

بررسی اهمیت و کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به دانشجویان مهندسی

علیرضا جهان تیغ پاک^۱ و محمدعلی دائیان^۲

چکیده: در این مقاله ضرورت آموزش اصول مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای به دانشجویان مهندسی بررسی شده است. در بخش ابتدایی مقاله به کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای در فرایند طراحی مهندسی و تأثیر استفاده از آن در سرعت و سهولت کار طراحی پرداخته شده است. به این منظور، سه مرحله اصلی فرایند طراحی مهندسی یعنی «ایده‌پردازی»، «اصلاح» و «اجرا» به تفکیک بررسی شده و نتایج حاصله در قالب شش گزاره ارائه شده است. این گزاره‌ها حاکی از نقش محوری مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای در فرایند طراحی مهندسی است که بهره‌گیری از آن مستلزم فراگیری اصول علمی و کسب مهارت در زمینه کار با ابزارهای آن است. در بخش بعدی مقاله، ۲۹ مورد از دروس مرتبط با مدل‌سازی سه‌بعدی در دانشگاه‌های برتر مهندسی دنیا ارائه شده است. نویسندگان در انتها با استناد به نتایج پژوهش، بر ضرورت تدوین برنامه‌های برای آموزش اصول مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای و ابزارهای آن به دانشجویان رشته‌های مختلف مهندسی و تحقیقات بیشتر در این زمینه تأکید کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: فرایند طراحی مهندسی، مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای، آموزش

مهندسی

۱. عضو هیئت‌علمی و رئیس مرکز گرافیک مهندسی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). jahantigh@sharif.ir

۲. مدرس مدعو مرکز گرافیک مهندسی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. m.a.daeian@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۴/۲۳)

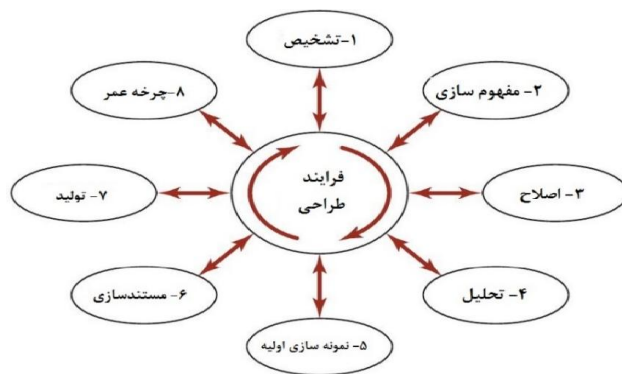
DOI: 10.22047/ijee.2016.31971

۱۲۰ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

۱. مقدمه

طراحی قلب مهندسی است (Leake, 2013) و یکی از اهداف آموزش مهندسی تربیت مهندسانی است که بتوانند در چرخه طراحی مهندسی فعالیت کنند (Crawley, 2007). طراحی مهندسی فرایندی است که ماحصل آن یک محصول یا یک سیستم است و از سه جنبه «کاهش هزینه»، «بهبود کیفیت محصول» و «کاهش زمان چرخه محصول» حائز اهمیت است (Dieter, 1991).

طراحی مهندسی به عنوان یک فرایند از مراحل تشکیل شده است. هرچند تعداد مراحل این فرایند در منابع مختلف متفاوت است، با این وجود می توان طبق شکل ۱ نمایش داد (Lieu, 2008). در مرحله نخست طراحی، مسئله اصلی طرح و تعریف می شود. در مرحله بعد، ایده های اولیه برای این مسئله تولید می شود. پس از طی مراحل اصلاح و تحلیل محصول، نمونه ای اولیه از محصول تولید می شود و در نهایت پس از مستندسازی محصول، طرح کامل شده و به تولید می رسد. در نهایت محصول چرخه عمر خود را طی می کند. با گسترش کاربرد رایانه در مهندسی طی سالیان اخیر، در فرایند مرسوم طراحی مهندسی تغییراتی به وجود آمده است. از جمله این تغییرات می توان به ظهور «مهندسی هم زمان»^۱ اشاره کرد.

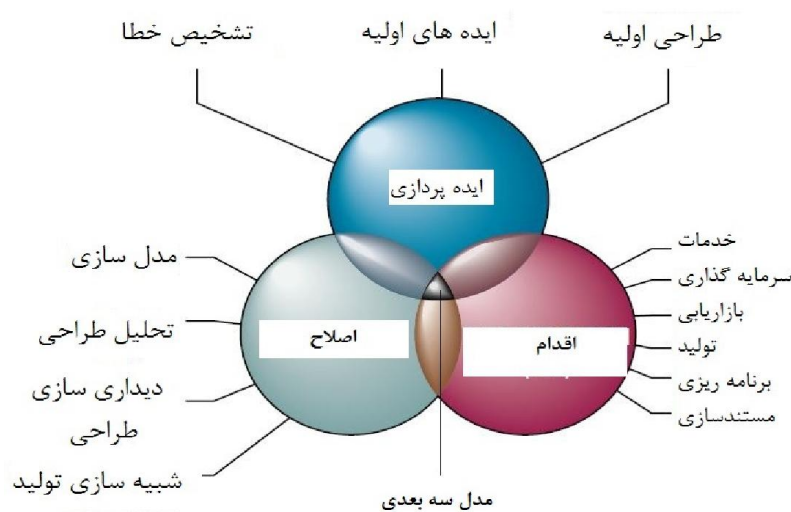


شکل ۱: مراحل فرایند طراحی مهندسی (Lieu, 2008)

در روشهای سنتی طراحی مهندسی، طراحی محصول و یا سیستم مرحله به مرحله انجام می گرفت و ایده یا محصول پس از طی هر مرحله وارد مرحله بعد می شد. اما در مهندسی هم زمان، مهندسان در تمامی مراحل

طراحی شامل ایده‌پردازی، تحلیل و تولید، با هم در ارتباط هستند؛ به‌عنوان مثال، ممکن است در مرحله ایده‌پردازی مهندس تولید در رابطه با هزینه تولید اظهارنظر کند و همین اظهارنظر موجب ایجاد تغییراتی در ایده شود (Lieu, 2008).

فارغ از نوع نگاه به طراحی مهندسی - سنتی یا همزمان - در فرایند طراحی به ابزارهایی نیاز است که مدل‌سازی سه‌بعدی یکی از مهمترین آنهاست. البته اهمیت مدل‌سازی سه‌بعدی در «طراحی مهندسی همزمان» بیش از نگاه سنتی است. دلیل آن نیز استفاده از مدل‌های سه‌بعدی از ابتدای فرایند برای انتقال ایده و نتایج تحلیل بین گروه‌های کاری مختلف درگیر در پروژه است. شکل ۲ ارتباط میان مراحل مختلف فرایند طراحی مهندسی همزمان را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که در طراحی مهندسی همزمان، برخلاف روش سنتی، میان مراحل طراحی ارتباط خطی وجود ندارد و مدل سه‌بعدی به‌عنوان نقطه اشتراک مراحل مختلف و قلب فرایند طراحی محسوب می‌شود (Bertoline, 2009).



