

مروری بر متامتریال ها و کاربرد آنها در حوزه الکتریسیته

مهدی محمدزاده^{1*}، حسام اسفندیاری²، لاریسا خدادادی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

3- استادیار، هیئت علمی، گروه برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

خلاصه

در این مقاله مروری بر خواص متامتریال ها و کاربردهای آنها پرداخته شده است. متامتریال یا فراماده به ماده مرکبی گفته می شود که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیس در ساختار وجودی خود است. آنچه این مواد را غیر معمول کرده است، خاصیت ضریب شکست منفی نور در آنها است، به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منعکس می کنند. ساختارهای متامتریال با توجه به ویژگیهای منحصر بفرد خود، توانسته است خود را به عنوان یکی از مهمترین موضوعات طراحی میکروویوی مطرح نماید. مواد الکترومغناطیس تشکیل دهنده آنها می تواند با دستکاری مختصر و دقیق ساختارشان «تنظیم» نیز بشود. کاربرد این ساختارها در طراحی آنتن ها، فیلترها، کوپلرها به سرعت در حال گسترش میباشد. این مواد در بهبود عملکرد آنتن ها موثر میباشد؛ با استفاده از پوششی از متامتریال می توان امپدانس داخلی آنتن را تغییر و حتی آن را با فضای آزاد تطبیق داد، که این امر باعث بهبود عملکرد آنتن می شود. همچنین آرایه فرامواد (متامتریال) را می توان به گونه ای تنظیم کرد که علاوه بر استحصال انرژی از امواج میکروویو، گستره ای از فرکانس ها مانند ارتعاشات و امواج صوتی را برای تولید الکتریسیته استفاده کند. در این مقاله به نحوه برداشت انرژی تابش الکترومغناطیسی و انرژی میکروویوی با استفاده از متامتریال که از منابع مختلفی مانند ماهواره، صوت و سیگنال های وای فای جمع آوری میشوند و به الکتریسیته تبدیل میگردند، پرداخته میشود.

کلمات کلیدی: متامتریال ، ضریب شکست منفی ، امواج میکروویو

1. مقدمه

متامتریال (Metamaterial) به ماده ای گفته می شود که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیس در ساختار درونی خود است. نکته ای قابل توجه در این مواد خاصیت ضریب شکست منفی نور در آنها است، به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی شکسته و منحرف می کنند. [1]

* Email: mahdi.mz@live.com

متامتریال‌ها ساختارهای ترکیبی هستند که برای تغییر خواص الکترومغناطیسی موثر مواد به صورت مصنوعی ساخته می‌شوند. عموماً سنتز متامتریال‌ها با استفاده از رزوناتورهای مثل split ring resonators صورت می‌گیرد. در این خصوص نکته‌ی کلیدی اندازه‌ی بسیار کوچک این رزوناتورها در قیاس با طول موج مورد استفاده است. همچنین، فشرده بودن این رزوناتورها همراه با مفاهیم الهام گرفته شده از تئوری متامتریال می‌تواند در طراحی مدارهای صفحه‌ای فشرده مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا، با توجه به نیاز روز افزون به فشرده سازی مدارهای صفحه‌ای میکروویو، گیگاهرتز و تراهرتز، خصوصاً در ادوات الکترونیکی و مخابراتی سیار، به بررسی ساختار فرامواد خواهیم پرداخت. [2]

در علم مواد، متامتریال مواد فوتونیک‌ی توسعه یافته‌اند که فوتون نور بعنوان حامل اصلی اطلاعات است. رفتار غیر عادی فاز میدان‌ها در متامتریال باعث می‌شود به خواصی دست یافت که به کمک دی‌الکتریک‌های معمولی نمی‌توان آن خواص را ایجاد کرد، و میتوان از این ویژگی فرامواد در حوزه‌های مختلف بهره گرفت. این مواد از ترکیب میله‌های ریز و مجموعه‌ای از حلقه‌های فلزی و مانند آنان ساخته شده‌اند که برای اولین بار توسط دیوید اسمیت (David Smith) استاد دانشگاه کالیفرنیا ساخته شد. خواص نامتعارف این مواد سبب شده است که از آنها در زمینه‌های مختلف استفاده شود از جمله در مهندسی میکروویو، موجرها، جبران‌پاشندگی، آنتن‌های هوشمند، لنزها و نمونه‌های فراوان دیگر. بهره‌گیری از مواد با دی‌الکتریک مصنوعی در مهندسی ماکروویو برای اولین بار پس از جنگ جهانی دوم صورت گرفت. در حالی که تحقیقات برای دستکاری در امواج الکترومغناطیسی مواد مصنوعی در پایان قرن 19 در جریان بود. [3]

