

مروری بر انواع فراماده، روش ساخت افزایشی و کاربرد آن در صنعت خودرو

چکیده: پیشوند "meta" در کلمه "metamaterial" در زبان یونانی به معنای "فرا" از ماده است. بنابر این متامتریال یا فرا مواد خواصی فراتر از مواد طبیعی دارند. خواص این مواد از ماده‌ای که از آن تشکیل شده است استخراج نمی‌شود اما خواص آن‌ها وابسته به ساختار آن‌ها است. این ساختار خاص در فرا مواد از تکرار و کنارهم قرارگرفتن اجزا یا آرایه‌های مشابه تولید می‌شود که به آن سلول گفته می‌شود. لذا فرا مواد دارای ساختار بسیار پیچیده است. در نتیجه توانایی بالای تولیدات افزایشی در تولید ساختارهای پیچیده باعث شده توجه‌ها به سمت این تکنولوژی جلب شود. انواع مختلف فرا مواد وجود دارد که به طور کلی به چهار گروه تقسیم می‌شوند که هر کدام کاربرد وسیعی در زمینه‌ها مختلف از جمله صنایع دفاعی، خودرویی، هوافضا و پزشکی دارند. هدف از تدوین این مقاله آشنایی با انواع فرا مواد، سلول‌های متفاوت، کاربردها و روش ساخت این مواد به صورت جامع و دسته بندی شده است. این مقاله همچنین به طور خاص کاربرد انواع فرا مواد را در صنعت خودرو بررسی کرده است.

واژه های راهنما: فرا ماده، پرینتر سه بعدی، پرینتر چهار بعدی، پرینتر پنج بعدی، صنعت خودرو.

شکوه دزبانیان

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمد آزادی*

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه سمنان، سمنان

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

Shokouh Dezania
MSc. Student

Mohammad

Azadi*

Associate Professor
Faculty of Mechanical
Engineering, Semnan
University, Semnan

A review on metamaterial types, additive manufacturing technique and its application in automotive industry

Abstract: The prefix "meta" in "metamaterial" is the Greek word, which means beyond the material. Therefore, metamaterials have properties beyond natural materials. The properties of these materials are not affected by the material from which they are composed, however, their properties depend on their structure. This particular structure in metamaterials is produced by the repetition of similar components or arrays called cells. Therefore, metamaterials have a very complex structure. As a result, the high ability of additive manufacturing to fabricate complex structures has drawn attention to this technology. There are different types of metamaterials that are generally divided into four groups, each of which is widely used in various fields, including defense, automotive, aerospace, and medicine. The purpose of compiling this article is to get acquainted with the types of metamaterials, different cells, applications, and methods of manufacturing these materials comprehensively and categorized. This article also specifically examines the application of metamaterials in the automotive industry.

Keywords: Metamaterial, 3D-printer, 4D-printer, 5D-printer, Automotive industry.

۱- مقدمه

۱-۲- فرامواد الکترومغناطیسی

میدان الکترومغناطیسی با توجه به خصوصیات ماکروسکوپی گذردهی الکتریکی^۱ (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی^۲ (μ) مواد تعیین می‌شود. مواد بر اساس این دو پارامتر، در چهار گروه، مطابق شکل ۱ طبقه‌بندی می‌شوند. لذا فرامواد الکترومغناطیسی، در گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند.

فرامواد یک منفی (SNG)^۳ این فرامواد یا دارای ϵ یا μ منفی می‌باشند. این فرامواد به دلیل ماهیت پراکندگی، قابلیت تغییر پارامترهایی همچون ضریب شکست، گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی با تغییر فرکانس را دارند.

فرامواد دو منفی (DNG)^۴: موادی که ϵ و μ منفی دارند. ترکیبی از دو لایه SNG در یک لایه شکل دیگری از مواد فرعی DNG را ایجاد می‌کند. این مواد به عنوان فرامواد شاخص منفی نیز شناخته می‌شوند. نام‌های دیگر DNGها مواد چپ دست و یا موادی با ضریب شکست منفی است.

انواع دیگر فرامواد الکترومغناطیسی نیز، وجود دارد که عبارتند از:

- فرامواد الکترومغناطیسی با فاصله باند^۵
- فرامواد دوگانه ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک^۶
- فرامواد کایرال^۷
- فرامواد تراهرتز^۸

از کاربردهای فراماد الکترومغناطیسی در صنعت خودرو می‌توان به سیستم‌های ایمنی اشاره کرد. برای سیستم‌های ایمنی معمول کنترل کروز، یک میدان دید که حدود ۲۰ درجه را در محدوده ۱۵۰ متر در یک باند موج میلی متر (۷۶-۷۷ گیگاهرتز) پوشش می‌دهد لازم است. با این حال، سیستم‌های جدید کروز کنترل که با استفاده از فرامواد طراحی می‌شوند به میدان دید تا ۶۰ درجه در دامنه ۶۰ متر نیاز دارند [۵]. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، فرامواد مغناطیسی کاربردهای دیگری نیز در صنعت خودرو دارند از جمله سیستم نشان‌دهنده فشار لاستیک و موارد دیگر که در شکل ۲، به صورت موردی نشان داده شده است.

۲-۲- فرامواد اکوستیک

پیشوند "meta" در کلمه "metamaterial" در زبان یونانی به معنای "فراتر" از ماده است. بنابراین متامتریال یا فرامواد خواص عجیب و غریب و فراتر از مواد طبیعی دارند. خواص فرامواد از ماده‌ای که از آن تشکیل شده است، استخراج نمی‌شود اما خواص آن‌ها وابسته به ساختار آن‌ها است. فرامواد به دست بشر به گونه‌ای تولید می‌شوند که دارای خواص غیرمعمولی باشند که در طبیعت یافت نمی‌شود. نمونه‌های محدود فرامواد طبیعی مثل چوب پنبه با ضریب پواسون نزدیک به صفر و تحت فشار، انبساط جانبی کمی را نشان می‌دهد [۱].

