

واژه‌های کلیدی:

فرامواد،
تولید افزایشی،
طراحی و ساخت،
چاپگر سه بعدی،
بهینه‌سازی توپولوژی

مروری بر کاربردها، فرایندهای طراحی و ساخت فرامواد با استفاده از فنون تولید افزایشی و چاپگرهای سه بعدی

محمد آزادی*

سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده ...

در این مقاله، مروری بر فرایندهای طراحی و ساخت فرامواد با استفاده از فنون تولید افزایشی و چاپگرهای سه بعدی، پرداخته شده است. در ادامه نیز، به کاربردهای این گونه مواد در قالب مهندسی مکانیک جامدات و شاخه‌های مرتبط با آن، اشاره شده است. در اولین گام، طراحی این گونه فرامواد می‌تواند با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی به صورت نرم‌افزاری به همراه روش اجزای محدود انجام پذیرد. تابع هدف برای بهینه‌سازی ریاضی، معمولاً خواص غیرمعمول ماده همچون ضریب پواسون صفر یا منفی و ضریب انبساط حرارتی صفر یا منفی است. پس از تعیین شکل و هندسه پیچیده آن‌ها، به کمک روش‌های ساخت افزایشی و چاپگرهای سه بعدی، فرامواد پلیمری، قابل ساخت هستند.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

m_azadi@semnan.ac.ir

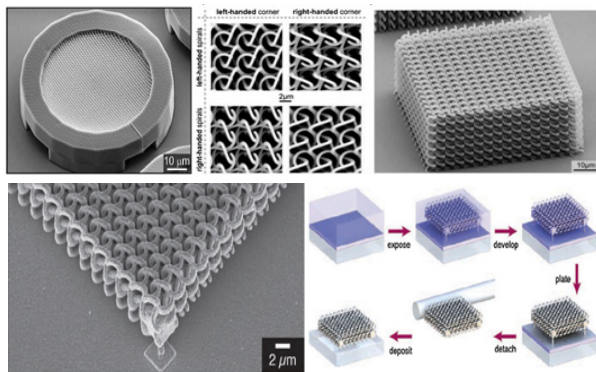
۱ مقدمه

پیشوند متا (Meta) کلمه‌ای یونانی، به معنی فراتر است. لذا فرامواد، موادی هستند که خواص مکانیکی، اکوستیکی و نوری جدیدی دارند [۱]. اصطلاح فراماده، به صورت آرایش عناصر ساختاری مصنوعی، طراحی شده برای دستیابی به خواص الکترومغناطیسی سودمند و البته غیرمعمول، تعریف شده است [۲]. بر اساس این تعریف، فرامواد به گونه‌ای طراحی و تولید می‌شوند که خصوصیات غیرمعمولی داشته باشند. یکی از نمونه‌های طبیعی، چوب پنبه است که نسبت پواسون تقریباً صفر دارد. به عبارت دیگر، تحت فشار، این ماده انبساط جانبی کمی نشان می‌دهد [۱]. بنابراین، هندسه و ساختار ماده و حتی متاتم‌های سازنده آن، می‌تواند روی خواص مکانیکی همچون ضریب الاستیک نیز، تأثیرگذار باشد [۳].

بر این اساس، تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه خواص فرامواد انجام شده است. تعداد و نوع مستندات علمی به چاپ رسیده در این زمینه مطالعاتی، مطابق با آمار درج شده در وب‌سایت لنز، در شکل (۱)، نمایش داده شده است. جالب است که تقریباً از سال ۲۰۰۰، مستندات بیشتر به صورت مقاله، چاپ شده‌اند. سیر این تحقیقات همچنان صعودی است که نشان از جدید بودن موضوع و مرز دانش بودن آن است. به طور تقریبی، میانگین تولید مستندات علمی، چاپ ۱۰ مقاله در روز است [۱].

۲ کاربرد فرامواد

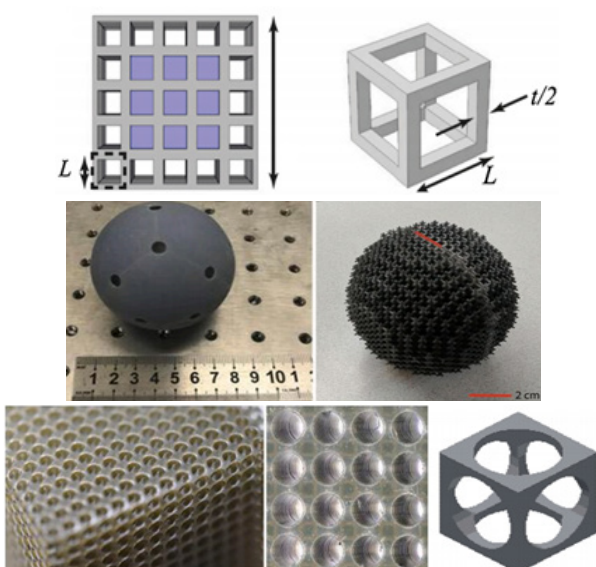
به طور کلی، کاربردهای این فرامواد شامل جاذب‌های پلاسمونیک [۴]، بلورهای فوتونیک [۵-۷]، عدسی‌های با شاخص منفی [۸]، آنتن‌ها [۹-۱۰]، بلورهای آوایی [۱۱] و لنزهای صوتی [۱۲-۱۳] هستند. لذا این مواد کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارند. در شکل‌های (۲) و (۳)، نمونه‌ای از



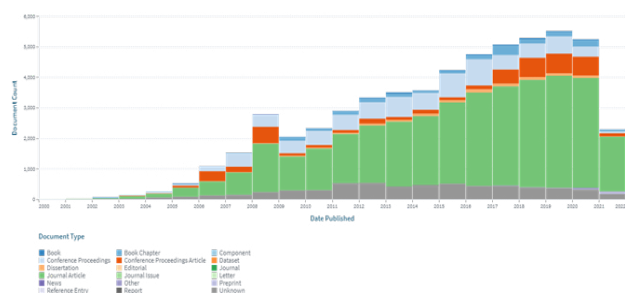
شکل ۲ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده الکترومگنت در بلور فوتونیک [۱].

کاربردهای فرامواد در بلور فوتونیک، سازه صوتی و بلور آوایی نمایش داده شده است.