ویکتور وسلایگو در سال 1967، معادلات ماکسول را بر اساس موادی فرضی که دارای نفوذپذیری و گذردهی همزمان منفی بودند، ارائه نمود. وی به صورت تئوری اثبات نمود که امواج صفحه‌ای در این مواد فرضی از ویژگی "چپگرد" پیروی می‌نمایند. وسلاگو همچنین نشان داد که نتیجه فرض فوق این ویژگی‌های الکترومغناطیسی ضریب شکست منفی و معکوس شدن اثر داپلر را به همراه دارد. اولین کاربرد چنین موادی در دانشگاه کالیفرنیا صورت گرفت که توانستند آرایه‌ای متناوب حجمی تشکیل یافته از سیمهای فلزی و ساختارهای متناوب تشدید کننده‌های رینگ شکافدار ایجاد نمایند که شرط نفوذ پذیری و گذردهی موثر منفی همزمان را ارضا می‌نمود. نتایج بدست آمده توسط وسلایگو، به مدت سی سال به فراموشی سپرده شد. در دهه 1990، پندری توانست از آرایه‌ای از سیم‌های فلزی، گذردهی منفی بدست آورد و در ادامه مطالعات خود نفوذ پذیری منفی را از ساختارهای متناوب تشدید کننده‌های رینگ شکافدار، بدست آورد. [4]

شاید نوید بخش ترین پیشرفت اخیر در مورد مواد، کشف ماده‌ای جدید و هیجان انگیز مسموم به متامتریال باشد که ممکن است روزی اشیاء را واقعا نامرئی کند. مضحک است که روزی ساخت متامتریال امکان ناپذیر تلقی می‌شد زیرا آن‌ها قوانین اپتیک را نقض می‌کنند. اما در سال 2006 پژوهشگران در دانشگاه دوک کارولینای شمالی و امپریال کالج لندن با موفقیت، متامتریال را برای نامرئی کردن شیء در برابر تابش میکروموج به کار گرفتند. هرچند هنوز موانع زیادی بر سر راه وجود دارد اما برای نخستین بار اکنون طرحی برای نامرئی ساختن اشیاء پیش رو داریم. [5]

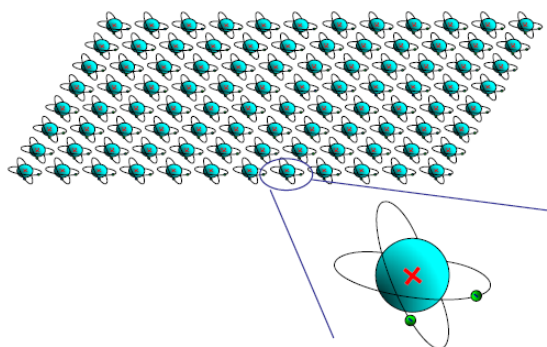
از این مواد میتوان در حوزه‌های تولید الکترونیسته نیز استفاده کرد و این امر با تغییر ساختار مواد صورت می‌گیرد که در ادامه به تشریح کامل آن خواهیم پرداخت. در این مقاله ابتدا به معرفی بنیادی و ساختار متامتریال‌ها می‌پردازیم، سپس در بخش سوم کاربردهای کلی و در بخش چهارم تولید الکترونیسته با ایجاد تغییراتی در ساختار متامتریال‌ها را توضیح میدهم. نتیجه‌گیری نهایی نیز در بخش پنجم صورت خواهد گرفت.