انواع مختلف فرامواد تا کنون طراحی شده است اما چیزی که در بین فرامواد مشترک است، مفهوم سلول است. فراماده‌ها از تکرار و کنارهم قرارگرفتن جزها یا آرایه‌های مشابه تولید می‌شوند. کوچکترین آرایه واحد تکراری، سلول نام دارد. ساختارهای سلولی به طور گسترده در سیستم‌های طبیعی، از جمله چوب، استخوان انسان و منقار پرندگان گسترش یافته است. مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد با الهام گرفتن از طبیعت می‌توان ساختارهای سلولی را به نحوی طراحی کرد که ویژگی‌های مکانیکی مانند وزن سبک، جذب انرژی زیاد، کنترل ارتعاش و عملکرد گرمایی پیشرفته را به دست آورد [۲].

اصلی‌ترین هدف این مقاله مروری بر فرامواد، دسته‌بندی و معرفی آن‌ها است. هدف دوم مقاله نیز کاربرد فرامواد در صنعت خودرو است. هر کدام از انواع فرامواد کاربردی در صنعت خودرو دارند که همگی بیان شده است. بنابراین، می‌توان موارد زیر را به عنوان نکات مهم این پژوهش مطرح نمود:

مطالعه‌ای بر فرامواد، دسته‌بندی و معرفی انواع فرامواد کاربرد فرامواد در صنعت خودرو

۲- انواع فرامواد

به طور کلی فرامواد به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۳].

- فرامواد الکترومغناطیسی
- فرامواد اکوستیک
- فرامواد مکانیکی
- فرامواد حرارتی

⁵ Electromagnetic Band Gap Metamaterials

⁶ Bi-isotropic and Bi-anisotropic Metamaterials

⁷ Chiral Metamaterials

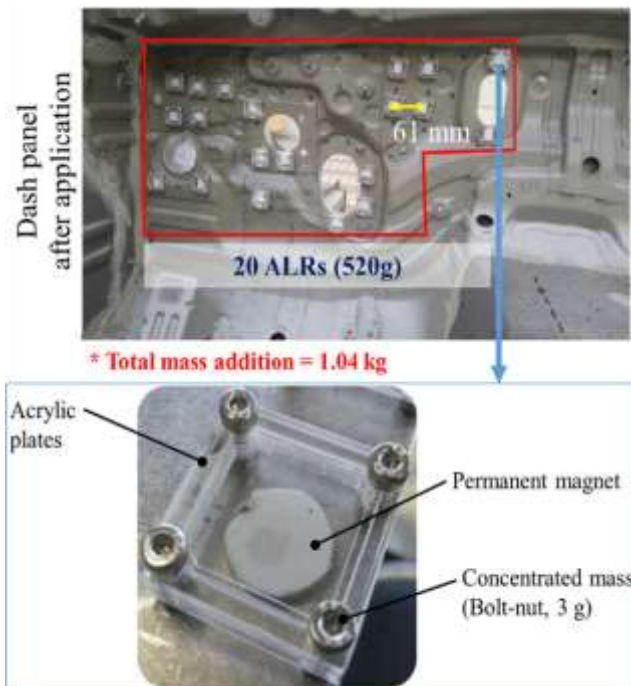
⁸ Terahertz Metamaterials

¹ Permittivity

² Permeability

³ Single Negative Metamaterial (SNG)

⁴ Double Negative Metamaterial (DNG)



شکل ۳ داشبرد و سلول واقعی ساخته شده [۶]

همانطور که قابل مشاهده است، برای ساخت یک سلول اکوستیک از یک صفحه فبری، چهار جرم متمرکز به اندازه ۳ گرم واقع در گوشه‌های صفحه فبری و یک آهنربای دائمی برای اتصال به صفحه داشبرد استفاده شده است. با تکرار این سلول می‌توان داشبرد کامل را تولید کرد.

پس از ساخت داشبرد، ضربه‌ای به آن اعمال شده و پاسخ لرزش و فشار صوتی اندازه‌گیری شده است. در نتایج اندازه‌گیری، تحركات ارتعاشی ۵-۱۳ دسی‌بل و فشارهای صوتی ۷-۱۶ دسی‌بل کاهش یافته است [۶].

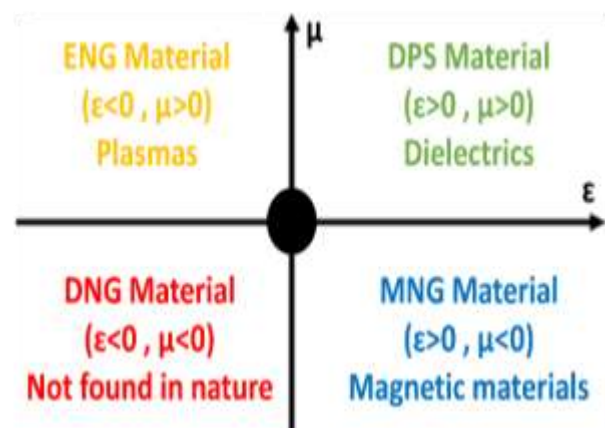
۲-۳- فرامواد مکانیکی

مواد معمولی به طور کلی با چهار ثابت الاستیک، مدول یانگ (E)، مدول برشی (G)، مدول بالک (K) و نسبت پواسون (ν) در ارتباط هستند که سه مورد آخر با سفتی، استحکام و قابلیت فشردگی یک ماده مطابقت دارد. بر این اساس انواع فرامواد مکانیکی به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که عبارتند از [۳،۷]:

- فرامواد با ضریب پواسون منفی یا اگزتیک ($G \gg K$)
- فرامواد با مدول برشی منفی یا پنتامود ($G \ll K$)
- فرامواد با تراکم پذیری و سفتی منفی ($-4G/3 < K < 0$)

فرامواد اکوستیک یا فراصوتی به دلیل کاربردهایی در پنهان کردن، کنترل سروصدا و ارتعاش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد با ساختارهای مختلف تولید شده‌اند و خواصی از جمله ضریب شکست منفی، مدول الاستیک منفی و مدول بالک منفی که در مواد معمولی مقدار مثبتی دارند می‌باشند. این ویژگی می‌تواند منجر به ضریب شکست صوتی منفی و سایر خصوصیات عجیب و غریب شود که در طبیعت یافت نمی‌شود [۱].

از جمله کاربردهای این نوع فرامواد در داشبرد خودرو است. داشبرد دارای یک ساختار بسیار پیچیده است و وظیفه اصلی آن جلوگیری از ورود صدا و لرزش در محفظه موتور به محفظه سرنشین است. در شکل ۳ یک سلول واحد و مجموعه داشبرد ساخته شده به کمک این سلول نشان داده شده است.



