

نقش علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی در توسعه فناوری

■ محمدرضا معمارجعفری⁺*

عضو هیئت علمی پژوهشکده توسعه تکنولوژی و
مسئول حوزه آمار و شبیه‌سازی گروه پژوهشی مهندسی
صنایع

■ زهره سادات گتمیری^۱

کارشناس پژوهشی پژوهشکده توسعه تکنولوژی

چکیده

در حالی که استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای در علوم مهندسی در حدود نیم قرن پیش شروع شده است، تنها در دهه گذشته **نظریه و فناوری شبیه‌سازی** اثر عظیمی را روی رشته‌های مهندسی گذاشته است. این تغییر قابل ملاحظه اساساً به دلیل توسعه علوم محاسباتی و رایانه‌ای و پیشرفت‌های سریع در تجهیزات و سیستم‌های آن رخ داده است. دلایل دیگری نیز وجود دارد، برای مثال، انبوهی از فناوری‌ها در افق قرار دارد که نمی‌توانیم بدون شبیه‌سازی امید به درک، توسعه، یا به کارگیری آنها داشته باشیم. در این مقاله تأثیر بالقوه پیشرفت‌های علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی روی علم و فناوری را بررسی کرده و چالش‌ها و موانع برای پیشرفت‌های بعدی را مورد شناسایی قرار داده‌ایم. با به کارگیری این علوم می‌توانیم پیشرفت‌های بسیار بزرگی را در جبهه وسیعی مانند پزشکی، علم مواد، امنیت ملی، ساخت، طراحی مهندسی و بسیاری موارد دیگر توقع داشته باشیم. به دلیل طولانی بودن مباحث، مقاله در دو قسمت جداگانه تدوین شده است. در این قسمت، اهمیت علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی به عنوان یک پیشنهاد برای علوم و مهندسی فردا را مورد بررسی قرار داده، برخی از کاربردهای قابل ملاحظه آن را که منافع و امتیازات بزرگی را به جامعه ارایه می‌دهد توصیف نموده و پیشنهادهای آن را عنوان نموده‌ایم. در قسمت دوم مقاله مباحثی مانند بزرگ‌ترین موانع، چالش‌ها و فرصت‌ها در علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی، شامل: "چالش مدل‌سازی و شبیه‌سازی چندمقیاسی، روش‌های تعیین عدم اطمینان، معتبرسازی و صحت‌گذاری مدل، سیستم‌های شبیه‌سازی پویا، حسگرها، معیارها و شبیه‌سازی‌های همگن، چشم‌اندازهای جدید در نرم‌افزار شبیه‌سازی، ضرورت داده-بزرگ در شبیه‌سازی و نقش تجسم در علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی و همچنین الگوریتم‌های نسل بعدی و عملکرد محاسباتی" و بالاخره، اثر علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی روی سیستم تعلیم و تربیت مهندسين، دانشمندان و متخصصین فردا مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی کامپیوتری، علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی، توسعه فناوری، پیشگویی رویدادهای فیزیکی، منطق‌های ریاضی و محاسباتی، عدم اطمینان، معتبرسازی و صحت‌گذاری مدل

* عهده دار مکاتبات

⁺ شماره نمایر: ۰۲۲۱-۶۶۰۲۴۵۴۳ و آدرس پست الکترونیکی: Memarj@jdscharif.ac.ir
^۱ شماره نمایر: ۰۲۲۱-۶۶۰۲۴۵۴۳ و آدرس پست الکترونیکی: Zsgatmiri@jdscharif.ac.ir

۱- مقدمه

که اندازه‌گیری‌ها غیر قابل انجام یا خیلی گران هستند فراهم می‌کند.

"علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی"، به عنوان موضوعی که پایه علمی و ریاضی را برای شبیه‌سازی سیستم‌های مهندسی شده فراهم می‌نماید تعریف می‌شود. چنین سیستم‌هایی از دستگاه‌های میکروالکترونیک تا اتومبیل‌ها، هوانورد‌ها و حتی زیرساخت‌های میدان‌های نفتی و شهرها گسترش دارد. در یک کلمه، "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی" دانش و فنون رشته‌های مهندسی سنتی مانند برق، مکانیک، عمران، شیمی، هوافضا، هسته‌ای، زیست‌پزشکی، و علوم مواد را با دانش و فنون رشته‌هایی مانند علوم کامپیوتر، ریاضیات، و علوم فیزیک و اجتماعی در می‌آمیزد. به عنوان یک نتیجه، مهندسی بهتر قادر خواهند بود سیستم‌های تأثیرگذار روی تقریباً تمام جنبه‌های زندگی و کار، شامل محیط، امنیت و ایمنی، و محصولات که استفاده یا صادر می‌گردد، را پیشگویی و بهینه نمایند.

در حالی که استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در علوم مهندسی در مدت نیم‌قرن پیش شروع شده است، تنها در دهه گذشته نظریه فناوری شبیه‌سازی اثر عظیمی را روی رشته‌های مهندسی گذاشته است. این تغییر قابل ملاحظه اساساً به دلیل توسعه علوم محاسباتی و رایانه‌ای و پیشرفت‌های سریع در تجهیزات و سیستم‌های آن رخ داده است. دلایل دیگری نیز وجود دارد. برای مثال، انبوهی از فناوری‌ها در افق می‌باشند که نمی‌توانیم بدون شبیه‌سازی امید به درک، توسعه، یا به کارگیری آنها داشته باشیم. بسیاری از آن فناوری‌ها برای رهبری مستمر در علوم و مهندسی حیاتی هستند. بی تردید، تحقیقات در "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی" به سرعت در حال حیاتی شدن برای امنیت، بهروزی و سعادت تمام کشورها است [۱۹].

این مقاله تأثیر بالقوه پیشرفت‌های "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی" روی علم و فناوری را بررسی کرده و چالش‌ها و موانع برای پیشرفت‌های بعدی را مورد شناسایی قرار می‌دهد. برای مثال، باید به مشکلات ذاتی در مدل‌سازی چندمقیاسی، توسعه الگوریتم‌های نسل بعدی، و طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کاربردی داده محور پویا فائق آمده و روش‌های

برای متجاوز از یک دهه، جوامع علوم و مهندسی بیش از پیش آگاه شده‌اند که شبیه‌سازی کامپیوتری ابزاری ضروری برای مرتفع کردن تعداد کثیری از مسایل علمی و فن‌سالارانه که کشورها با آن مواجه هستند، می‌باشد. برای تعریف دقیق تر رشته شبیه‌سازی کامپیوتری و ارزیابی اثر بالقوه آن روی زمینه‌های مهم علوم مهندسی، در آوریل ۲۰۰۴، بنیاد ملی علوم^۲، در آمریکا کارگاهی را در مورد **علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی**^۳ سازماندهی نمود. با حمایت و تشویق گسترده از نتایج کارگاه، این بنیاد یک میزگرد نشان برتری^۴ را در مورد این علوم اختصاص داد. هدف میزگرد، بررسی در مورد چالش‌ها و منافع بالقوه این علوم، و نیز موانع توسعه آن بود. به علاوه، ارایه پیشنهادها در مورد چگونگی پشتیبانی کردن از این رشته در بنیاد، دانشگاه، صنعت، آزمایشگاه‌های ملی، و آژانس‌های دولتی به عهده میزگرد گذاشته شد. کارگاه دوم در مورد علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی در سپتامبر ۲۰۰۵ برگزار گردید که در آن زمان میزگرد ورودی‌هایش را در مورد این علوم از هواداران و حامیان وسیعی دریافت کرد [۱۹].

شبیه‌سازی، به کاربرد مدل‌های کامپیوتری برای مطالعه و پیشگویی رویدادهای فیزیکی یا رفتار سیستم‌های مهندسی شده^۵ مربوط می‌شود. توسعه شبیه‌سازی کامپیوتری از یک منبع عمیق دانش و منطق‌های علمی، ریاضیاتی، محاسباتی و مهندسی استخراج شده است. شبیه‌سازی کامپیوتری با توسعه مبانی نظری و حیطه متنوع کاربردهای خود، به عنوان ابزار قدرتمندی که متحول‌سازی هدایت مهندسی و علوم را در قرن بیست و یکم نوید می‌دهد ظهور کرده است. این ابزار، گستره‌ای از علوم نظری را معرفی می‌کند که در آن مدل‌های ریاضی مبنا هستند. چنین مدل‌هایی کوشش می‌نمایند پیشگویی‌های فیزیکی یا نتایج نظریه‌های علمی را مشخص سازد. شبیه‌سازی می‌تواند برای کشف نظریه‌های جدید و طراحی آزمایش‌های جدید به منظور آزمون این نظریه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. شبیه‌سازی همچنین جایگزین توانمندی را برای فنون علوم تجربی وقتی که پدیده‌ها قابل مشاهده نیستند یا هنگامی

^۲ National Science Foundation (NSF)

^۳ Simulation Based Engineering Science (SBES)

^۴ Blue Ribbon (Longman Dic: the first prize in a competition, sometimes consisting of a small piece of blue material)

^۵ شامل طراحی، برنامه‌ریزی، ساخت و ...