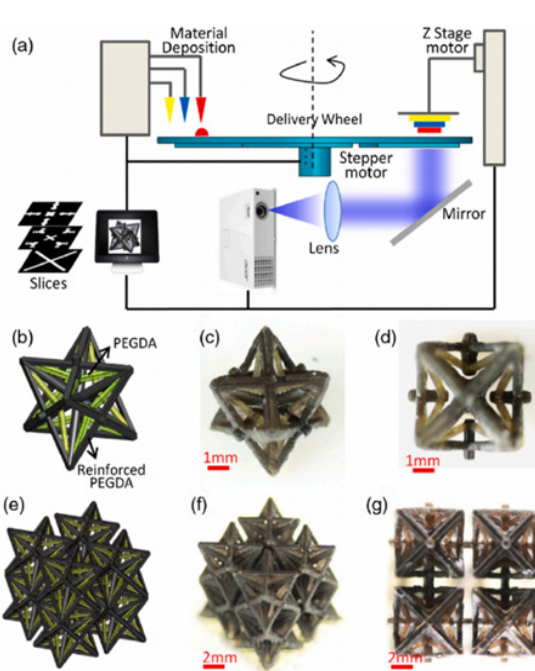
در این مقاله، بیشتر تأکید بر کاربردهای فرامواد در زمینه مهندسی مکانیک جامدات است. بر این اساس، فرامواد مکانیکی با نسبت پواسون منفی، امروزه مورد توجهند. هرچند روش ساخت آن‌ها، پیچیدگی‌های خاص خود را دارد اما توسعه فنون تولید افزایشی (Additive Manufacturing) با چاپگرهای سه‌بعدی، امکان ساخت فرامواد با هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده است. لذا مزایای این گونه روش‌های جدید تولید، می‌تواند



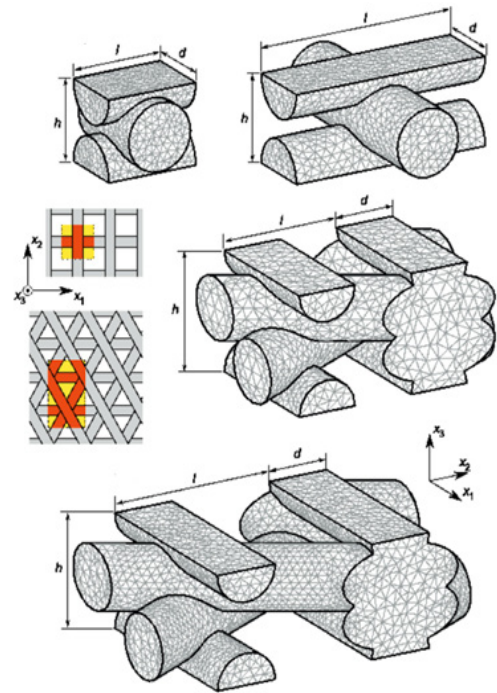
شکل ۳ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده صوتی در بلور آوایی [۱].



شکل ۱ آمار تعداد و نوع مستندات علمی در زمینه مطالعاتی فرامواد (www.lens.org).



شکل ۶ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده مکانیکی با ضریب انبساط حرارتی منفی [۱۵].



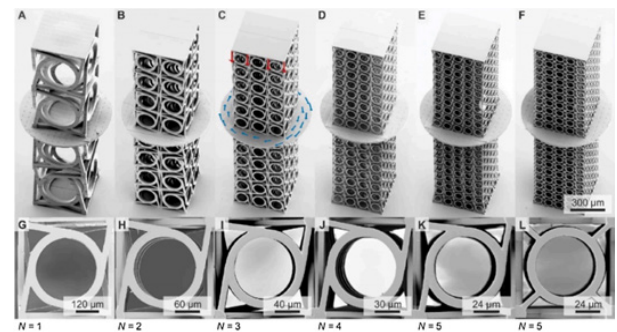
شکل ۴ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده در داربست برای مهندسی بافت [۱۱].

فرامواد مکانیکی با ضریب انبساط حرارتی صفر یا حتی منفی، ایجاد کردند (شکل ۶). محققان دیگری، بازده جذب انرژی توسط سازه فرامادی (ساخته شده از پلیمر PMMA) را تا ۱۱ درصد نسبت به فوم آلومینیومی افزایش دادند [۱۶، ۱]. باور (Bauer) و همکاران [۱۷]، رفتار فشاری فرامواد پلیمری و کامپوزیت پلیمری تقویت شده با سرامیک با ساختار شبکه‌ای توخالی از سرامیک (اکسید آلومینیوم) در مقیاس نانو را مقایسه کردند (شکل ۷).

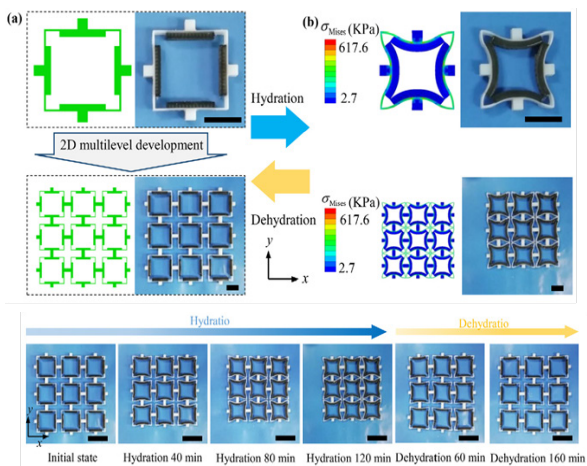
لیو (Liu) و همکاران [۱۸]، فراماده‌ای با ضریب پواسون صفر را برای عملکرد مکانیکی و ارتعاشی، طراحی کرده، با چاپگر چهاربعدی (شامل چاپگر سه بعدی به همراه خواص حافظه شکلی پلیمرها) ساختند. سپس آزمون فشار و شبیه سازی اجزای محدود را روی نمونه‌های فرامواد طراحی شده خود، اجرا کردند (شکل ۸). تحلیل و طراحی فراماده هیدروژلی با ضریب انبساط آب پوشی (Hydration Expansion) منفی، توسط وی (Wei) و همکاران [۱۹]، صورت گرفت. نتایج عددی و تجربی آن‌ها برای فراماده هیدروژلی دوبعدی و سه بعدی، به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰)، نمایش داده شده است. شایان گفتن است که در مواد با ضریب انبساط آب پوشی منفی، با جذب رطوبت، سازه منقبض شده و با حذف رطوبت، منبسط می‌شوند. کاربرد این

باعث استفاده فراگیرتر از فرامواد در آینده، حتی با هندسه‌های بسیار پیچیده تر (با به کارگیری چاپگرهای پنج بعدی) شود. در شکل (۴)، نمونه‌ای داربست با کاربرد مهندسی بافت نشان داده شده است.

فرنزل (Frenzel) و همکاران [۱۴]، فرامواد مکانیکی‌ای را طراحی کرده و با روش تولید افزایشی پلیمری شدن ساخته‌اند که قادر به چرخش تا ۲ درجه بر درصد کرنش، تحت فشار محوری است (شکل ۵). کادیک (Kadic) و همکاران [۱۵]،



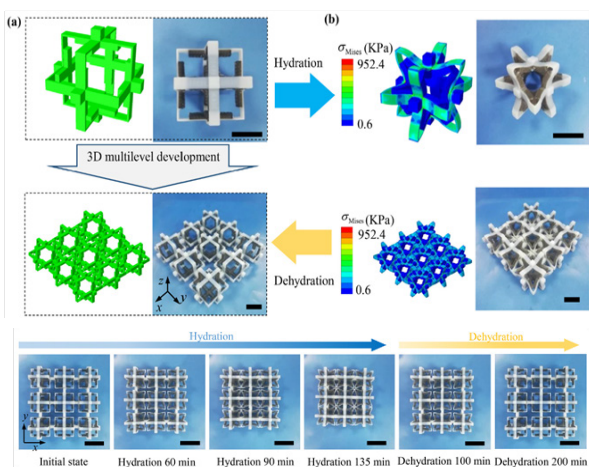
شکل ۵ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده مکانیکی با قابلیت چرخش [۱۴].



