فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال هجدهم، شماره ۷۰، تابستان ۱۳۹۵، صص. ۹۷- ۷۷

استفاده از فنّاوری چاپگرهای سه‌بُعدی در بهبود کیفیت آموزش درس نقشه‌کشی صنعتی

مهدی متقی‌پور[۱]

چکیده: از ظهور فنّاوری چاپگرهای سه‌بُعدی نزدیک به دو دهه می‌گذرد. اما در این زمان محدود، پیشرفتهای شگرفی در چرخهٔ تولید محصول رخ داده است. به‌طوری‌که، در بسیاری از مراکز صنعتی بزرگ از قبیل صنایع خودروسازی، تجهیزات پزشکی، صنایع نظامی و غیرمجاز این فنّاوری استفاده می‌کنند. اصطلاحاً به این گروه از فنّاوریها «نمونه‌سازی سریع» گفته می‌شود. همانطور که می‌دانیم ساخت مدل به روش سنتی مثل استفاده از دستگاههای فرز و تراش فرایندی بسیار وقت‌گیر، مشکل و هزینه‌بر است. درحالی‌که به کمک این فنّاوری می‌توان یک نمونه را به صورت لایه‌لایه مستقیماً از روی فایل مدل سه‌بُعدی آن، که توسط یکی از نرم‌افزارهای که تهیه شده است، ساخت. یکی دیگر از کاربردهای مهم این فنّاوری، استفاده از آن در مباحث آموزشی و تحقیقاتی است که از دید دانشگاههای برتر دنیا مخفی نمانده است. بیشتر دانشجویان مهندسی در درس نقشه‌کشی صنعتی با مباحثی همچون تجسم فضای سه‌بُعدی و مجهول‌یابی تصویر سوم با مشکل روبه‌رو هستند، لذا نویسندهٔ این نوشتار مدلهای فیزیکی تمرینها را به‌کمک چاپگر سه‌بُعدی می‌سازد و در کلاس در اختیار دانشجویان قرار می‌دهد. باتوجه‌به نظرسنجی و آزمونهای گرفته‌شده بر روی تعدادی از دانشجویان مرد، که در درس نقشه‌کشی صنعتی ثبت‌نام کرده بودند. مشخص شد که بسیاری از آنها نسبت به استفاده از مدلهای سه‌بُعدی فیزیکی نگرش مثبتی دارند و نتایج آزمونها بهبود در کیفیت فرایند آموزش را نشان می‌دهد.

واژه‌های‌کلیدی: نمونه‌سازی سریع، چاپگرهای سه‌بُعدی، نرم‌افزارهای کَد، درس نقشه‌کشی صنعتی، قدرت تجسم سه‌بُعدی

---

۱. مربی مرکز گرافیک مهندسی دانشگاه صنعتی شریف، ایران. mmottaghi@sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۷/۱۴)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۲۵)

۱. مقدمه

با پیشرفت علم و فنّاوری و ظهور فنّاوریهای نوین در چرخهٔ طراحی و تولید محصول، روشهای جدیدی برای ساخت قطعات مختلف ابداع شده است که سرعت آن در مقایسه با روشهای سنتی بسیار زیاد است و این امر موجب کاهش مصرف انرژی، زمان و هزینه‌های تولید می‌شود. یکی از این روشها که جزء جدیدترین فنّاوریهای روز جهان محسوب می‌شود، نمونه‌سازی سریع[۱] است. در نمونه‌سازی سریع، قطعهٔ نمونه از روی مدل سه‌بُعدی طراحی‌شده در یکی از نرم‌افزارهای کَد[۲] ساخته می‌شود و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از صنعت کفش تا صنایع پیشرفته خودروسازی و صنایع هوایی دارد. البته لازم به ذکر است که در حالت کلی واژهٔ نمونه‌سازی سریع از دو معنا برخوردار است که عبارت‌اند از: ۱ـ نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ کاهشی[۳] و ۲ـ نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ افزایشی[۴]. نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ کاهشی همان روش تولید قطعه به شیوهٔ سنتی است که از دیرباز هم مرسوم بوده است و در آن از قطعهٔ خام آنقدر ماده برداشته می‌شود تا اینکه به قطعهٔ نهایی موردنظر برسد. از مثالهای این روش می‌توان به روشهای براده‌برداری سنتی شامل فرزکاری، تراشکاری، سنگ‌زنی و غیره تا روشهای پیشرفته شامل ماشینهای کنترل عددی[۵] ، ماشین‌کاری با روش تخلیهٔ الکتریکی[۶] و غیره اشاره کرد. در روش نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ افزایشی برخلاف روش پیشین با اضافه کردن لایه به لایه از ماده بر روی هم به قطعهٔ نهایی موردنظر دست می‌یابیم. از مثالهای این روش می‌توان به روشهای استریولیتوگرافی[۷]، تفجوشی انتخابی با لیزر[۸]، ساخت لایه‌ای[۹]، رسوب مذاب[۱۰] و غیره اشاره کرد. روش نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ کاهشی معمولاً به ساخت قطعات با هندسهٔ ساده محدود می‌شود و از هزینه و زمان ساخت بالاتری برخوردار است، درحالی‌که در روش نمونه‌سازی سریع به شیوهٔ افزودنی می‌توان قطعات با هندسه پیچیده را با هزینه و زمان ساخت کمتری به دست آورد. امروزه در نوشتارهای علمی از عنوان نمونه‌سازی سریع

---

1. RP: Rapid Prototyping
2. CAD: Computer Aided Design
3. Subtractive
4. Additive
5. CNC: Computer Numerical Control
6. EDM: Electric Discharge Machining
7. SLA: Stereo Lithography Apparatus
8. SLS: Selective laser Sintering
9. LOM: LaminatedObject Manufacturing
10. FDM: Fused Deposition Modeling

بیشتر معنای دوم برداشت می‌شود و حتی گاهی از آن به عنوان کلی ساخت افزایشی[1] نیز یاد می‌شود.(Ian Gibson, David Rosen and Brent Stucker, 2015; Mahindru and Mahendru, 2013) ازاین‌رو در این مقاله، منظور از عنوان نمونه‌سازی سریع همان معنای دوم است.

