فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، تابستان ۱۴۰۱، صص.۲۲-۱

طراحی و اجرای درس جدید مجازی «آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس»

سمیه بشگزی[۱] و محمد معماریان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۳

DOI: 10.22047/IJEE.2022.316129.1869

چکیده: دانشجویان مقطع کارشناسی رشته‌های مهندسی، در کنار یادگیری کیفی مطالب نظری، می‌بایست مهارت‌های عملی، طراحی و کاربردی مورد نیاز را کسب کنند، تا آنها را برای ورود به بازار کار و یا ادامه تحصیل آماده سازد. در شاخه مخابرات مایکروویو و فوتونیک رشته مهندسی برق، تاکنون آزمایشگاه‌های مایکروویو، آنتن و اپتیک، دانشجویان را با جنبه‌های عملی، افزاره‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری این حوزه آشنا کرده است. در دو دهه اخیر و با پیشرفت شگرف توانایی رایانه‌ها، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی این حوزه کاربرد وسیعی هم در صنعت و هم در پژوهش‌های دانشگاهی پیدا کرده‌اند و به ابزارهایی جدایی‌ناپذیر از مراحل تحلیل و طراحی و پژوهش تبدیل شده‌اند. به دلایل تاریخی و همچنین پیچیدگی‌های محتوا در این شاخه، استفاده از این نرم‌افزارها در دوره کارشناسی معمولاً آموزش داده نمی‌شود، و اغلب مهندسان، پس از ورود به بازار کار و یا در مقاطع تحصیلات تکمیلی، بر حسب نیاز برای اولین‌بار این نرم‌افزارها را تجربه می‌کنند. در نتیجه، امروزه در دوره کارشناسی، جای آزمایشگاهی که نحوه صحیح استفاده از این نرم‌افزارها را به دانشجویان آموزش دهد، بسیار خالی است. در این راستا در نیمسال اول ۰۰-۱۳۹۹ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، برای اولین‌بار درس نوینی با نام آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس طراحی و ارائه شد. بررسی تعداد زیادی از برنامه‌های آموزش مهندسی برق دانشگاه‌های داخل و خارج از کشور، مشخص ساخت که طراحی و اجرای آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس، در قالب یک درس رسمی مقطع کارشناسی، اقدامی نوین در آموزش مهندسی برق است. هدف این درس‌آموزش نحوهٔ صحیح شبیه‌سازی، با استفاده از سه نرم‌افزار معروف و کاربردی شاخه مایکروویو و فوتونیک بوده است که بتواند اکثر جنبه‌های این حوزه را پوشش دهد. در این مقاله دلایل پیدایش و ایده اصلی درس، ساختار و نحوه ارائه آن، به همراه چالش‌ها و دستاوردهای این تجربه جدید، مورد بحث قرار گرفته است. در کنار مزایای پرکردن این خلأ آموزشی در برنامه کارشناسی مهندسی برق، ارائه این آزمایشگاه فرصت بسیار مغتنمی را جهت ایجاد انگیزه و علاقه به این شاخه در دانشجویان، آماده‌سازی آنها برای بازار کار و یا ادامه تحصیل و امکان مجازی‌سازی این آزمایشگاه (به‌خصوص در دوران شیوع همه‌گیری کووید-۱۹)، ایجاد کرد.

واژگان کلیدی: شاخه مایکروویو و فوتونیک، آزمایشگاه شبیه‌سازی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی، آموزش مجازی، ADS، COMSOL، HFSS، مهندسی برق

۱- دانشجوی دکتری مخابرات میدان و موج، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. somayeh.boshgazi@ee.sharif.edu

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). mmemarian@sharif.edu

۱. مقدمه

شاخه مایکروویو و فوتونیک (موسوم به مخابرات میدان یا میدان‌ها و امواج) در رشته مهندسی برق، شاخه‌ای بسیار وسیع و اثرگذار است، به‌طوری‌که جوانب مختلف زندگی مدرن بشر از جمله مخابرات، اینترنت، رایانه‌ها، گوشی‌های هوشمند، تصویربرداری، رادار و ... مرهون پیشرفت‌های این حوزه در دهه‌های گذشته‌اند. به‌طور خلاصه، مهندسین این شاخه به طراحی و حل مسائل صنعتی و تحقیقاتی در حوزه‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی نظیر مایکروویو، آنتن، تراهرتز، فوتونیک، اپتیک، مایکروویو فوتونیک، می‌پردازند. طیف الکترومغناطیسی شامل همه فرکانس‌ها، از جمله جریان الکتریکی ثابت و فرکانس پایین مانند برق شهری، امواج رادیویی، ریزموج (مایکروویو)، نور، اشعه ایکس و گاما است (Pozar, 2011).

از دیدگاهی کلی و کلاسیک، بخش عمده‌ای از محتوای رشته مهندسی برق بر پایه فیزیک الکترومغناطیس بنا شده[۱]، که با معادلات ماکسول[۲] بیان می‌شود (Cheng, 1989). بسیاری از دروس شاخه‌های مختلف رشته مهندسی برق، از جمله دروس مدارهای الکتریکی، الکترونیک، حالت جامد، سامانه‌های قدرت، موتورهای الکتریکی، ... بر روی قسمتی از این طیف الکترومغناطیسی تمرکز می‌کنند. این دروس، با استفاده از تقریب‌های مناسب بر معادلات ماکسول، قوانین، فرمول‌ها و فنون مخصوص طراحی و تحلیل حوزه موردنیاز را استخراج و فضای آموزش را حول این مطالب بنا می‌کنند.

شاخه مایکروویو و فوتونیک به‌طور کلان‌تری به تمامی طیف الکترومغناطیس می‌پردازد. در این حوزه، مسائل متنوعی وجود دارند که حل بسیاری از آنها، بسیار پیچیده است. بخش عمده‌ای از دروس شاخه مایکروویو و فوتونیک به یاددهی فنون، طراحی‌ها، و روش‌های مختلف حل این مسائل و معادلات می‌پردازد، تا دانشجو را از لحاظ نظری به دانش لازم برساند. دانشجویان این شاخه در دوره کارشناسی، درس‌های اصلی مانند الکترومغناطیس، میدان‌ها و امواج، مهندسی مایکروویو و مهندسی اپتیک را به همراه دروس تخصصی دیگری می‌گذرانند. با توجه به این‌که در این دروس تمرکز روی یادگیری تئوری می‌باشد، همواره چالشی وجود دارد که برخی دانشجویان شهود کافی در مورد این مسائل پیدا نمی‌کنند. این موضوع می‌تواند در علاقه دانشجویان به این حوزه نیز تأثیرگذار باشد. البته در دوره کارشناسی شاخه مایکروویو و فوتونیک، آزمایشگاه‌هایی عملی مانند آزمایشگاه مایکروویو، آزمایشگاه آنتن و آزمایشگاه اپتیک نیز وجود دارند که تلاش می‌کنند مسائل را به‌صورت عملی، کاربردی و شهودی ارائه دهند. در این آزمایشگاه‌ها دانشجویان علاوه بر آشنایی با ادوات و افزاره‌های این حوزه، با دستگاه‌های اندازه‌گیری مربوط نیز آشنا می‌شوند. مدارهای مایکروویوی مانند مدار چاپی، انواع آنتن، موج‌برهای سه‌بعدی، میز اپتیکی، ... همگی کمک به یادگیری جنبه‌های عملی و ایجاد درک

۱- که بعداً با فیزیک کوانتوم تجمیع شد

2- Maxwell's equations

بصری می‌کنند. متأسفانه، در این آزمایشگاه‌ها تنها به آموزش مفاهیم درسی پرداخته شده است و طراحی و شبیه‌سازی این قطعات از دانشجویان خواسته نمی‌شود.

با توجه به این‌که پایه و اساس مسائل این حوزه نیازمند حل معادلات ماکسول برای ساختارهای مختلفی است که معمولاً پاسخی آسان و تحلیلی ندارند، نیازمند به حل با روش‌های عددی توسط رایانه‌ها هستیم. این امر موجب پیدایش نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متنوعی در ۴۰ سال اخیر شده است. در دو دهه اخیر و با پیشرفت شگرف توانایی رایانه‌ها، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی الکترومغناطیسی، پیشرفت‌های به‌سزایی داشته‌اند، و کاربرد وسیعی هم در صنعت و هم در پژوهش‌های دانشگاهی پیدا کرده‌اند، به‌گونه‌ای که به ابزارهایی جدایی‌ناپذیر از مراحل تحلیل و طراحی و پژوهش تبدیل شده‌اند. امروزه این نرم‌افزارها به ابزار اصلی کار مهندسین در این حوزه تبدیل شده‌اند. در بسیاری از کارهای صنعتی، آشنایی با نحوه طراحی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای متداول، امری ضروری است. در محیط‌های دانشگاهی و به ویژه در تحصیلات تکمیلی نیز اتکای ویژه‌ای به این نرم‌افزارها برای طراحی، اعتبارسنجی، و شبیه‌سازی قبل از ساخت نمونه می‌شود. با وجود استفاده گسترده در صنعت و دانشگاه، رویکرد فعلی به نرم‌افزارهای شبیه‌ساز در این حوزه، امری بسیار تخصصی و دور از دسترس دانشجویان مقطع کارشناسی است و بیشتر مختص تحصیلات تکمیلی و یا محیط‌های تخصصی صنعتی است. خوشبختانه با قوی‌تر شدن رایانه‌ها، این نرم‌افزارها روزبه‌روز جامع‌تر شده و پیشرفت کرده‌اند و مناسب گستره وسیع‌تری از کاربران شده‌اند.