2. معرفی بنیادی و ساختار

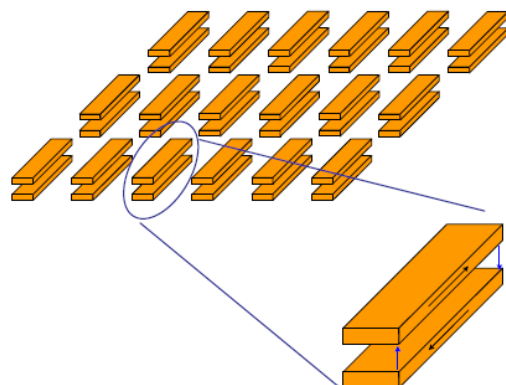
مواد عادی (شکل 1) در طبیعت دارای اپسیلون (ضریب نفوذپذیری الکتریکی) و مو (ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی) مثبت هستند. متامتریال به موادی گفته می‌شود که دارای اپسیلون و مو منفی باشند، (شکل 2) این باعث می‌شود که

انتشار موج در این مواد با انتشار موج در مواد عادی فرق بکند، اگر فقط اپسیلون یا مو منفی باشد موج در این مواد انتشار نمی‌یابد و دچار تضعیف شدید می‌شود اما اگر هر دوی آن‌ها منفی شود موج در این مواد قابل انتشار خواهد بود ولی با مواد عادی فرق می‌کند.

مهم‌ترین تفاوت آن با مواد عادی این است که در مواد عادی انرژی حمل شده توسط موج در همان جهت حمل می‌شود که موج انتشار پیدا می‌کند ولی در متامتریال‌ها انرژی در جهت معکوس انتشار موج حمل می‌شود؛ دومین تفاوت مهم این است که در متامتریال‌ها امواج میرا تقویت می‌شوند.



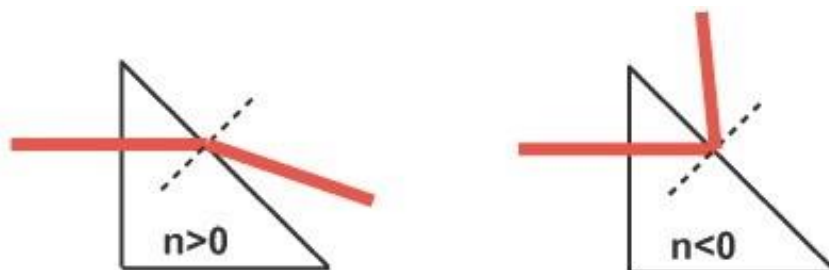
شکل 1: یک ماده‌ی عادی با اتم‌هایش



شکل 2: یک متامتریال با اتم‌های مصنوعی

یک تصور غلط و گسترده‌ای که با توجه به نظریه‌ی نسبیت، ایجاد شده است این است که هیچ چیزی نمی‌تواند بر سرعت نور در خلاء غلبه کند؛ یعنی چگالی نوری، کمتر از عدد یک شود، چرا که چگالی نوری خلاء برابر یک است و هرچه چگالی نوری یک ماده بیشتر باشد، سرعت نور در آن ماده کمتر است. این تصور غلط است؛ چرا که چگالی نوری، سرعت فازی نور را اندازه می‌گیرد که انرژی و اطلاعات را حمل نمی‌کند؛ لازم به ذکر است این انرژی و اطلاعات هستند که سرعت انتشار نور را محدود می‌کنند؛ سرعت فازی نور، سرعتی است که قله‌های موج حرکت می‌کند و می‌تواند از سرعت نور در خلاء بیشتر شده و در نتیجه، چگالی نوری زیر عدد یک را حاصل شود؛ این قضیه می‌تواند در فرکانسهای

نزدیک به فرکانس‌های تشدید برای پلاسماها و برای اشعه ی ایکس اتفاق بیافتد، در رژیم اشعه ی ایکس، ضریب‌های شکست کوچکتر اما نزدیکتر به عدد یک هستند. ولی استثناهای نزدیک به فرکانس تشدید را هم داریم. تحقیقات اخیر نشان داده است که مواد دارای ضریب شکست منفی نیز وجود دارند. [6] ضریب شکست منفی به طور معمول در مواد طبیعی وجود ندارد، ولی در بعضی فرامواد این خاصیت دیده می‌شود. ضریب شکست منفی زمانی به وجود می‌آید که ثابت گذردهی ϵ و تراوایی مغناطیسی μ ماده در یک فرکانس مشخص به طور همزمان منفی باشند. سمت راست شکل 3، برای ضریب شکست منفی است.



