فرامواد و کاربردهای آن

شکراله کریمیان *[1]

چکیده

بدون شک می توان موج را از بنیادی ترین عناصر سازنده طبیعت و کشف و درک آن را یکی از مهم ترین دست آوردهای بشری دانست؛ چرا که واسطه "شناخت" و "ارتباط" فیمابین اجزاء طبیعت به شمار می رود. موجودات زنده، هر کدام به نحوی متفاوت، با امواج صوتی یا تصویری با یکدیگر ارتباط برقرار می کنند.

اگرچه دانشمندان با دسته بندی این امواج در محدوده (باند) های فرکانسی مختلف سعی در معرفی آنها داشته اند، لیکن به دست آوردنِ شناخت کامل از رفتار این امواج در برخورد با محیط های متفاوت، تنها با بررسی "ساختاریِ" آن محیط و "تاثیر متقابل" فیمابین آن با امواج امکان پذیر است. به لحاظ علمی، نسبت بین طول موج و اندازه تک واحد سلولی آن سازه، نحوه تقابل آنها را مشخص می سازد.

با اتکا به یافته های علمی موجود درباره امواج، زمان آن رسیده تا تاثیرات متقابل امواج و محیط را از دیدگاه ساختاریِ مواد نیز بررسی کنیم. به عبارت دیگر، شرایطی را متصور شویم که بتوان با طراحی هوشمند ماده، امواج را به نحو مقتضی کنترل و هدایت نمود. تحقیقات نشان می دهد که این موضوع توسط فناوری فرامواد یا "متامتریال" امکان پذیرشده است. فرامواد به سازه هایی مصنوعی اطلاق می شود که به واسطه قابلیت شان در ارائه پارامترهای کنترلیِ فراتر از معمول، خواص خارق العاده ای که به طور طبیعی مشاهده نمی شود، را از خود نشان می دهد. در این نوشتار تلاش گردیده تا با معرفی این فناوری، تصویری اجمالی از ویژگی های منحصر به فرد سازه های مصنوعی فرامواد و نیز کاربردهای خارق العاده آن (نظیر نامرئی کردن، کوچک نمودن، بهینه سازی و ...) ارائه شود.

واژگان کلیدی: متامتریال (فرامواد)، الکترومغناطیس، فرکانس های رادیویی و مایکروویو، نانو پلاسمون، فرامواد مرکب و نوری، نامرئی سازی.

*تلفن: ۸۱۳۳۱۹۹(۹۸۹۱۲+)، نشانی الکترونیکی : S.Karimian@manchester.ac.uk

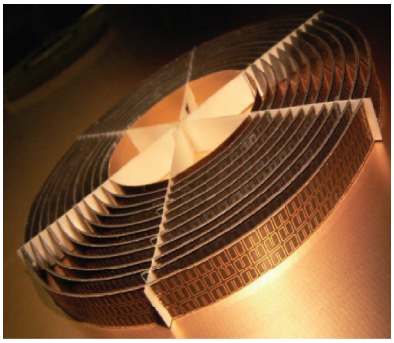
۱. گروه مهندسی متامتریال، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران، ایران و پردیس مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه منچستر، منچستر، انگلستان.

