

مدل سازی و شبیه سازی سیستم های کنترل خودکار

محمد مهدی صادقی^۱، مهدی زاهدی^۲

^۱دپارتمان مهندسی قدرت و کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۲دپارتمان برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

مدل سازی و شبیه سازی سیستم های کنترل خودکار فرآیندی پیچیده و ضروری است که به مهندسان این امکان را می دهد تا رفتار سیستم ها را قبل از پیاده سازی واقعی تحلیل کنند. این مرحله شامل تعریف دقیق ساختار، دینامیک و ویژگی های سیستم مورد نظر است. با استفاده از ابزارهای ریاضی و الگوریتم های پیچیده، مهندسان می توانند مدل های دقیق تری ایجاد کنند که به شبیه سازی عملکرد سیستم در شرایط مختلف کمک می کند. این شبیه سازی ها نه تنها بینش عمیق تری درباره نقاط قوت و ضعف سیستم ارائه می دهند، بلکه به کاهش هزینه ها و زمان توسعه نیز منجر می شوند. در این راستا، نرم افزارهای پیشرفته به عنوان ابزارهایی کلیدی عمل می کنند که امکان تجربه و آزمایش را برای طراحان فراهم می کنند. با شبیه سازی سناریوهای مختلف، می توان واکنش سیستم را به تغییرات ورودی و اختلالات خارجی پیش بینی کرد. این فرآیند به مهندسان کمک می کند تا راه حل های بهینه تری برای بهبود عملکرد و پایداری سیستم های کنترل خودکار پیدا کنند. در نهایت، این رویکرد تحلیلی نه تنها کارایی سیستم ها را افزایش می دهد، بلکه به تضمین ایمنی و قابلیت اعتماد آن ها نیز کمک می کند.

واژه های کلیدی: شبیه سازی، تحلیل رفتار سیستم ها، ساختار و دینامیک سیستم، ابزارهای ریاضی

مقدمه

مدل سازی و شبیه سازی سیستم های کنترل خودکار یکی از مباحث کلیدی در حوزه مهندسی برق و مهندسی سیستم ها است که تأثیر عمیقی بر بهبود عملکرد و طراحی سیستم ها دارد. در این مقاله، به بررسی اصول و تکنیک های مدل سازی و شبیه سازی سیستم های کنترل پرداخته می شود. همچنین، اهمیت تفکیک سیستم ها به زیرسیستم ها، انتخاب روش های مناسب برای مدل سازی و شبیه سازی، و تأثیر آن ها بر بهینه سازی عملکرد سیستم های کنترل به تفصیل مورد بحث قرار می گیرد. در این راستا، به بررسی تکنیک های مختلف شبیه سازی، نرم افزارهای کاربردی و چالش های موجود در این زمینه خواهیم پرداخت. همچنین، در پایان به نتایج حاصل از مطالعات و تجربیات عملی در این حوزه اشاره خواهد شد.

مدل سازی و شبیه سازی سیستم های کنترل خودکار نه تنها به درک بهتر رفتار سیستم ها کمک می کند، بلکه امکان پیش بینی و تحلیل عملکرد آن ها در شرایط مختلف را نیز فراهم می آورد. یکی از روش های کارآمد در این زمینه، استفاده از مدل سازی ریاضی است که با استفاده از معادلات دیفرانسیل و الگوریتم های بهینه سازی، می تواند رفتار سیستم را به طور دقیق توصیف کند. در این مقاله، بر روی رویکردهای مختلفی از جمله مدل سازی مبتنی بر فیزیک، مدل سازی مبتنی بر داده و همچنین روش های ترکیبی تمرکز خواهیم کرد. هر یک از این رویکردها مزایا و معایب خاص خود را دارند و انتخاب مناسب ترین روش بستگی به نوع سیستم و اهداف مورد نظر دارد. به عنوان مثال، در سیستم های پیچیده ای که شامل تعاملات غیرخطی هستند، مدل سازی مبتنی بر داده می تواند به شناسایی الگوهای پنهان کمک کند، در حالی که در سیستم های ساده تر، استفاده از مدل های تحلیلی می تواند به نتایج دقیق تری منجر شود. [1,2]

علاوه بر این، شبیه سازی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای آزمودن سناریوهای مختلف و بررسی تأثیر تغییرات در پارامترهای سیستم به کار می رود. با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی پیشرفته، مهندسان می توانند به آسانی تغییرات را پیاده سازی کرده و نتایج را در زمان واقعی مشاهده کنند. این قابلیت به آن ها این امکان را می دهد که پیش از پیاده سازی عملی، نقاط قوت و ضعف طراحی های خود را شناسایی کنند. چالش های موجود در این زمینه شامل محدودیت های محاسباتی، انتخاب پارامترهای صحیح و نیاز به داده های دقیق برای مدل سازی است. به همین دلیل، همکاری میان محققان، مهندسان و صنعتگران ضروری است تا بتوانند به توسعه راهکارهای نوآورانه و کارآمد در این حوزه بپردازند. در خاتمه، نتایج تجربی به دست آمده از پروژه های مختلف نشان می دهد که مدل سازی و شبیه سازی می تواند نقش بسزایی در ارتقای کیفیت و کارایی سیستم های کنترل ایفا کند. با توجه به اهمیت روزافزون فناوری های نوین و نیاز به بهینه سازی فرایندها، این حوزه همچنان به عنوان یکی از چالش ها و فرصت های بزرگ در مهندسی برق و سیستم ها باقی خواهد ماند. [3]

تعریف مدل سازی و شبیه سازی

مدل سازی به فرایند ایجاد یک نمایش ریاضی یا منطقی از یک سیستم واقعی اشاره دارد. این مدل می تواند شامل معادلات دیفرانسیل، توابع انتقال، یا دیگر ساختارهای ریاضی باشد. شبیه سازی، به نوبه خود، فرایند اجرای مدل برای بررسی رفتار سیستم تحت شرایط مختلف است. این دو مفهوم به طور غیرقابل تفکیکی با یکدیگر مرتبط هستند و درک عمیق تری از سیستم های پیچیده را فراهم می کنند. مدل سازی به عنوان یک ابزار کارآمد، به پژوهشگران و مهندسان این امکان را می دهد که با استفاده از تئوری های موجود، جنبه های مختلف یک سیستم را تحلیل کنند [4]. این تحلیل ها می توانند شامل پیش بینی نتایج، ارزیابی ریسک ها و شناسایی نقاط قوت و ضعف سیستم باشد. به عنوان مثال، در حوزه مهندسی، مدل سازی می تواند به

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله کمک کند، در حالی که در علوم اجتماعی، ممکن است برای درک رفتار جمعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