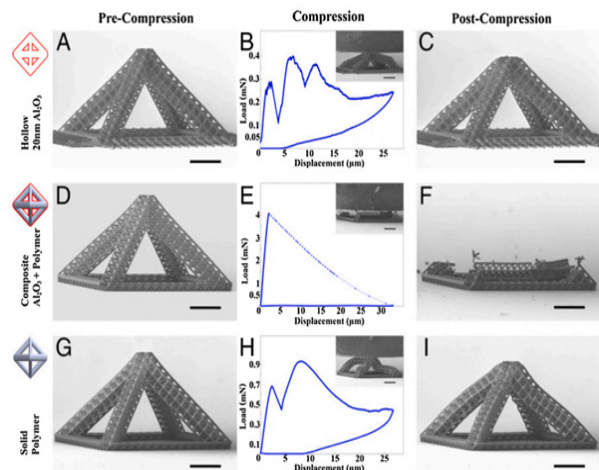
شکل ۹ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده هیدروژلی دوبعدی با ضریب انبساط آب پوشی منفی [۱۹].

برای درک بهتر از تحلیل نرم افزاری فراماده با ضریب پواسون منفی (Auxetic)، مدل اجزای محدود نیز، که توسط وی (Wei) و همکاران [۲۰] ارائه شده است، در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همچنین، ژائو (Zhao) و همکاران [۲۱]، طرح‌های مختلفی از آرایش و چیدمان المان‌ها به صورت‌های هگزاگونال و تتراگونال، در سازه فراماده حافظه شکلی را ارائه (شکل ۱۳) و سپس بهینه‌سازی کردند.

یی (Ye) و همکاران [۲۲]، از بهینه‌سازی توپولوژی برای طراحی فراماده با سفتی متغیر و ضریب پواسون منفی، استفاده کردند. نمونه‌ای از نتایج آن‌ها در شکل (۱۴)، شامل یک مستطیل با دو سوراخ اولیه تا سازه نهایی فراماده، نمایش داده شده



شکل ۱۰ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده هیدروژلی سه بعدی با ضریب انبساط آب پوشی منفی [۱۹].

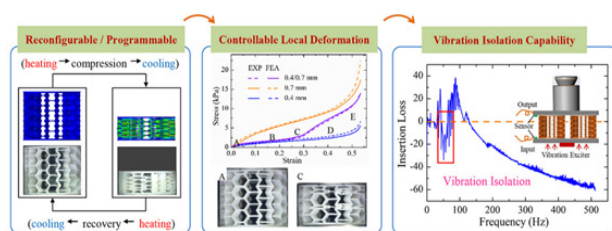


شکل ۷ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده مکانیکی در مقیاس نانو [۱۷].

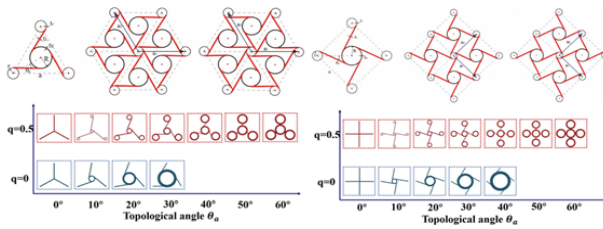
گونه مواد در مهندسی الکترونیک، مهندسی رباتیک و مهندسی بیونیک است [۱۹].

۳ طراحی فرامواد

فرایند طراحی فرامواد با هدف استخراج هندسه پیچیده آن‌ها بر اساس تابع هدف مدنظر، از روش بهینه‌سازی توپولوژی (Topology Optimization) به همراه روش اجزای محدود (FEM: Finite Element Method) قابل دسترسی است. معمولاً در نرم‌افزارهای تجاری همچون آباکوس (ABAQUS)، از روش بهینه‌سازی ریاضی توپولوژی مبتنی بر ماده همسانگرد جامد با جریمه (SIMP: Solid Isotropic Material with Penalization) برای طراحی ساختارهای پیچیده و خواص مواد غیرمعمول (همچون ضریب پواسون صفر یا منفی، ضریب انبساط حرارتی صفر یا منفی، ضریب انبساط آب پوشی صفر یا منفی) استفاده می‌شود. برای درک بهتر رفتار ماده، این گونه خواص برای ضریب پواسون، در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۸ کاربردهای فرامواد در صنایع مختلف: فراماده پلیمری با خواص حافظه شکلی [۱۸].

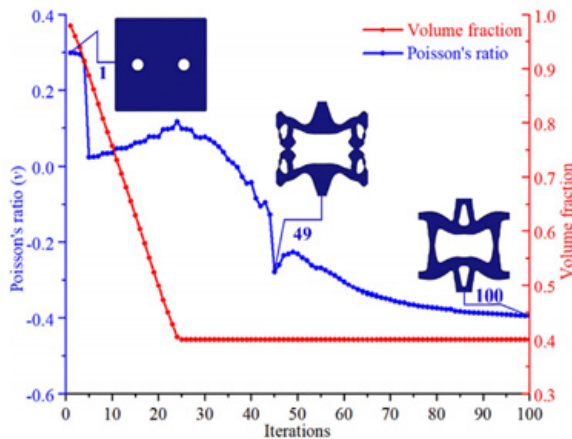


شکل ۱۳ طرح‌های مختلف از آرایش و چیدمان المان‌های فراماده ماده با ضریب پواسون منفی به صورت‌های هگزاگونال و تتراگونال [۲۱].

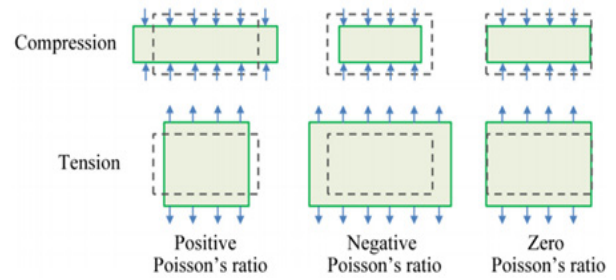
این چیدمان از جنس دو ماده نایلون و پلی‌وینیل‌الکل، در شکل (۱۶) آمده است. آلوارز-تریگو (Alvarez-Trejo) و همکاران [۲۵]، هندسه‌های مختلفی را برای فراماده لحاظ کردند و سازه را تحت بارهای فشاری، بهینه کردند (شکل ۱۷). هو (Hu) و همکاران [۲۶]، نتایج عددی و تجربی فراماده حافظه‌شکلی (چاپگر چهاربعدی) را تحت فشار و دما بررسی کردند (شکل ۱۸). گارلند (Garland) و همکاران [۲۷]، با استفاده از جبهه پرتو و ترکیب روش‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، بهینه‌سازی فرامواد را انجام دادند.