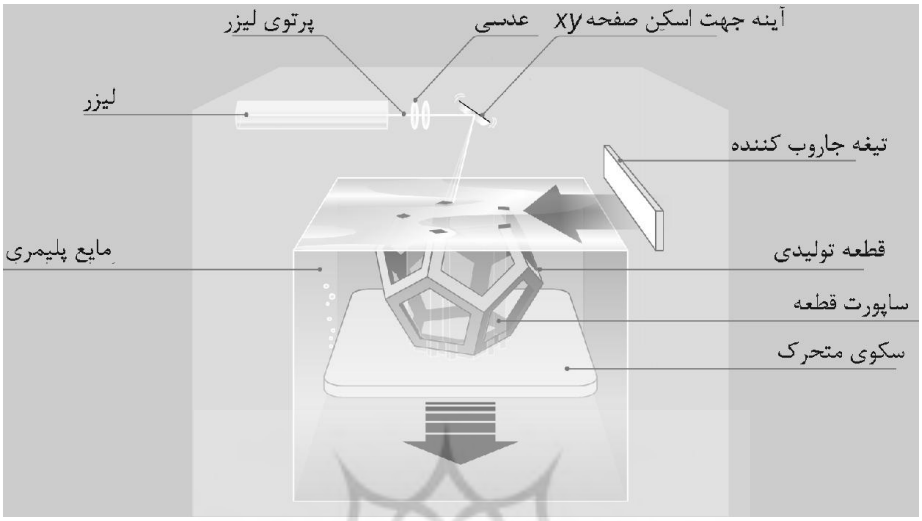
۲. روشهای نمونه‌سازی سریع و کاربردها

در حال حاضر روشهای بسیاری در نمونه‌سازی سریع مورداستفاده قرار می‌گیرد که از مهمترین و کاربردی‌ترین آنها می‌توان به چهار روش استریولیتوگرافی، ساخت لایه‌ای، تفجوشی انتخابی با لیزر، و رسوب مذاب اشاره کرد که همگی به‌عنوان چاپگرهای سه‌بعدی شناخته می‌شوند (نمونه‌سازی سریع: https://fa.wikipedia.org/wiki/). در روش استریولیتوگرافی قطعهٔ نمونه با استفاده از یک محفظه محتوی بسپار[2] مایع، که به نور ماوراءبنفش حساس است و در اثر تابش به آن از مایع به جامد تبدیل می‌شود و همچنین یک لیزر ماوراءبنفشِ لایه به لایه ساخته می‌شود. برای ساخت هر لایه، پرتو لیزر از روی سطح مایع طبق الگوی برنامه‌ریزی‌شدهٔ رایانه‌ای حرکت می‌کند و موجب جامد شدن آن قسمت از بسپار می‌شود. پس از ایجاد الگوی موردنظر برای آن لایه، سکوی متحرک، که درون محفظه مایع قرار دارد و نقش زیر لایهٔ قطعه موردنظر را بازی می‌کند به اندازهٔ ضخامت یک لایه، که معمولاً بین۰/۰۵ تا ۰/۱۵میلی‌متر است، پایین می‌رود. سپس یک تیغهٔ جاروکننده از روی سطح مقطع قسمتی که پیش‌تر ساخته شده عبور می‌کند و باعث توزیع یکنواخت مایع تازه بر روی آن می‌شود. پس از این مراحل، نوردهی لایهٔ دوم شروع می‌شود که آن هم پس از جامد شدن به لایهٔ پیشین متصل می‌شود. لایه‌های بعدی نیز پی‌درپی به همین شیوهٔ ذکرشده ایجاد می‌شوند و هر یک به لایهٔ زیرین خود متصل می‌شوند. در نهایت، یک حجم کامل سه‌بُعدی با این روش ساخته خواهد شد. مدلهای ساخته‌شده توسط این روش به‌قدری استحکام دارند که می‌توان آنها را ماشین‌کاری کرد یا اینکه در قالبهای تزریق از آنها استفاده کرد(Chua, C. K., Leong, K.F., 2014). در شکل ۱ نمونه‌ای از دستگاهی، که براساس این روش کار می‌کند، می‌توان مشاهده کرد.

---

1. Additive Manufacturing

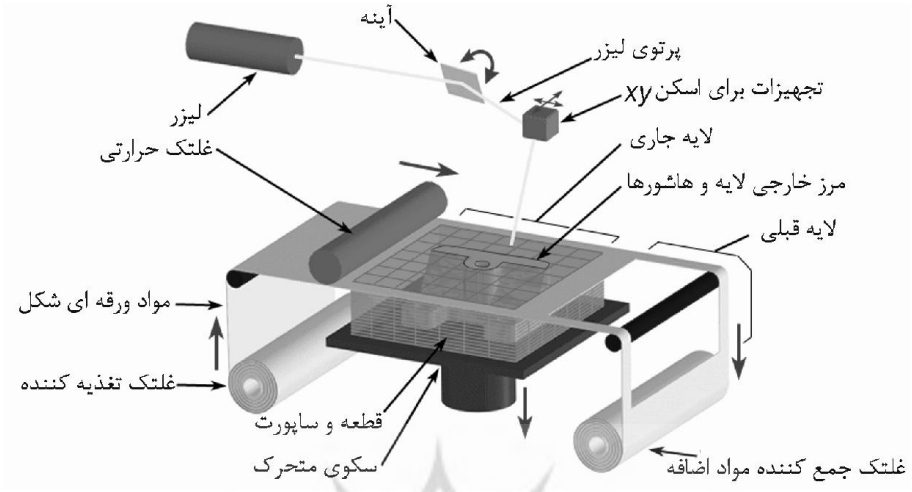
۲. معادل مصوب فرهنگستان برای واژهٔ «پلیمر»



شکل ۱: دستگاهی که بر اساس روش استریولیتوگرافی کار می‌کند

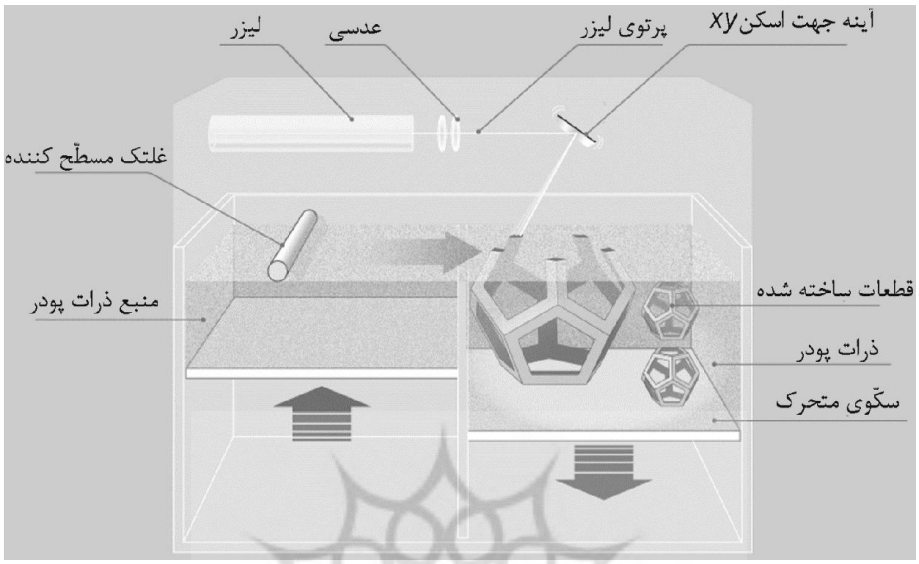
پس از ساخت کل قطعه، آن را به‌منظور تمیز کردن و پاک کردن بسپارهای اضافی درون حمامی از یک ماده شیمیایی قرار می‌دهند و سپس از آن در یک کورهٔ فرابنفش می‌گذراند.