پیشرفت‌ها، به هر حال باید به موانع اصلی علوم، مهندسی، جامعه‌شناسی، و تعلیم و تربیت فائق آمد. پیشرفت، نیاز به توفیق معنی‌دار در تحقیقات، تغییر در فرهنگ تعلیم و تربیتی و تحقیقاتی نهادهای آموزشی، و تغییر در ساختار سازمانی سیستم تعلیم و تربیت خواهد داشت. برای زمینه‌های مهندسی، پیشرفت‌های شبیه‌سازی کامپیوتری امکانات ارزشمندی را پیشنهاد می‌نماید. بهره‌برداری کامل از توانایی‌های جدید، به هر صورت، باید پذیرای تحقیقات پایه‌ای در مؤلفه‌های علمی مدل-سازی، شبیه‌سازی و محاسبات، در بین سایر زمینه‌ها باشد. **به ترکیب این فعالیت‌های تحقیقاتی پایه‌ای به عنوان "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی"، یا (در سراسر مقاله) "عم‌مش" ارجاع داده شده است.**

در این مقاله، ابتدا این شاخه جدید، **عم‌مش**، را توضیح داده و برخی از منافع و مزیت‌های قابل ملاحظه‌ای را که برای فناوری‌هایی که زندگی ما را سالم‌تر، امن‌تر و بهتر می‌سازند موجب می‌شود، شناسایی می‌کنیم. سپس، موانع اصلی و فرصت‌های توسعه آن و در ادامه اثر **عم‌مش** را روی تحقیقات ملی و منابع تعلیم و تربیتی، اهداف و سازمان‌ها مورد بررسی قرار می‌دهیم.

آن چیز که مسلم به نظر می‌رسد این است که در آینده نزدیک شبیه‌سازی کلید رسیدن به پیشرفت در علوم و مهندسی می‌باشد [۱۹]. در واقع، مطالعات مستقل توسط متخصصین از چشم‌اندازهای گوناگون به ندرت در چنین توافقی بوده است که: "شبیه‌سازی کامپیوتری دارای یک اثر فوق‌العاده روی تمام زمینه‌های مهندسی، کشفیات علمی و تلاش برای حل مسایل عمده اجتماعی بوده است و این اثر را در آینده نیز خواهد داشت". این پیام به یافته‌های اصلی بسیاری از تحقیقات کلیدی تنیده شده است. برای مثال، گزارش پیتاک^{۱۰} [۳] نیاز به توسعه علوم محاسباتی را برای رقابت‌پذیری مورد تأکید قرار می‌دهد، و گزارش‌های **سایداک**^{۱۱} [۱۸] و **اسکالس**^{۱۲} [۱۰ و ۱۱] موقعیت‌هایی را برای کشف علمی در آخرین توانایی‌های امروز شبیه‌سازی شناسایی کرده و فرهنگ جدید علمی کار تیمی بین رشته‌ای را برای درک آن توانایی‌ها ایجاد می‌نماید. به علاوه، نقشه راه برای تجدید حیات محاسبات پیشرفته [۱۶] و طرح فدرال برای محاسبات

تعیین عدم اطمینان و معتبرسازی و صحه‌گذاری^۶ مدل را بهبود بخشیم. همچنین باید راه‌های بهتر را برای یکپارچه کردن محاسبه داده‌های زیاد^۷، تجسم^۸، و شبیه‌سازی تعیین کنیم. مهم-مهم‌تر اینکه، باید سیستم تعلیم و تربیت خود را برای پرورش مطالعه بین رشته‌ای مورد نیاز این علوم بازسازی کنیم. می‌توانیم پیشرفت‌های بسیار بزرگی را در جبهه وسیعی مانند پزشکی، علم مواد، امنیت ملی، ساخت، طراحی مهندسی و بسیاری موارد دیگر توقع داشته باشیم.

در ادامه، در بخش ۲، اهمیت "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی" به عنوان یک پیشنیاز برای علوم و مهندسی فردا مورد بررسی قرار گرفته و در بخش ۳، برخی از کاربردهای قابل ملاحظه آن، که منافع و امتیازات بزرگی را به جامعه ارایه می‌دهد توصیف شده است. در بخش ۴، به نتیجه‌گیری از قسمت اول مقاله پرداخته و برخی پیشنهادات عنوان گردیده است.

(در قسمت دوم مقاله، مسائل اصلی مانند بزرگ‌ترین موانع، چالش‌ها و فرصت‌ها در علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی، شامل: "چالش مدل‌سازی و شبیه‌سازی چندمقیاسی؛ روش‌های تعیین عدم اطمینان، معتبرسازی و صحه‌گذاری مدل؛ سیستم‌های شبیه‌سازی پویا، حسگرها، معیارها و شبیه‌سازی‌های همگن؛ چشم‌اندازهای جدید در نرم‌افزار شبیه‌سازی؛ ضرورت داده-بزرگ^۹ در شبیه‌سازی، نقش تجسم در علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی؛ الگوریتم‌های نسل بعدی و عملکرد محاسباتی" و بالاخره، اثر "علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی" روی سیستم تعلیم و تربیت مهندسین، دانشمندان و متخصصین فردا مورد بررسی قرار خواهد گرفت.)

۲- علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی؛ یک پیشنیاز برای علوم و مهندسی فردا

امروزه رشته شبیه‌سازی کامپیوتری در آستانه یک عصر جدید است. پیشرفت‌های مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم‌های محاسباتی، سرعت رایانه‌ها و علم و فناوری محاسبات داده‌های زیاد روشی را برای بهبودهای بی‌سابقه در بهداشت، امنیت، بهره‌وری، و رقابت فراهم آورده است. برای تشخیص و درک این

⁶ Validation , Verification

⁷ Data-Intensive (Longman Dic: involving or needing a lot of data)

⁸ Vizualization

⁹ Big Data

¹⁰ PITAC

¹¹ SciDAC

¹² SCaLes

زیست‌شناسی) و علوم زمین^{۱۸} (مانند بوم‌شناسی)، و (۳) بهبودهای فراوان برای کیفیت، درستی و مطلوبیت پیش‌بینی‌های محاسباتی. به طور واضح، **ع‌م‌م‌ش** آغازگر فناوری‌ای می‌شود که نه تنها دامنه دسترسی و توانمندی هر رشته مهندسی را گسترش می‌دهد بلکه بهبودهای معنی‌دار در سلامتی، امنیت، رقابت و ثروت عمومی را نوید می‌دهد.

اگر قرار است از مزایای **ع‌م‌م‌ش** بهره‌مند شویم، باید ابتدا به موانع فائق آییم. اول، باید روشی را که در سر پنداشته و شبیه‌سازی را انجام می‌دهیم متحول سازیم. این تحول نیاز دارد که یاد بگیریم کشفیات جدید را که باعث ساده‌سازی و بهبود شبیه‌سازی‌های چندمقیاسی و چندرشته‌ای می‌شوند ملحق کنیم. دوم، باید پیشرفت‌های معنی‌داری را در حمایت از فناوری‌ها، شامل محاسبات مقیاس بزرگ، مدیریت داده‌ها، و الگوریتم‌ها داشته باشیم. سوم، باید در عُرف‌های تعلیم و تربیتی خود برای هماهنگ‌شدن با نیازهای تحقیقاتی و تربیتی **ع‌م‌م‌ش** تجدیدنظر و آنها را متحول کنیم. و چهارم، باید روش سرمایه‌گذاری و هدایت تحقیقات را تغییر دهیم.

تا کنون، توسعه‌های شبیه‌سازی روی موج پیشرفت‌های فناوری اطلاعات نرم‌افزار و سخت‌افزار سوار شده‌اند. به دلیل این پیشرفت‌ها، شبیه‌سازی ابزاری بسیار مؤثر و اثر بخش در علوم تجاری و تجربیات مهندسی شده است. شبیه‌سازی با سیستم‌های حقیقی سر و کار دارد. به همین دلیل، دسترسی بی‌نظیری را به شرایط دنیای واقعی فراهم می‌آورد. به علاوه، شبیه‌سازی هیچ یک از محدودیت‌های طراحی‌ها و آزمون‌های تجربی، که اغلب به دلیل شرایط و محدودیت‌های هزینه‌ای، حیطه‌های پارامتری غیرحقیقی، و حتی محدودیت‌های تحمیلی عهدنامه‌ها/پیمان‌ها یا نگرانی‌های سلامتی و محیطی مانع ایجاد می‌کنند را ندارد. به دلایل مذکور، شبیه‌سازی کامپیوتری با پیروزی‌های جدی در قرن بیستم پذیرفته و متعبر شده است. برای مثال، در تولید مدل‌های پیش‌بینی کننده آب و هوا، تغییرات آب و هوایی و رفتار اتمسفر و همچنین در طیف‌های وسیعی از آنالیز مهندسی و طراحی و ساخت محصولات لازم شده است. دستاوردهای آن در کاربردهای زیست‌دارویی به طور وسیعی مورد بحث است. طراحی سیستم‌ها در دفاع، ارتباطات، و حمل‌ونقل نیز به شبیه‌سازی کامپیوتری اتکا دارد. در قلب این موفقیت‌ها، به‌رحال، منطق‌های شبیه‌سازی می‌باشد که سابقه چند ده ساله دارد.

پیشرفته [۹] هر دو نوآوری‌هایی را در معماری رایانه برای به حساب آوردن شبیه‌سازی پیشرفته ایجاب می‌کند. گزارش آینده محاسبات عالی (آبر محاسبات^{۱۳}) [۸] نقش دولت فدرال آمریکا را در استمرار بخشیدن آخرین پیشرفت‌های آبر محاسبات مورد بررسی قرار می‌دهد، و گزارش زیرساخت‌سایبر [۱] یک برنامه متفاوت از ضرورت‌های تحقیقات به هم مرتبط را به طور خلاصه بیان می‌نماید که در نهایت شبیه‌سازی را به فناوری‌های ارتباطات و داده‌ها می‌کشاند. با شروع از گزارش ۱۹۸۲، لاکس، [۱۲] و ادامه‌دادن با تعدادی از گزارش‌های ارائه شده در این قرن [۲، ۵، ۶ و ۱۵]، مطالعات، نگاه مشابهی را با ملاحظه اهمیت شبیه‌سازی مطرح می‌کند.