شکل ۱ دسته بندی مواد الکترومغناطیسی [۴]



شکل ۲ کاربرد فرامواد در خودرو [۵]

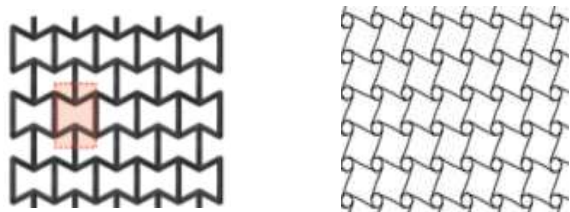
۱-۳-۲- فرامواد اگزتیک

ضریب پواسون نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری است. این نسبت عددی مثبت است و بدین معناست که در اثر اعمال تنش کششی عمودی، اندازه قطعه در راستای نیرو افزایش و در راستای عمود بر نیرو کاهش می‌یابد. از جمله فرامواد مکانیکی، موادی با ضریب پواسون منفی است که با نام اگزتیک شناخته می‌شوند [۱]. اگزتیک‌ها در هنگام اعمال تنش کششی عمودی، در راستای عمود بر نیرو، ضخیم‌تر می‌شوند. همچنین ضریب پواسون صفر که نشان دهنده ثابت ماندن اندازه قطعه در راستای عمود بر نیرو است در این دسته از مواد قرار می‌گیرند. شکل ۴ برای درک بهتر از این موضوع ارائه شده است.

مواد با نسبت پواسون منفی دارای خصوصیات مکانیکی از جمله افزایش مقاومت فرورفتگی، مقاومت در برابر شکستگی، مدول برشی عرضی بالا، خصوصیات دینامیکی پیشرفته مانند: جذب انرژی در اثر ضربه، عملکرد میرایی موج و غیره است [۸]. ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی متعددی برای فرامواد اگزتیک ارائه شده است (شکل ۵).

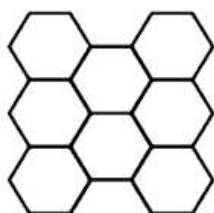
۲-۳-۲- فرامواد پنتامود

فرامواد پنتامود برای اولین بار توسط میلتون و چرکایف در سال ۱۹۹۵ طراحی شد. آن‌ها طراحی به صورت آرایش خاصی از چهار میله مخروطی در یک ساختار شبکه‌ای از نوع الماس را ارائه دادند که میله‌ها فقط در ابتدا و انتها خود و تنها در یک نقطه‌ای به شبکه متصل می‌شوند [۱۶ و ۳]. این شبکه پنتامود در شکل ۶ نشان داده شده است که می‌تواند دارای سطح مقطع‌های مختلف باشد.

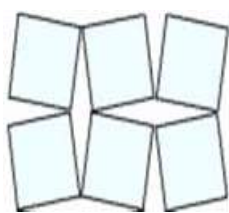


ب

الف



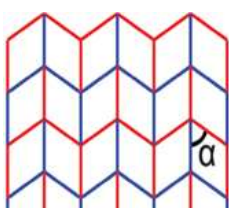
ت



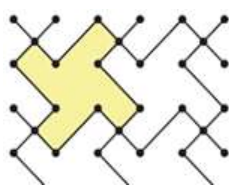
پ



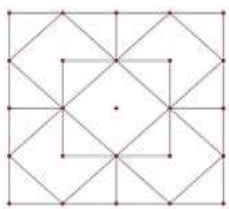
ج



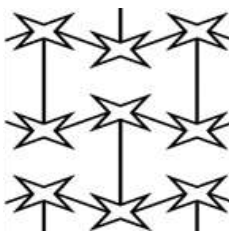
ث



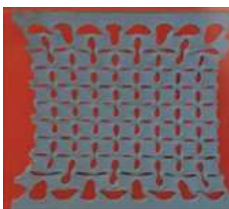
ح



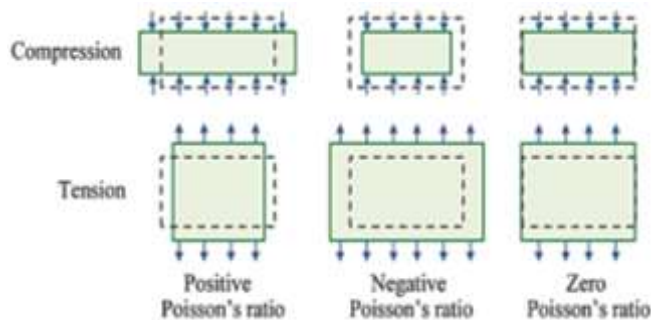
چ



د



خ



شکل ۴ تغییر هندسی تحت ضریب پواسون مثبت، منفی و صفر

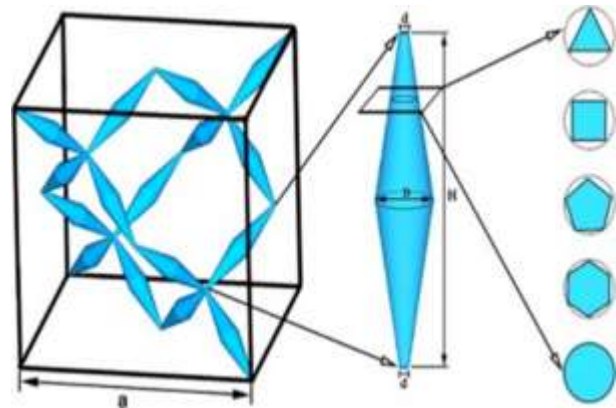
[۸]

شکل ۵ فرامواد اگزتیک (الف) کایرال [۹]، (ب) پاپیونی [۱۰]، (پ) سازه‌های صلب یا نیمه صلب چرخشی [۱۱]، (ت) لانه زنبوری [۱۲]، (ث) اورینگامی [۱۳]، (ج) کریگامی [۱۴]، (چ) فراکتال [۱۵]، (ح) چرخنده ناقص [۱۱]، (خ) بستر الاستیک [۱۱] و (د) ستاره‌ای [۱۰]

فشار است. معمولاً وقتی فشار افزایش می‌یابد، یک ماده از همه جهات منقبض می‌شود.