در روش ساخت لایه‌ای مواد به‌صورت ورقهٔ درسته‌شده و روی غلتک تغذیه‌کننده نصب می‌شوند. با چرخش غلتک، ورقه به داخل دستگاه کشیده می‌شود و از زیر یک غلتک حرارتی عبور می‌کند. به این ترتیب، چسب حرارتی ورقه فعال شده و همزمان سکوی متحرک کمی به پایین حرکت می‌کند تا ورقهٔ داغ در موقعیت مناسب خود قرار گیرد. سپس سکو بالا می‌آید و ورقه به لایهٔ زیرین خود می‌چسبد. پس از این مرحله، مرز خارجی لایهٔ با لیزر برش می‌خورد و در انتها قسمت اضافی ورقه به‌صورت مربعی برش خواهد خورد. این مراحل تا پایان یافتن قطعهٔ سه‌بُعدی ادامه می‌یابد. جنس ورقه می‌تواند از پلاستیک یا فلز باشد و معمولاً برای کارهای حجیم از این روش استفاده می‌شود. (Chua, C.K., Leong, K. F., 2014) در شکل ۲ نمونه‌ای از دستگاهی، که براساس این روش کار می‌کند، می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۲: دستگاهی که براساس روش ساخت لایه‌ای کار می‌کند

در روش تفجوشی انتخابی با لیزر، ذرات پودر از جنس پلاستیک، فلز، شیشه، و سرامیک با قطری در حدود ۲۰ الی ۵۰ میکرون متناظر با مقطع قطعه به‌وسیلهٔ پرتوهای لیزر مطابق با الگوی رایانه در محل ذوب شده و روی سطح به هم جوش می‌خورند. به این ترتیب، مواد مذاب جامدشده تشکیل یک لایهٔ جامد می‌دهند. سپس سکوی متحرک حاوی قطعه به اندازهٔ یک لایه پایین می‌آید و پودر برای لایهٔ بعدی با حرکت غلتک مسطّح‌کننده روی سطح کار قرار می‌گیرد و دوباره عملیات پیشین انجام می‌شود و این کار ادامه می‌یابد تا قطعهٔ سه‌بُعدی تکمیل شود. مدلهای تجسمی، قطعات کاربردی، ریخته‌گری دقیق، و قالبهای فلزی برای تیراژ پایین از کاربردهای دیگر این روش محسوب می‌شوند. از مزیتهای این روش نسبت به روشهای دیگر این است که نیاز به حمایت ندارد(Chua, C. K., Leong, K. F., 2014). در شکل ۳ نمونه‌ای از دستگاهی، که براساس این روش کار می‌کند، می‌توان مشاهده کرد.

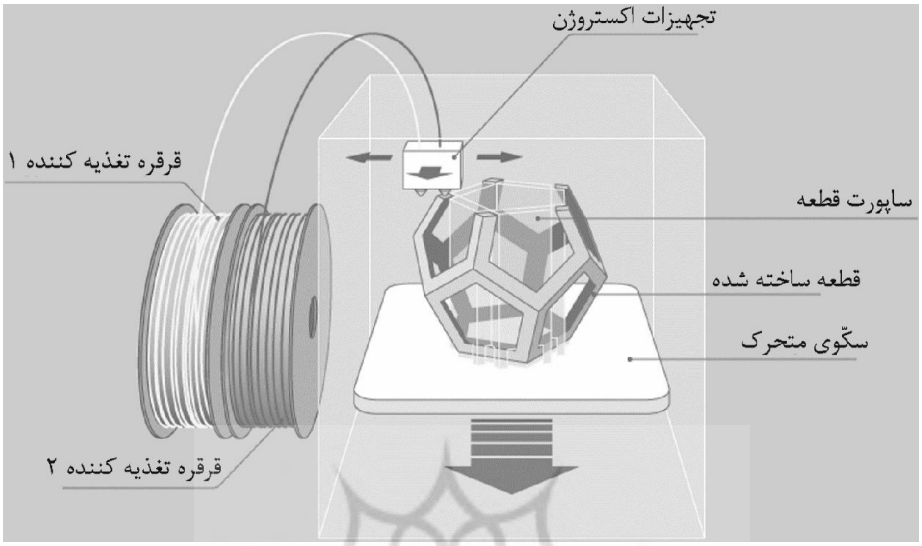


شکل ۳: دستگاهی که براساس روش SLS کار می‌کند

در روش رسوب مذاب، مواد ترموپلاستیک به صورت رشته‌ای (فیلامنت) به‌وسیلهٔ غلتک تغذیه‌کننده به سمت افشانک[۱] موجود در تجهیزات اکستروژن کشیده می‌شود. در افشانک، اِلمنتهای حرارتی وجود دارد که باعث می‌شود رشتهٔ ترموپلاستیک به حالت نیمه‌مذاب تبدیل شده و با فشاری، که از سوی موتورهای الکتریکی موجود در تجهیزات اکستروژن وارد می‌شود، از افشانک خارج شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱. معادل مصوب فرهنگستان برای واژهٔ «نازل»



شکل ۴: دستگاهی که براساس روش رسوب مذاب کار می‌کند

در این فرایند براساس الگوی رایانه، سکوی متحرک در راستای محور z و افشانک در صفحه xy حرکت می‌کند و لایهٔ اول را بر روی سکّو می‌سازد. پس از آن سکّو به‌اندازهٔ ضخامت یک لایه پایین رفته و لایهٔ بعدی روی آن ساخته می‌شود و این کار ادامه می‌یابد تا قطعهٔ سه‌بُعدی کامل شود (Chua, C.K., Leong, K. F., 2014). در شکل ۴ نمونه‌ای از دستگاهی، که براساس این روش کار می‌کند، می‌توان مشاهده کرد.

امروزه چاپگرهای سه‌بُعدی کاربردهای مختلفی دارند. نظیر صنایع الکترونیک و رباتیک، خودرو، هوافضا، لوازم خانگی، وسایل اسباب‌بازی، ساخت مدلهای جواهرآلات، ساخت انواع مجسمه، تندیس و قطعات تزیینی، ساخت مدل بافتهای سخت یا نرم بدن انسان، ترمیم استخوانهای شکسته، ساخت برسازه‌ها[۱] و کاشتینه‌های[۲] سفارشی و غیره. توسعه و استفاده از چاپگرهای سه‌بُعدی در سالهای اخیر به‌شدت روبه‌افزایش است. هر چند، استفاده از این فنّاوری بیشتر در بخش صنعت متمرکز بوده ولی استفاده از آن در بخشهای آموزش مهندسی نیز به‌خوبی گسترش یافته است که این امر از دید دانشگاههای برتر دنیا مخفی نمانده است. در جدول۱ فهرست بعضی از دانشگاههای ممتاز دنیا به

---

۱. معادل مصوب فرهنگستان برای واژهٔ «پروتز»

۲ . معادل مصوب فرهنگستان برای واژه «ایمپلنت»

همراه تعدادی از درسهایی، که در آنها از فنّاوری چاپگرهای سه‌بُعدی استفاده می‌شود، می‌توان مشاهده کرد.

