

# فناوری هپتیک و تأثیر آن بر آموزش دروس نقشه‌کشی صنعتی

مهدی متقی پور<sup>۱</sup>، رسول فشارکی فرد<sup>۲</sup>

۱ مربی مرکز نقشه‌کشی صنعتی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲ استادیار پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، fesharaki@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

## چکیده

در سالیان اخیر، آموزش مهندسی مکانیک به شیوه‌های متنوعی تحت تأثیر سیر تکامل فناوری قرار گرفته است. از جمله شیوه‌های نوین آموزش، استفاده از فناوری واقعیت مجازی با بازخورد نیرویی است که اصطلاحاً آن را فناوری هپتیک می‌نامند. در این فناوری به کاربر این امکان داده می‌شود که علاوه بر مشاهده یک محیط شبیه‌سازی رایانه‌ای، اشیای موجود در آن را لمس کند و یا با آنها در تعامل باشد. در این فناوری، کاربر می‌تواند ارتجاعی بودن یک بادکنک مجازی، سختی و نرمی و یا دما و وزن اجسام مجازی را احساس کند. هنگامی که حس لامسه با دیگر حواس، خصوصاً بینایی، ترکیب می‌شود، اطلاعات مربوط به جسم با جزئیات بیشتری به کاربر انتقال می‌یابد. به همین دلیل این فناوری در زمینه‌های یادگیری می‌تواند نقش کلیدی و حساسی ایفا کند؛ زیرا استفاده از آن علاوه بر کاهش هزینه‌های بالای آموزش در دنیای واقعی، این امکان را فراهم می‌کند که مطالب آموزشی با کیفیت و جذابیت بیشتری به دانشجویان منتقل شود. یکی از کاربردهایی که این فناوری می‌تواند در آینده داشته باشد، استفاده از آن در آموزش دروس نقشه‌کشی صنعتی است که اکثر دانشجویان در آن با مباحث مربوط به تجسم فضای سه‌بعدی با مشکل روبرو هستند. در این مقاله مزایای استفاده از این فناوری در مقایسه با روش‌های امروزی بررسی می‌شود.

**واژگان کلیدی:** فناوری هپتیک، واقعیت مجازی، حس لامسه، آموزش مهندسی مکانیک، نقشه‌کشی صنعتی

## ۱. مقدمه

سریع و اساسی در ساختار خود مواجه‌اند و در نتیجه اصلاحات و تغییرات در برنامه‌های آموزشی و پژوهشی دانشگاه‌ها امری ضروری است. با توجه به نیازهای متغیر و پویا در آینده و ارتقای سطح خدمات علمی و تخصصی و تحول آن در جامعه باید آموزش‌های مهندسی نیز به‌طور متناسب تغییر کند. در حال حاضر، استفاده از انواع فناوری، نه تنها به‌عنوان ابزاری برای

جهان امروز در حال گذر از عصر صنعتی به عصر فناوری است و این سیر تحول، اثر عمیقی بر صنعت می‌گذارد. به‌طور معمول، ظهور و ورود فناوری‌های نو در صنعت نه تنها موجب تحول در فرایندهای تولید و تغییر مسیر آن می‌شود، که جنبه‌های آموزشی و پژوهشی مرتبط با آن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در عصر فناوری، دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی به ناچار با تغییرات

تسریع در عملیات و بهبود کیفیت در زمینه‌های آموزشی و پژوهشی شناخته می‌شود، که به‌عنوان شاه‌کلید پیشرفت در آموزش مهندسی و تحقیقات بنیادی در دانشگاه‌ها و مراکز آموزش عالی تلقی می‌گردد. بسیاری از امور انجام‌شده اعم از آموزشی و پژوهشی در محیط‌های دانشگاهی به‌نوعی با کاربردهای فناوری مرتبط می‌باشد. دانشجویان مهندسی از طریق فناوری محیط‌های چندرسانه‌ای و با استفاده از شبیه‌سازها به بررسی و درک سیستم‌های مهندسی در قالب ریاضی و نرم‌افزاری می‌پردازند. فناوری مدل‌جدیدی از آموزش را ارائه می‌کند که در آن آموزش‌های ترکیبی نظری - عملی جایگزین آموزش‌های نظری محض در روش‌های سنتی می‌شود [۱]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که برای ایجاد تغییر و تحول در آموزش مهندسی، استفاده از فناوری‌ها در تمام مراحل یاددهی و یادگیری باید به‌منزله یک اصل تلقی گردد. همچنین، ارتباط‌های استاد و دانشجو باید از ارتباط‌های یک‌طرفه به برقراری ارتباط‌های دوطرفه سوق داده شود. این نقش، وقتی به‌خوبی ایفا می‌شود که استادان و دانشجویان توانایی لازم برای بهره‌گیری از این فناوری‌ها را داشته باشند و تأثیر فناوری بر اثر بخشی تدریس و یادگیری را باور کنند [۲].

در سال‌های اخیر، آموزش مهندسی از روش‌های مختلف تحت تأثیر سیر تکامل فناوری قرار گرفته است. انفورماتیک، ابزار و روش‌های مختلفی ارائه داده که به کاربردهایی با تعامل بصری یا صوتی منجر شده است. تصویر و حرکت به دانشجویان به درک از مسائل مهندسی و کسب تصویر بهتری از فصول معینی از علوم مهندسی کمک کرده است. به‌نظر می‌رسد دانشجویان در درک جنبه‌های خاصی از مسائل مهندسی هنوز با مشکل روبرو هستند؛ زیرا برای درک کامل سیستم‌ها و قوانینی که آنها را کنترل می‌کنند به پیش از بینایی و شنوایی نیاز است. مثلاً توضیح و آموزش نحوه عملکرد یک آسیاب آبی یا مجموعه چرخ‌دنده‌های موجود در دیفرانسیل خودرو توسط استاد رشته مهندسی مکانیک برای دانشجویان تا آنها بتوانند عملکرد اجزاء را به‌طور کامل درک کنند، امری بسیار وقت‌گیر و مشکل است. در طول تاریخ، آموزش مهندسی مکانیک به‌تدریج تکامل یافته و روش‌های جدید آموزشی به‌منظور بهبود روند یادگیری اتخاذ شده است. یکی از مهم‌ترین پرسش‌ها همواره این بوده که چگونه می‌توان دانشجویان را در روند یادگیری شرکت داد. در

