

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

سمیه بَشْغَزی<sup>۱</sup> و محمد معماریان<sup>۲</sup>

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، تا کنون آزمایشگاه‌های مایکروویو، آنتن و اپتیک، دانشجویان را با جنبه‌های عملی، افزارها 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 اولین بار 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 ۱۳۹۹-۲۰۰۰ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، برای اولین بار 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 درس آموزش نحوه 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 (به خصوص در دوران شیوع همه‌گیری کووید-۱۹)، ایجاد کرد.

**واژگان کلیدی:** شاخه مایکروویو و فوتونیک، آزمایشگاه شبیه‌سازی، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی، آموزش مجازی، HFSS، COMSOL، ADS، 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، به طوری که جوانب مختلف زندگی مدرن بشر از جمله مخابرات، اینترنت، رایانه‌ها، گوشی‌های هوشمند، تصویربرداری، رادار و ... مرهون پیشرفت‌های این حوزه در دهه‌های گذشته‌اند. به طور 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<sup>۱</sup>، که با معادلات ماکسول<sup>۲</sup> 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 به طور 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 دانشجویان 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 به صورت 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 اپتیک، ... همگی کمک به یادگیری جنبه‌های عملی و ایجاد درک

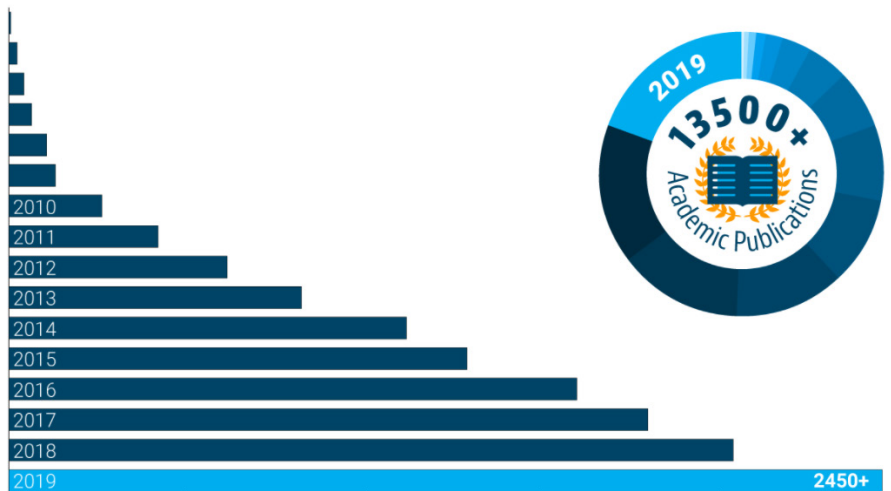
۱- که بعداً با فیزیک کوانتوم جمع شد

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 مهندسين 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 مناسب‌گستره وسیع‌تری از کاربران شده‌اند.

به علت عدم آموزش 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 نرم‌افزارها 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<sup>۱</sup> (Reddy, 2019)، ممان<sup>۲</sup> (Harrington, 1993) و تفاضل محدود حوزه زمان<sup>۳</sup> (Taflove et al., 2005) آشنا می‌شوند، اما نحوه کار با نرم‌افزارها را فرا نمی‌گیرند.

امروزه به جایگاهی رسیده‌ایم که بسیاری از مهندسين و متخصصين لزوماً نيازى 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، قابل دسترس‌اند.

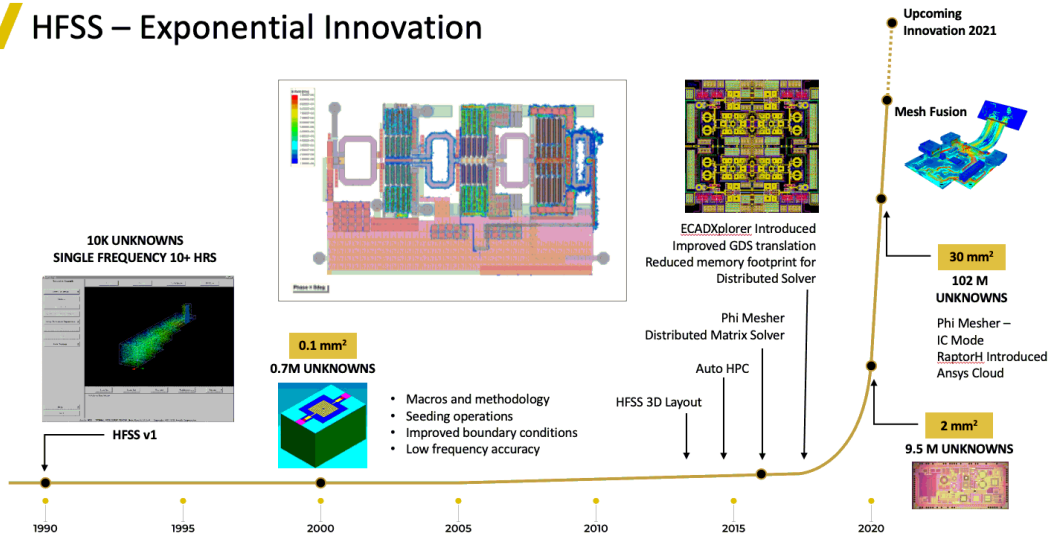
به‌عنوان مثال نرم‌افزار COMSOL یک مجموعه جامع برای تحلیل انواع مسائل در مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین و فیزیک کوانتوم است. این نرم‌افزار از سال ۱۹۹۸ وارد بازار شده و نسخه‌های جدیدتر آن، قابلیت‌های چشمگیری پیدا کرده است (COMSOL, 2021). با پیشرفت رایانه‌ها، مسائل پیچیده‌تری با این نرم‌افزار قابل حل شده‌اند و با افزایش قابلیت نرم‌افزار، تنوع مسائل قابل حل 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 می‌دهد 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 داشته است.