جدول ۱: فهرست درسهایی که در آنها از فنّاوری چاپگرهای سه‌بُعدی استفاده می‌شود

ردیف	نام دانشگاه	نام درس
۱	ام‌آی‌تی	طراحی مهندسی و نمونه‌سازی سریع (http://ocw.mit.edu/courses)
۲	هاروارد	طراحی ماشین به کمک رایانه (http://biodesign.seas.harvard.edu/courses-and-activities)
۳	میشیگان	چاپ سه‌بُعدی (http://opensource.com)
۴	برکلی	نمونه‌سازی سریع دستگاههای مکانیکی (http://guide.berkeley.edu)
۵	تیو دلفت	نمونه‌سازی پیشرفته برای طراحی (http://www.arlab.nl)
۶	واترلو	نمونه‌سازی، شبیه سازی و طراحی (http://www.ucalendar.uwaterloo.ca)
۷	واشنگتن	طراحی برای ساخت و استراتژی ساخت مدرن (http://www.mme.wsu.edu)
۸	ویرجینیا تک	اصول نمونه‌سازی سریع (http://www.cadlab.vt.edu)

نکته قابل‌توجه این است که در بعضی دانشگاهها مثل دانشگاه میشیگان (درس چاپ سه‌بُعدی) دانشجویان با نحوهٔ ساخت یک مدل چاپگر سه‌بُعدی آشنا می‌شوند و در انتهای دورهٔ هر دانشجو یک دستگاه چاپگر سه‌بُعدی می‌سازد.(http://opensource.com).

۳. درس نقشه‌کشی صنعتی و چالشهای موجود در آن

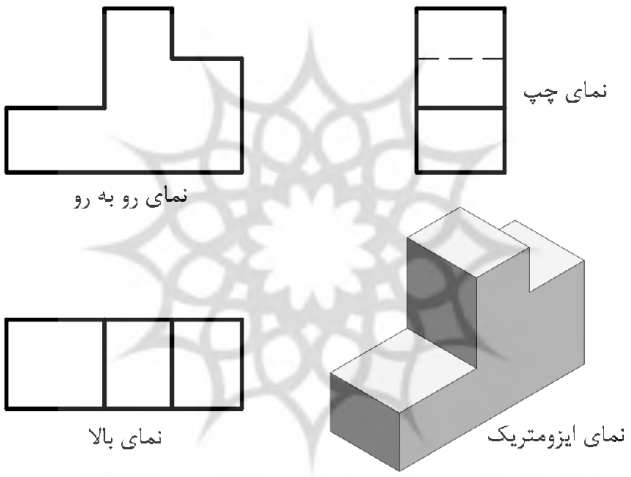
نقشه‌کشی صنعتی و ترسیمات برای ارتباط دادن بین ایده‌ها از زمان قدیم تا دوران امروز مورداستفاده قرار گرفته است. این درس یک وسیلهٔ ارتباطی مهم بین مهندسان، فن‌ورزها[1] و کسانی که در زمینهٔ مدل‌سازی، طراحی و ساخت فعالیت می‌کنند، محسوب می‌شود که شامل قوانین فنی، قراردادهای ترسیمی و مهارتهای بصری، ترسیمی، و تجسّمی است. در نقشه‌کشی صنعتی با تصاویر و نماهای مختلف اجسام سروکار داریم. یک نقشهٔ استاندارد (بر اساس استاندارد ISO) شامل نماهای روبه‌رو، بالا

---

۱. معادل مصوب فرهنگستان برای واژه «تکنسین»

و چپ جسم، به‌علاوه نمای مجسم آن (مثل ایزومتریک یا مایل) است. نماهای روبه‌رو، بالا و چپ نماهای دو بُعدی یک جسم سه‌بُعدی هستند که از زوایای عمود نسبت به یکدیگر ایجاد شده‌اند.

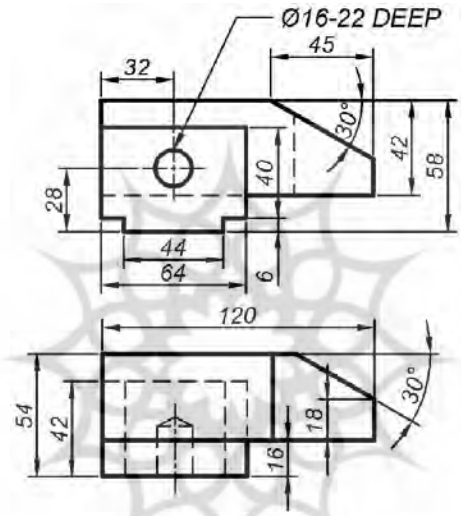
نمای ایزومتریک در اصل یک نمای دوبُعدی است که از یک زاویهٔ خاص، جسم را نشان می‌دهد به‌طوری‌که هر سه بُعد جسم قابل‌مشاهده است. در حالت کلی نماهایی که تنها دو بُعد از یک جسم را نشان می‌دهند (مثل نمای روبه‌رو، بالا و جانبی) نماهای اورتوگرافیک و نماهایی که سه بُعد از یک جسم را نشان می‌دهند، نماهای مجسم نامیده می‌شوند. در شکل ۵ می‌توان سه نمای اورتوگرافیک و نمای مجسم (ایزومتریک) یک جسم را مشاهده کرد.



شکل ۵: نماهای اورتوگرافیک و نمای مجسم

یکی از قابلیتهای مهندسان، حل مسائل طراحی سه‌بُعدی است. به همین روی، دانشجویان رشته‌های مهندسی باید در زمینهٔ تجسم مسائل سه‌بُعدی آموزش ببینند. طراحی و نقشه‌کشی از موضوعات اساسی در دوران تحصیلات دانشجویان مهندسی است. استفاده از خطوط و علائم برای نشان دادن ایده‌ها و فکرها به‌عنوان وسیلهٔ ارتباطی مؤثرتر از توضیحات شفاهی است. تمام افرادی که با صنعت و مسائل فنی درگیر هستند باید بتوانند به‌راحتی و بدون تأمل، نقشه‌های صنعتی را بخوانند و آنها را تفسیر کنند. معمولاً این درس در سال اول برای دانشجویان ورودی ارائه می‌شود و پیش‌نیاز درسهای طراحی است. هدف ابتدایی در درس نقشه‌کشی صنعتی کمک به دانشجویان برای توسعهٔ مهارتهای ترسیمی و تجسمی و دانش موردنیاز برای یک مهندس است. سخت‌ترین مهارتی که

دانشجویان باید فرا گیرند، مشاهدهٔ دو نمای یک جسم و تصور سه‌بُعدی آن در ذهن و رسم تصویر سوم آن (مجهول‌یابی) است. این مهارت برای تحلیل نقشه‌های صنعتی، نقشه‌خوانی و مباحث مربوط به مهندسی معکوس لازم است که نمونه‌ای از این دست مسائل را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. همانطور که ملاحظه می‌کنید، دانشجو باید بتواند با مشاهدهٔ تصاویر روبه‌رو و بالا ماهیت سه‌بُعدی قطعه را درک کند و همچنین مدل سه‌بُعدی آن را به کمک دست یا نرم‌افزار ترسیم کند.