به علت عدم‌آموزش این ابزارها در مقطع کارشناسی، بسیاری از دانش‌آموختگان کارشناسی این حوزه مجبور می‌شوند که از روش‌های غیرعلمی و غیراصولی استفاده و یا صرفاً با بهینه‌سازی، مسائل را حل می‌کنند. البته در برخی از دروس، از جمله مهندسی مایکروویو (Memarian, 2021) و میدان‌ها و امواج (Memarian, 2021) بعضاً تمرین‌هایی به دانشجویان داده می‌شود که مسئله‌ای را شبیه‌سازی کنند. اما هدف این تمرین‌ها اغلب محدود به درک مطالب خود درس است. لذا دانشجویان بخش محدودی از یکی از این نرم‌افزار را در بهترین حالت و با کیفیت‌های بسیار متفاوت می‌آموزند. در حالی که با وجود یک درس اختصاصی برای آموزش این نرم‌افزارها، فضایی که به آموزش این نرم‌افزارها در سایر دروس اختصاص می‌یافت آزاد شده و فرصت بیشتری برای پرداختن به مفاهیم اصلی خود درس، و یا آموزش و طراحی مسایل متنوع‌تر به کمک این نرم‌افزارها را، در اختیار مدرس آن دروس قرار می‌دهد. در دروس تحصیلات تکمیلی نیز، تمرکز روی یاددهی روش‌های عددی و الگوریتم‌های مربوط و در واقع چگونگی کار موتور داخلی نرم‌افزارهای شبیه‌ساز است (Jin, 2011). به عنوان مثال دانشجویان با روش اجزای محدود[1] (Reddy, 2019)، ممان[2] (Harrington, 1993) و تفاضل محدود حوزه زمان[3] (Taflove et al., 2005) آشنا می‌شوند، اما نحوه کار با نرم‌افزارها را فرا نمی‌گیرند.

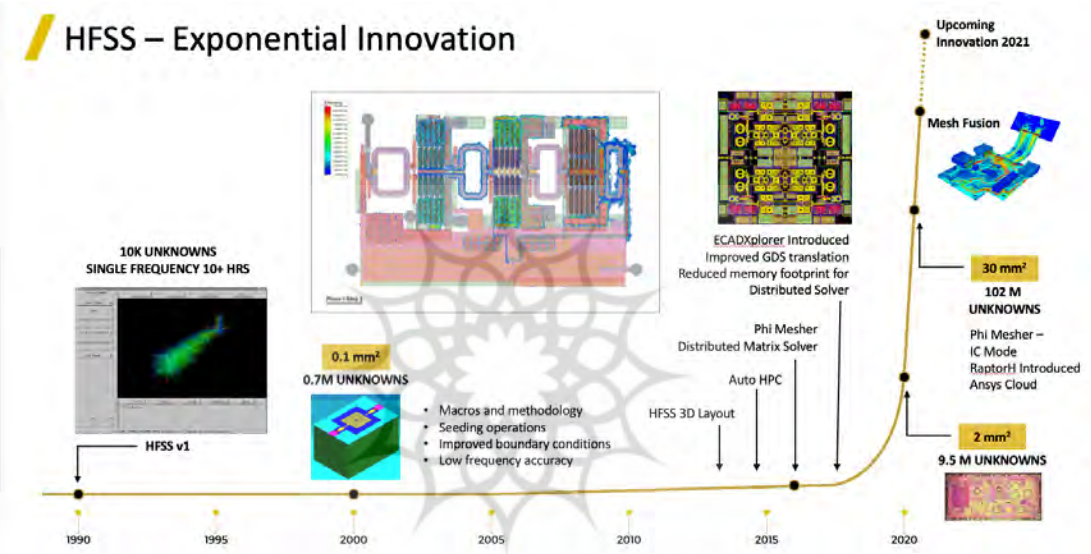
1- Finite element method (FEM) 2- Method of moment (MOM) 3- Finite difference time domain (FDTD)

امروزه به جایگاهی رسیده‌ایم که بسیاری از مهندسین و متخصصین لزوماً نیازی ندارند تمامی جزئیات الگوریتم‌های پشت سر یک ابزار را بدانند، همان‌طور که یک مهندس برق شاید دقیق نمی‌داند که یک اسیلوسکوپ دقیقاً چه‌طور کار می‌کند، ولی به‌طور علمی و صحیح اندازه‌گیری را به‌وسیله آن انجام می‌دهد. در گذشته که قدرت پردازش رایانه‌ها پایین‌تر بود و نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نیز محدودتر بودند، استفاده از این نرم‌افزارها متداول نبود و حوزه محدودتری از متخصصین با آن‌ها کار می‌کردند. اما هم‌اکنون سال‌هاست که نرم‌افزارهای شبیه‌ساز در این حوزه پیشرفت‌های زیادی داشته‌اند و به اندازه نرم‌افزارهایی همانند Spice که در شاخه الکترونیک آموزش داده می‌شود، قابل‌دسترس‌اند.

به عنوان مثال نرم‌افزار COMSOL یک مجموعه جامع برای تحلیل انواع مسائل در مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین و فیزیک کوانتوم است. این نرم‌افزار از سال ۱۹۹۸ وارد بازار شده و نسخه‌های جدیدتر آن، قابلیت‌های چشمگیری پیدا کرده است (COMSOL, 2021). با پیشرفت رایانه‌ها، مسائل پیچیده‌تری با این نرم‌افزار قابل‌حل شده‌اند و با افزایش قابلیت نرم‌افزار، تنوع مسائل قابل‌حل چندین برابر شده‌اند. با بهبود کارایی این نرم‌افزارها، تعداد کاربران آن‌ها نیز افزایش یافته است. برای مثال، نرم‌افزار Lumerical یک نرم‌افزار شبیه‌ساز مسائل الکترومغناطیس است که از سال ۲۰۰۳ وارد بازار شده و قابلیت‌های مختلفی برای حل مدارهای نوری، در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Lumerical, 2021). شکل ۱ تعداد مقالاتی را نشان می دهد که از سال ۲۰۰۴ تا سال ۲۰۱۹، به‌طور مستقیم به استفاده از این نرم‌افزار اشاره کرده‌اند. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از این نرم‌افزار در کارهای پژوهشی هر سال افزایش داشته‌است.

شکل ۱. تعداد مقالاتی که از نرم‌افزار Lumerical برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند (Lumerical, 2021).

HFSS[1] یک نرم‌افزار شبیه‌سازی ساختارهای موج‌بری و تشعشعی تمام‌موج است که در سال ۱۹۹۰ وارد بازار شد. شکل ۲ نمودار پیشرفت‌های این نرم‌افزار در گذر زمان و افزایش قدرت محاسباتی آن را نشان می‌دهد. به عنوان مثال شبیه‌سازی یک مبدل کابل کواکسیال به موج‌بر در یک نقطه فرکانسی در سال ورود نرم‌افزار به بازار حدود ۱۰ ساعت طول می‌کشید. درحالی‌که همین شبیه‌سازی در یک بازه فرکانسی را اکنون می‌توان زیر ۳۰ ثانیه انجام داد (Nenni, 2021).



شکل ۲. پیشرفت امکانات نرم‌افزار HFSS در طول زمان (Peterson, 2021)

تعدادی از نرم‌افزارهای مشهور در حوزه الکترومغناطیس، به همراه برخی ویژگی‌های کلیدی آنها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. هر کدام از این نرم‌افزارها از یک یا چند نوع روش عددی استفاده کرده و در یک یا چند دسته از مسائل کارایی بیشتری دارند. امروزه با حضور چنین نرم‌افزارهای متنوع شبیه‌سازی، به همراه قدرت بالای پردازش رایانه‌ها، تنوع و قابلیت‌های فراوانی در اختیار کاربران قرار گرفته است، به‌طوری که پژوهشگران و مهندسین در دانشگاه و صنعت دیگر به‌جای پیاده‌سازی روش‌های عددی و برنامه‌نویسی (مگر در موارد خاص)، عموماً به استفاده از این نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آماده روی آورده‌اند.