مقدمه

در سال ۲۰۰۹ میلادی نشریات و مجلاتِ علمی نظیر مجله فناوری اِم. آی.تی[1] و مجله نیوساینتیست[2]، مقالاتی تحت عنوان "ده اختراع که زندگی بشر را دگرگون خواهد کرد" منتشر ساختند و ضمن معرفی این اختراعات، پیش بینی نمودند که اینها اعجازهای فناوری می باشد و الگوی زندگی بشر را در دهه های پیش رو دگرگون می سازند [۱].
توجه ویژه این مقالات به مبحثی در خصوص "نامرئی شدن" معطوف گشته است که با ارجاع به داستان های علمی-تخیلی، تلاش دانشمندان در جهت تحقق ساخت "شِنِل های نامرئی کننده" به عنوان یکی از کاربردهای فراموادرا به تصویر می کشد. اما آیا نامرئی سازی به راستی امکان پذیر است؟ برای پاسخ به این سوال، بهتر است کمی به عقب بازگردیم.
اصرار به یافتن پاسخی برای سوالِ "چرا؟" بوده که محققان را در طول تاریخ مجذوب علم کرده است. اکنون با در نظر گرفتن پیشرفت های خیالی در عرصه علم، شاید زمان آن رسیده باشد که به خود بگوئیم: "چرا که نه؟". بدین ترتیب و با این ذهنیت، می توان جسورانه جویای چالش بود و با تفکری دوباره برای یافتن پاسخ به سوالات بحث برانگیز به سمت اکتشافات جدید رفت. سوالاتی نظیر: "آیا تمامی شرایط و حالات رفتاری موج ها شناخته شده اند؟"، "آیا می توان شرایطی را متصور شد که موج الکترومغناطیس رفتاری متفاوت از آنچه تاکنون شناخته شده داشته باشد؟"، "آیا نامرئی سازی به راستی امکان پذیر است؟ آیا روش های موجود برای طراحی و گسترش مدارهای الکترونیکی و نوری جوابگوی نیازهای امروزه اند؟". حتی احتمال مثبت بودن پاسخِ این پرسش ها، هیجان بخش است. بدون تردید جسارت طرح اینَ سوالات و نیز انگیزه یافتن پاسخی حقیقی به آنها، دلیل کشف پدیده ی فراموادبوده است.

فراموادها

فراموادهای الکترومغناطیسی ساختارهایی از مواد مصنوعی هستند که به نحوی طراحی شده اند تا ضمن فعل و انفعال با امواج الکترومغناطیسی، آنها را کنترل کنند (تصویر ۱). این امواج ممکن است از هر نوع موج در طیف الکترومغناطیس باشند. اکثر ما با امواج نور در محدوده قابل رویت که بخش نسبتا کوچکی از طیف الکترومغناطیسی را اشغال می کند آشنا هستیم. امواج نورِ قابل رویت، طول موجی از ٤٠٠ تا ۷۰۰ نانومتر دارند، در حالی که امواجِ الکترومغناطیس می توانند، طول موج هایی از هزارها کیلومتر تا یک تریلیونم متر داشته باشند.
زمانی که امواج نور (یا الکترومغناطیس) به ماده ای وارد می شوند،

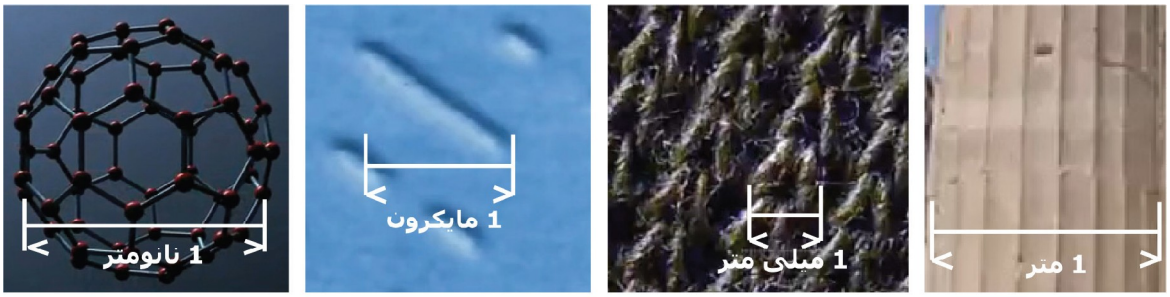


تصویر ۱: نمونه ای از یک ساختار فراماده که سوپرلنز (Super Lens) نام دارد و می تواند برای ارتقای انتقال قدرت به صورت بی سیم مفید باشد [۲].

میدان های الکتریکی و مغناطیسیِ موج باعث حرکت الکترون های داخل ماده به اطراف می شوند. این معاوضه ی انرژیِ الکترومغناطیسی با اتم ها و مولکول های ماده، می تواند ابزاری باشدَ تا از طریق آن، از مواد برای کنترل و دستکاری امواج نور استفاده کرد.