واقع دو روش برای شرکت در روند یادگیری وجود دارد؛ یکی روش کنش‌پذیر<sup>۱</sup> و دیگری روش کنشگر<sup>۲</sup>. در روش کنش‌پذیر در روند یادگیری برای به‌دست آوردن دانش، هیچ تعاملی با محیطی که در آن آموزش ارائه می‌شود، صورت نمی‌پذیرد. یک نمونه از راه‌های کنش‌پذیر کتاب خواندن است که در آن دانشجو دانش را می‌پذیرد، اما راه‌های محدودی برای بررسی آن دارد مشروط بر اینکه آن را به‌طور کامل درک کرده باشد. در روش کنش‌پذیر، دانشجویان می‌خوانند، گوش می‌دهند و مشاهده می‌کنند اما تجربه نمی‌کنند؛ که در این صورت به سطح پایینی از درک علمی منجر می‌شود. علاوه بر این، بسیاری از ما متوجه شده‌ایم که بیشتر شرکت‌کنندگان در روند کنش‌پذیر از علاقه و شور و شوق اندکی برخوردارند. در روش کنشگر اما، دانش از طریق شرکت، تحقیق در مورد پدیده‌ها و دستکاری اجزای آن به‌دست می‌آید. یکی از نمونه‌های روش کنشگر در روند یادگیری، آزمایشاتی است که در دانشکده انجام می‌شود و از طریق آن، دانشجویان، توانایی به‌دست آوردن دانش عملی را کسب می‌کنند که در درک علم نقش زیادی را ایفا می‌کند. مورد دیگر استفاده از فناوری‌های مربوط به شبیه‌سازی محیط‌های واقعی است که تعامل دوطرفه بین دانشجو و پدیده مورد نظر صورت می‌گیرد و در این صورت علاوه بر ایجاد جذابیت در فرایند یادگیری، درک مسائل مهندسی راحتتر و در زمان کمتری به دانشجویان انتقال می‌یابد [۳].

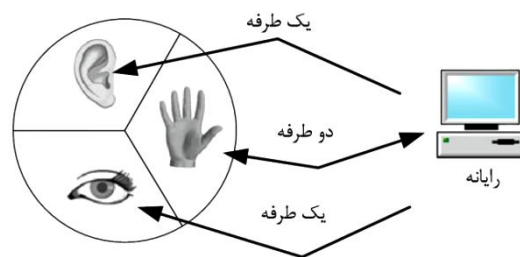
در ادامه این مقاله، به کارگیری فناوری هپتیک در نقشه‌کشی صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. نگاهی گذرا بر فناوری هپتیک

اصطلاح هپتیک، از کلمه یونانی هپتیکوس<sup>۳</sup> نشأت گرفته شده است و به‌معنای مربوط به حس لامسه و اشاره به کار با حس لامسه دارد و به‌صورت حساسیت هر فرد نسبت به جهان اطراف خود تعریف می‌شود. این اصطلاح در آغاز قرن ۲۰ م توسط محققان در رشته روانشناسی تجربی تعریف شد که به حس لامسه فعال انسان از اشیای واقعی اطراف خود اشاره دارد. سپس در اواخر ۱۹۸۰ م، این اصطلاح دوباره تعریف شد تا تمام جنبه‌های مربوط به لمس توسط ماشین‌آلات و تعامل لمسی ماشین‌آلات و انسان را دربر گیرد. لمس اشیاء توسط انسان، ماشین‌آلات و یا ترکیبی از هر دو و محیط اطراف می‌تواند

واقعی، مجازی و یا ترکیبی از هر دو باشد. همچنین ممکن است در این تعامل، سایر روش‌های حسی مانند بینایی و شنوایی نیز همراه باشند. در حال حاضر این اصطلاح، رشته‌های بسیاری را در کنار هم گرد آورده است که از جمله آنها می‌توان به رشته‌های بیومکانیک، روانشناسی، فیزیولوژی اعصاب، مهندسی و علوم کامپیوتر اشاره کرد که از این اصطلاح جهت اشاره به مطالعه حس لامسه انسان و نیروی بازخورد با محیط خارج استفاده می‌کنند.

حس لامسه یکی از حواس منحصر به فرد در مقایسه با سایر حواس به‌ویژه بینایی و شنوایی محسوب می‌شود؛ زیرا در این حس، جریان انرژی ناشی از حس کردن و انجام عملیات مانند مبادله اطلاعات بین محیط واقعی یا مجازی با کاربر نهایی به‌صورت دوطرفه صورت می‌گیرد (شکل ۱).



شکل ۱. جریان دوطرفه اطلاعات؛ ویژگی متمایز حس لامسه

به این انتقال دوطرفه اطلاعات توسط حس لامسه، لمس فعال<sup>۴</sup> گفته می‌شود. برای مثال برای حس کردن شکل یک فنجان چای، شخص باید انگشتان را به طرف آن ببرد و انگشتان خود را دور سطح بیرونی آن حلقه بزند تا تصویر ذهنی فنجان شکل بگیرد. وقتی دست شخص در تعامل با یک جسم قرار می‌گیرد، حس اولیه تماس، توسط گیرنده لمسی (اعصاب انتهایی) در پوست ایجاد می‌شود. این گیرنده، اطلاعات مربوط به هندسه، بافت، لیزی و جز این‌ها از سطح جسم را به شخص می‌دهد. به این اطلاعات اصطلاحاً اطلاعات لمسی<sup>۵</sup> یا پوستی<sup>۶</sup> گفته می‌شود. وقتی دست تلاش می‌کند تا با اعمال نیرو، جسم را نگه دارد، اطلاعات جنبشی<sup>۷</sup> (نیروی بازخورد) نقش بازی می‌کند و اطلاعات فیزیکی در مورد موقعیت و حرکت دست نسبت به جسم را به شخص می‌دهد. بنابراین در انتقال اطلاعات بین کاربر نهایی و محیط، دو دسته داده جابه‌جا می‌شوند که عبارت‌اند از اطلاعات لمسی و اطلاعات جنبشی [۴]. در تولید

سیستم‌های هپتیک رویکردهای مختلفی وجود دارد، اما کلیه آنها از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از:

الف) هپتیک انسانی<sup>۸</sup>: مطالعه نحوه به‌کارگیری حس لامسه توسط انسان که حاوی اطلاعات جنبشی و لمسی است.

ب) هپتیک رایانه ای<sup>۹</sup>: یک الگوریتم یا نرم‌افزار که شامل تکنیک‌ها و فرایندهای مرتبط با تولید و نمایش لمسی و احساس از اشیای مجازی و انتقال آن به یک اپراتور انسانی از طریق یک نیروی منعکس‌کننده می‌باشد. این بخش شامل معماری نرم‌افزار مورد نیاز برای تعامل هپتیک و هماهنگ‌سازی با حس بینایی و سایر وسائل نمایشی است.

ج) هپتیک ماشینی<sup>۱۰</sup>: یا همان رابط کاربر هپتیک<sup>۱۱</sup> است که به طراحی، ساخت و استفاده از ماشین‌آلات برای جایگزینی یا تقویت لمس انسان مرتبط می‌گردد. رابط کاربر هپتیک، دستگاه‌هایی هستند که مجموعه‌ای از اجزای مکانیکی را دربر دارند و به‌منظور تبادل اطلاعات با سیستم عصبی انسان در تماس فیزیکی با آن می‌باشند. وقتی اپراتور با رابط کاربر هپتیک کار می‌کند در واقع موتور عملگر مورد نظر را به‌صورت فیزیکی تحریک می‌کند و در عوض، اطلاعات مربوط به حس لامسه توسط تحریک‌کننده‌های لمسی و جنبشی به اپراتور انتقال می‌یابد [۵]. در شکل‌های ۲ تا ۵ می‌توان چهار نمونه از انواع رابط کاربر هپتیک را، که توسط شرکت‌های مختلف ساخته شده‌اند، مشاهده کرد.