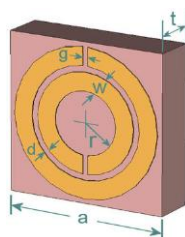
شکل 3: سمت راست برای ضریب شکست منفی و سمت چپ برای ضریب شکست مثبت

تقریباً تمام مواد از نظر اپتیکی دارای ضریب گذردهی (ϵ) و نفوذپذیری (μ) مثبت می‌باشند. ماده ای که دارای یکی از دو ضریب ϵ یا μ منفی است، در تابش الکترومغناطیسی کدر است. در عمل مواد شفاف دارای ضریب شکست n حقیقی می‌باشد که از رابطه (1) تعیین شود.

$$n = \pm \sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

متمتریال‌ها باید به صورت مصنوعی ساخته شوند و در طبیعت وجود ندارند. معمولاً برهم کنش فلز با امواج الکترومغناطیسی باعث می‌شود که در بعضی مواقع خواص متمتریال به وجود بیاید؛ بنابراین متمتریال‌ها معمولاً از یک دی الکتریک که داخل آن پر از المان‌های فلزی ریز هستند درست شده‌اند. مثلاً اگر تعداد زیادی سیم‌های فلزی به شکل مرتب در داخل یک دی الکتریک قرار داده شوند، آن وقت این ساختار در بعضی فرکانس‌ها دارای اپسیلون منفی می‌شود؛ دلیل آن این است که سیم‌ها موج الکترومغناطیسی را طوری باز می‌تابانند که مثل این می‌ماند که ماده دارای اپسیلون منفی است. باید ابعاد سیم‌ها از طول موج تابشی خیلی کم‌تر باشد.

همچنین SRR (Split-ring Resonator) ها یکی از المان‌های معمول برای تولید متمتریال‌ها هستند. اگر بر روی لایه ای کپتون دایره‌های فلزی قرار داده بشود، این ماده از خودش موج منفی نشان خواهد داد چرا که حلقه‌های فلزی طوری میدان مغناطیسی رو عوض می‌کنند که مکعب دارای موج منفی میشود. (شکل 4) [7]



شکل 4: SRR

همانطور که در شکل 4 دیده میشود، تشدید کننده از دو حلقه مسی متحدالمرکز تشکیل شده است که روی لایه از کپتون سوار شده اند.

3. کاربرد

ماتریال ها ترکیباتی با خواص اپتیکی ای هستند که در طبیعت مشابه ندارد. این مواد با کارگذاری درون کاشت هایی از ماده ساخته می شوند که موج های الکترو مغناطیس را مجبور به خمیده شدن به شیوه های نامعمول می کند. دانشمندان مدارهای کوچک الکتریکی را در نوارهای مسی با آرایش دایره های هم مرکز تخت، شبیه به المنت های اجاق برقی جایگذاری کردند. نتیجه آمیخته ای پیچیده از سرامیک، تفلون، فیبرهای کامپوزیتی و اجزای فلزی بود؛ این درون کاشت های کوچک در مس ، خم کردن و مسیردهی به تابش میکروموج به شیوه ای ویژه را ممکن می سازند. مسیری را که آب در اطراف یک تخته سنگ بزرگ می پیماید را تصور کنید؛ چون آب به سرعت در اطراف تخته سنگ می پیچد، حضور تخته سنگ در پایین دست، از بین می رود؛ به عبارتی در نقطه ای که آب به دور تخته سنگ به طریقی می پیچد تخته سنگ نامرئی شده است. به همین نحو تمام مواد می توانند پیوسته مسیر میکروموج ها را تغییر دهد و خم کنند به طوری که مثلا در اطراف یک استوانه قرار داده شوند اصولاً هر چیزی درون استوانه را نسبت به میکروموج، نامرئی می کنند. دانشمندان با ساخت وسیله ای متشکل از ده حلقه ی فایبرگلاس پوشیده از عناصر مسی با موفقیت این اصل را به نمایش درآوردند. حلقه ی مسی درون این وسیله تقریباً به طور کامل نسبت به تابش میکروموج نامرئی شد و تنها سایه ای اندک ایجاد کرد. و در پایان باید بگوییم که تمام مواد برای نور مرئی نیز در دست ساخت می باشد که البته هنوز فاصله ایی چندین ساله با آنها وجود دارد.