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

HFSS یک نرم افزار شبیه سازی ساختارهای موج بری و تشعشعی تمام موج است که در سال ۱۹۹۰ وارد بازار شد. شکل ۲ نمودار پیشرفت های این نرم افزار در گذر زمان و افزایش قدرت محاسباتی آن را نشان می دهد. به عنوان مثال شبیه سازی یک مبدل کابل کواکسیال به موج بر در یک نقطه فرکانسی در سال ورود نرم افزار به بازار حدود ۱۰ ساعت طول می کشید. درحالی که همین شبیه سازی در یک بازه فرکانسی را اکنون می توان زیر ۳۰ ثانیه انجام داد (Nenni, 2021).

## HFSS – Exponential Innovation



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

تعدادی از نرم افزارهای مشهور در حوزه الکترومغناطیس، به همراه برخی ویژگی های کلیدی آنها در جدول ۱ نشان داده شده اند. هر کدام از این نرم افزارها از یک یا چند نوع روش عددی استفاده کرده و در یک یا چند دسته از مسائل کارایی بیشتری دارند. امروزه با حضور چنین نرم افزارهای متنوع شبیه سازی، به همراه قدرت بالای پردازش رایانه ها، تنوع و قابلیت های فراوانی در اختیار کاربران قرار گرفته است، به طوری که پژوهشگران و مهندسين در دانشگاه و صنعت دیگر به جای پیاده سازی روش های عددی و برنامه نویسی (مگر در موارد خاص)، عموماً به استفاده از این نرم افزارهای شبیه سازی آماده روی آورده اند.

