لایه نشانی سرامیک مذاب (FDC) روشی بهینه جهت ساخت کامپوزیت‌های پیزوالکتریک

فریار عین‌خواه، نفیسه سهرابی، زیارتعلی نعمتی

دانشگاه صنعتی شریف

feinkhah@alum.sharif.edu

چکیده: *کامپوزیت‌های پیزو الکتریک سرامیک- پلیمری به روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند که روش لایه نشانی سرامیک مذاب FDC (fused deposition of ceramics) یکی از این روش‌ها است. این روش، یک روش ساخت قطعات سه بعدی به صورت ساخت قالب بدون شکل SFF (solid freeform fabrication) می‌باشد. در این روش قطعات بصورت لایه به لایه و کنترل شده توسط کامپیوتر از فایل CAD (computer-aided design) بر روی یک سطح بدون نگهدارنده ساخته می‌شوند. از این طریق بصورت مستقیم یا غیر مستقیم در ساخت کامپوزیت‌های پلیمر- سرامیک استفاده می‌شود. در روش مستقیم لایه نشانی سرامیک مذاب، از فیلمان پلیمری ترموپلاست حاوی ٪۵۵-۵۰ پودر سرامیکی جهت ساخت طرح مورد نظر استفاده می‌شود. به کمک این روش امکان ایجاد ساختارهای جدید با ترکیب‌ها و پیوستگی‌های مختلف جهت کاربردهای متنوع و همچنین قابلیت ساخت کامپوزیت‌ها با نسبت‌های حجمی و ریزساختارهای مختلف وجود دارد. یکی از مزایای روش لایه نشانی سرامیک مذاب نسبت به بقیه روش‌های نمونه‌سازی سریع (RP) قابلیت این پروسه برای ساخت قطعات با هر نوع ماده، با هر اندازه و ساختارهای پیچیده (حتی با ابعاد کمتر از چند میلیمتر) می‌باشد.*

در این نوشتار ضمن بررسی کلیات، مزایا و معایب این روش در ساخت کامپوزیت‌های پیزو الکتریک برخی نتایج حاصل توسط محققان ارائه شده است.

کلمات کلیدی: *لایه نشانی سرامیک مذاب، کامپوزیت‌های پیزو الکتریک، نمونه‌سازی سریع.*

۱- مقدمه

پیزوالکتریسیته را می‌توان به توانایی و قابلیت یک ماده برای ایجاد بار الکتریکی متناسب با تنش و کرنش مکانیکی اعمالی، تعریف نمود. خاصیت پیزوالکتریسیته یک خاصیت دو طرفه است. در حالت پیزوالکتریک مستقیم، با اعمال تنش به ماده میدان الکتریکی ایجاد می‌شود و در حالت معکوس میدان الکتریکی اعمالی باعث ایجاد کرنش در ماده می‌شود[۱].

این خاصیت اولین بار توسط برادران کوری (پیر و ژاکوب) در سال ۱۸۸۰ کشف شد. تا آن زمان فقط دو نوع ماده فروالکتریک نمک راشل و فسفات دی هیدروژن پتاسیم, شناخته شده بود. اما طی دهه ۱۹۴۰، اکسیدهای تیتانیم و باریم و سپس تیتانات باریم به جمع گروه مواد پیزوالکتریک اضافه شدند و به تدریج طی این سال‌ها مهمترین و اصلی‌ترین گروه سرامیک‌های پیزوالکتریک, یعنی خانواده PZT (اکسید تیتانیم زیرکونات سرب) ساخته شد و به تدریج با رشد و توسعه آنها، کاربردهای زیادی در ساخت تجهیزات صنعتی مطرح گردید[۲].

مواد پیزو الکتریک به دلیل کاربردهای فراوان در انواع سیستم‌های الکترومکانیک بسیار مورد توجه بوده است. از بین انواع سرامیک‌های پیزو الکتریک، PZT جزء مهم‌ترین و اصلی‌ترین گروه به شمار می‌آید. سرامیک‌های PZT، مزایای بیشماری از قبیل ارزان بودن، صرفه اقتصادی و راحتی روش‌های ساخت دارند. همچنین دارای ضریب کوپلینگ الکترومکانیکال مناسب و ضریب دی الکتریک بالا می‌باشند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

علاوه بر مزایای فوق، پیزو الکتریک‌های PZT دارای محدودیت نیز می‌باشند. مثلا ضریب هیدرواستاتیک (dh) و ضریب ولتاژ هیدرواستاتیک (gh) پایینی دارند. از طرفی امپدانس آکوستیک بالا و سازگاری ضعیف آکوستیکی با آب و محیطهایی که امواج از آنها ارسال و یا دریافت می‌شوند، دارا می‌باشد. علاوه بر آن، PZT نمی‌تواند به راحتی روی سطوح انحناء دار شکل بگیرد و نمی‌توان آنها را به اشکال انحناءدار و پیچیده جهت طراحی مبدل‌ها ساخت. به این دلیل که دارای ساختار بسیار شکننده و ترد می‌باشند. از طرفی نویزهای مزاحم زیادی در مورد رزونانس آنها وجود دارد که گسترش آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳و۴].

