فرهنگ و زیست فناوری معماری

نشریه علمی فرهنگ و زیست‌فناوری معماری

پاییز ۱۴۰۰، سال ۱، پیاپی ۲

ذخیره انرژی با استفاده از آجرهای هوشمند در سازه‌های بیومیمتیک با فرآیندهای پولتروژن

زمان دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۳ زمان پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۸/۳

محبوبه آجیلی[۱]- کارشناس معماری و پژوهشگر حوزه نانوفناوری، تهران، ایران

دکتر علی بهنام‌والا- استادیار، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

آجر پخته یکی از مصالح ساختمانی جهانی است که توسط فناوری هزار ساله تولید شده است و به عنوان یکی از مصالح اساسی در ساخت و ساز و ساختمان نقش اساسی دارد. از این مصالح پر کاربرد در (نماسازی، اسکلت‌سازی، کرسی چینی، دیوارسازی، قوس‌ها و پوشش انواع طاق‌ها، کف‌فرش‌ها) استفاده می‌شود. با توجه به استفاده فراوان از آجر، بهینه‌سازی چنین صنعتی در دوران مدرن امروز و در آینده گام بزرگی در جهت صنعتی شدن ساختمان‌ها به وجود می‌آورد. مقاله حال حاضر در صدد است که به روش علمی به بررسی و نحوه عملکرد آجرهای هوشمند ازجمله مقاومت بسیار زیاد، کنترل حرارتی بالا، کاهش مصرف انرژی، عبور تاسیسات (لوله و کابل)، سهولت در ساخت و ساز، کاربرد آن در نماهای ساختمانی و ذخیره انرژی خورشید که منجر به کاهش اتلاف حرارت شده و گرما و سرما را در خود ذخیره می‌کند، بپردازد. هدف نهایی تحقیق ساخت ساختمان‌هایی با سرعت ساخت و ساز بالاتر، کاهش هزینه‌ها، ذخیره‌سازی انرژی، استحکام و دوام بالا، ظرفیت حرارتی بالاتر، سبک‌تر و .. از روش‌های ساخت با استفاده از سیستم پولتروژن می باشد. همچنین تبدیل پارادایم‌های بیولوژیکی به ساخت و ساز ساختمان‌ها، انتقال سازه و ویژگی‌های تعریف سیستم از مدل‌های بیولوژیکی به سیستم‌ها، فرآیندهای ویژه غیرسازه‌ای ابداعی را شامل می‌شود. چالش ساخت سازه های بیومیمتیک و زیست‌الهام شامل ارائه روش‌ها و روندهایی است که امکان نقشه‌برداری از ویژگی های بیولوژیکی را به صورت ترسیم مربوط به تولید فراهم می‌کند. رویکرد روش‌شناختی نیازمند اعتبارسنجی و تایید روش‌های تولید موجود در مقیاس کوچک (مدل، سلول‌های اولیه) برای انتقال یافته‌ها به تولید اجزای سازنده در مقیاس سازه دارد، می‌باشد. علاوه بر این، ویژگی‌های بیولوژیکی که نمی‌توانند توسط روش‌های موجود بازتولید شوند، نیازمند تنظیم بیشتر یا توسعه روش‌های جدید برای انتقال مناسب می‌باشند. شرط اساسی برای توسعه بیشتر چنین روندهایی تولیدی، امکان تولید سازه‌های پیچیده براساس استراتژی‌های بیولوژیکی است که مربوط به مصرف منابع و انرژی، تولید زباله و انتشار گازهای گلخانه‌ای می باشد.

واژگان کلیدی: آجر هوشمند، سازه‌های بیومیمتیک، فرآیندهای پولتروژن، سازه ماژولار.

[۱] نویسنده مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۹۳۷۶۴۰۳۳۶۳، رایانامه: mahboobeh.ajili@gmail.com

۱- مقدمه و بیان مساله

آجر از رایج‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی است که در نماهای ساختمان‌ها استفاده می‌شود. انسان از سال‌های دور از آجر برای ساخت و ساز استفاده می‌کرده، قدمت آن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی به ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. نقطه آغازین تولید آجر از عهد باستان شروع شد. زمانی که متوجه شدند پس از طغیان گل و لای در کناره‌های دجله و فرات، رسوباتی به جای می‌ماند که چسبندگی خاصی دارد. این رسوبات بر اثر تابش آفتاب و عمل تبخیر ترک می-خوردند و در نهایت با از دست دادن آب درون آن‌ها قطعات نامنظمی به وجود می‌آمد. به دلیل انسجام این قطعات به‌جا مانده از آن‌ها در ساخت دیوارهای گلی استفاده می‌کردند. این خاک و لای که حاوی سیلیت بسیاری بود، در تولید آجر مورد توجه قرار می‌گرفت. از این‌رو به‌طورکلی، خانواده فرآیندهای تولید مبتنی بر لایه و ساخت آجرهای هوشمند مناسب برای توسعه هندسه‌های پیچیده و سازه‌ها، ادغام عملکردی اجزای سازنده و درنتیجه ساخت سازه‌های سبک وزن بر اساس مدل‌های طبیعی بواسطه استفقاده از آجرهای هوشمند است. علاوه بر پیچیدگی هندسه‌های مدل‌های این چنینی، انواع مواد مورد استفاده و رفتار حاصل از آن‌ها باید در نظر گرفته شود. از آنجا که اصل اساسی اهمیت تحمل بار، انتقال بار از طریق فیبر تعبیه شده ماتریسی است، ویژگی‌های مختلف ماکروسکوپیک مواد ساختمانی با هدف قرار دادن مواد مختلف فیبری به دست خواهد آمد. بنابراین تولید سازه‌های مسلح فیبری با رفتار آرمه شده باید با فرآیندهای مبتنی بر لایه و پولتروژن فضایی امکان پذیر باشد. از این رو، فرآیندهای لایه‌ای شناخته شده و روش‌های پولتروژن به‌عنوان یک نقطه شروع به کار خواهند پرداخت، اگر چه تناسب آن‌ها باید با توجه به الزامات اجزای ساخت و ساز بیومیمتیک مورد ارزیابی و توسعه قرار گیرد. سه دسته بندی فرآیند، برای ساخت سازه های بیومیمتیک شناسایی شده اند:

- مدلسازی رسوب مذاب مسلح (FDM) با فیبر بی‌پایان،
- بافت پولتروژن و فرآیند جاگذاری فیبر،
- اسپری و ریخته‌گری بتن هدفمند.

محدوده‌ای را که این روش‌های تولید می‌توانند به یکدیگر متصل شوند یا می‌توانند به عنوان یک فرآیند تولید هیبرید در همان گیاه مورد استفاده قرار گیرند، مورد بررسی و توجه قرار خواهیم داد. بر اساس این نتایج، روش‌شناسی و روش‌های تولید آتی برای سازه‌ها در مقیاس ساختمانی باید توسعه یابند. درجه بندی مواد، تخلخل و بافت ها به تمایز فضایی خواص ساختاری و فیزیکی اجازه می‌دهد که در بسیاری از مدل‌های بیومیمتیک ظاهر می‌شود که منجر به راه‌حل‌های چند منظوره می‌شود. تحقیق و طراحی سیستم‌های هدایتی چاپ و سرسوزنی نیز ضروری است، همانطور که امکانات پولتروژن برای تولید قطعات بیومیمتیک در مقیاس ساخت الزامی می‌باشد.

۲- روش‌شناسی و پیشینه تحقیق

هدف این است که (استراتژی‌های پرکننده سه‌بعدی جدید سازگار با مسیرهای رسوب فیبر و بهینه-سازی توپولوژیکی) باری اولین‌بار در ایران معرفی شده و همانطور که تقویت‌کننده‌های فیبر برای سازه بیومیمتیک مورد نیاز است. استراتژی‌های پرکننده جایگاه فیبر داخلی در فناوری ساخت حاصل از شبیه‌سازی عناصر محدود را حمایت و تضمین می‌کنند. اصول مختلف سازماندهی مواد و سازه برای بازتولید ساختارهای بیومیمتیک در اندازه سلولی اولیه و بعداً در مقیاس سازه باید از تجزیه و تحلیل مدل‌های بیولوژیکی، منتقل شوند. برای این منظور، پارامترهای تولید باید با استفاده از انتزاع و شبیه سازی، از اصول بیولوژیکی استخراج شوند. بنابراین، شرایط مرزی اولیه و الزامات برای توالی‌های فرآیند و در نتیجه برای اصلاح فرآیندهای تولید می‌توانند مشتق شوند.