شبیه‌سازی، در این راستا، ابزاری قدرتمند است که به ما اجازه می‌دهد تا با ایجاد سناریوهای مختلف، واکنش‌های سیستم را تحت فشار یا تغییرات محیطی مشاهده کنیم. این فرایند می‌تواند از طریق نرم‌افزارهای پیشرفته انجام شود که قابلیت پردازش داده‌های بزرگ و تجزیه و تحلیل‌های پیچیده را دارند. به عنوان مثال، در علوم زیستی، شبیه‌سازی می‌تواند به پیش‌بینی شیوع بیماری‌ها کمک کند و در نتیجه، سیاست‌گذاران را در اتخاذ تصمیمات بهینه یاری دهد. [5]

در واقع، این دو ابزار به ما کمک می‌کنند تا دنیای پیچیده و متغیر پیرامون خود را بهتر درک کنیم. از یک سو، مدل‌سازی به ما امکان می‌دهد تا ساختارهای بنیادی سیستم را شناسایی کنیم و از سوی دیگر، شبیه‌سازی به ما این امکان را می‌دهد که پیامدهای احتمالی تصمیمات خود را بررسی کنیم. در نهایت، ترکیب این دو رویکرد می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه و بهینه برای چالش‌های مختلف کمک کند، از بحران‌های زیست‌محیطی گرفته تا مسائل اقتصادی و اجتماعی. به همین دلیل، یادگیری و تسلط بر تکنیک‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی به یک ضرورت برای متخصصان در هر حوزه‌ای تبدیل شده است. این مهارت‌ها نه تنها به درک عمیق‌تر از سیستم‌های موجود کمک می‌کنند، بلکه به پیش‌بینی و مدیریت تغییرات آینده نیز یاری می‌رسانند. در نتیجه، سرمایه‌گذاری در آموزش و توسعه این مهارت‌ها به عنوان یک استراتژی کلیدی برای موفقیت در دنیای امروز به شمار می‌رود. [6,7]

اهمیت مدل‌سازی در سیستم‌های کنترل

مدل‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار به مهندسان این امکان را می‌دهد تا ویژگی‌های سیستم را بررسی و تحلیل کنند. با ایجاد یک مدل دقیق، مهندسان می‌توانند پیش‌بینی کنند که چگونه سیستم به ورودی‌ها واکنش نشان خواهد داد. این امر به طراحی کنترل‌کننده‌های بهینه و کاهش هزینه‌های توسعه کمک می‌کند. مدل‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار به مهندسان این امکان را می‌دهد تا ویژگی‌های سیستم را بررسی و تحلیل کنند. با ایجاد یک مدل دقیق، مهندسان می‌توانند پیش‌بینی کنند که چگونه سیستم به ورودی‌ها واکنش نشان خواهد داد. این امر به طراحی کنترل‌کننده‌های بهینه و کاهش هزینه‌های توسعه کمک می‌کند. [8]

علاوه بر این، مدل‌سازی به شبیه‌سازی رفتار سیستم در شرایط مختلف نیز کمک می‌کند. این فرایند به مهندسان اجازه می‌دهد تا نقاط قوت و ضعف سیستم را شناسایی کرده و راهکارهای مناسبی برای بهبود عملکرد آن ارائه دهند. به عنوان مثال، با شبیه‌سازی تغییرات در پارامترهای محیطی یا بارهای غیرمنتظره، مهندسان می‌توانند استراتژی‌های کنترلی را برای حفظ پایداری سیستم توسعه دهند. یکی دیگر از مزایای مدل‌سازی، امکان انجام تحلیل‌های حساسیت است. این تحلیل‌ها به مهندسان کمک می‌کند تا بفهمند کدام پارامترها بیشترین تأثیر را بر عملکرد سیستم دارند و با تمرکز بر آن‌ها، بهبودهای مؤثری اعمال کنند. به این ترتیب، می‌توان به یک طراحی هوشمندانه و هدفمند دست یافت که نه تنها به افزایش کارایی سیستم کمک می‌کند، بلکه به کاهش ریسک‌های ناشی از خطاهای احتمالی نیز می‌انجامد. [9]

علاوه بر این، مدل‌های ساخته شده می‌توانند به عنوان مبنای آموزشی برای دانشجویان و تازه‌واردان به حوزه مهندسی کنترل عمل کنند. با استفاده از این مدل‌ها، آن‌ها می‌توانند تجزیه و تحلیل‌های عمیق‌تری انجام دهند و قابلیت‌های خود را در حل مسائل پیچیده بهبود بخشند. این فرآیند یادگیری به نوبه خود به ارتقاء سطح کیفی مهندسان آینده کمک خواهد کرد. در

نهایت، با پیشرفت تکنولوژی و ظهور روش‌های نوین مدل‌سازی، مهندسان قادر خواهند بود تا به سرعت به نیازهای متغیر بازار پاسخ دهند و راه‌حل‌های خلاقانه‌ای برای چالش‌های موجود ارائه کنند. این نوآوری‌ها نه تنها به بهبود عملکرد سیستم‌های کنترلی منجر می‌شوند، بلکه به تحقق بخشیدن به چشم‌اندازهای بلندمدت صنعتی و اقتصادی نیز کمک می‌کنند. [10]

روش‌های مختلف مدل‌سازی

مدل‌سازی سیستم‌های کنترل می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود. برخی از این روش‌ها شامل:

- **مدل‌سازی ریاضی:** استفاده از معادلات دیفرانسیل و توابع انتقال برای نمایش دینامیک سیستم. مدل‌سازی ریاضی ابزار قدرتمندی برای تحلیل و درک رفتار دینامیک سیستم‌ها به شمار می‌آید. در این رویکرد، معادلات دیفرانسیل به عنوان ابزار اصلی برای توصیف تغییرات زمانی و فضایی متغیرها عمل می‌کنند. این معادلات قادرند روندهای پیچیده‌ای نظیر نوسانات، پایداری و ناپایداری را در سیستم‌های مختلف نشان دهند. با استفاده از این معادلات، می‌توان به شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف پرداخت و در واقع، درکی عمیق از دینامیک آن به دست آورد. [11]

در کنار معادلات دیفرانسیل، توابع انتقال نیز نقش حیاتی در تحلیل دینامیک سیستم‌ها ایفا می‌کنند. این توابع به ما امکان می‌دهند تا ارتباط بین ورودی و خروجی یک سیستم را به صورت دقیق‌تری بررسی کنیم. با استفاده از توابع انتقال، می‌توان به راحتی اثر تغییرات ورودی بر رفتار خروجی را تحلیل کرد و مدل‌های پیچیده‌تری را برای شبیه‌سازی دینامیک سیستم طراحی نمود. در نتیجه، این دو ابزار به مهندسان و پژوهشگران کمک می‌کنند تا ضمن درک بهتر رفتار سیستم‌ها، به بهینه‌سازی و کنترل آنها بپردازند. [12]