شکل ۶: نمونه پرسش مجهول‌یابی

باتوجه‌به اینکه حل این‌گونه مسائل نیازمند داشتن قدرت تجسم سه‌بُعدی مناسب است و معمولاً دانشجویانی، که این درس را می‌گذرانند، این توانایی را ندارند لذا درصورتی‌که یک سیستم آموزشی مدون به‌عنوان راهکاری مناسب برای بهبود قدرت تجسم سه‌بُعدی دانشجویان در درس نقشه‌کشی صنعتی وجود نداشته باشد، دانشجویان را با مشکلات جدی نظیر بیزاری از درس، حذف درس، کسب نکردن نمرهٔ دلخواه و گاهی اوقات نگرفتن نمرهٔ قبولی روبه‌رو می‌کند. برای رفع این مشکل باتوجه‌به ورود فنّاوریهای جدید نظیر نرم‌افزارهای مدل‌سازی و طراحی کَد و همچنین چاپگرهای سه‌بُعدی به عرصهٔ آموزش مهندسی، این دو فنّاوری را استادان مختلف به کلاسهای درس آوردند و موردارزیابی قرار دادند. نویسندهٔ این نوشتار در مقالات پیشین خود (متقی‌پور، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴) و همچنین نویسندگانی نظیر سِردار و همکاران (۲۰۱۵)، مارتین دورتا و همکاران (۲۰۱۳)، اونیانچا و همکاران (۲۰۰۹)، نشان

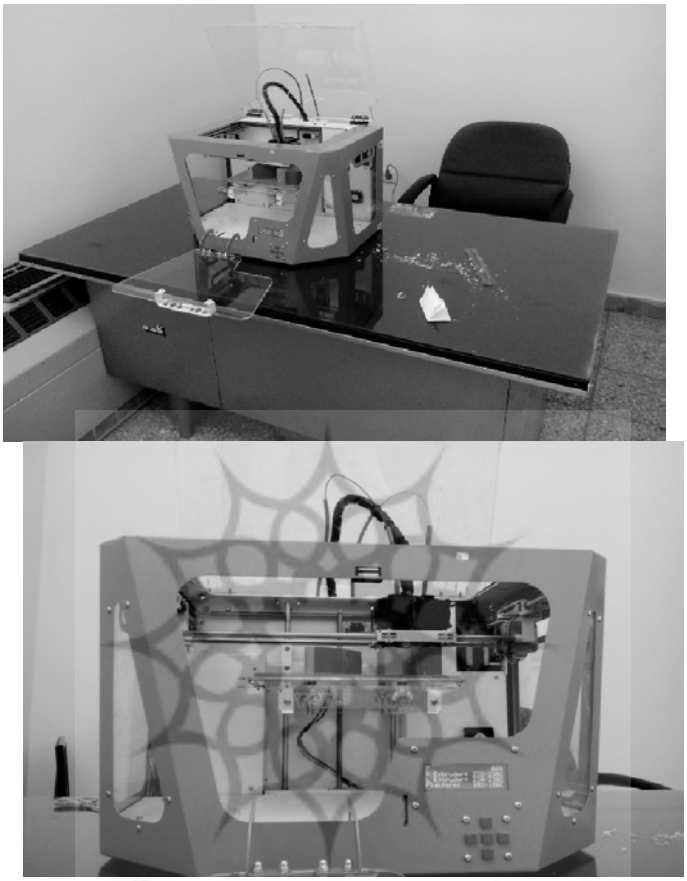
دادند که با اختصاص دادن جلساتی به آموزش یکی از نرم‌افزارهای کَد و استفادهٔ دانشجویان از آنها در جلسات متعدد کلاس بر اساس برنامهٔ تعیین‌شده می‌تواند قدرت تجسم سه‌بُعدی آنها را بهبود بخشد و چالشهای موجود در این درس را برای دانشجویان برطرف سازد. از طرفی، بعضی از نویسندگان نظیر وان (۲۰۱۵)، اوریا و همکاران (۲۰۰۹)، زاپکا و همکاران (۲۰۰۲) از مدلهای فیزیکی واقعی ساخته‌شده توسط چاپگرهای سه‌بُعدی نیز استفاده کرده‌اند و بهبود یادگیری دانشجویان را گزارش داده‌اند.

۴. شیوهٔ به‌کارگیری چاپگر سه‌بُعدی در آموزش درس نقشه‌کشی صنعتی

نزدیک به چهار سال است (از سال ۱۳۹۰) (http://www.bazarkhabar.ir) که از ورود فنّاوری چاپگرهای سه‌بُعدی به داخل کشور می‌گذرد و بسیاری از مراکز صنعتی، پژوهشی، و آموزشی از این فنّاوری بهره می‌برند. مرکز گرافیک مهندسی دانشگاه صنعتی شریف نیز مطابق با سایر مراکز پیشرو به‌منظور ارتقا بهبود کیفیت آموزش دروس گرافیک مهندسی، یک چاپگر سه‌بُعدی، که براساس روش رسوب مذاب[1] کار می‌کند، خریداری کرد (شکل ۷).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. FDM



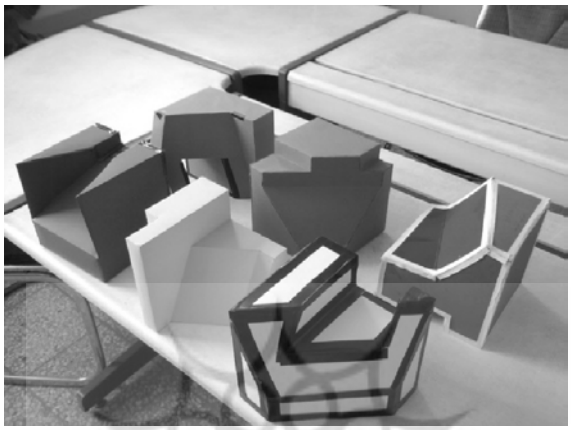
شکل ۷: دستگاه چاپگر سه بعدی رسوب مذاب دانشگاه صنعتی شریف

هرچند نویسنده در مقالهٔ پیشین خود (متقی‌پور،۱۳۹۱) از نمونک‌های[1] مقوایی در کلاس درس برای بهبود قدرت تجسم استفاده می‌کرد (شکل ۸) ولی چون ساخت این نوع نمونک‌ها سخت، هزینه‌بر و زمان‌بر بود لذا تعداد محدودی وجود داشت و از طرفی تمرینهایی که تجسم آنها برای دانشجویان به دلیل پیچیدگی هندسی سخت بود از نظر نمونک‌سازی نیز سخت بود و لذا نمونکی برای این دست از تمرینها ساخته نمی‌شد و در نتیجه مشکل تجسمی دانشجویان مرتفع نمی‌شد. همچنین این نمونک‌ها پس از مدتی استفاده به علت دست به دست شدن بین دانشجویان خراب می‌شد.

---

۱. معادل مصوب فرهنگستان برای واژه «ماکت»

با خریداری چاپگر سه‌بُعدی و ورود آن به مرکز گرافیک مهندسی، مدلهای فیزیکی تمرینهای داده‌شده به دانشجویان، که از کتاب نقشه‌کشی صنعتی ۱ (به شیوهٔ مدرن) (متقی‌پور، ۱۳۹۲) انتخاب شده‌اند، توسط نویسنده این نوشتار ساخته می‌شود.