۳- ادبیات تحقیق

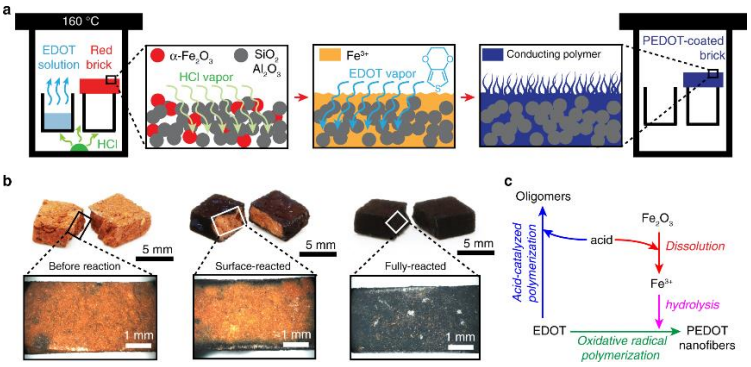
۳-۱ آجر هوشمند

آجر نخستین عنصر در ساخت خانه بودع و آجرهای اولیه از خشت درست می‌شدند و از کاه به عنوان اتصال‌دهنده استفاده می‌شد. روند تولید آجر تکامل پیدا کرد به این‌صورت که گل رس و کاه را با لگد کردن مخلوط می کردند سپس در قالب‌های مستطیلی یا مربعی می‌ریختند و در مقابل آفتاب قرار می‌دادند تا خشک شود. بعدها مردم مصر و بال و آشور در روند پخت آجر به این نتیجه رسیدند که با گداختن رس، آجری به دست می‌آید که نسبت به آجرهای قبلی در برابر هوا مقاوم‌تر است. این روند ادامه پیدا کرد تا اینکه در ۳۵۰۰ سال قبل از میلاد اختراع کوره‌های پخت صورت گرفت آجرهای به دست آمده کیفیت بهتری داشت و سریع‌تر مراحل تولید را طی می‌کرد و در هرنقطه از دنیا روند خاصی را طی کرد بعنوان مثال رومی‌ها، از خاک رس قرمز یا سفید برای ساخت آجر استفاده می‌کردند و به اشکال مربع، مستطیل و دایره و مثلث ساخته می‌شد. در اروپا در دوران گوتیک ساختمان ها با آجر قرمز ساخته شد در قرن شانزدهم میلادی معماری آجری دوره رنسانس جایگزین آجر گوتیک شد. در آمریکا هم بسیاری از آسمان‌خراش‌ها با آجر پوشیده شده اند، برای مثال برای ساخت امپایر استیت ۱۰ میلیون آجر مصرف شد. اما با شروع انقلاب صنعتی در روند ساخت آجر هم تحولات شگرفی به وجود آمد و ماشین آلات آجر سازی به بازار عرضه شد و تولید آجر به طرز شگفت‌آوری سرعت پیدا کرد. نکته جالب اینکه محبوب‌ترین رنگ آجر رنگ قرمز بود و در سازه‌های برخی از معماران قرن بیستم مانند لوکوربوزیه، لوئیس‌خان و رایت بکار رفته بود. اما تاریخچه معماری آجری در ایران به هزاره چهارم پیش از میلاد می‌رسد و با مشاهده کوره‌های آجرپزی در سیلک و شوش برمی‌گردد. از نمونه‌های معماری آجری در ایران می‌توان به گنبد سلطانیه (بزرگ ترین گنبد آجری جهان)، برج علاءالدین در ورامین، برج مهماندوست در دامغان، ساختمان

برج بابل، طاق کسری در کاخ تیسفون، گنبد قابوس (مرتفع‌ترین بنای آجری جهان) و چغازنبیل مربوط به تمدن ایلامی در جنوب شرقی دزفول اشاره کرد. آجر در ایران از دیر باز یکی از محبوب-ترین مصالح ساختمانی است. بنا به دلایل مصالح بوم‌آورد هنوز هم در هر جای ایران خاک به اندازه کافی هست ولی سنگ به مقدار کم در دسترس است آجرپزی در ایران هنوز هم رواج دارد و مصرف آن نسبت به گذشته هم گسترده تر شده است. امروزه از آجر نه تنها در نما ساختمان بلکه در دکوراسیون داخلی، کف و محوطه سازی استفاده می‌شود.

تصویر ۱. آجر هوشمند در مقابل آجر معمولی؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

اولین گروه از ویژگی های مشخصه می‌تواند از سازه‌های متخلخل هدفمند یا سلولی طبیعی که دارای ترکیب منحصر به‌فرد وزن کم و عملکرد بالا هستند، مشتق شده باشند. بسیاری از سیستم‌های بیولوژیکی از سازه متخلخل سبک وزن، نه تنها برای پشتیبانی مکانیکی بلکه به‌عنوان اجزای عملکردی برای انتقال حرارت و جرم استفاده می‌کنند. از آن‌جا که گیاهان استراتژی‌های فردی را برای انطباق با شرایط مختلف توسعه داده‌اند، یکی از اهداف این است که برخی از این خصوصیات را به مصالح ساختمانی متخلخل صنعتی انتقال‌دهد. بر اساس الگوی بیولوژیکی، الزامات برای ساخت قطعات متخلخل ناشی می‌شوند. این امر به خواص فیزیکی مطلوب با توجه به مقاومت در برابر برودت، عایق حرارتی و انتقال رطوبت در سازه‌های متخلخل ناهمگون منجر خواهد شد. منافذ می‌توانند یا به‌واسطه خواص مواد داخلی (به عنوان مثال فوم) یا با ویژگی‌های قطعه کار طراحی شده، ایجاد شوند. در FDM، منافذ و سازه‌های توخالی می‌توانند با استفاده از قطر نازل بسیار نازک (<< ۱ میلی متر) چاپ شوند. عایق حرارتی در قطعات بتونی می‌تواند با ایجاد سازه‌های منفذ بسته و یا باز به صورت هدفمند ایجاد شود. منبع دیگر الهام از مواد طبیعی متخلخل و لایه‌ای درجه بندی شده، توانایی آن‌ها در ترکیب استحکام و انعطاف‌پذیری است که به منظور اجتناب از بارهای بیش از حد حساس، منجر به اتلاف بالای انرژی می‌شود. انتقال چنین خواصی به مواد و سازه‌های خاص ساخت و ساز، برای ساختمان‌ها در مناطق دارای فعالیت لرزه ای بالا و یا در معرض بارهای پویا به طور ویژه مورد علاقه هستند.



تصویر ۲. آجر قرمز در جذب گرما با سیستم پولتروژن؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

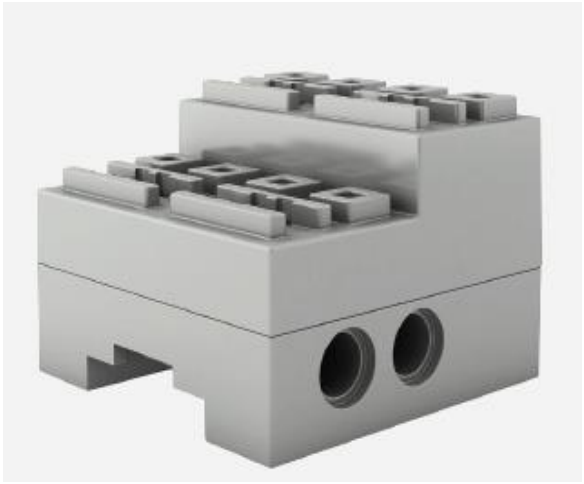
روش‌های انتقال عبارتند از: *ارزیابی و توسعه سازه‌های مسلح فیبری متخلخل و لایه‌ای با توانایی سازگاری با خواص مکانیکی مانند استحکام و دوام از طریق تغییرات کنترل شده توزیع مواد و سازه.*

با استفاده از FDM مسلح با بتن هدفمند یا مسلح فیبری، چنین سازه‌ای می‌تواند با تغییرات چگالی، تخلخل و جهت گیری فیبری مطابق با یک طرح خاص ایجاد شود. گروه دوم ویژگی‌های مشخصه، مربوط به مواد و سازه‌های آرمه و فیبری است. تحقیقات علمی مدل‌های طبیعی نشان داده اند که تمام گیاهان از مواد مسلح با فیبر طبیعی تشکیل شده‌اند. به طور خاص، هنگامی که به سازه‌های شاخه‌ای حمل بار می‌رسیم، طبیعت مفاهیم جالبی را در رابطه با جهت‌گیری فیبری در سازه‌های شاخه‌ای ارائه می‌دهد (Milwich ۲۰۱۵). به‌عنوان مثال، استفاده از اصل جهت گیری فیبری در گیاهان شفلرا، منجر به تکنیک بافت جدید شده است. این امر امکان ساخت سازه شاخه‌ای سبک ساخته شده از پلیمر مسلح فیبری با جهت‌گیری فیبری مطابق بار را فراهم می کند که به‌عنوان قالب بیرونی برای پر کردن بتن است. سازه‌های شاخه‌ای ستون که با استفاده از این تکنولوژی تولید می‌شوند، قادر به تحمل نیروهای پیچشی، خمشی و کششی هستند. مواد فیبری نیز می‌تواند برای توسعه سازه‌های خود تنظیمی در برنامه‌های مختلف معماری مورد استفاده قرار گیرد. طیف گسترده-ای از سازه های متحرک در طبیعت، مسطح یا صدف شکل هستند و بنابراین سازگاری فنی از اجزای پلاستیکی مسلح فیبری با جهت‌گیری فیبری تشکیل می‌شود. به‌طور خاص، مکانیزم حرکتی بدون-محور ویژه در گیاهان می‌تواند از لحاظ فنی رونویسی شود. جنبش فعال تله‌ها در گیاهان گوشت‌خوار اصولی برای سازه‌های قابل تنظیم ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان عناصر سایه‌ای استفاده شوند که به تقاضای سبک کم مصرف‌تر و پایدارتر معماری پاسخ می‌دهد.