درک پتانسیل کامل **ع‌م‌م‌ش** نیاز به یک انقلاب در فناوری شبیه‌سازی دارد. "**علم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی**" با "**شبیه‌سازی متداول**" متفاوت است؛ در واقع، این علم تحقیقی است که روی مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده، مهندسی (طراحی) شده مرتبط با هم و فراگیری نتایجی که حائز استانداردهای معین دقت و قابلیت اطمینان هستند متمرکز می‌شود. در واقع، چشم‌انداز **ع‌م‌م‌ش** شامل خیلی بیشتر از مدل‌سازی حادثه فیزیکی می‌باشد. این چشم‌انداز روش‌های جدید، دستگاه‌ها، رویه‌ها، فرآیندها و راهبردهای برنامه‌ریزی را توسعه می‌دهد. کشف‌های **ع‌م‌م‌ش** دارای کاربردهای مستقیم برای بهینه‌سازی، کنترل، تعیین عدم اطمینان، صحنه‌گذاری و معتبرسازی، تصمیم‌سازی و پاسخ زمان حقیقی^{۱۴} می‌باشند. به طور خلاصه، **ع‌م‌م‌ش**، شبیه‌سازی را تا سطح جدید قدرتمندی بالا می‌برد، که امیدواریم اکثر مسایل مشکل و سرسخت مدل‌سازی، طراحی مهندسی، ساخت، و تحقیق علمی را حل کنیم. در حقیقت، درگیری‌های فنون پیشرفته شبیه‌سازی همان قدر وسیع و نامحدود می‌باشد که می‌توانیم توقع داشته باشیم **ع‌م‌م‌ش** باعث ایجاد تعداد زیادی فناوری‌های جدید تهاجمی^{۱۵} و میدان دادن به کشف‌های علمی جدید معنی‌دار بشود.

برای مثال، تعدادی از موفقیت‌هایی را که **ع‌م‌م‌ش** پدید می‌آورد عبارتند از: (۱) وسایلی برای درک و کنترل پدیده‌های چندمقیاسی، چند فیزیکی؛ (۲) توسعه‌های اساسی در نانوفناوری، زیست‌دارو^{۱۶}، مواد، انرژی و محیط، و علوم زندگی^{۱۷} (مانند

¹³ Supercomputing

¹⁴ Real-Time Response

¹⁵ Aggressive

¹⁶ Biomedicine

¹⁷ Life science

¹⁸ Earth science

بوده در حالی که در ایالات متحده به صورت راکد یا در حال نزول می‌باشد.

کلید جبران آن ضررها، رهبری در شبیه‌سازی است.

ایالات متحده عقیده دارد:

۱- آنها باید در صف مقدم کوشش برای ساده‌تر کردن و قابل اطمینان‌تر کردن شبیه‌سازی باشند.

۲- آنها باید توانایی‌های شبیه‌سازی را برای تجزیه سیستم‌های پیچیده‌تر و کسب زمان حقیقی از داده‌های زمان حقیقی گسترش دهند.

۳- شبیه‌سازی نباید دیگر به حاشیه‌های یک مجموعه مهارت-های دانشجوی مهندسی تنزل رتبه پیدا کند؛ در عوض، باید یک قسمت اصلی برنامه آموزشی و درسی مهندسی، که نقشی را در تعلیم و تربیت اثربخش بازی می‌نماید، باشد [۱۹].

شبیه‌سازی کامپیوتری برای توسعه فناوری‌های دیگر، شامل میکرو الکترونیک، مواد پیشرفته، فناوری زیست، فناوری نانو، داروسازی، پزشکی، و دفاع و امنیت، ضروری شده است. بسیاری از توفیقات در این فناوری‌ها از شبیه‌سازی کامپیوتری و کشف علمی مبتنی بر شبیه‌سازی مشتق شده است. بی‌گمان لازم است شبیه‌سازی کامپیوتری به تعلیم و تربیت و تجربه مهندسی تلفیق شود. به هر حال، برای انجام چنین کاری، به منابع فکری قوی و یک الزام ملی برای عم‌م‌ش نیاز است.

۳- کاربردهای کارساز و منافع اجتماعی عم‌م‌ش

در این بخش برخی از کاربردهای مهم عم‌م‌ش مرور شده و چالش‌ها و منافع هر یک مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- عم‌م‌ش در پزشکی / دارو:

اکثر بیماری‌ها (مانند بیماری قلبی، سرطان، سکتة مغزی، و بیماری‌های تنفسی) و درمان‌های آنها (جراحی، سوندگذاری، یا دارویی) شامل پاسخ‌های پیچیده فیزیکی و تعامل بین سیستم‌های زیست‌شناختی^{۲۰}، از مقیاس‌های مولکولی تا موجود زنده می‌باشد. روش‌های شبیه‌سازی می‌تواند درک ما را از این بیماری‌ها و درمان‌ها بسیار افزایش داده، و به علاوه، درمان را بهبود بخشد. علوم محاسباتی قبلاً اثرات معنی‌داری را در بسیاری از حیطه‌های زیست‌پزشکی^{۲۱} به ویژه جنومیک^{۲۲} و پروتئومیک^{۲۳}

رقیبان جهانی آمریکا به خوبی از پتانسیل قوی شبیه‌سازی کامپیوتری آگاه هستند. در سراسر اروپا و آسیا، دولت‌ها در حال سرمایه‌گذاری عمده در محاسبات (استفاده از رایانه)، مدل‌سازی ریاضی و رایانه‌ای، الگوریتم‌ها، شبکه‌سازی، و به طور کلی در مهندسی و علوم محاسباتی هستند. در واقع، این ملت‌ها در حال ساختن فناوری‌هایی هستند که ایالات متحده در قرن بیستم پیشرو بوده است.

بر طبق [۳: ۹] "از سال ۱۹۸۸، اروپای غربی مقالات ژورنالی علوم و مهندسی بیشتری را نسبت به ایالات متحده تولید کرده است و رشد کل در مقالات تحقیقاتی به ترتیب در آسیای شرقی (۴۹۲ درصد) بالاترین، سپس ژاپن (۶۷ درصد) و اروپا (۵۹ درصد) در مقایسه با ۱۳ درصد برای ایالات متحده، بوده است. در سطح جهانی، سهم ایالات متحده مطابق استنادها و نقل قول‌ها در مقالات علمی در حال کوچک شدن، از ۳۸ درصد در ۱۹۸۸ به ۳۱ درصد در سال ۲۰۰۱ بوده است." در آلمان، ۳۶ درصد در چین، ۵۹ درصد ژاپن، ۶۶ درصد دانشجویان کارشناسی در علوم و مهندسی درجه لیسانس دریافت می‌کنند. در مقابل، تنها ۳۲ درصد دانشجویان لیسانس در ایالات متحده چنین درجاتی را به دست می‌آورند [۱۷، ۴، ۱۳].

"از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ میلادی، سهم ایالت متحده از صادرات جهانی فناوری بالا^{۱۹} از ۳۱ درصد به ۱۸ درصد تنزل کرده است، در حالی که سهم کشورهای آسیایی از ۷ به ۲۵ درصد ترقی کرده است" [۳: ۸]. از سال ۲۰۰۱، تراز تجاری ایالات متحده در محصولات با فناوری بالا منفی بوده است. رقیب اصلی اقتصاد جهانی ایالات متحده کشور چین است. در سال ۲۰۰۴ میلادی تقریباً ۴۹۸/۰۰۰ مهندس در سطح لیسانس در کشور چین فارغ‌التحصیل شده‌اند و در مقایسه، هندوستان ۳۵۰/۰۰۰ و ایالات متحده، ۷۰/۰۰۰ مهندس فارغ‌التحصیل داشته است [۴ و ۱۷]. هزینه استخدام یک مهندس در چین به طور تقریبی یک دهم تا یک ششم هزینه در ایالات متحده است. به هر حال برخی استدلال می‌نمایند که محصول مهندسیین، دانشمندان کامپیوتر، و متخصصین فناوری اطلاعات در بازارهای جهانی ایالات متحده، وقتی داده‌های نظیر به نظیر از کشورهای نماینده مقایسه می‌شوند، رقابتی باقی می‌ماند [۷]. معه‌ذا، حتی رقیبان آمریکا در عم‌م‌ش معتقدند که هزینه‌ها و مخارج تحقیقات عم‌م‌ش در اروپا و آسیا به سرعت در حال گسترش

²⁰ Biological systems

²¹ Biomedical

²² Genomics

²³ Proteomics

¹⁹ High-Tech

شبیه‌سازی عملکرد طراحی‌های متناوب دستگاه برای حیطه‌ای از بیماران مجازی هدایت کرده و طراحی‌های خود را برای شرایط مختلف بیمار بهبود بخشند. به عنوان یک نتیجه، این آزمایش‌های بالینی مجازی پیش از آزمایش‌های حیوانی و انسانی می‌تواند به دستگاه‌های امن‌تر، اثربخش‌تر، کاهش هزینه‌های توسعه و کوتاه کردن زمان تا بازار منجر شود.

سازندگان در رشته‌های داروسازی و فناوری زیست نیز می‌توانند از روش‌های **عم‌ش** سود ببرند. برای مثال، فنون هدفمند حمل دارو به طور فزاینده‌ای برای معالجه حیطه وسیعی از بیماری‌ها، شامل بیماری قلبی (برای مثال، استنت‌های شستشوی دارو)، سرطان (برای مثال، شیمی‌درمانی‌های محلی) و بیماری‌های تنفسی کرونیک (برای مثال استنشاق‌کننده‌های شفابخش) در حال استفاده هستند. در همه آن حیطه‌های نوع‌آوری، **روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی** می‌توانند برای مدل‌سازی حمل داروها از طریق سیستم‌های تنفسی و گردشی و برای تعیین تجمع‌های محلی برای استفاده در مدل‌های حرکت دارویی^{۲۷} سوخت و ساز دارویی^{۲۸} مورد استفاده قرار گیرند.