شکل ۲: جایگاه مدل‌سازی سه‌بعدی در مهندسی همزمان

با بررسی سرفصل‌های درس‌های مهندسی، درس‌هایی را می‌توان یافت که انتظار می‌رود دانشجویان فنی، دانش و مهارت موردنیاز در بخش‌های مختلف فرایند طراحی مهندسی را در آنها بیاموزند. طراحی اجزای ماشین، طراحی مبدل‌های حرارتی، طراحی سازه‌های دریایی، طراحی سازه‌های بتنی، طراحی سازه‌های فولادی و طراحی معماری و یا درس‌هایی نظیر دینامیک سیالات محاسباتی و امان محدود نمونه‌هایی از این درس‌های رشته‌های

۱۲۲ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

مختلف مهندسی هستند. بدیهی است که یک برنامه آموزش مهندسی کامل باید به نحوی تدوین شده باشد که تمامی اصول، دانش و مهارت‌های لازم برای کار حرفه‌ای یک مهندس را به میزان کافی بیاموزد. آموزش اصول مدل سازی سه بعدی نیز به عنوان یک مهارت مهم در فرایند طراحی نیز می‌بایست متناسب با اهمیتی، که دارد، در برنامه آموزش مهندسی دیده شود. هر چند پژوهشهایی در رابطه با بررسی میزان آشنایی با مهارت‌های لازم برای رشته‌های فنی - مهندسی به انجام رسیده است (محمودی، ۱۳۹۵) اما به نظر می‌آید که نظام آموزش مهندسی در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، در زمینه مدل سازی سه بعدی غافل مانده است. لذا، در ادامه اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی رایانه‌ای در فرایند طراحی مهندسی با بررسی پژوهشهای پیشین بررسی می‌شود.

۲. کاربردها و اهمیت مدل سازی در طراحی مهندسی

طراحی مهندسی را می‌توان متشکل از سه بخش کلی «ایده پردازی»، «اصلاح» و «اجرا» دانست (Bertoline, 2009). در این قسمت، به بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی رایانه‌ای در هر کدام از این بخشها می‌پردازیم.

۲.۱. ایده پردازی

یکی از اولین مراحل طراحی یافتن ایده‌هایی برای پاسخ‌گویی به یک نیاز است. خلاقیت یکی از تأثیرگذارترین ویژگیهای یک طراح در این مرحله است. از این رو، پژوهشهایی پیرامون تأثیر عوامل مختلف بر خلاقیت صورت گرفته است (Toh, 2015). تأثیر استفاده از مدل سازی سه بعدی در فرایند ایده پردازی نیز در سالهای اخیر، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. موسامل^۱ و دیگران (۲۰۱۲) دریافتند که استفاده از نرم افزارهای کد (CAD) در طراحی می‌تواند باعث بروز برخی رفتارهای خلاقانه در طراحان شود. هم‌چنین سونمز^۲ (۲۰۱۳)، با بررسی رابطه خلاقیت و مدل سازی سه بعدی به این نتیجه رسید که آشنایی با مدل سازی سه بعدی می‌تواند باعث پرورش خلاقیت در دانشجویان مهندسی شود.

از سوی دیگر قدرت مجسم سازی اطلاعات^۳ و تفکر بصری^۴ در مرحله ایده پردازی نقشی کلیدی ایفا می‌کند (Keller, 2006; Shen, 2008). تأثیر مثبت مدل سازی سه بعدی بر این موارد به اثبات

-
1. Musta'amal
 2. Sönmez
 3. Information Visulisation
 4. Visual Thinking

رسیده است (Shen, Ibid; Bertoni, 2013). به عنوان مثال، برتونی^۱ (همان) در مطالعه‌ای استفاده از مدل‌های سه‌بعدی کد همراه با کدگذاری رنگی را برای بازطراحی یک محصول بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد طراحانی، که از این نوع مدل‌های سه‌بعدی استفاده کرده‌اند، به درک صحیح‌تری از اطلاعات دریافتی از مشتری برای بازطراحی محصول دست یافته‌اند.

انتقال ایده یکی دیگر از فعالیتهای مرحله ایده‌پردازی است. مدل‌سازی در این فعالیت نیز نقشی مهم ایفا می‌کند (Rahimian, 2011; Ibrahim, 2010). رابرتسون^۲ و رادکلیف (۲۰۰۹) در پژوهشی دریافتند که استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در مرحله ایده‌پردازی و بهبود طرح می‌تواند قدرت انتقال ایده را تا حد زیادی افزایش دهد. به علاوه، مدل‌سازی سه‌بعدی می‌تواند در کنار رسم دستی، به عنوان ابزاری برای ارائه طرح‌های اولیه به کار رود (Açici, 2014).

الف. مدل‌سازی سه‌بعدی می‌تواند از طریق کمک به بروز خلاقیت، تسهیل انتقال ایده، تسهیل مجسم‌سازی اطلاعات و کمک به تفکر بصری به طراح در مرحله ایده‌پردازی کمک کند.

۲.۲. اصلاح

پس از ایده‌پردازی نوبت به اصلاح ایده می‌رسد. یک ایده برای نهایی شدن نیازمند بررسی و اصلاح از جنبه‌های مختلف است. یکی از مهم‌ترین اقدامات در بررسی و اصلاح یک ایده، ساخت مدلی کامل برای ایجاد درک کلی و ملموس از ایده است. مدل‌سازی فیزیکی مدل در مقیاس مناسب، با استفاده از گل، فوم یا چوب از روشهای قدیمی برای دستیابی به یک مدل سه‌بعدی از محصول است. هر چند روشهای سنتی ساخت مدل فیزیکی همچنان در برخی از صنایع مرسوم و گاه ضروری است، اما با ظهور مدل‌سازی رایانه‌ای، این روشها اغلب جای خود را به «نمونه‌سازی سریع»^۳ داده‌اند. در نمونه‌سازی سریع کافی است تا فایل سه‌بعدی مدل با فرمت اس‌تی‌ال به سیستمهای نمونه‌سازی سریع نظیر چاپگرهای سه‌بعدی منتقل شود تا نمونه‌ای از مدل در اندازه دلخواه آماده شود (Gibson, 2010). تبدیل سریع مدل سه‌بعدی رایانه‌ای به مدل فیزیکی با استفاده از روش نمونه‌سازی سریع، برای ساخت مدل‌های فیزیکی بسیار مورد توجه واقع شد (Ying, 2015; Fowell, 2015).