۳-۲ عملکرد آجرهای هوشمند

این آجرها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به راحتی به یکدیگر متصل می‌شوند. همچنین امکان عبور تاسیسات وزیرساخت‌های ساختمان از میان آن‌ها ونیز دسترسی آسان به این تاسیسات در آن‌ها فراهم است. دیوارها، کف‌ها و قسمت‌های مختلف توسط نوع مناسبی از این آجر پیش‌بینی و ساخته می‌شوند و به همین دلیل سهولت در اجرا و روند خشک ساخت و ساز موجب کاهش قابل توجه

هزینه ساخت و ساز خواهد شد. این آجرها امکان عبور تاسیسات (لوله‌کشی و سیم‌کشی) را به راحتی فراهم می‌آورند. همچنین پنل‌هایی که روی این آجرها متصل می‌شوند، قابل جدا شدن بوده و دسترسی به تاسیسات بسیارآسان خواهد بود. دقت شود که این پنل‌ها برعکس پنل‌های گچی مورد استفاده در ساختمان به جای اینکه پیچ شوند، درآجرها قفل می‌شوند و همین ویژگی سبب می‌شود که یکبار مصرف نبوده و در صورت نیاز بتوان به راحتی آن را جدا و سپس متصل نمود. با توجه به پیش‌بینی کمپانی مربوط، حدود ۳۰ ٪ در مصرف انرژی صرفه جویی خواهد کرد.



تصویر ۳. محل عبور تاسیسات (لوله‌کشی و سیم کشی) در آجر هوشمند؛ ماخذ: آرشیو نگارندگان.

آجرهای هوشمند به گونه‌ای طراحی شده اند که مقاوم‌سازی در آن‌ها به وسیله میلگرد صورت گیرد. فضاهای خالی تعبیه شده در ساختار این آجرها امکان عبور میلگرد از آن‌ها را فراهم می‌سازد. این محصول در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تولید خواهد شد و نیاز به شکل‌دهی جهت ساخت درها، پنجره‌ها و ... نمی‌باشد. علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت و ساز، آجرهای هوشمند ساخت‌وسازی تمیز و آرام بدون نیاز به اتصال داربست و جرثقیل را فراهم می‌آورد. همچنین با استفاده از این نوع آجر دیگر نیازی به تراز کردن دیوار و کف وجود ندارد.

۳-۳ سیستم مدولار زیستی

سیستم‌های طبیعی همچنین می توانند به عنوان یک منبع الهام‌بخش برای سازه‌های کامپوزیتی پیچیده و حتی فرآیندها باشند. به‌عنوان مثال، خارپوست‌های شن‌زی، توتیاهای دریایی بسیار سازگار، به عنوان یک مولد مفهوم بیولوژیکی برای صدف‌های جدا شده در ساختمان‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته اند. با توجه به شکل کلی و ترتیب صفحه، خارپوست‌های شن‌زی تنوع هندسی بسیار بالایی نشان می‌دهند. ظرفیت تحمل‌بار بالا اسکلت خارپوست‌های شن‌زی با محیطزیست خود به‌خوبی سازگاری دارد و ویژگی‌های مورفولوژیکی را نشان می‌دهد که برای صدف‌ها در ساخت ساختمان (معمولا انحنای صاف، دیافراگم و اتصالات ستون مانند) مورد نیاز است. صدف‌های خارپوست‌های شن زی شامل صفحات چند ضلعی ماژولار هستند که در لبه آن‌ها به برآمدگی‌های انگشت مانند کلسیت و

فیبر ارگانیک وصل می شوند و بنابراین می توانند به عنوان یک مدل مناسب برای صدف در ساخت و ساز ساختمان عمل کنند. نمایش فیزیکی اسکلت و مفاصل با فرآیندهای تولید افزودنی و تاثیر تولید افزودنی بر روی مفاصل، مورد بررسی قرار می‌گیرد. استراتژی‌ها برای مکانیسم‌های مفصل مسلح فیبری به منظور رسیدن به سختی و ثبات واحد حتی در سازه های جداگانه استخراج خواهد شد. یک مدل بیولوژیکی محتمل، تشکیل صدف در حلزون خشکی است که شکل‌های پیچیده‌ای با سطوح بسیار کارآمد و عملکردی تولید می‌کند. در مقایسه با اکثر حیوانات تولیدکننده صدف، حلزون‌ها مواد ساختمانی تولید می کنند که در یک شیار بافت تولیدی دفع می شود که مشابه فرآیندهای تولید افزودنی فعلی است. حلزون‌های خشکی یک فیلم پلیمری نازک (پریستراکوم) که با کربنات کلسیم تقویت می‌شود، دفع می‌کند. پریستراکوم خارجی‌ترین لایه صدف است که قالبی را برای تبدیل به آهک و سطح عملکردی با ساختاری خاص (ضد آب، خود پاکساز و غیره) فراهم می کند. ماده تحمل بار صدف، یک لایه کربنات کلسیم ضخیم است. اصول اساسی که می‌توانند به فرآیندهای ساخت فنی منتقل شوند عبارتند از:

- قطعات هندسی چند مقیاسی و
- فرآیندهای تولید چند مرحله‌ای لایه سطحی،
- قالب و سازه تحمل بار.

۳-۴ آجر هوشمند و سازه‌های بیومیتیکس

الف- صرفه‌جویی انرژی؛ ویژگی‌های به‌خصوص آجرهای هوشمند موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی‌های سرمایشی و گرمایشی می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده حدود۶۰٪ از انرژی‌های مصرف شده در ساختمان مربوط به سرد و یا گرم کردن (شامل گرم کردن به وسیله آب) می‌باشد. آجرهای هوشمند با داشتن فضای خالی درون خود که با هوا پر می‌شود، به خوبی موجب کاهش مصرف انرژی به وسیله مقابله با جذب گرما در تابستان و خروج گرما در زمستان می‌شوند.

ب- عایق حرارتی طبیعی؛ از ویژگی‌های خصوصیتی آجرهای هوشمند صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی‌های سرمایشی و گرمایشی است. طبق بررسی‌های انجام شده آجرهای هوشمند انرژی تابشی خورشید (جرم حرارتی) را در فصل گرما جذب می‌کند و در خود ذخیره می‌کند و در فصل سرما انرزی ذخیره شده را به داخل ساختمان هدایت می‌کند. همچنین سوراخ‌دار بودن این آجرها عامل دیگری است که باعث عایق حرارتی عالی می‌شود.

۳-۵ بهینه‌سازی قطعه مدولار

یک قطعه بهینه‌سازی شده را می‌توان با ترکیب روش‌های طراحی، خواص مواد و تکنیک‌های تولید در جهت حداکثر عملکرد در محدودیت‌های طراحی از پیش تعیین شده، مشخص کرد. شکل گیری سیستم‌های طبیعی می‌تواند به عنوان یک منبع الهام‌بخش در رویکرد به چنین مشکلاتی باشد، از آن‌جا که وابستگی‌های بین شکل، ریزساختار و ساخت و ساز به فرآیند رشد متصل است، که به عنوان سازگاری طولانی مدتی یک ارگانیزم با شرایط خارجی و داخلی دائماً متغیر ظاهر می شود. ارگانیزم ها با استفاده از منابع محدود در ترکیب عمدی اجزای تشکیل‌دهنده مواد، به همراه جای گذاری بسیار متمایز آن‌ها تحت محدودیت‌های ساخت و ساز، ساختارهای اجرایی را توسعه می-دهند. بنابراین، برای ساخت سازه‌های زیست‌الهام، وابستگی متقابل بین روش‌های طراحی، خواص مواد و تکنیک‌های تولید باید به‌منظور بازتولید چنین مواد و توزیع‌های سازه، مورد توجه قرار گیرند. این امر با تنظیم پارامترهای فرآیند (مسیرها، نرخ تغذیه، دما) یا اجزای فرآیند (توسعه هدچاپ‌ها، طراحی نازل، سیستم تغذیه مواد) یا توسعه فرآیندهای جدید (اسپری بتن هدفمند، فرآیندهای افزودنی جدید) امکان‌پذیر می‌شود.

۳-۶ فرآیندهای تولید پولتروژن

استراتژی‌های مختلفی برای فیبر، مواد ماتریکس و ترکیبات آن‌ها توسعه یافته است. به‌عنوان مثال، برای مواد فیبری در فرآیندهای تولید مانند پولتروژن، FDM یا فیبر مسلح FDM، ترتیب جهت قرار دادن فیبرها، باعث بهبود وضعیت مواد و در نتیجه عملکرد بالاتر می‌شود. در این مورد، طرح فیبر مطابق با خواص مواد و تحت محدودیت‌های تولید (رسوب مستمر، بررسی برخورد، مسیرهای چندمحوری) ایجاد شده است. برای مواد ماتریس (مثلاً پلیمرها و مواد معدنی) راه دیگری برای بهینه سازی قطعه کار است که ثابت شده مشخصا مناسب است، تغییرات کنترل شده خواص مواد (چگالی، درصد حجم مواد، و غیره) در حجم طراحی است. به عنوان مثال، در تکنولوژی ریخته‌گری و اسپری بتون، تغیر چگالی می‌تواند توسط ریخته‌گری لایه به لایه از مخلوط بتن درجه یک، با استفاده از یک فرآیند تخریبی کنترل شده یا برای گرادیان‌های پیچیده سه بعدی، توسط استفاده از رسوب مخلوط هدایت شده بر اساس طرح توزیع چگالی به دست آید. در تمام موارد فوق، ادغام خواص مواد، طراحی طرح و انتقال پارامترهای طرح به پارامترهای ساخت مورد نیاز است.