با این وجود مواد استثنايي وجود دارد که تحت فشار هیدرواستاتیک در یک یا دو جهت منبسط می‌شوند. چنین پدیده‌هایی به ترتیب تحت فشار پذیری خطی منفی و سطح فشار منفی شناخته می‌شوند [۱۹]. شکل ۸ برای درک بهتر از این مفهوم ارائه شده است. با افزایش وسایل نقلیه، تعداد تصادفات رانندگی نیز در حال افزایش است که خسارت جبران‌ناپذیری به زندگی و مال مردم وارد می‌کند. طبق آمار، برخورد جلوی خودرو بیشترین احتمال را در تصادفات دارد.

هنگامی که تصادف از جلو رخ می‌دهد، سیستم سپر، اولین قطعه‌ای است که با جسم برخورد می‌کند. بنابراین، برای بهبود قابلیت‌های ایمنی خودرو در هنگام تصادف و همچنین کاهش آسیب‌دیدگی عابر پیاده، لازم است سیستم سپر مورد مطالعه قرار گرفته شود.



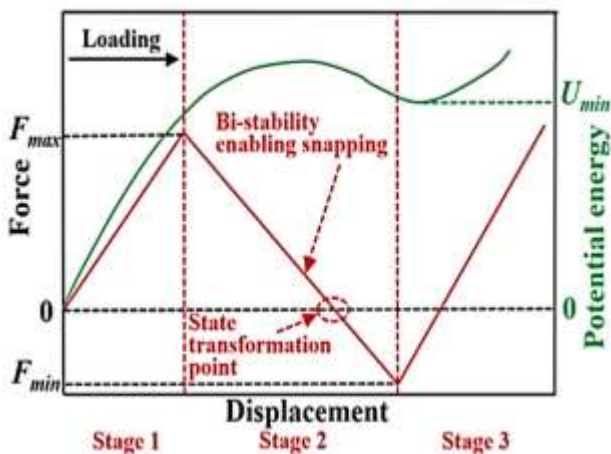
شکل ۶ پنتامود [۱۷]

فرامواد پنتامود نوعی فراماده مکانیکی جامد سه‌بعدی است که به طور مصنوعی طراحی شده تا فقط حالت تنش تک محوری را تحمل کنند. یک فراماده پنتامود از ماتریس کشش مرتبه ششم خود فقط یک مقدار ویژه غیر صفر دارد و بنابراین می‌تواند به راحتی در پنج حالت مستقل مربوط به پنج مقدار ویژه صفر از ماتریس کشش آن تغییر شکل دهد. این نوع فرامواد را می‌توان به عنوان سیال ایده آل در نظر گرفت، مدول برشی G در مقایسه با مدول بالک K تقریباً صفر است. به عبارت دیگر، در چنین ساختاری فشرده‌سازی سخت است اما به راحتی جریان می‌یابد. در واقع آنها ریزساختارهای شبکه‌ای سه‌بعدی هستند که برای تقلید از رفتار مایعات ساخته شده‌اند. در نتیجه پنتامود جامدی است که رفتاری مشابه مایعات دارد. به همین دلیل به آنها مایعات متا نیز گفته می‌شود.

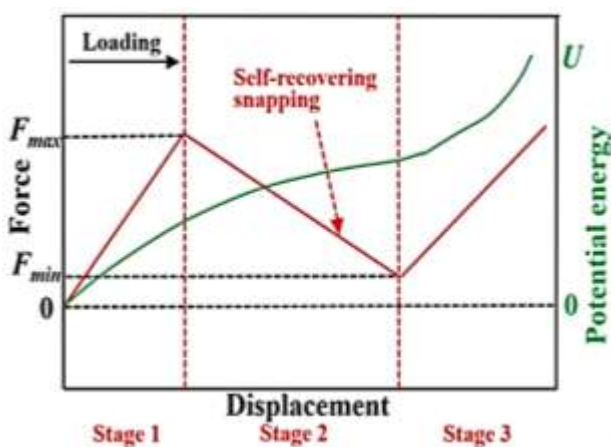
۳-۲-۳- فرامواد با سفتی و تراکم پذیری منفی

این دسته شامل فراموادی است که به طور کلی دارای خواص مکانیکی منفی است. از جمله این خواص می‌توان به سفتی منفی اشاره کرد. NS شاخه بسیار مهمی از فرامواد مکانیکی است. برای سازه‌های معمولی، با افزایش بار، تغییر شکل در امتداد جهت نیرو افزایش می‌یابد، در حالی که برای فرامواد NS، افزایش تغییر شکل منجر به افت بار می‌شود. این رفتار به صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. فرامواد NS به دو دسته تقسیم می‌شوند: فراموادی که با برداشتن بار در حالت تغییر شکل یافته باقی می‌ماند و فراموادی که به شکل اولیه خود برمی‌گردند [۱۸]. شکل ۷ نمودار نیرو-جابه جایی را برای این مواد در دو حالت نشان می‌دهد.

مورد دیگر فراموادی با تراکم‌پذیری منفی است. تراکم‌پذیری تغییر حجم نسبی ماده جامد یا مایع به عنوان پاسخ به تغییر



الف



ب

شکل ۷ شماتیک نمودار نیرو- جابه جایی برای فرامواد NS: (الف)

بازگشت ناپذیر و (ب) بازگشت پذیر [۱۸]

شکل ۹ فرآیند مدل‌سازی سیستم سپر NPR: (a) جاذب سپر متداول، (b) کل سیستم سپر متداول، (c) ساختار سلول واحد جاذب NPR، (d) ساختار سلول واحد تیر NPR، (e) جاذب NPR، (f) تیر NPR، (g) جاذب سپر NPR، (h) کل سیستم سپر NPR، (i) مدل وسیله نقلیه ساده شده، (j) مدل ساق پا، (k) مدل دیوار سخت، (l) مدل برخورد خودرو به ساق پا و (m) مدل برخورد خودرو به دیوار سخت [۲۱]

کاربرد دیگر فرامواد در تایر خودرو است. از زمان انتشار اولین لاستیک دوچرخه بادی تجاری توسط دانلپ در سال ۱۸۸۸، بیش از ۱۰۰ سال است که لاستیک پنوماتیک به دلیل چهار مزیت عمده نسبت به یک لاستیک سفت و سخت در بازار مورد توجه قرار گرفته است: (۱) اتلاف انرژی کم در سطوح ناهموار، (۲) سختی عمودی کم، (۳) فشار تماس کم و (۴) جرم کم. با این حال، لاستیک پنوماتیک معایب مختلفی نیز دارند از جمله: (۱) احتمال خرابی فاجعه بار هنگام رانندگی، (۲) نگهداری لازم برای فشار مناسب داخلی هوا و (۳) روش پیچیده ساخت.