1- High frequency structure simulator

جدول ۱. برخی نرم‌افزارهای متداول در زمینه شبیه‌سازی مسائل الکترومغناطیسی

نرم‌افزار	روش حل	قابلیت‌ها	کاربرد	ارزش یادگیری نسبت به درجه سختی و جامعیت
ADS	MOM, FEM	تحلیل DC، تحلیل AC، تحلیل حالت گذرا، تحلیل پارامتر پراکندگی، تیونینگ، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی مداری و تمام‌موج	آنتن و مدارات مایکروویو و RF، مدارات مخابراتی، تقویت‌کننده توان، فیلترهای دیجیتال و آنالوگ	زیاد
AWAS[1]	MOM	تحلیل آنتن‌های سیمی و پراکنده‌سازها	طراحی انواع آنتن مانند آنتن‌های تک‌قطبی، دوقطبی و آنتن تلویزیون	کم
AWR	MOM, FEM	شبیه‌سازی مداری و تمام‌موج، سنتز، بهینه‌سازی	مدارات مایکروویو و RF، مدارات فرکانس بالا مانند تقویت‌کننده‌ها، نوسان‌سازها و میکسرها	کم
COMSOL	FEM	شبیه‌سازی تمام‌موج در ۱ یا ۲ یا ۳ بعد، شبیه‌سازی چند فیزیک مختلف در کنار یکدیگر	انواع مسائل الکتروستاتیک، ساختارهای موج‌بری نوری، مسائل نور هندسی، انواع عدسی‌ها، ادوات نوری مانند صفحات موج و...، ساختارهای متناوب نوری، تزویج‌کننده‌های نوری، رزوناتورهای نوری	بسیار زیاد
CST	FEM	تحلیل فرکانس بالا، تحلیل فرکانس پایین، تحلیل دینامیک ذره، تحلیل سازگاری الکترومغناطیسی	انواع آنتن مسطح و غیرمسطح، ساختارهای متناوب و فراماده، مسائل الکتروستاتیک، فیلترها، رزوناتورها، انواع موج‌برها	زیاد
FEKO	MOM	تحلیل ساختارها آرایه‌ای بزرگ، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی تمام‌موج سه‌بعدی	انواع آنتن سیمی، مایکرواستریپ، پنجره‌ای، آرایه آنتنی بزرگ، ساختارهای متناوب، انواع کانکتورها، سازه‌های الکتریکی بزرگ	متوسط
HFSS	FEM	تحلیل مقدار ویژه، تحلیل مودی، سوییپ پارامترها و ذخیره میدان‌های الکترومغناطیسی، امکان مشاهده پویانمایی میدان‌ها	آنتن و مدارات فرکانس بالا، ساختارهای موج‌بری غیرمسطح و کواکسیالی، فیلترهای موج‌بری، آرایه آنتن	بسیار زیاد
Lumerical	FDTD	شبیه‌سازی تمام‌موج در ۲ یا ۳ بعد، امکان مشاهده پویانمایی حرکت موج در ساختار	موج‌برهای نوری، انواع رزوناتور نوری، ساختارهای فوتونیک کریستال، توری‌های پراش، مدارات مجتمع نوری	زیاد
NEC[2]	MOM, MFIE[3]	تحلیل آنتن‌های سیمی و سطحی	طراحی آنتن مخصوصاً آنتن رادیو و تلویزیون	کم
Sonnet	MOM	شبیه‌سازی تمام موج، بهینه‌سازی ساختار، سوییپ پارامترها	آنتن مدار مجتمع RF و مایکروویو مسطح و سه‌بعدی، مدارات چاپی چندلایه، موج‌برهای مسطح مانند خطوط مایکرواستریپ و استریپ لاین، انواع فیلترهای مسطح	متوسط

1- Analysis of wire antennas and scatterers
2- Numerical electromagnetic code
3- Magnetic field integral equation

هم‌اکنون آموزش این نرم‌افزارها، معمولاً توسط کارشناسان و یا دانشجویان در انجمن‌های علمی دانشکده‌های مهندسی برق انجام می‌شود، و دانشجویان علاقه‌مند با پرداخت مبلغی در این دوره‌ها شرکت می‌کنند و کار با نرم‌افزار را یاد می‌گیرند. در مواردی نیز کارگاه‌هایی در این زمینه‌ها برگزار می‌شود (Work-shop, 2019). در خارج از کشور نیز کارگاه‌هایی در دانشگاه‌ها و یا در حاشیه کنفرانس‌ها توسط شرکت‌های سازنده نرم‌افزار ارائه می‌شود که قابلیت‌های نرم‌افزار را به‌صورت حضوری (COMSOL, 2018) و مجازی (Workshop, 2021) آموزش می‌دهند. یکی دیگر از راه‌های یادگیری نرم‌افزارها استفاده از خودآموزهایی است که در اینترنت قابل‌دسترسی است (ADS, 2011) (Ansys Inc., 2019). با توجه به اهمیت موضوع یادگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز در این سال‌ها و عدم‌وجود یک منبع دانشگاهی قابل استناد به زبان فارسی، یک کمبود اساسی در سطح کارشناسی در شاخه مایکروویو و فوتونیک دیده می‌شود. این کاستی نیاز به یک درس آزمایشگاهی مستقل، برای آموزش صحیح این ابزارهای شبیه‌ساز را دو چندان می‌کند.

با شیوع بیماری کرونا در اواخر سال ۱۳۹۸ و به منظور کنترل این بیماری، در تمامی مراکز آموزشی و دانشگاه‌های کشور آموزش حضوری متوقف شد و جای خود را به آموزش غیرحضوری و الکترونیکی داد (Ahmady et al., 2020). از این رو آزمایشگاه‌های عملی که قابلیت ارائه به‌صورت الکترونیکی و از راه دور را نداشتند، با چالش بزرگی مواجه شدند. با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی، تنها با دردست‌داشتن یک رایانه قابل‌انجام هستند، آموزش شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی به‌صورت مجازی، فرصت استثنایی برای جبران این خلأ آموزشی، فراهم نمود. لذا در نیمسال اول سال تحصیلی ۰۰-۹۹ برای اولین‌بار آزمایشگاهی تحت عنوان «آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس» در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف طراحی و ارائه شد. هدف از ارائه این آزمایشگاه آموزش علمی نحوهٔ استفاده از نرم‌افزارهای مطرح حوزه الکترومغناطیس بود که در صنعت و یا تحصیلات تکمیلی کاربرد به‌سزایی دارند. قابل ذکر است که با نگاهی به برنامه‌های آموزش مهندسی برق دانشگاه‌های داخل و خارج از کشور، طراحی و ارائه آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس در قالب واحد درسی مقطع کارشناسی، اقدامی نوین در آموزش مهندسی برق می‌باشد.

۲. سازوکار اجرای درس

درس «آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس» برای اولین‌بار در دانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف در نیمسال اول سال تحصیلی ۰۰-۱۳۹۹ برای دانشجویان کارشناسی ارائه شد. پس از اجرای موفق نخستین‌بار، این درس به درس اجباری چارت آموزشی شاخه اضافه شده است. در این قسمت به بررسی محتوای درس آزمایشگاه و نحوه برگزاری کلاس‌ها به‌صورت مجازی و روش ارزیابی درس پرداخته می‌شود.

۲-۱. محتوای درس

در این آزمایشگاه سه نرم‌افزار از میان نرم‌افزارهایی که در صنعت و همچنین در پژوهش‌های دانشگاهی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند انتخاب شده و به دانشجویان آموزش داده می‌شود. انتخاب نرم‌افزارها بر اساس توانایی‌هایشان، جامعیت و در نهایت برآورد کیفی ارزش یادگیری نسبت به جامعیت و درجه سختی آنها انجام شده است (جدول ۱). بر این اساس سه نرم‌افزار HFSS، ADS و COMSOL انتخاب شدند. نرم‌افزار ADS برای شبیه‌سازی مداری و تمام‌موج مدارهای مایکروویو استفاده می‌شود. نرم‌افزار HFSS برای شبیه‌سازی ساختارهای موج‌بری و لایه‌ای و آنتن‌ها در صنعت و دانشگاه بسیار پرکاربرد است. نرم‌افزار COMSOL نیز یک نرم‌افزار پرکاربرد در بسیاری از رشته‌ها از علوم تا مهندسی است و برای شبیه‌سازی تمام موج مدارهای نوری و سیلیکونی مختلف و همچنین مدارهای روی میز اپتیکی نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب با یادگیری این سه نرم‌افزار، دانشجو با جامعیت خوبی، روش‌ها و مهارت‌های لازم برای شبیه‌سازی و طراحی ادوات در کل طیف الکترومغناطیسی را می‌آموزد. این آزمایشگاه به سه بخش کلی تقسیم شده که هر بخش به آموزش یکی از این سه نرم‌افزار اختصاص یافته است. برای آموزش هر نرم‌افزار، چهار جلسه (هفته) آزمایشگاه سه ساعتی در نظر گرفته شده است. هر جلسه این آزمایشگاه، شامل یادگیری‌ها و فعالیت‌های پیش از کلاس و فعالیت‌های داخل آزمایشگاه می‌باشد. فعالیت‌های قبل از کلاس شامل خواندن دستور کار پیش آزمایشگاه، دیدن ویدیوهای آموزشی و حل مثال‌های آموزشی ویدیوها است. جلسه آزمایشگاه نیز به حل و تحویل تمرین‌ها و بحث و رفع اشکال، اختصاص یافته است.

«دستور کار» این آزمایشگاه به گونه‌ای تنظیم شده است که اکثر حوزه‌های شاخه، مانند مدارهای مایکروویو، آنتن‌ها، انواع قطعات نوری و مدار مجتمع و مسائل نور هندسی را به‌خوبی پوشش دهد. از آنجا که هدف آزمایشگاه آموزش استفاده صحیح و علمی شبیه‌سازی توسط این نرم‌افزارها است، دستور کار شامل شیوه استفاده از محیط نرم‌افزار، نحوه پیاده‌سازی مدل ساختار، اعمال فیزیک مناسب و شرایط فیزیکی مناسب (مانند شروط مرزی، جنس مواد) است. همچنین نکات ریز و درشتی که موجب می‌شود یک شبیه‌سازی بسیار دقیق و علمی و با کمترین ایرادها و حجم محاسباتی پیش برود، گوشزد شده‌اند. در طراحی مثال‌های آموزشی دستور کار آزمایشگاه تمرکز بیشتر بر قابلیت‌های کاربردی نرم‌افزار بوده است و لازم به ذکر است که محتوای این درس آزمایشگاهی، با محتوای دیگر آزمایشگاه‌هایی که در دوره کارشناسی رشته مهندسی برق ارائه می‌شود، هم‌پوشانی ندارد.