دو مسئله بسیار مهم در این بخش مطرح بوده است. یکی فرایند/ فرایندهای ساخت مخصوصاً در قطعات با شکل و یا طراحی پیچیده و یا کامپوزیتی و دیگری خواص نهایی سیستم. در جهت کنترل و دستیابی به خواص مورد نظر در هر دو بخش، پلیمرها در ساخت کامپوزیت‌های پلیمر – سرامیک بکار گرفته شدند. از طرفی از آن جایی که خواص پلیمرها و سرامیک‌های پیزو الکتریک به تنهایی نیازهای صنعتی را برآورده نمی‌کرد، ساخت کامپوزیت‌های پلیمر–سرامیک از دهه ۱۹۸۰ شروع شد و رشد چشمگیری پیدا کرد. کامپوزیت‌های پیزو الکتریک شامل سرامیک پیزوی فعال در زمینه پلیمر غیر فعال می‌باشد که دارای خواص بسیار مناسب در مقایسه با مواد مونولیتیک می‌باشد. طی دو دهه اخیر، محققان روش‌های مختلف ساخت کامپوزیت‌های پیزو الکتریک و بهبود خواص آنها را بررسی کرده‌اند [۵و۶].

اکثر روش‌های ذکر شده در ساخت قطعات با طراحی‌های پیچیده، محدودیت‌های زیادی دارند. در زمینه توسعه محصولات، ساخت نمونه یکی از مراحل وقت‌گیر و پرهزینه ساخت است. در طول چند دهه اخیر روش‌های جدیدی بررسی شده که در آن از فایل کامپیوتری CAD برای ساخت مدل کاربردی سرامیکی، فلزی و پلیمری بدون نیاز به قالب استفاده می‌شود. این روش مزایای بیشماری از جمله بهبود طراحی و صرفه جویی در مواد را دارد. به این روش‌ها، روش‌های نمونه‌سازی سریع یا ساخت جامد بدون شکل[1] گفته می‌شود که نه تنها جهت ساخت نمونه کاربرد دارند، بلکه با پیشرفت‌های اخیر جهت تولید مستقیم محصولات با تیراژ کم و ساخت قالب و بقیه ابزار فلزی یا سرامیکی نیز به کار برده می‌شوند[۷]. در این روش انعطاف‌پذیری جهت ساخت نمونه با اشکال پیچیده بدون نیاز به ابزار خاص وجود دارد. امروزه به کمک این روش ها، طی چند روز می توان به محصول نهایی دست یافت که در مقایسه با روش های سنتی که هفته‌ها یا ماه‌ها برای ساخت قطعات یا ابزار پیچیده قطعات طول می‌کشید، بسیار قابل ملاحظه است.

قطعات پیزوالکتریک، بیوسرامیک و کامپوزیت‌های متعددی با روش‌های مختلف نمونه سازی سریع ساخته شده و آن را به عنوان روش مناسبی جهت ساخت ابزارهای الکترومکانیکی با بهترین قابلیت درآورده است[۶-۱۰].

مزایای روش نمونه‌سازی و ابزار سازی سریع عبارتند از:

- کاهش زمان ساخت و رساندن محصولات جدید به طور وسیع به بازار
- صرفه اقتصادی به خاطر حذف ابزارهای ساخت
- تسهیل و انعطاف‌پذیری طراحی قطعات
- کاهش سعی و خطا برای ساخت ابزار
- امکان ساخت قطعات پیچیده سرامیکی

روش‌های نمونه‌سازی سریع شامل روش استرئولیتوگرافی (SLA)، تف جوشی لیزری (SLS)، ساخت لایه‌ای قطعات (LOM)، ماسک نوری (SGC)، چاپ سه بعدی (D-Printing۳) و لایه نشانی سرامیک مذاب(FDC) می‌باشد.