جدول ۱. برخی نرم افزارهای متداول در زمینه شبیه سازی مسائل الکترومغناطیسی

نرم افزار	روش حل	قابلیت ها	کاربرد	ارزش یادگیری نسبت به درجه سختی و جامعیت
ADS	MOM, FEM	تحلیل DC، تحلیل AC، تحلیل حالت گذرا، تحلیل پارامتر پراکندگی، تیونینگ، بهینه سازی، شبیه سازی مداری و تمام موج	آنتن و مدارات مایکروویو و RF، مدارات مخابراتی، تقویت کننده توان، فیلترهای دیجیتال و آنالوگ	زیاد
AWAS <sup>۱</sup>	MOM	تحلیل آنتن های سیمی و پراکنده سازها	طراحی انواع آنتن مانند آنتن های تک قطبی، دوقطبی و آنتن تلویزیون	کم
AWR	MOM, FEM	شبیه سازی مداری و تمام موج، سنتز، بهینه سازی	مدارات مایکروویو و RF، مدارات فرکانس بالا مانند تقویت کننده ها، نوسان سازها و میکسرها	کم
COMSOL	FEM	شبیه سازی تمام موج در ۱ یا ۲ یا ۳ بعد، شبیه سازی چند فیزیک مختلف در کنار یکدیگر	انواع مسائل الکتروستاتیک، ساختارهای موج بری نوری، مسائل نور هندسی، انواع عدسی ها، ادوات نوری مانند صفحات موج و ...، ساختارهای متناوب نوری، تزویج کننده های 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 فرامواد، مسائل الکتروستاتیک، فیلترها، رزوناتورها، انواع موج برها	زیاد
FEKO	MOM	تحلیل ساختارها آرایه ای بزرگ، بهینه سازی، شبیه سازی تمام موج سه بعدی	انواع آنتن سیمی، مایکرواستریپ، پنجره ای، آرایه آنتنی بزرگ، ساختارهای متناوب، انواع کانکتورها، سازه های الکتریکی بزرگ	متوسط
HFSS	FEM	تحلیل مقدار ویژه، تحلیل مودی، سویپ پارامترها و ذخیره میدان های الکترومغناطیسی، امکان مشاهده پویانمایی میدان ها	آنتن و مدارات فرکانس بالا، ساختارهای موج بری غیرمسطح و کوآکسیالی، فیلترهای موج بری، آرایه آنتن	بسیار زیاد
Lumerical	FDTD	شبیه سازی تمام موج در ۲ یا ۳ بعد، امکان مشاهده پویانمایی حرکت موج در ساختار	موج برهای نوری، انواع رزوناتور نوری، ساختارهای فوتونیک کریستال، توری های پراش، مدارات مجتمع نوری	زیاد
NEC <sup>۲</sup>	MOM, MFIE <sup>۳</sup>	تحلیل آنتن های سیمی و سطحی	طراحی آنتن مخصوصاً آنتن رادیو و تلویزیون	کم
Sonnet	MOM	شبیه سازی تمام موج، بهینه سازی ساختار، سویپ پارامترها	آنتن مدار مجتمع RF و مایکروویو مسطح و سه بعدی، مدارات چاپی چندلایه، موج برهای 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 (Workshop, 2019). در خارج از کشور نیز کارگاه‌هایی در دانشگاه‌ها و یا در حاشیه کنفرانس‌ها توسط شرکت‌های سازنده نرم‌افزار ارائه می‌شود که قابلیت‌های نرم‌افزار را به صورت حضوری (COMSOL, 2018) و مجازی (Workshop, 2021) آموزش می‌دهند. یکی دیگر از راه‌های یادگیری نرم‌افزارها استفاده از خودآموزیهایی است که در اینترنت قابل دسترسی است (ADS, 2011) (Ansys Inc., 2019). با توجه به اهمیت موضوع یادگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز در این سال‌ها و عدم وجود 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 به صورت الکترونیکی و از راه دور را نداشتند، با چالش بزرگی مواجه شدند. با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی، تنها با دردست داشتن یک رایانه قابل انجام هستند، آموزش شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی به صورت مجازی، فرصت استثنایی برای جبران این خلأ آموزشی، فراهم نمود. لذا در نیمسال اول سال تحصیلی ۹۹-۰۰ برای اولین بار 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 نحوه 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 اولین بار در دانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف در نیمسال اول سال تحصیلی ۱۳۹۹-۰۰ برای دانشجویان کارشناسی ارائه شد. پس از اجرای موفق نخستین بار، این درس به درس اجباری چارت آموزشی شاخه اضافه شده است. در این قسمت به بررسی محتوای درس آزمایشگاه و نحوه برگزاری کلاس‌ها به صورت مجازی و روش ارزیابی درس پرداخته می‌شود.

## ۲-۱. محتوای درس

در این آزمایشگاه سه نرم افزار از میان نرم افزارهایی که در صنعت و همچنین در پژوهش های دانشگاهی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند انتخاب شده و به دانشجویان آموزش داده می شود. انتخاب نرم افزارها بر اساس توانایی هایشان، جامعیت و در نهایت برآورد کیفی ارزش یادگیری نسبت به جامعیت و درجه سختی آنها انجام شده است (جدول ۱). بر این اساس سه نرم افزار ADS، HFSS و COMSOL انتخاب شدند. نرم افزار ADS برای شبیه سازی مدارای و تمام موج مدارهای میکروویو استفاده می شود. نرم افزار HFSS برای شبیه سازی ساختارهای موج بری و لایه ای و آنتن ها در صنعت و دانشگاه بسیار پرکاربرد است. نرم افزار COMSOL نیز یک نرم افزار پرکاربرد در بسیاری از رشته ها از علوم تا مهندسی است و برای شبیه سازی تمام موج مدارهای نوری و سیلیکونی مختلف و همچنین مدارهای روی میز اپتیکی نیز استفاده می شود. بدین ترتیب با یادگیری این سه نرم افزار، دانشجو با جامعیت خوبی، روش ها و مهارت های لازم برای شبیه سازی و طراحی ادوات در کل طیف الکترومغناطیسی را می آموزد. این آزمایشگاه به سه بخش کلی تقسیم شده که هر بخش به آموزش یکی از این سه نرم افزار اختصاص یافته است. برای آموزش هر نرم افزار، چهار جلسه (هفته) آزمایشگاه سه ساعته در نظر گرفته شده است. هر جلسه این آزمایشگاه، شامل یادگیری ها و فعالیت های پیش از کلاس و فعالیت های داخل آزمایشگاه می باشد. فعالیت های قبل از کلاس شامل خواندن دستور کار پیش از آزمایشگاه، دیدن ویدیوهای آموزشی و حل مثال های آموزشی ویدیوها است. جلسه آزمایشگاه نیز به حل و تحویل تمرین ها و بحث و رفع اشکال، اختصاص یافته است.