در کنار ساخت مدل فیزیکی تولید یک فضای مجازی و درعین حال ملموس، از دیگر روشهایی است که به حصول درک کلی از ایده کمک می‌کند. این امر به‌ویژه برای مدل‌هایی، که امکان ساخت آنها در اندازه واقعی وجود

1. Bertoni

2. Robertson

3. Rapid Prototyping

۱۲۴ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

ندارد، اهمیت می‌یابد. این فضای مجازی با نام «واقعیت مجازی»^۱ شناخته می‌شود. سیستم‌های واقعیت مجازی به کاربر این امکان را می‌دهند تا با استفاده از یک یا چند حس از حواس اصلی خود با محیط طراحی شده ارتباطی ملموس برقرار کنند. در این سیستمها با تغییر موقعیت کاربر ویژگیهای محیط مجازی متناسب با حرکت کاربر تغییر می‌کند. مرحله نخست تولید یک سیستم واقعیت مجازی مدل سازی سه بعدی با نرم افزارهای کد است (Fernández, 2015). طراحی خودرو (Lawson, 2016)، کشتی (Fernández, Ibid) و نیز طراحیهای معماری و عمرانی (Sampaio, 2014; Abdelhameed, 2013; Portman, 2015) از مهم ترین زمینه‌های استفاده از واقعیت مجازی هستند. از آنجایی که در طراحیهای، که در معماری و عمران انجام می‌گیرد، امکان تولید مدل به اندازه واقعی موجود نیست، واقعیت مجازی می‌تواند فضایی را برای طراح فراهم سازد تا بتواند به راحتی فضای نهایی را از نزدیک احساس کند.

ب. مدل سازی سه بعدی غالباً اولین قدم برای ایجاد یک مدل - مجازی یا حقیقی - برای مجسم کردن یک طرح است.

بررسی رفتار یک محصول در شرایط عملکردی نیازمند کسب درک صحیح از اصول و مفاهیم مهندسی حاکم بر آن رفتار می‌باشد. شبیه سازی رایانه‌ای ابزاری است که امکان درک رفتار محصول را بر اساس این اصول و بدون نیاز به ساخت محصول و انجام آزمایشهای تجربی زمان بر و پرهزینه فراهم می‌سازد.

به عنوان نمونه، شبیه سازی رفتار سیال و برهم کنش سیال و سازه بر اساس روابط و قوانین مکانیک سیالات نمونه‌ای از مهم ترین شبیه سازیهای است که در طراحی خودرو، هواپیما، توربین و بسیاری از تجهیزات دوار و نیروگاهی کاربرد دارد. صرف نظر از روش عددی یا ابزار مورد استفاده، شبیه سازی سه بعدی مستلزم وجود مدل سه بعدی محصول است. از این رو، در اکثر پژوهشهای مرتبط با شبیه سازی چه با استفاده از کدهای تجاری (López, 2015; Qi, 2010) و چه با استفاده از کدهای تولیدی (Grishchenko, 2015; Hua, 2015) ساخت مدل سه بعدی رایانه‌ای، نخستین قدم است. پس از بررسی نتایج شبیه سازی و حصول مقدار کمیتهای مهندسی مهم، نتایج شبیه سازی معمولاً به صورت متحرک و پویانمایی^۲ نمایش داده می‌شود (Tarshizi, 2015; Rupérez, 2010). این امر باعث می‌شود که علاوه بر پارامترهای نظری پراهمیت، نمایی گرافیکی از شبیه سازی نیز برای اصلاح محصول فراهم شود.

1. Virtual Reality

۲. معادل مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی برای واژه «انیمیشن»

پ. مدل‌سازی سه‌بعدی یکی از مهمترین پیش‌نیازها برای شبیه‌سازی رفتار یک محصول و مشاهده رفتار آن بدون صرف هزینه زیاد برای ساختن مدل فیزیکی و انجام آزمایش است. یک طرح در طول فرایند طراحی، از منظرهای مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد تا اصلاح و تکمیل شود. لذا بسته به ماهیت هر طرح باید آن را از لحاظ ویژگیهای فیزیکی، اقتصادی، عملکردی، قابل ساخت بودن، رعایت عوامل انسانی و موارد متعدد دیگری به‌دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. خصوصیات فیزیکی طرح مانند حجم، مرکز جرم، مقاومت مکانیکی، ممان اینرسی و سایر موارد، شامل ویژگیهای مربوط به جرم، هندسه و ویژگیهای حرارتی آن است. ابزارهای رایج مدل‌سازی سه‌بعدی دسترسی به تمامی اطلاعات مذکور را برای یک مدل را ممکن می‌سازند. به‌علاوه، هندسه‌ای که این ابزارها تولید می‌کند، می‌تواند به‌منظور تحلیل مقاومت مکانیکی و حرارتی جسم به روش تحلیلی المان محدود مورد استفاده قرار بگیرد. لذا تحلیل المان محدود یک هندسه نیز همانند شبیه‌سازیهای سیالاتی نیازمند ایجاد یک مدل سه‌بعدی است (Wang, 2016).

یکی از مهم‌ترین تحلیلهای مربوط به طراحی یک محصول یا یک سیستم، تحلیل اقتصادی و قیمت تمام‌شده آن است. اگر این بررسی به‌طور دقیق انجام نشود، ممکن است موجب شکست خوردن طرح در رقابت با رقبای شود. با توجه به اهمیت موضوع، سازندگان بسیاری از ابزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی امکان تحلیل قیمت را به ابزارهای نرم‌افزاری خود افزوده‌اند. به‌عنوان نمونه، می‌توان به شرکت‌های پی‌تی‌سی (PTC) و داسو سیستمز^۱، که تولیدکننده نرم‌افزارهای کریوپارامتریک^۲، سالدیورکز^۳ و کتیا^۴ است اشاره کرد (Chang, 2013). به‌علاوه در شرایطی که به هر دلیل امکان استفاده از ابزارهای مذکور ممکن نباشد می‌توان با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی به تحلیل قیمت محصولات پرداخت. به‌طور مثال سرات و دیگران^۵ (۲۰۱۳) با ارائه روشی جدید و با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی توانستند به تخمینی از زمان موردنیاز برای ساخت و نیز قیمت تمام‌شده یک نوع شیلنگ برسند.

تحلیل عملکرد مدل شامل تحلیل سازکار، نحوه سوار شدن قطعات در مونتاژ و نیز حرکت‌شناسی سینماتیکی و سینتیکی مدل است. هدف این نوع از تحلیل، بررسی مطلوب بودن سازکار طراحی شده و بارهای دینامیکی و

-
1. Dassault Systems
 2. Creo Parametric
 3. Solidworks
 4. Catia
 5. Serrat

۱۲۶ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

حرکت مدل است. در اغلب ابزارهای مدل سازی سه بعدی مانند نرم افزارهای سالیدورکز و کریوپارامتریک معمولاً محیطی برای بررسی حرکت سازکار مدل شده وجود دارد (Chang K. H., 2013). به علاوه، با این ابزارها می توان مجموعه های مونتاژی را از جنبه های مختلف تناوب، تداخل یا فاصله های موجود تحلیل کرد (همان). بسیاری از این تحلیلها موجب اصلاح و بهینه سازی محصول می شود.

ت. مدل سازی سه بعدی طرح، هندسه و اطلاعات لازم برای انواع تحلیل را فراهم کرده و بهینه سازی آن را تسهیل می کند.