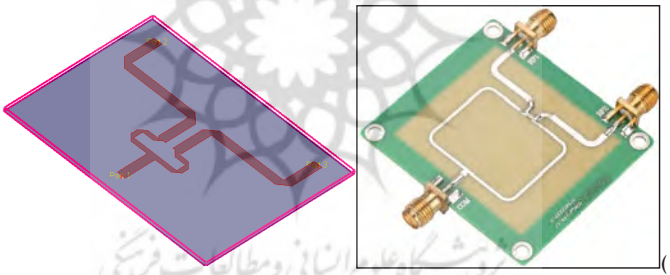
ساختار دستور کار شامل بخش‌های پیش آزمایش، مثال‌های آموزشی و قسمت تمرین‌ها می‌باشد. قسمت پیش‌آزمایش، تئوری‌های پیش‌نیاز و ابزار موردنیاز مانند راهنمای نصب نرم‌افزار را شامل می‌شود. قسمت مثال‌های آموزشی حاوی چندین مسئله است که پیش‌نیاز آنها در قسمت پیش آزمایش، توضیح داده شده است. این مثال‌ها نحوه استفاده از نرم‌افزار را آموزش می‌دهند. قسمت تمرین‌ها نیز با توجه

به مطالب دو قسمت قبل شامل یک یا دو مسئله است که تحویل بخش‌هایی از آن اجباری و تحویل بخش‌هایی نیز امتیازی است. در این تمرین‌ها از دانشجویان خواسته می‌شود یک مسئله کاربردی را شبیه‌سازی کرده و پارامترهای خواسته‌شده را به‌صورت نموداری، عددی یا جدول گزارش کنند.

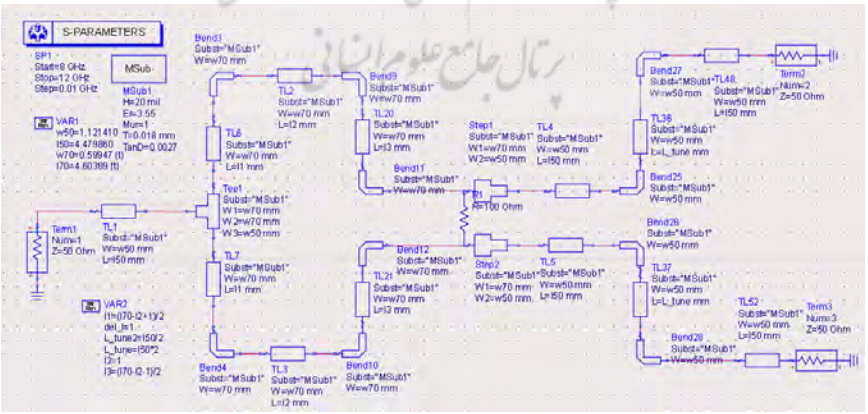
تقسیم‌کننده توان (شکل ۳)، نمونه‌ای از تمرین‌هایی است که در یکی از جلسات مربوط به نرم‌افزار ADS مورد تحلیل قرار گرفته است. نمونه ساخته‌شده این تقسیم‌کننده توان را که در شکل ۳ الف نشان داده شده، در بازار می‌توان تهیه نمود. دانشجویان در آزمایشگاه این تقسیم‌کننده توان را طراحی کرده و برای آن شبیه‌سازی مداری (شکل ۳ ب) و تمام‌موج (شکل ۳ ج) انجام می‌دهند.

از دیگر نمونه تمرین‌های قسمت دوم دستور کار آنتن شیپوری است که در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه ساخته‌شده در شکل ۴ الف و نمونه شبیه‌سازی شده در شکل ۴ ب آمده است. در آزمایشگاه این آنتن مورد تحلیل قرار می‌گیرد و الگوی تشعشعی آن مطابق شکل ۴ ج رسم می‌شود.

نمونه دیگر از مسائل قسمت سوم آزمایشگاه، شبیه‌سازی یک عدسی برای تزویج نور به فیبر نوری است که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی این مسئله فیبر نوری توسط یک مکعب مستطیل مدل شده است (شکل ۵ ب). شکل ۵ ج نیز نحوه عبور نور در این ساختار را نشان می‌دهد.

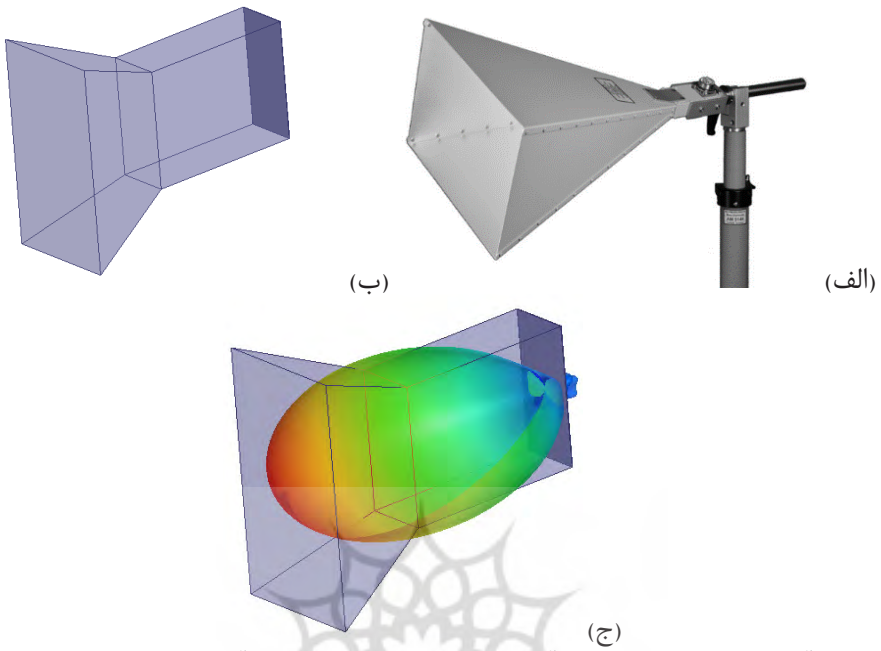


(ج) (الف)

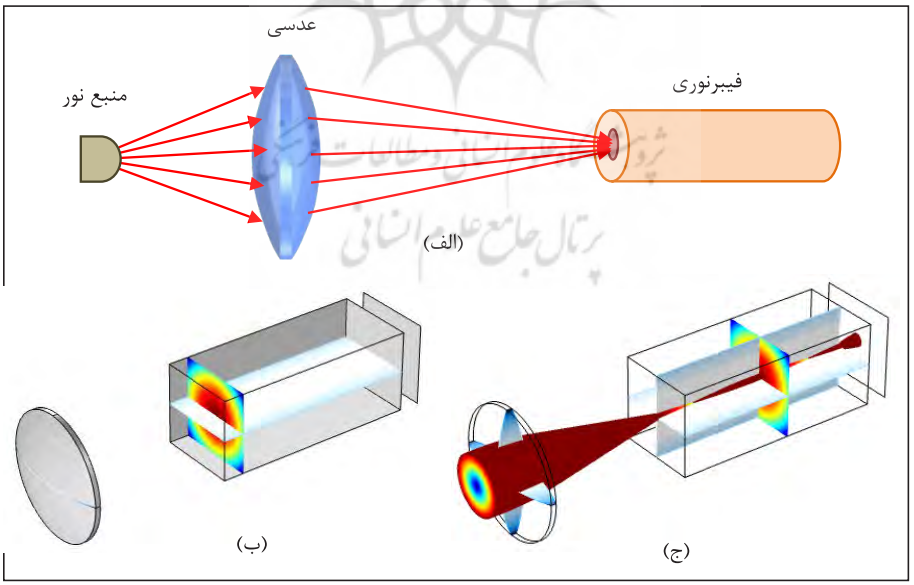


(ب)

شکل ۳. تقسیم‌کننده توان ویلکینسون. الف) یک نمونه ساخته‌شده تجاری Wal front27ugm56idq. ب) شماتیک یک نمونه تقسیم‌کننده توان ویلکینسون شبیه‌سازی‌شده در آزمایشگاه توسط نرم‌افزار ADS. ج) Layout تقسیم‌کننده توان جهت شبیه‌سازی تمام‌موج



شکل ۴. آنتن شیپوری. الف) نمونه ساخته‌شده آنتن HA 9250-48. ب) مدل‌سازی یک نمونه آنتن شیپوری به‌سازی‌شده در نرم‌افزار HFSS. ج) الگوی تشعشعی آنتن شیپوری به‌سازی‌شده.