۴ ساخت فرامواد

به طور کلی، به دلیل وجود هندسه پیچیده فرامواد، از روش‌های تولید افزایشی استفاده می‌شود. برای فرامواد پلیمری نیز از برخی از این فنون شامل فرایند پلیمری شدن (Vat-Polymerization) در شکل (۱۹) برای الاستومرها [۲۸]، شکل (۲۰) برای فرایند جت یا پاشش ماده (Materials Jetting) در سازه ماده با ضریب



شکل ۱۴ بهینه‌سازی توپولوژی در فراماده با سفتی متغیر و ضریب پواسون منفی [۲۲].



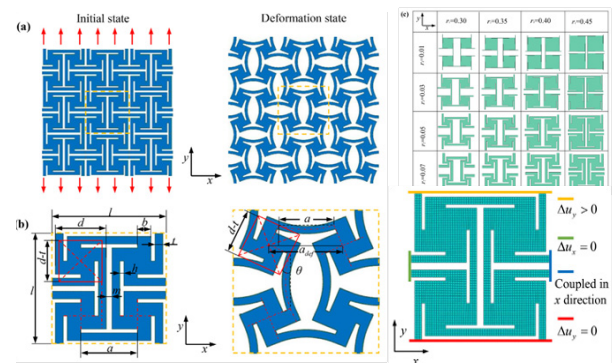
شکل ۱۱ تغییرات هندسی تحت ضریب پواسون مثبت، منفی و صفر برای فرامواد مکانیکی [۱۸].

است. همچنین این مقاله، گزارش کاملی از فرایند بهینه‌سازی توپولوژی ارائه داده است.

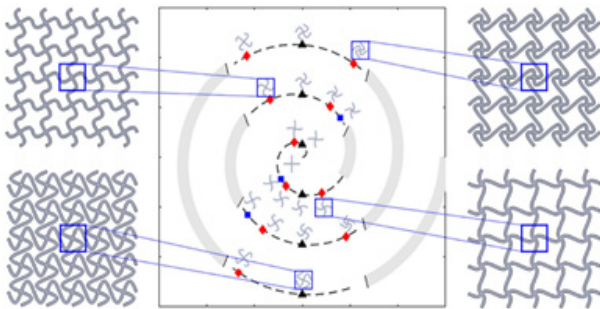
نرم‌افزارهای تجاری قابل استفاده برای فرایند بهینه‌سازی توپولوژی فرامواد بسیار متعدد هستند که برخی از آن‌ها، در جدول (۱)، درج شده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع، برخی از این نرم‌افزارها (nTopology)، به تازگی در این زمینه مطالعاتی، توسعه داده شده‌اند.

ژنگ (Zheng) و همکاران [۲۳]، سه روش مختلف ریاضی برای تولید ساختار و هندسه بهینه در سازه‌های فراماده با ضریب پواسون منفی معرفی کردند (شکل ۱۵). در نهایت، آن‌ها با تابع هدف ریاضی و استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب (MATLAB) و همچنین، روش تنظیم سطح (Level-Set)، فرایند بهینه‌سازی را انجام دادند.

وی (Wei) و همکاران [۲۴]، فراماده‌ای دوگانه (Bi-Material) را به گونه‌ای جالب طراحی کردند که ضریب انبساط حرارتی آن، محدوده وسیعی را از مقادیر منفی تا مثبت، شامل می‌شد.



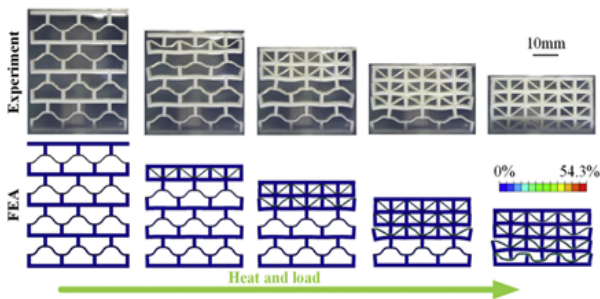
شکل ۱۲ مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجزای محدود فراماده ماده با ضریب پواسون منفی [۲۰].



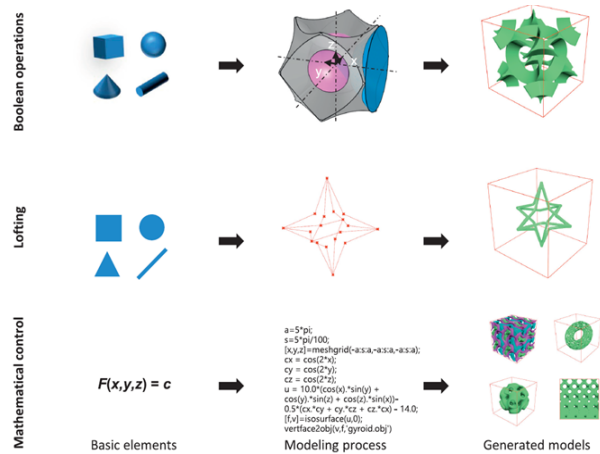
شکل ۱۷ چیدمان‌های مختلف از فراماده تحت فشار [۲۵].

پواسون منفی [۲۹] و همچنین برای فرایند پخت لیزری انتخابی (SL: Selective Laser Sintering) در پلی آمید [۳۰] است. یکی از روش‌های مرسوم تولید فرامواد، فرایند مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM: Fused Deposition Modeling) است که در شکل (۲۱) برای سازه ساندویچی تحت بار خمش، نمایش داده شده است.