بطور اجمالی می‌توان گفت روش استرئولیتوگرافی (SLA) شامل پلیمریزاسیون مواد پلیمری از حالت مایع به

[1] RP (Rapid Prototyping) or (SFF) Solid free from fabrication

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

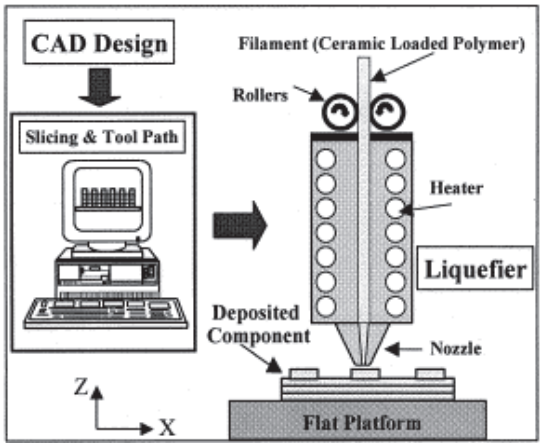
جامد تحت تاثیر اشعه ماوراء بنفش (UV) می‌باشد[۱۱]. روش تف جوشی لیزری (SLS) بر مبنای جوش دادن یا ترکیب مواد پودری شکل با ابعاد ریز بوسیله اشعه لیزر CO_2 با قدرت بالا (۵۰ وات) بنا شده است[۱۲].
در روش ساخت لایه‌ای، قطعات از لایه‌های باریک ساخته می‌شوند. لایه‌ها به صورت پی در پی با استفاده از یک چسب حساس به دما و فشار به یکدیگر متصل می‌شوند. این لایه‌ها توسط اشعه لیزر CO_2 با قدرتی حدود ۵۰-۲۵ وات با طول موج اشعه مادون قرمز ۱۰/۶ میکرومتر بریده می‌شوند[۱۳].
روش ماسک نوری از نظر انجماد فتو پلیمر رزین، شبیه به روش تف جوشی لیزری می‌باشد. با این تفاوت که بجای نور لیزر از اشعه ماوراء بنفش استفاده می‌شود. روش چاپ سه بعدی، با پخش و پهن کردن پودر مواد بر روی یک سطح صاف آغاز می‌شود. مواد چسبنده بصورت انتخابی و کنترل شده پودرها را بهم می‌چسباند. محصول تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد تا پخت نهایی انجام و مواد زائد خارج شود. سپس سطح قطعه کار توسط یک پیستون به مقدار ضخامت لایه بعدی پائین می‌رود تا لایه بعدی مجددا روی آن ساخته شود. از مزایای این روش، توانایی ساختن نمونه با استفاده از طیف وسیعی از مواد شامل سرامیک‌ها، فلزات و کامپوزیت‌های فلز - سرامیک و مواد پلیمری می‌باشد. یکی از روش‌های مطرح، روش لایه نشانی مذاب می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شود. این روش جهت ساخت انواع سرامیک‌های پیزو الکتریک توسعه یافته و بصورت تجاری نیز در آمده است. به کمک این روش امکان ایجاد ساختارهای جدید زیادی با ترکیب‌ها و پیوستگی‌های مختلف، جهت کاربردهای متفاوت فراهم شده است. همچنین قابلیت ساخت کامپوزیت‌ها با نسبت‌های حجمی مختلف و ریزساختارهای مختلف وجود دارد که این امکان در روش‌های ساخت کامپوزیت سنتی وجود نداشت. کامپوزیت‌های تولید شده به این روش دارای خواص بهتری نسبت به روش سنتی ساخت کامپوزیت‌ها می‌باشند. چون کنترل فازی بصورت تناوبی در ساختار به صورت میکرو و ماکرو وجود دارد. انواع طراحی‌های ساخته شده شامل لانه زنبوری، سه بعدی، نردبانی، میله‌ای، حلقوی و خوشه‌ای می‌باشند [۱۴].
یکی از مزایای این روش نسبت به بقیه روش‌های نمونه‌سازی سریع، قابلیت این فرایند جهت ساخت قطعات با هر نوع ماده، هر اندازه و ساختارهای پیچیده (حتی با ابعاد کمتر از چند میلیمتر) می‌باشد.
فرایند لایه نشانی سرامیک مذاب جهت ساخت سرامیک‌های ساختاری (structural ceramics)، تابعی (functional ceramics) و بیو (Bio ceramics) مثل Si_3N_4، PZT، Al_2O_3، هیدروکسی آپاتیت و فولاد زنگ نزن (به منظور استفاده در کاربردهای ساختاری، الکتروسرامیک‌ها و بیوسرامیک‌ها) بکار می‌رود. تلفات مواد مصرفی در این فرآیند بسیار ناچیز می‌باشد. همچنین تجهیزات فرآیند، ساده و ارزان می‌باشد[۱۵].