فراموادها، نمونه ای عملی از تغییر در فناوری و آغاز انقلابی فوتونیکی هستند. در طبیعت، اجسام با گردهم آمدن مولکول ها در جامد های بلورین ساخته می شوند. اما در فناوری نانو، مولکول ها طراحی و ایجاد می گردند تا سازه هایی مصنوعی مانند فراموادبه وجود آورند. از منظری دیگر، واژه فراموادبه موادی اطلاق می شود که ماورای تصور هستند و چنانچه ساخته شوند، با توجه به مقیاس بی اندازه کوچکشان، خاصیت خارق العاده ای دارند. در مقایسه ای ملموس، همانگونه که از تصویر ۲ ملاحظه می شود، قطر برخی ستون های کاخهای هخامنشیان یک متر است (الف)؛ قطر یک گره در ژاکت پشمی هزار برابر کوچکتر، یعنی ۱ میلیمتر، است (ب). خطوط روی سی دی هزار برابر دیگر کوچک تر، یعنی ۱ مایکرون، هستند (ج)؛ و یک زنجیره دایره ای کربن حتی هزار برابر کوچک تر، یعنی ۱ نانومتر، است (د). این همان مقیاسی است که فراملکول ها باید طراحی و ساخته شوند.
می دانیم که اندازه و فاصله نوعیِ (نمادین) بین اتم ها در یک ماده در مقیاس انگستروم، یا یکدهم نانومتر است. این بدان معناست که امواجِ نورِ قابل رویت (که اندازه آنها صدها نانومتر است) یا امواجی با طولَ موج های بزرگ تر، امکان تحلیل و برهم کنش با ساختارهای اتمی را ندارند. شاید ملموس ترین مثال، عدم توانایی ما در مشاهده اتم ها و مولکول های یک ماده باشد؛ بدین ترتیب که، اگرچه مواد

1. MIT Technology Review: http://www.technologyreview.com/
2. New Scientist: http://www.newscientist.com/



(د) (ج) (ب) (الف)

تصویر ۲: مقایسه ی اندازه های سلولی در سازه های مختلف و تاثیر آن ها بر امواج.

از مجموعه ای از اتم ها تشکیل شده اند، لیکن نمی توانیم اتم های مجزا را مشاهده کنیم. زیرا نوری که با چشم قابل رویت است، مقیاسی بسیار بزرگتر از اتم دارد. بنابراین، چشمان ما اتم ها و مولکول های مجزای یک ماده را به عنوان جسمی پیوسته تخمین می زنند تا خواص آن ماده را نه تنها از تک تک اتم ها و مولکول هایش، بلکه از برهم کنش آنها تشخیص دهند.

اکنون با در نظر گرفتن توضیحات بالا، اگر از نگاه موج به فراموادِ الکترومغناطیسی بنگریم، مشاهده می کنیم که آنها ساختارهایی مصنوعی با جلوه ی موادی "مجموعه همگون" هستند. این مواد دارای خواصی می باشند که به طور معمول در طبیعت یافت نمی شوند. فراموادِ "مجموعه همگون"، ساختاری با "متوسط اندازه واحد سلولی (شبکه ای) – p" بسیار کوچکتر از (یا حداقل یک چهارم) طول موج هدایت شده λg دارند.

این حالت، "شرط یا حد همگونی" نام دارد و هدف آن، اطمینان از غلبه پدیده شکست یا انکسار بر پدیده تقسیم یا پراکنش موج در محیط متشکل از فراموادِ است [۲].

اگر شرط همگونی برآورده شود، سازه به شکل ماده ای واقعی رفتار می کند. به این معنی که امواج الکترومغناطیسی لزوما نزدیک به واحد سلولی دیده میشوند و فقط موج کاوشگر میانگین پارامترهای سازنده ی تعریف شده در ماده هستند؛ اَلبته همه اینها به طبیعت واحد سلولی بستگی دارند. بنابراین، سازه موردنظر از لحاظ الکترومغناطیسی در جهت پراکندگی موج یکنواخت عمل می کند. بدین ترتیب، می توان "ماده" را بوسیله پارامترهای سازنده آن، یعنی اپسیلون ε و میو μ [۱] تعریف نمود که با ضریب شکست n از طریق عبارت $n = \pm\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ مرتبط می شوند.