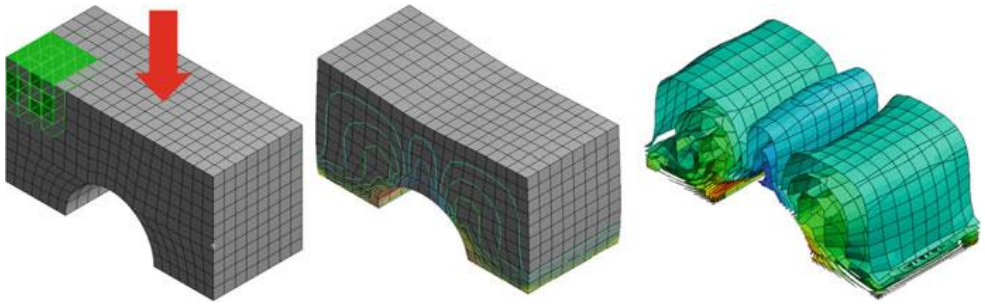
۳-۷ سازه‌های متخلخل سبک وزن با استفاده از FDM مسلح با فیبر

کار تحقیقاتی با توجه به تولید افزودنی بر FDM مسلح فیبری متمرکز است، زیرا FDM یک روش تولید محبوب برای تولید سازه‌ها، هم در اندازه مدل و سپس هم در مقیاس ساختمانی می‌باشد. پخت لیزری انتخابی (SLS) و مدل‌سازی لمینت ابجکت (LOM) را می‌توان در برنامه های خاص به عنوان فرآیندهای مکمل استفاده کرد. مصالح ساختمانی باید با طیف گسترده‌ای از خواص

ماکروسکوپی، به‌ویژه از طریق تقویت مواد ماتریس با مواد متنوع فیبری و با تغییر جهت‌های فیبری در مناطق مختلف، تولید شوند. استفاده از فیبر بی پایان همراه با فرآیندهای افزودنی هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است و بنابراین امکان‌سنجی اولیه این روش ابتدا باید مورد بررسی قرار گیرد. محدودیت‌های کنونی که باید برطرف شوند، مناطق کار کوچک، استراتژی‌های یکپارچه سازی پرکننده و نرخ پایین ساخت‌وساز هستند. منطقه کار را می توان با مفاهیم جدید جنبشی مانند روبات‌های کابلی، روبات‌های تلفن همراه یا سیستم‌های پورتال افزایش داد. یکی دیگر از رویکردها این است که ساخت قطعات کوچک است که باید در محل نصب شوند که به استراتژی‌های پیوست جدید برای اطمینان از عملکرد سازه های بهینه سازی شده نیازمند است. ابزارهای برنامه‌ریزی سنتی FDM فقط مقدار محدودی از استراتژی‌های پرکننده را ارائه می دهند (مثل مورب، لانه زنبوری، جامد و غیره) که برای تمام قطعه کار استفاده می‌شوند. قطعات بهینه‌سازی شده از لحاظ توپولوژیک به الگوی پرکننده متغیر از لایه‌های جدید و محلی، مخصوصاً برای قطعات مسلح فیبری نیاز دارند، زیرا فیبر باید در جهت تنش قرار گیرند. نرخ کم ساخت و ساز که ساخت قطعات بزرگ را دشوار می‌سازد، می‌تواند با همبستگی اکتروژن و افزایش قطر نازل، تاثیر گذاری بر برنامه‌ریزی مسیر و الگوریتم‌های کنترل مسیر، افزایش یابد.

۳-۸ بهینه‌سازی قطعه کار برای تولید افزودنی

جهت گیری قطعه کار در فرآیندهای استاندارد FDM از اهمیت زیادی درخصوص خواص مکانیکی و سطوح برانگیختگی برخوردار است. محدودیت‌های جدید زمانی رخ می‌دهند که فیبر با یک جهت خاص در قطعه کار قرار می‌گیرند. هم مسیرهای دو بعدی و هم سه بعدی به سیستم‌هایی با بیش از سه درجه آزادی برای جهت گیری فیبر و سر چاپ نیاز دارند، که از حالت هنری FDM ماشین آلات فراتر می‌رود. علاوه بر این، مسیرهای سه بعدی ممکن است بین سر چاپ و نواحی قبلا چاپ شده قطعه کار ایجاد برخورد کنند؛ این امر باید توسط ابزار برنامه ریزی مسیر جلوگیری شود. هدف تعیین یک سری احتمالی از جهات قطعه کار / سر برای هر قسمت از قطعه کار با توجه به مسیرهای فیبری مورد نیاز است، در حالی‌که مواد ذخیره شده قبلی، برخورد بالقوه و برانگیختگی را باید درنظر گرفت. یک الزام اجباری، دسترسی به تمامی موقعیت‌های چاپ و درنتیجه امکان تولید قطعه کار در موقعیت فعلی آن است. اگر چند موقعیت و جهت قطعه کار امکان‌پذیر باشد، بهینه‌سازی در جهت سرعت چاپ، دقت و کمینه کردن مواد پشتیبانی می‌تواند انجام شود. در فرآیندهای فعلی ساخت FDM، پرکننده در همان زمان با پیرامون ساخته می‌شود. قطعه کار فقط توسط سطح تعریف می‌شود و کل قطعه با استفاده از الگوی پرکننده (مورب پرکننده، لانه زنبوری و غیره)، بدون توجه به استرس داخلی و هندسه، پر شده است.



تصویر ۴. بهینه سازی توپولوژیک یک سازه مونتاژ شده متشکل از زیر ماژول‌ها (مثلا مکعب)؛ ماخذ: Neitzel M, Breuer U (2014

سازه‌های بزرگ معماری را می‌توان با منتاژ بخش‌های کوچکتر که بر روی ماشین‌های معمولی چاپ شده اند ساخت. بنابراین بهینه‌سازی توپولوژیکی چندمقیاسی باید برای هر دو بخش تکی و سازه مونتاژ شده انجام شود (Dadalau و همکاران، ۲۰۰۹). نتیجه این امر بهینه سازی میکرو مقیاس برای بخش‌های تکی و بهینه‌سازی ماکرو مقیاس برای کل سازه می‌باشد.

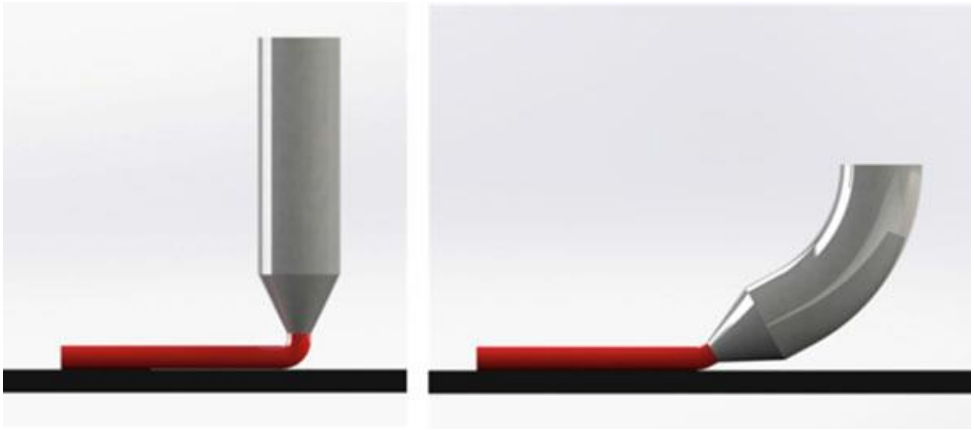
درحال حاضر، مقاومت مکانیکی قطعات معمولی FDM تقریبا ۸۰ تا ۸۵ درصد از قطعات قالب-گیری شده تزریقی مربوطه است (Fischer و همکاران، ۲۰۱۳a). ادغام فیبرها به صورت قطعه کار در جهت تنش‌ها، قدرت را افزایش می‌دهد. رشته ترموپلاستیک که در سیستم‌های FDM معمولی استفاده می شود، می تواند نیروهای کششی و فشرده سازی را کنترل کند که تامین مواد ناچیزی را که در حالت چاپگرهای هنری وجود دارند، امکان‌پذیر می‌سازند. رشته توسط یک موتور از رول رشته‌ها کشیده می‌شود و به یک دستگاه گرمایشی وارد می‌شود و در نهایت از نازل اکستروژن خارج می شود. در مقابل، فیبرها می‌توانند تنها نیروهای کششی که نیازمند استراتژی‌های عرضه مواد جدید هستند را اداره کنند. مفهومی در بازار وجود دارد که از دو نازل استفاده می‌کند، یکی برای رشته‌ها و دیگری برای یک فیبر کربن. این دستگاه به سه محور محدود می شود و بنابراین تقویت تنها در لایه‌ها و نه بین آن‌ها امکان پذیر است. یکی دیگر از مفاهیم فرآیند FDM توسعه یافته با استفاده از یک ربات صنعتی ششگانه، شامل امکان استخراج مواد پلیمری تقویت شده فیبر (Fischer و همکاران، ۲۰۱۳b) توسعه یافته است. با این وجود، فقط قطعات صاف با استفاده از نرم افزار برش معمولی ساخته شده‌اند. همانطور که برش آنلاین فیبر در این سیستم امکان‌پذیر نیست، قطعه کار به اشکال بسیار ساده محدود می‌شود. دو اشکال عمده راه‌حل ارائه شده عبارتند از:

- پرشدن از فیبر کم (۲۰٪ >) و
- عدم امکان برش فیبر در طی فرآیند استخراج.