۲- نمونه سازی به روش لایه نشانی سرامیک مذاب (FDC)

فرآیند لایه نشانی سرامیک مذاب یکی از روش‌های ساخت بدون شکل جامد و بر پایهٔ تکنیک لایه نشانی مذاب[1] است که توسط شرکت Stratasys برای ساخت پلیمرها، موم‌ها، سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های سرامیک-پلیمر در دهه ۹۰میلادی تجاری شد.
در این روش از فیلمان حاوی ذرات سرامیکی در چسب ترموپلاست استفاده می‌شود. شکل (۱) و (۲) شماتیکی از روش لایه نشانی سرامیک مذاب را نشان می‌دهد. این روش شبیه اکستروژن پیستون مستقیم است که فیلمان‌های سرد تغذیه شده به عنوان پیستون عمل می‌کنند. فیلمان با یک جفت قرقره متحرک به سمت مایع کننده گرم (Heated Liquefier) هدایت می‌شود.
در این روش حرکت قرقره‌های متحرک با کامپیوتر کنترل می‌شود. وقتی فیلمان‌ها به گرم کننده می‌رسند، چسب موجود در آنها ذوب و نرم شده و به عنوان حامل ذرات سرامیکی عمل می‌کند. سپس محصول مخلوط، اکسترود شده و از سیستم خارج می‌شود [۱۷و۱۶].

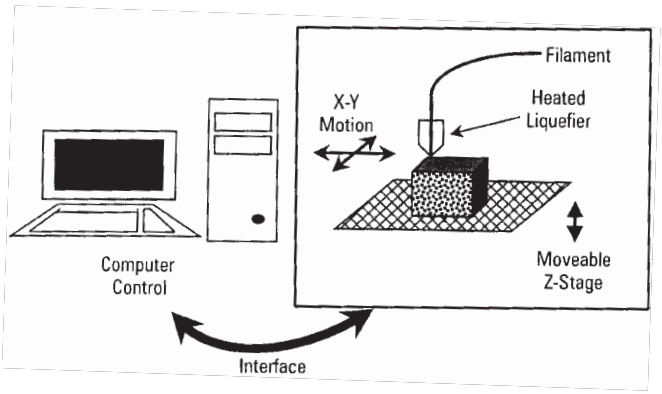
[1] FDM(Fused Deposition Modeling)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]



شکل ۱- شماتیکی از فرآیند لایه نشانی سرامیک مذاب [۱۶].

مواد حاصل از اکسترود روی سطح قرار می‌گیرد که میله (Road) خوانده می‌شوند. پهنا و ضخامت این میله‌ها توسط مصرف کننده تعیین می‌گردد.



شکل ۲- شماتیکی از فرآیند FDC [۱۶].

با توجه به این پهنا، نازل مناسب برای اکستروژن انتخاب می‌شود. پهنای میله معمولا ۱/۲ تا ۱/۵ برابر اندازه نازل است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فشار اکستروژن، با کاهش اندازه نازل و افزایش طول نازل، افزایش می‌یابد. فیلمان‌های اکسترود شده در بالای سطح بدون فیکسچر نشست می‌کنند. در این مرحله، حرکت نازل در جهت x و y توسط کامپیوتر براساس هندسه قطعه کنترل می‌شود. در واقع ابتدا طرح کلی ایجاد می‌شود و سپس پیوندهای درونی شکل می‌گیرد و لایه کامل می‌شود. بعد از اینکه اولین لایه شکل گرفت، سطح در جهت Z به پایین حرکت می‌کند و سپس لایه‌های بعدی روی لایهٔ اول می‌نشیند. ضخامت لایه‌ها می‌تواند از ۲۵μm تا ۱mm تغییر کند. به این ترتیب قطعه خام شکل می‌گیرد. پیوند بین لایه‌ها در اثر چسبندگی پلیمر و یا دوباره ذوب شدن نسبی لایهٔ قبلی ایجاد می‌شود. ویژگی‌های فیلمان تغذیه شده یکی از مهم‌ترین پارامترها در موفقیت فرآیند لایه نشانی سرامیک مذاب است [۱۸و۱۵].

بعد از ساخت قطعه خام توسط این روش، قطعات به سمت محفظهٔ عملیات حرارتی هدایت می‌شوند تا چسب‌ها خارج شده و تا رسیدن به دانسیته نهایی زینتر شوند. در نهایت عملیات پرداخت سطحی انجام می‌شود.

موفقیت نهایی فرآیند لایه نشانی سرامیک مذاب و تولید قطعه بدون عیب، به کنترل و درک متغیرهای فرایند بستگی دارد، با اینکه کنترل همهٔ متغیرها و ارتباط بین آنها کار ساده‌ای نمی‌باشد[۱۴].