شکل ۲. دسته جوی استیک SideWinder

با نیروی بازخورد، ساخت شرکت مایکروسافت [۶]



شکل ۳. دستکش هپتیک CyberGrasp [۷]

از اشیای مجازی خواهد شد. اصطلاحاً به اعمال نیروی بازخورد به اپراتور از طریق دستگاه رابط، رندرینگ هپتیک<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود. در حالتی که برخوردی شناسایی نشده باشد، هیچ نیرویی محاسبه و اعمال نمی‌شود و کاربر می‌تواند قلم شبیه‌سازی شده خود را در فضای خالی آزادانه حرکت دهد [۱۰].

### ۳. کاربردها و محدودیت‌های فناوری هپتیک

استفاده از فناوری هپتیک در اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوائل دهه ۱۹۶۰ م کلید خورد و دانشمندانی نظیر رالف موشر<sup>۱۳</sup> از آن به‌عنوان یک فناوری در سیستم‌های رباتیک خود استفاده کردند. در حال حاضر فرصت‌های بالقوه زیادی در استفاده از فناوری هپتیک وجود دارد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود [۱۱]:

(الف) وسائل مربوط به بازی‌های ویدیویی: تولیدکنندگان بازی‌های ویدیویی نخستین کسانی بودند که از این فناوری در صنعت بازی بهره گرفتند. اولین محصولات تجاری با برخی از کاربردهای ابتدایی هپتیک، جوی استیک‌ها با نیروی بازخورد هستند که می‌توانند حس آثار نیرو (معمولاً لرزش) را به کاربر بدهند. در حال حاضر شرکت‌هایی نظیر لوگی‌تک<sup>۱۴</sup> و مایکروسافت چنین دستگاهی را با قیمت مناسب برای استفاده در خانه جهت بازی تولید کرده‌اند.

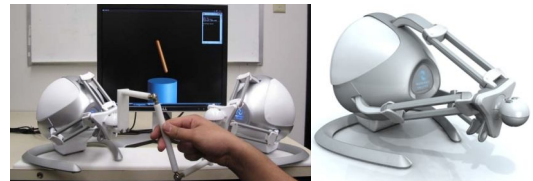
(ب) علوم پزشکی: کاربرد هپتیک در این زمینه عمدتاً شبیه‌سازها می‌باشد که می‌تواند فرایندهای واقعی پزشکی را شبیه‌سازی کند. این نوع شبیه‌سازها به ارائه‌دهندگان خدمات درمانی اجازه می‌دهد که فرایندهای پزشکی را در محیط‌هایی که هیچ خطری برای بیمار ندارد شبیه محیط‌های واقعی تمرین کنند. مثلاً شرکت نووینت<sup>۱۵</sup> یک سیستم واقعیت مجازی دندانپزشکی و تصویربرداری پزشکی را طراحی و ساخته است.

(ج) زمین‌شناسی: در اکتشاف نفت، توسعه مدل‌های دقیق از زیر سطح زمین یک مسئله بسیار پیچیده و چالش‌برانگیز است. استفاده از ماوس و صفحه‌کلیدهای موجود دوبعدی برای کار با داده‌های سه‌بعدی می‌تواند امری زمان‌بر و دست‌وپاگیر باشد. شرکت نووینت نرم‌افزارهای سفارشی TouchStone و VoxelNotePad را با افزودن بازخورد لمسی و تعامل سه‌بعدی با تکنیک‌های تجسمی موجود،



شکل ۴. رابط کاربر هپتیک Phantom ساخت شرکت Sensable

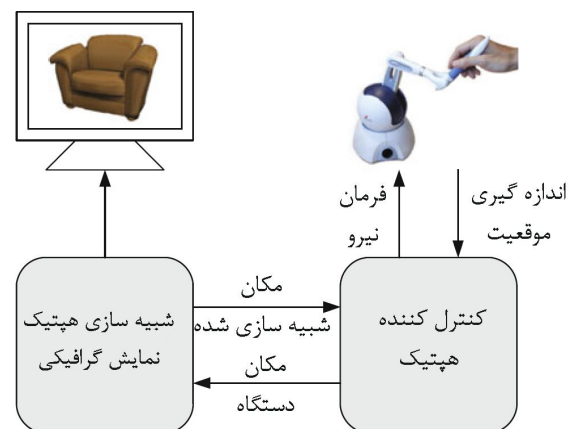
با ۶ درجه آزادی [۸]



شکل ۵. رابط کاربر هپتیک Novint Falcon ساخت شرکت Novint

با ۳ درجه آزادی [۹]

به کمک شکل ۶ می‌توان با نحوه کار یک سیستم هپتیک به زبان ساده آشنا شد که توسط آن اشیای مجازی قابل لمس می‌گردند. وقتی اپراتور رابط کاربر هپتیک را دستکاری می‌کند، حسگرهای موقعیت دستگاه، اطلاعات مربوط به موقعیت را به رایانه انتقال می‌دهند. در هر فاصله زمانی (مثلاً در فاصله‌های زمانی ۱ میلی‌ثانیه) رایانه که دستگاه رابط کاربر را کنترل می‌کند، برخوردهای بین قلم شبیه‌سازی شده و اشیای مجازی موجود در محیط مجازی را نیز کنترل می‌کند.



شکل ۶. نحوه کار یک سیستم هپتیک جهت لمس اشیای مجازی

اگر یک برخورد در محیط مجازی اتفاق بیافتد، سیستم هپتیک رایانه‌ای، نیروها و گشتاورهای نیروی عکس‌العمل را محاسبه کرده و آن را در نقطه تعامل بین اپراتور و دستگاه رابط کاربر به اپراتور اعمال می‌نماید که این امر منجر به درک لمسی

طراحی و ساخته است که به کمک آنها می توان با داده‌های سه‌بعدی به صورت سه‌بعدی کار کرد.

د) شبیه‌سازی سیستم‌های مکانیکی: برخی از کاربردهای هپتیک برای شبیه‌سازی قطعات مکانیکی یا سایر سیستم‌های پیچیده (به‌عنوان مثال سیستم ارباب فرود هواپیما) با هدف کنترل و تست عملکرد سیستم قبل از تولید نمونه اولیه توسعه یافته است. شرکت بوئینگ به صورت تجربی برخی از برنامه‌های لمسی با رابط کاربر لمسی سه‌بعدی فانتوم<sup>۱۶</sup> را توسعه داده است.