- **مدل‌سازی گرافیکی:** استفاده از دیاگرام‌ها و نمودارها برای نمایش ارتباطات میان اجزای سیستم. مدل‌سازی گرافیکی به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی سیستم‌ها، به ما این امکان را می‌دهد که پیچیدگی‌های موجود را با استفاده از دیاگرام‌ها و نمودارها به صورت بصری ساده‌سازی کنیم. این روش به تحلیل‌گران و طراحان کمک می‌کند تا ارتباطات میان اجزای مختلف را به وضوح مشاهده کرده و درک بهتری از نحوه تعامل آن‌ها با یکدیگر پیدا کنند. از نمودارهای جریان کار گرفته تا دیاگرام‌های کلاس، هر کدام نقش خاصی در تجسم فرایندها و ساختار سیستم ایفا می‌کنند و این امر به تسهیل ارتباطات میان اعضای تیم و ذینفعان کمک می‌کند. [13]

استفاده از مدل‌سازی گرافیکی نه تنها به تسهیل فهم و تبادل اطلاعات کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به شناسایی نواقص و بهینه‌سازی ساختارهای موجود نیز منجر شود. از طریق تجزیه و تحلیل بصری، می‌توان نقاط قوت و ضعف سیستم را شناسایی کرده و راه‌حل‌های بهتری برای بهبود عملکرد ارائه داد. این شیوه، به ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده، به عنوان یک زبان مشترک میان افراد با تخصص‌های مختلف عمل کرده و به هم‌افزایی دانش و تجربه کمک می‌کند. [14]

- **مدل‌سازی مبتنی بر داده:** استفاده از داده‌های واقعی برای ایجاد مدل‌هایی که به تحلیل رفتاری سیستم کمک می‌کنند. مدل‌سازی مبتنی بر داده، فرایندی است که در آن با استفاده از داده‌های واقعی و ملموس، مدل‌هایی طراحی می‌شوند تا رفتار سیستم‌های پیچیده را تحلیل و پیش‌بینی کنند. این رویکرد به پژوهشگران و محققان این امکان را می‌دهد که با بهره‌گیری از اطلاعات جمع‌آوری شده، الگوهای پنهان و روابط بین متغیرها را شناسایی کنند. در حقیقت، این نوع مدل‌سازی می‌تواند به درک عمیق‌تری از نحوه عملکرد سیستم‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها منجر شود، و به این ترتیب، بهبود تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی استراتژیک را تسهیل نماید. [15]

از سوی دیگر، استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده می‌تواند در حوزه‌های مختلفی از جمله اقتصاد، محیط زیست و علوم اجتماعی کاربرد داشته باشد. با تحلیل دقیق داده‌ها، می‌توان به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف پرداخت و اثرات احتمالی تغییرات را بر رفتار سیستم مورد نظر پیش‌بینی کرد. به این ترتیب، مدل‌سازی مبتنی بر داده نه تنها به شفاف‌سازی فرآیندها کمک می‌کند، بلکه ابزار قدرتمندی برای بهینه‌سازی عملکرد و کاهش ریسک‌های احتمالی در تصمیم‌گیری‌های کلان به شمار می‌آید. [16]

شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل

شبیه‌سازی به مهندسان این امکان را می‌دهد که رفتار سیستم را در شرایط مختلف بررسی کنند. این فرایند شامل اجرای مدل ایجاد شده در یک محیط شبیه‌سازی است. نرم‌افزارهای مختلفی برای شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل وجود دارند، از جمله MATLAB/Simulink، Python با کتابخانه‌های خاص، و نرم‌افزارهای صنعتی مانند LabVIEW. این ابزارها به مهندسان اجازه می‌دهند تا با دقت و جزئیات بالا، سناریوهای مختلف را تجزیه و تحلیل کرده و به ارزیابی کارایی سیستم‌ها بپردازند. به عنوان مثال، با استفاده از MATLAB/Simulink، مهندسان می‌توانند مدل‌های دینامیکی پیچیده را طراحی کرده و رفتار آن‌ها را تحت تأثیر تغییرات ورودی‌ها و شرایط محیطی به آزمایش بگذارند. این رویکرد به آن‌ها کمک می‌کند تا نقاط ضعف و قوت سیستم‌ها را شناسایی کنند و بهینه‌سازی‌های لازم را انجام دهند. [17]

علاوه بر این، Python به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت‌های وسیع خود، به ابزاری محبوب در میان محققان تبدیل شده است. با استفاده از کتابخانه‌هایی همچون NumPy و SciPy، می‌توان به سرعت محاسبات پیچیده ریاضی را انجام داده و نتایج را به شیوه‌ای بصری و جذاب ارائه داد. این قابلیت‌ها به مهندسان این امکان را می‌دهد که در کمترین زمان ممکن، شبیه‌سازی‌های دقیقی را انجام دهند و به تصمیم‌های بهتری دست یابند. نرم‌افزارهای صنعتی مانند LabVIEW نیز با ارائه یک رابط کاربری گرافیکی کاربرپسند، به متخصصان کمک می‌کنند تا به راحتی سیستم‌های کنترل را طراحی و پیاده‌سازی کنند. این محیط به ویژه برای پروژه‌های آزمایشگاهی و صنعتی که نیاز به جمع‌آوری و تحلیل داده‌های زمان واقعی دارند، بسیار کارآمد است. [18]

در نتیجه، شبیه‌سازی نه تنها ابزاری برای آزمایش و تحقیق است، بلکه به مهندسان امکان می‌دهد تا با اطمینان بیشتری به طراحی و توسعه سیستم‌های پیچیده بپردازند. این فرایند نه تنها به صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک می‌کند، بلکه ریسک‌های مرتبط با پیاده‌سازی واقعی را نیز به حداقل می‌رساند. به این ترتیب، دنیای مهندسی به طور قابل توجهی تحت تأثیر این فناوری‌های نوین قرار گرفته و مسیرهای جدیدی برای نوآوری و پیشرفت فراهم آمده است.