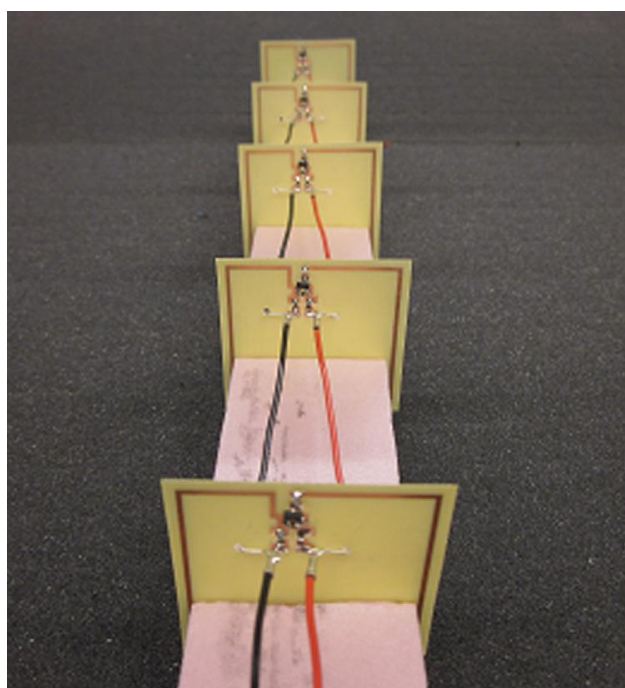
از کاربرد های دیگر ماتریال این است که در لنزهای کامل می توان از آن استفاده کرد؛ لنز کامل به لنزی گفته می شود که دارای دقت بی نهایت است و هر جسم ریزی را با آن می توانید ببینید. کاربرد مهم مواد ماتریال در بهبود عملکرد آنتن ها می باشد؛ با استفاده از پوششی از ماتریال می توان امپدانس داخلی آنتن را تغییر داده و حتی آن را با فضای آزاد تطبیق دهیم ، که این امر باعث بهبود عملکرد آنتن می شود. در پژوهش های اخیر آنتن های میکرواستریپی با المانهای حلقوی، عمل کوچک سازی سیگنال با خط انتقال ماتریالی صورت گرفته و تطبیق نسبتاً خوبی بین نتایج ساخت و شبیه سازی برقرار است. [8] کاربردهای دیگر بالقوه فرامواد مدیریت هوشمند انرژی خورشیدی، سنسورهای مافوق صوت پیشرفته، مخابرات فرکانس بالا در میدان جنگ ، ساختارهای محافظ در مقابل زمین لرزه ها هستند. [9], [10], [11], [12]

4. تولید الکتریسیته با تغییراتی در ساختارهای ماتریال

دانشمندان با طراحی یک مدار الکتریکی و افزودن آن به دستگاه های طراحی شده برای برداشت انرژی تابش های الکترومغناطیسی محیط توانسته اند انرژی میکروویو را از منابع مختلفی مانند ماهواره، صوت و سیگنال های Wi-Fi جمع آوری کرده و آنها را به الکتریسیته تبدیل کنند. این ابزار انرژی اتلاف شده را به ولتاژ جریان مستقیم و با کارایی مشابه سلول های خورشیدی تبدیل می کند. الکساندر کاتکو و آلن هاوکز، ضمن همکاری با استیون کامر، پروفیسور مهندسی برق و کامپیوتر و محقق ارشد دانشگاه دوک و به وسیله پنج هدایتگر انرژی از جنس مس و فایبرگلاس که به شکل یک آرایه ی پنج تایی (شکل 5) به یک بورد الکتریکی متصل شده اند موفق به ساخت این ابزار شدند.

طراحان گفته‌اند، در نتیجه این کار مدار الکتریکی قادر به برداشت امواج میکروویو و تبدیل آنها به 7.3 ولت انرژی الکتریکی است. آنها این مقدار را با شارژهای USB موبایل مقایسه کرده‌اند که حدود 5 ولت نیرو تولید می‌کند. هاوکز می‌گوید هدف ما رسیدن به بیشترین میزان انرژی بود. در ابتدا بهره‌وری تبدیل به این روش بین 6 تا 10 درصد بود اما در ادامه ما توانستیم بهره‌وری را به طرز چشمگیری افزایش داده و آن را به 37 درصد برسانیم که این مقدار قابل مقایسه با کارایی سلول‌های خورشیدی است. [13]

این آرایه‌ی فرامواد را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که علاوه بر برداشت انرژی از امواج میکروویو، گستره‌ای از فرکانس‌ها مانند ارتعاشات و امواج صوتی را برای تولید الکتریسیته استفاده کند. کاتکو می‌گوید: تاکنون کار زیادی به صورت تئوریک روی فرامواد در این زمینه انجام شده بود، اما ما با کمی کار نشان دادیم این مواد می‌تواند کاربردهای مصرفی زیادی داشته باشد.