ه) مدلسازی سه‌بعدی: فناوری هپتیک، روش جدیدی برای ایجاد و دستکاری اشیای سه‌بعدی ارائه داده است. بسیاری از سیستم‌های مدلسازی به‌منظور تسهیل در ساخت دیجیتال هر نوع مدل از کفش تا اسباب‌بازی توسعه داده شده‌اند و به کمک آنها می‌توان در زمینه‌های مجسمه‌سازی، هنرهای زیبای کلاسیک تا طراحی محصولات صنعتی استفاده کرد. از نمونه‌های آن می‌توان به سیستم مدلسازی فرم آزاد و استودیوهای دست مجازی و قابل لمس که به ترتیب توسط شرکت‌های Sensable و Immersion ساخته شده‌اند اشاره کرد.

و) آموزش: در زمینه آموزش، حس لامسه و نیروی بازخورد می‌تواند پیشرفت‌های بزرگی در روش‌های تدریس موجود ایجاد کند؛ زیرا استفاده از آن علاوه بر اینکه سبب کاهش هزینه‌های بالای آموزش در دنیای واقعی می‌شود، این امکان را نیز فراهم می‌کند که مطالب آموزشی با کیفیت و جذابیت بیشتری به دانشجویان انتقال یابد و برای مصارف آموزشی در زمینه‌های مختلف نظیر پزشکی و مهندسی از آن استفاده گردد [۳].

هرچند پیشرفت‌های مهمی در زمینه فناوری هپتیک اتفاق افتاده است، اما ترکیب این فناوری با محیط‌های مجازی هنوز در مراحل ابتدایی خود قرار دارد و این فناوری همچنان به یک فناوری متداول تبدیل نشده است؛ زیرا هنوز محدودیت‌هایی پیش روی خود دارد. اگر بتوان بر این محدودیت‌ها فائق آمد، این فناوری سبب انقلابی بزرگ در زمینه‌های صنعتی، آموزشی و تحقیقاتی خواهد شد. برخی از این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

۱. دستگاه‌های هپتیک معمولاً حجیم و از اندازه و وزن زیادی برخوردارند.

۲. نیروهای تعاملی وارده از دستگاه رابط هپتیک از اندازه محدودی برخوردار است و در تمام جهات یکسان نیست.

۳. الگوریتم رندرینگ هپتیک، که حس محیط مجازی را تداعی می‌کند، در فاصله‌های زمانی گسسته عمل می‌کند. این در حالی است که کاربر به صورت زنده و در فاصله‌های زمانی پیوسته مشغول به کار می‌باشد.

۴. محدودیت پهنای باند مشکل عمده‌ای است که سیستم‌های هپتیک با آن روبرو هستند؛ زیرا این سیستم‌ها داده‌های زیادی را انتقال می‌دهند و در صورتی که پهنای باند کافی قابل دسترسی نباشد منجر به تفسیر اشتباه از داده‌ها خواهد شد.

۵. دستگاه‌های رابط هپتیک برای کاربردهای خاصی طراحی شده‌اند، لذا برای استفاده از آنها در سایر زمینه‌ها باید دستگاه‌های مناسب با زمینه مورد نظر طراحی و ساخته شود که این امر می‌تواند خیلی هزینه‌بر و وقت‌گیر باشد. از اینرو طراحی و ساخت یک رابط هپتیک با کارایی عموم از ضرورت‌های این فناوری محسوب می‌شود.

۶. تصاویر گرافیکی می‌توانند خود را با نرخ ۶۰ هرتز بروزرسانی کنند. این در حالی است که داده‌های هپتیک باید با نرخ ۱۰۰۰ هرتز بروزرسانی شوند. چنانچه نرخ بروزرسانی کمتر از این مقدار باشد، سیستم ناپایدار شده و دچار ارتعاش می‌گردد.

اگر بدانیم چگونه می‌توان محرک‌های حس لمسی را ذخیره، دستکاری و دوباره تولید کرد، آنگاه طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های امروزی جامعه بشری شامل ارتباطات، آموزش، هنر، سرگرمی، تجارت و علم برای همیشه تغییر خواهند کرد [۱۲].

#### ۴. استفاده از فناوری هپتیک در آموزش نقشه‌کشی

تحقیقات نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از دانشجویان از طریق حواس جنبشی یا لمسی خود یاد می‌گیرند و وقتی آموزش همراه با حرکت و لمس باشد، مطالب را بهتر درک می‌کنند و آنها را بهتر به یاد می‌آورند. برای طیف گسترده‌ای از موضوعات، ترکیب داده‌های حسی و بازخورد آنها این اجازه را می‌دهد تا درک عمیق‌تری از مفاهیم موجود حاصل گردد. چون فرایند آموزش مرسوم، به‌طور سنتی بر حواس بینایی و شنوایی متمرکز

شده است، دانشجویان نقاط ضعفی دارند. این در حالی است که فناوری هپتیک رویکردی کاملاً متفاوت از آموزش ارائه می‌دهد که در آن بهترین شرایط یادگیری برای بسیاری از دانشجویان حاصل می‌شود [۱۳]. برخی از اساتید رشته‌های مهندسی با پس‌زمینه‌های پژوهشی در زمینه هپتیک تلاش کرده‌اند که این فناوری را وارد برنامه‌های آموزشی کارشناسی و کارشناسی ارشد بکنند. یکی از کاربردهای این فناوری استفاده از آن به‌عنوان شبیه‌ساز کامپیوتری جهت کمک به آموزش مطالب مهندسی از قبیل فیزیک، استاتیک، دینامیک، طراحی ماشین، طراحی مهندسی و جز این‌هاست. شبیه‌سازی کامپیوتری و انیمیشن‌ها به‌همراه حس لمسی اجازه می‌دهند که دانشجویان پاسخ سیستم را احساس کنند که این امر فرایند یادگیری را جذاب‌تر و سرگرم

کننده‌تر می‌کند و از طرفی آنها مفاهیم درس را بهتر درک خواهند کرد [۱۴]. با توجه به نوظهور بودن این فناوری، تعداد کمی از دانشگاه‌های مهندسی مجهز به این فناوری هستند و معمولاً استادان این دانشگاه‌ها از این فناوری به‌صورت تحقیقاتی و یا به‌صورت موردی جهت بهبود کیفیت آموزش کلاس درس خود استفاده می‌کنند [۱۵-۱۷]. تعدادی از محققان، کلاس‌هایی را برای آموزش هپتیک تعریف کرده‌اند که در آن هپتیک به‌عنوان موضوع اصلی مطرح است. البته تعداد این دوره‌ها بعد از برگزاری همایش بهترین شیوه برای آموزش هپتیک در سال ۲۰۱۲ م در شهر ونکوور کانادا، روبه افزایش است [۱۸]. در جدول ۱ نام چهار دانشگاه به‌همراه درس تعریف‌شده در آنها، که هپتیک به‌عنوان موضوع اصلی مطرح است، مشاهده می‌شود [۱۹].