نرم‌افزارهای محبوب شبیه‌سازی

نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نقش بسیار مهمی در تحلیل سیستم‌های کنترل ایفا می‌کنند. برخی از نرم‌افزارهای مشهور شامل: - **MATLAB/Simulink**: یکی از پرکاربردترین ابزارها برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی. MATLAB/Simulink یکی از ابزارهای برجسته در حوزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی است که به مهندسان و محققان این امکان را می‌دهد تا رفتار سیستم‌های پیچیده را به طور دقیق تحلیل کنند. با استفاده از محیط کاربرپسند MATLAB، کاربران می‌توانند به آسانی الگوریتم‌ها و مدل‌های ریاضی را توسعه دهند و سپس از قابلیت‌های شبیه‌سازی Simulink برای تجزیه و تحلیل دینامیک سیستم‌ها بهره‌برداری کنند. این ابزار با ارائه بلوک‌های آماده و

قابلیت‌های بصری، فرآیند طراحی و آزمون سیستم‌ها را تسهیل کرده و به کاربران اجازه می‌دهد تا به سرعت فرضیات خود را مورد ارزیابی قرار دهند. [19]

علاوه بر این، ترکیب MATLAB و Simulink به کاربران این امکان را می‌دهد که از قابلیت‌های پیشرفته‌ای نظیر شبیه‌سازی زمان واقعی و کنترل خودکار بهره‌مند شوند. این ویژگی‌ها به ویژه در حوزه‌های مهندسی برق، مکانیک و علوم کامپیوتر از اهمیت بالایی برخوردار است. از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی، پژوهشگران می‌توانند به نتایج قابل اعتمادی دست یابند و طراحی‌های خود را بهینه کنند، در حالی که از خطاهای ناشی از آزمایش‌های فیزیکی جلوگیری می‌کنند. در نهایت، MATLAB/Simulink به عنوان یک پلتفرم جامع، به تسریع فرآیند نوآوری و تحقیق در زمینه سیستم‌های دینامیکی کمک می‌کند.

- **LabVIEW**: نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل و جمع‌آوری داده‌ها. LabVIEW، نرم‌افزاری پیشرفته و کاربرپسند است که به مهندسان و محققان امکان می‌دهد تا سیستم‌های کنترل را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کرده و داده‌ها را به‌صورت مؤثری جمع‌آوری کنند. این پلتفرم با فراهم کردن ابزارهای بصری و گرافیکی، فرآیند توسعه برنامه‌ها را ساده‌تر می‌سازد و به کاربران اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به نوشتن کدهای پیچیده، الگوریتم‌ها و فرآیندهای کنترل را طراحی کنند. با استفاده از بلاک دیاگرام‌ها و رابط‌های کاربری قابل تنظیم، می‌توان به راحتی سنسورها و دستگاه‌های مختلف را به هم متصل کرد و به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخت.

این نرم‌افزار به‌ویژه در حوزه‌های علمی و صنعتی محبوبیت زیادی دارد، زیرا قابلیت‌های متنوعی را برای نظارت بر سیستم‌ها و اجرای آزمایش‌ها فراهم می‌کند. با امکاناتی نظیر ایجاد گزارش‌های جامع و گرافیک‌های تعاملی، LabVIEW به کاربران این امکان را می‌دهد که به تحلیل دقیق‌تری از عملکرد سیستم‌ها دست یابند. این ویژگی‌ها موجب ارتقاء بهره‌وری و دقت در پروژه‌های مختلف می‌شود و به عنوان ابزاری حیاتی در تحقیق و توسعه شناخته می‌شود. [20]

- **Python**: با استفاده از کتابخانه‌هایی مانند NumPy و SciPy، امکان شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های پیچیده فراهم می‌شود. زبان برنامه‌نویسی Python به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در زمینه تحلیل داده‌ها و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده شناخته می‌شود. با استفاده از کتابخانه‌هایی نظیر NumPy و SciPy، تحلیلگران و پژوهشگران می‌توانند به راحتی به محاسبات عددی پیشرفته و عملیات ماتریسی دست یابند. NumPy با ارائه آرایه‌های چندبعدی و توابع ریاضی کارآمد، پایه‌گذار بسیاری از پروژه‌های علمی و تحقیقاتی است. در کنار آن، SciPy با مجموعه‌ای از توابع علمی و ریاضیاتی، امکان حل مسائل پیچیده‌ای نظیر بهینه‌سازی، ادغام و حل معادلات دیفرانسیل را فراهم می‌کند.

این دو کتابخانه به همراه یکدیگر، توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی و تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهند. پژوهشگران می‌توانند با استفاده از این ابزارها، مدل‌های ریاضی پیچیده را توسعه دهند و رفتار سیستم‌های واقعی را تحت شرایط مختلف بررسی کنند. این قابلیت‌ها به ویژه در حوزه‌های مهندسی، فیزیک، و علوم زیستی کاربردی می‌باشند و امکان کشف الگوهای جدید و پیش‌بینی رفتار آینده سیستم‌ها را فراهم می‌آورد. به این ترتیب، Python به عنوان یک زبان منعطف و قدرتمند، جایگاه ویژه‌ای در عرصه علوم داده و شبیه‌سازی پیدا کرده است. [21]

چالش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی

مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل با چالش‌های متعددی همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به:

- **پیچیدگی سیستم:** سیستم‌های بزرگ و پیچیده ممکن است مدل‌سازی و شبیه‌سازی را دشوار کنند. پیچیدگی سیستم‌های بزرگ به عنوان یک چالش اساسی در عرصه مدل‌سازی و شبیه‌سازی شناخته می‌شود. این سیستم‌ها معمولاً شامل اجزای متعددی هستند که به طور همزمان با یکدیگر تعامل می‌کنند و رفتارهای غیرقابل پیش‌بینی‌ای را تولید می‌کنند. این تعاملات نه تنها در درک دقیق دینامیک سیستم اختلال ایجاد می‌کنند، بلکه پیش‌بینی نتایج نیز به شدت دشوار می‌شود. برای نمونه، در سیستم‌های اکولوژیکی یا اقتصادی، تغییرات در یک عنصر می‌تواند اثرات زنجیره‌ای و غیرخطی بر سایر اجزا داشته باشد، که این خود نیازمند مدل‌های پیچیده‌تری برای تحلیل و شبیه‌سازی است. [22]

علاوه بر این، تنوع و عدم قطعیت در داده‌ها و ورودی‌ها، فرآیند مدل‌سازی را حتی چالش‌برانگیزتر می‌سازد. سیستم‌های بزرگ معمولاً به اطلاعات گسترده و متنوعی نیاز دارند که ممکن است به راحتی در دسترس نباشند. این کمبود داده‌ها، به ویژه زمانی که صحبت از پیش‌بینی رفتار بلندمدت سیستم می‌شود، می‌تواند نتایج را به طرز قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، در مواجهه با چنین پیچیدگی‌هایی، نیاز به توسعه روش‌های نوین و پیشرفته برای درک، تحلیل و شبیه‌سازی این سیستم‌ها به وضوح حس می‌شود. [23]

- **عدم قطعیت:** برخی از متغیرها ممکن است به طور دقیق قابل پیش‌بینی نباشند. عدم قطعیت یکی از ویژگی‌های بنیادین زندگی انسان است که در ابعاد مختلف آن نمایان می‌شود. در دنیایی که تغییرات سریع و غیرقابل پیش‌بینی به یک امر عادی تبدیل شده، بسیاری از متغیرها به‌راستی فراتر از کنترل ما قرار دارند. از نوسانات اقتصادی گرفته تا تغییرات آب و هوایی، هر یک از این عوامل می‌توانند تأثیرات عمیقی بر آینده ما بگذارند. این عدم قطعیت می‌تواند منجر به احساس ناامنی و اضطراب شود، اما در عین حال فرصتی برای رشد و یادگیری فراهم می‌آورد. قبول کردن این واقعیت که برخی چیزها قابل پیش‌بینی نیستند، ما را به سمت انعطاف‌پذیری و سازگاری سوق می‌دهد. [24]