«دستور کار» این آزمایشگاه به گونه ای تنظیم شده است که اکثر حوزه های شاخه، مانند مدارهای میکروویو، آنتن ها، انواع قطعات نوری و مدار مجتمع و مسائل نور هندسی را به خوبی پوشش دهد. از آنجا که هدف آزمایشگاه آموزش استفاده صحیح و علمی شبیه سازی توسط این نرم افزارها است، دستور کار شامل شیوه استفاده از محیط نرم افزار، نحوه پیاده سازی مدل ساختار، اعمال فیزیک مناسب و شرایط فیزیکی مناسب (مانند شروط مرزی، جنس مواد) است. همچنین نکات ریز و درشتی که موجب می شود یک شبیه سازی بسیار دقیق و علمی و با کمترین ایرادها و حجم محاسباتی پیش برود، گوشزد شده اند. در طراحی مثال های آموزشی دستور کار آزمایشگاه تمرکز بیشتر بر قابلیت های کاربردی نرم افزار بوده است و لازم به ذکر است که محتوای این درس آزمایشگاهی، با محتوای دیگر آزمایشگاه هایی که در دوره کارشناسی رشته مهندسی برق ارائه می شود، هم پوشانی ندارد.

ساختار دستور کار شامل بخش های پیش از آمایش، مثال های آموزشی و قسمت تمرین ها می باشد. قسمت پیش از آمایش، تئوری های پیش نیاز و ابزار مورد نیاز مانند راهنمای نصب نرم افزار را شامل می شود. قسمت مثال های آموزشی حاوی چندین مسئله است که پیش نیاز آنها در قسمت پیش از آمایش، توضیح داده شده است. این مثال ها نحوه استفاده از نرم افزار را آموزش می دهند. قسمت تمرین ها نیز با توجه

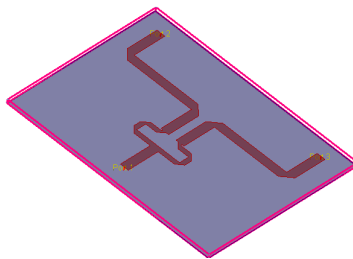


به مطالب دو قسمت قبل شامل یک یا دو مسئله است که تحویل بخش‌هایی از آن اجباری و تحویل بخش‌هایی نیز امتیازی است. در این تمرین‌ها از دانشجویان خواسته می‌شود یک مسئله کاربردی را شبیه‌سازی کرده و پارامترهای خواسته‌شده را به صورت نموداری، عددی یا جدول گزارش کنند.

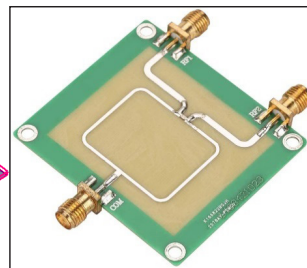
تقسیم‌کننده توان (شکل ۳)، نمونه‌ای از تمرین‌هایی است که در یکی از جلسات مربوط به نرم‌افزار ADS مورد تحلیل قرار گرفته است. نمونه ساخته‌شده این تقسیم‌کننده توان را که در شکل ۳ الف نشان داده شده، در بازار می‌توان تهیه نمود. دانشجویان در آزمایشگاه این تقسیم‌کننده توان را طراحی کرده و برای آن شبیه‌سازی مداری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

از دیگر نمونه‌های قسمت دوم دستور کار آنتن شیبوری 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.

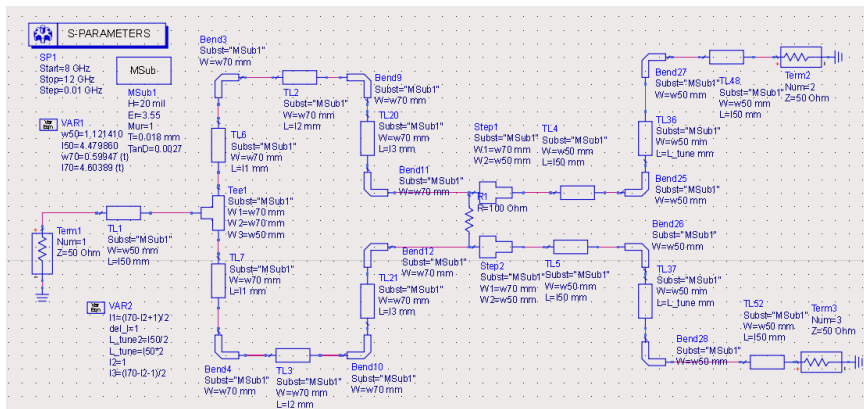
نمونه دیگر از مسائل قسمت سوم آزمایشگاه، شبیه‌سازی یک عدسی برای تزویج نور به فیبر نوری است که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی این مسئله فیبر نوری توسط یک مکعب مستطیل مدل شده است (شکل ۵ ب). شکل ۵ ج نیز نحوه عبور نور در این ساختار را نشان می‌دهد.