در حال حاضر، عناوین مهم در تحقیق سرطان، مکانیزم‌های "چسبندگی و هجوم سلولی" و گره‌های عصبی پیام‌رسان^{۲۹} می‌باشند. درک بهتر از این مکانیزم‌ها برای پیشرفت‌های تحقیق سرطان و زیست‌شناسی اعصاب^{۳۰} بسیار مهم است. توسعه در فناوری‌های چندمقیاسی **عم‌ش** برای تحقیقات در ساختارهای سلولی و مکانیک سلول، مانند توسعه دستگاه‌های نوظهور و جدید اندازه‌گیری اظطراری سلولی، به توضیح معماری‌های دینامیک سلولی و مکانیزم موتیلیتی^{۳۱} سلولی کمک خواهند کرد.

فناوری‌های **عم‌ش** به ما کمک می‌نماید که بتوانیم درک خود را از وظایف سلولی بهبود بخشیده و توانایی خود را برای تمایز سلول‌های نرمال از سلول‌های سرطانی افزایش دهیم. اعتقاد بر این است که تهاجم سلول‌های تبدیل شده به بافت‌های دیگر فرآیند موسوم به متاستاسیز^{۳۲} مقدمه توسعه بافت سرطان می‌باشد.

داشته است. یک چالش فعلی، کاربرد **عم‌ش** برای پزشکی بالینی و مطالعه سیستم‌های زیست‌شناختی در مقیاس‌های سلولی، بافت، و اندام می‌باشد.

تجربه پزشکی و مهندسی تشابهات زیادی دارند. هر دو رشته‌های حل مسئله هستند، و هر دو نیاز به درک سیستم‌های پیچیده دارند. فرآیندهای طراحی مهندسی، به هر حال، مبتنی بر نتایج پیش‌بینی شده هستند. اغلب، راه‌حل‌های مهندسی به طور همزمان نیاز به برآوردن معیارهای متعدد دارند. این راه‌حل‌ها اغلب نیاز به رایانه پیشرفته و فناوری‌های تحلیل دارند. برعکس، تجربه پزشکی از یک رویکرد "آنها را بساز و آنها را خراب کن"^{۲۴} استفاده می‌کند. از نظر تاریخی، الگوی پزشکی، تشخیص^{۲۵} و تخصص تجربی^{۲۶} را ترکیب می‌نماید، یعنی، پزشکان از آزمون-های گوناگون برای تشخیص یک شرط پزشکی استفاده کرده و سپس یک معالجه یا مداخله را بر مبنای داده تجربی و تجربه حرفه‌ای طراحی می‌نمایند.

یک برنامه در **عم‌ش** می‌تواند به رویکردهای جدید برای تجربه پزشکی منجر شود، رویکردهایی که می‌تواند روی هم رفته به نام "**پزشکی مبتنی بر شبیه‌سازی**" نامیده شود. منطق‌های جدید **عم‌ش**، تا آن موقع، با نفوذ و تأثیر پیشرفت‌های فوق‌العاده در تصویر برداری پزشکی و محاسبات کارآمد، می‌توانند ابزار مهندسی مدرن را به تجربه پزشکی ارائه دهند. برای مثال، پزشکان قادر می‌شوند از شبیه‌سازی‌ها که با داده‌های کالبدشناختی و فیزیولوژیکی یک بیمار خاص راه‌اندازی شده است برای **پیش‌گویی** خروجی‌های روبه‌ها و شاید برای **طراحی** معالجات بهینه برای بیماران خاص استفاده کنند. این توانایی برای پیش‌گویی نتایج معالجه و روش‌های طراحی، مسلماً یک امکان مهیج را برای پزشکی ارائه می‌نماید.

نه فقط پزشکان می‌توانند معالجات بهتری را برای بیماران بیندیشند، بلکه سازندگان می‌توانند از روش‌های **عم‌ش** برای پیش‌گویی عملکرد دستگاه‌های پزشکی خود در بیماران مجازی استفاده کنند. رویه‌های آزمون فیزیکی و حیوانی که در حال حاضر قبل از آزمایش‌های انسانی استفاده می‌شود محدودیت‌های معنی‌داری را در توانایی خود برای ارائه تغییرات در کالبدشناسی و فیزیولوژی انسان دارند. با متدهای **عم‌ش**، سازندگان می‌توانند نمونه‌سازی مجازی از دستگاه‌های پزشکی را با

²⁷ Pharmacokinetic

²⁸ Drug metabolism

²⁹ Signaling pathways

³⁰ Neurobiology

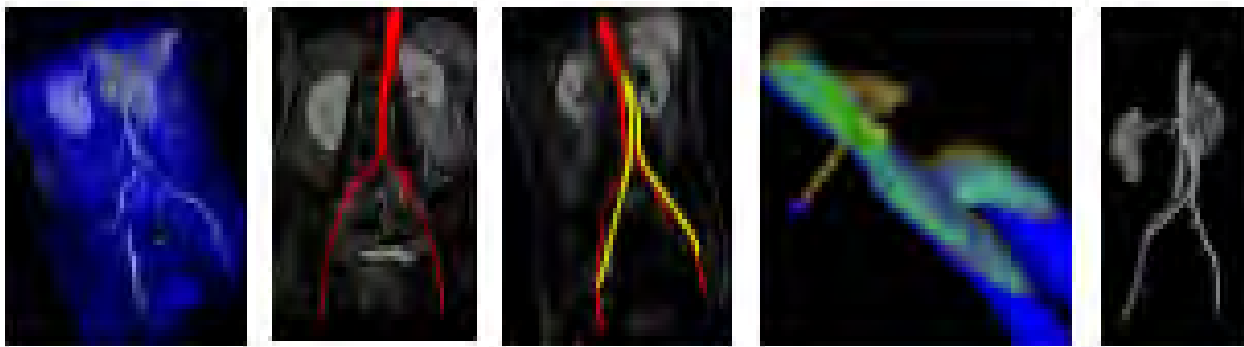
³¹ Motility

³² Metastasis

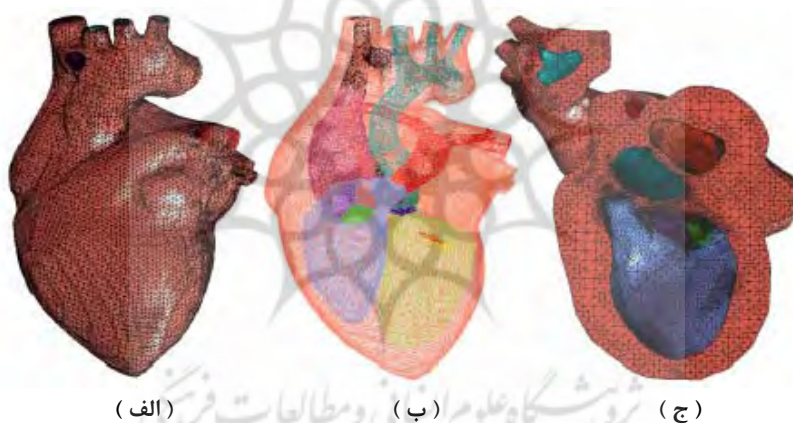
²⁴ Build them and bust them

²⁵ Diagnosis

²⁶ Empiricism



شکل ۱: مثالی از یک رویکرد پزشکی مبتنی بر شبیه‌سازی که برای طراحی یک روش جراحی بای‌پس^{۳۳} برای یک بیمار با بیماری عضله انسدادی قلب در سرخرگ‌های آنورت و ایلیاک^{۳۴} به کار رفته است. از چپ به راست، داده تصویری رزونانس مغناطیسی، یک مدل توپوهندسی قبل از کار، یک طرح عملی و قابل اجرا، سرعت جریان خون محاسبه شده در آنورت و انتهای پروکسیمال بای‌پس، و داده تصویری پس از کار مورد استفاده برای پیش‌گویی‌های معتبر نشان داده شده است. پیشرفت‌های فکورانه در رشته‌های عمده می‌توانست خیلی زیاد این رویکردها را با امکان کنترل انعطاف‌پذیر زمان حقیقی رویه‌های جراحی از طریق ترکیب ابزارهای شبیه‌سازی و فناوری‌های تصویرسازی بهبود بخشد.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۲: مدل‌سازی سیستم‌های زیست پزشکی به طور فزاینده‌ای در حال پیشرفت هستند. در این جا نمونه‌ای از یک مدل قلب سه بعدی، با مش‌بندی چهاروجهی وجود دارد [۲۰] که از داده‌های به دست آمده از دانشکده پزشکی دانشگاه نیویورک، توسعه داده شده است [۱۴]. (الف) منظره بیرونی. (ب) آشکارسازی مرزی ارائه شده در قاب سیمی. (ج) منظره برش عرضی مش‌بندی. فن‌آوری‌های مدل‌سازی بیمار خاص نیاز دارد که به طور معنی‌دار برای حقیقی ساختن رویای پزشکی مبتنی بر شبیه‌سازی پیشرفته شود. منافع، به هر حال، چشمگیر هستند: مدل‌های دینامیکی بدقوارگی^{۳۵}، جریان خون، و اثرات مقایسه مناسب مویرگ ممکن است به طور وسیعی پزشکی عروقی قلبی^{۳۶} را پیشرفت دهد.

³³ Bypass

³⁴ Iliac

³⁵ Deformation

³⁶ Cardiovascular

۳-۲- ع‌م‌ش در امنیت ملی پیش‌گویانه:

در وسیع‌ترین حس، طراحی مهندسی برای امنیت، شامل توسعه سیستم‌های محافظت جوامع انسانی و زیرساخت‌های مصنوعی و طبیعی است که از آنها پشتیبانی می‌نماید. این سیستم‌ها ما را از طیفی از تهدیدهای خصمانه (برای مثال تروریست‌ها)، محیطی (برای مثال آلودگی آب و هوا) و یا طبیعی (برای مثال زلزله یا طوفان شدید) **حفاظت** می‌کند. سیستم‌های حفاظت‌کننده باید کل زیرساختار پشتیبانی ما، شامل ساختمان‌ها، سیستم‌های حمل و نقل، غذا، آب، و توزیع برق، ارتباطات؛ و انهدام زباله را **محافظت** نماید.