این امر مسیر پیوسته‌ای را به سوی محدودیت‌های هندسی نتیجه می‌دهد که هرگز قطعه کار را ترک نمی‌کند. بنابراین، یک سر چاپ جدید باید برای غلبه بر این اشکالات همراه با استراتژی‌های برنامه-ریزی مسیری توسعه یابد.

۴- بیان یافته‌های تحقیق

برای شبیه‌سازی مکانیکی (با استفاده از روش عناصر محدود) از قطعات کامپوزیت ساخته شده از فیبر و ماتریس، تعریف توزیع و جهت‌گیری فیبر در آن حجم دشوار است. یکی از راه‌های ممکن برای تجزیه و تحلیل مکانیکی، ساختن یک مدل عناصر محدود براساس مسیرهای اکسترودر است، بدین ترتیب هر عنصر مسیری برای ساخت یک عنصر محدود با ویژگی‌های شناخته شده مانند حضور فیبر، جهت‌گیری فیبر، و غیره به‌کار گرفته می‌شود. هنگام ترکیب فیبر و ترموپلاستیک با هم، چسبندگی فیبر به ماتریس ترموپلاستیک، رفتار هر دو مواد در هنگام خنک کردن و رفتار مکانیکی رشته کامپوزیت در حالی که به قطعه کار بر روی مسیر منحنی فشار داده یا کشیده می شود، همه حائز اهمیت هستند اما پارامترهایی ناشناخته می‌باشند. زاویه خمیدگی حائز اهمیت نباید بیش از حد باشد، زیرا این امر موجب آسیب رساندن به فیبرها خواهد شد. بنابراین مجموعه‌ای از پارامترهای احتمالی می‌تواند مربوط به ویژگی‌های فیبر و ترموپلاستیک، دمای اکستروژن، شعاع، زاویه شیب، زاویه باز و غیره باشد. زاویه اکستروژن را می‌توان با چرخش سر اکستروژن در جهت معکوس به سمت مسیر به حداقل رسانده، به طوری‌که رشته را به‌جای خم کردن، به عقب بکشد. این امر باید در ابزار CAM برنامه‌ریزی شود. برای اعمال این مسیرها در فرآیند، دو محور اضافی در سر چاپ مورد نیاز است. علاوه بر این دو محور، نازل باید به شیوه ای جدید برای کاهش زاویه اکستروژن طراحی شود. نازل‌های فعلی امکان تبدیل فیبر را به‌صورت مذاب ترموپلاستیک فراهم نمی‌کنند. علاوه بر این، نازل های کوتاه زاویه اکستروژن ممکن را کاهش می‌دهد. هدف ایجاد نازل جدیدی است که امکان تبدیل فیبر را به ذوب بدون حباب های هوا فراهم می کند. طراحی نازل باید برای کاهش محدودیت‌های اعمال شده بر زاویه اکستروژن انتخاب شود. مکانیک نازل به منظور تبدیل فیبر به مذاب ترموپلاستیک طراحی خواهد شد، به‌طوری‌که از سیستم تامین مواد آن کشیده شده است. شکل منحنی آداپتور نازل باید اجازه دهد که زاویه اکستروژن به آسانی افزایش یابد تا از برخورد صفحه چاپ با قطعات ساخته شده یا دستگاه جلوگیری شود. یک سیستم تغذیه فیبری کنترل نشده بدون بازخورد می‌تواند به شل شدگی در بخش‌های فیبری سیستم منجر شود، که باعث خم شدن یا ریزش می شود که ممکن است به کلاف فیبری آسیب برساند یا حتی آن را بشکند.



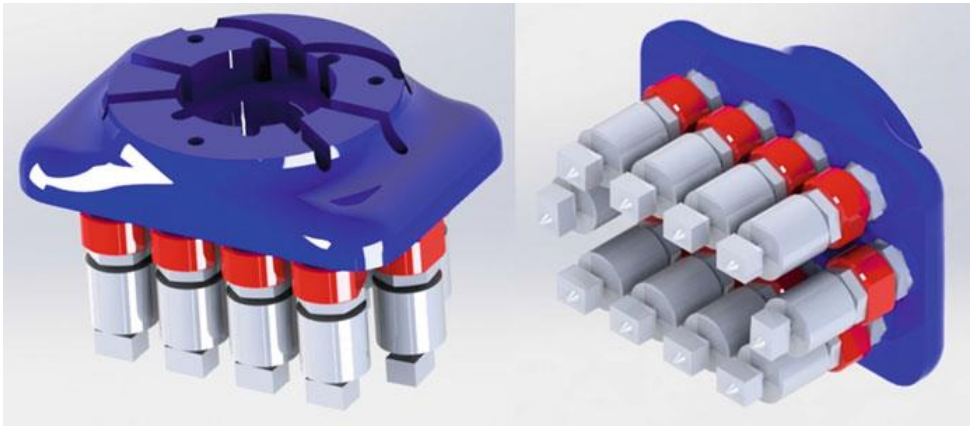
تصویر ۵. زاویه محدود برای تبدیل فیبر نیازمند طراحی نازل جدید است؛ ماخذ: HerrmannM,Wolf C, SobekW(2015

اگر میزان تغذیه فیبر و رشته ترموپلاستیک هماهنگ نباشد، هندسه قطعه کار و تنش‌های داخلی تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. در بدترین حالت، ممکن است در طی فرآیند ساخت انحراف قطعه کار رخ دهد. هم زمان با ادغام سیستم های حسگر، کشش فیبر و سرعت اکستروژن باید کنترل شود تا رفتار فیبر تعریف شده تضمین شود. تنش فیبر را می توان توسط کنترل رقصنده با یک سنسور نیروی یکپارچه کنترل کرد. رقصنده می‌تواند یک درایو منفعل یا فعال باشد، به عنوان مثال درایو الکتریکی کنترل تنش فیبر به این طریق تضمین می‌کند که فیبر باقی‌مانده در مسیر تغذیه تعریف شده تحت تنش تعریف شده است. برای اندازه گیری میزان فیبر واقعی فیدر، می توان از یک تلمبه کشنده ای با حلقه یکپارچه استفاده کرد. رقصنده می‌تواند یک فنر منفعل یا فعال مانند درایو الکتریکی، باشد. کنترل تنش فیبر به این طریق تضمین می کند که فیبر در مسیر تغذیه تعریف شده تحت تنش تعریف شده باقی می ماند. برای اندازه گیری میزان تغذیه واقعی فیبر، می‌توان از قرقره کشنده ای با رفع کننده یکپارچه استفاده کرد. از آن‌جاکه فیبرها تنها قادر به دریافت نیروهای کششی هستند و از آنجا که نیروی کششی اصلی تغذیه توسط ترموپلاستیک اکسترود شده القا می‌شود، سیستم کنترل تنها می‌تواند سرعت جریان را توسط یک ترمز الکترو پویا در رول فیبر یا با یک عملگر اضافی، کاهش دهد.

۴-۱ آرایه نازل برای رسوب سریع مواد

سازه‌های با مقیاس بزرگ نیاز به نرخ ساخت بالاتری از ماشین های فعلی FDM می توانند داشته باشند. برای افزایش حجم مواد اکسترود شده در زمان، مفاهیم جدید با آرایه های نازل در حال توسعه هستند، که احتمالات سیستم‌های امروز را افزایش می دهد. آرایه های نازل امکان اتصال فرآیند اکستروژن را فراهم می‌کنند، بنابراین مواد تغذیه را افزایش می‌دهند. بسته به زاویه چرخش آرایه با توجه به جهت هدایت سر چاپ، ساختارهای مختلف (چندین خط موازی، منطقه بسته یا یک دیوار نازک) می‌توانند تولید شوند. اگر چاپی در جهت آرایه حرکت کند، دیوار نازک می‌تواند

به سرعت ساخته شود؛ با این حال، به منظور اجتناب از برخورد یک نازل با مواد اکسترود شده از متصل کننده آن، به محورهای z در نازل مورد نیاز است. پردازش FDM با آرایه نازل نیازمند استراتژی های جدید برای برنامه ریزی و کنترل مسیر است. هدف اصلی این روش جلوگیری از برخورد با ناحیه های چاپ شده قبلی و در عین حال کاهش زمان ساخت توسط اکستروژن موازی است.