در این فرایند، فرمولاسیون، مشخصات فیزیکی و تهیه فیلمان مناسب گام نخست محسوب می‌شود. انتخاب پلیمر مناسب با خواص و رفتار مناسب، مسئله بعدی است. داشتن سیستم کامپیوتری با قابلیت‌های بالا جهت امکان طراحی‌های سه بعدی نیز از ضروریات است. کنترل عملیات حرارتی پس از شکل‌دهی در راستای رسیدن به قطعه سالم با مشخصات مورد نظر نیز حائز اهمیت فراوان است.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

۲-۱-تهیه فیلمان

اولین و کلیدی‌ترین مرحله ساخت قطعه، ساخت فیلمان کامپوزیتی با خواص و ابعاد مناسب می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بزرگترین مانع در به کار بردن مواد جدید در پروسه لایه نشانی سرامیک مذاب، ساخت فیلمان با خواص مناسب است.

مراحل ساخت فیلمان کامپوزیتی به این صورت می‌باشد که ابتدا پودر سرامیکی با اندازه ذرات، مساحت سطح و دانسیته مشخص با پراکنده ساز مناسب پوشش داده می‌شود [۱۷]. در اکثر فرآیندهای ساخت سرامیک‌ها پودر در یک حلال سیال پخش می‌شود که در مورد این روش، سیال یک چسب گرمانرم ذوب شده است. چون سیستم سرامیکی شامل اجزاء مختلف است، یک سری پراکنده ساز برای پایداری مخلوط در مقابل آگلومراسیون لازم است. در این مرحله فیلمان با حدود ۵۵-۳۵٪ سرامیک تهیه می‌شود. پخش پودر در پلیمر اثر شدیدی روی خواص رئولوژی فیلمان تولید شده دارد. هر چه پودر دریک سیال پلیمری بهتر پخش شود، ویسکوزیته محصول کمتر و در اکستروژن، درصد جامد اضافه شده می‌تواند بیشتر باشد. پراکنده ساز نباید خواص مکانیکی، حرارتی یا رئولوژیکی پلیمر مخلوط را تغییر دهد. از طرفی روی مدول الاستیک فیلمان نباید تاثیر بگذارد. همچنین بعد از ساخت قطعه باید بتوان آنرا به طور کامل توسط تجزیه حرارتی خارج کرد تا از هرگونه آلودگی قطعات سرامیکی هنگام زینتر جلوگیری نمود[۱۹].

در مرحله بعدی پودر در آسیاب گلوله‌ای به مدت زمان مناسب مخلوط شده و سپس مخلوط حاصله فیلتر می‌شود. محصول به مدت زمان مناسب در خشک کن خشک شده و سپس در رئومتر چرخشی با مقدار مناسبی چسب پلیمری مخلوط می‌شود. در مرحله بعد، مخلوط حاصله گرانول می‌شود. قبل از آزمایش، گرانول‌ها در دسیکاتور محافظت و سپس به سمت اکستروژن هدایت می‌شوند. فیلمان‌های اکسترود شده با حاملی که سرعتی متناسب با سرعت اکستروژن دارد، جمع شده و از نظر ابعادی کنترل می‌شوند. در مرحله بعد فیلمان‌ها دور قرقره پیچیده شده و در یک محیط کنترل شده PH نگهداری می‌شود[۱۷].

۲-۱-۱- خواص فیلمان

فیلمان باید خواص مکانیکی، حرارتی و رئولوژیکی مناسبی داشته باشد.

از نظر خواص مکانیکی فیلمان باید استحکام کافی برای جلوگیری از شکست، حین باز شدن از قرقره را داشته باشد. علاوه بر آن چون فیلمان به عنوان پیستون اکستروژن ماده مذاب در طول نازل‌های با ابعاد کم عمل می‌کند. باید استحکام مناسب برای این کار را هم داشته باشد[۲۰].

از نظر خواص رئولوژیکی نیزچون فرآیند لایه نشانی سرامیک مذاب نوعی اکستروژن گرم است، ویسکوزیته ماده مذاب باید در محدوده مشخصی باشد. از یک طرف ویسکوزیته باید به اندازه کافی کم باشد تا در طول مایع کننده پمپ شود و پهنای میله مناسبی با حجم و نرخ رسوب مناسب ایجاد کند. از طرف دیگر، ویسکوزیته کافی برای نشست مناسب روی سطح برای جلوگیری از مشکلات پرداخت نهایی تا حد امکان لازم است[۲۱].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که دما، نسبت حجمی جامد و مقدار پخش کننده، از مهمترین عوامل موثر بر ویسکوزیته هستند. مدل‌های مختلف جهت بررسی رفتار ویسکوزیته سرامیک در منابع گزارش شده است که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود:

۱) مدل کازمن: بر اساس این مدل ویسکوزیته از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$\ln \eta = A' \times \frac{B'}{\ln \frac{T}{T_k}}$$

که در آن:

A' و B': اعداد ثابت

T: درجه حرارت

T_k: دمای کازمن (ثابت)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

۲) مدل VFT: بر اساس این مدل، تغییرات ویسکوزیته با دما بصورت ذیل می‌باشد:

$$\ln \eta = A \times \frac{B}{T - T_0}$$

که در آن:

A' و B': اعداد ثابت

T: درجه حرارت

T_0: دمای ثابت

۳) مدل آنیدرید- فرنکل: این مدل، مدلی است که بر اساس اکتیواسیون انرژی ویسکوز فلو است. مشکل این مدل وابستگی خود اکتیواسیون به دماست.

$$\eta = \eta_0 \exp \frac{u}{KT}$$

خود u تابع دماست $U=U_0f(T)$ به عبارت دیگر چون خود u تابعی از درجه حرارت است بهتر است فرمول به صورت زیر نوشته شود.

$$\eta = \eta_0 \exp \frac{u_0(T)}{KT}$$

براساس هر سه مدل واضح است که با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. البته رفتار مدل‌ها، با یکدیگر متفاوت است و معمولاً هم از رفتار ایده‌الی انحراف نشان می‌دهند. به عنوان مثال اثر دما روی ویسکوزیته طبق مدل نهایی، می‌بایست از یک رابطه آرنیوسی تبعیت کند ولی عملاً اینطور نیست[۱۷].

متغیرهای کلیدی که نیاز به توجه ویژه دارد شامل ویسکوزیته، مدول پیچشی، استحکام و رفتار چسبندگی پیوند است. اکثر عیوب فرایند لایه نشانی سرامیک مذاب ناشی از محدودیت‌های سخت‌افزاری (شکل و اندازه نازل)، محدودیت‌های نرم افزاری (روش ساخت) و ویژگی های ماده (زمان سفت شدن، رئولوژی، چسبندگی، ابعاد هموژن، پخش پودر در چسب و خواص مکانیکی) می‌باشد[۲۲].

برای ساخت قطعه با خواص مناسب هر گونه عدم ایجاد پیوند بین میله‌های مجاور و لایه‌های مجاور یا هرگونه ناکاملی در پرشدن هر قسمت قطعه باعث ایجاد عیوب در قطعه نهایی می‌شود.

البته برخی از عیوب سطحی نیز با روش‌های پرداخت سطحی بعد از ساخت قطعه می‌توانند حذف شوند. عیوب عمده دیگر، با کنترل پارامترهای فیلمان و بهینه‌سازی پارامترهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری باید کنترل شود. با کنترل این عوامل می‌توان به خواص مناسبی از نظر دانسیته، خواص مکانیکی، انقباض و ریزساختار تقریباً بدون عیب دست یافت[۲۳].

۲-۲-عملیات حرارتی- چسب زدایی و زینترینگ

براساس بررسی‌های انجام گرفته[۲۴] بر پایه آنالیز ترموگراویمتریک (TGA) در نمونه‌های پیزو کامپوزیت چسب زدایی شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

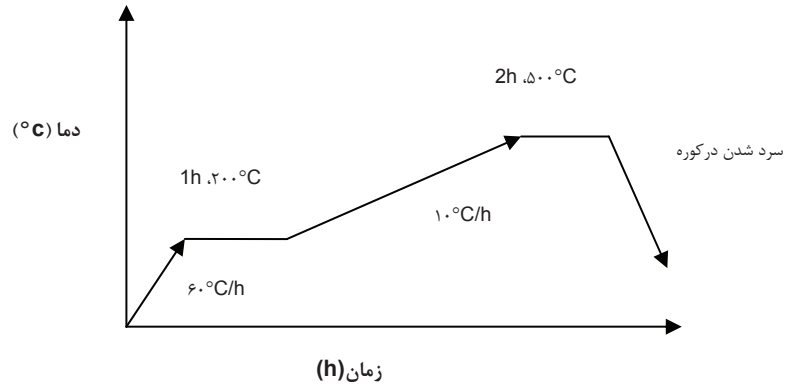
ابتدا عملیات حرارتی در اتمسفر هوای ساکن و دمای حدود ۵۰۰°C به مدت ۴ ساعت انجام می‌شود. نرخ حرارت دهی ۶۰°C/hr از دمای اتاق تا ۲۰۰°C و ۱۰°C/hr از ۲۰۰°C تا ۵۰۰°C می‌باشد. سپس نمونه‌ها در بوته آلومینایی و بستر ذرات درشت PZT قرار می‌گیرند. زینترینگ در دمای بالا (معمولاً حوالی ۱۲۸۵°C) به مدت یک ساعت در اتمسفر حاوی PbO اضافی (برای جلوگیری از کاهش سرب حین زینترینگ) در محفظه آلومینایی با در پوش انجام می‌شود. نرخ حرارت دهی ۳/۵°C/min می‌باشد. میزان اکسیژن درون کوره کنترل نشده است[۲۴].

نمونه‌ای از نمودارهای عملیات حرارتی شامل خروج چسب و زینترینگ در شکل های ۳ و ۴ آمده است.