جدول ۱. دوره‌های آموزشی که در آن آموزش هپتیک به‌عنوان موضوع اصلی مطرح است

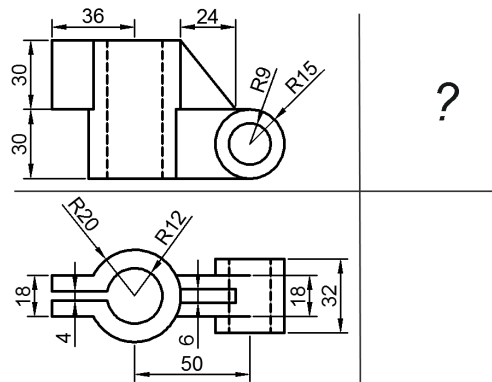
نام درس	دانشگاه	دانشکده	کشور
Introduction to Haptics, Design and Control of Haptic Systems	استنفورد	مهندسی مکانیک	امریکا
Advanced Haptics	علم و فناوری پوهانگ	علوم و مهندسی کامپیوتر	کره جنوبی
Physical User Interface Design	بریتیش کلمبیا	علوم کامپیوتر	کانادا
Introduction to Robotics	پنسیلوانیا	مهندسی مکانیک	امریکا

## ۵. آموزش دروس نقشه‌کشی صنعتی و فناوری هپتیک

دروس نقشه‌کشی صنعتی به‌طور معمول در تمام دانشگاه‌های دنیا برای دانشجویان مهندسی ارائه می‌شود. هرچند نام درس، شیوه اجرا یا زمان تخصیص داده‌شده به آن برای دانشگاه‌های مختلف با هم متفاوت است، اما اصل کلی آن آموزش و بهبود توانایی تجسم سه‌بعدی و بهبود توانایی دانشجویان در ارائه ایده‌ها و خلاقیت‌ها توسط ترسیم، علائم و استانداردهای گرافیکی است. این حرفه وسیله‌ای ارتباطی مهم بین مهندسان، تکنسین‌ها و کسانی که در زمینه طراحی و تولید فعالیت می‌کنند محسوب می‌شود که شامل قوانین فنی و قراردادهای ترسیمی است. مهارت نقشه‌خوانی و نقشه‌کشی در مهندسی مانند سواد خواندن و نوشتن می‌باشد و به‌همین دلیل از نقشه‌کشی صنعتی به‌عنوان زبان صنعت یاد می‌گردد که اطلاعات مورد نیاز از یک قطعه و یا یک دستگاه شامل شکل هندسی، نحوه قرار گرفتن و اتصال اجزای مختلف، مشخصات فیزیکی و هرگونه اطلاعات

ضروری را به روشنی و بدون ابهام بیان می‌کند. تسلط بر این زبان برای هر مهندسی لازم و ضروری است تا بتواند از طریق آن به تبادل اطلاعات با سایر مهندسان بپردازد. هر مقدار که تسلط یک مهندس به نقشه‌خوانی و نقشه‌کشی بیشتر باشد، سریعتر و راحت‌تر می‌تواند ایده‌های خود را به دیگران منتقل کند و به‌طور متقابل ایده‌های دیگران را درک نماید. به‌همین دلیل دانشجویان رشته‌های مهندسی باید در زمینه تجسم مسائل سه‌بعدی آموزش ببینند. استفاده از خطوط و علائم برای نشان دادن ایده‌ها و فکرها به‌عنوان وسیله ارتباطی بسیار مؤثرتر از توضیحات شفاهی است. نقشه‌کشی صنعتی مانند پلی عمل است که دفاتر طراحی را با کارگاه‌های ساخت‌وتولید مرتبط می‌سازد. از همین روی تمام افرادی که با صنعت و مسائل فنی درگیرند باید بتوانند به‌راحتی و بدون تأمل، نقشه‌های صنعتی را بخوانند و آنها را تفسیر نمایند [۲۰]. سخت‌ترین مهارتی که دانشجویان باید در این درس یاد بگیرند، تجسم اجسام سه‌بعدی در ذهن و

پیااده سازی تصاویر آن به صورت ترسیمی است که یک نمونه آن مشاهده دو نمای یک جسم و تجسم سه بعدی آن در ذهن و ترسیم نمای مجهول جسم می باشد (شکل ۷).



شکل ۷. نمونه ای از تمرین کلاس نقشه کشی صنعتی (مجهول یابی)

از محققان در دو دهه اخیر به دنبال شیوه های متفاوت آموزشی و اجرای آن در کلاس بوده اند تا بتوانند از طریق این شیوه های آموزشی جدید، مشکلات دانشجویان در زمینه درک فضای سه بعدی را مرتفع سازند و قدرت تجسم سه بعدی آنها را بهبود بخشند. در مقالات، راه های مختلفی برای بهبود قدرت تجسم سه بعدی دانشجویان پیشنهاد و مورد آزمایش قرار گرفته است که دو مورد از آخرین راه کارهای مؤثر در بهبود قدرت تجسم سه بعدی دانشجویان عبارتند از:

۱. آموزش یکی از نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر<sup>۱۷</sup> و استفاده از آن در کلاس [۲۱-۲۳]
۲. استفاده از مدل های فیزیکی سه بعدی ساخته شده توسط پرینترهای سه بعدی در کلاس [۲۴-۲۵]

در واقع مورد اول، استفاده از فناوری محیط های مجازی در بحث مدلسازی و مورد دوم، استفاده از حس لامسه در کنار حس بینایی جهت بهبود تجسم فضای سه بعدی در نظر گرفته شده است. نویسنده این نوشتار، هر دو راه کار را به صورت منظم و همزمان با هم در کلاس درس بر روی ۲۹ نفر دانشجویی که در درس نقشه کشی صنعتی ثبت نام کرده بودند اجرا می کند. شیوه اجرا به این صورت است که در جلسات اول درس نقشه کشی صنعتی، محیط های دوی بعدی و سه بعدی نرم افزار اتوکد به دانشجویان آموزش داده می شود تا بتوانند از آن به عنوان یک ابزار در رسم نقشه های دوی بعدی و مدل های سه بعدی در جلسات بعدی کمک بگیرند. همچنین در هر جلسه یک سری تمرین به عنوان کار در خانه برای دانشجویان تعیین می شود تا آنها را به کمک نرم افزار اتوکد ترسیم و برای جلسه بعد به صورت پرینت شده تحویل نمایند. با انجام تمرین های مستمر، دانشجویان به سطح قابل قبولی از نظر مدلسازی با این نرم افزار می رسند. همچنین برای به کارگیری از حس لامسه، مدل های ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی در کلاس و در جلسات مربوط به تجسم، مجهول یابی، یافتن تصویر سوم (مانند شکل ۷) و همچنین یافتن نمای برشی مورد استفاده قرار می گیرد که این مباحث در حدود ۶۰ درصد از جلسات درس نقشه کشی صنعتی را به خود اختصاص می دهند. در این جلسات بعد از آموزش تئوری درس، از دانشجویان خواسته می شود که تمرین های مربوطه را انجام دهند و پاسخ خود را با مدل فیزیکی مقایسه نمایند. در صورتی که پاسخ دانشجو صحیح باشد، می تواند به تمرین بعدی