شکل 5: آرایه‌ای از SRRها به منظور برداشت انرژی الکتریکی

5. نتیجه‌گیری

به معرفی مختصری از متامتریال پرداخت شد و سعی گردید تا مختصراً از کاربردهای آن خصوصاً در حوزه‌ی آنتن‌های مخابراتی و تولید الکتریسیته بحث گردد.

خواص فرامواد به گونه‌ای است که اجازه طراحی انعطاف‌پذیری را به محققان می‌دهد که با آنتن‌های معمولی امکان آن نیست. زمانی که آنتن‌های سنتی در فضایی که با هم در ارتباط هستند به هم نزدیک‌تر می‌شوند در عملکرد یکدیگر اختلال ایجاد می‌کنند. فرآیند به کار گرفته شده در طراحی فرامواد چنین معضلاتی را در نظر گرفته و به آنها اجازه می‌دهد برخلاف آنتن‌ها و بدون ایجاد مزاحمت برای یکدیگر بر راحتی در کنار هم کار کنند.

همچنین با تنظیم مناسب آرایه متامتریال می‌توان علاوه بر برداشت انرژی از امواج میکروویو، گستره‌ای از فرکانس‌ها مانند ارتعاشات و امواج صوتی را برای تولید الکتریسیته استفاده کند.

7. مراجع

1. V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of μ and ϵ ," Soviet Phys—Usp., vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
 2. D. R. Smith and D. Schurig, "Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors," Phys. Rev. Lett., vol. 90, no. 7, p. 077405, Feb. 2003.
 3. A. Alu and N. Engheta, "Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or doublepositive (DPS) layers," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 52, no. 1, pp. 199–210, Jan. 2004.
 4. A. Ishimaru, S.-W. Lee, Y. Kuga, and V. Jandhyala, "Generalized constitutive relations for metamaterials based on the quasi-static Lorentz theory," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 10, pp. 2550–2557, Oct. 2003.
 5. R. W. Ziolkowski, "Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 7, pp. 1516–1529, Jul. 2003.
 6. Shelby, R. A.; Smith D.R; Shultz S., "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction". Science. vol. 292 (5514), pp. 77–79, 2001
 7. Pedro J. Castro, Joaquim J. Barroso, Joaquim P. Leite Neto, "Experimental Study on Split-Ring Resonators with Different Slit Widths", Scientific Research Publishing, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, vol.5, no.9, pp. 366-370, Sep.2013
8. پریسا فروزان نژاد، ساحره سهندآبادی و مرتضی عزیزی قومی، (1393)، "طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن کوچک باندگسترده با استفاده از ساختار متامتریال"، ششمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، گناباد، ایران
9. Brun, M.; S. Guenneau; and A.B. Movchan "Achieving control of in-plane elastic waves". Appl. Phys. Lett., vol. 94 (61903), pp. 1–7, Feb.2009
 10. Rainsford, Tamath J.; D. Abbott; Abbott, Derek. Al-Sarawi, Said F, ed. "T-ray sensing applications: review of global developments". Proc. SPIE. Smart Structures, Devices, and Systems II. Conference Location: Sydney, Australia 2004-12-13: The International Society for Optical Engineering. 5649 Smart Structures, Devices, and Systems II (Poster session): 826–838, Mar.2005
 11. Cotton, Micheal G., "Applied Electromagnetics", 2003 Technical Progress Report (NITA – ITS). Boulder, CO, USA: NITA – Institute for Telecommunication Sciences. Telecommunications Theory (3), 4–5, Dec.2003 Retrieved 2009-09-14.
 12. Alici, Kamil Boratay; Özbay, Ekmel, "Radiation properties of a split ring resonator and monopole composite", Physica status solidi (b). 244 (4), pp.1192–1196 , 2007
 13. Hawkes, AM ; Katko, AR ; Cummer, SA , " A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality ". Appl. Phys. Lett., vol. 103 (163901), Oct.2013