(ج)

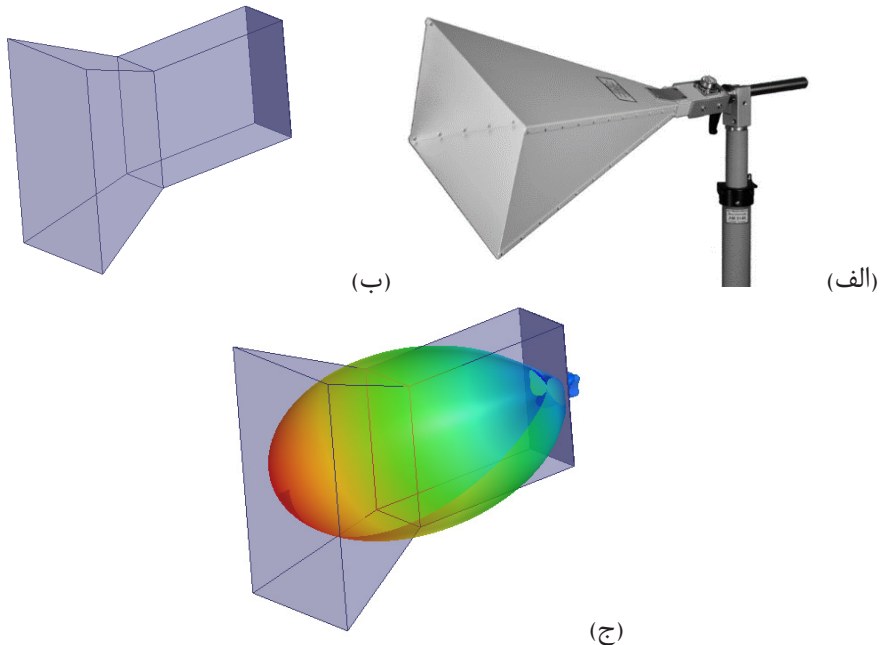


(الف)

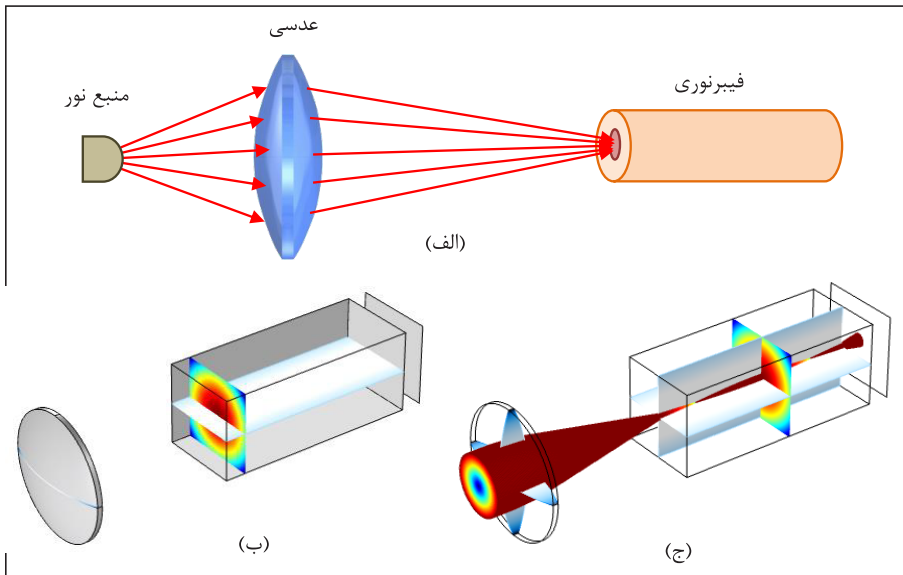


(ب)

شکل ۳. تقسیم‌کننده توان ویلکینسون. الف) یک نمونه ساخته‌شده تجاری  $Wal\ front27\ ugm56idq$ . ب) شماتیک یک نمونه تقسیم‌کننده توان ویلکینسون شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه توسط نرم‌افزار ADS. ج) Layout تقسیم‌کننده توان جهت شبیه‌سازی تمام‌موج



شکل ۴. آنتن شیپوری. الف) نمونه ساخته شده آنتن HA 9250-48. ب) مدل سازی یک نمونه آنتن شبیه سازی شده در نرم افزار HFSS. ج) الگوی تشعشعی آنتن شبیه سازی شده.