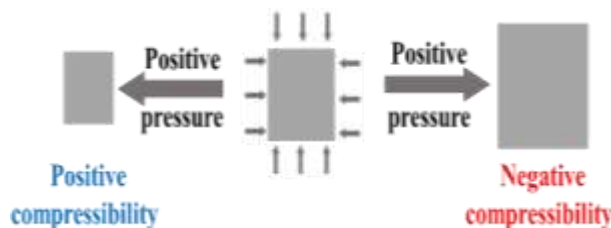
از اوایل دهه ۱۹۲۰، تلاش برای تولید چرخ انعطاف‌پذیر با افزودن سیم به منظور ارائه لاستیک پنوماتیک با کیفیت و در عین حال تضمین ایمنی صورت گرفت. از آن زمان، محققان با پر کردن الاستومر یا ساختن پره‌هایی مانند چند ضلعی برای جایگزینی هوای تایر پنوماتیک، سعی در تولید لاستیک‌های غیرپنوماتیک دارند. اخیراً در رابطه با تایرهای بدون هوا، نوآوری‌هایی صورت گرفته است. NPT ها متشکل از پره‌های چند ضلعی انعطاف‌پذیر و یک لایه الاستومر دارای حلقه‌های داخلی و بیرونی بوجود آمده‌اند.

استفاده از فرامواد مکانیکی لانه زنبوری به عنوان جایگزین هوای یک تایر پنوماتیک پیشنهاد شده است. شکل ۱۰ لاستیک طراحی شده به کمک فراماده را نشان می‌دهد [۲۲].

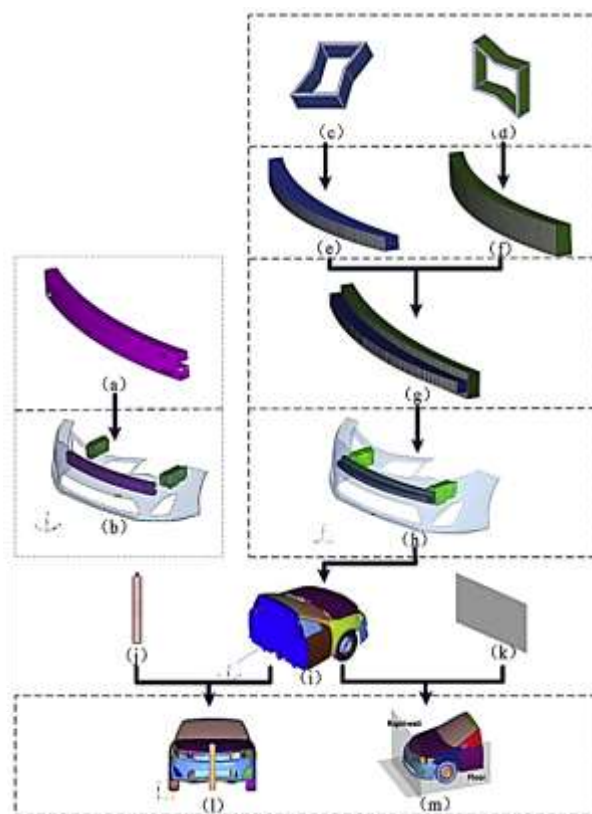
۲-۴- فرامواد با ضریب انبساط حرارتی منفی

به طور کلی، جامدات پس از گرم شدن منبسط می‌شوند، یعنی ضریب انبساط حرارتی مثبت را نشان می‌دهند. با این حال، اقلیت جامدات اثر معکوس، یعنی انقباض در اثر حرارت را نشان می‌دهند. در واقع این مواد دارای انبساط حرارتی منفی می‌باشند [۲۳]. مواد خاصی دارای این خاصیت می‌باشد از جمله می‌توان به Sm₂75C60 با ضریب انبساط حرارتی معادل ۱۰۰- اشاره کرد [۲۴].

امروزه، تحقیقات در مورد سیستم سپر به طور عمده از طریق بهینه‌سازی ساختار یا استفاده از مواد خاص متمرکز شده است. از نظر بهینه‌سازی ساختار، تابع هدف، بهینه‌سازی شکل یا ضخامت مقطع سیستم سپر است. بنابراین، با استفاده از فرامواد مکانیکی اگزتیک در سپرها نوع جدیدی از سپر تولید شده است. این سیستم سپر شامل یک تیر و یک جاذب با ضریب پواسون منفی است تا قابلیت تصادف از جلو در خودرو را بهبود بخشد و همچنین از عابر پیاده محافظت کند. شکل ۹ سلول واحد استفاده شده و سپر تولید شده به این روش و استفاده آن در خودرو را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود از یک صفحه تخت و یک میله به عنوان نمونه برای شبیه‌سازی تصادف با دیوار و پای انسان استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که عملکرد جامع سیستم سپر NPR بهینه‌سازی شده به طور موثری بهبود یافته است و عملکردهای بسیار خوبی را هم در حفاظت از عابر پیاده و هم در تصادفات خودرو دارد [۲۱].

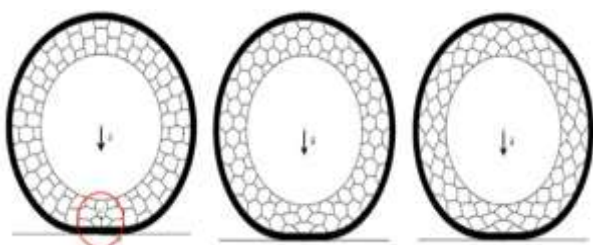


شکل ۸ تراکم پذیری مثبت و منفی [۲۰]