برای دانشجویان مهندسی مهارت های تجسمی می تواند درک مفاهیم اصولی در ترسیم فنی بسیار مهم باشد. این مهارت ها در موفقیت مهندسان طراح در کلیه گرایش ها بسیار اهمیت و با کارایی آنها رابطه تنگاتنگی دارد. دانشجویان تمام رشته های مهندسی در دانشگاه های کشور، درس نقشه کشی صنعتی را باید بگذرانند. این در حالی است که با توجه به اهمیت و جایگاهی که این درس در بهبود تجسم فضای سه بعدی و ایجاد خلاقیت در دانشجویان دارد، در دانشگاه صنعتی شریف علاوه بر دانشجویان مهندسی، دانشجویان علوم پایه نظیر فیزیک، ریاضی و علوم کامپیوتر نیز باید این درس را بگذرانند. از طرفی رشته هایی نظیر مهندسی مکانیک و صنایع در این دانشگاه باید درس نقشه کشی صنعتی ۲ را نیز بگذرانند. در این درس دانشجویان با انواع قطعات صنعتی، نقشه های مورد نیاز در طراحی و صنعت و نحوه ترسیم آنها براساس آخرین فناوری های اجرایی و قابل استفاده در کشور آشنا می شوند و در انتهای ترم از آنها انتظار می رود بتوانند از قطعات و دستگاه های صنعتی نقشه های اجرایی قطعه، مونتاژ، دیمونتاژ و انفجاری تهیه کنند. با توجه به اینکه دانشجویان ورودی رشته های مهندسی در دانشگاه از قبل، کمتر با مباحث تجسمی روبرو شده اند، لذا بسیاری از آنها در درس نقشه کشی صنعتی، با مسائل مربوط به تجسم سه بعدی دچار مشکل می شوند و قادر نیستند خود جسم و یا اجزا و قسمت های مختلف آن را در ذهن به درستی تجسم کنند و یا آنها را روی کاغذ ترسیم نمایند. به همین خاطر بسیاری

برود و در غیر این صورت باید با مقایسه با مدل فیزیکی، اشکال پاسخ خود را بیابد. به این ترتیب دانشجویان به صورت موازی از دو روش؛ یعنی استفاده از حس بینایی (هنگام مدلسازی با نرم افزار) و دیگری ترکیب حس بینایی و لامسه (دستکاری با مدل های فیزیکی) در جهت بهبود قدرت تجسم خود بهره می گیرند. برای مقایسه این دو روش پرسشنامه ای مطابق جدول ۲ تهیه شد و در انتهای ترم در اختیار دانشجویان قرار گرفت تا آن را تکمیل کنند. نتیجه این پرسشنامه برای پرسش های ۱ و ۲ به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ قابل مشاهده است. همان گونه که در شکل ۸ ملاحظه می شود، در مجموع، حدود ۹۴ درصد

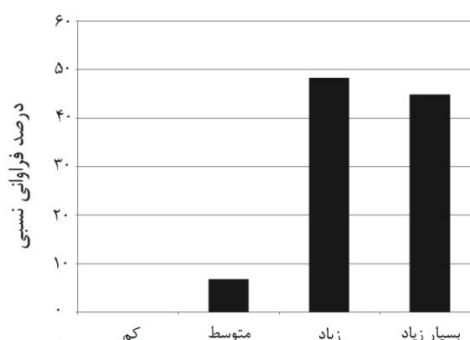
دانشجویان (جمع گزینه های زیاد و بسیار زیاد) به اثر قابل توجه ترکیب حواس بینایی و لامسه در بهبود قدرت تجسم سه بعدی اذعان کردند. همچنین با مشاهده شکل ۹ می توان دریافت که با وجود قابلیت های بالای نرم افزار اتو کد و استفاده راحت از آن، ۶۵/۵ درصد دانشجویان مدل فیزیکی را بر مدل مجازی ترجیح می دهند و این نشان می دهد که اثر یک مدل فیزیکی بیشتر از یک مدل سه بعدی مجازی است؛ زیرا علاوه بر حس بینایی، حس لامسه نیز مورد استفاده قرار می گیرد و دانشجو درک بهتری نسبت به تجسم حجم سه بعدی به دست می آورد.

جدول ۲. پرسشنامه جهت مقایسه بین حس بینایی با ترکیب حس بینایی و لامسه

پرسش ۱	الف) بسیار زیاد	ب) زیاد	ج) متوسط	د) کم
تأثیر استفاده از مدل های ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی بر روی بهبود قدرت تجسم فضایی خود را تا چه حد ارزیابی می کنید؟				
پرسش ۲	چنانچه در حل یک مسئله تجسمی مانند یافتن تصویر سوم جسم از روی دو تصویر دچار مشکل شوید، کدام روش زیر را انتخاب می کنید؟			
	الف) استفاده از مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار اتو کد	ب) استفاده از مدل فیزیکی ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی		



شکل ۹. نتیجه نظرسنجی از پرسش ۲



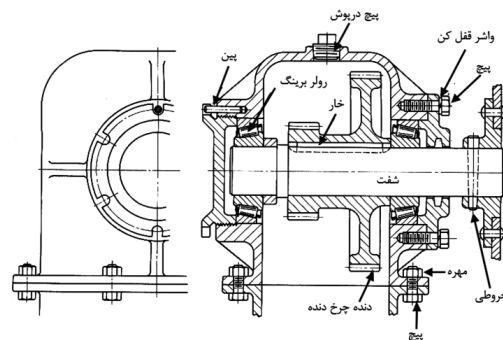
شکل ۸. نتیجه نظرسنجی از پرسش ۱

پرینتر سه بعدی که به روش اف. دی. ام.<sup>۱۹</sup> کار می کند (مدل خریداری شده در دانشگاه صنعتی شریف) باید در حدود ۸۰۰۰۰ تومان هزینه کرد که این مقدار فقط برای ساخت تقریباً ۲۰ عدد مدل فیزیکی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر مکعب جوابگو خواهد بود. دومین ایراد این است که برای ساخت یک مدل فیزیکی مدت زمان زیادی مورد نیاز است. مثلاً مدت زمان لازم برای ساخت یک مدل فیزیکی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر مکعب توسط یک پرینتر سه بعدی متداول در حدود ۲ ساعت به طول می انجامد. به همین دلیل تمام مدل های فیزیکی باید قبل از کلاس تهیه شوند و چنانچه دانشجو در کلاس درس در مورد