شکل ۵. تزویج نور به فیبر نوری توسط عدسی. الف) شیوه عملی تزویج نور به یک فیبر نوری توسط یک عدسی همگرا (ب) مدل سازی مسئله در نرم افزار COMSOL (ج) نتیجه شبیه سازی مسئله در نرم افزار

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، پیشنهادهای 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 به صورت مجازی صورت گرفت. با تعطیلی آزمایشگاه‌های عملی در طول این دوره، ارائه این آزمایشگاه به دانشجویان کمک کرد که برای اولین بار، آنچه در سایر دروس خوانده‌اند را به طور مجازی تجربه کنند و کمبود عدم دسترسی 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 مدت زمان آزمایشگاه انجام دهند. حجم تمرین‌های تحویلی هر جلسه به گونه‌ای بود که در مدت زمان سه ساعته آزمایشگاه کاملاً قابل انجام باشد. تجربه تیم آموزشی نشان داد که این گونه مسائل، به طور 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 از پیش تعیین شده 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 مورد نظر و اصالت کار وی، به دست آورد. نمرات فعالیت‌های جدید دانشجویان به طور هفتگی، به آن‌ها اعلام می‌شد تا از وضعیت عملکرد خود به طور 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 نظرسنجی‌هایی (به صورت 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 نظرسنجی‌هایی، این نظرسنجی به عنوان یکی از فعالیت‌های الزامی درس، قبل از اعلام نمرات نهایی، در نظر گرفته شد.

## ۳-۱. محتوای نظرسنجی

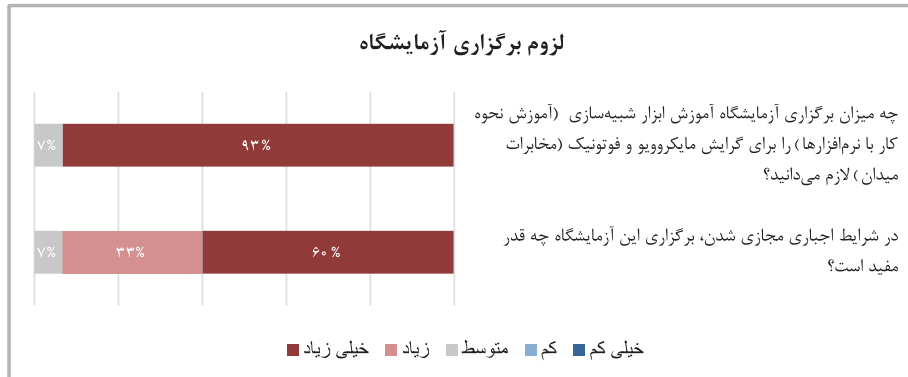
پرسش‌نامه‌ای که برای این نظرسنجی تهیه شد، شامل ۵۰ سؤال در ۵ قسمت است که محورهای زیر

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

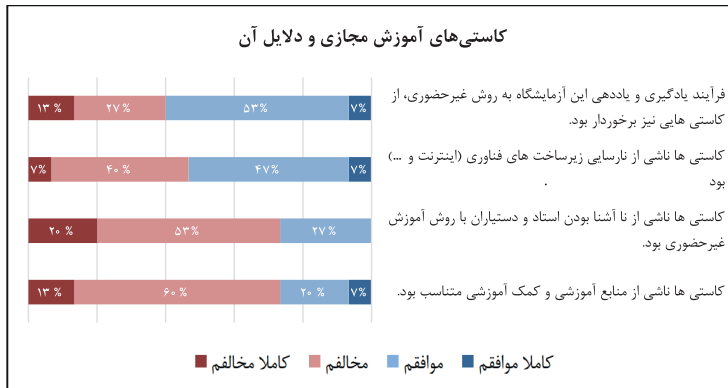
۲-۳. بررسی نتایج نظرسنجی

در قسمت اول نظرسنجی از دانشجویان سؤالاتی در مورد لزوم وجود این آزمایشگاه در درس کارشناسی مهندسی برق و به خصوص 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.



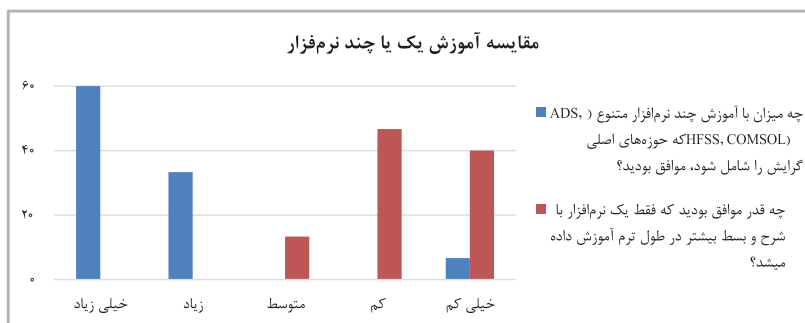
شکل ۶. میزان مفید بودن ارائه آزمایشگاه در دوره کارشناسی و به خصوص در دوران کرونا

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.



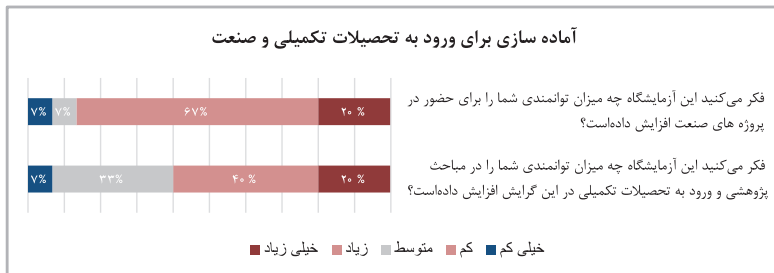
شکل ۷. کاستی‌های آموزش مجازی آزمایشگاه

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، من جمله 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 قابل قبول 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.