شکل ۵. تزویج نور به فیبر نوری توسط عدسی. (الف) شیوه عملی تزویج نور به یک فیبر نوری توسط یک عدسی همگرا (ب) مدل‌سازی مسئله در نرم‌افزار COMSOL (ج) نتیجه شبیه‌سازی مسئله در نرم‌افزار

برای طراحی دستور کار آزمایشگاه و برگزاری جلسات آن و ارزیابی عملکرد دانشجویان، یک گروه آموزشی متشکل از ۵ دستیار آموزشی تشکیل شد. برای هر بخش سه دستیار موظف بودند مطالب آموزشی را آماده و سؤالات، مثال‌ها و تمرین‌ها را زیر نظر استاد درس طرح کنند. با توجه به این‌که برخی از دستیاران منتخب، دارای تجارب صنعتی و همگی دانشجویان تحصیلات تکمیلی بودند، در طرح سؤالات تمرین‌ها، پیشنهادها و تجربه‌های مفیدی داشتند که منجر به طرح سؤالات کاربردی می‌شد و به غنای درس می‌افزود. جهت هماهنگی و طراحی محتوا، تیم آموزشی جلسات هفتگی منظمی برای طرح دستور کار و تنظیم امور با استاد درس برگزار می‌کردند.

۲-۲. سازوکار ارائه درس

با توجه به توقف آموزش حضوری در ایام کرونا، ارائه این درس به‌صورت مجازی صورت گرفت. با تعطیلی آزمایشگاه‌های عملی در طول این دوره، ارائه این آزمایشگاه به دانشجویان کمک کرد که برای اولین‌بار، آنچه در سایر دروس خوانده‌اند را به‌طور مجازی تجربه کنند و کمبود عدم‌دسترسی به وسایل اندازه‌گیری و آزمایشگاه‌های عملی تا حدودی جبران شود. به منظور کارآمد بودن تدریس مجازی در جلسات آزمایشگاه روش‌های متنوعی به کار گرفته شده و سعی شد با نظرسنجی‌های مختلف در طول نیمسال، میزان یادگیری و رضایت دانشجویان سنجیده شود و با توجه به بازخوردهای کسب‌شده، شیوه تدریس متناسب با آن بهبود یابد.

فایل پیش‌آزمایش یک هفته قبل از هر جلسه در اختیار دانشجویان قرار می‌گرفت تا از نظر تئوری به مطالب آن جلسه تسلط پیدا کنند. در چند جلسه اول، در ابتدای جلسه برخی مثال‌های آموزشی توسط دستیار حل می‌شد و دانشجویان به همراه دستیار این مراحل را دنبال کرده و سؤال‌های خود را می‌پرسیدند. سپس با استفاده از تمرین‌های تحویلی میزان یادگیری دانشجویان ارزیابی می‌شد. در انتهای برخی از جلسات آزمایشگاه نیز یک تمرین امتیازی، برای دانشجویان با علاقه‌مندی بیشتر، در نظر گرفته می‌شد.

طبق مشاهدات تیم آموزشی و نظرسنجی از دانشجویان، پس از گذشت چند جلسه مشخص شد که یاددهی مثال‌های آموزشی در ابتدای کلاس زمان‌بر است. لذا از جلسه چهارم به بعد، برای هر جلسه ویدیوهای آموزشی (در حد یک تا یک ساعت و نیم)، که شامل مثال‌های آموزشی بودند، تهیه شد. این ویدیوها یک هفته قبل از کلاس به همراه فایل پیش‌آزمایش در اختیار دانشجویان قرار می‌گرفت و دانشجویان موظف بودند آن ویدیوها را قبل از جلسه مشاهده کنند و در ابتدای هر جلسه چند دقیقه‌ای به رفع اشکال در مورد مثال‌های آموزشی ویدیوها اختصاص داده می‌شد. مزایای دیگر ارائه با کمک این ویدیوها، ماندگاری محتوای آموزشی، امکان دسترسی مکرر، بازنگری قسمت‌های موردنیاز و کاهش تنش دانشجویان در هنگام یادگیری بود.

۲-۳. نحوه ارزیابی درس

به منظور سنجش میزان یادگیری، دانشجویان موظف بودند قسمت تمرین‌های تحویلی را در مدت‌زمان آزمایشگاه انجام دهند. حجم تمرین‌های تحویلی هر جلسه به‌گونه‌ای بود که در مدت‌زمان سه ساعتی آزمایشگاه کاملاً قابل‌انجام باشد. تجربه تیم آموزشی نشان داد که این گونه مسائل، به‌طور متوسط در ۱٫۵ ساعت قابل حل‌اند.

هر دانشجو پس از اتمام تمرین، در یک اتاق مجازی مجزا فعالیت آن روز خود را به یک دستیار تحویل می‌داد. دستیار مربوط با پرسش تعدادی سؤال ازپیش‌تعیین‌شده و درخواست برخی نتایج و نمودارها از دانشجو، فعالیت دانشجو را مورد ارزیابی قرار می‌داد. این روش این امکان را فراهم کرد تا علاوه بر احراز هویت دانشجویان، گروه آموزشی بتواند ارزیابی دقیقی از فعالیت هر دانشجو، تسلط وی به مطالب موردنظر و اصالت کار وی، به دست آورد. نمرات فعالیت‌های جدید دانشجویان به‌طور هفتگی، به آن‌ها اعلام می‌شد تا از وضعیت عملکرد خود به‌طور مستمر آگاه شوند و در صورت نیاز میزان تلاش و آماده‌سازی خود را افزایش دهند.

در انتهای نیمسال تحصیلی، پروژه‌ای کاربردی با پوشش کامل مطالب آموزشی هر سه بخش درس، طراحی و به دانشجویان ارائه شد. در این مرحله، دانشجویان موظف به تکمیل و تحویل پروژه در قالب یک گزارش بودند. این پروژه که به نحوی همانند امتحان پایان نیمسال آزمایشگاه بود، علاوه بر جمع‌بندی مطالب درس و سنجش یادگیری دانشجویان، موقعیت مناسبی جهت تمرین نگارش گزارش علمی برای دانشجویان ایجاد می‌کرد.

۳. نظرسنجی

در طول نیمسال نظرسنجی‌هایی در مورد نحوه برگزاری کلاس، تمرین‌ها و مطالب آموزشی و شیوه ارائه درس انجام می‌گرفت که به بهبود کیفیت ارائه درس کمک شایانی نمود. در انتهای نیمسال، نیز نظرسنجی نهایی (به‌صورت ناشناس) از دانشجویان صورت گرفت که نتایج آن در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد. جامعه آماری این نظرسنجی ۱۵ نفر دانشجوی ثبت‌نامی در این درس است و همه این ۱۵ نفر در نظرسنجی شرکت داشتند. جهت شرکت تمامی دانشجویان در نظرسنجی نهایی، این نظرسنجی به‌عنوان یکی از فعالیت‌های الزامی درس، قبل از اعلام نمرات نهایی، در نظر گرفته شد.

۱-۳. محتوای نظرسنجی

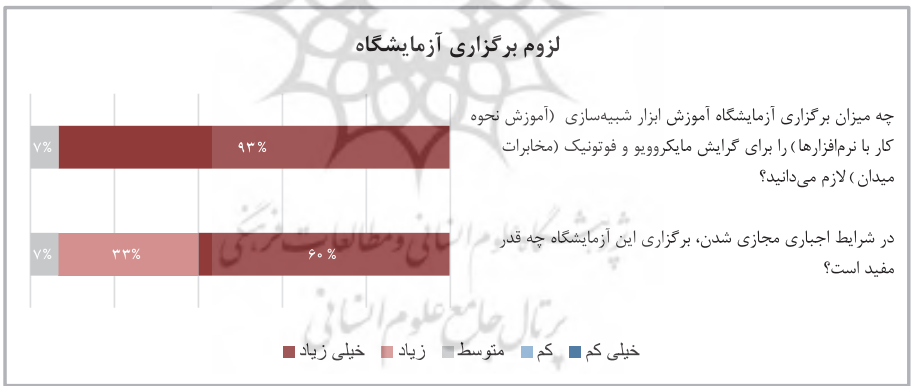
پرسش‌نامه‌ای که برای این نظرسنجی تهیه شد، شامل ۵۰ سؤال در ۵ قسمت است که محورهای زیر

را مورد پرسش قرار می‌دهد:

- ضرورت، مؤثر بودن و امکان‌پذیری برگزاری آزمایشگاه به‌ویژه در شرایط آموزش مجازی
- بررسی محتوا از نظر به‌روز بودن، جامع بودن، کاربردی بودن در صنعت، پژوهش و ورود به تحصیلات تکمیلی
- سنجش میزان علاقه‌مندی دانشجویان به شاخه و آزمایشگاه و میزان شهود آن‌ها نسبت به مسائل تئوری
- مؤثر بودن/ نبودن نحوه ارائه آزمایشگاه و کیفیت تدریس و سنجش یادگیری