هر چند استفاده از مدل های فیزیکی ساخته شده توسط پرینتر سه بعدی و به کارگیری ترکیب حواس بینایی و لامسه در درک شکل سه بعدی اجسام در ذهن دانشجویان نسبت به استفاده تنها از نرم افزار اتو کد نقش بهتری بازی می کند، اما استفاده از پرینترهای سه بعدی خالی از اشکال نیست. نخستین ایراد این دستگاه ها قیمت نسبتاً بالای آنهاست. در حال حاضر، برای خرید یک نمونه از این دستگاه ها با کیفیت و کارایی مناسب باید در حدود ده میلیون تومان هزینه کرد. از طرفی برای تهیه مواد مصرفی جهت ساخت مدل فیزیکی نیز باید هزینه کرد. مثلاً برای خرید یک کیلوگرم از ماده ای. بی. اس.<sup>۱۸</sup> جهت استفاده در



یک حجم ذهنی خود سؤال داشته باشد و بخواهد آن را مشاهده و لمس کند، باید برای پاسخ به این نیاز دانشجو، او را به زمان جلسه بعدی ارجاع داد تا بین فاصله زمانی بین دو جلسه، مدل فیزیکی در فرصت مناسب ساخته و در جلسه بعد در اختیار دانشجو قرار بگیرد. این ایراد در کلاس‌های درس نقشه‌کشی صنعتی ۲، که برای دانشجویان مهندسی مکانیک و صنایع ارائه می‌شود، ملموس‌تر خواهد بود؛ زیرا تمرین‌های استفاده‌شده در این کلاس شامل دستگاه‌ها و مجموعه‌های مونتاژی است (شکل ۱۰) که ترکیب تعداد زیادی قطعه است.



شکل ۱۰. نمونه‌ای از تمرین کلاس درس نقشه‌کشی صنعتی ۲

دانشجویان علاوه بر اینکه باید شکل سه‌بعدی هر قطعه را درک و تجسم کنند، باید نحوه عملکرد هر قطعه، ارتباط آن با سایر قطعات و سازوکار حرکتی کل مجموعه را شناسایی و درک کنند. در این تمرین‌ها استفاده از مدل فیزیکی و به‌کارگیری حس لامسه به‌مراتب بیشتر از حس بینایی به دانشجویان کمک می‌کند. از طرفی ساخت مدل فیزیکی دستگاه‌های مونتاژی با پرینتر سه‌بعدی که شامل انواع قطعات مانند چرخ‌دنده، پیچ و مهره، یاتاقان و جز این‌هاست هم از منظر مالی و هم از نظر زمانی مقرون به‌صرفه نیست. از طرفی، هرچه تعداد قطعات بالاتر رود، تجسم و درک شکل هندسی قطعات، نحوه چیدمان آنها و همچنین نحوه حرکت آنها نسبت به هم سخت‌تر خواهد شد و ضرورت داشتن یک مدل فیزیکی سه‌بعدی از مجموعه مونتاژی برای حس لمسی توسط دانشجویان بیشتر محسوس می‌گردد. با استفاده از فناوری هپتیک در کلاس نقشه‌کشی صنعتی می‌توان بسیاری از ایرادها و کمبودهای مربوط به شیوه‌های آموزش دروس نقشه‌کشی صنعتی در استفاده از فناوری‌های متداول را مرتفع ساخت. به‌کمک این فناوری می‌توان بعد از مدلسازی حجم یا مجموعه مونتاژی از قطعات،

بلافاصله آنها را از راستاهای مختلف لمس کرد و از شکل هندسی قطعات، سطح مقطع برشی، نحوه حرکت قطعات نسبت به هم در مجموعه مونتاژی و چگونگی درگیری آنها با هم به‌صورت لمسی نیز مطلع شد. همچنین به‌کمک این فناوری دانشجویان با حس کردن سطح قطعات و وزن آنها می‌توان درک بهتری از جنس قطعات به‌دست آوردند و شناخت بهتر و واقعی‌تر نسبت به مسائل مهندسی کسب نمایند. با توجه به اینکه فناوری هپتیک مانند فناوری پرینترهای سه‌بعدی نیاز به مواد مصرفی ندارد، تنها هزینه، همان هزینه اولیه برای خرید یک دستگاه رابط کاربر هپتیک به ازای هر دانشجو در کلاس است. مثلاً برای خرید یک دستگاه رابط کاربر هپتیک ساخت شرکت نوینت با سه درجه آزادی باید در حدود ۱۵۰ دلار هزینه کرد. بنابراین برای یک کلاس نقشه‌کشی صنعتی، که به‌طور متداول دارای ۱۵ نفر دانشجو است، باید در حدود ۲۲۵۰ دلار هزینه شود. با توجه به نوظهور بودن فناوری هپتیک، تا این لحظه (در زمان نگارش این نوشتار) از به‌کارگیری این فناوری در آموزش دروس نقشه‌کشی صنعتی در دانشگاه‌های معتبر دنیا گزارشی مشاهده نشده است، اما استفاده از این فناوری به‌منظور بررسی عملکرد آن از نظر کیفیت آموزشی در درس‌هایی نظیر فیزیک، شیمی، استاتیک، دینامیک و جز این‌ها در مقالات مطرح شده است [۱۵].

## ۶. نتیجه‌گیری

سازندگان بازی‌های ویدیویی پیشگامان استفاده از فناوری هپتیک به‌طور عموم هستند که از طریق این فناوری توانستند بازی‌های ساخته‌شده خود را از طریق به‌ارتعاش درآوردن دسته جوی استیک‌ها و دسته فرمان‌ها جذاب‌تر و مهیج‌تر کنند. اما بازی‌های ویدیویی آینده، بازیکنان را قادر به لمس و دستکاری اشیای مجازی، مایعات، ابزارآلات و جز این‌ها خواهد کرد. در حال حاضر بعضی از شرکت‌های سازنده مثل Novint Falcon توانسته‌اند این وعده را تا حدی به واقعیت تبدیل کنند. مثلاً کاربر می‌تواند تفاوت بین اثر شلیک یک هفت‌تیر و شلیک تفنگ ساچمه‌ای را تشخیص دهد. از طرفی برخی از تولیدکنندگان صفحه نمایش لمسی در حال حاضر در حال تجربه این فناوری هستند. مثلاً طراحان گوشی نوکیا، یک صفحه‌نمایش لمسی ساخته‌اند که به‌کمک حسگرهای