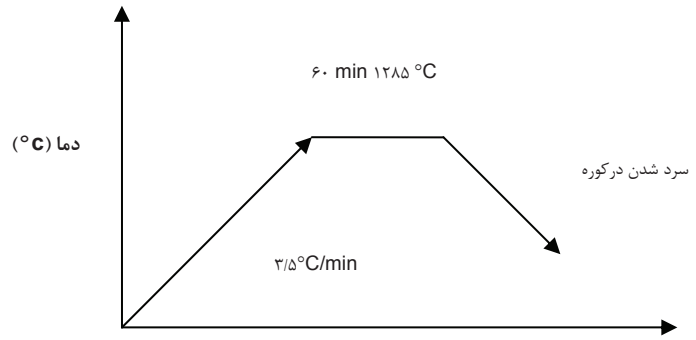
کنترل هر دو مرحله از اهمیت بالایی جهت دستیابی به خواص نهایی مورد نظر و ساخت قطعه سالم برخوردار می‌باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]



شکل ۳- نمودار خروج چسب PZT [۲۴]



شکل ۴- نمودار زینترینگ نمونه [۲۴]

۲-۳-عملیات قطبش و پیر سازی

بعد از زینترینگ قطعات، نمونه‌ها قطبی می‌شوند. بعد از عملیات پیرسازی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت، ساختار سرامیکی حاصله در پلیمر اپوکسی قرار می‌گیرد. جهت خروج کامپوزیت‌ها از پایه و برداشتن اپوکسی اضافه، نمونه‌ها ماشین کاری می‌شوند. سپس ساختار سرامیک- پلیمر الکترود گذاری شده و دوباره با همان شرایط قطبی می‌شوند. در نهایت جهت بررسی خواص الکترومکانیکی، تحت آزمایش قرار می‌گیرند[۲۵].

۳- مزایای کاربرد روش لایه نشانی سرامیک مذاب

به کمک این روش امکان ساخت ساختارهای جدید زیادی با ترکیب‌های متفاوت و پیوستگی‌های مختلف، برای کاربردهای متعدد فراهم شده است. قابلیت ساخت کامپوزیت‌ها با نسبت‌های حجمی مختلف و ریزساختارهای گوناگون وجود دارد که این امکان در روش‌های ساخت کامپوزیت سنتی وجود نداشت و یا به سختی حاصل می‌شد.

کامپوزیت‌های تولید شده به این روش دارای خواص بهتری نسبت به روش سنتی هستند. چون کنترل فازی بصورت تناوبی در ساختار به صورت میکرو و ماکرو وجود دارد، طراحی‌های گوناگون نیز میسر می‌باشد. طراحی‌های ساخته شده شامل لانه زنبوری، میله‌ای، حلقوی، خوشه‌ای می‌باشد[۱۴].

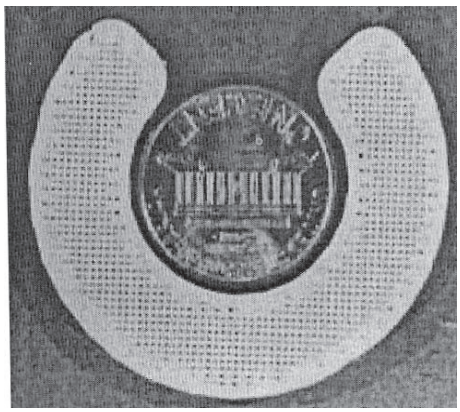
یکی از مزایای این روش نسبت به بقیه روش‌های RP، قابلیت این پروسه برای ساخت قطعات با هر نوع ماده، با هر اندازه و ساختارهای پیچیده (حتی با ابعاد کمتر از چند میلیمتر) می‌باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

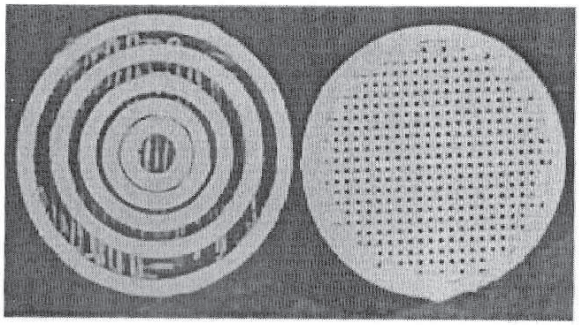
[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

٤- بررسی شکل سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های ساخته شده به روش FDC

همانگونـه که اشاره شد، فرایند لایه نشانی سرامیک مذاب جهت سـاخت انـواع سـرامیک‌هـا در کاربردهـای مختلف به کار رفتـه است. به عنـوان مثال صفری و همکاران قطعـات متعــدد سـرامیکی PZT را بـه روش لایه نشانی سـرامیک مذاب ساخته‌اند. همانطور که در شکل (۵) و (۶) مـشاهده مـی‌شـود انـواع سـاختارهای Annular Ring , C-Ring Actuato ۲-۲ و ۳-۳ نردبانی طراحی و ساخته شده‌اند[۲۲].