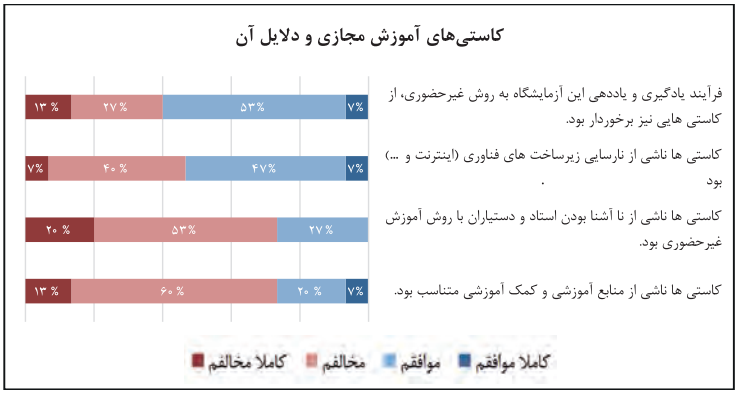
۳-۲. بررسی نتایج نظرسنجی

در قسمت اول نظرسنجی از دانشجویان سؤالاتی در مورد لزوم وجود این آزمایشگاه در دروس کارشناسی مهندسی برق و به‌خصوص ایام همه‌گیری کرونا و مشکلات احتمالی در آموزش برخط پرسیده شد. برای مثال پاسخ دانشجویان به دو سؤال مربوط به این موارد، در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. میزان مفید بودن ارائه آزمایشگاه در دوره کارشناسی و به‌خصوص در دوران کرونا

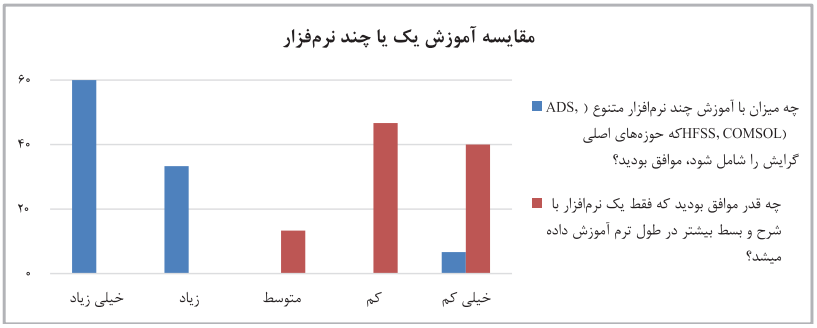
نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشتر از ۹۰٪ دانشجویان وجود این آزمایشگاه در دوره کارشناسی را ضروری می‌دانستند. در کنار نظر دانشجویان، لازم به ذکر است که اساتید شاخه مایکروویو و فوتونیک نیز به اتفاق آرا اضافه نمودن این درس به دروس اصلی شاخه را نیز تصویب نمودند. همچنین از نظر اکثر دانشجویان، برگزاری این آزمایشگاه در دوران کرونا بسیار مفید بوده است.



شکل ۷. کاستی‌های آموزش مجازی آزمایشگاه

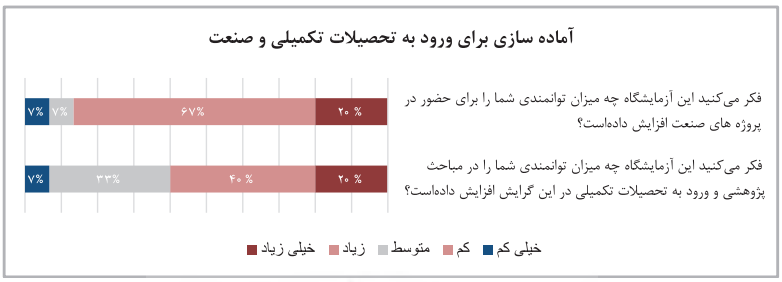
در مورد کاستی‌ها به علت آموزش مجازی، سؤالاتی در نظرسنجی گنجانده شد که نتایج آن در شکل ۷ آورده شده است. عمده کاستی‌ها از نظر دانشجویان، به دشواری و نارسایی در آموزش غیرحضوری و همچنین نارسایی‌های ناشی از زیرساخت‌های فناوری، من‌جمله ارتباط اینترنتی یا رایانه بوده است.

محور دوم سؤال‌های نظرسنجی در مورد محتوای آزمایشگاه بود. برای مثال در مورد جامع بودن مطالب نتایج دو سؤال از بخش دوم نظرسنجی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌کنیم که بیش از ۹۰٪ دانشجویان با آموزش چندین نرم‌افزار متفاوت، به میزان "خیلی زیاد" و "زیاد" موافق بوده‌اند و همین‌طور بیش از ۸۰٪ درصد دانشجویان در پاسخ به سؤال آموزش یک نرم‌افزار گزینه‌های "خیلی کم" و "کم" را انتخاب کرده‌اند، به این معنی که اکثراً مخالف آموزش تنها یک نرم‌افزار با شرح و بسط زیاد بودند. بنابراین این نمودار نشان می‌دهد که جامعیت و جذابیت تعداد نرم‌افزارهایی که در این درس آزمایشگاهی تدریس شد، از نظر دانشجویان قابل‌قبول بوده است و این بیانگر این است که احتمالاً در دروس دیگر دانشجویان با این نرم‌افزارها آشنایی کمی داشته‌اند که مشتاق آموزش این نرم‌افزارها در این آزمایشگاه بوده‌اند.



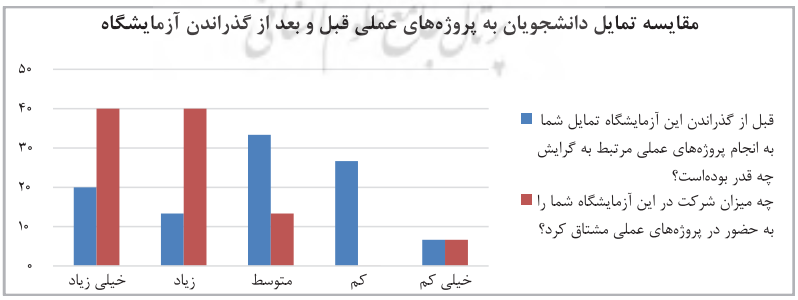
شکل ۸. آموزش یک نرم‌افزار یا چند نرم‌افزار

از آنجا که در طراحی این درس آزمایشگاهی، مرتبط بودن محتوای آموزشی با فعالیت در صنعت یا ادامه تحصیل مدنظر بود، برداشت دانشجویان دراین‌رابطه با پرسش دو سؤال سنجیده شد که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در هر دو سؤال بیشتر از ۸۰٪ دانشجویان گزینه‌های خیلی زیاد، زیاد و متوسط را انتخاب کرده‌اند.



شکل ۹. میزان توانمندی دانشجویان در مسائل صنعت و تحصیلات تکمیلی

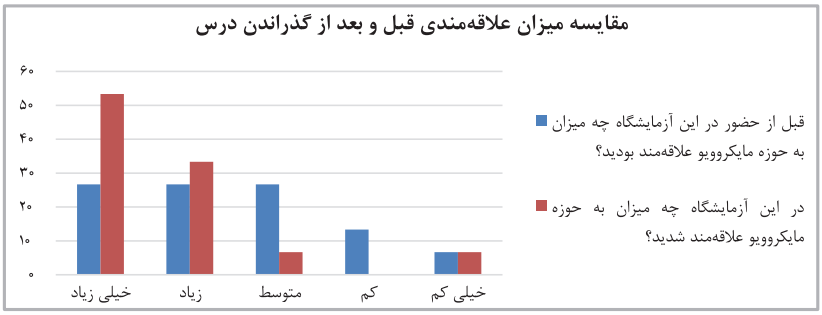
همچنین طراحی دستور کار آزمایشگاه به‌گونه‌ای بود که آشنایی و میزان علاقه‌مندی دانشجویان به انجام پروژه‌های کاربردی و عملی را افزایش دهد. برداشت دانشجویان در این رابطه نیز مورد سؤال قرار گرفتند که نتایج سؤال‌های ۵ و ۷ از قسمت دوم نظرسنجی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها ۳۳٪ از دانشجویان قبل از گذراندن درس آزمایشگاه تمایل خیلی زیاد و زیاد به انجام پروژه‌های عملی داشته‌اند اما بعد از گذراندن این درس، تمایل دانشجویان به شرکت در پروژه‌های کاربردی و عملی بیشتر شده است، به‌طوری‌که ۸۰٪ از دانشجویان گزینه "خیلی زیاد" و "زیاد" را انتخاب کرده‌اند. بنابراین ارائه این آزمایشگاه علاقه‌مندی دانشجویان به شرکت در پروژه‌های عملی و کاربردی را افزایش داده است.