در عرصه علوم اجتماعی و انسانی، عدم قطعیت به‌ویژه در تحلیل رفتارهای انسانی و تصمیم‌گیری‌ها نمود بیشتری پیدا می‌کند. افراد و گروه‌ها تحت تأثیر عوامل متعدد، از جمله احساسات، فرهنگ و شرایط اجتماعی، انتخاب‌هایی را انجام می‌دهند که ممکن است در آینده نتایج غیرمنتظره‌ای به دنبال داشته باشد. این پیچیدگی در تعاملات انسانی، نه تنها چالش‌هایی را به وجود می‌آورد، بلکه زمینه‌ساز نوآوری و خلاقیت نیز می‌شود. بنابراین، آگاهی از عدم قطعیت می‌تواند ما را به سوی تفکر عمیق‌تر و پذیرش ایده‌های نو سوق دهد، و در نهایت ما را به تحقق پتانسیل‌های نهفته‌مان نزدیک‌تر کند. [25]

- **محدودیت‌های نرم‌افزاری:** برخی از نرم‌افزارها ممکن است نتوانند به طور کامل تمامی جنبه‌های سیستم را مدل‌سازی کنند. محدودیت‌های نرم‌افزاری به عنوان یک چالش مهم در دنیای تکنولوژی شناخته می‌شوند. بسیاری از نرم‌افزارها به دلیل طراحی یا ساختارشان قادر به شبیه‌سازی دقیق و جامع تمامی جنبه‌های یک سیستم نیستند. این عدم توانایی می‌تواند منجر به اطلاعات ناقص یا نادرست شود و در نتیجه تصمیمات مدیریتی و تحلیلی را تحت تأثیر قرار دهد. در برخی موارد، نرم‌افزارها تنها بر روی جنبه‌های خاصی از یک سیستم تمرکز می‌کنند و از تحلیل عمیق‌تر و شمول جنبه‌های دیگر غافل می‌مانند. [26]

علاوه بر این، پیچیدگی‌های ذاتی سیستم‌ها می‌تواند به محدودیت‌های نرم‌افزاری دامن بزند. به عنوان مثال، در محیط‌هایی که شامل تعاملات پیچیده انسانی یا داده‌های متغیر و نامنظم هستند، نرم‌افزارها ممکن است نتوانند به طور کامل دینامیک‌های موجود را درک و پیش‌بینی کنند. این موضوع می‌تواند به ایجاد ناهماهنگی‌ها و مشکلاتی منجر شود که در نهایت کارایی و

اثربخشی سیستم را تضعیف می‌کند. بنابراین، شناسایی و درک این محدودیت‌ها برای توسعه‌دهندگان و کاربران نرم‌افزارها امری ضروری است. [27]

کاربردهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی

مدل‌سازی و شبیه‌سازی در صنایع مختلف کاربرد دارد. از جمله:

- **صنعت خودروسازی:** برای بهینه‌سازی عملکرد خودروها و سیستم‌های کنترل آن‌ها. صنعت خودروسازی در دو دهه اخیر با توجه به پیشرفت‌های فناوری، تحولات شگرفی را تجربه کرده است. مهندسان و طراحان با بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین، بهینه‌سازی عملکرد خودروها را در کانون توجه خود قرار داده‌اند. این تلاش‌ها شامل بهبود طراحی موتور، کاهش وزن بدنه، و استفاده از مواد پیشرفته می‌شود. همچنین، سیستم‌های کنترل هوشمند که قابلیت تحلیل و پردازش داده‌های لحظه‌ای را دارند، به افزایش کارایی و ایمنی خودروها کمک می‌کنند. [28]

در این راستا، صنعت خودرو به سمت استفاده از تکنولوژی‌های نوینی مانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء پیش می‌رود. این فناوری‌ها امکان جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مربوط به رفتار راننده و شرایط جاده را فراهم می‌آورند، که در نهایت منجر به ارتقاء سیستم‌های هدایت و کنترل می‌گردد. با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، خودروها قادر به یادگیری از تجربیات گذشته و تطبیق با شرایط متغیر خواهند بود. این تحولات نه تنها به بهبود تجربه رانندگی کمک می‌کند، بلکه به کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی محیط زیست نیز منجر می‌شود. [29]

- **صنعت هوافضا:** برای تحلیل رفتار پرواز و طراحی کنترل‌کننده‌های پیچیده. صنعت هوافضا به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و پیچیده‌ترین حوزه‌های فناوری، نقش حیاتی در تحلیل رفتار پرواز ایفا می‌کند. در این زمینه، پژوهشگران از مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بهره می‌برند تا دینامیک پرواز را به‌طور دقیق بررسی کنند. این تحلیل‌ها به مهندسان این امکان را می‌دهد که الگوهای حرکتی و پاسخ‌های سیستم‌های پرنده را شناسایی کنند. در نتیجه، قابلیت پیش‌بینی رفتارهای غیرمنتظره و بهینه‌سازی عملکرد پرنده‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. [30]

در طراحی کنترل‌کننده‌های پیچیده، استفاده از تکنیک‌های نوین فنی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، منجر به توسعه سیستم‌های کنترلی دقیق و کارآمد می‌شود. این کنترل‌کننده‌ها نه تنها توانایی مدیریت دقیق پرواز را دارند، بلکه می‌توانند در شرایط متغیر و چالش‌برانگیز نیز عملکرد بهینه‌ای ارائه دهند. با تکیه بر داده‌های جمع‌آوری شده از پروازهای آزمایشی و شبیه‌سازی‌های پیشرفته، مهندسان قادر به طراحی راهکارهایی هستند که ایمنی و کارایی هواپیماها را به حداکثر می‌رساند.