روش‌های **ع‌م‌ش** می‌تواند نقش مهمی را در طراحی و بهینه‌سازی این سیستم‌های **حفاظتی** بازی نموده و به نحو بارزتر، **ع‌م‌ش** به برنامه‌ریزان اضطراری ما اجازه می‌دهد نه تنها نتایج تهدیدها (برای مثال، پرتاب غیرمنتظره یا ناشی از قصد قبلی یک عامل بیولوژیکی یا شیمیایی سمی) را، بلکه اثرات اقدامات متقابل (ضدعملیات) را نیز پیش‌گویی کند. با کمک شبیه‌سازی‌های پیش‌گویانه، مهندسیین قادر خواهند بود زیرساخت‌هایی را طراحی و بهینه‌سازی نمایند که برای طیف وسیعی از تهدیدها نفوذناپذیر خواهد بود. به علاوه، با توانایی هدایت شبیه‌سازی‌های زمان حقیقی، یک تیم اورژانس قادر خواهد بود منطقی‌ترین و معقول‌ترین واکنش به یک بحران را شناسایی کند.

ع‌م‌ش می‌تواند به مهندسیین و برنامه‌ریزان، یک چشم‌انداز عملیاتی نسبتاً بزرگی از سیستم‌ها را ارائه دهد که جامعه را کامل کنند. برای مثال، **ع‌م‌ش** توانایی شبیه‌سازی اداره یک شهر کامل را به صورت یک سیستم تک بدهد و این کاملاً امکان‌پذیر بوده زیرا، شبیه‌سازی‌های چندمقیاسی زیرسیستم‌های چندگانه و فرآیندها، مانند واکنش‌های ساخت‌یافته، حمل‌مایدات آلاینده، توزیع برق، و سیستم‌های حمل و نقل، به علاوه واکنش جامعه انسانی، را یکپارچه می‌کند.

این پندار از یک "شهر دیجیتالی" نیاز به فراهم آوردن داده از جزئیات بدون سابقه خواهد داشت. نه تنها سیستم مجبور است "داده- ایستا"^{۳۷}، یعنی، داده‌ای که زیربنای مستقرشده را رعایت کند، بلکه همچنین مجبور خواهد بود به طور مستمر "داده پویا"^{۳۸}، یعنی، داده‌ای که به تغییر ثابت تن در می‌دهد را به

دست آورد. برای مثال، شامل اندازه‌گیری‌های پیوسته از غلظت‌های آلاینده هوا و آب، نرخ‌های جریان هوا، آب و فاضلاب‌ها؛ مکان‌ها و سرعت‌های حمل و نقل و سایر دارایی‌های قابل انتقال (برای مثال، قطارها و ماشین‌آلات سنگین)؛ و تراکم‌ها و جابه‌جایی‌های مردم و اتومبیل‌ها می‌شود.

مفاهیم و روش‌های **ع‌م‌ش** نوید متحول کردن تجربه برنامه‌ریزی شهری، حمل و نقل، مهندسی ساختاری و محیطی، و مدیریت شهری و محیطی را می‌دهد. برای درک بینش‌های شهر دیجیتالی، به هر حال، باید اذعان کنیم که مقدار زیادی از تحقیقات باید به منزله پیشقدم راه باشد. در زیر تعدادی از زمینه‌های نیازمند توسعه ارائه می‌شود:

- **مدل‌های کمی فرآیندهای مورد شبیه‌سازی باید توسعه داده شوند.** برای بسیاری از آن فرآیندها، مدل‌های با سطوحی از کیفیت از قبل وجود دارد، یا برای اهداف دقیق‌تر مهندسی در حال توسعه می‌باشد. از مثال‌های واضح، می‌توان به مدل‌های ساختاری (ساختمان‌ها و سایر ساختارها)، مدل‌های دینامیک سیالات (جریان هوا و آب)، مدل‌های احتراق (برای مثال برای پیشگویی سرعت آتش‌سوزی‌ها)، و مدل‌های حمل و نقل (برای مثال برای تحلیل جریان ترافیک) اشاره نمود. برای سایر فرآیندهای مهم، به هر حال، مدل‌های کمی، یا ابتدایی بوده و یا وجود ندارد. برای مثال، فاقد مدل‌های جامعه‌شناسی که بتواند به ما در توصیف یا پیشگویی واکنش جوامع به بحران‌ها کمک کند، می‌باشیم.

- **یک سیستم شبیه‌سازی جامع مورد نیاز است که مدل‌های با جزئیات زیاد طیف وسیعی از مقیاس‌ها را یکپارچه کند.** جامعیت سیستم شبیه‌سازی، اگر برنامه‌های کاربردی **ع‌م‌ش** قرار است سیستم‌های پیچیده چندمقیاسی را شبیه‌سازی کند، یک نیاز است. برخی از مسائل عمومی‌اند، ولی سایر مسائل ویژه هستند.

- **مدل‌های جدید با کیفیت استثنایی مورد نیاز می‌باشند.** ایجاد و معتبرسازی چنین مدل‌هایی، به دست آوری داده از جزئیات غیرعادی و استثنایی را ایجاب می‌نماید. به عنوان یک نتیجه، ایجاد شهر دیجیتالی و اکوسیستم دیجیتالی، بی‌شک روی علوم تجربی و تحقیقات نظری برای مواجهه با تقاضا برای داده‌های فراوان فشار وارد می‌کند.

- **یک درک بهتر از نقش عدم اطمینان مورد نیاز است.** حدی از عدم اطمینان در توانایی یک مدل برای انعکاس حقیقت و در داده‌ای که مدل مورد استفاده قرار می‌دهد اجتناب‌ناپذیر است. ما

³⁷ Static

³⁸ Dynamic

۳-۳- عم‌مش در انرژی و محیط

صنایع مرتبط با انرژی به روش‌های مدرن شبیه‌سازی برای نظارت محصول مخازن نفت، برنامه‌ریزی معیارهای رفع آلودگی، و راهبردهای کنترل طرح تکیه می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در **فناوری‌های مرتبط با شبیه‌سازی** ممکن است مدیریت مخازن نفت را تا یک سطح جدید مهارت بالا ببرد. این پیشرفت‌ها، محاسبات طبقه‌بندی شده، مدل‌سازی شیمی و چند فیزیکی، الگوریتم‌های موازی، و روش‌ها و دستگاه‌هایی برای استفاده پویا از داده‌های حفر چاه و مرتبط با زلزله را در بر می‌گیرد. به علاوه، نسل بعدی ابزار شبیه‌سازی مناطق نفتی می‌تواند از توسعه فناوری‌ها برای راهبردهای به طور پویا انعطاف‌پذیر، داده محور و تعاملی به منظور مشخص‌سازی زیرسطحی^{۳۹} و مدیریت مخزن بهره‌برداری نماید. به زودی می‌توانیم مدل‌های مخازن چند تنظیمی^{۴۰} را مشاهده کنیم که قادر است روی محیط‌های محاسباتی، همگن، طبقه‌بندی شده، و خیلی بزرگ اجرا گردد. این مدل‌ها، به علاوه، می‌تواند داده‌ها را از حسگرهای جا داده شده در میدان‌های مخازن (برای مثال، حسگرهای دائمی پایین چاه‌ها و حسگرهای مرتبط با زلزله که روی کف دریا محکم شده) دریافت نماید. چنین سیستم مدل و حسگر می‌تواند یک حلقه بازخورد ارتباط متقابل بین داده اندازه‌گیری شده و مدل‌های محاسباتی فراهم کند. این رویکرد می‌تواند به یک میدان نفتی مجهز به ماشین‌آلات، که کاراتر، مقرون به صرفه، و از نظر محیطی امن باشد منجر شود. منافع اقتصادی و راهبردی فراوان هستند:

- **افزایش در حجم نفت و گاز طبیعی که از منابع و مخازن موجود تولید می‌شود.** با درک بهتر از مخازن موجود نفت و گاز، می‌توانیم توقع داشته باشیم مخازن موجود را به طور کاراتر به انتها رسانده و مخازن فرعی و جانبی را مکان‌یابی و تولید کنیم. محصول اضافی می‌تواند به ما در کاهش وابستگی به نفت خارجی کمک کند.

- **درک بهتر از خطرها و عدم اطمینان‌ها در اکتشاف و هزینه‌های پایین‌تر جستجو.** مدل‌های بهتر زیرسطحی می‌تواند به شرکت‌های نفت و گاز اجازه تمرکز روی جنبه‌هایی که بهترین بازگشت را پیشنهاد می‌نماید بدهد. به عنوان یک نتیجه، آنها قادر خواهند بود سرمایه خود را به طور بسیار کاراتری اختصاص دهند.

نیاز داریم روش‌هایی را برای تفسیر عدم اطمینان و مشخص ساختن اثرات آن روی ارزیابی‌های نتایج ممکن به دست آوریم.

امتیازات پاسخ‌گویی به این چالش‌ها فراوان می‌باشد: امنیت بهبود یافته، ایمنی، و راحتی زندگی در شهر دیجیتالی و اکوسیستم دیجیتالی؛ یک زیرساخت اجتماعی با کارایی بی‌همتا؛ واکنش‌های منطقی و خردمندانه به رویدادهای طبیعی؛ و تعاملات بهینه با محیط‌های طبیعی. در زیر مهم‌ترین و عمده‌ترین کاربردها خلاصه می‌شود.

- **محافظت در مقابل آلاینده‌های هوا:** فناوری‌های عم‌مش حضور آلاینده‌های بیولوژیکی و شیمیایی در هوا را آشکار و اندازه‌گیری می‌نماید و به شرط اینکه داده مفصل (با جزییات) از آب و هوا وجود داشته باشد، مکان انتشار و بزرگی آن را به طور احتمالی شناسایی می‌کند. سپس سیستم یک برنامه واکنش بهینه را طراحی خواهد کرد.