پیزوالکتریک کوچک تعبیه شده در زیر آن، احساس فشردن یک دکمه واقعی برای کاربر را تداعی می کنند. اگرچه شرکت های زیادی در حال تلاش برای استفاده از این فناوری هستند، اما همچنان بزرگترین مانع در استفاده از این فناوری، قیمت تمام شده آن است. از پیشرفته ترین کاربردهای این فناوری می توان به کاربردهای صنعتی، نظامی و پزشکی اشاره کرد. از طرفی آموزش با فناوری هپتیک هر روز مرسوم تر و رایج تر می شود. مثلاً دانشجویان پزشکی هم اکنون می توانند تکنیک های جراحی ظریف نظیر بخیه زدن رگ های خونی یا تزریق بوتاکس به داخل بافت عضله را به صورت مجازی احساس کنند. تکنسین های مکانیک هواپیما می تواند با قطعات پیچیده و فرایندهای سرویس دهی آنها کار کنند و به تمامی آنچه روی صفحه نمایش رایانه می بینند دست بزنند و آنها را لمس کنند. سربازان به کمک این فناوری می توانند برای انواع نبردها از یادگیری نحوه خنثی سازی بمب تا نحوه کار با هلیکوپتر، تانک و یا جت جنگنده آموزش ببینند و آماده شوند. زمانی طولانی نخواهد گذشت تا فضانوردان و ستاره شناسان

روی زمین بتوانند از طریق یک سیستم تله روباتیک مجهز به فناوری هپتیک سنگ های کره مریخ را لمس کنند. با گذشت زمان و با روند نزولی در قیمت تمام شده این فناوری، انتظار می رود این فناوری به زودی در آموزش های مهندسی فراگیر شود. از طرفی، با توجه به اینکه به کمک نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر می توان تمام دستگاه ها و مجموعه های مونتاژی و محیط های مهندسی را مدلسازی یا شبیه سازی کرد و از طریق فناوری هپتیک شکل هندسی، جنس، وزن، سختی و زبری قطعات را لمس کرد. به این ترتیب می توان حس یک مهندس در محیط واقعی را برای یک دانشجوی مهندسی با هزینه بسیار ناچیز شبیه سازی و تداعی کرد. به این ترتیب آموزش نه تنها با جذابیت همراه است، که تمام جزئیات دانش مورد نظر به دانشجو منتقل می گردد. در همین راستا، معضل آموزش دروس نقشه کشی صنعتی به عنوان یکی از درس های مشکل برای دانشجویان مهندسی و برای استادانی که آن را تدریس می کنند و به عنوان یک چالش مطرح است برای همیشه پایان خواهد یافت.

## ۷. مآخذ

- [۱] ر.، ستوده قره باغ، تکنولوژی اطلاعات و کاربرد آن در مهندسی شیمی، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، ش. ۱۴، ص. ۲۶-۱، ۱۳۸۱.
- [۲] ب. زمانی، ع. افخمی خیرآبادی، راهکارهای نوین برای آموزشگران به منظور کاربرد فناوری های اطلاعات و ارتباطات در آموزش علوم، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، ش. ۳۲، ص. ۱۳۱-۱۰۵، ۱۳۸۵.
- [3] M. Pantelios, L. Tsiknas, S. Christodoulou, T. Papatheodor, Haptics technology in Educational Applications, *Journal of Digital Information Management*, Vol. 2, 2004.
- [4] A. El Saddik, M. Orozco, M. Eid, J. Cha, Haptics Technologies; Bringing Touch to Multimedia, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011.
- [5] M. Goyal, D. Saproo, A. Bagashra, K. Rahul Dev, Haptics: Technology Based on Touch, *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, Vol. 2, No. 8, pp 468-471, 2013.
- [6] Microsoft's SideWinder Force Feedback 2 Joystick, <http://www.1960pcug.org> (accessed January 13, 2017).
- [7] <http://www.cyberglovesystems.com> (accessed January 13, 2017).
- [8] <http://www.dentsable.com/haptic-phantom-omni.htm> (accessed January 13, 2017).
- [9] <http://www.novint.com> (accessed January 13, 2017).
- [10] M. J. Hari Hara Sudhan, Haptic Technology, *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 2 Vol. 2, 2014.
- [11] U. Suryavanshi, How to Possible Virtual Education by Haptic Technology, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 5, No. 3, 2014.
- [12] A. Alur, P. Shrivastav, A. Jumde, Haptic Technology: A Comprehensive Review of its Applications and Future Prospects, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 5, No. 5, 2014.

- [13] N. Sharma, S. Uppal, S. Gupta, Technology Based On Touch: Haptics Technology, *International Journal of Computational Engineering & Management*, Vol. 12, 2011.
- [14] L. Ni, A Haptics-Enabled Rehabilitation Design Project for a Control Systems Course, *American Society for Engineering Education*, 2011.
- [15] R. L. Williams II, X. He, T. Franklin, S. Wang, Haptics-augmented engineering mechanics educational tools, *World Transactions on Engineering and Technology Education*, vol. 6, No. 1, 2007.
- [16] W. Barfield, The Use of Haptic Display Technology in Education, *Themes in science and technology education*, Vol. 2, No. 1-2, 2009.
- [17] D. Lopes, C. Vaz de Carvalho, Simulation and Haptic Devices in Engineering Education, *Electronics and electrical engineering*, Vol. 102, No. 6, 2010.
- [18] <http://2012.hapticssymposium.org/node/68.html> (accessed January 13, 2017).
- [19] L. Jones, News from the Field: Courses in Haptics, *IEEE transaction on haptics*, Vol. 7, No. 4, 2014.
- [20] V. Kosse, Engineering Drawing as a Global Language for Engineers, *Proceedings of the 2005 ASEE/AaeE 4th Global Colloquium on Engineering Education*.
- [21] R.M. Onyancha, M. Derov, L. Brad, Improvements in Spatial Ability as a Result of Targeted Training and Computer-Aided Design Software Use: Analyses of Object Geometries and Rotation Types, *Journal of Engineering Education*, 2009.
- [22] A. N. Aljawi, H. A. Bogis, A. Abu-Ezz, Use of solid modeling and team skills in engineering graphics, *Proc. 2nd Saudi sSci. Conf. Fac. Sci. KAU*, 15-17 March 2004, pp 93-101.
- [23] G. Marunic, V. Glazar, G. Gregov, 3D Solid Modeling Inclusion in Engineering Graphics Course, *Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 6, pp. 667-675, 2009.
- [24] H. Wan, 3D Printing for Engineering Students – Understanding and Misunderstanding, *Proceedings of the ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*, 2015.
- [25] J. T. Czapka, M. H. Moeinzadeh, J. M. Leake, Application of Rapid Prototyping Technology to Improve Spatial Visualization, *Proceedings of the American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2002.

## پی نوشت

- 
1. passive method
  2. active method
  - 3 haptikos
  4. active touch
  5. tactile information
  6. cutaneous information
  7. kinesthetic information
  8. human haptics
  9. computer haptics
  10. machine haptics
  11. haptic interface
  12. haptic rendering
  13. Ralph Mosher
  14. Logitech
  15. Novint
  16. Phantom
  17. computer-aided design
  18. Acrylonitrile butadiene styrene

- 
19. fused deposition modeling