- **سیستم‌های الکتریکی:** برای بررسی رفتار سیستم‌های قدرت و کنترل بار. سیستم‌های الکتریکی به عنوان شریان حیاتی تأمین انرژی در جوامع مدرن، نقش کلیدی در تضمین پایداری و کارایی شبکه‌های قدرت ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها شامل مجموعه‌ای از اجزاء مانند ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال هستند که به هم پیوسته‌اند تا انرژی تولید شده را به مصرف‌کنندگان برسانند. بررسی رفتار این سیستم‌ها، به ویژه در شرایط بار متغیر، نیازمند تحلیل دقیق و مدل‌سازی پیچیده است. با توجه به تغییرات ناگهانی در تقاضای انرژی، این مطالعات به مهندسان امکان می‌دهد تا راهکارهای مؤثری برای مدیریت بار و بهینه‌سازی عملکرد شبکه طراحی کنند. [31]

کنترل بار به عنوان یکی از جنبه‌های اساسی در عملکرد سیستم‌های الکتریکی، به تدبیر و تنظیم جریان انرژی در شبکه‌های قدرت اشاره دارد. با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، مانند سیستم‌های کنترل هوشمند و الگوریتم‌های یادگیری ماشین،

می‌توان رفتار بار را به طور دقیق پیش‌بینی و تنظیم کرد. این تکنیک‌ها به کاهش تلفات انرژی و افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند و در عین حال از وقوع مشکلات جدی مانند خاموشی‌های ناگهانی جلوگیری می‌کنند. به این ترتیب، نه تنها قابلیت اطمینان شبکه افزایش می‌یابد، بلکه تأثیرات منفی بر محیط زیست نیز به حداقل می‌رسد. [32]

انتخاب روش‌های مناسب

انتخاب روش‌های مناسب برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بستگی به نوع سیستم و اهداف پروژه دارد. مهندسان باید با توجه به ویژگی‌های سیستم، روش‌های مختلف را ارزیابی کرده و بهترین گزینه را انتخاب کنند. انتخاب روش‌های مناسب برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی بستگی به نوع سیستم و اهداف پروژه دارد. مهندسان باید با توجه به ویژگی‌های سیستم، روش‌های مختلف را ارزیابی کرده و بهترین گزینه را انتخاب کنند. در این راستا، توجه به عوامل متعددی همچون دقت، پیچیدگی و قابلیت درک مدل اهمیت ویژه‌ای دارد.

به عنوان مثال، اگر سیستم مورد نظر دارای رفتارهای غیرخطی و پیچیده باشد، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تری مانند شبیه‌سازی مونت کارلو یا شبیه‌سازی مبتنی بر عامل می‌تواند مفید باشد. این تکنیک‌ها به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که تأثیرات متغیرهای مختلف را به‌طور همزمان بررسی کنند و سناریوهای متنوعی را تحت شرایط متفاوت شبیه‌سازی نمایند. همچنین، در پروژه‌هایی که زمان و منابع محدود هستند، ممکن است انتخاب مدل‌های ساده‌تر و تحلیل‌های سریع‌تر ترجیح داده شود. در چنین مواردی، مهندسان می‌توانند از روش‌های تحلیلی یا مدل‌های تقریبی بهره‌گیرند که به سرعت اطلاعات کلیدی را در اختیار قرار می‌دهند و زمان لازم برای تصمیم‌گیری را به حداقل می‌رسانند. [33]

در نهایت، اهمیت همکاری و تبادل نظر در بین اعضای تیم نیز نباید نادیده گرفته شود. به اشتراک گذاشتن دانش و تجربیات مختلف می‌تواند به انتخاب بهترین روش‌ها و بهینه‌سازی فرآیند مدل‌سازی کمک شایانی کند. در دنیای به‌سرعت در حال تغییر فناوری، درک عمیق از مسائل و همفکری گروهی عاملی کلیدی برای موفقیت در پروژه‌های مهندسی محسوب می‌شود. از این رو، فراتر از انتخاب روش، ایجاد یک فرایند پویا و سازگار جهت به‌روزرسانی و اصلاح مدل‌ها به محض دریافت داده‌های جدید و تغییر شرایط، به عنوان یک استراتژی مؤثر در نظر گرفته می‌شود. [34]

نتایج حاصل از شبیه‌سازی

شبیه‌سازی می‌تواند به مهندسان کمک کند تا نقاط ضعف و قوت سیستم را شناسایی کنند. با تجزیه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی، می‌توان کنترل‌کننده‌های بهینه‌تری طراحی کرده و عملکرد سیستم را بهبود بخشید. شبیه‌سازی نه تنها ابزاری برای شناسایی مشکلات است، بلکه می‌تواند به عنوان پلی برای نوآوری و پیشرفت نیز عمل کند. مهندسان با استفاده از این روش قادرند سناریوهای مختلف را آزمایش کرده و واکنش سیستم را در شرایط گوناگون مشاهده کنند. این فرایند به آنها این امکان را می‌دهد تا راهکارهایی خلاقانه و مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد ارائه دهند. [35]

به عنوان مثال، در صنعت خودروسازی، شبیه‌سازی می‌تواند به طراحان کمک کند تا رفتار خودرو را در شرایط مختلف جاده‌ای پیش‌بینی کنند. با این اطلاعات، می‌توانند به طراحی سیستم‌های تعلیق و ترمز بهینه بپردازند که نه تنها ایمنی را افزایش می‌دهد، بلکه تجربه رانندگی را نیز بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، شبیه‌سازی به مهندسان اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به ساخت

و آزمایش نمونه‌های فیزیکی، هزینه‌ها و زمان را کاهش دهند. این رویکرد به توسعه سریع‌تر محصولات جدید کمک کرده و به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا در بازار رقابتی باقی بمانند. [36]

همچنین، شبیه‌سازی می‌تواند به افزایش بهره‌وری در فرآیندهای صنعتی نیز کمک کند. با شبیه‌سازی خط تولید، مهندسان می‌توانند گلوگاه‌ها را شناسایی کرده و تغییرات لازم را قبل از اجرای واقعی اعمال کنند. این امر نه تنها موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه کیفیت نهایی محصول را نیز بهبود می‌بخشد. در نهایت، این فناوری به مهندسان اجازه می‌دهد تا به چالش‌های پیچیده‌ای که در دنیای مدرن با آن روبه‌رو هستند، پاسخ‌های نوآورانه‌ای ارائه دهند. از توسعه پایدار گرفته تا طراحی سیستم‌های هوشمند، شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار کلیدی در دست مهندسان قرار دارد تا آینده‌ای روشن‌تر و کارآمدتر بسازند. [37]

آینده مدل‌سازی و شبیه‌سازی

با پیشرفت تکنولوژی و ظهور ابزارهای جدید، مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار در حال تحول است. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند به بهبود دقت مدل‌ها و شبیه‌سازی‌ها کمک کند. همچنین، پیشرفت در سخت‌افزارهای محاسباتی می‌تواند قابلیت‌های شبیه‌سازی را افزایش دهد. این تحولات نه تنها به افزایش سرعت پردازش داده‌ها منجر می‌شود، بلکه امکان بررسی سناریوهای پیچیده و پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها را نیز فراهم می‌آورد. با ورود الگوریتم‌های نوین، مهندسان قادر به تحلیل الگوهای غیرخطی و دینامیکی می‌شوند که در گذشته به سادگی قابل شبیه‌سازی نبودند. این پیشرفت‌ها به طراحان این امکان را می‌دهد تا سیستم‌های خودکار را به گونه‌ای بهینه‌سازی کنند که نه تنها به نیازهای کنونی پاسخ دهند، بلکه برای چالش‌های آینده نیز آماده باشند. [38]