۳.۲. اجرا

مرحله نهایی در طراحی مهندسی اجرا و عملیاتی سازی ایده نهایی است. در این مرحله محصول روانه بازار مصرف می شود. این مرحله را می توان به دو بخش کلی «ساخت» و «بازاریابی» تقسیم کرد. تولید نقشه های اجرایی هم به منظور مستندسازی طرح تکامل یافته و هم برای تولید یک محصول به کار می روند. در گذشته این نقشه ها با دست و سپس با نرم افزارهای نقشه کشی دوبعدی تولید می شد. اما امروزه ابزارهای مدل سازی سه بعدی امکان تولید نقشه اجرایی استاندارد با جزئیات و نماهای لازم از مدل های سه بعدی تولید شده را به راحتی فراهم ساخته اند. بدین ترتیب، نیازی به ترسیم دوبعدی نقشه ها نیست و مدل سه بعدی می تواند به تنهایی برای تولید نقشه مورد استفاده قرار گیرد.

از طرف دیگر، با استفاده از برخی روشهای ساخت جدید نظیر سی ان سی یا سیستم های روباتیک امکان تبدیل سریع مدل سه بعدی رایانه ای به محصول به وجود آمده است (Xiao, 2015; Wen-ming, 2015). در این حالت، کافی است تا خروجی مناسبی از مدل سه بعدی به سیستم ساخت منتقل شود. با توجه به اهمیت استفاده از مدل های سه بعدی برای ساخت محصول، در سالهای اخیر پژوهشهای زیادی پیرامون افزایش گستره و کاهش محدودیتهای بین سیستم های کد و سیستم های سی ان سی صورت گرفته است (Huang, 2015).

ث. مدل سازی سه بعدی، تهیه خروجی مناسب برای ساخت محصولات را ممکن ساخته و موجب تسهیل فرایند ساخت می شود.

گاهی یک طراح برای ارائه یک ایده و جلب نظر سرمایه گذاران نیازمند تصویر یا ویدیویی از آن ایده پیش از تولید آن است. همچنین ارائه محصول به بازار مصرف پس از ساخت، نیازمند تبلیغ، تهیه کالانما^۱ و

۱. معادل مصوب فرهنگستان برای واژه «کاتالوگ»

دفترک^۱ گاهی ارائه حضوری به مصرف‌کننده است. ارائه‌نمایی نزدیک به واقعیت از مدل با نورپردازی مناسب و امکان انتقال فایل از نرم‌افزارهای کد به نرم‌افزارهای گرافیکی برای انجام عملیات تکمیلی، از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی در زمینه بازاریابی و ارائه محصول است (Tuchkevich, 2015). همچنین از این تصاویر متحرک می‌توان برای آموزش مشتریان و ساخت دفترچه‌های راهنمای محصول نیز بهره برد.

ج. مدل‌سازی سه‌بعدی تولید تصاویر و انیمیشن‌های موردنیاز از یک ایده یا محصول را ممکن و جذاب سرمایه‌گذار، بازاریابی محصول و ارائه خدمات پس از فروش را تسهیل می‌کند.

۳. نمونه‌هایی از درسهای مرتبط با آموزش اصول مدل‌سازی به دانشجویان فنی در دانشگاههای

مطرح جهان

باتوجه به اهمیت و گستره کاربرد مدل‌سازی سه‌بعدی در رشته‌های مختلف مهندسی، بسیاری از مدارس فنی در دنیا توجه ویژه‌ای به آموزش اصول، مفاهیم و کاربردهای آن کرده‌اند. برخی از این مدارس، آموزش اصول هندسی مدل‌سازی را مدنظر قرار داده و برخی نیز به آموزش مهارت‌های موردنیاز برای به‌کارگیری این اصول پرداخته‌اند. در جدول ۱، نمونه‌هایی از درسهای رشته‌های مختلف مهندسی دانشگاه‌های برتر دنیا آمده است که در آنها به آموزش «اصول هندسی» یا «مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای» یا «کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی» پرداخته می‌شود. دانشگاه‌های بررسی‌شده مطابق رتبه‌بندی سایت تحصیلات تکمیلی تایمز (Times Higher Education, 2015) جزء پنجاه دانشگاه برتر فنی - مهندسی در ۳ سال گذشته هستند.

۴. بحث و جمع‌بندی

افرادی که مسئولیت هرکدام از مراحل طراحی مهندسی را بر عهده می‌گیرند، باید در حوزه تخصصی خود به ابزارها و مهارت‌های لازم تسلط داشته باشند. هدف بسیاری از درسهای تخصصی، که یک دانشجوی مهندسی می‌گذراند، انتقال دانش موردنیاز در قسمتی از فرایند طراحی مهندسی است. دانشجو در دوران تحصیل خود از طریق آشنایی با مفاهیم اصلی مهندسی، بنیانهای تخصص موردنظر خود را کسب می‌کند و آماده ورود به بازار کار حرفه‌ای و تقویت این بنیانهای تخصصی می‌شود.

۱۲۸ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

شش گزاره ارائه شده در این مقاله نشان دهنده اهمیت بالا و کاربرد وسیع مدل سازی سه بعدی در فرایند طراحی مهندسی از مرحله ایده پردازی تا تولید محصول به عنوان یک مهارت است. مهارتی که می تواند به تنهایی در تقویت برخی تواناییهای مورد نیاز برای طراحی مانند تجسم مؤثر باشد. به همین دلیل آشنایی دانش آموختگان رشته های مهندسی با دانش، اصول و کاربردهای مدل سازی سه بعدی برای موفقیت در حرفه مهندسی ضروری به نظر می رسد. از سوی دیگر، مطالب درسهای متعدد در رشته های مختلف مهندسی، به نوعی با مدل سازی سه بعدی مرتبط هستند. از این رو، آموزش مفاهیم و اصول اولیه مدل سازی سه بعدی نه تنها در موفقیت شغلی دانش آموختگان رشته های مهندسی مؤثر است، بلکه در صورت آموختن در ابتدای دوره تحصیل می تواند به دانشجویان در فراگیری بهتر برخی دروس تخصصی مهندسی نیز یاری کند.

به علاوه، وجود درسهای متعدد و متنوع مرتبط با مدل سازی سه بعدی رایانه ای و کاربردهای آن در برنامه آموزشی رشته های مختلف مهندسی دانشگاه های برتر دنیا، که بخشی از آنها به عنوان نمونه در جدول ۱ آمده است، نشان دهنده توجه این دانشگاهها به موضوع گفته شده است. این توجه ناشی از درک ضرورت گنجاندن این سرفصلها در برنامه آموزشی دانشجویان مهندسی است. البته از آنجاکه رشته های مختلف مهندسی تفاوت هایی با هم دارند، میزان نیاز دانشجویان رشته های مختلف مهندسی به یادگیری اصول مدل سازی سه بعدی رایانه ای و کاربردهای آن در طراحی مهندسی نیز متفاوت است. تفاوت در تعداد، شکل ارائه و محتوای این درسهای در رشته های مختلف مهندسی، که در جدول ۱ نیز دیده می شود، گواه همین ادعاست. دانشجویان رشته های مهندسی، که در آنها طراحی و تولید مصنوعات فیزیکی (اعم از ماشین، محصول، ساختمان و سایر موارد) پررنگ تر است، مانند «مهندسی مکانیک»، «مهندسی هوافضا»، «مهندسی عمران»، نیاز بیشتری به این درسهای و دانشجویان رشته های مهندسی، که طراحی و تولید مصنوعات فیزیکی در آنها کم رنگ تر است، مانند «مهندسی نرم افزار»، نیاز کمتری به آن دارند.