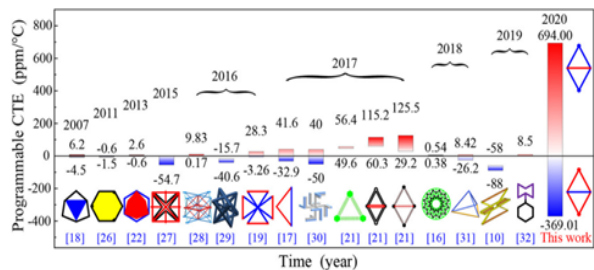
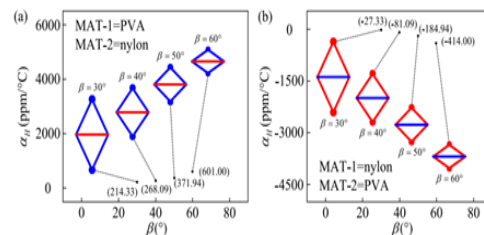
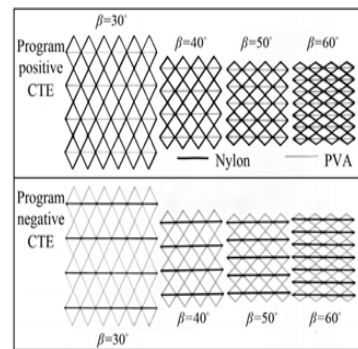
وی (Wei) و همکاران [۲۰]، پلیمر حافظه شکلی را برای ساخت فراماده مکانیکی ماده با ضریب پواسون منفی به روش پاشش ماده ساختند (شکل ۲۲). در مقاله دیگری، فراماده با ضریب پواسون منفی بهینه‌سازی شده با استفاده از رزین فوتوپلیمری الاستیک و چاپگر سه بعدی، ساخته شد و سپس با استفاده از نیکل، پوشش دهی شد [۲۳]. نمونه ساخته شده فوق و تصاویر میکروسکوپی سطحی آن، در شکل ۲۳ نمایش داده شده است. کیفیت نامناسب سطوح چاپ شده، قبل از پوشش دهی نیکل، کاملاً مشخص است که از معایب چاپگرهای سه بعدی و تولید افزایشی است. فراماده دوگانه‌ای (از دو جنس نایلون و پلی وینیل الکل)، با



شکل ۱۸ تحلیل تجربی و عددی فراماده حافظه شکلی تحت دما و فشار [۲۶].



شکل ۱۵ راهکارهای تولید ساختار و هندسه بهینه در سازه فراماده با ضریب پواسون منفی [۲۳].

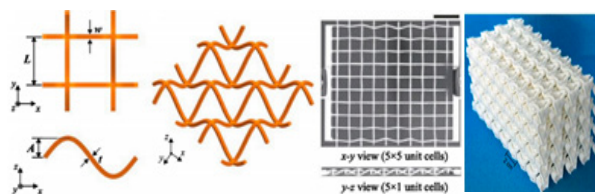


شکل ۱۶ چیدمان‌های مختلف از دو ماده نایلون و پلی وینیل الکل برای طراحی فراماده جدید [۲۴].

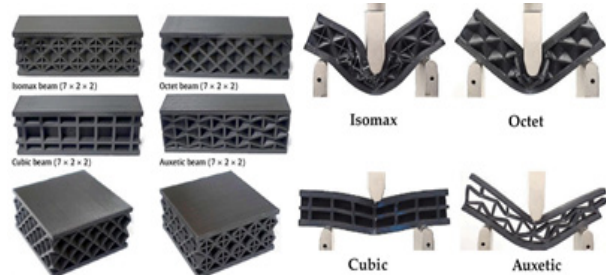
جدول ۱ نرم افزارهای تجاری برای فرایند بهینه سازی توپولوژی در فرامواد.

No.	Name	References for more information
1	Crashworthiness topology optimization	-
2	The code recommended by Daniel Gert Nielsen	https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Nielsen-9
3	Altair Optistruct	http://www.altairhyperworks.com/%28X%281%29S%28gi3xmn30qw1ni-y45z01u4u55%29%29/Product,19,OptiStruct.aspx
4	Simens NX topology optimization	https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/webinar/fluid-topology-optimization/87410
5	AMEBA: Rhinoceros and its parametric design tool Grasshopper	https://www.rhino3d.com/ https://www.food4rhino.com/ https://www.food4rhino.com/app/ameba
6	MATLAB	https://www.researchgate.net/publication/225899336_Sigmund_O_A_99_Line_Topology_Optimization_Code_Written_in_MATLAB_Structural_and_Multidisciplinary_Optimization_21_120-127 https://www.researchgate.net/publication/226050138_Efficient_topology_optimization_in_MATLAB_using_88_lines_of_code
7	ABAQUS/ ATOM (ABAQUS topology optimization module)	http://www.simulia.com/products/unified_fea.html
8	TOSCA	http://www.processopt.com/toscatopo.htm https://www.simuleon.com/simulia-tosca/ https://www.4realsim.com/tosca/
9	Genesis	http://www.vrand.com/Genesis.html
10	Autodesk Nastran IN-CAD	https://www.autodesk.com/solutions/topology-optimization http://www.msccsoftware.com/Solutions/Applications/Design-Optimization.aspx
11	ODESSY	http://www.ime.auc.dk/research/design/odessy/Ods_index.htm
12	ANSYS	-
13	nTopology	-
14	BESO	http://www.isg.rmit.edu.au/downloads.html
15	BOSS quattro	http://caesam.com/en/pss.php?ID=3&W=products
16	CATOPO	http://www.catopo.de/index.htm
17	Dynaflow	http://www.princeton.edu/~dynaflow/index.htm
18	Eyeshot	http://www.devdept.com
19	FELyX	http://felyx.sourceforge.net/idea.html
20	Femap	http://www.plm.automation.siemens.com/en_in/products/velocity/femap/topography-optimization/index.shtml
21	FEMTools	http://www.femtools.com/products/ftopt.htm https://www.femtools.com/products/ftopt.htm?gclid=Cj0KCQjw9GCBhDvARIsAFunhsmUPbdkozM_In8ztHA_VBDxvRZBSjQGdMwdbqtHYk89zhUwIT0T-5MaAun3EALw_wcB
22	Fomd	http://www.mkpsd.com/fomd3d.html
23	Forcepad	http://forcepad.sourceforge.net/
24	FreeFEM++	http://www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/freemem_en.html
25	GPUPop	-
26	Impact	http://impact.sourceforge.net/
27	LS-OPT	http://www.lstc.com/lsopt.htm
28	OPTISHAPE-TS	http://www.quint.co.jp/eng/pro/ots/ots_fnc_e.htm
29	PareTO	http://sciartsoft.com/Products.html
30	PERMAS 4EDU	http://www.intes.de/ https://www.intes.de/edu https://www.researchgate.net/project/PERMAS4EDU