به علاوه، رویکردهای جدید در یادگیری عمیق، قابلیت تشخیص و پیش‌بینی خطاها را در سیستم‌ها ارتقاء می‌بخشد. این ویژگی به مهندسان این فرصت را می‌دهد که با شناسایی مشکلات پیش از وقوع، اقدامات پیشگیرانه‌ای اتخاذ کنند و از هزینه‌های ناشی از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری نمایند. علاوه بر این، ادغام داده‌های کلان با ابزارهای شبیه‌سازی، دیدگاه‌های جدیدی در زمینه تحلیل عملکرد سیستم‌ها به وجود آورده است. این داده‌ها می‌توانند از منابع مختلفی چون سنسورها، اینترنت اشیاء و پایگاه‌های اطلاعاتی جمع‌آوری شوند و به غنای مدل‌سازی کمک کنند. این روند، نه تنها به افزایش دقت در پیش‌بینی‌ها کمک می‌کند، بلکه باعث می‌شود تحلیلگران بتوانند تصمیمات بهتری اتخاذ کنند. [39]

در نهایت، با ظهور فناوری‌های نوین، همکاری بین رشته‌ها و تخصص‌های مختلف نیز افزایش یافته است. این تعاملات می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه‌تری منجر شود و به مهندسان کمک کند تا از تجارب و دانش‌های متنوع بهره‌برداری کنند. به این ترتیب، آینده مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار به مراتب روشن‌تر و پویاتر از گذشته خواهد بود.

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار از ابزارهای اساسی در مهندسی است که به بهبود طراحی و عملکرد سیستم‌ها کمک می‌کند. با استفاده از تکنیک‌های درست و نرم‌افزارهای مناسب، مهندسان می‌توانند به تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از رفتار سیستم‌های پیچیده بپردازند. به علاوه، با توجه به چالش‌ها و محدودیت‌های موجود، نیاز به تحقیقات بیشتر و

توسعه ابزارهای پیشرفته‌تر احساس می‌شود. آینده این حوزه با توجه به پیشرفت‌های سریع در تکنولوژی نویدبخش است و می‌تواند به ایجاد سیستم‌های کنترل خودکار با عملکرد بهتر و کارایی بالاتر منجر شود.

در این راستا، نوآوری در الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، افق‌های جدیدی را پیش روی مهندسان قرار می‌دهد. این فناوری‌ها با توانایی تحلیل داده‌های کلان و شناسایی الگوهای نهفته در آنها، امکان طراحی سیستم‌هایی را فراهم می‌آورند که نه تنها به صورت خودکار عمل می‌کنند، بلکه قادر به یادگیری و بهبود عملکرد در طول زمان هستند. این قابلیت باعث می‌شود که سیستم‌ها بتوانند به سرعت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهند و کارایی خود را بهینه کنند.

علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های پیشرفته به مهندسان اجازه می‌دهند تا سناریوهای مختلف را در یک محیط کنترل‌شده آزمایش کنند. این امر کمک می‌کند تا نقاط ضعف و مشکلات احتمالی پیش از پیاده‌سازی واقعی شناسایی شوند. در نتیجه، هزینه‌های توسعه و زمان لازم برای طراحی کاهش می‌یابد و خطرات ناشی از اشتباهات عملیاتی به حداقل می‌رسد. در کنار این تحولات، همکاری بین رشته‌ای بین مهندسان، دانشمندان داده و متخصصان حوزه‌های مختلف علوم کامپیوتر نیز اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. این همکاری نه تنها به تسهیل تبادل ایده‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند منجر به خلق راه‌حل‌های نوآورانه و بین‌رشته‌ای برای چالش‌های پیچیده‌ای شود که در سیستم‌های کنترل خودکار وجود دارند.

با توجه به این تحولات، سرمایه‌گذاری در آموزش و پژوهش در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد. دانشگاه‌ها و موسسات تحقیقاتی باید به پرورش نیروی انسانی متخصص و خلاق بپردازند تا در آینده بتوانند به‌طور مؤثری به نیازهای رو به رشد صنعت پاسخ دهند. همچنین، ایجاد ارتباط بین صنعت و دانشگاه می‌تواند به تحقق ایده‌ها و پروژه‌های نوآورانه کمک شایانی کند. در نهایت، پیشرفت در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل خودکار نه تنها به بهبود عملکرد سیستم‌ها منجر می‌شود، بلکه می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر صنایع مختلف داشته باشد. از خودروسازی و هوافضا گرفته تا پزشکی و تولید، این فناوری‌ها به بهینه‌سازی فرآیندها و افزایش بهره‌وری کمک خواهند کرد. به این ترتیب، آینده‌ای روشن و پرامید در انتظار این حوزه است که به واسطه آن، جامعه بشری از مزایای گسترده‌تری بهره‌مند خواهد شد.

منابع:

1. Nürnberg, T.; Schambach, M.; Uhlig, D.; Heizmann, M.; León, F.P. framework for the design and evaluation of computational cameras. In Proceedings of the SPIE 11061, Automated Visual Inspection and Machine Vision III, Munich, Germany, 21 June 2019; p. 1106102.
2. Mora-Salinas, R.J.; Hernández, H.G.G. Virtual labs: 5 ways to connect with Factory IO for mechatronics engineering courses. In Proceedings of the 2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Tunis, Tunisia, 28–31 March 2022; pp. 485–490.
3. Montenegro, G.; Chacón, R.; Fabregas, E.; Garcia, G.; Schröder, K.; Marroquín, A.; Dormido-Canto, S.; Farias, G. Modeling and Control of a Spherical Robot in the CoppeliaSim Simulator. *Sensors* 2022, 22, 6020.
4. Farley, A.; Wang, J.; Marshall, J.A. Andrew Farley, Jie Wang, Joshua A. Marshall, How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion. *Simul. Model. Pract. Theory* 2022, 120, 102629.
5. Rajesh, G.; Raajini, X.M.; Dang, H. (Eds.) *Industry 4.0 Interoperability, Analytics, Security, and Case Studies*, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2021.
6. Lu, Y. The Current Status and Developing Trends of Industry 4.0: A Review. *Inf. Syst. Front.* 2021, 1–20.
7. Wu, K.; Xu, J.; Zheng, M. Industry 4.0: Review and proposal for implementing a smart factory. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024, 133, 1331–1347.
8. Zhou, K.; Liu, T.; Zhou, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In Proceedings of the 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Zhangjiajie, China, 15–17 August 2015; pp. 2147–2152.
9. Stavropoulos, G.; Violos, J.; Tsanakas, S.; Leivadetas, A. Enabling Artificial Intelligent Virtual Sensors in an IoT Environment. *Sensors* 2023, 23, 1328.
10. Vázquez-Hurtado, C.; Altamirano-Avila, E.; Roman-Flores, A.; Vargas-Martinez, A. Towards a Mixed Virtual Reality Environment Implementation to Enable Industrial Robot Programming Competencies within a Cyber-Physical Factory. In Proceedings of the 2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Kuwait, Kuwait, 1–4 May 2023; pp. 1–8.
11. Kampa, A. Modeling and Simulation of a Digital Twin of a Production System for Industry 4.0 with Work-in-Process Synchronization. *Appl. Sci.* 2023, 13, 12261.
12. Sansana, J.; Joswiak, M.N.; Castillo, I.; Wang, Z.; Rendall, R.; Chiang, L.H.; Reis, M.S. Recent trends on hybrid modeling for Industry 4.0. *Comput. Chem. Eng.* 2021, 151, 107365.
13. Sofia, D.; Giuliano, A.; Gioiella, F.; Barletta, D.; Poletto, M. Modeling of an air quality monitoring network with high space-time resolution. In *Computer Aided Chemical Engineering*; Friedl, A., Klemeš, J.J., Radl, S., Varbanov, P.S., Wallek, T., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; Volume 43, pp. 193–198. ISBN 9780444642356.
14. Nath, S.V.; Dunkin, A.; Chowdhary, M.; Patel, N. *Industrial Digital Transformation: Accelerate Digital Transformation with Business Optimization, AI, and Industry 4.0*; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2020.