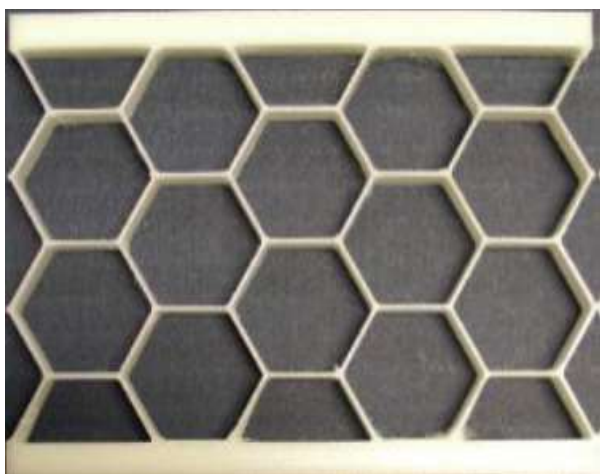


۳- روش تولید فرامواد

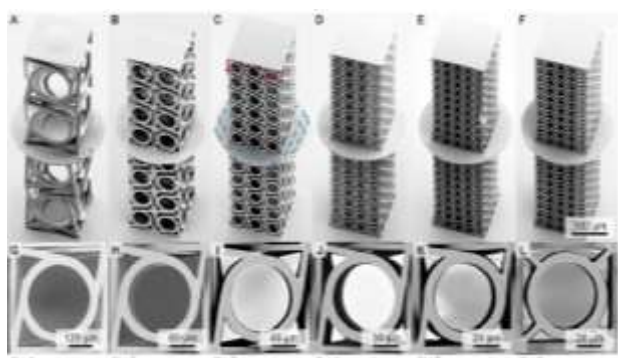
ساخت فرامواد اگزتیک و پنتامود مورد استفاده قرا گرفته است. شکل ۱۲ یک نمونه فراماده صلب چرخشی ساخته شده به این روش را نشان می‌دهد. این فراماده می‌تواند در هر کرنش محوری بیش از ۲ درجه بچرخد [۲۸].



شکل ۱۰ لاستیک خودرو طراحی شده با فراماده لانه زنبوری [۲۲]



شکل ۱۱ فراماده مکانیکی ساخته شده به روش FDM [۲۷]



شکل ۱۲ فراماده مکانیکی صلب چرخشی ساخته شده به روش پلیمریزاسیون [۲۸].

۳-۱-۳- ماده پرانی ۳

از آنجایی که فرامواد به دست بشر ساخته می‌شوند و خصوصیات غیر معمول خود را نه بر اساس جنس ماده، اما بر اثر ساختار خود به دست می‌آورند، می‌توان پی برد انتخاب روش ساخت یک انتخاب حیاتی برای فرامواد به شمار می‌آید. این گونه مواد از چیدمان سلول‌ها یا شبکه‌های پیایی و تکراری از مواد مختلف حاصل می‌شوند. لذا دارای ساختار پیچیده می‌باشند. پیشرفت‌های اخیر در فرآیندهای تولید افزایشی، به عنوان مثال چاپ سه‌بعدی، ساخت ساختارهای سلولی را با توپولوژی‌های کاملاً مشخص امکان پذیر کرده است. علاوه بر این پرینترها توانایی تولید طیف وسیعی از مواد را نیز شامل می‌شوند [۲۵].

۳-۱-۱- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینترهای سه‌بعدی

تولید افزایشی که به پرینتر سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود شامل ۷ فرآیند متفاوت است که هر کدام دارای ویژگی‌ها منحصر به فرد است. در تمام این فرآیندها، قطعه مورد نظر با اضافه کردن مواد به صورت لایه به لایه به یکدیگر تولید می‌شوند. لازم به ذکر است در این فرآیندها نازل و صفحه ساخت جمعا در سه راستا و در دستگاه‌های مختصات مختلف مانند کارتیزین و قطبی حرکت می‌کنند [۲۶].

۳-۱-۱-۱- اکستروژن ماده

فرآیند کانونی در این روش ساخت رشته‌های مذاب ۱ است. ساخت رشته‌های مذاب، که با نام تجاری مدل‌سازی لایه‌ای مذاب (FDM) ۲ نیز شناخته می‌شود، پرکاربردترین روش چاپ اکستروژن ماده است. در شکل ۱۱ نوعی فراماده مکانیکی ساخته شده به روش FDM نشان داده شده است. در این ساختار مکانیسم خرابی، جذب انرژی و قابلیت چند ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۱].

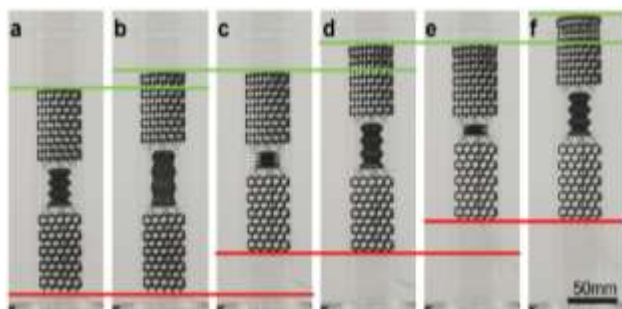
۳-۱-۲- پلیمریزاسیون

فرآیند پلیمریزاسیون بیشتر از سایر فرآیندهای تولید افزایشی مورد استفاده قرار گرفته است. این فرآیند به طور گسترده برای

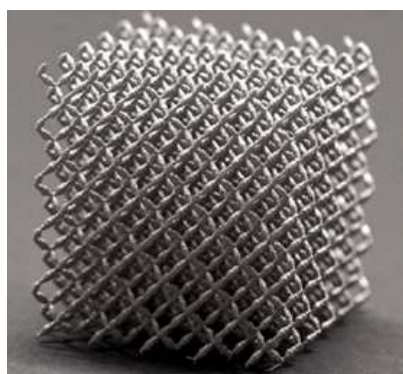
³ Material Jetting

¹ Fused Filament Fabrication (FFF)

² Fused Deposition Modeling (FDM)



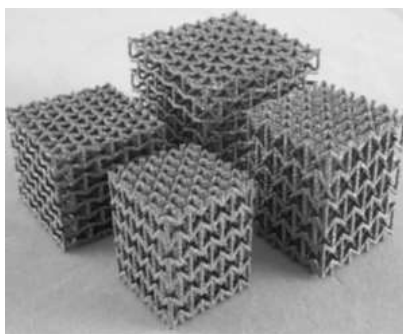
شکل ۱۳ فراماده مکانیکی پلیمری ساخته شده به روش ماده پرانی [۲۹]



الف



ب



ج

شکل ۱۴ فراماده مکانیکی ساخته شده به روش جوش بستر پودری: (الف) پنتامود ساخته شده به روش SLM [۳۰]، (ب) قطعه ساخته شده به روش SLS [۳۱] و (ج) قطعه ساخته شده به روش EBM [۳۲]

بیشتر ساختارهای فرامادی سه بعدی با کاربرد در جذب انرژی و کنترل ارتعاش با استفاده از فرآیند ماده پرانی طراحی و ساخته شده اند (شکل ۱۳).