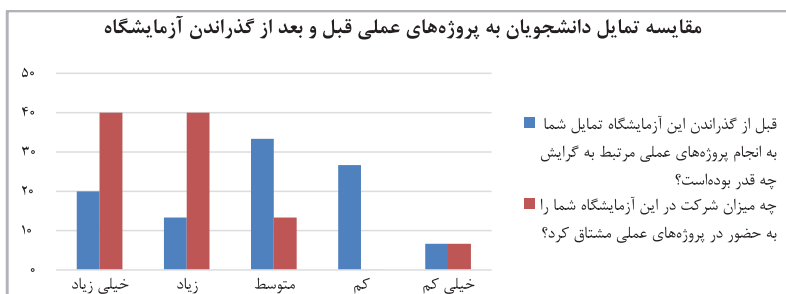
شکل ۸. آموزش یک نرم‌افزار یا چند نرم‌افزار

از آنجا که در طراحی این درس آزمایشگاهی، مرتبط بودن محتوای آموزشی با فعالیت در صنعت یا ادامه تحصیل مدنظر بود، برداشت دانشجویان در این رابطه 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

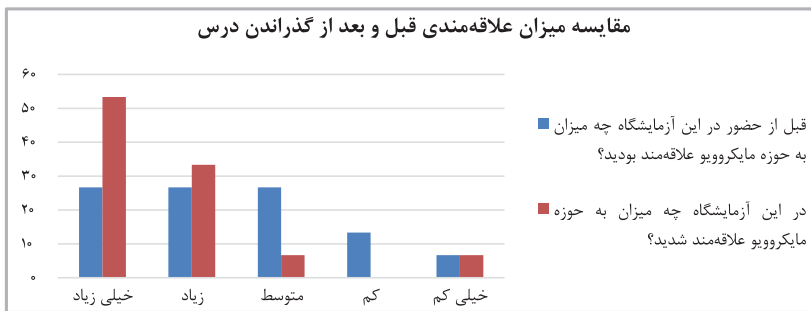
همچنین طراحی دستور کار آزمایشگاه به گونه‌ای بود که آشنایی و میزان علاقه‌مندی دانشجویان به انجام پروژه‌های کاربردی و عملی را افزایش دهد. برداشت دانشجویان در این رابطه نیز مورد سؤال قرار گرفتند که نتایج سؤال‌های ۵ و ۷ از قسمت دوم نظرسنجی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها ۳۳٪ 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، به طوری که 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.



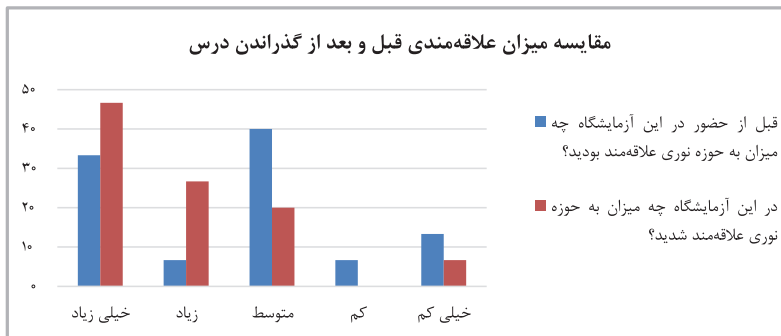
شکل ۱۰. میزان تمایل دانشجویان به انجام پروژه‌های عملی

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

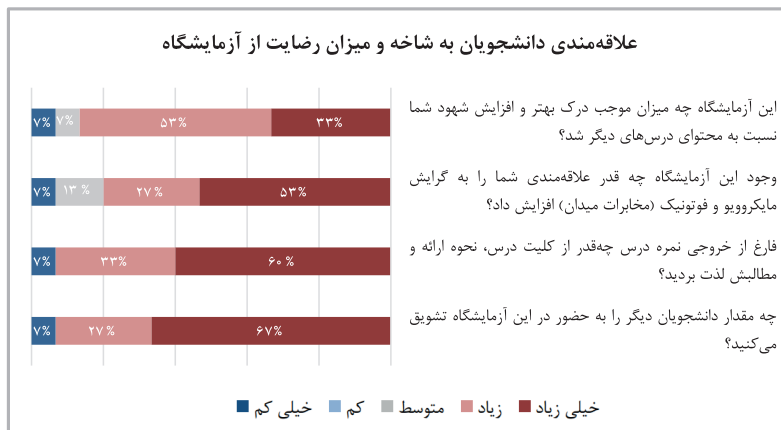
این آزمایشگاه علاقه دانشجویان به این دو حوزه را افزایش داده است. در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که بیش از ۹۰٪ دانشجویان، سایر دانشجویان را به شرکت در این آزمایشگاه تشویق می‌کنند، که این نشان می‌دهد دانشجویان با ارائه این درس موافق بوده‌اند.