- **بهینه‌سازی زیرساخت‌ها:** فناوری‌های عم‌مش طراحی‌های ساختمان‌ها و سایر عناصر زیرساختی را بهینه خواهند کرد. چنین طراحی‌هایی قادر خواهد بود محل معین باشد، با محیط‌های مصنوعی و طبیعی به خوبی تعامل و با سیستم شهری که قسمتی از آن است، اختلاط حاصل نماید.

- **پیش‌گویی اثرات محیطی طولانی مدت:** فناوری‌های عم‌مش، اثرات فضولات ناشی از تسهیلات بهداشتی موجود و پیشنهادی را روی محیط‌های شهری و طبیعی پیش‌گویی کرده که به مقدار زیادی قابلیت اطمینان و سودمندی مطالعات اثرات محیطی را افزایش می‌دهد. به علاوه، برای برنامه‌ریزان این فرصت را ایجاد می‌نماید تا احتمال رویدادهای زیان‌بخش و آسیب‌رسان پیش‌بینی نشده را به حداقل برسانند.

- **بهینه‌سازی پاسخ‌های اضطراری:** فناوری‌های عم‌مش می‌تواند واکنش‌های اضطراری برای آتش‌سوزی و انفجار (چه تصادفی و چه عمدی) را بهینه نماید. برنامه‌ریزی برای واکنش‌های اضطراری می‌تواند بررسی کند که چطور موقعیت ممکن است شکل گیرد یا گسترش یابد (برای مثال، یک آتش ممکن است گسترش پیدا کند، ساختمان ویران شود، یا دخالت واکنش، خودش ممکن است برعکس روی موقعیت اثر بگذارد).

- **بهینه‌سازی زیرساخت‌های امنیتی برای محیط‌های شهری:** فناوری‌های عم‌مش قادر است در طراحی و جاگذاری حسگرهای آلیش هوا و آب و به برنامه‌ریزی عملیات متقابل، مانند پراکنده کردن آلودگی و کاهش سیل کمک نماید.

³⁹ Subsurface characterization

⁴⁰ Multi-Resolution

توسعه مؤلفه‌های ساختاری رآکتورهای انرژی هسته‌ای کمک کند. چنین **موادی** نه فقط باید در برابر تشعشعات مقاوم باشد، بلکه باید طول عمرهای بالای ۴۰ سال را هم داشته باشد. حتی برای **موادی** که برای آنها اجباری وجود ندارد در مقابل شرایط استثنایی فشار بالا و تشعشع شدید مقاومت کنند، رشته نوع‌آوری **مواد**، مملو از چالش‌هایی برای درک ما از ریزساختارهای^{۴۷} زیربنایی **مواد** است. برای مثال، می‌توانیم یک "مدل مولکولی سیمان"، مورد استفاده‌ترین ماده ساخته شده به دست بشر، را تولید کنیم. چنین مدلی به ما در توسعه یک سیمان جدید با مقاومت خزندگی^{۴۸} بیشتر و دوام محیطی بیشتر، کمک می‌کند. به طور مشابه، مدل‌ها به ما در بهبود عملکرد کاتالیست‌ها برای وسایل نقلیه مجهز به **باتری الکتریکی**^{۴۹} کمک خواهند کرد. همچنین می‌توانیم فنون را در اکتشاف میدان نفتی، جایی که ابزارسازی و مدیریت دیجیتال مخازن هیدروکربن مسئله هستند، بهبود بخشیم. در تمام این مثال‌ها، **بهبودها در عملکرد مواد اثر بزرگی را خواهند داشت.**

هر جایی که نگاه می‌کنیم، مسائل مهم برای جامعه وجود دارند که نیاز به بهینه‌سازی ویژگی‌های عملکردی **مواد** از طریق کنترل ریزساختارهایشان دارند. به طور مسلم، **عموم‌ش اثر** درازمدتی روی نوآوری و ابداع **مواد** خواهد داشت. سه ویژگی **عموم‌ش** به خصوص به این نتیجه‌گیری منجر می‌شوند.

- **پهنه باند استثنایی:** مبنای مفهومی مدل‌سازی و شبیه‌سازی **مواد**، تمام علوم فیزیکی را در بر می‌گیرد. این مبنا فرقی بین آنچه متعلق به فیزیک یا شیمی یا مهندسی و غیره است قائل نمی‌شود. این جامعیت فناوری **عموم‌ش** یک پهنه باند علمی را ارائه می‌دهد که حداقل به اندازه کل حیطه کاربردهای چندمقیاسی در علوم و مهندسی می‌باشد. در مدل‌سازی و شبیه‌سازی **مواد**، همانند **عموم‌ش** به طور کلی‌تر، موانع بین‌رشته‌ای سنتی و مرسوم حذف می‌گردد؛ آنچه که مهم است "نیاز به دانستن" است.

- **حذف تجربه‌گرایی:** یک حُسن مدل‌سازی چندمقیاسی این است که نتایج هر دو مورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی به طور مفهومی و عملیاتی قابل اندازه‌گیری بوده در نتیجه، فرض‌های تجربی می‌تواند به طور نظام‌مند با توصیف‌های مبتنی بر فیزیک

فناوری‌های جدید مرتبط با **عموم‌ش** نیاز به یک چارچوب شبیه‌سازی یکپارچه و تعاملی (دوسویه) با توانمندی‌های چندمقیاسی دارد. توسعه و استفاده از چنین چارچوب‌هایی نیازمند پشتیبانی از گروه‌های میان رشته‌ای محققان، شامل دانشمندان زمین‌شناسی، مهندسين، رياضيدانان کاربردی، و متخصصين کامپيوتر می‌باشد.

۳-۴- عموم‌ش در مواد

فناوری مرتبط با **عموم‌ش** ممکن است بزرگ‌ترین اثر اجتماعی خود را در جایی داشته باشد که نوع‌آوری و ابتکارات در مدل‌سازی و منطق‌های شبیه‌سازی با نوع‌آوری‌های **مواد**^{۴۱} تلاقی دارد. مدل‌سازی و شبیه‌سازی چندمقیاسی در حال تغییر شکل دادن علوم و فناوری توسعه **مواد جدید** و بهبود **مواد موجود** بوده و این تغییرشکل معادل با جا به جایی به یک الگوی جدید قدرتمند از علوم مهندسی است. روش‌های جدید، امکان توانایی بی‌نظیری را برای دستکاری **مواد فلزی**^{۴۲}، سرامیکی، نیمه‌هادی، فرامولکولی^{۴۳}، و پلیمری فراهم می‌سازد که نتیجه آن، ساختارها و ترکیبات **مواد** و دستگاه‌هایی که دارای خواص قابل ملاحظه فیزیکی، شیمیایی، الکترونیکی، نوری و مغناطیسی است، می‌باشد. اکنون می‌توانیم طراحی مولکولی **مواد ترکیبی**^{۴۴} را با کارآمدی‌های باورنکردنی پیش‌بینی کنیم.

منافع حاصل از توسعه **مواد** جدید به قدر کافی در پیشرفت کنونی در نانو علوم و فناوری آشکار هستند. به دلیل طبیعت چندمقیاسی مدل‌سازی و شبیه‌سازی **مواد**، **عموم‌ش** برای ایفای یک نقش کلیدی در نانو علوم تخصص یافته است. **عموم‌ش** توانمندی ارتباط روش‌های با ساختار الکترونیکی^{۴۵} را، که برای سر و کار داشتن با نانو ساختارها و ویژگی‌های عملکردی نوظهور لازم می‌باشد، با فنون در مقیاس اتم و مقیاس میزو^{۴۶} فراهم می‌آورد. این ارتباط مطمئن می‌سازد که فازهای مختلف نوآوری **مواد**، از طراحی تا آزمون تا عملکرد و ارزیابی طول عمر، می‌تواند همگی شبیه‌سازی، آزمایش، و بهینه‌سازی گردد.

شبیه‌سازی چندمقیاسی همچنین می‌تواند به حل مسائل در

⁴¹ Materials

⁴² Metallic

⁴³ Supramolecular

⁴⁴ Composite materials

⁴⁵ Electronic-Structure

⁴⁶ Mesoscale

⁴⁷ Microstructures

⁴⁸ Creep resistance

⁴⁹ Fuel-Cell electric vehicles

مرکزی را در کاربردهای مهم صنعتی و طراحی دفاعی ایفا نماید. با این همه، تهیه مدل به زمان و نیروی کار اساسی نیاز دارد. اغلب، برای تهیه یک مدل ماهها وقت صرف می‌شود، و حتی بعد از آن اگر طراحی عمدتاً از طراحی‌های قبلی متفاوت باشد مدل نیاز دارد که با آزمون‌هایی تنظیم شود.^{۵۵}

به علاوه، تهیه یک مدل معمولاً نیاز به دانش قابل ملاحظه و مهارت در آنالیز اجزاء متناهی^{۵۶} دارد. به همین دلیل، چالش تولید مدل‌ها به طور معمول نه بر گردن طراحان بلکه بر دوش مهندسی با تخصص بالا قرار دارد. این جداسازی بین شبیه‌سازی و فعالیت‌های طراحی باعث تأخیرها شده و اثربخشی شبیه‌سازی را کاهش می‌دهد.

مشکلات شبیه‌سازی وقتی تشدید می‌گردد که مواد جدید، مانند کامپوزیت‌ها و مواد فلزی، در طراحی‌های محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. قبل از اینکه شبیه‌سازی حتی بتواند شروع شود، مواد جدید باید به طور وسیع و همه‌جانبه‌ای برای تعیین خواص آنها مورد آزمون قرار گیرد. چنین آزمون‌هایی زمان‌بر بوده، و زمان لازم برای آماده کردن و هدایت شبیه‌سازی‌های مفید را طولانی می‌نماید.