با در نظر گرفتن گزاره های تحلیلی ارائه شده و ارائه نمونه های متعدد درسهای مربوط به آموزش اصول و کاربردهای مدل سازی در دانشگاه های برتر مهندسی دنیا، می توان این گونه نتیجه گرفت که آموزش مدل سازی سه بعدی رایانه ای در کنار کاربردهای آن به دانشجویان همه رشته های مهندسی خصوصاً دانشجویان دو حوزه «مهندسی عمران» و «مهندسی مکانیک» شامل رشته های وابسته به آن مانند مهندسی سازه، مهندسی معماری، مهندسی هوافضا و مهندسی پزشکی ضروری است.

تعیین جزئیات این برنامه برای هر رشته مهندسی نیازمند تحقیقات و کسب تجارب بیشتر در آینده است.

جزئیاتی چون مطالب و سرفصلهای ضروری برای هر رشته، تعداد مناسب درسها و شکل و زمان ارائه آنها.

جدول ۱: نمونه هایی از درسهای رشته های مختلف دانشگاهی برتر دنیا

ردیف	نام درس	نام لاتین درس	رشته تحصیلی	دانشگاه	توضیحات
۱	روشهای طراحی و آنالیز سازه‌ای	Techniques for Structural Analysis and Design	هوانوردی و فضانوردی	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	در این درس تمرینها و پروژه درس ۴۰ درصد از نمره نهایی درس را به خود اختصاص می‌دهد. پروژه شامل مدل‌سازی و تحلیل المان محدود سازه است. نرم‌افزارهای سالیدورکز و که به ترتیب نرم‌افزارهای مدل‌سازی و (Cosmos) کازمس تحلیل مورد استفاده در پروژه هستند، به صورت جلسات یادآوری دانشجویان آموزش داده می‌شود (MIT OpenCourseWare, 2016).
۲	طراحی مهندسی و نمونه‌سازی سریع	Engineering Design and Rapid Prototyping	هوانوردی و فضانوردی	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	درسی است که در طی چهار هفته از هفته اول ژانویه تا انتهای ماه اراشه می‌شود. دانشجویان در دو فاز اصلی مراحل طراحی، بهینه‌سازی و ساخت یک محصول را طی می‌کنند. مهارتهایی نظیر مدل‌سازی سه‌بعدی با (هر دو با نرم‌افزار (CAE) نرم‌افزارهای کد، تحلیل سی‌ای‌ئی و کار با ماشینهای (CAM) سالیدورکز) و برنامه‌نویسی کم سی‌ان‌سی در قالب مباحث درسی و تمرین در این درس گنجانده شده است. ارائه درس بر اساس یک نظرسنجی از دانشجویان و احساس نیاز و تمایل آنها به درسی فشرده در زمینه نمونه‌سازی سریع و بهینه‌سازی طراحی است. (MIT OpenCourseWare, 2016).
۳	ماشینها چرا و چگونه کار می‌کنند؟	How and Why Machines Work	مهندسی مکانیک	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	درسی است که به آشنایی کلی با ماشینها توجه دارد. درس به همراه آزمایشگاه است. اصول مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار سالیدورکز و مونتاژ مدلها در قالب مباحث درسی، آزمایشگاه و تمرین ارائه است (همان).
۴	اجزای طراحی مکانیکی	Elements of Mechanical Design	مهندسی مکانیک	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	هدف این درس مدل‌سازی، طراحی، مونتاژ کردن و به‌کارگیری اجزای ماشین نظیر بیرینگها، فنرها، چرخ‌دندهها و سازکارهای است. ۵۰ درصد از نمره این درس به فعالیت‌های کلاسی و آزمونها و ۵۰ درصد به آزمایشگاه و پروژه اختصاص داده شده است. ارائه نقشه‌های اجرایی با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز، ارائه مدل‌های سه‌بعدی همراه با رندرینگ (Rendering) در نرم‌افزار سالیدورکز و تحلیل اجزا در نرم‌افزار کازمس‌ورکز از مراحل اصلی تشکیل‌دهنده پروژه درس است. وظایف پروژه باید در هر گروه به ۶ بخش تقسیم شود و دانشجویان مسئولیت هر بخش پروژه را بر عهده بگیرند. دو بخش کد (سالیدورکز) و تحلیل (کازمس) دو دسته از مهم‌ترین این وظایف است (همان).
۵	آشنایی با طراحی (تابستان سال دوم تحصیلی)	2nd summer Introduction to design	مهندسی مکانیک	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	هدف این درس آشنایی دانشجویان با فرایند طراحی خلاق است. دانشجویان در طی فرایند طراحی و ساخت با مهارتهایی نظیر طراحی طرح اولیه، انتخاب طرح اولیه، تفکر