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



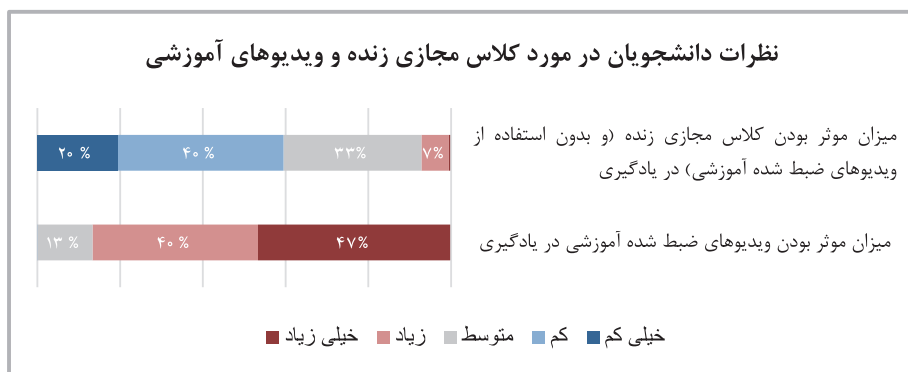
شکل ۱۲. میزان علاقه‌مندی دانشجویان به حوزه نوری و تأثیر گذراندن آزمایشگاه



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



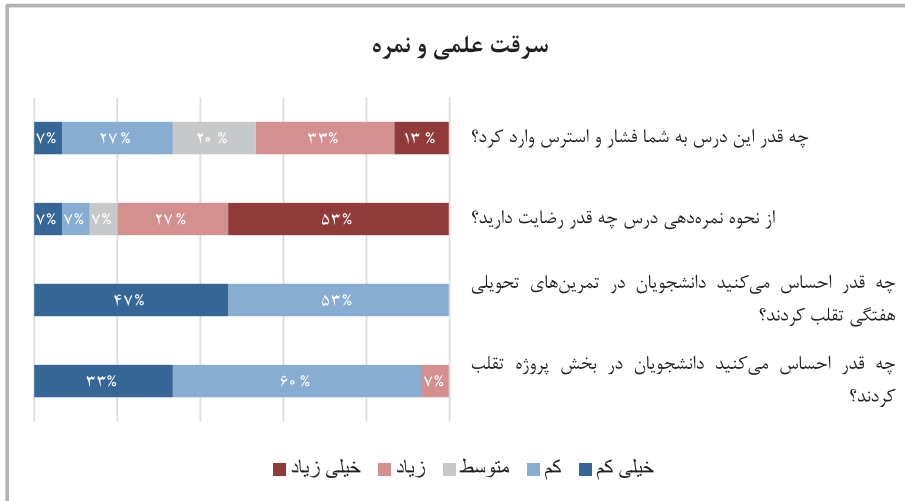
محور دیگر سؤالات نظرسنجی، پرسش در مورد نحوه ارائه درس و مسائلی از جمله شیوه آموزش، شیوه ارزیابی، تناسب حجم تمرین‌ها و زمان آزمایشگاه و میزان رضایت دانشجویان از وجود تمرین‌های امتیازی و پروژه بود. برای مثال نظر دانشجویان در مورد برگزاری کلاس مجازی زنده در مقابل ویدیوهای آموزشی در شکل ۱۴ نشان داده شده 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 میکروویو، ساختارهای تشعشی 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 میکروویو 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 توجه به 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).

#### ۲-۴. چالش‌ها

یکی از چالش‌های ارائه این آزمایشگاه برگزاری جلسات به صورت 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 ظرفیت برگزار شد که نیازمند نیروی دستیار 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 ۱۴۰۰-۰۱ به صورت 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 مهندسی و پژوهشگران حوزه میکروویو و فوتونیک تبدیل شده‌اند. این در حالی است که در برنامه آموزش کارشناسی مهندسی برق خلأ اساسی به علت عدم آموزش 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 معاریان که در ویرایش و نوشتار مقاله راهنمایی‌های ارزشمندی داشتند، قدردانی می‌نمایند. از دستیاران آزمایشگاه در نیمسال اول سال تحصیلی ۱۳۹۹-۲۰۰۰، 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 Multiphysics. (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., & Picket-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، فرامواد و فراسطوح، محیط‌های متغیربازمان و شبکه‌های عصبی نوری فعالیت پژوهشی دارند.



◀ سمیه بشگری: دانشجوی دکتری گرایش مخابرات مایکروویو و

فوتونیک رشته مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف و دانش‌آموخته 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