فنـاوری امروزه، روش هایی را برای ایجاد سـازه هـای نانویی ارائه نموده اسـت که از آن جمله می توان به چاپ بسیار مشکل و پیچیده با پرتوهای الکترونی و مُهرهای نانویی اشاره نمود. بعلاوه، یون های گالیوم شـتاب داده شده را نیز می توان با شعله های آتشین به سطح فلزات کوباند تا شکل ها و الگوهایی با مقیاس نانو ایجاد کرد.

به منظور ایجاد چنین سـازه هایی، تـلاش های چند جبهه ای و بین رشته ایِ فیمابین فیزیکدانان، ریاضی دانان، مهندسین و محققین علوم مواد ضرورت می یابد. به این ترتیب، سـازه های فراموادِ از بسیاری لحاظ به کیفیتی غیر قابل باور سـاخته می شـوند، مانند داستان های تخیلی، به واقعیت هایی علمی تبدیل شـده اند. در یک نمونه تخیلی ماده فراموادِ پوشش دهنده جسم را منحرف کرده ، به نحوی که با دور زدن اطراف جسم پنهان شده، هیچ گونه اعوجاج ملموسی از خود به جای نگذاشـته است. لذا، به چشم بیننده، به نحوی جلوه می کند که گویی هیچ جسمی آنجا نبوده است [۳].

۱- شاخه های علمی-پژوهشی فراموادِ

موضوعاتی که تاکنون در زمینه فراموادِ مطرح شـده اسـت، به شرح زیر می باشد:

الف) فرا مواد و ارتباطات

از آغاز تحقیقات بر تناسب طبیعی بین فراموادِ و طراحی فرکانس های رادیویی (RF) تاکید می گشـت. محققان سـازه های منحصر به فرد متنوعی را بر اسـاس فراموادِ در فرکانس های رادیویی و مایکروویو ارائـه داده اند و تحقیق در این زمینه همچنـان ادامه دارد. به عبارت دیگر، خواصی که فراموادِ را از دیدگاه علمی بسیار مجذوب کرده، به

۱. ε_r و μ_r به ترتیب واحد اندازه گیری نسبی الکتریسیته (پِرمیتیویتی) و مغناطیس (پِرمیبیلیتی) هستند که با ε_0 و μ_0 در خلاء بواسطه $\varepsilon_0 = \varepsilon/\varepsilon_r = 8.854.102$ و $\mu_0 = \mu/\mu_r = 4\pi.10\text{-}7$ مرتبط می شوند.

فرصت هایی جدید در دستگاه های RF تبدیل شده اند. به طور مثال، شرکتLG یکی از نخستین شرکت هایی بود که در تلفن های همراه خود از آنتن های فراماد برای به دست آوردن دستگاهی باریک، شیک و با توانایی های ارتباطاتی خوب استفاده نمود [٤].

ب) پلاسمونیک های مجتمع (Integrated Plasmonics)

کار روی استفاده از لایه های فلزی نازک به عنوان موج- هادی های پلاسمونیکی مجتمع برای ایجاد ساختارهای فراماد همچنان ادامه دارد. هدف اصلی این محققان آن است که روش ها و ابزارهای لازم برای مهندسی پلاسمون های سطحی برد- بلند (LRSP) را مهیا سازند. محققان همچنین درصدداند "جعبه ابزاری" جامع بسازند که دربرگیرنده مجموعه ای نسبتا کامل از ابزارهای عددی، پردازه های (مراحل) ساخت، و قراردادهای آزمایشی سیستماتیک نظام مند) برای دستگاه ها و ادوات LRSP باشد.