تصویر ۶. مفهوم سر چاپ با آرایه نازلی شامل ده نازل؛ ماخذ: Dadalau A, Hafla A, Verl A (2009)

۳-۴ فرآیندهای پولتروژن و بافت برای سازه‌های سبک مسلح فیبری

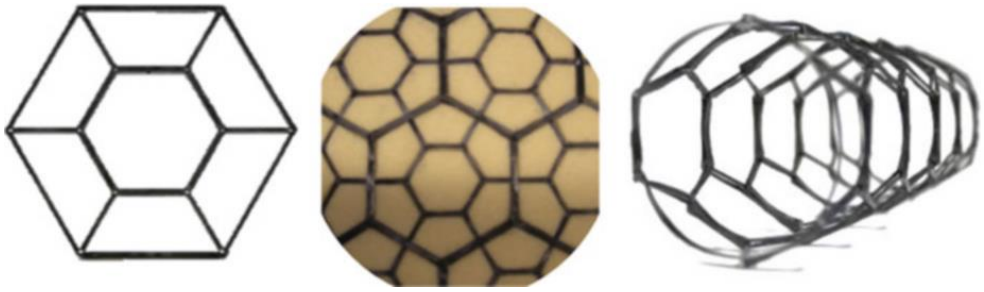
پولترژون یکی از فرآیندهای بسیار اندکی می باشد که برای تولید مداوم کامپوزیت‌های مسلح فیبری نامحدود موجود است. این امر امکان تولید پروفیل‌ها مانند میله‌ها، تیرآهن یا لوله‌های توخالی را در طیف گسترده ای از مقاطع ثابت ممکن با مواد ماتریس مختلف (رزین‌های ترموست و ترموپلاستیک) و مواد فیبری (مانند کربن، شیشه، بازالت و غیره) فراهم می‌سازد. به دلیل هزینه های به صرفه آن‌ها، پروفیل های کامپوزیتی پولتروژن شده به طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی و حمل و نقل هوایی استفاده می شوند. خروجی بالای تولید نیز باعث می‌شود فرآیند پولتروژن به ویژه برای ساخت قطعات کامپوزیت برای صنعت ساخت و ساز در مقادیر زیاد مناسب باشد. با فرآیند پولتروژن سنتی نشان داده شده در تصویر ۴ تنها پروفیل تقویت‌شده یک طرفه می‌تواند تولید شود. این پروفیل‌ها می‌توانند بارهای کششی و خمشی را تحمل کنند. به دلیل کمبود فیبر در جهت مخالف، توانایی تحمل بارهای پیچشی کم است. پروژه‌های مختلف به افزایش توانایی فرآیند پولتروژن در تولید شکل ها و پروفیل های پیچیده‌تر هدفمند می‌باشد. به‌عنوان مثال، خطوط پولتروژن برای تولید پروفیل های منحنی به تازگی توسعه یافته است (Mallick ۲۰۰۸). با این‌حال، تا به امروز، هیچ خط پولتروژنی به ساخت سازه‌های سه بعدی پیچیده سلسله مراتبی یا شیب‌دار مشاهده شده در ژنراتور مفهوم طبیعی، قادر نیست. سایر روش‌های تولید نیز برای سازه‌های ساختمانی مانند آنچه که در طبیعت یافت می‌شود، مناسب نیستند. اولین قدم به سوی یک فرآیند پولتروژن مقرون به صرفه برای تولید (بیمیمتیک) پروفیل‌های FRP بهینه شده، ادغام یک ماشین برش در خط پولتروژن است.

تکنیک بافت این امکان را می‌دهد که فیبرهای مارپیچی با فیبرهای یک طرفه ادغام شوند. بنابراین، یک پروفیل بافتی پولتروژن شده نیز می‌تواند بارهای چرخشی را تحمل کند. فرآیند بافت اجازه می‌دهد تا زاویه های فیبر را بین ۱۰ و ۷۰ درجه در راستای محور پولتروژن تنظیم شود. بنابراین، بسته به زاویه بافت، نسبت سفتی خمشی و سختی پیچشی می‌تواند تنظیم شود. در همکاری تنگاتنگ، متخصصان زیست‌شناسی و مهندسین، انواع گیاهان مختلفی نظیر علف‌های هرز (Arundo donax) و دم‌اسبی (Equisetum hyemale) را برای یافتن خواص مکانیکی پروفیل های پولتروژن شده، مورد بررسی قرار دادند. کار تحقیق در نهایت منجر به توسعه پروفیل ساقه گیاهی فنی با قابلیت‌های تعدیل ساختاری بسیار بالاتری نسبت به پروفیل لوله‌ای با همان محدوده سطح مقطع بود (Ghomeshi ۲۰۱۵). این امر امکان انتقال جرم و اطلاعات را از طریق سازه کامپوزیت فراهم می‌کند. در این مورد، بهینه سازی بیومیمتیک سازه نه تنها به خواص مکانیکی کمک می‌کند، بلکه همچنین عملکردهای جدیدی مانند امکان ادغام سنسورها به پروفیل‌ها را به آن می‌افزاید. این قدمی به سوی تولید انبوه ساختارهای کامپوزیت هوشمند است.

۳-۴ تنظیم فرآیند پولتروژن برای تولید اجزای سبک وزن فضایی زیست الهام

بافت-پولتروژن اجازه می‌دهد تنوع خواص مکانیکی پروفیل بدون تغییر در نوع فیبرهای تقویت کننده یا ماتریس با تنظیم زاویه‌های فیبر زا امکان‌پذیر می‌کند. با این وجود، در حالت کنونی، روند پولتروژن محدود به پروفیل با یک مقطع ثابت است. برای غلبه بر محدودیت‌های فعلی فرآیند پولتروژن، روشی جدید برای تولید سه‌بعدی (فضایی) قطعات تقویت شده فیبر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- هدف این است که فرآیند پولتروژن را بیشتر توسعه دهیم که پس از آن می‌تواند فیبرها را به صورت فضایی بدون نیاز به یک ابزار یا هسته بسازد.
- هدف دوم، ایجاد یک سازه بهینه‌سازی شده به لحاظ توپولوژیکی زیست‌الهام توسط تغییرات تدریجی در جهت‌گیری فیبر و چگالی فیبر در مناطق بسیار کوچک می‌باشد. توپولوژی بسیار پیچیده‌ای در سطوح مختلف سلسله‌مراتبی در گونه‌های پلانکتون دیده می‌شود. در پروژه فناوری پلانکتون، توپولوژی بهینه‌سازی شده به صورت طبیعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و به سازه‌های کامپوزیتی مختلف منتقل می‌شود (Milwich ۲۰۱۵).

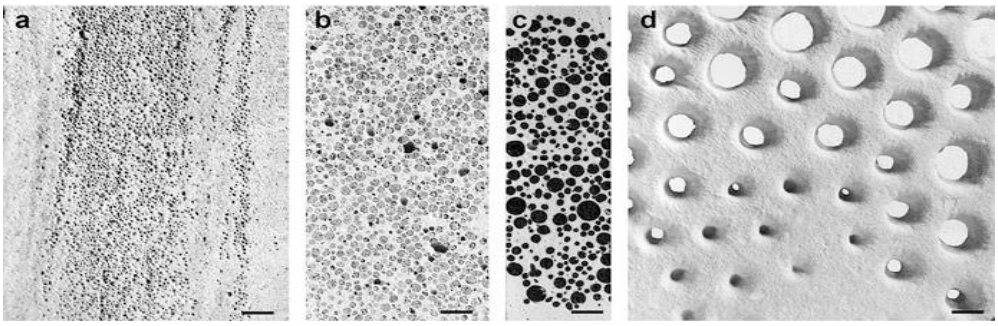


تصویر ۷. سازه های فنی بیمیمتیک الهام گرفته شده از دیاتوم ها؛ ماخذ:(2015) Milwich M

قرار دادن فیبرها به صورت فضایی می‌تواند با نصب قطعه ای پولتروژن روی یک ربات صنعتی حاصل شود. این امر باعث می شود که قالب پولتروژن تقریبا به همه مختصات در فضای کاری نزدیک شود و اساسا لایه‌گذاری فضایی را امکان پذیر سازد. همانطور که فیبرها باید از درون قالب کشیده شوند، یک دستگاه کشنده در جلو قالب نصب شده است. هدف دوم (تغییر جهت گیری/ چگالی فیبر) را می‌توان با استفاده از چندین قالب پولتروژن با مواد و یا ضخامت فیبر مختلف همان مواد فیبری به دست آورد. برای تولید سازه‌های فضایی از طریق حرکت قالب پولتروژن، به سیستم ماتریس ترموست پخت سریع برای دستیابی به سرعت تولید بالا مورد نیاز است. بررسی سیستم های مختلف ماتریس به این نتیجه رسیده است که سیستم های ماتریس ترموپلاستیک فقط برای بخشی از فرآیند پولتروژن ذکر شده اند.

ویسکوزیته بالا رزین های ترموپلاستیک می‌تواند باعث رطوبت رسانی ناکافی به فیبر شود و از این رو خواص مکانیکی خوبی به دست نمی آید (Mallick ۲۰۰۸). یک گزینه برای بهبود رطوبت رسانی استفاده از فیبرهای تقویت کننده است که با ماتریس ترموپلاستیک (پیش آغشته های ترموپلاستیک) پیش اشباع شده است. این پیش آغشته‌های نسبتا سفت هستند و برای تغییر سریع خواص کامپوزیت مناسب نیستند. در مورد سیستم‌های ماتریس ترموست، رزین‌های اپوکسی مواد ماتریسی استانداردی برای بسیاری از قطعات FRP هستند. یکی از معایب رزین های اپوکسی این است که در طول تولید نیاز به دوره های پخت/ پس از پخت نیازمندند (Mallick ۲۰۰۸). نه تنها زمان پخت بلکه درجه اتصال متقابل رزین می‌تواند با تغییر طول موج یا شدت منبع نور UV، تنظیم شود. شدت کم تابش عامل پخت نوری، واکنش متقابل را کاهش می‌دهد و رزین می‌تواند به حالت ژل تبدیل شود که در این حالت بسیار چسبناک است اما هنوز قابل تغییر است. این امر باعث می شود که قدرت اجزای کامپوزیتی پولتروژن شده برای تغییر شکل بعدی امکان پذیر باشد. با استفاده از این پتانسیل، اتصالات متقابل بین فرآیندهای مختلف یا پروفیل‌ها می‌توانند شکل بگیرد. هنگامی که بخش غیرمتصل به سمت راست جایگاه می رسد، می تواند با تابش نقطه ای مجدد بر آن بخش با اشعه ماوراء بنفش کاملا پخته شود. این فرآیند جدید پولتروژن فضایی هنوز در مرحله مفهوم است و هنوز اعتبار ندارد. چندین پارامتر فنی مانند عرض افقی حداکثری بدون انحراف، حداقل