۳-۱-۴- جوش بستر پودری^۱

این فرآیند شامل زیرمجموعه‌های مختلف از جمله پالایش انتخابی لیزر (SLS)^۲ که توانایی تولید فلزات و پلاستیک‌ها را دارد، ذوب لیزر انتخابی (SLM)^۳ و ذوب پرتو الکترونی (EBM)^۴ است. فرآیند SLM اغلب برای ساخت سازه‌های شبکه‌ای فلزی برای کاربردهای مختلف از جمله خودرو و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. SLM همچنین برای ساخت سازه‌های اگزتیک و پنتامورد مورد استفاده واقع شده است. شکل ۱۴ نمونه‌های مختلف ساخته شده با این فرآیند را نشان می‌دهد. [۱]

۳-۲- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینتر

چهاربعدی

پرینت چهاربعدی برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ معرفی شد و توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله مواد هوشمند و زیست پزشکی، به خود جلب کرد. پرینت چهاربعدی به عنوان پرینت سه بعدی در طول زمان تعریف می‌شود. در واقع در این فرآیند بعد چهارم زمان است. تفاوت عمده در مورد پرینت چهاربعدی نسبت به پرینت سه بعدی توانایی تغییر شکل قطعه در طول زمان است. در این فرآیند با اعمال یک نیرو خارجی در جسم، تغییر شکل ایجاد می‌شود، سپس با اعمال یک نوع محرک خارجی مانند دما، نور، pH، رطوبت یا سایر محرک‌های محیطی به قطعه‌ای که به روش سه بعدی تولید شده و تغییر شکل یافته، قطعه به شکل اولیه خود باز می‌گردد [۳۳].

³ Selective Laser Melting (SLM)

⁴ Electron Beam Melting (EBM)

¹ Powder Bed Fusion

² Selective Laser Sintering (SLS)

در گام بعدی می‌توان با استفاده از روش بهینه‌سازی توپولوژی، برای بهینه نمودن ساختار سلولی فرامواد با قیود و یا توابع هدف استحکام، وزن، عمر خستگی و قابلیت اطمینان اقدام نمود. پس از نهایی کردن هندسه نیز، با یکی از روش‌های تولید افزایشی همچون پرینترهای سه‌بعدی، چهاربعدی و پنج‌بعدی برای تولید فرامواد استفاده کرد.

۵- مراجع

- [1] M. Askari, D. Hutchins, P. Thomas, L. Astolfi, R. Watson, M. Abdi, M. Ricci, S. Laureti, L. Nie, S. Freear, R. Wildman, C. Tuck, M. Clarke, E. Woods, A. Clare, Additive Manufacturing of Metamaterials: A review, Additive Manufacturing, Vol. 36, Article No. 101562, (2020).
- [2] T. Li, X. Hu, Y. Chen, L. Wang, Harnessing out-of-plane deformation to design 3D architected lattice metamaterials with tunable Poisson's ratio, Scientific Reports, Vol. 7, Article No. 8949, (2017).
- [3] F. Junxiang, Z. Lei, W. Shuashuai, Z. Zhi, C. Seung-Kyum, S. Bo, S. Yusheng, A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends, Materials Today, (2021), doi: 10.1016/J.MATTOD.2021.04.019.
- [4] G. Singh, A. Rajni, A. Marwaha, A Review of Metamaterials and its Applications, International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 19, No. 6, pp. 305–310, (2015).
- [5] R. Liu, C. Ji, Z. Zhao, T. Zhou, Metamaterials: Reshape and Rethink, Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 179–184, (2015).
- [6] J. Jung, H. Kim, S. Goo, K. Chang, S. Wang, Realization of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 122, pp. 206–231, (2019).
- [7] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, Progress in Materials Science, Vol. 94, pp. 114–173, (2018).
- [8] K. Liu, L. Hand, W. Hua, L. Ji, S. Zhua, Z. Wan, X. Yang, Y. Wei, Z. Dai, Z. Zhao, Z. Li, P. Wang, R. Tao, 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching function of mechanical and vibration isolation performance, Materials and Design, Vol. 196, Article No. 109153, (2020).
- [9] Q. Qi, P. Zhang, W. Wu, K. Xin, H. Liao, Y. Li, D. Xiao, R. Xia, Innovative 3D chiral metamaterials under large deformation: Theoretical and

عملکرد مکانیکی فرامواد معمولی برگشت ناپذیر است و نمی‌تواند تغییرات محیط را درک و پاسخ دهد. با این حال بر اساس روش چاپ چهاربعدی پلیمرهای حافظه شکل، فراماده‌هایی ایجاد شده است که می‌تواند تغییرات دما را حس کرده و خواص مکانیکی را تغییر دهد. این مواد با نسبت پواسون صفر طراحی شده است و قابلیت برگشت‌پذیری به حالت اولیه خود را دارد [۸].