۱۳۰ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

					<p>بصری، کار گروهی و مسئولیتهای حرفه‌ای آشنا می‌شوند. دانشجویان موظفند در طول این درس از طریق آموزشهای برخط وبگاه دانشکده، با یکی از نرم‌افزارهای سالی‌دورکز یا پرواینجینیر (Pro/Engineer) آشنا شوند. در پایان درس، هر گروه باید با ارائه اسلایدهایی مراحل طراحی محصول در آن گروه را نمایش دهد. نمایش ایده‌های اولیه در فرایند طوفان فکری و نیز محصول نهایی با استفاده از نرم‌افزارهای کد از مهم‌ترین مطلوبات از دانشجوی در این ارائه‌ها است (MITOpenCourseWare, 2016).</p>
۶	طراحی مهندسی سازه	Structural Engineering Design	مهندسی عمران و محیط‌زیست	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	<p>در این درس دانشجویان با فرایند طراحی سازه آشنا می‌شوند. تحلیل مدل‌های ساده با نرم‌افزار سَپ (SAP) از مهم‌ترین مباحث این درس است (همان).</p>
۷	آشنایی با محاسبات طراحی	Introduction to Design Computing	معماری	مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)	<p>در این درس با استفاده از مدل‌سازی رایانه‌ای و رندرینگ دانشجویان با فرایند طراحی و محاسبات معماری آشنا می‌شوند. تمرکز اصلی درس بر روی طراحی معماری با استفاده از نقشه‌های کد، مدل‌سازی سه‌بعدی، رندرینگ و نمونه‌سازی سریع است. دانشجویان در این درس موظف به تولید مدل‌های رایانه‌ای برای تولید بسته‌های رایانه‌ای با قابلیت کاوشگری هستند (همان).</p>
۸	خلق محصول به کمک رایانه	Computer-Aided Product Creation	مهندسی مکانیک	دانشگاه استنفورد	<p>تمرکز این درس بر روی کاربردهای رایانه در فرایند طراحی نظیر نمونه‌سازی سریع، مدل‌سازی سه‌بعدی و ملشین‌کاری با استفاده از رایانه است. این درس همراه با آزمایشگاه ارائه می‌شود که هدف آن تقویت مهارت‌های کد/آکم‌سی‌ای‌ئی است (Stanford Bulletin: EXPLORE COURSES, 2016).</p>
۹	طراحی و تولید	Design and Manufacturing	مهندسی مکانیک	دانشگاه استنفورد	<p>در این درس مهارت‌هایی نظیر طراحی طرح اولیه، طراحی جزئیات، تولید نمونه اولیه، ارائه عمومی محصول نهایی آموزش داده می‌شود. باتوجه به محوریت نرم‌افزارهای کد در این درس، داشتن تجربه کار با این نرم‌افزارها جزء پیش‌نیازهای این درس است (همان).</p>
۱۰	آزمایشگاه نمونه‌سازی سیستم‌های زیست پزشکی ^۱	Biomedical System Prototyping Lab	مهندسی پزشکی	دانشگاه استنفورد	<p>در این درس دانشجویان در قالب گروه‌های دو یا سه‌نفره به طراحی و ساخت یک بیوراکتور با خصوصیات مشخص هستند. استفاده از نرم‌افزارهای کد و چاپ سه‌بعدی از مهم‌ترین مهارت‌های آموزش در طی فرایند طراحی در این درس است (همان).</p>
۱۱	طراحی معماری: مدل‌سازی سابعدی، روش و فرایند	Architectural Design: 3-D Modeling, Methodology, and Process	مهندسی عمران	دانشگاه استنفورد	<p>هدف پروژه‌های ارائه‌شده در این درس طراحی مفهومی اجزای اصلی معماری نظیر دیوارها و سقف است. تمرکز اصلی درس بر روی ایجاد مدل‌های سابعدی با جنسهای مختلف است (همان).</p>
۱۲	آشنایی با	Introduction to	مهندسی مکانیک	دانشگاه فناوری	<p>در این درس دانشجویان با فنون دستی و رایانه‌ای ماشین‌کاری</p>

علیرضا جهان تیغ پاک و محمد علی دائیان ۱۳۱

نمونه‌سازی سریع در مهندسی مکانیک	Mechanical Prototyping	کالیفرنیا (Caltech)	در کنار روشهای نمونه‌سازی سریع با چاپگرهای سه‌بعدی و برش‌کاری با استفاده از جت‌آب آشنا می‌شود (Caltech Catalog, 2016)
۱۳ طراحی مکانیک	Mechanical Design	دانشگاه پرینستون	در این درس دانشجویان ملزم به طراحی و ساخت یک سیستم رباتیک به صورت گروهی هستند. فرایند طراحی/تسبیح‌سازی/نمونه‌سازی مستلزم آشنایی با مهارت‌ها و ابزارهای کد/کم/سی‌ای‌تی. لذا برای تقویت این مهارت‌ها درس به همراه آزمایشگاه ارائه شده است. (Princeton Mechanical and Aerospace Engineering Courses, 2016)
۱۴ طراحی مهندسی؛ روشها و مهارت‌ها	Engineering Design: Methods and Skills	دانشگاه کارنگی ملون	در این درس دانشجویان در چهار مرحله با روشها و مهارت‌های موردنیاز برای فرایند طراحی آشنا می‌شوند. این چهار مرحله عبارتند از: طراحی طرح اولیه، طراحی جزئیات، تحلیل و تولید. دانشجویان در پایان درس به مهارت‌هایی دست می‌یابند که مهم‌ترین آنها تولید نقشه‌های مهندسی، مدل‌سازی سه‌بعدی اجزاء در نرم‌افزار کد، تحلیل اجزاء در نرم‌افزارهای سی‌ای‌ای و تولید و تست نمونه اولیه است. (Courses-Mechanical Engineering - Carnegie Mellon, 2016)
۱۵ آشنایی با طراحی به کمک رایانه	Introduction to computer-aided design	دانشگاه کارنگی ملون	در این درس دانشجویان با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز با مهارت‌های فرایند طراحی به کمک رایانه آشنا می‌شوند. نظیر: تولید و تحلیل اجزاء و مونتاژ مکانیکی، تولید نقشه‌های اجرایی، و آماده‌سازی محصول طراحی شده برای تولید. درس با یک آزمایشگاه دو ساعته در طول هفته همراه است. (Courses-Mechanical Engineering - Carnegie Mellon, 2016)
۱۶ طراحی به کمک رایانه	Computer-aided design	دانشگاه فناوری جورجیا	آشنایی با اصول مدل‌سازی هندسی، سطوح سیمی سه‌بعدی و نمایش سه‌بعدی به همراه نمایش ریاضی منحنیها، سطوح و اجسام سه‌بعدی و کاربردهای آن در مهندسی هوافضا از مهم‌ترین مباحث این درس است. (Georgia tech catalog, 2016)
۱۷ طراحی به کمک رایانه	Computer-aided design	دانشگاه فناوری جورجیا	مباحث اصلی این درس عبارتند از: اصول کد، شامل مدل‌سازی هندسی و مدل‌سازی سه‌بعدی، نمایش پارامتریک هندسه‌ها و نحوه تعامل انسان با ماشینها به همراه کاربرد آن در طراحی، تحلیل و تولید (همان).
۱۸ مدل‌سازی سه‌بعدی	3D Modeling	دانشگاه فناوری جورجیا	تولید مدل‌های سه‌بعدی از سازه‌های معماری شامل مباحث تولید هندسه، تعیین جنس و نورپردازی مدل، رندرینگ و تولید انیمیشن‌های اولیه از اهداف این درس است (همان).
۱۹ اصول طراحی معماری به کمک رایانه	Principles of Computer Aided Architectural Design	دانشگاه کالیفرنیا برکلی	هدف اصلی در این درس آشنایی دانشجویان با کاربردهای رایانه در معماری و تأثیرات آن در مهندسی معماری در حال حاضر و آینده می‌باشد. مباحث اصلی درس شامل ارائه و بازارانه (تولید طرح دوبعدی، درفتینگ (Drifting)، مدل‌سازی، ساخت انیمیشن و رندرینگ)، ارائه راه‌حلهای طراحی، ارزیابی و پیش‌بینی و کاربردهای رایانه در معماری در آینده (مانند ماشینی‌کردن ساخت، ساختمانهای