شعاع تغییر مسیر بدون خم شدن، کسر حجم فیبر ممکن، نیروهای کششی و سرعت تولید ممکن باید مورد بررسی قرار بگیرد. دو مخلوط بتن با بالاترین و کمترین مقدار چگالی به عنوان پایه ای برای تولید گرادیان‌ها از طریق ترکیب آن‌ها در مقدار مورد نیاز (Herrmann و همکاران ۲۰۱۵) توسعه داده شده است. برای تسهیل دستیابی و تجزیه و تحلیل در مرحله توسعه، مخلوط‌های مرجع شامل سیمان (CEM I 52.5 R)، آب و دانه‌های ماسه (شن و ماسه با ابعاد تا ۲ میلی متر) برای مخلوط سنگین و علاوه بر این از سنگ شیشه ای منبسط برای ترکیبات کم چگالی (Heinz و همکاران، ۲۰۱۱) می‌شود. محدودیت چگالی پایین تر به اندازه ماسه سبک و استفاده از عوامل افزودنی و تشکیل دهنده بستگی دارند و در حال حاضر در هنگام استفاده از دانه‌های با اندازه دانه ۱–۲ میلی متر استفاده می شود، به ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌رسد. بنابراین، مقدار چگالی جسم می‌تواند به میزان ۶۵٪ در مقایسه با مخلوط سنگین با چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم در متر مکعب کاهش یابد. برای مقایسه، بافت‌های بیولوژیکی بسیار معدنی مثل مرجان ها و اکینوئید ها دارای محدوده چگالی مشابهی هستند که از نواحی کلسیت متراکم با چگالی ۲۷۰۰–۳۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب تا نواحی به شدت متخلخل ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب متغیر هستند. محدوده‌های پایین تر، تطبیق پارامترهایی مانند اندازه، شکل یا هماهنگی شن های سبک وزن مورد بررسی قرار گرفته اند. افزایش اندازه دانه از ۱ تا ۴ میلی متر باعث کاهش حدودا ۱۰٪ چگالی می شود. با این حال، انتقال مخلوط با شن‌های بزرگتر در مورد فناوری کاربرد اسپری کردن با استفاده از دستگاه‌های پاشش پمپ گرم، مشکل‌ساز می‌شود؛ به دلیل وزن نامناسب و چسبندگی اجزای مخلوط، شن‌های سبک وزن در انتقال از پمپ به شلنگ موفق نمی شوند. در این مورد، تطبیق ویژه تولید از مخلوط باید ارائه شود. یکی دیگر از راهکارها این است که اندازه‌های مناسب دانه را در نسبت مورد نیاز به منظور افزایش چگالی کلی ذرات شن ترکیب کنید، در نتیجه افزایش کسر حجمی شن سبک وزن و در عین حال کاهش میزان اتصال دهنده که باعث کاهش مقدار چگالی جسم می‌شود.

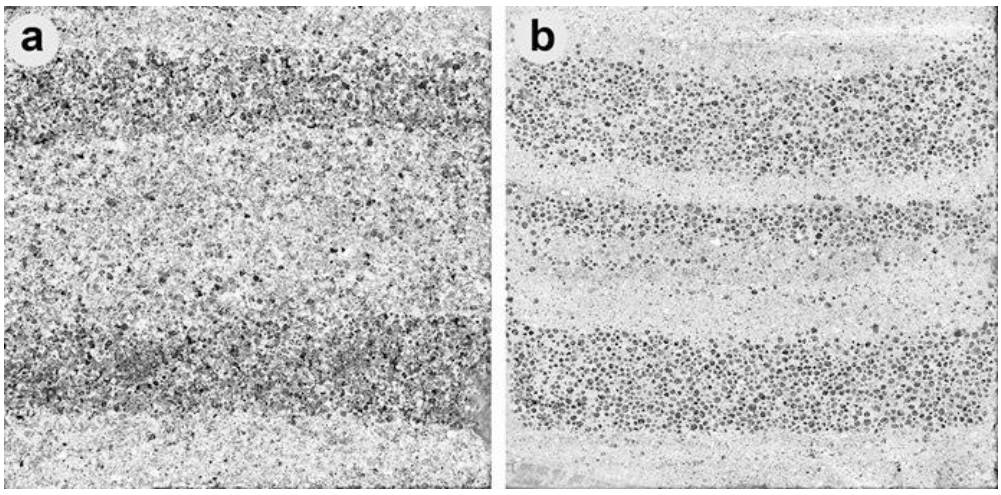


تصویر ۸. اندازه ها و روش های مختلف برای گرادیان تخلخل آجر هوشمند. (a، b، c) – بتن شن سبک وزن با اندازه دانه ۱–۲ میلی متر، ۲–۴ میلی متر، ۴–۸ میلیمتر، بر این اساس؛ (d) – بتن متخلخل باز؛ تمام نمونه ها در یک مقیاس، مقیاس نشانه ۱D سانتی متر است.

۴-۴ اسپری و ریخته‌گری بتن هدفمند

بخش مهمی از فناوری بتن هدفمند که بر ایجاد مخلوط تاثیر می گذارد و محدودیت ها را در طراحی طرح ایجاد می سازد، تکنیک کاربرد بتن است. در حال حاضر دو تکنیک لایه ای مختلف ریخته گری و اسپری در موسسه سازه های سبک وزن و طراحی مفهومی دانشگاه اشتوتگارت برای کاربرد بتن گرادیان مورد استفاده قرار می گیرند (Woerner و همکاران، ۲۰۱۵).

برای هر دو تکنیک، دو مخلوط بتن با مقادیر حداقل و حداکثر چگالی باید بر اساس محدودیت های ویژه تولید از لحاظ منحنی طبقه بندی شن، نسبت آب/ سیمان، افزودنی های مناسب و غیره تنظیم شود. تکنولوژی ریخته گری ثابت می کند که کنترل راحتی دارد و برای طرح بندی لایه ای با درجه بندی یک طرفه چگالی های مواد مناسب است. برای رسیدن به گرادیان مشخصی دلخواه، دو مخلوط که قبلا ساخته شده اند در میزان مورد نیاز و ترکیب می شوند و در قالب بندی به صورت لایه در لایه قرار می گیرند. از لحاظ اهمیت، ترکیبات باید با توجه به سازگاری آن ها با ترکیب گرادیان ها ایجاد شوند، در غیر این صورت، اثرات نامطلوب مانند چگالی کامل معیوب می تواند مشاهده شود. تراکم و ضخامت لایه هنگام استفاده از بتن شن سبک وزن می تواند به راحتی قابل پیش بینی و کنترل باشد.

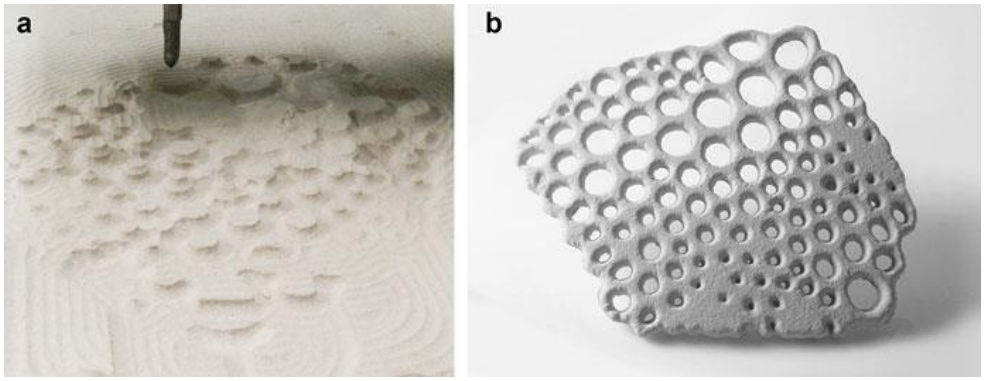


تصویر ۹. نمونه گرادیان‌های تولید شده آجر هوشمند توسط فناوری (a) ریخته گری و (b) اسپری؛ ماخذ: Woerner M, Sippel S, Schmeer D, Garrecht H, Sobek W, Sawodny O (2015)

با این حال، چندین نقص در فناوری ریخته‌گری با توجه به استفاده از آن در تولید گرادیان، از قبیل عدم توانایی جمع شدن بتن پس از ریخته‌گری، به علت حضور چگالی بتن‌های مختلف و محدودیت در دستیابی گرادیان‌های پیچیده فضایی، تجربه می‌شود. در مورد گرادیان‌های دو و حتی سه بعدی پیچیده‌تر، فناوری اسپری مناسب‌تر ثابت شده اند. با اسپری کردن، دو ترکیب بتنی مخلوط می شوند و از طریق شیلنگ به نازل، پمپ می شوند. تنوع خواص مواد با دستکاری مقدار مواد منتقل شده در هر شلنگ از طریق تنظیم سرعت چرخش پمپ بدست می آید. با افزایش مداوم میزان جریان یک