ج) فراماد مرکب (Composite Metamaterials)

در این پژوهش ها، تمامی موضوعات مربوط به مواد مرکب چندکاربردی، از کابردهای بالقوه این سازه ها تا جزئیات ساخت و مشخصه یابی آنها، به منظور ایجاد سازه های فرامادی مرکب مورد بررسی قرار می گیرند. از موضوعات تحت بررسی در این گرایش که لزوما به مواد مرکب با کاربردهای الکترومغناطیسی محدود نمی باشند، می توان به اجماع کاربردهای خودترمیم شوندگی و حس گری در فراماد مرکب چندگانه اشاره نمود. مطالعه و اعمال روش های ساختی با هدف کوچک سازی اجزاء الکترونیکی، که قابلیت بکارگیری و اجتماع این اجزاء در مواد کامپوزیتی پیشرفته را فراهم سازند، یکی از جلوه های این کار است.

د) نانوپلاسمونیک ها (Nano Plasmonics)

گروه دیگری از محققان نیز هم اکنون محدوده وسیعی از نانوسازه های پلاسمونیکی را مطالعه می کنند و در تلاشند تا پاسخ های الکترومغناطیسی بسیار متنوع این سازه ها را به عنوان مسیری برای به واقعیت رساندن فراماد فرکانس های نوری مورد بررسی بیشتر قرار دهند. از آنجایی که شکل هندسی ذرات نانویی را می توان در طول ساخت کنترل کرد، این ذرات می توانند برای کاربردهای خاص بهینه سازی شوند. بدین ترتیب، مقیاس بزرگی از احتمالات ساختاری را می توان در نظر گرفت، چرا که هر ترکیبی از ذرات نانویی پلاسمونی تشدیدی را می توان در جهت کاربرد خاصی شکل داد و بهینه سازی نمود.

ه) فراماد نوری (Optical Metamaterials)

یکی دیگر از زمینه های تحقیقاتی اصلی محققان این رشته، توسعه روش های طراحی و ساخت فراماد برای فرکانس های بالا می باشد. ظهور موادی با دگرگونی نوری، حتی انگیزه بیشتری برای توسعه فراماد نوری ایجاد کرده است. برجسته ترین تلاش ها، ساخت مدارهای فوتونیکی و الکترونیک-نوری (قابل رویت) است که این موضوع مراکز علمی را قادر به الحاق اجزاء فراماد و پلاسمونی جدید با فناوری مرسوم (قدیمی تر) نموده است. پیوندزنی مباحث پیشرفته فراماد با مجتمع نوری و روش های چاپی (لیتوگرافی) کامل، قدرتمند و کارا، نمونه ای از این توانایی های کلیدی است.

و) دگرگونی های نوری و نامرئی سازی (Transformation Optics and Cloaking)

در این زمینه تحقیقاتی، محدوده خارق العاده ای از خواص الکترومغناطیسی را می توان در سازه های فراماد مصنوعی مهندسی نمود که از انعطافی بی همتا نسبت به مواد مرسوم برخوردار باشند. محققان این زمینه توانسته اند گرادیان فضایی (مستقل و با دقت کنترل بالا) در خواص الکتریکی و مغناطیسی یک فراماد ایجاد کنند، که دارای دقت بالاتر و محدوده وسیع تری از تغییرات – نسبت به هر زمان دیگری – باشند. بهره برداری کامل از این انعطاف پذیری عظیم، پیشرفت های اخیر در دگرگونی نوری [1] را امکان پذیر ساخته است. به جای تکیه بر ابزارهای استاندارد نوری، مانند ترسیم-پرتو یا شبیه سازی موج-کامل، این تصور را می توان داشت که فضا را طوری بپوشانیم که خط سیر های پرتوهای نور را کنترل کنیم. محققان همچنین در حال توسعه ابزارهایی هستند که ساختارهای دگرگونی نوری را از تئوری بنیادی تا اجرای احتمالی نهایی فراماد ، تحقق ببخشند.