۱۳۲ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

					هوشمند و محیط مجازی) است. درس همراه با آزمایشگاه است که برای آشنایی دانشجویان با نرم افزار رویت (Revit) و کاربردهای آن در درفتینگ، مدل سازی و رندرینگ است.
۲۰	فناوری رایانه‌ای سه بعدی	3-D Computer Technology	مهندسی معماری	دانشگاه کالیفرنیا برکلی	هدف این درس آشنایی دانشجویان با نرم افزارهای حرفه‌ای مدل سازی معماری نظیر تری دی استودیومکس (3D Studio Max)، مایا (Maya) و راینو (Rhino) و چگونگی تولید و ارتباط با استفاده از مدل‌های سه بعدی دیجیتال است. (Berkley Academic guide, 2016)
۲۱	کارگاه ایجاد فضای مجازی	Workshop in Designing Virtual Places	مهندسی معماری	دانشگاه کالیفرنیا برکلی	دانشجو در این درس با چگونگی تولید فضای مجازی با استفاده از رایانه آشنا می‌شود. درس تلفیقی از مفاهیم معماری، فیلم سازی و طراحی بازبهای رایانه‌ای است و از یک نرم افزار موتور بازیهای رایانه‌ای و یک نرم افزار مدل سازی برای تولید تست و به کارگیری فضاهای مجازی بهره می‌برد (همان)
۲۲	مدل سازی اجسام و اصول CAD/CAM	Solid Modeling and CAD/CAM fundamentals	مهندسی مکانیک	دانشگاه کالیفرنیا برکلی	هدف این درس آشنایی با طرز نمایش و الگوریتمهای هندسه‌های سه بعدی است. در این درس همچنین کاربرد مدل سازی در طراحی، تحلیل، نقشه کشی و ساخت قطعات مکانیکی ارائه می‌شود. از جمله این کاربردها می‌توان به روباتیک، مهندسی معکوس، نمونه سازی سریع و تولید قالب اشاره کرد (Berkley Academic guide, 2016)
۲۳	مدل سازی هندسه	Geometry Modeling	مهندسی مکانیک و هوافضا	دانشگاه کالیفرنیا لس آنجلس	موضوع اصلی این درس اصول منحنیهای پارامتری، مدل سازی سطوح، اسپلاینها (Splines) و منحنی بزیر (Bezier) عنوان شده است. در این درس اصول و مفاهیم آموزش داده شده با استفاده از نرم افزارهای کدآکم نیز مشاهده می‌شوند (UCLA Register Office, 2016)
۲۴	گرافیک و طراحی مهندسی	Engineering Graphics and Design	مهندسی مکانیک / مهندسی عمومی (۱)	دانشگاه ایلینوی، اربانا	هدف آن آشنایی با انواع مدل‌های پارامتری و غیر پارامتری و مدل‌های سطوح و سیمی است. تهیه نقشه از مدل‌ها و شیوه ویرایش مدل‌های سه بعدی نیز از دیگر اهداف این درس است. در این درس برای ساخت مدل قطعات و مجموعه‌ها از نرم افزارهای کد استفاده می‌شود. (University of Illinois Urbana Course Explorer, 2016)
۲۵	طراحی به کمک رایانه	Computer Aided Design	مهندسی مکانیک	دانشگاه ایلینوی، اربانا	محتوای درس آشنایی با هندسه و توپولوژی تجهیزات مهندسی، آشنایی با استانداردهای ترانسینگ (Tolerancing) و اندازه گذاری، ایجاد مدل‌های مهندسی و ارائه آنها به صورت نقشه اجرایی و مدل‌های سه بعدی است. قسمتهای اصلی درس عبارتند از: ۱- آشنایی با کد در دو بعد و سه بعد ۲- مدل سازی اولیه قطعات با استفاده از کد ۳- سطوح پیشرفته ۴- نقشه‌های اجرایی (همان)
۲۶	طراحی مهندسی	Engineering Design	مهندسی مکانیک	دانشگاه کالج لندن	در این درس دانشجویان با طراحی، تحلیل، ساخت و تست یک محصول آشنا می‌شوند. همچنین آنها در استفاده از ابزارهایی نظیر نرم افزارهای کد (CAD) و تحلیل متب (MATLAB) به تخصص نسبی دست می‌یابند. همچنین آنها به تخصص کافی برای ساخت مدل فیزیکی نمونه اولیه

و نیز انجام تحلیلهای مناسب دست می‌یابند. ۲۰ درصد نمره این درس به طراحی، ۵۰ درصد به ساخت نمونه اولیه و ۳۰ درصد آن نیز به تحلیل اختصاص یافته است. (MECH2022 Engineering Design)					
در این درس پیشینه تاریخی مهندسی به کمک رایانه به همراه تحلیل دینامیکی و تولید به کمک رایانه آموزش داده می‌شود (NTU Education (BRC Course Listing).	دانشگاه نئیانگه، سنگاپور	مهندسی مکانیک	Computer aided Engineering	مهندسی به کمک رایانه	۲۷
در این درس ضمن ارائه اصول اولیه طراحی سیستمهای مکترونیک، امکان تولید نمونههای اولیه از محصولات با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی به کمک رایانه فراهم شده است. (HKUST UG Course Catalog-Mechanical Engineering).	دانشگاه علم و صنعت هنگ‌کنگ	مهندسی مکانیک	Mechatronic Design and Prototyping	طراحی مکترونیک و نمونه‌سازی	۲۸
سیستمهای مدل‌سازی هندسی، ساختمان داده، فناوری و ماشینکاری NC از عناوین تشکیل‌دهنده این درس است. (همان)	دانشگاه علم و صنعت هنگ‌کنگ	مهندسی مکانیک	CAD/CAM	CAD/CAM	۲۹

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش نقش مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای در فرایند طراحی مهندسی بررسی و نتایج، در شش دسته کلی زیر ارائه شد:

- کاربرد مدل‌سازی در ایده‌پردازی: ارتقای تفکر بصری، افزایش قابلیت انتقال ایده و پرورش خلاقیت
- کاربرد مدل‌سازی در مجسم کردن طرح: ساخت مدل سه‌بعدی، نمونه‌سازی سریع و واقعیت مجازی
- کاربردها در شبیه‌سازی: شبیه‌سازی سیالاتی و انیمیشن؛
- کاربردها در تحلیل: تحلیل ویژگیهای فیزیکی، مقاومت مکانیکی، اقتصادی، عملکرد و سایر موارد؛
- کاربردها در تولید: تهیه خروجی مناسب برای انواع روشهای تولید- کاربرد در بازاریابی و خدمات پس از فروش: تهیه تصاویر و انیمیشنهای نزدیک به واقعیت.

اهمیت ذاتی طراحی مهندسی و گستره وسیع کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی در این فرایند، ضرورت تسلط مهندسان بر این مهارت را آشکار می‌سازد. لذا تدوین برنامه‌ای برای آموزش اصول مدل‌سازی سه‌بعدی رایانه‌ای و کاربردهای آن به دانشجویان رشته‌های مختلف مهندسی به فراخور میزان نیاز هر رشته و در نظر گرفتن تجربه دانشگاههای برتر جهان در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

۱۳۴ بررسی اهمیت و کاربردهای مدل سازی سه بعدی در طراحی مهندسی و ضرورت آموزش اصول آن به ...