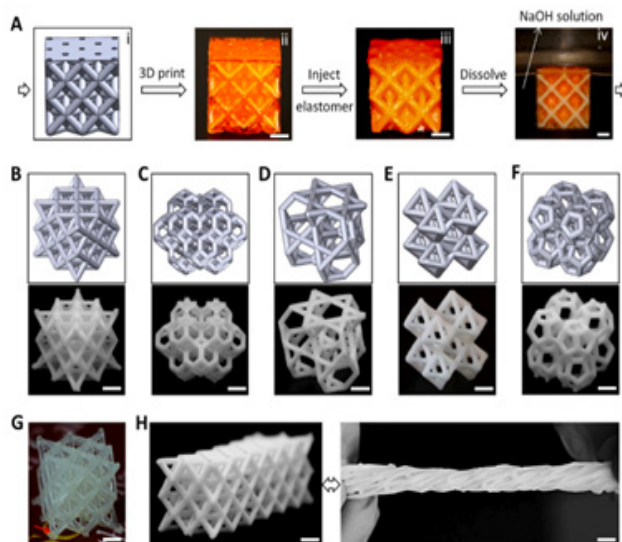
No.	Name	References for more information
31	CAESS ProTOP	http://www.edibo.si/ess/index.html https://caess.eu/site/Software.html https://www.pdsol.com/product/topology-optimization/
32	SFE	http://www.sfe-berlin.de/
33	SmartDO	http://www.fea-optimization.com/SmartDO/index_e.htm
34	TOPLSM	http://www2.mae.cuhk.edu.hk/~cmdl/download.htm
35	TopOpt	http://www.topopt.dtu.dk/?q=node/11 https://www.topopt.mek.dtu.dk/apps-and-software
36	Topostruct	http://sawapan.eu/sections/section79_topostruct/download.html
37	TOPO4ABQ	http://www.fema.se/
38	ToPy	http://code.google.com/p/topy/
39	Trinitas	http://www.solid.iei.liu.se/Offered_services/Trinitas/index.html
40	SolidThinking	http://www.solidthinking.com/InspiredNav.aspx?pid=4
41	Altair Inspire	https://www.youtube.com/watch?v=crFFDvnlv3k
42	Autodesk Fusion 360 Generative Design	-
43	Simufact Additive	-
44	Netfabb	https://www.3dnatives.com/en/netfabb-software-241120205/
45	SOLIDWORKS	https://www.solidworks.com/media/topology-optimization https://www.grm-consulting.co.uk/solidworks-topology-optimization
46	OpenLSTO	http://m2do.ucsd.edu/software/



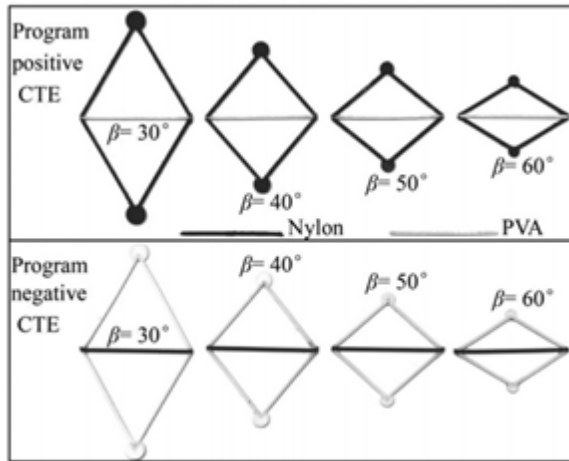
شکل ۲۰ روش های ساخت فرامواد: فرایند جت یا پاشش ماده در سازه ماده با ضرب پواسون منفی [۲۹] (سمت راست) و پلی آمید به روش پخت لیزری انتخابی [۳۰] (سمت چپ).



شکل ۲۱ روش های ساخت فرامواد: فرایند مدل سازی رسوب ذوبی برای سازه ساندویچی تحت خمش [۱].



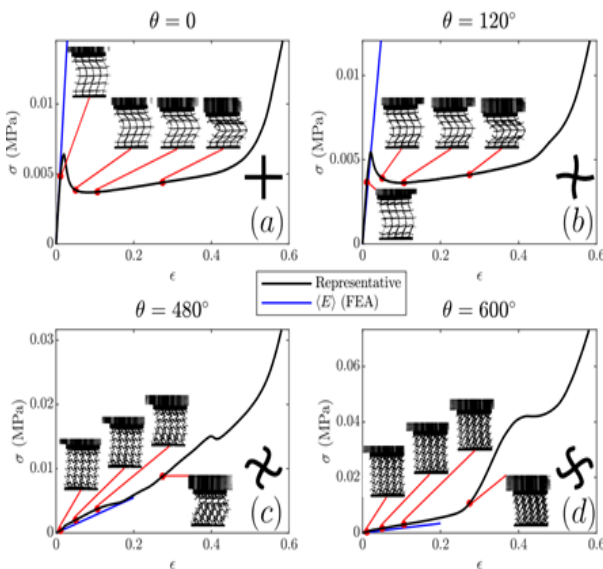
شکل ۱۹ روش های ساخت فرامواد: فرایند پلیمری شدن الاستومرها [۲۸].



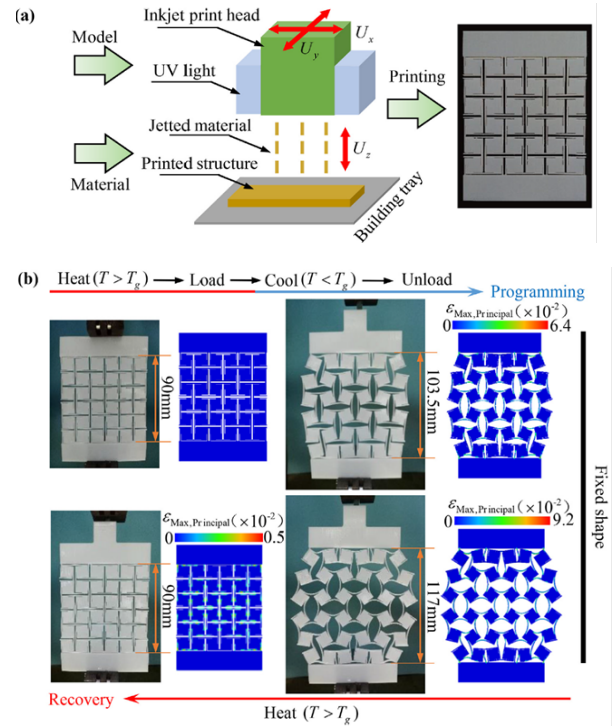
شکل ۲۴ تولید فراماده دوگانه از نایلون و پلی وینیل الکل با چاپگر سه بعدی مدل سازی رسوب ذوبی [۲۴].

شد [۲۴].

آوارز-تریگو (Alvarez-Trejo) و همکاران [۲۵]، با استفاده از نوعی رزین انعطاف پذیر (Flexible Resin) و چاپگر استریولیتوگرافی (SLA: Stereolithography)، نمونه های فراماده را ساختند و با استفاده از آزمون فشار، عملکرد چیدمان های مختلف را بررسی کردند (شکل ۲۵).

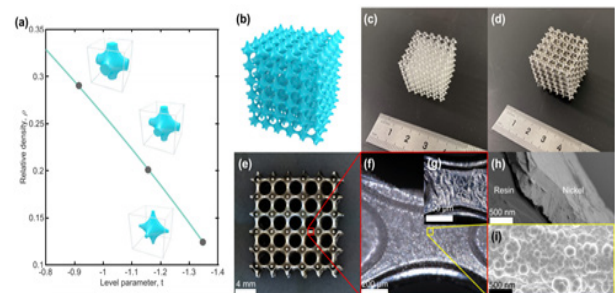


شکل ۲۵ تولید فراماده با چاپگر استریولیتوگرافی و اجرای آزمون های فشار روی هندسه های مختلف [۲۵].