۲- کاربردهای فراماد و چالش های موجود

اگر چه نمی توان در نوشتار حاضر تمامی کاربردهای فراماد را مورد بحث قرار داد، در ادامه عمده ترین این کابردها در محورهای ذیل دسته بندی و به اختصار ارائه شده است:

الف) نامرئی سازی در نور

• **رادارگریزی:** جت ها را می توان با استفاده از لایه پوششی درست فراماد رادارگریز کرد، به نحوی که خود پوشش قابل دید است ولی رادارها نمی توانند هواپیما را ردیابی کنند. البته، نامرئی کردن کل هواپیما از چشمان غیر مسلح چالش بزرگتری است. چالش بعدی این است که دستگاه نامرئی کننده را باید بتوان طوری هدفمند طراحی کرد که نور را در کل "طیف قابل رویت" دستکاری کند، زیرا در طول موج های مختلف، نورهای متفاوتی وجود دارند. و در آخر، دستگاه نامرئی کننده، شخص داخل خود را در تاریکی فرو می برد، چرا که نورهایی که به طور معمول به او می رسند اکنون باید به دور او و دستگاه نامرئی کننده

۱. Transformation optics: دگرگونی نوری روشی منحصر به فرد در طراحی دستگاه های نوری است.

اش منحرف شوند.شاید مهم ترین چالش ها این باشد که پوشنده این نوع پوشش های نامرئی کننده، باید خود بتواند بیرون را ببیند در حالی که از دید افراد بیرون پوشش نامرئی باشد. زمانی که این مشکلات حل شوند، ارتش های آینده بسیار سخت دیده خواهند شد!

• **ساختن "لنزهای کامل و بی عیب"**: خواص نوری جدید فراموادمی تواند راه را برای ساخت "لنزهای کامل و بی عیب[1]" باز کند؛ به شکلی که مشاهده مستقیم یک تک پروتئین در میکروسکوپ نوری امکان پذیر شود. تاکنون کارایی فراموادبواسطه ناتوانی در عملکرد آنها در پهنای باند وسیعی از نور بوده است.

طراحی فراموادکه در کل طیف نوری قابل روئیت کار کند، چالشی قابل توجه می نماید. این کار با سازه های موجود، که شامل اجزاء جداگانه برای تقابل با امواج الکتریکی و مغناطیسی هستند، سخت تر نیز می شود. زیرا این اجزاء با رنگ های مختلف نور برخورد کرده و معمولا هم پوشانی آنها روی محدوده وسیعی از طول موجها بسیار مشکل است؛ البته پیشرفت هایی از طریق به کارگیری ریاضیات پیچیده و دگرگونی های نوری حاصل شده است.

ب) پوشش نامرئی صوتی

محققان پا را کمی فراتر از نور نهاده و تمرکز خود را بر هر آنچه که به عنوان موج سفر می کند معطوف ساخته اند. بدین ترتیب، می توان برای موج صوتی نیز پوششی نامرئی متصور شد. به طور مثال میتوان شیئی را از دستگاه های کاشف امواج صوتی پنهان کرد، یا اینکه "ناحیه های مُرده" صوتی را در سالن های کنسرت اصلاح نمود. پوشش های نامرئی صوتی را شاید بتوان از کریستال های صوتی ساخت؛ سازه هایی که می تواند امواج صوتی را در فرکانس های منتخب مسدود کنند. در سال ۲۰۱۳ میلادی، محققین اسپانیایی نخستین پوشش نامرئی صوتی سه بعدی را معرفی کردند [۵].

ج) پویش گرهای امنیتی

پویش گرهای امواج میلیمتری قادرند اسلحه های گرم و سرد مخفی شده روی بدن افراد را آشکار کنند و این کار را بواسطه دریافت انعکاس امواج از سطح این فلزات انجام می دهند. اما این پویش گرها بسیار گران، بزرگ (جسیم) و کند هستند. به وسیله فراموادو روش های کامپیوتری تصویر پردازی، فناوری تصویربرداری در مایکروویو و میلیمیترویو را اختراع شده است که می تواند هزینه، اندازه و سرعت این پویشگرها را بهینه کرده و آنها را برای کاربردهای دیگر نیز ارزشمند سازد.