ترکیب و کاهش دیگری، گرادیانی یک طرفه بدون درز بین دو مخلوط قابل دستیابی است. کاربرد مواد روی سطح تحت فشار هوا منجر به فشرده‌سازی مناسب می شود، که امکان استفاده از مواد را در سه بعد، حتی در مناطق سربار، امکان پذیر می‌سازد. ساختارهای ساندویچی هدفمند چندین نوع از طرح ها، از طریق ریخته گری و تکنیک های اسپری خشک، توسعه داده و تولید شده اند تا تکرارپذیری گرادیان های یک طرفه را آزمایش کنند که می توانند در هنگامی استفاده شوند که ترکیب عملکرد ساختاری مانند جذب شوک با ادغام از عملکرد اضافی، مانند عایق حرارتی، مورد نیاز است. این نوع سازه در سیستم‌های طبیعی، به‌عنوان مثال، در زره های پوستی حیوانی گسترده است. طرح‌ها در توزیع و ضخامت لایه های گرادیان متفاوت هستند. بخش صدف هدفمند یک بخش صدف متخلخل باز ساخته شده است تا توانایی آن برای ساخت گرادیان های بتنی دو بعدی و مزو ساختاری آزمایش شوند که می تواند هنگامی مورد استفاده قرار گیرد که رفتار ساختاری بهینه سازی شده باید با عملکرد متضاد، مانند نفوذ نور ترکیب شود. الگوی استرس حاصل از مدل تحلیلی ساختاری، به توزیع مزوساختاری تخلخل بتن، با توجه به محدودیت های مواد مانند استقامت ستون، تبدیل شده است. چنین سازه‌های متخلخل بازی در بسیاری از سیستم های طبیعی مشاهده می شود، به عنوان مثال، سازه‌های کلسیت متخلخل بسیار معدنی در اکینوئید و دیگر موجودات دریایی.

نشـــریـه علمی فرهنگ و زیست فناوری معماری، سال ۱، شماره ۲



تصویر ۱۰. ساخت سازه‌های متخلخل با استفاده از قالب‌بندی شن یخزده برای ساخت آجر هوشمند. (الف) سنگ‌زنی منجمد؛ (ب) قطعه بتونی ریخته با تخلخل درجه‌بندی شده؛ ماخذ: Ghomeshi R (2015)

با وجود این که شکل و اندازه منافذ توسط خواص مواد و فرآیند بیومینالیزاسیون محدود می شوند، هنوز می توان تغییرات قابل توجهی در تخلخل مشبک از نواحی کاملا متراکم تا ۶۵٪ مشاهده کرد، که نفوذ پذیری سازه برای حمل و نقل تغذیه درون ارگانیسم را تضمین می کند. در این مورد خاص، ساخت چنین سازه‌ای با استفاده از تکنیک قالب بندی شن یخ زده امکان پذیر می‌شود که بدون اتلاف است و امکان آماده سازی قالب‌های پیچیده سه بعدی را با تهیه مخلوط یخزده از آب و شن فراهم می‌کند (Gericke و همکاران ۲۰۱۵). همچنین دارای پتانسیل برای توسعه قالب های فضایی پیچیده است، زیرا هیچ محدودیتی از قبیل کمبودها یا مشکلات تنگنا ندارد. به محض این که بتن به

قالب ریخته شود، خنک سازی شن متوقف می‌شود، از حالت منجمد درمی آید، و بعد از مدت زمان لازم برای سخت شدن بتن، می توان آن را آزادانه برداشته و دوباره استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری و جمعبندی

آجر از رایج‌ترین و پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان‌سازی است. استفاده از متربال آجر که نماد اصالت معماری ایرانی می‌باشد سبب دوری از نماهای غربی در سازه‌ها می‌شود؛ بنابراین جای بسی امیدواری است که نماهای ساختمان‌ها که نشان از فرهنگ و تمدن غنی ایرانی است را با استفاده از مواد و مصالح و تکنولوژی پولتروژن جدید بتوان همچنان زنده نگه‌داشت. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به ساخت و ساز سریع استفاده از فناوری‌های نوین در صنعت ساخت و ساز هم از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است و هم جلوگیری از کاهش هدر رفت منابع می‌کند. آجرهای هوشمند هم از این قاعده مستثنی نیست و جایگاه خودش را در ساختمان‌سازی مدرن امروزه پیدا کرده است و هم چشم‌انداز خوبی در آینده برای این صنعت نوپا وجود دارد. ترکیبی از فرآیندهای تولید، پتانسیل بالایی برای تولید سازه‌های پیچیده بیولوژیک نشان می دهد، عمدتا به این علت که سیستم‌های طبیعی، علیرغم مشکل ساز بودن در ساخت آن‌ها در یک فرآیند واحد، ساختارهای سلسله مراتبی چند مقیاسی و کامپوزیت‌های چند ماده‌ای هستند. سه دسته فرآیند که در این مقاله شرح داده شده، پردازش گروه‌های مختلف مواد (ماتریس های فیبر، پلیمر و مواد معدنی) را ارائه می دهند و در مقیاس‌های مختلف عمل می‌کنند. این امر امکان استفاده از مزایای یک فرآیند برای غلبه بر محدودیت‌های دیگری، مانند تولید اجزای بتنی در مقیاس بزرگ، سازه‌های دقیق و پیچیده توسط FDM و تقویت فیبر بی پایان از مواد مختلف ماتریس را فراهم می‌کند.

(*) اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است. (تعارض منافع به حالتی گفته می‌شود که منافع شخصی مادی یا غیرمادی نویسنده یا نویسندگان با نتایج پژوهش در تعارض باشد و این موضوع بر روند انجام پژوهش یا اعلام صادقانهٔ نتایج تأثیر بگذارد).

۶- منابع و ماخذ

1- Dadalau A, Hafla A, Verl A (2009) A new adaptive penalization scheme for topology optimization. Prod Eng Res Dev (WGP) 3(4):427
2- Duan Y, Wang Y, Tang Y et al (2010) Fabrication and mechanical properties of UVcurable glass fiber-reinforced polymer–matrix composite. J Comp Mat 45(5):565–572.
3- Fischer A, Rommel S, Bauernhansl T (2013a) New fiber matrix process with 3D fiber printer – a strategic in-process integration of endless fibers using fused deposition modeling (FDM). Digital product and process development systems, Bd. 411, Springer, Berlin Heidelberg, pp 167–175

4- Fischer A, Rommel S, Verl A (2013b) 3D fibre printer – generativ gefertigte thermoplastische Kunststoff Bauteile mit Endlosfaser Integration. Tagungsband Anwenderforum Gericke O, Haase W, Sobek W (2015) Herstellung von Freiform-Betonbauteilen mittels einer gefrorenen Schalung aus Wasser und Sand, DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloqium, Stuttgart
5- Ghomeshi R (2015) Entwicklung von biomimmetisch optimierten, pultrudierten Faserverbundprofilen mit verbesserten dynamischen Eigenschaften. Dissertation, University of Stuttgart
6- Heinz P, Herrmann M, Sobek W (2011) Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für Funktional Gradierte Bauteile im Bauwesen. Final report Research Initiative Future Building, University of Stuttgart
7- HerrmannM,Wolf C, SobekW(2015) Design and manufacturing of optimal structures made from functionally graded concrete. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) 2015, Amsterdam
8- Mallick PK (2008) Fiber-reinforced composites: materials manufacturing and design. CRC Press,
9- Boca Raton
10- Milwich M (2015) Biomimetic engineering of tailored, ultra-lightweight fibrous composites.
11- In: Hamm C (ed) Evolution of lightweight structures – analyses and technical applications. Springer, Dordrecht
12- Neitzel M, Mitschang P, Breuer U (2014) Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung
13- Woerner M, Sippel S, Schmeer D, Garrecht H, Sobek W, Sawodny O (2015) Automated spraying of functionally graded concrete components – analysis of the process parameters. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) 2015, Amsterdam

Energy storage using smart bricks in biomimetic structures with poltrogen processes

Abstract

Baked brick is one of the world's building materials, produced by a thousand-year-old technology, and plays an essential role as one of the basic materials in construction and building. These widely used materials are used in (façade construction, skeleton construction, porcelain chairs, wall construction, arches and covering all kinds of arches, carpet floors). Considering the abundant use of bricks, the optimization of such an industry in the modern era today and in the future will bring about a big step towards the industrialization of buildings. The current article aims to scientifically investigate and how smart bricks work, including high resistance, high thermal control, reduction of energy consumption, passage of facilities (pipes and cables), ease of construction, its application in facades. Building and storing solar energy which leads to reducing heat loss and stores heat and cold in itself. The final goal of the research is building buildings with higher construction speed, cost reduction, energy storage, high strength and durability, higher heat capacity, lighter, etc. from the methods of construction using the poltrogen system. Be Also, the conversion of biological paradigms to the construction of buildings, the transfer of structure and system definition features from biological models to systems, includes special innovative non-structural processes. The challenge of building biomimetic and bio-inspired structures includes providing methods and trends that allow the mapping of biological characteristics in the form of drawings related to production. The methodological approach requires validating and confirming existing production methods on a small scale (models, primary cells) to transfer the findings to the production of structural components. In addition, biological characteristics that cannot be reproduced by existing methods require further adjustment or development of new methods for proper transfer. The basic condition for the further development of such production processes is the possibility of producing complex structures based on biological strategies that are related to resource and energy consumption, waste production, and greenhouse gas emissions.

Key words: *smart brick, biomimetic structures, poltrogen processes, modular structure*