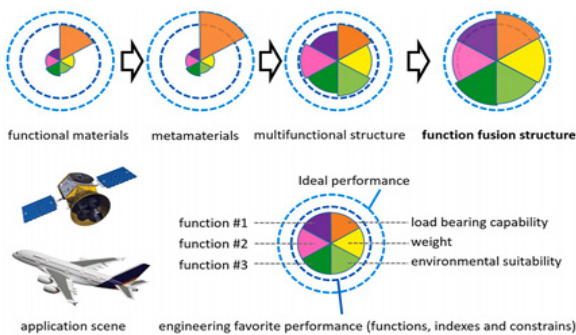


شکل ۲۲ روش های ساخت فرامواد: فرایند مدل سازی رسوب ذوبی برای سازه ساندریجی تحت خمش [۲۰].

استفاده از روش مدل سازی رسوب ذوبی، با چاپگر سه بعدی و دو افشانک همزمان، طبق شکل ۲۴ نشان داده شده است. در این فرایند چاپ، نایلون با افشانک با دمای ۲۳۰ درجه سانتی گراد، قطر ۰/۲۵ میلی متر و ضخامت لایه ۰/۲۳ میلی متر چاپ شد. برای ماده پلی وینیل الکل، دمای افشانک ۲۱۵ درجه سانتی گراد، قطر آن ۰/۴ میلی متر و ضخامت لایه چاپ، ۰/۳۵ میلی متر بود. سرعت چاپ، ۲۰ میلی متر بر ثانیه در نظر گرفته



شکل ۲۳ نمونه های رزینی ساخته شده با چاپگر سه بعدی و قبل و بعد از فرایند پوشش دهی با نیکل [۲۳].



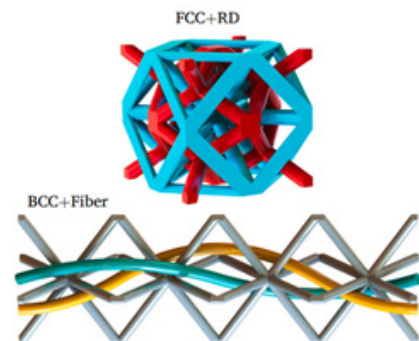
شکل ۲۸ فرایند تولید علم و دانش در زمینه توسعه مواد [۳۲].

انرژی این دو ساختار با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در حالت شبکه‌های نفوذی و تودرتو، میزان جذب انرژی (سطح داخل منحنی تنش-کرنش)، به شدت نسبت به حالت پایه فراماده، افزایش می‌یابد.

اما در انتها، فرامواد که در این مقاله، کاربردها، روش‌های طراحی و ساخت آن‌ها معرفی شدند، پایان تحقیقات در دنیا نخواهد بود و همچنان رشد علم و دانش باعث ایجاد مواد جدیدتری خواهد شد که در شکل ۲۸ نمایش داده شده است. لذا معرفی و استفاده از سازه‌های هوشمند با توابع هدف متفاوت، با عملکرد ایده‌آل، با الهام و الگوبرداری از سازه‌های واقعی در طبیعت (تقلید زیستی)، گام بعدی مطالعات خواهد بود.

۶ نتیجه‌گیری

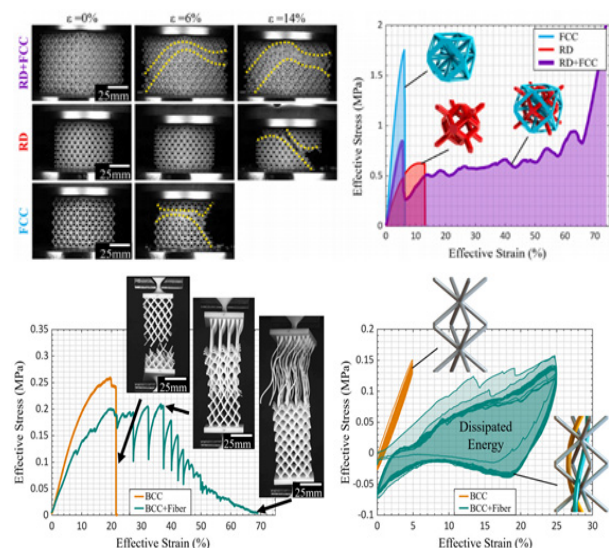
از مزیت‌های مهم فرامواد، می‌توان به هندسه پیچیده برای دستیابی به خواص مواد خاص و غیرمتداول اشاره کرد. از جمله خواص مدنظر، ضریب پواسون صفر یا منفی و ضریب انبساط حرارتی صفر یا منفی است. طراحی و بهینه‌سازی توپولوژی به صورت نرم‌افزاری و همچنین، ساخت این گونه مواد از طریق فنون تولید افزایشی، به کاربرد و توسعه بیشتر این گونه فرامواد، در صنایع مختلف همچون خودرو، پزشکی و هوافضا کمک می‌کند. هر چند، کیفیت سطحی نه‌چندان مناسب قطعات تولیدی به روش ساخت افزایشی، استحکام کم (با الیاف پلیمری) و هزینه زیاد آن، همچنان از معضلات اصلی برای ساخت فرامواد خواهد بود. البته تولید کامپوزیت‌های پلیمری (با استفاده از الیاف کامپوزیتی یا تولید کامپوزیت حین چاپ سه‌بعدی)، می‌تواند یکی از راهکارهای بهبود خواص مکانیکی فرامواد باشد.



شکل ۲۶ ساختارهای جدید فرامواد شامل شبکه‌های نفوذی و تودرتو [۳۱].

۵ آینده فرامواد

در کنار استفاده از فناوری فرامواد و البته در گامی فراتر از دانش روز دنیا، استفاده از شبکه‌های نفوذی و تودرتو (IPL: Interpenetrating Lattice)، می‌تواند باعث افزایش عملکرد مکانیکی سازه شوند. با الگوبرداری از ساختارهای موجود در ریزساختار مواد مثل FCC (Face-Centered Cubic) و همچنین، BCC (Body-Centered Cubic)، می‌توان پیشنهاداتی را برای هندسه‌های جدید فرامواد ارائه کرد. دو نوع پیشنهادی این گونه ساختارها، شامل RD+FCC (RD: Rhombic Dodecahedron) و BCC+Fiber (فیبر)، در شکل ۲۶ توسط ایت (White) و همکاران ارائه شده است [۳۱]. در شکل ۲۷ نیز، نتایج جذب



شکل ۲۷ مقایسه جذب انرژی در ساختارهای جدید فرامواد شامل شبکه‌های نفوذی و تودرتو [۳۱].