در دو دهه گذشته صنعت "مدارهای مجتمع"^{۵۷} یک بازیگر اصلی در مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی بوده است. تاکنون، ایالات متحده در توسعه نرم‌افزار بسیار یکپارچه و آسان برای استفاده به منظور تحلیل مدار، مانند اسپایس^{۵۸} و در تعلیم و تربیت نیروی کار مهندسی در کاربرد آن نرم‌افزار، رهبر بوده است، ولی، با آهنگ سریع پیشرفت، نظریه مدار دیگر کاربردی ندارد. ترانزیستورهای نسل آینده، مانند ترانزیستورهای تک الکترونی، آستانه پایین^{۵۹}، و دستگاه‌های محاسبه کوانتومی، به فیزیک جدید متکی خواهند بود که مکانیک کوانتوم و الکترومغناطیس را به هم مرتبط می‌کند.

درکل، شبیه‌سازی در صنعت تا کنون به پتانسیل کامل خود نرسیده است. خلاصه‌ای از محدودیت‌های فعلی آن عبارتند از:

۱- توسعه مدل‌ها، به ویژه برای هندسه‌های سیستم‌های مهندسی پیچیده مانند کشتی‌ها و هواپیماها، خیلی زمان‌بر است. به علاوه، تعیین خواص فلزی، اغلب، قبل از اینکه شبیه‌سازی

جایگزین گردد. قابلیت اندازه‌گیری به محققان اجازه می‌دهد هر قسمت از مدل و شبیه‌سازی را با یک روش کنترل شده به دقت مورد بررسی و ارتقاء قرار دهند. در این صورت آنها می‌توانند یک پدیده پیچیده را جزء به جزء بررسی کنند.

• **تجسم پدیده‌ها:** خروجی‌های عددی از یک شبیه‌سازی، معمولاً داده‌های درجات آزادی توصیف مدل است که قابلیت دسترسی این نوع داده‌ها نه تنها مناسب پویا نمایی^{۵۰} مستقیم، بلکه مناسب تجسم ویژگی‌های تحت آنالیز می‌باشد، ویژگی‌هایی که برای مشاهده تجربی فراهم نمی‌باشد. با میکروسکوپ، برای مثال، محققان می‌توانند اطلاعات ساختاری ولی معمولاً غیرفعال را به دست بیاورند. از طریق شبیه‌سازی، آنها، می‌توانند هر دو را داشته باشند. سخن مشابهی را می‌توان در مورد داده‌های مکانیزم‌های بدقوارگی^{۵۱} و گره‌های عصبی واکنش^{۵۲} بیان کرد.

این سه مشخصه **عم‌م‌ش**، البته، محدود به توسعه مواد نمی‌شود؛ آنها به همان خوبی برای سایر زمینه‌های کاربردی **عم‌م‌ش** به کار می‌روند. به هر حال، تمرکز این بخش روی کاربرد **عم‌م‌ش** برای توسعه مواد بوده است. نکته‌ای که، به کمک فناوری **عم‌م‌ش**، آشکار می‌شود این است که مدل‌سازی و شبیه‌سازی مواد، یا مواد محاسبه‌ای^{۵۳}، دارد با علوم فیزیک محاسبه‌ای و شیمی محاسبه‌ای علم خواهر^{۵۴} می‌شود.

۳-۵- عم‌م‌ش در کاربردهای صنعتی و دفاعی

شبیه‌سازی در صنعت، فراگیر بوده و نقش اساسی را در طراحی مواد، فرایندهای ساخت، و محصولات بازی می‌کند. به طور فزاینده‌ای، شبیه‌سازی در حال جایگزین شدن با آزمون‌های فیزیکی برای تضمین قابلیت اطمینان و کیفیت محصول است. آزمون‌های کمتر به معنی نمونه‌های کمتر و نتیجه، یک چرخه طراحی کوتاه‌تر است. نیاز برای چرخه‌های کوتاه‌تر طراحی، برای دفاع و امنیت ملی نیز به کار می‌رود. رویدادهای جهان اغلب غیرقابل پیش‌بینی بوده و لذا صنعت دفاعی باید توانایی طراحی، اصلاح، و ساخت تجهیزات را در واکنش سریع به فوریت‌ها و ضرورت‌های نظامی و پلیسی داشته باشد. به طور کلی، شبیه‌سازی هنوز مجبور است یک نقش

⁵⁵ Be calibrated

⁵⁶ Finite-Element analysis

⁵⁷ IC

⁵⁸ SPICE

⁵⁹ Low-Threshold

⁵⁰ Animation

⁵¹ Deformation

⁵² Reaction pathways

⁵³ Computational materials

⁵⁴ Sister science

البته، با اتکای فزاینده فرایندهای طراحی به **شبیه‌سازی کامپیوتری**، رویه‌های **معتبرسازی و صحت‌گذاری** به طور فزاینده‌ای مهم خواهند شد. در نتیجه، یک فهم پایه‌ای از این رویه‌ها مورد نیاز است. با وجود این، برای مفید بودن، ابزار شبیه‌سازی مورد استفاده توسط آژانس‌های دفاعی و صنایع باید نتایج قابل اطمینانی را فراهم کنند. به علاوه، چون بسیاری از پدیده‌های دنیای واقعی معین نیستند، برای تعیین میزان عدم اطمینان، **روش‌های آماری** مورد نیاز خواهند بود.

بهینه‌سازی طراحی نیز در آغاز راه خود بوده و دارای موانع بسیاری است که باید بر آنها فائق آمد. به علاوه، برای اثربخش بودن طراحی مهندسی، روش‌های بهینه‌سازی باید به طور **تنگانگ با فنون شبیه‌سازی** درهم آمیخته شود.

در قسمت دوم مقاله مباحثی مانند بزرگ‌ترین موانع، چالش‌ها و فرصت‌ها در **علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی (عم‌مش)**، شامل: "چالش مدل‌سازی و شبیه‌سازی چندمقیاسی؛ روش‌های تعیین عدم اطمینان، معتبرسازی و صحت‌گذاری مدل؛ سیستم‌های شبیه‌سازی پویا، حسگرها، معیارها و شبیه‌سازی‌های همگن؛ چشم‌اندازهای جدید در نرم‌افزار شبیه‌سازی؛ ضرورت داده بزرگ در شبیه‌سازی و نقش تجسم در علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی؛ و همچنین، الگوریتم‌های نسل بعدی و عملکرد محاسباتی" و بالاخره، اثر علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی روی سیستم تعلیم و تربیت مهندسين، دانشمندان و متخصصین فردا مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سعی شده است تا خواننده در جریان آخرین وضعیت نگرش جهانی در خصوص موضوع **علوم مهندسی مبتنی بر شبیه‌سازی**، یا **عم‌مش**، قرار گیرد. همان طور که در این مقاله تعریف شده است، **عم‌مش**، شاخه‌ای از علوم است که بر روی **مدل‌سازی کامپیوتری و شبیه‌سازی** سیستم‌های پیچیده، و مرتبط باهم مهندسی شده، و در مورد کسب داده‌هایی که استانداردهای تعیین شده دقت و قابلیت اطمینان را رعایت می‌کنند متمرکز می‌شود. **عم‌مش** از پیشرفت‌های درک علمی و الحاق آن درک به رویکردهای جدید برای مسایل موجود در حیطه مهندسی از طریق **شبیه‌سازی کامپیوتری** کمک می‌گیرد.

نیاز برای **عم‌مش** به عنوان یک زمینه تحقیقاتی جداگانه، به

بتواند شروع شود، به خاصه اگر خواص آماری مورد نیاز باشد، نیاز به آزمون همه جانبه مقیاس کوچک دارد. این آزمون نیز زمان اجرای یک شبیه‌سازی و لذا چرخه طراحی را افزایش می‌دهد.

۲- روش‌هایی برای مرتبط کردن مدل‌ها در مقیاس‌های گوناگون و شبیه‌سازی پدیده‌های چند فیزیکی مورد نیاز می‌باشد.
۳- شبیه‌سازی، اغلب از فرآیند بهینه‌سازی طراحی مجزا بوده و نمی‌تواند همزمان با عواملی مانند توانایی ساخت، هزینه، و اثر محیطی سر و کار داشته باشد.

برای فائق آمدن به این موانع نیاز به پیشرفت در فهم پایه‌ای و توسعه متدهای جدید توانمند داریم. در میان این چالش‌ها موارد زیر وجود دارد:

۱- روش‌های **چندمقیاسی**، که می‌تواند با طیف‌های وسیعی از مقیاس‌های زمانی و مکانی سر و کار داشته باشد و انواع مختلف فیزیک‌ها را به هم مرتبط نماید.

۲- روش‌های محاسبه پدیده‌های **ماکروسکپی (بسیار بزرگ)**، مانند ویژگی‌های مواد و فرآیندهای ساخت، برحسب رفتار زیرمقیاس (مقیاس‌های کوچک‌تر از مقیاس ماکرو).

۳- روش‌های اثربخش **بهینه‌سازی**، که می‌تواند با سیستم‌های مجتمع پیچیده سر و کار داشته باشند، برای عدم اطمینان‌ها به حساب آیند، و طراحی‌های استوار را فراهم نماید.

۴- چارچوب‌های **معتبرسازی، صحت‌گذاری و اندازه‌گیری عدم اطمینان**.

۵- روش‌های تولید سریع مدل‌های **با هندسه و ویژگی مواد پیچیده**.