د) عمل های جراحی "بسته"

امروزه، چه برای پزشکان و چه برای بیماران، عمل های بسته جایگزین مناسب تری برای عمل های باز به حساب می آیند؛ به شرطی که قابلیت کنترل و دقت بالایی داشته باشند. دستگاهی بسیار دقیق[2] ساخته شده است که لنزهای پوشیده شده از نانولوله های کربنی است و قادر به تبدیلِ نور به امواج صوتیِ بسیار متمرکز می باشد. در حال حاضر، بزرگترین چالش عمل با فناوری مافوق صوت مورد بحث، نقطه تمرکز نسبتا بزرگ آن است که در مقیاس چندین میلیمتر است. بنابراین، معالجه عناصر بافتی با دقتی بسیار بالا، هدف گرفتن بافت های آوندی ظریف، لایه های نازک بافتی و بافت های سلولی کمی دشوار است؛ هنوز می توان تمرکز آن را میلیاردها بار بالاتر برد [٦].

و این تنها بخشی از توانایی های بالقوه فراموادست که انجام بسیاری از کارهایی را امکان پذیر می سازند که تاکنون شاید تصور هم نمی کردیم. تخیلاتی که شاید حتی ندانیم چه هستند و چه کاربرد های گسترده ای ممکن است داشته باشند! حاصل آنکه، آنگونه که انقلاب صنعتی، اساس و بافت جامعه را دگرگون ساخت و فیبرهای نوریِ حامل نور، تحولی در شبکه های اطلاعات جهانی به همراه داشتند، فراموادنیز انقلاب بعدی را به ارمغان خواهند آورد. آنها نویدبخش راه حل هایی هوشمندتر و با آلایندگی کمتر (سبزتر) می باشند که برای تمام صنایعی که به نحوی با موج سرو کار دارند مطلوب است؛ از صنایع تلکام (ارتباطات) و ذخایر داده ها تا صنایع دفاعی و امنیتی.

۳- ملاحظات پایانی

آنچه در این نوشتار آورده شده، معرفی بخشی از تحقیقات عظیمی است که در حوزه های مختلف علمی در ارتباط با فراموادو کاربردهای آنها در دانشگاه ها و مراکز علمی-تحقیقاتی دنیا در جریان است. اگرچه مراکز تحقیقاتی کشورمان نیز در حد توان تلاش نموده اند تا از این چرخه عقب نمانند، شواهد چندانی از ترویج این علم و پژوهش های مرتبط با این فناوری در کشورمان به چشم نمی خورد. امید است به توان گام هایی اساسی به منظور ورود این حوزه علمی در کشور و ترویج و ارتقای آن برداشت.

مولف مشتاقانه منتظر است تا بذری که با رهنمود و بزرگواری استاد عزیزم جناب آقای دکتر موسوی موحدی در مجله ارزشمند "نشاء علم" کاشته شده است، با حمایت محققین رشته های مختلف علمی مرتبط بارور گردد و ثمرات ارزشمندی را در آینده کشور اسلامی در پی داشته باشد. در انجام این مهم خاضعانه دست گرم و مهربان تمامی دانش پژوهان سرزمینم را به گرمی می فشارم و از هر گونه رهنمود آنان بهره خواهم برد.

۱. لنزهای کامل و بی عیب به لنزهای اتلاق می شود که تصاویری با کیفیت بسیار خوب را ارائه می کنند.

۲. امواج صوتی آن با دامنه های بزرگ می توانند اشیایی با ابعاد ۷۵ در ٤۰۰ مایکرومتر را مورد هدف قرار دهند.

منابع و مآخذ

[1].Ball, P.(2007). "10 Breakthough Technologies,"MIT Technology Review, 12 March 2007.
[2].C. Caloz, C., Itoh,T.(2006)."Electromagnetic Metamaterials": Transmission Line Theory and Microwave Applications, John Wiley & Sons, Inc.
[3]."Metamaterials: the Next Photonics Revolution,"The Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, UK, 23 November 2009.
[4].Saswato, R.(2009). "Metamaterials Arive in Cell Phones," IEEE Spectrum, 28 October 2009.
[5].Sanchis, L. "Three-Dimensional Axisymmetric Cloak Based on the Cancellation of Acoustic Scattering from a Sphere", Phys. Rev. Lett. 110(12):124301-2–124301-5.
[6].Won Baac, H., Jong G. Ok). 2012(. "Carbon-Nanotube Opt Acoustic Lens for Focused Ultrasound Generation and High-Precision Targeted Therapy" ,Scientific Reports 2, Article number: 989, 18.