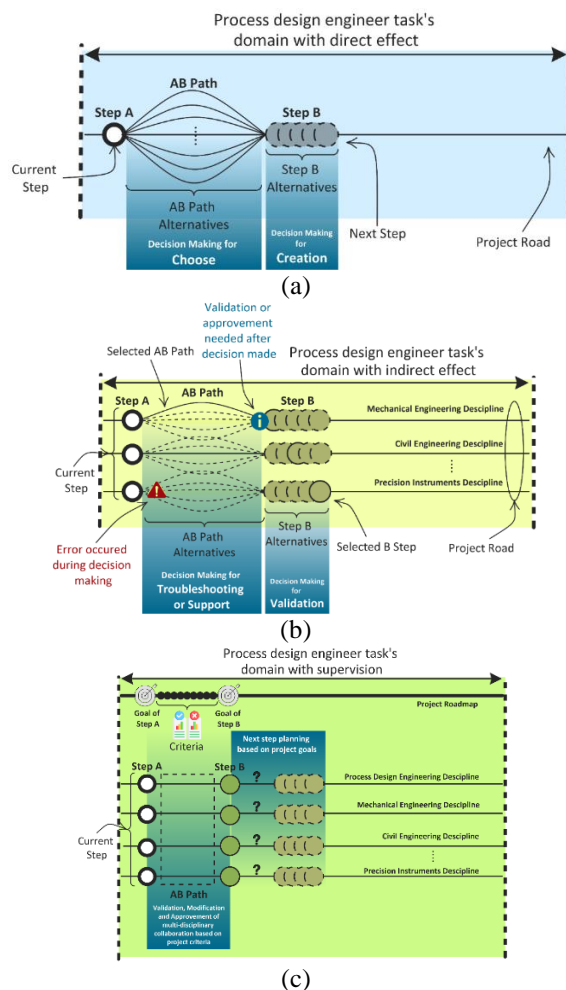
این‌حال، بسیاری از این مدل‌ها را نمی‌توان به‌صورت تحلیلی برای سامانه‌های واقعی حل کرد و برای حل عددی به مقدار قابل‌توجهی قدرت محاسباتی نیاز دارند. این نقص باعث شده است که بیشتر مهندسان ابتدا از مدل‌های ساده برای توصیف واقعیت استفاده کنند. مثالی مهم در این زمینه مدل لایه‌مرزی پراندتل است. در شیمی محاسباتی، دانشمندان و مهندسان حاضرند برای صرفه‌جویی در زمان، تا حدودی از دقت چشم‌پوشی کنند [۲۴].

صرف‌نظر از اینکه این رویدادها به کشف و ایجاد مواد مؤثر دارویی برای بیماری‌های جدید یا به بهبود کارایی فرایندها برای رعایت قوانین سخت‌گیرانه محیط زیستی مربوط باشند یا نه. این رویدادها از نرخ واکنش سطحی یا انتخاب‌پذیری در واکنشگاه، تا کنترل تأمین گرما به آن واکنشگاه متغیر هستند. پیش‌بینی‌ها می‌توانند با استفاده از مدل‌های نظری انجام شوند که قرن‌هاست ساخته شده‌اند. معادلات ناویر-استوکس، که رفتار سیال گرانو را توصیف می‌کنند، یکی از نمونه‌های چنین مدل نظری هستند. با



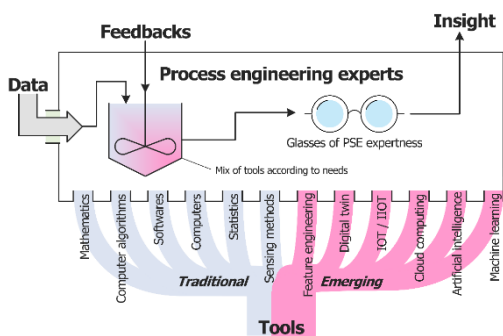
شکل ۷ مجموعه فعالیت‌های با اثر مستقیم مهندسان طراحی فرایند در طی پیشبرد اهداف هر پروژه مهندسی [۲۳]

Figure 7 The set of activities of process design engineers that have a direct impact on advancing the goals of an engineering project [23]



شکل ۸ سازوکار پاسخگویی مهندسان طراحی فرایند به چالش‌های طراحی سامانه‌های مهندسی در سه حوزه ایفای نقش الف) با اثر مستقیم، ب) با اثر غیرمستقیم و ج) با نظارت بالاسری

Figure 8 The process design engineer's accountability mechanism for addressing engineering system design challenges in three areas: a) direct impact, b) indirect impact, and c) supervision