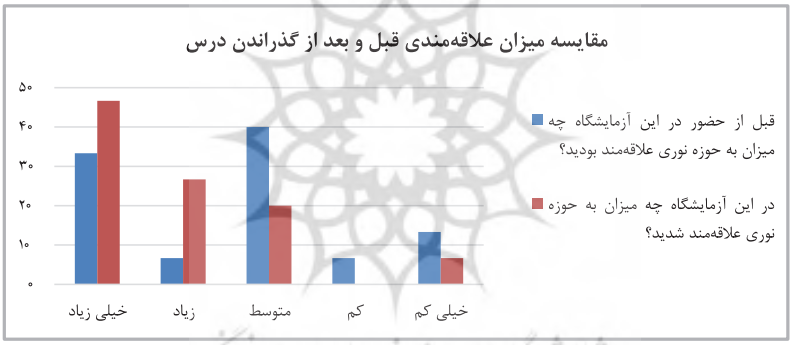
شکل ۱۰. میزان تمایل دانشجویان به انجام پروژه‌های عملی

محور سوم نظرسنجی بررسی میزان علاقه دانشجویان به دروس شاخه مایکروویو و فوتونیک است که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ برخی نتایج مربوط به این قسمت نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که

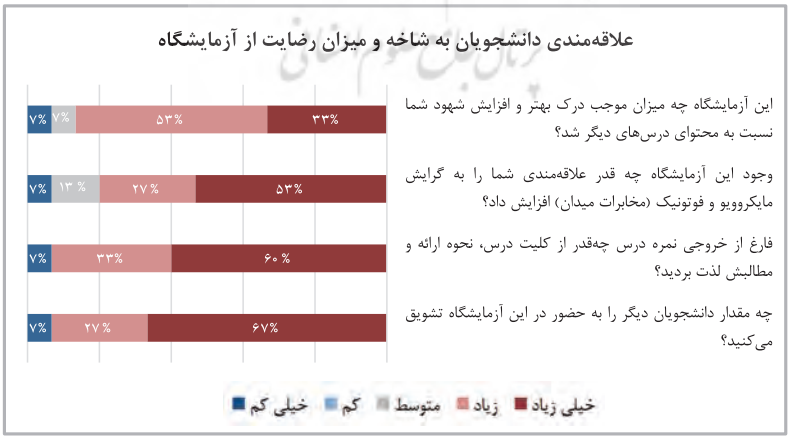
این آزمایشگاه علاقه دانشجویان به این دو حوزه را افزایش داده است. در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که بیش از ۹۰٪ دانشجویان، سایر دانشجویان را به شرکت در این آزمایشگاه تشویق می‌کنند، که این نشان می‌دهد دانشجویان با ارائه این درس موافق بوده‌اند.



شکل ۱۱. میزان علاقه‌مندی دانشجویان به حوزه مایکروویو و تأثیر گذراندن آزمایشگاه

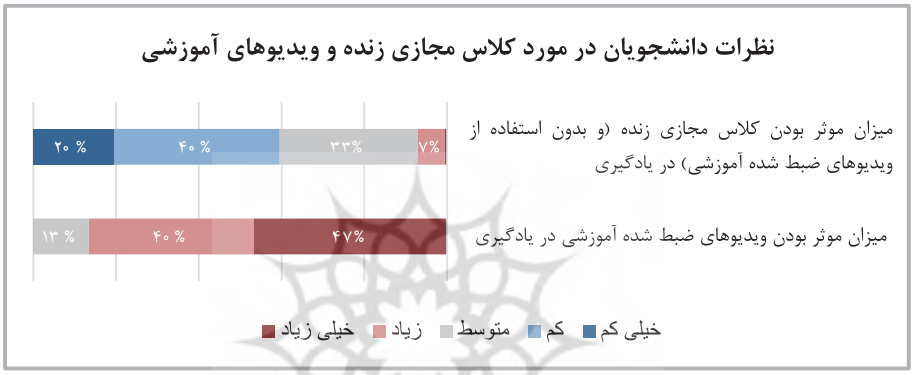


شکل ۱۲. میزان علاقه‌مندی دانشجویان به حوزه نوری و تأثیر گذراندن آزمایشگاه



شکل ۱۳. سنجش علاقه‌مندی دانشجویان به شاخه، میزان رضایتمندی آنها از آزمایشگاه، و تأثیر آزمایشگاه در افزایش علاقه به شاخه

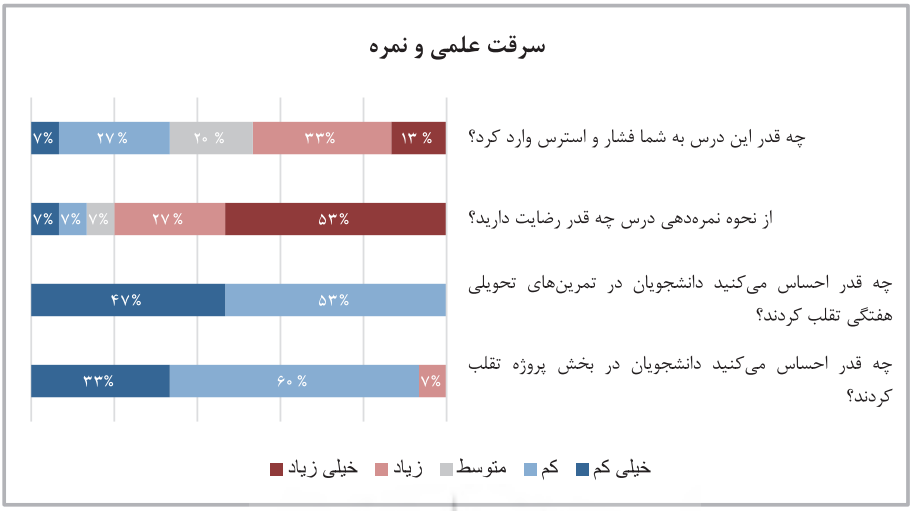
محور دیگر سؤالات نظرسنجی، پرسش در مورد نحوه ارائه درس و مسائلی از جمله شیوه آموزش، شیوه ارزیابی، تناسب حجم تمرین‌ها و زمان آزمایشگاه و میزان رضایت دانشجویان از وجود تمرین‌های امتیازی و پروژه بود. برای مثال نظر دانشجویان در مورد برگزاری کلاس مجازی زنده در مقابل ویدیوهای آموزشی در شکل ۱۴ نشان داده شده است که نشان می‌دهد بیش از ۸۰٪ دانشجویان با ارائه ویدیوهای آموزشی موافق بوده‌اند و گزینه‌های زیاد و خیلی زیاد را انتخاب کرده‌اند و زیر ۱۰٪ با ارائه مجازی زنده موافق بوده‌اند.



شکل ۱۴. مقایسه کلاس مجازی زنده و ویدیوهای آموزشی

نظر دانشجویان در مورد نحوه ارزیابی درس و فرایند نمره‌دهی در شکل ۱۵ آورده شده است. باتوجه‌به این نمودار، هیچ‌کدام از دانشجویان در پاسخ به سؤال میزان سرقت علمی در تمرین‌های تحویلی گزینه‌های «خیلی زیاد»، «زیاد» و «متوسط» را انتخاب نکرده‌اند و این نشان می‌دهد که نحوه تحویل تمرین‌ها در جلسات آزمایشگاه تخلف جهت سرقت علمی را کاهش داده است. اما در تحویل پروژه باتوجه‌به این که دانشجویان موظف بودند در زمان مشخصی مسئله‌ای را در خانه حل کنند، زیر ۱۰٪ دانشجویان در پاسخ به سؤال مربوط گزینه «زیاد» را انتخاب کرده‌اند. به همین ترتیب از میزان تنش و فشاری که در طول این درس به دانشجویان وارد شده است، پرسیده شد که بیشتر از ۵۰٪ دانشجویان گزینه‌های «خیلی زیاد»، «زیاد» و «متوسط» را انتخاب کرده‌اند.

دلیل اصلی احتمالی این نتیجه این است که بیشتر حجم فعالیت‌ها در این درس در خود جلسه آزمایشگاه است، و دانشجویان در هر جلسه با سؤالات و تمرین‌هایی مواجه می‌شوند که قبلاً ندیده‌اند و در جلسه باید روی آن فکر کرده و مسئله را حل کنند، گویی که در هر جلسه از دانشجویان یک آزمون گرفته می‌شود که طبیعتاً مقداری استرس به دانشجویان وارد می‌کند.



شکل ۱۵. نظرات دانشجویان در مورد سرقت علمی و نمره

۴. دستاوردها و چالش‌های درس

۴-۱. دستاوردها

طراحی و اجرای این درس آزمایشگاهی دستاوردهایی را به همراه داشت که عمده‌ترین آن‌ها را در ادامه مرور می‌کنیم:

۱. **آشنایی دانشجویان با ابزار موردنیاز برای کار در صنعت و ورود به مقاطع بالاتر تحصیلی:** با توجه به این‌که در این آزمایشگاه سه نرم‌افزار مختلف در سه کاربرد مدارهای مایکروویو، ساختارهای تشعشعی و ادوات نوری آموزش داده می‌شود، آزمایشگاه از جامعیت کافی برخوردار است. نتایج نظرسنجی شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که دانشجویان از آموزش سه نرم‌افزار راضی بوده‌اند. همین‌طور دانشجویان با گذراندن این آزمایشگاه برای ورود به مقاطع تحصیلی بالاتر آمادگی بیشتری پیدا می‌کنند. نتایج نظرسنجی شکل ۹ نیز این دستاورد را تأیید می‌کند. با توجه به این‌که دستیاران آزمایشگاه دانشجویان تحصیلات تکمیلی بودند، که برخی با فعالیت‌های صنعت نیز آشنا بودند، طراحی مسائل آزمایشگاه به‌گونه‌ای انجام شده است که دانشجویان را برای ورود به بازار کار و فعالیت‌های صنعت آماده می‌کند.

۲. **افزایش علاقه‌مندی دانشجویان به پروژه‌های عملی:** با توجه به این‌که در این آزمایشگاه دانشجویان دسته‌های متنوعی از مسائل عملی مرتبط با شاخه مایکروویو و فوتونیک را شبیه‌سازی می‌کنند، درک و شهود بالاتری نسبت به تئوری دیگر دروس پیدا کرده و به پروژه‌های عملی علاقه‌مند می‌شوند. نتایج نظرسنجی در شکل ۱۰ این دستاورد را تأیید می‌کند.