15. Nath, S.V.; Schalkwyk, P.V.; Isaacs, D. Building Industrial Digital Twins: Design, Develop, and Deploy Digital Twin Solutions for Real-World Industries Using Azure Digital Twins; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2021.
16. Liyanawaduge, N.N.; Kumarasinghe, E.M.H.K.; Iyer, S.S.; Kulatunga, A.K.; Lakmal, G. Digital Twin & Virtual Reality Enabled Conveyor System to Promote Learning Factory Concept. In Proceedings of the 2023 IEEE 17th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, 25–26 August 2023; pp. 85–90.
17. Novák, P.; Vyskocil, J. Digitalized Automation Engineering of Industry 4.0 Production Systems and Their Tight Cooperation with Digital Twins. *Processes* 2022, 10, 404.
18. Barata, J.; Kayser, I. How will the digital twin shape the future of industry 5.0? *Technovation* 2024, 134, 103025.
19. Lewis, M.; Jacobson, J. Game engines. *Commun. ACM* 2002, 45, 27.
20. Gil, G.; Rosas, J.; Palma, L.B. Specification and Development of Dynamic Systems and Controllers Based on Game Engines. In *CONTROLO 2022: Proceedings of the 15th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing*, Caparica, Portugal, 6–8 July 2022; Lecture Notes in Electrical Engineering; Palma, L.B., Neves-Silva, R., Gomes, L., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022; Volume 930, pp. 285–296.
21. Wang, Z.; Han, K.; Tiwari, P. Digital Twin Simulation of Connected and Automated Vehicles with the Unity Game Engine. In Proceedings of the 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), Beijing, China, 15 July–15 August 2021; pp. 1–4.
22. Goldstone, W. *Unity Game Development Essentials*; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2009.
23. Sanders, A. *An Introduction to Unreal Engine 4*; AK Peters/CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.
24. Tracy, S.; Reindell, P. *CryENGINE 3 Game Development: Beginner's Guide*; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2012.
25. Bradfield, C. *Godot Engine Game Development Projects: Build Five Cross-Platform 2D and 3D Games with Godot 3.0*; Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2018.
26. Cossu, S.M. *Game Development with Game Maker Studio 2*; Apress Media LLC: London, UK, 2019.
27. Gusmão, G.F.; Barbosa, C.R.H.; Raposo, A.B. Development and Validation of LiDAR Sensor Simulators Based on Parallel Raycasting. *Sensors* 2020, 20, 7186.
28. Hu, W.; Zhang, T.; Deng, X.; Liu, Z.; Tan, J. Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. *J. Intell. Manuf. Spec. Equip.* 2021, 2, 1–34.
29. Liu, Y.; Ong, S.; Nee, A. State-of-the-art survey on digital twin implementations. *Adv. Manuf.* 2022, 10, 1–23.
30. Tantik, E.; Anderl, R. Integrated data model and structure for the asset administration shell in industrie 4.0. *Procedia Cirp.* 2017, 60, 86–91.
31. Souza, B.V.; Santos, S.R.B.D.; Oliveira, A.M.D.; Givigi, S.N. Modelling of Virtual Sensors for Manufacturing Process using Gradient Boosting Technique. In Proceedings of the 2023 IEEE International Systems Conference (SysCon), Vancouver, BC, Canada, 17–20 April 2023; pp. 1–8.

32. Paepae, T.; Bokoro, P.N.; Kyamakya, K. From Fully Physical to Virtual Sensing for Water Quality Assessment: A Comprehensive Review of the Relevant State-of- the-Art. *Sensors* 2021, 21, 6971.
33. Martin, D.; Kühl, N.; Satzger, G. Virtual sensors. *Bus. Inf. Syst. Eng.* 2021, 63, 315–323.
34. Mitchell, H.B. *Data Fusion: Concepts and Ideas*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012.
35. Yuriyama, M.; Kushida, T. Sensor-Cloud Infrastructure—Physical Sensor Management with Virtualized Sensors on Cloud Computing. In *Proceedings of the 2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems*, Takayama, Japan, 14–16 September 2010; pp. 1–8.
36. Bose, S.; Gupta, A.; Adhikary, S.; Mukherjee, N. Towards a Sensor-Cloud Infrastructure with Sensor Virtualization. In *Proceedings of the Second Workshop on Mobile Sensing, Computing and Communication (MSCC '15)*, Hangzhou, China, 22 June 2015; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2015; pp. 25–30.
37. Alam, S.; Chowdhury, M.M.R.; Noll, J. SenaaS: An event-driven sensor virtualization approach for Internet of Things cloud. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications*, Suzhou, China, 25–26 November 2010; pp. 1–6.
38. Tiainen, T.; Miettinen, J.; Viitala, R.; Hiekkänen, K.; Kuosmanen, P. Digital Twin and Virtual Sensor for a Rotor System. *Ann. DAAAM Proc.* 2019, 30, 1115–1121.
39. Mukhopadhyay, A.; Reddy, G.R.; Mukherjee, I.; Gopa, G.K.; Pena-Rios, A.; Biswas, P. Generating synthetic data for deep learning using VR digital twin. In *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Cloud and Big Data Computing*, Liverpool, UK, 13–15 August 2021; pp. 52–56.