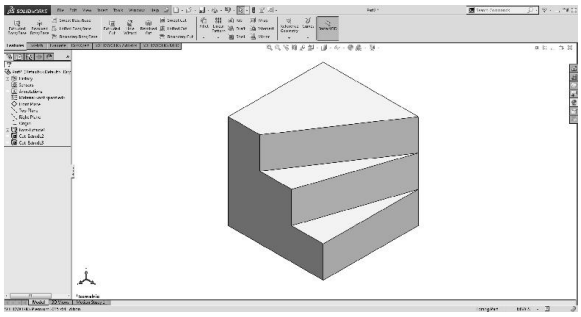


شکل۸ : ساخت تعداد محدودی ماکت مقوایی

نحوهٔ ساخت مدل فیزیکی به این صورت است که ابتدا مدل سه‌بُعدی تمرین موردنظر مطابق شکل ۹ توسط نرم‌افزار SolidWorks مدل‌سازی می‌شود. سپس این مدل با شیوهٔ STL [1]ذخیره شده و به نرم‌افزار واسطی مثل MakerBot فرستاده می‌شود (شکل ۱۰). در این نرم‌افزار پارامترهای مهم برای ساخت، نظیر دمای افشانک اکسترودر برای ذوب فیلامنت مورداستفاده (جنس ABS)، دمای صفحه متحرک، که قرار است مدل بر روی آن ساخته شود، درصد توپُر بودن مدل، سرعت حرکت افشانک و غیره تنظیم می‌شود. سپس اطلاعات مدل لایه به لایه به همراه اطلاعات مربوط به ساخت آن با شیوه x3g ذخیره می‌شوند. این اطلاعات توسط کارت حافظه SD به دستگاه چاپگر منتقل می‌شود و دستگاه براساس اطلاعات داده‌شده آن را می‌سازد. چند نمونه از مدلهای فیزیکی تمرینهای درس نقشه‌کشی صنعتی ساخته شده با این روش را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد. مدت زمان ساخت یک مدل فیزیکی با ابعاد $5 \times 5 \times 5cm^3$ برای این چاپگر در حدود ۲ ساعت به طول می‌انجامد. بنابراین هر مقدار که مدل بزرگ‌تر باشد، زمان لازم برای ساخت آن بیشتر خواهد شد. مدلهای ساخته‌شده مربوط به هر جلسه در یک کیسهٔ نایلونی گذاشته شد تا در جلسهٔ مربوط سر کلاس استفاده شود.

---

1. Stereolithography



شکل ۹: ساخت مدل مربوط به تمرین درس نقشه‌کشی صنعتی در نرم‌افزار SolidWorks

شکل ۱۰: ارسال مدل با شیوه STL به نرم افزار MakerBot

شکل ۱۱: مدلهای فیزیکی تمرینهای درس نقشه‌کشی صنعتی که با چاپگر سه‌بُعدی درست شده‌اند

در جلسات اول درس نقشه‌کشی صنعتی، محیطهای دوبُعدی و سه‌بُعدی نرم‌افزار اتوکَد به دانشجویان آموزش داده می‌شود تا بتوانند از آن به‌عنوان یک ابزار در رسم نقشه‌های دوبُعدی و مدلهای سه‌بُعدی در جلسات بعدی کمک بگیرند. همچنین در هر جلسه یک سری تمرینها به‌عنوان

کار در خانه برای دانشجویان تعیین می‌شود تا آنها را به کمک این نرم‌افزار ترسیم کنند و برای جلسهٔ بعد، چاپ‌شده، تحویل دهند. با انجام تمرینهای مستمر، دانشجویان به سطح قابل‌قبولی از نظر مدل‌سازی با نرم‌افزار اتوکَد می‌رسند. مدلهای ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی بیشتر در جلسات مربوط به تجسم، مجهول‌یابی، یافتن تصویر سوم (مانند شکل۶) و همچنین یافتن نمای برشی مورداستفاده قرار می‌گیرد که این مباحث در حدود ۶۰٪ از جلسات درس نقشه‌کشی صنعتی را به خود اختصاص می‌دهد. در این جلسات پس از آموزش نظری درس، از دانشجویان خواسته می‌شود که تمرینهای مربوط را انجام دهند و پاسخ خود را با مدل فیزیکی مقایسه کنند. درصورتی‌که، پاسخ دانشجو صحیح باشد، می‌تواند به تمرین بعدی برود و در غیر این صورت باید با مقایسه با مدل فیزیکی، نادرستی پاسخ خود را بیابد (شکل ۱۲). از طرفی مشابه جلسات پیشین، از دانشجو خواسته می‌شود که مدل سه‌بُعدی بعضی از تمرینها را در نرم‌افزار اتوکَد ترسیم کنند و از سه راستای مختلف از مدل نماگیری کنند. به‌این‌ترتیب، تطابق بین نماهای مدل مجازی و فیزیکی در ذهن دانشجو به خوبی شکل می‌گیرد.

شکل ۱۲: مقایسهٔ پاسخ دانشجو با مدل فیزیکی ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی

۵. بحث و نتایج

برای بررسی اثر استفاده از مدلهای فیزیکی سه‌بُعدی در کلاس، دو گروه از دانشجویان، که در درس نقشه‌کشی صنعتی ثبت‌نام کرده بودند، موردمطالعه قرار گرفتند. مشخصات این دو گروه را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد.

جدول ۲: مشخصات گروه های مورد مطالعه

نام گروه	رشتهٔ تحصیلی	جنسیت	تعداد	سال تحصیلی	شیوهٔ آموزشی
آزمایش	مهندسی برق	مرد	۱۸	ورودی	استفادهٔ همزمان از نرم‌افزار اتوکَد و مدلهای فیزیکی ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی
کنترل	مهندسی برق	مرد	۱۹	ورودی	فقط استفاده از نرم‌افزار اتوکَد

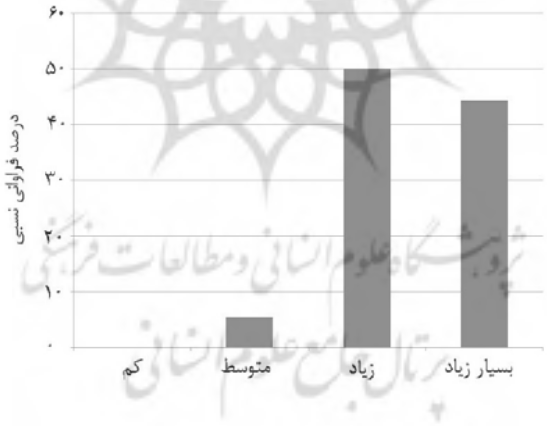
نویسندهٔ این نوشتار، شیوه‌ای را، که در بخش پیش توضیح داده شد، بر روی گروه آزمایش اجرا کرد. در این شیوه، استفادهٔ همزمان از نرم‌افزار اتوکَد و مدلهای فیزیکی ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی مدنظر قرار گرفته است. به کمک مدلهای فیزیکی موجود در کلاس، خود دانشجو باید مقایسه‌ای بین پاسخ خود و مدل فیزیکی انجام دهد و درصورتی‌که تفاوتی مشاهده شد، علت را جویا شود. به‌این‌ترتیب، دانشجو مستقل از استاد درس به‌دنبال علت تفاوت می‌گردد و باعث می‌شود تعاملی و دوطرفه و از جذابیت بیشتری برخوردار باشد. حال اگر دانشجو نتواند علت تفاوت پاسخ خود را با مدل فیزیکی بیابد به استاد مراجعه می‌کند. لازم به ذکر است که در جلسات اجراشده بر روی این ۱۸ نفر به طور متوسط در حدود۱۰٪ از دانشجویان به استاد مراجعه کردند و بقیه توانستند مستقلاً، علت تفاوت را جویا شده و اشتباه پاسخ خود را متوجه شوند. بنابراین، بخش عملی کلاس خودمحور است و توسط دانشجو اجرا می‌شود و نیاز به توضیح استاد به کمترین میزان خود می‌رسد.