مراجع

1. Askari M., Hutchins D.A., Thomas P.J., Astolfi L., Watson R.L., Abdi M., Ricci M., Laureti S., Nie L., Freear S., Wildman R., Tuck C., Clarke M., Woods E., Clare A.T., Additive Manufacturing of Metamaterials: A Review, *Additive Manufacturing*, 36, 101562, **2020**.
2. Cai W., ShalaeV., Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, Springer, USA, **2010**.
3. Xie Y., Ye S., Reyes C., Sithikong P., Popa B.I., Wiley B.J., Cummer S.A., Microwave Metamaterials Made by Fused Deposition 3D Printing of a Highly Conductive Copper-based Filament, *Applied Physics Letters*, 110, 181903, **2017**.
4. Hedayati M.K., Javaherirahim M., Mozooni B., Abdelaziz R., Tavassolizadeh A., Chakravadhanula V.S.K., Zaporojtchenko V., Strunkus T., Faupel F., Elbahri M., Design of a Perfect Black Absorber at Visible Frequencies using Plasmonic Metamaterials, *Advanced Materials*, 23, 5410-5414, **2011**.
5. Hermatschweiler M., Ledermann A., Ozin G.A., Wegener M., Von Freymann G., Fabrication of Silicon Inverse Woodpile Photonic Crystals, *Advanced Functional Materials*, 17, 2273-2277, **2007**.
6. Staude I., Thiel M., Essig S., Wolff C., Busch K., Von Freymann G., Wegener M., Fabrication and Characterization of Silicon Woodpile Photonic Crystals with a Complete Bandgap at Telecom Wavelengths, *Optical Letters*, 35, 1094-1096, **2010**.
7. Joannopoulos J.D., Villeneuve P.R., Fan S., Photonic Crystals: Putting A New Twist on Light, *Nature*, 386, 143-149, **1997**.
8. Ziolkowski R.W., Heyman E., Wave Propagation in Media Having Negative Permittivity and Permeability, *Physics Review E*, 64, 15, **2001**.
9. Engheta N., Ziolkowski R.W., Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, John Wiley and Sons, USA, **2006**.
10. Di Falco A., Ploschner M., Krauss T.F., Flexible Metamaterials at Visible Wavelengths, *New Journal of Physics*, 12, 113006, **2010**.
11. Kruisova A., Sevcik M., Seiner H., Sedlak P., Roman-Manso B., Miranzo P., Belmonte M., Landa M., Ultrasonic Bandgaps in 3D-Printed Periodic Ceramic Microlattices, *Ultrasonics*, 82, 91-100, **2018**.
12. Fu X.F., Li G.Y., Lu M.H., Lu G., Huang X., A 3D Space Coiling Metamaterial with Isotropic Negative Acoustic Properties, *Applied Physics Letters*, 111, 251904, **2017**.
13. Moleron M., Serra-Garcia M., Daraio C., Acoustic Fresnel Lenses with Extraordinary Transmission, *Applied Physics Letters*, 105, 114109, **2014**.
14. Frenzel T., Kadic M., Wegener M., Three-Dimensional Mechanical Metamaterials with a Twist, *Science*, 358, 1072-1074, **2017**.
15. Kadic M., Buckmann T., Schittny R., Gumbsch P., Wegener M., Pentamode Metamaterials with Independently Tailored Bulk Modulus and Mass Density, *Applied Physics Reviews*, 2, 054007, **2014**.
16. Wang Q., Jackson J.A., Ge Q., Hopkins J.B., Spadaccini C.M., Fang N.X., Lightweight Mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion, *Physics Review Letters*, 117, 175901, **2016**.
17. Bauer J., Hengsbach S., Tesari I., Schwaiger R., Kraft O., High-Strength Cellular Ceramic Composites with 3D Microarchitecture, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 2453-2458, **2014**.
18. Liu K., Han L., Hu W., Ji L., Zhu S., Wan Z., Yang X., Wei Y., Dai Z., Zhao Z., Li Z., Wang P., Tao R., 4D Printed Zero Poisson's Ratio Metamaterial with Switching Function of Mechanical and Vibration Isolation Performance, *Materials and Design*, 196, 109153, **2020**.
19. Wei Y.L., Yang Q.S., Ma L.H., Tao R., Shang J.J., Design and Analysis of 2D/3D Negative Hydration Expansion Metamaterial Driven by Hydrogel, *Materials and Design*, 1196, 109084, **2020**.
20. Wei Y.L., Yang Q.S., Tao R., SMP-based Chiral Auxetic Mechanical Metamaterial with Tunable Bandgap Function, *International Journal of Mechanical Sciences*, 195, 106267, **2021**.
21. Zhao W., Zhu J., Liu L., Leng J., Liu Y., Analysis of Small-Scale Topology and Macro-Scale Mechanical Properties of Shape Memory Chiral-Lattice Metamaterials, *Composite*

- Structures*, 262, 113569, **2021**.
22. Ye M., Li H., Cai X., Gao L., Zhang A., Zhao Z., Progressive Design of Gradually Stiffer Metamaterial using Surrogate Model, *Composite Structures*, 264, 113715, **2021**.
23. Zheng X., Guo X., Watanabe, A Mathematically Defined 3D Auxetic Metamaterial with Tunable Mechanical and Conduction Properties, *Materials and Design*, 198, 109313, **2021**.
24. Wei K., Xiao, X., Chen J., Wu Y., Li M., Wang Z., Additively Manufactured Bi-Material Metamaterial to Program a Wide Range of Thermal Expansion, *Materials and Design*, 198, 109343, **2021**.
25. Alvarez-Trajo A., Cuan-Urquizo E., Roman-Flores A., Trapaga-Martinez L.G., Alvarado-Orzco J.M. Bezier-based Metamaterials: Synthesis, Mechanics and Additive Manufacturing, *Materials and Design*, 199, 109412, **2021**.
26. Hu W., Ren Z., Wan Z., Qi D., Cao X., Li Z., Wu W., Tao R., Li Y., Deformation Behavior and Band Gap Switching Function of 4D Printed Multi-Stable Metamaterials, *Materials and Design*, 200, 109481, **2021**.
27. Garland A.P., White B.C., Jensen S.C., Boyce B.L., Pragmatic Generative Optimization of Novel Lattice Metamaterials with Machine Learning, *Materials and Design*, 203, 109632, **2021**.
28. Meza L.R., Greer J.R., Mechanical Characterization of Hollow Ceramic Nanolattices, *Journal of Materials Science*, 49, 2496-2508, **2014**.
29. Li T., Hu X., Chen Y., Wang L., Harnessing Out-of-Plane Deformation to Design 3D Architected Lattice Metamaterials with Tunable Poisson's Ratio, *Science Reports*, 7, 8949, **2017**.
30. Clausen A., Wang F., Jensen J.S., Sigmund O., Lewis J.A., Topology Optimized Architectures with Programmable Poisson's Ratio over Large Deformations, *Advanced Materials*, 27, 5523-5527, **2015**.
31. White B.C., Garland A., Alberdi R., Boyce B.L., Interpenetrating Lattices with Enhanced Mechanical Functionality, *Additive Manufacturing*, 38, 101741, **2021**.
32. Yuan X., Chen M., Yao Y., Guo X., Huang Y., Peng Z., Xu B., Lv B., Tao R., Duan S., Liao J., Yao K., Li Y., Lei H., Chen X., Hong G., Fang D., Recent Progress in the Design and Fabrication of Multifunctional Structures based on Metamaterials, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 25, 100883, **2021**.