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف به انجام رسیده است. بدین وسیله از حمایت‌های این معاونت قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

- محمودی، فیروز و مولا، سمیه (۱۳۹۵). بررسی میزان دستیابی دانشجویان فنی - مهندسی دانشگاه تبریز به مهارت‌های اساسی قرن ۲۱. *فصلنامه آموزش مهندسی ایران*، ۱۸ (۶۹)، ۳۸-۱۹
- Abdelhameed, W. A. (2013). Virtual reality use in architectural design studios: A case of studying structure and construction. *Procedia Computer Science*, 220-230.
- Açici, F. K. (2014). The Place of Hand Drawing and Computer Aided Design in Interior Design Education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 716-720.
- Berkley Academic guide. (2016). Retrieved from Guide.berkeley.edu
- Bertoline, G. R. (2009). Technical Graphics communication. New York: McGraw-Hill.
- Bertoni, A. (2013). Analyzing product-service systems conceptual design: The effect of color-coded 3D representation. *Design Studies*, 763-793.
- Caltech Catalog. (2016). Retrieved from <http://catalog.caltech.edu/>
- Chang, K. H. (2013). *Product Performance Evaluation using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series*. Academic press.
- Chang, K. H. (2013). *Using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series. Product Manufacturing and Cost Estimating*. Academic Press.
- Chang, K. H. (2014). *Product Design Modeling using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series*. Academic Press.
- Courses-Mechanical Engineering - Carnegie Mellon. (2016). Retrieved from www.cmu.edu/me/
- Crawley, E. M. (2007). Rethinking engineering education. In *The CDIO Approach*. Springer Singapore.
- Dieter, G. E. (1991). *Engineering design*. McGraw-Hill.
- Fernández, R. P. (2015). Virtual reality in a shipbuilding environment. *Advances in Engineering Software*, 30-40.
- Fowell, C. E. (2015). Rapid prototyping and patient-specific pre-contoured reconstruction plate for comminuted fractures of the mandible. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 1035-1037.
- Georgia tech catalog (2016). Retrieved from <http://catalog.gatech.edu/>
- Gibson, I. R. (2010). *Additive manufacturing technologies*. New York: Springer.
- Grishchenko, D. J. (2015). The TALL-3D facility design and commissioning tests for validation of coupled STH and CFD codes. *Nuclear Engineering and Design*.
- HKUST UG Course Catalog-Mechanical Engineering, Retrieved from publish.ust.hk/prog_crs/ugcourse.
- Hua, S. H. (2015). Numerical investigation of two-phase flow characteristics of subcooled boiling in IC engine cooling passages using a new 3D two-fluid model. *Applied Thermal Engineering*, 648-663.

- Huang, B. X. (2015). An automatic 3D CAD model errors detection method of aircraft structural part for NC machining. *Journal of Computational Design and Engineering*, 253-260.
- Ibrahim, R. (2010). Comparison of CAD and manual sketching tools for teaching architectural design. *Automation in Construction*, 978-987.
- Keller, T. G. (2006). Information visualizations for knowledge acquisition: The impact of dimensionality and color coding. *Computers in Human Behavior*, 43-65.
- Lawson, G. S. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer. *Applied Ergonomics*, 323-330.
- Leake, J. M. (2013). *Engineering design graphics*. J Wiley & Sons.
- Lieu, D. (2008). *Visualization, modeling, and graphics for engineering design*. Cengage Learning. Cengage Learning.
- López, A. N. (2015). CFD study of jet impingement test erosion using Ansys Fluent® and OpenFOAM®. *Computer Physics Communications*, 197, 88-95.
- MECH2022 Engineering Design, Retrieved from <http://www.ucl.ac.uk/basc/current/pathways/sciences-engineering/mech2022>
- MITOpenCourseWare (2016). Retrieved from <http://ocw.mit.edu>
- Musta'amal, A. H. (2012). Does CAD really encourage creative behaviors among its users: A case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 602-608.
- NTU Education (BRC) Course Listing, Retrieved from [http://www.mae.ntu.edu.sg/Programmes/CurrentStudents/UG\(Full-Time\)/ME/Documents/NTU Education \(BRC Course Content\)](http://www.mae.ntu.edu.sg/Programmes/CurrentStudents/UG(Full-Time)/ME/Documents/NTU%20Education%20(BRC%20Course%20Content))
- Portman, M. E.-G. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers. Environment and Urban Systems*, 376-384.
- Princeton Mechanical and Aerospace Engineering Courses (2016). Retrieved from www.princeton.edu/mae
- Qi, R. N. (2010). Numerical simulations of LNG vapor dispersion in Brayton Fire Training Field tests with ANSYS CFX. *Journal of Hazardous Materials*, 51-61.
- Rahimian, F. P. (2011). Impacts of VR 3D sketching on novice designers' spatial cognition in collaborative conceptual architectural design. *Design Studies*, 255-291.
- Robertson, B. F. and Radcliffe, D. F. (2009). Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design. *Computer-Aided Design*, 41(3), 136-146.
- Rupérez, M. J. (2010). Contact model, fit process and, foot animation for the virtual simulator of the footwear comfort. *Computer-Aided Design*, 425-431.
- Sampaio, A. Z. (2014). The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods. *Automation in Construction*, 58-67.
- Serrat, J., Lumberas, F. and Lopez, A. M. (2013). Cost estimation of custom hoses from STL files and CAD drawing. *Computers in Industry*, 64(3) 299-309.
- Shen, Y. O. (2008). Product information visualization and augmentation in collaborative design. *Computer-Aided Design*, 963-974.
- Sönmez, M. (2013). Creativity and Solid Modeling. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 169-173.
- Stanford Bulletin: Explore courses. (2016). Retrieved from <http://explorecourses.stanford.edu/>

- Tarshizi, E. S. (2015). Simulation and animation model to boost mining efficiency and enviro-friendly in multi-pit operations. *International Journal of Mining Science and Technology*, 671-674.
- Times Higher Education. (2015). Retrieved from Times Higher Education: www.timeshighereducation.co.uk
- Toh, C. A. (2015). How engineering teams select design concepts: A view through the lens of creativity. *Design Studies*, 111-138.
- Tuchkevich, E. R. (2015). ADN and AP Programs for civil engineering students. *Procedia Engineering*, 1142-1147.
- UCLA Register Office (2016). Retrieved from <http://www.registrar.ucla.edu/>
- University of Illinois Urbana Course Explorer. (2016). Retrieved from <http://www.courses.illinois.edu/>
- Wang, X. (2016). 3D FEM analyses of the ultrasonic transducer for controlled nanowire rotary driving. *Applied Acoustics*, 157-162.
- Wen-ming, X. A.-m.-H.-f.-f. (2015). An integrated CAD/CAM/robotic milling method for custom cementless femoral prostheses. *Medical engineering & physics*, 911-915.
- Xiao, W. Z. (2015). A complete CAD/CAM/CNC solution for STEP-compliant manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1-10.
- Ying, B. Y. (2015). Correction of facial asymmetry associated with vertical maxillary excess and mandibular prognathism by combined orthogenetic surgery and guiding templates and splints fabricated by rapid prototyping technique. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 1330-1336.