۳-۳- فرامواد مکانیکی ساخته شده به روش پرینتر پنج‌بعدی

پرینت پنج‌بعدی شاخه جدیدی از تولید مواد افزایشی است. این فناوری در سال ۲۰۱۶ توسط دانشگاه‌های آمریکایی معرفی شد. در این فناوری، نازل و صفحه ساخت جمعاً دارای پنج درجه آزادی هستند. در فناوری‌های پرینت سه بعدی حرکت در محورهای X ، Y و Z منجر به تولید قطعه می‌شود. در این پرینترها نازل از لایه‌ای به لایه دیگر منتقل می‌شود و مقدار نازکی از فیلامنت اکستروود شده را رسوب می‌کند، در واقع قطعه به برش‌های مسطح تقسیم شده و سپس آن را پرینت می‌کند. این بدان معنی است که طراحی‌ها می‌توانند به شدت محدود شوند. درحالی که در پرینترهای پنج بعدی علاوه بر حرکت در این سه راستا، حرکت چرخشی حول دو محور نیز وجود دارد. این حرکات باعث می‌شود نازل توانایی تولید لایه‌های منحنی به جای لایه‌های مسطح در پرینت سه بعدی را داشته باشند. یکی دیگر از مزایای مهم این فناوری جدید استفاده از مواد ۲۵ درصد کمتر در مقایسه با پرینت سه بعدی است. همچنین تولید اجسام پیچیده و مستحکم‌تر نسبت به قطعات ساخته شده به روش سه بعدی از مزیت‌های این فرآیند به حساب می‌آید [۳۴]. با توجه به مزایای بیان شده برای پرینترهای پنج‌بعدی می‌توان نتیجه گرفت این فرآیند نیز مانند پرینترهای سه‌بعدی قابلیت بالایی برای تولید انواع فرامواد با خواص بهبودیافته را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به معرفی انواع فرامواد و کاربرد آنها در صنعت خودرو پرداخته شد. این کاربردها شامل موارد مختلفی از جمله سیستم‌های امنیتی، سیستم‌های اندازه‌گیری، سپر، تایر و سایر قطعات خودرو می‌باشد. علاوه بر این، فرامواد کاربردهایی از جمله جذب انرژی، سر و صدا و ارتعاش را نیز به همراه دارد. برای ساخت این مواد می‌توان از الگوهای از پیش تعریف شده و یا با الهام گرفتن از طبیعت (ساختارهای سلولی)، طرحی را پیشنهاد نمود.

- [20] R. Gatt, J. Grima, Negative compressibility, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, Vol. 2, pp. 236–238, (2008).
- [21] C. Wang, W. Wang, W. Zhao, Y. Wang, G. Zhou, Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 153, pp. 78–96, (2018).
- [22] J. Ju, D. Kim, K. Kim, Flexible cellular solid spokes of a non-pneumatic tire, *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 2285–2295, (2012).
- [23] W. Miller, C. Smith, D. Mackenzie, K. Evans, Negative thermal expansion: a review, *Journal of Materials Science*, Vol. 44, pp. 5441–5451, (2009).
- [24] K. Takenaka, Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 13, pp. 013001, (2012).
- [25] S. Montgomery, X. Kuang, C. Armstrong, H. Qi., Recent advances in additive manufacturing of active mechanical metamaterials, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 24, Article No 100869,(2020).
- [26] Standard Document, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, Standard No. F2792, ASTM International, (2012).
- [27] M. Bodagh, A. Damanpack, G. Hu, W. Liao, Large Deformations of Soft Metamaterials Fabricated by 3D Printing, *Materials and Design*, Vol. 131, pp. 81–91, (2017).
- [28] T. Frenzel, M. Kadic, M. Wegener, Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist, *Science*, Vol. 358, pp. 1072–1074, (2017).
- [29] G. Andrew, P. Stefano, Q. Tian, F. Peer, Auxetic metamaterial simplifies soft robot design, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (2016), DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487701.
- [30] R. Hedayati, A. Leeflang, A. Zadpoor, Additively manufactured metallic pentamode meta-materials, *Applied Physics Letters*, Vol. 110, Article No. 91905, (2017).
- [31] Y. Shangqin, S. Fei, B. Jiaming, K. Chee, W. Jun, Z. Kun, 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization, *Materials and Design*, Vol. 120, pp. 317–327, (2017).
- [32] Y. Li, H. Ola, C. Denis, W. Harvey, Additive Manufacturing of Metal Cellular Structures: Design and Fabrication, *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 67, pp. 608–615, (2015).
- experimental analysis, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 202, pp. 787–797, (2020).
- [10] Y. Xin, H. Wang, C. Wang, S. Cheng, Q. Zhao, Y. Sun, H. Gao, F. Ren, Properties and tunability of band gaps in innovative reentrant and star-shaped hybrid honeycomb metamaterials, *Results in Physics*, Vol. 24, Article No. 104024, (2021).
- [11] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto, Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review, *Materials and Design*, Vol. 180, Article No 107950, (2019).
- [12] J. Shabanpour, S. Beyraghi, H. Oraizi, Reconfigurable honeycomb metamaterial absorber having incident angular stability, *Scientific Reports*, Vol. 10, Article No. 14920, (2020).
- [13] J. Silverberg, A. Evans, L. McLeod, R. Hayward, T. Hull, C. Santangelo, I. Cohen, Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials, *Science*, Vol. 345, pp. 647–650, (2014).
- [14] Y. Tang, G. Lin, S. Yang, Y. Yi, R. Kamien, J. Yin, Programmable Kiri-Kirigami Metamaterials, *Advanced Material*, Vol. 29, Article No. 1604262, (2017).
- [15] A. Tran, M. Tran, Y. Wang, Constrained mixed-integer Gaussian mixture Bayesian optimization and its applications in designing fractal and auxetic metamaterials, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 59, pp. 2131–2154, (2019).
- [16] Z. Li., Z. Luo, L. Zhang, C. Wang, Topological design of pentamode lattice metamaterials using a ground structure method, *Materials & Design*, Vol. 202, Article No. 109523, (2021).
- [17] Y. Huang, X. Lu, G. Liang, Z. Xu, Pentamodal property and acoustic band gaps of pentamode metamaterials with different cross-section shapes, *Physics Letters A*, Vol. 380, No. 13, pp. 1334–1338, (2016).
- [18] B. Chen, L. Chen, B. Du, H. Liu, W. Li, D. Fang, Novel multifunctional negative stiffness mechanical metamaterial structure: Tailored functions of multi-stable and compressive mono-stable, *Composite Part B Engineering*, Vol. 204, Article No. 108501, (2021).
- [19] X. M. Yiy, Y. Xiaoying, S. Jiahu, Y. Xiaolei, G. Arash, R. Jianhua, H. Xiaodong, Z. Shiwei, Designing orthotropic materials for negative or zero compressibility, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 4038–4051, (2014).

[34] S. Dezianian. M. Azadi, S.M. Esfarjani. An overview of the incremental production process with five-dimensional printers and their applications, Vol. 6, No. 1, pp. 51- 60 (in Persian فارسی)

[33] P. Rastogi, B. Kandasubramanian, Breakthrough in the printing tactics for stimuli-responsive materials: 4D printing, Chemical Engineering Journal, Vol. 366, pp. 264–304, (2019).