نرم‌افزار اتوکَد به‌ویژه ویرایش ۲۰۱۵ آن قابلیتهای زیادی دارد و می‌تواند به‌راحتی سه تصویر استاندارد یک مدل سه‌بُعدی را تهیه کند یا مدل ترسیم‌شده را به شکلهای گوناگون رنگ‌آمیزی کند و همچنین آن را در راستاهای مختلف دَوَران دهد و به‌صورت انیمیشن یک حرکت پیوسته به آن بدهد. باتوجه‌به این قابلیتها ممکن است پرسشی مطرح شود که در صورت استفاده از نرم‌افزار اتوکَد استفاده از مدل فیزیکی چه جایگاهی می‌تواند داشته باشد و دانشجو در مقایسه با هم کدامیک را ترجیح می‌دهد؟ به همین خاطر پرسش‌نامه‌ای مطابق جدول ۳ تهیه شد و در انتهای ترم در اختیار

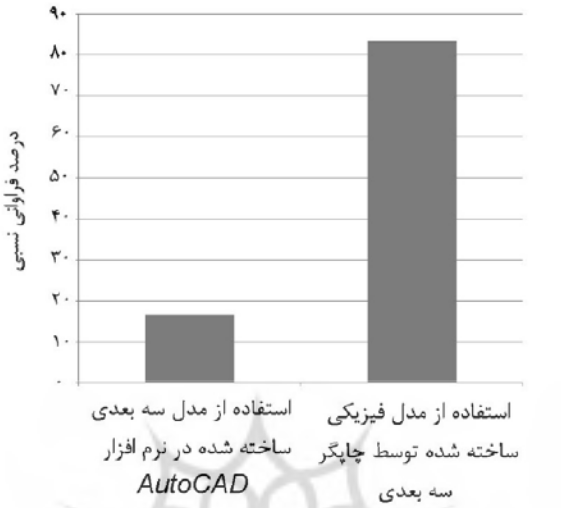
دانشجویان قرار گرفت تا آن را تکمیل کنند. نتیجه این پرسش‌نامه برای پرسشهای ۱ و ۲ به‌ترتیب در شکلهای ۱۳ و ۱۴ قابل‌مشاهده است.

جدول ۳. پرسش‌نامه برای مقایسه بین مدل فیزیکی و مدل مجازی

پرسش ۱	تأثیر استفاده از مدلهای ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی بر روی بهبود تجسم فضایی خود را تا چه حد ارزیابی می‌کنید؟			
	الف) بسیار زیاد	ب) زیاد	ج) متوسط	د) کم
پرسش ۲	درصورتی‌که در حل یک مسئلهٔ تجسمی مانند یافتن تصویر سوم جسم از روی دو تصویر دچار مشکل شوید، کدام روش زیر را انتخاب می‌کنید؟			
	الف) استفاده از مدل سه‌بُعدی ساخته‌شده در نرم‌افزار اتوکَد		ب) استفاده از مدل فیزیکی ساخته‌شده توسط چاپگر سه‌بُعدی	

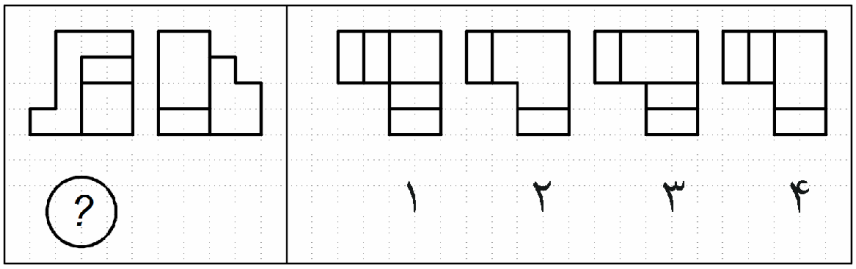


شکل ۱۳: نتیجهٔ نظرسنجی پرسش ۱



شکل ۱۴: نتیجهٔ نظرسنجی پرسش ۲

همان‌طورکه در شکل ۱۳ ملاحظه می‌کنید، در مجموع حدود ۹۴٪ از دانشجویان (گزینه‌های بسیار زیاد و زیاد) به اثر قابل‌توجه مدلهای فیزیکی در کلاس اذعان دارند. همچنین با مشاهدهٔ شکل ۱۴ می‌توان دریافت که علی‌رغم قابلیتهای بالای نرم‌افزار اتوکَد و استفادهٔ راحت از آن در حدود ۸۳٪ از دانشجویان، مدل فیزیکی را بر مدل مجازی ترجیح می‌دهند. بنابراین باتوجه‌به نظرسنجی دانشجویان نگرش مثبتی نسبت به استفاده از مدلهای فیزیکی دارند. همچنین برای بررسی میزان اثربخشی این شیوهٔ آموزشی بر روند یادگیری دانشجویان، در ابتدا و انتهای ترم به‌ترتیب پیش‌آزمون و پس‌آزمون با سطح سختیِ یکسان از هر دو «گروه آزمایش» و «کنترل» گرفته شد که یک نمونه از پرسشهای این دو آزمون در شکل ۱۵ آورده شده است. نتایج این دو آزمون برای هر دو گروه را می‌توان در جدولهای ۴ و ۵ ملاحظه کرد.



شکل ۱۵: نمونهٔ پرسش پیش‌آزمون و پس‌آزمون

جدول ۴: نتیجهٔ پیش‌آزمون

نام گروه	میانگین نمره (از ۱۰ نمره)	انحراف معیار	آزمون t مستقل
آزمایش	۱/۳۳	۱/۰۸	۰/۸۳
کنترل	۱/۶۸	۱/۴۵	

جدول ۵: نتیجهٔ پس‌آزمون

نام گروه	میانگین نمره (از ۱۰ نمره)	انحراف معیار	آزمون t مستقل
آزمایش	۴/۴۴	۲/۳	۰/۰۴
کنترل	۴/۴۷	۲/۴۸	

برای بررسی تفاوت معناداری بین میانگینها در پیش‌آزمون و پس‌آزمون از آزمون t مستقل استفاده شده است. در پیش‌آزمون (جدول ۴) t =۰/۸۳ به دست آمد که با سطح اطمینان $\alpha =$ ۰/۰۵ معنادار نیست. بنابراین در شروع ترم دو گروه «آزمایش» و «کنترل» از نظر قدرت تجسم در یک سطح قرار داشته‌اند. در انتهای ترم و در پس‌آزمون (جدول ۴) t =۰/۰۴ به دست آمد که با سطح اطمینان $\alpha =$ ۰/۰۵ معنادار نیست. بنابراین فرضیهٔ صفر رد نمی‌شود و هر دو گروه از نظر قدرت تجسم در انتهای ترم با هم برابرند. براساس این نتایج، می‌توان دریافت که دانشجویان مرد در گروه آزمایش، توانستند در بخش عملی زمان کلاس، به‌کمک مدلهای فیزیکی و مستقل از توضیحات استاد، پرسشهای خود را پاسخ دهند و از نظر قدرت تجسم، خود را به سطح گروه کنترل، که از توضیحات استاد برخودار بودند، برسانند.