شکل ۹ نحوه به کارگیری ابزار مختلف برای تبدیل معلومات به دانش کاربردی و بهبود تصمیم‌گیری

Figure 9 How to use various tools to convert information into practical knowledge and improve decision-making

با وجود اینکه ابزارهای سنتی برای سالیان متمادی بسیار مفید واقع شدند؛ اما با پیشرفت ابزارها و به تبع آن تغییر مداوم نیازمندی‌های صنایع و فشارهای مختلف محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی نیاز به بهبود ابزارها به‌منظور افزایش سرعت و دقت توأمان باهم غیرقابل اجتناب است. ضمن اینکه دهه‌ها شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایندهای شیمیایی، صنایع شیمیایی را از بابت داده غنی کرده است.

### ۵-۳ توسعه هوشمند و دستیابی به آن

هوش مصنوعی با افزایش کارایی، تسریع در تحقیق و توسعه و بهینه‌سازی فرایندهای تولید، صنعت شیمیایی را متحول کرده است. در حوزه صنایع شیمیایی، هوش مصنوعی برای کاربردهای مختلفی مانند بهینه‌سازی فرایند، نگهداری پیش‌بینانه و مدیریت زنجیره تأمین استفاده می‌شود. با تحلیل داده‌های وسیع و انجام محاسبات پیچیده، الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند الگوها و همبستگی‌هایی را شناسایی کنند که ممکن است انسان‌ها از دست بدهند، که منجر به کشف مواد، فرمول‌بندی‌ها و فرایندهای جدید می‌شود. به‌عنوان مثال، سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند خواص ترکیبات جدید را پیش‌بینی کنند که به محققان این امکان را می‌دهد تا تلاش‌های خود را بر روی امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها متمرکز کنند و بدین ترتیب زمان و منابع موردنیاز برای آزمایش را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند [۲۶].

بازار هوش مصنوعی در صنعت شیمی در حال تجربه رشد قابل توجهی است. با ادامه بلوغ فناوری، شرکت‌های شیمیایی بیشتری به راه‌حل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی روی می‌آورند تا از مزیت رقابتی برخوردار شوند. هوش مصنوعی نه تنها تحقیقات را تسریع می‌کند، بلکه در ایجاد محصولات و فرایندهای پایدارتر و دوستدار محیط‌زیست نیز کمک می‌کند، که با تأکید فرایندهای جهانی بر مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، ابزارهای نگهداری پیش‌بینی‌شده، بهینه‌سازی فرایند مبتنی بر هوش مصنوعی، کارایی کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی را افزایش می‌دهند و زمان توقف و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهند. ادغام هوش مصنوعی در تولید شیمیایی نه تنها کیفیت و ثبات محصول را بهبود می‌بخشد؛ بلکه اطمینان حاصل می‌کند که با مقررات سخت‌گیرانه مطابقت دارد و رشد بیشتر بازار را تسهیل می‌کند [۲۷].

### ۵-۲ به کارگیری ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی توسط مهندسان طراحی فرایند

به‌واسطه‌ی مدل‌سازی فرایندها، دستگاه‌ها و پدیده‌های مختلف و حل آن‌ها به کمک روش‌های عددی پیشرفته، بسته‌های نرم‌افزاری مبتنی بر رایانه برای گروه‌های مختلف مهندسی ایجاد شدند. این ابزارهای مبتنی بر رایانه توابع و قابلیت‌های قدرتمند و هوشمند را برای مهندسان در زمینه‌های مهندسی مختلف، مانند تحلیل شیمیایی، طراحی فرایند شیمیایی و طراحی مکانیکی فراهم می‌کنند.

شبیه‌سازی و مدل‌سازی به کمک این ابزارها یکی از متداول‌ترین فعالیت‌ها در زمینه مهندسی شیمی بوده، همچنان ادامه دارد. یکی از مهم‌ترین ویژگی این ابزارها وابستگی آن‌ها به پیشرفت‌های رایانه و امکانات سخت‌افزاری و قدرت پردازش است. این خصوصیت باعث می‌شود سرعت پیشرفت و توسعه این ابزارها بسیار بیشتر از سرعت پیشرفت دانش فرایندی باشد. همگام‌سازی پیشرفت دانش فرایندی با پیشرفت این ابزارها باعث ایجاد جهش‌های مختلفی در طی زمان در قالب انقلاب‌های صنعتی شده‌اند. ادغام این ابزارها با دانش مهندسی، ریاضیات، آمار و الگوریتم‌های رایانه‌ای باعث تبدیل دارایی‌های اطلاعاتی به دانش می‌شود که می‌توان این دانش را در راستای دستیابی به اهداف بزرگ‌تر مورد استفاده قرار داد [۲۵].