۳. **افزایش علاقه‌مندی دانشجویان به شاخه مایکروویو و فوتونیک:** با توجه به این‌که مطالب درسی این شاخه در اکثر موارد محاسبات پیچیده‌ای دارند و دانشجویان شهود کافی از مسائل پیدا نمی‌کنند، میزان علاقه‌مندی دانشجویان نیز به این شاخه کمتر از دیگر شاخه‌های مهندسی برق است. بعد از ارائه این درس نظرسنجی آخر نیمسال نشان می‌دهد که میزان علاقه‌مندی دانشجویان به این شاخه بیشتر شده است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

۴. **نحوه ارائه مؤثر:** با توجه‌ب ه این‌که در هر جلسه ویدیوهایی مرتبط با آزمایش همان هفته ارائه می‌شود، دانشجویان می‌توانند در زمان مناسبی خارج از وقت آزمایشگاه ویدیوها را مشاهده کرده و آمادگی لازم برای حضور در جلسه را کسب کنند. نظرسنجی از دانشجویان نیز نشان می‌دهد که این نحوه ارائه (کلاس معکوس) بهتر از ارائه مجازی زنده است که دستیار سر کلاس نرم‌افزار را آموزش می‌دهد (شکل ۱۴).

۵. **کاهش سرقت علمی با نحوه تحویل مناسب:** با توجه به این‌که برای ارزیابی دانشجویان هرکدام به یکی از دستیاران مراجعه در یک اتاق مجازی مجزا مراجعه می‌کرد و دستیار نیز سؤال‌های متنوعی را در مورد مراحل انجام شبیه‌سازی از دانشجو می‌پرسید، دانشجویان احراز هویت شده و امکان سرقت علمی نیز بسیار کم بود و در صورتی که فردی تخلف کند، به راحتی دستیاران تشخیص می‌دهند. نتایج نظرسنجی نیز این امر را تأیید می‌کند (شکل ۱۵).

۴-۲. چالش‌ها

یکی از چالش‌های ارائه این آزمایشگاه برگزاری جلسات به‌صورت مجازی بود، زیرا مستلزم این بود که هر دانشجو به یک رایانه شخصی برای استفاده از نرم‌افزارها دسترسی داشته باشد. علاوه بر این، چالشی دیگر برخورداری از اتصال اینترنت برای ارتباط هر دانشجو با کلاس مجازی و خصوصاً داشتن ارتباط باثبات به هنگام تحویل فعالیت‌ها به دستیاران، در بازه زمانی محدود بود. به علت استقبال دانشجویان، آزمایشگاه با تعداد دانشجویانی بیشتر از عرف برگزار شد که نیازمند نیروی دستیاری متناسب داشت. چالش دیگر این است که ممکن است همیشه همه دانشجویان به همه قسمت‌های آزمایشگاه علاقه‌مند نباشند.

۵. آینده درس

این درس در برنامه جدید کارشناسی مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف به عنوان یکی از آزمایشگاه‌های اصلی شاخه مایکروویو و فوتونیک گنجانده شده است. با یک دوره ارائه موفق در سال ۱۳۹۹، این آزمایشگاه مجدداً در نیمسال اول سال تحصیلی ۰۱-۱۴۰۰ به‌صورت مجازی در حال ارائه است. با تکیه بر محتوای تولیدشده، از جمله ویدیوهای آموزشی، دستیاران در آینده می‌توانند به

اعمال تغییرات جزئی در محتوا و مثال‌های آموزشی، رفع ایرادهای موجود و خصوصاً طراحی سؤالات جدید و به‌روز، جهت تکراری نشدن و جلوگیری از سرقت علمی، بپردازند. در شرایط آموزش حضوری، این آزمایشگاه می‌تواند به‌صورت حضوری و یا مجازی ارائه شود. ارائه حضوری می‌تواند در وبگاه‌های رایانه دانشکده و تجهیز این رایانه‌ها با نرم‌افزارهای موردنظر انجام شود. مسلماً آموزش حضوری و ارتباط مستقیم مدرسین و دانشجویان می‌تواند بر غنا و جذابیت درس بیفزاید. در مورد آینده محتوای درس، در سال‌های آینده و بر حسب تغییرات جهانی در این حوزه، می‌توان نرم‌افزارها را تغییر داد و در صورت نیاز از نرم‌افزار دیگری استفاده کرد.

۶. نتیجه‌گیری

امروزه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی الکترومغناطیس به ابزار لاینفکی برای مهندسین و پژوهشگران حوزه مایکروویو و فوتونیک تبدیل شده‌اند. این در حالی است که در برنامه آموزش کارشناسی مهندسی برق خلأ اساسی به علت عدم‌آموزش این ابزار وجود دارد. ارائه آزمایشگاه شبیه‌سازی در الکترومغناطیس، با آموزش سه نرم‌افزار مطرح در این حوزه، به این نیاز اساسی پاسخ می‌دهد. ارائه این آزمایشگاه موجب افزایش انگیزه و اشتیاق دانشجویان به شاخه، آماده‌سازی بهتر آنها برای بازار کار و یا ادامه تحصیل، بالابردن شهود و به‌روز کردن دانش دانشجویان در این حوزه می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از جناب آقای دکتر بهزاد رجایی که در مراحل مختلف پیدایش این آزمایشگاه، از جمله تعیین محتوا، راهنمایی‌های ارزنده‌ای داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارند. همین‌طور از جناب آقای دکتر حسین معماریان که در ویرایش و نوشتار مقاله راهنمایی‌های ارزشمندی داشتند، قدردانی می‌نمایند. از دستیاران آزمایشگاه در نیمسال اول سال تحصیلی ۰۰-۱۳۹۹، خانم مهندس آزاد، خانم مهندس سیدرضایی، آقای مهندس جهانبخت و آقای مهندس رحمان‌زاده که همگی در تهیه دستور کار آزمایشگاه و سایر وظایف همکاری فعال داشتند بسیار سپاسگزاریم.

References

- ADS Quick Start. (2011). Retrieved from http://edadownload.software.keysight.com/eedl/ads/2011/pdf/adstour.pdf
- Ahmady, S., Shahbazi, S., & Heidari, M. (2020). Transition to virtual learning during the coronavirus disease--2019 Crisis in Iran: Opportunity or challenge? Disaster Medicine and Public Health Preparedness , e11--e12.
- Ansys Inc. (2019). HFSS help
- Cheng, D. K. (1989). Field and wave electromagnetics Pearson Education India.
- COMSOL Conference Boston, United States October 3-5, 2018.

- COMSOL Multipysics. (2021). Release history. (Lumerical Inc.) Retrieved November 10, 2021, from https://www.comsol.com/: https://www.comsol.jp/release-history
- Harrington, R. F. (1993). Field computation by moment methods. Wiley-IEEE Press.
- Jin, J.M. (2011). Theory and computation of electromagnetic fields. John Wiley & Sons.
- Lumerical. (2021). About Lumerical. (Ansys Canada) Retrieved November 10, 2021, from https://www.lumerical.com/: https://www.lumerical.com/about-lumerical/
- Lumerical. (2021). Lumerical in the Literature. (Ansys Canada) Retrieved November 10, 2021, from https://www.lumerical.com: https://www.lumerical.com/in-the-literature/
- Memarian, M. (2021b). Fields and waves course. Tehran, Iran: Sharif University of Technology [in Persian].
- Memarian, M. (2021a). Microwave engineering course. Tehran, Iran: Sharif University of Technology [in Persian].
- Nenni, D. (2021). HFSS - A history of electromagnetic simulation innovation. Retrieved November 10, 2021, from The semiwiki: https://semiwiki.com
- Peterson, R. (2021). Innovations in high-frequency electromagnetic simulation. Retrieved November 10, 2021, from The Semiengineering: https://semiengineering.com/
- Pozar, D. M. (2011). Microwave engineering. John wiley & sons.
- Reddy, J. N. (2019). Introduction to the finite element method McGraw-Hill Education.
- Taflove, A., Hagness, S. C., & Piket-May, M. (2005). Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method. The Electrical Engineering Handbook 3.
- Workshop on fun simulation with HFSS (Tarbiat Modres University 2019) [in Persian].
- Workshop on Lumerical finite-difference-time-domain(FDTD) (on zoom April 12, 2021).

محمد معماریان: استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف. ایشان در گروه مایکروویو و فوتونیک و در حوزه‌های پژوهشی الکترومغناطیس نظری و کاربردی، اپتیک، آنتن‌ها، ادوات مایکروویو، فراماده و فراسطوح، محیط‌های متغیربازمان و شبکه‌های عصبی نوری فعالیت پژوهشی دارند.

سمیه بشگزی: دانشجوی دکتری گرایش مخابرات مایکروویو و فوتونیک رشته مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف و دانش آموخته کارشناسی ارشد از دانشگاه صنعتی شریف و کارشناسی از دانشگاه صنعتی اصفهان. علایق پژوهشی ایشان شبکه‌های عصبی نوری، مدارات مایکروویو و فوتونیک و محیط‌های الکترومغناطیسی متغیربا