۶. نتیجه‌گیری

روشهای استفاده‌شده در فرایند یادگیری را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم‌بندی کرد که عبارت‌اند از: ۱ـ روش کنش‌پذیر و ۲ـ روش کنش‌گر. در روش کنش‌پذیر در روند یادگیری برای به دست آوردن دانش، هیچ تعاملی با محیطی، که در آن آموزش ارائه می‌شود، صورت نمی‌پذیرد. یک نمونه از راههای کنش‌پذیر، یادگیری از طریق گوش دادن به توضیحات استاد در کلاس درس است که در آن دانشجو دانش را می‌پذیرد ولی راههای محدودی برای بررسی آن دارد مشروط بر اینکه آن را کاملاً درک کرده باشد. در روش کنش‌پذیر، دانشجویان گوش می‌دهند و مشاهده می‌کنند ولی تجربه نمی‌کنند که در این صورت به سطح پایینی از درک علمی منجر می‌شود. علاوه‌براین، بسیاری از ما متوجه شده‌ایم که بیشتر شرکت‌کنندگان در روند کنش‌پذیر از علاقه و شور و شوق کمی برخوردار هستند. این در حالی است که در روش کنش‌گر در روند یادگیری، دانش از طریق شرکت، تحقیق دربارهٔ پدیده‌ها و دستکاری اجزاء آن به‌دست می‌آید. یکی از نمونه‌های روش کنش‌گر در روند یادگیری، استفاده از مدلهای فیزیکی در کلاس درس است که تعامل دوطرفه بین دانشجو و پدیدهٔ موردنظر صورت می‌گیرد که در این‌صورت علاوه بر ایجاد جذابیت در فرایند یادگیری، درک مسائل مهندسی راحت‌تر و با جزئیات کامل‌تری به دانشجویان انتقال می‌یابد. به کمک نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله می‌توان دریافت که علی‌رغم استفاده از یکی از نرم‌افزارهای کَد بهتر است مدلهای فیزیکی از مطالب درسی نیز ساخته شود و در اختیار دانشجویان قرار گیرد. به‌این‌ترتیب، فرایند یادگیری تعاملی است و با جذابیت بیشتری همراه خواهد بود؛ درعین‌حال، می‌توان همان نتایج موردانتظار از روشهای کنش‌پذیر را به دست آورد. از چاپگرهای سه‌بُعدی نه‌تنها در درس نقشه‌کشی صنعتی بلکه در سایر درسهایی که به نوعی با خلاقیت، ایده‌پردازی، و طراحی سروکار دارند باید استفاده شود تا دانشجویان بتوانند نتیجهٔ ایده‌پردازی و خلاقیت را به‌وضوح در جهان عینی مشاهده کنند و ایرادهای موجود در آن را لمس کنند. این امر زمینه رشد و شکوفایی بیشتر دانشجویان را به دنبال خواهد داشت.

مراجع

بازار خبر: http://www.bazarkhabar.ir/News.aspx?ID=99826

متقی‌پور، مهدی (۱۳۹۱). مطالعهٔ مقایسه‌ای دربارهٔ شیوه‌های تدریس درس نقشه‌کشی صنعتی ۱. *فصلنامه آموزش مهندسی ایران*. ۱۴(۵۴)، ۱۱۷-۱۳۷.

متقی‌پور، احمد و متقی‌پور، مهدی (۱۳۹۲). *نقشه‌کشی صنعتی ۱(به شیوهٔ مدرن)*. تهران: آفرنگ.

متقی‌پور، مهدی (۱۳۹۴). ارزیابی تأثیر آموزش درس نقشه‌کشی صنعتی بر بهبود قدرت تجسّم سه‌بُعدی دانشجویان رشته‌های مهندسی و علوم پایه. *فصلنامه آموزش مهندسی ایران*. ۱۷ (۶۷)، ۷۵ ـ ۹۰.

AR-related courses at the KABK, TU Delft and Leiden University - See more at: http://www.arlab.nl/project/ar-related-courses-kabk-tu-delft-and-leiden-university#sthash.lKLK7acs.dpuf :http://www.arlab.nl/project/ar-related-courses-kabk-tu-delft-and-leiden-university.

Chua, C. K., and Leong, K. F. (2014). *3D Printing and additive manufacturing: principles and applications*, 4th Edition.

Courses and activities: http://biodesign.seas.harvard.edu/courses-and-activities
Michigan Tech course to build your own 3D printer:
http://opensource.com/education/15/3/open-source-3d-printing-course

Courses: http://guide.berkeley.edu/courses/mec_eng/

Course descriptions - Undergraduate Calendar 2015-2016:
http://www.ucalendar.uwaterloo.ca/1516/COURSE/course-BME.html

Czapka, J. T., Moeinzadeh, M. H. and Leake, J. M. (2002). Application of rapid prototyping technology to improve spatial visualization, *Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*.

Design for manufacture and modern manufacturing strategies course: http://www.mme.wsu.edu/academics/me_courses.html?course=474
course:http://www.cadlab.vt.edu/ME4644/

Engineering design and rapid prototyping course: http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-810-engineering-design-and-rapid-prototyping-january-iap-2007

Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping. and direct digital manufacturing, Second Edition*, Springer.

Mahindru, D. V. and Mahendru, p. (2013). Review of rapid prototyping-technology for the future, *Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Visio*, Vol. 13, Issue 4.

Martín-Dorta, N., Saorín, J. L. and Contero, M. (2013). Development of a fast remedial course to improve the spatial abilities of engineering students. *Journal of Engineering Education.*

Onyancha, R. M., Derov, M. and Brad, L. (2009). Improvements in spatial ability as a resultof targeted training and computer-aided design software Use: Analyses of object geometries and rotation types. *Journal of Engineering Education.*

Serdar, T. and Roelof Harm deVries P. E. (2015). Enhancing spatial visualization skills in engineering drawing course, 122nd ASee Annual Conference & Exposition.

Wan, H. (2015). 3D printing for engineering students – understanding and misunderstanding, *Proceedings of the ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*

Uria, E. S., Mugica, M. G. and Colindres, J. M. (2009). Methodology for part visualization problem solving (reading, interpretation and creation of multiview technical drawings), *Proceedings of 17th International Conference on Engineering Design.*