در به کارگیری ابزارها توجه به دو نکته ضروری است: اول، نحوه و شرایط به کارگیری و دوم، تفسیر و تشریح خروجی آن‌ها. نیروهای متخصص آموزش‌دیده می‌توانند با تشخیص درست ابزار مناسب، نحوه به کارگیری مناسب و تفسیر و تشریح خروجی این به کارگیری در پیشبرد اهداف مختلف مؤثر ظاهر شوند. در واقع این نیروهای متخصص هستند که به خروجی حاصل از پردازش ابزارهای مختلف معنا می‌بخشند و بدون حضور و نظارت این افراد ممکن است تشخیص میزان کیفیت خروجی و دانش منتهی آن دشوار باشد. هرچند که هر ابزاری روش استفاده و شرایط خاص خود را می‌طلبد و خروجی محدودی در حوزه‌ای مشخص را مهیا می‌کند اما می‌توان روند تأثیر این ابزارها در تصمیم‌گیری مهندسان طراحی فرایند را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- درک صحیح از معلومات، مجهولات و روش‌های مختلف به کارگیری
- تشخیص و انتخاب بهترین ابزار و روش موجود
- استفاده از معلومات به روش مناسب ابزار انتخابی
- تعیین قید و شرایط مختلف برای پردازش معلومات
- تعیین انتظارات منطقی از خروجی ابزار
- تحلیل، بررسی و تفسیر نتایج خروجی از به کارگیری ابزار و تطبیق با انتظارات
- اصلاح و به کارگیری مجدد به کمک بازخوردهای مختلف تا رسیدن به نتایج مطلوب
- بررسی چندباره به کارگیری برای جلوگیری از خطا و تصادفی بودن نتایج

این مراحل در شکل شماره ۹ به‌صورت خلاصه نمایش داده شده‌اند.

## ۶ نتیجه‌گیری

سامانه‌های صنایع شیمیایی، سامانه‌هایی تودرتو هستند که تنوع و تعدد اجزا، تعاملات غیرخطی و پویای اجزا و شرایط و محدودیت‌های ناظر بر این تعاملات باعث پیچیدگی شناخت و پیش‌بینی رفتار این سامانه‌ها می‌شود. این مجموعه از پیچیدگی‌ها، حل چالش‌ها را دشوارتر کرده و با توجه به تغییر دائمی نیازهای بازارهای هدف صنایع شیمیایی، این چالش‌ها در حال پیچیده‌تر شدن و افزایش است. پاسخگویی به این چالش‌ها با تکیه دانش متداول سنتی مهندسی شیمی، زمان‌بر، پیچیده و بعضاً ناممکن است. مهندسی سامانه‌های فرایندی (PSE) به‌عنوان حوزه مهندسی ضروری برای پروژه‌های طراحی مهندسی، به کمک فنون تخصصی پاسخگویی به این چالش‌ها و با به‌کارگیری ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی، در بخش‌های مختلف پروژه‌های طراحی سامانه‌های صنایع شیمیایی ایفای نقش کرده، با بهره‌گیری از امکانات و فرصت‌ها، کیفیت تصمیم‌گیری و راه‌حل‌های پیشنهادی را ارتقا می‌دهند. این گروه از مهندسان شیمی، با آموزش‌های لازم و تخصص کسب کرده در حوزه سامانه‌های صنایع شیمیایی، در سه حوزه وظایف با اثر مستقیم، غیرمستقیم و نظارت بالاسری ایفای نقش می‌کند و در هر سه حوزه ابزارهای نوظهور اثرگذاری قابل‌توجهی دارند. تجهیز مهندسان طراحی فرایند با فنون جدید پاسخگویی به چالش‌های صنایع شیمیایی و نحوه استفاده از ابزارهای نوظهور هوش مصنوعی، زمینه‌ساز توسعه هوشمند صنایع نفت، گاز و پتروشیمی است.