روش‌های **چندمقیاسی** ممکن است **پیش‌گویی** خواص و ویژگی‌های مواد را برحسب بلوک‌های ساختمانی پایه، از خواص ماتریسی و سلولزی مواد کامپوزیت تا خواص اتم‌ها در فلزات، ممکن سازد. تقاضا برای موادی که وزن و هزینه را کاهش دهد در حال افزایش است؛ در نتیجه، دسترسی به ابزاری که، **از طریق شبیه‌سازی**، بتواند رفتار یک ماده را از بلوک‌های ساختمانی پایه آن پیش‌بینی کند، امکانات فوق‌العاده‌ای را برای محصولات قابل توسعه با سرعت بیشتر، هزینه کمتر، و بی‌خطرتر فراهم خواهد کرد. چنین ابزاری گلوگاه آزمون گسترده مواد را حذف خواهند کرد، که نتیجه آن کاهش‌های اساسی در زمان‌های چرخه طراحی خواهد بود. روش‌هایی که ما متصور هستیم اتصال مدل‌هایی با مقیاس‌های مختلف، مانند مدل‌های میکرومکانیک یا حتی مکانیک کوانتوم، به مدل‌های با رفتار مقیاس ماکرو را فراهم می‌سازد.

معرفی می‌نماید که در تمام رشته‌های مهندسی برق، کامپیوتر، مکانیک، عمران، شیمی، هوافضا، هسته‌ای، زیست پزشکی، و علوم مواد کاربرد دارد. برای مثال، همه رشته‌های مهندسی از پیشرفت در بهینه‌سازی، کنترل، تعیین عدم اطمینان، صحت‌گذاری و معتبرسازی، طراحی تصمیم‌سازی، و پاسخ زمان حقیقی سود می‌برند.

تعجیبی ندارد که مطالعات مستقل در آینده فناوری ملت‌ها، در نتیجه‌گیری‌های خود که مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری، عناصر کلیدی برای رسیدن به پیشرفت در مهندسی و علوم هستند، متفق‌القول هستند. برای مثال، باید روش‌هایی را برای ارتباط دادن پدیده‌ها در سیستم‌ها پیدا کنیم که طیف‌های بزرگی از مقیاس‌های زمانی و مکانی را در برگیرند. باید قادر باشیم رویدادهای ماکروسکوپی را بر حسب رفتارهای زیرمقیاس (مقیاس‌های کوچک‌تر)^{۶۳} توضیح دهیم. به روش‌های بهینه‌سازی بهتر برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده، که بتوانند برای عدم اطمینان‌ها به حساب آیند نیازمند هستیم. همچنین، نیاز داریم چارچوب‌هایی را برای معتبرسازی، صحت‌گذاری، و تعیین عدم اطمینان بسازیم. بالاخره، به روش‌هایی برای تولید سریع مدل‌های با کیفیت بالای دارای هندسه‌ها و ویژگی‌های پیچیده مواد نیاز داریم.

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۸ و تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۶

نقطه عطفی در توسعه فناوری‌ها رسیده است. تقریباً برای مدت نیم‌قرن، توسعه در مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم‌های محاسباتی/کامپیوتری، و فناوری محاسبات داده‌های زیاد^{۶۰} به بهبودهای قابل ملاحظه‌ای در سلامتی، امنیت، بهره‌وری، کیفیت زندگی، و رقابت‌جویی منجر شده است [۱۹]. همان‌طور که در این مقاله شرح داده شده، دنیا در آستانه یک گسترش بزرگ در توانایی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تقریباً طیف نامحدودی از پدیده‌های طبیعی است. این گسترش دارای معانی ضمنی عظیم و پرمحتوایی است:

اول، مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری، به ما اجازه خواهد داد که رویدادهای طبیعی و سیستم‌های مهندسی شده را که امکان تحلیل طولانی را نداشته و دارای معیار و منطق‌های تجربی هستند مورد کند و کاو قرار دهیم. درحقیقت، فرض‌های تجربی با مدل‌های محاسباتی/کامپیوتری مبتنی بر علوم جایگزین خواهند شد.

دوم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، کاربردهایی در فناوری‌ها از ریزپردازنده‌ها^{۶۱} تا زیرساخت^{۶۲} شهرها خواهند داشت. حداقل این فناوری‌های جدید سیستم‌های مؤثری برای امنیت ملی خواهند بود. به علاوه، روش‌های جدید شبیه‌سازی، زیربنای کل فناوری‌هایی را که اکنون فقط به عنوان امکانات، دارند پدید می‌آیند و شکل می‌گیرند، خواهند ساخت.

سوم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، ما را در طراحی و ساخت مواد و محصولات بر مبنای یک پایه علمی‌تر با سعی و خطای کمتر و چرخه‌های طراحی کوتاه‌تر قادر می‌سازد.

چهارم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، به طور وسیعی توانایی ما را در پیش‌گویی نتایج و بهینه‌سازی راه‌حل‌ها قبل از اختصاص منابع در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های معین بهبود خواهند بخشید.

پنجم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، توانایی ما را در از عهده برآمدن مسایلی که برای روش‌های سنتی بسیار پیچیده بوده‌اند گسترش می‌دهد. از جمله مسایلی که شامل مقیاس‌های چندگانه طول و زمان، فرآیندهای فیزیکی چندگانه، و سطوح ناشناخته عدم اطمینان‌ها هستند.

ششم، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، ابزارها و روش‌هایی را

⁶⁰ Data-Intensive computing

⁶¹ Microprocessors

⁶² Infrastructure

⁶³ Subscale

فهرست منابع

- [1] Atkins, D. (Chair); *"Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure"*, National Science Foundation Blue Ribbon Panel Report, January 2003.
http://www.communitytechnology.org/nsf_ci_report/ExecSum.pdf,
http://www.communitytechnology.org/nsf_ci_report/report.pdf,
http://www.communitytechnology.org/nsf_ci_report/appendices.pdf
- [2] Belytschko, T.; Fish, J.; Hughes, T.J.R.; Oden, J.T. (Eds.); *"Simulation Based Engineering Science"*, National Science Foundation Workshop Report, May 2004.
http://www.ices.utexas.edu/~bass/outgoing/sbes/SBES_Workshop_1_Report.pdf
- [3] Benioff, M.; Lazowska, E. (Chairs); *"Computational Science: Ensuring America's Competitiveness"*, President's Information Technology Advisory Committee (PITAC) Report, June 2005, <http://www.nitrd.gov>.
- [4] Colvin, G.; *"America Isn't Ready"*, Fortune Magazine, July 25, 2005.
- [5] Dolbow, J.; Khalell, M.A.; Mitchell, J. (Eds.); *"Multiscale Mathematics Initiative: A Roadmap"*, Department of Energy – Office of Science Roadmap, December 2004, <http://www.sc.doe.gov/ascr/mics/amr/Multiscale Math Workshop 3 - Report latest edition.pdf>.
- [6] Douglas, C.; Deshmukh, A. (Eds.); *"Dynamic Data Driven Application Systems"*, NSF Workshop Report, March 2000, <http://www.cise.nsf.gov/dddas>.
- [7] Gereffi, G.; and Wadhwa, V. (Eds.); *"Framing the Engineering Outsourcing Debate: Placing the United States on a Level Playing Field with China and India"*, Master of Engineering Management Program, Duke University, December 2005.
- [8] Graham, S.; Snir, M. (Eds.); *"The Future of Supercomputing"*, National Research Council – Computer Science and Telecommunications Board Interim Report, May 2003.
http://www7.nationalacademies.org/cstb/pub_supercomp.html.
- [9] Grosh, J.; Laub, A. (Eds.); *"Federal Plan for High-End Computing"*, High-End Computing Revitalization Task Force Report, Office of Science and Technology Policy, May 2004.
<http://www.sc.doe.gov/ascr/hecrtrfpt.pdf>.
- [10] Keyes, D.; Colella, P.; Dunning Jr. T.; Gropp, W. (Eds.); *"A Science-Based Case for Large-Scale Simulation - Volume 1"*, Department of Energy – Office of Science Workshop Report, July 2003.
<http://www.pnl.gov/scales/>
- [11] Keyes, D.; Colella, P.; Dunning, Jr. T.; Gropp, W. (Eds.); *"A Science-Based Case for Large-Scale Simulation - Volume 2"*, Department of Energy – Office of Science Workshop Report, September 2004.
<http://www.pnl.gov/scales/>
- [12] Lax, Peter D. (Chair); *"Report of the Panel on Large Scale Computing in Science and Engineering"*, Department of Defense and the National Science Foundation, December 1982.
http://www.pnl.gov/scales/docs/lax_report_1982.pdf.
- [13] National Science Foundation, Division of Science Resources Statistics, Science and Engineering Degrees: 1966-2001; NSF 04-31, Project Officers, Susan T. Hill and Jean M. Johnson.
<http://www.nsf.gov/statistics/nsf04311/htmstart.htm>.
- [14] New York University School of Medicine, <http://endeavor.med.nyu.edu/public/>.
- [15] Petzold, L.; Colella, P.; Hou, T. (Eds.); *"Report of the First Multiscale Mathematics Workshop: First Steps toward a Roadmap"*, Department of Energy – Office of Science Workshop Report, July 2004.
<http://www.sc.doe.gov/ascr/mics/amr/Multiscale Math Workshop 1 - Report.pdf>.
- [16] Reed, D. (Ed.); *"The Roadmap for the Revitalization of High-End Computing"*, National Coordination Office for Information Technology Research and Development Report, June 2003.
<http://www.cra.org/reports/supercomputing.pdf>.
- [17] *Rising Above the Gathering Storm: Energizing and Employing America for a Brighter Economic Future*, Committee on Prospering in the Global Economy of the 21st Century, 2005.
<http://www.nap.edu/catalog/11463.html>
- [18] *Scientific Discovery through Advanced Computing*; Department of Energy - Office of Science Strategic report, March 2000.
http://www.sc.doe.gov/ascr/mics/scidac/SciDAC_strategy.pdf
- [19] Oden, T.; Belytschko; Fish, T. J.; Hughes, T.J.R.; Johnson, C.; Keyes, D.; *"A Report of the National Science Foundation Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science"*, ICES Technical Report, University of Texas, February, 2006.
- [20] Y. Zhang; C. Bajaj; *"Finite Element Meshing for Cardiac Analysis"*, ICES Technical Report 04-26, University of Texas, Austin, 2004.