## مراجع

- no. 2, pp. 179–182, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.02.012.
- Z. Wang *et al.*, Global oil and gas development situation, trends and enlightenment in 2023, *Pet. Explor. Dev.*, vol. 51, no. 6, pp. 1536–1555, Dec. 2024, doi: 10.1016/S1876-3804(25)60558-1.
- R. Müller and L. Oehm, Process industries versus discrete processing: How system characteristics affect operator tasks, *Cogn. Technol. Work*, vol. 21, no. 2, pp. 337–356, May 2019, doi: 10.1007/s10111-018-0511-1.
- I. E. Grossmann and A. W. Westerberg, Research challenges in process systems engineering, *AIChE J.*, vol. 46, no. 9, pp. 1700–1703, Sept. 2000, doi: 10.1002/aic.690460902.
- J. Leng *et al.*, Review of manufacturing system design in the interplay of industry 4.0 and industry 5.0 (Part I): Design thinking and modeling methods, *J. Manuf. Syst.*, vol. 76, pp. 158–187, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.07.012.
- T. F. Edgar and E. N. Pistikopoulos, Smart manufacturing and energy systems, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 114, pp. 130–144, June 2018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.027.
- A. Sircar, K. Yadav, K. Rayavarapu, N. Bist, and H. Oza, Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry, *Pet. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 379–391, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ptlrs.2021.05.009.
- M. Zhang, F. Tao, Y. Zuo, F. Xiang, L. Wang, and A. Y. C. Nee, Top ten intelligent algorithms towards smart manufacturing, *J. Manuf. Syst.*, vol. 71, pp. 158–171, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.09.006.
- V. S. Vassiliadis *et al.*, Reloading process systems engineering within chemical engineering, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 209, pp. 380–398, Sept. 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2024.07.066.
- Z. Jan, Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities, *Expert Syst. Appl.*, 2023.
- Artificial Intelligence in Chemicals Market Size - Global Industry, Share, Analysis, Trends and Forecast 2023 - 2032, Acumen Research and Consulting, ARC3441, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.acumenresearchandconsulting.com/artificial-intelligence-in-chemicals-market>
- AI in Chemicals Market Size, Share, Trends, Industry Analysis Report – By Component; Business Application; End User, and By Region; Segment Forecast, 2024–2032, Polaris Market Research & Consulting, Inc., 2019. [Online]. Available: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/ai-in-chemicals-market>
- Mohamed A. El-Reedy, *Project Management for the Oil and Gas Industry*, 5-30, Wiley, 2016.
- A. Wiesner, J. Morbach, and W. Marquardt, Information integration in chemical process engineering based on semantic technologies, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 35, no. 4, pp. 692–708, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.compchemeng.2010.12.003.
- M. R. Dobbelaere, P. P. Plehiers, R. Van De Vijver, C. V. Stevens, and K. M. Van Geem, Machine learning in chemical engineering: strengths, weaknesses, opportunities, and threats, *Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 1201–1211, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.eng.2021.03.019.
- C. Thon, B. Finke, A. Kwade, and C. Schilde, Artificial intelligence in process engineering, *Adv. Intell. Syst.*, vol. 3, no. 6, p. 2000261, June 2021, doi: 10.1002/aisy.202000261.
- L. H. Chiang, B. Braun, Z. Wang, and I. Castillo, Towards artificial intelligence at scale in the chemical industry, *AIChE J.*, vol. 68, no. 6, p. e17644, June 2022, doi: 10.1002/aic.17644.
- B. Decardi-Nelson, A. S. Alshehri, A. Ajagekar, and F. You, Generative AI and process systems engineering: The next frontier, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 187, p. 108723, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.compchemeng.2024.108723.
- J. S. Osmundson *et al.*, Process modeling: A systems engineering tool for analyzing complex systems, *Syst. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 320–337, Jan. 2004, doi: 10.1002/sys.20012.
- J. Davis, T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, and M. Sarli, Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 145–156, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.037.
- R. Sargent, *Process Systems Engineering*, 125-137, Imperial College, London, 2004.
- K.-U. Klatt and W. Marquardt, Perspectives for process systems engineering—Personal views from academia and industry, *Comput. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp. 536–550, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.compchemeng.2008.09.002.
- Y. Xie and Y. Ma, Design of a multi-disciplinary and feature-based collaborative environment for chemical process projects, *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 8, pp. 4149–4166, May 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.01.009.
- B. A. Hohne and T. H. Pierce, *Expert System Applications in Chemistry*, Brinston, Chapter 1, 1-7, 1989.
- T. Wang *et al.*, Current status and prospects of artificial intelligence technology application in oil and gas field development, *ACS Omega*, p. acsomega.3c09229, Jan. 2024, doi: 10.1021/acsomega.3c09229.
- M. Bortz, K. Dadhe, and A. Mitsos, AI in chemical engineering – We are just at the beginning, *Chem. Ing. Tech.*, vol. 93, no. 12, pp. 1875–1875, Dec. 2021, doi: 10.1002/cite.202171202.
- W. D. Seider, *Product and Process Design Principles*, Wiley, London, Chapter 2, 25-46, 2018.
- Z. Yuan, W. Qin, and J. Zhao, Smart manufacturing for the oil refining and petrochemical industry, *Engineering*, vol. 3,