شکل ۵- C-ring actuator با ساختار۳-۳ نردبانی [۲۲].



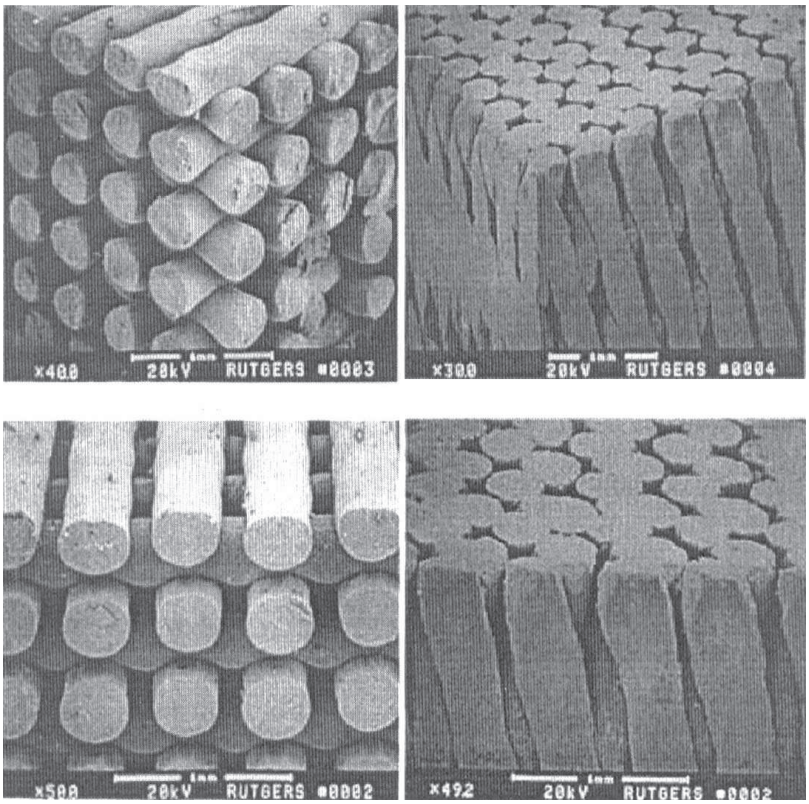
شکل ۶- ساختار Annular ring 2-2 و Ladder 3-3 [۲۲].

شکل (۷) ریز ساختار ۳-۳ نردبانی سرامیک PZT قبل از پر شدن با اپوکسی کـه توسـط روش لایـه نـشانی سرامیک مذاب تولید شده است، را نشان می‌دهد[۲۲].

شکل سمت چپ بالا نمای جانبی و شکل سمت چپ پایینی، نمای روبرو از چیـدمان ۳-۳ نردبـانی را نـشان می‌دهد. در این ساختار لایه‌های متوالی با جهت گیری در زاویـه۹۰۰ساخته شـده اسـت. جـزء حجمـی فـاز سرامیکی در ساختار نشان داده شده به میزان ۷۰٪ می‌باشد و می‌تواند با تغییر عرض و فاصله بین میلـه‌هـای سرامیکی خام، تغییر کند. همانگونه که شکل ۷ ریز ساختار سمت چپ بالا نشان می‌دهد، میله‌های سـرامیکی به عرض تقریباً ۳۰۰µm و فواصل تقریباً ۲۰۰µm (بین نزدیکترین لبه) قرار گرفته‌اند. شکل شـماره ۷ سـمت چپ پایین، ساختار یکنواخت با قابلیت تکرار پذیری بسیار مناسب سلول واحد را نشان می‌دهد. شـکل سـمت راست بالا نیز نمای جانبی دیگر را نشان می‌دهد در حالیکه شکل سمت راست پایینی، نمای روبـرو و بـالا را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود در این شکل لایه‌های متوالی در جهت‌گیـری‌هـایی غیـر از ۹۰۰ ساخته شده‌اند. با استفاده از جهت‌گیری‌های متفاوت، تاثیر جهت گیری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها قابـل ارزیابی می‌باشد. جزء حجمی فاز سرامیکی در ساختار نشان داده شده تقریباً ۶۰٪ حجمـی مـی‌باشـد. در ایـن شکل میله‌های سرامیکی به عـرض تقریبـاً ۲۷۵µm و فواصـل تقریبـاً ۲۰۰µm (بـین نزدیکتـرین لبـه) قـرار گرفته‌اند.

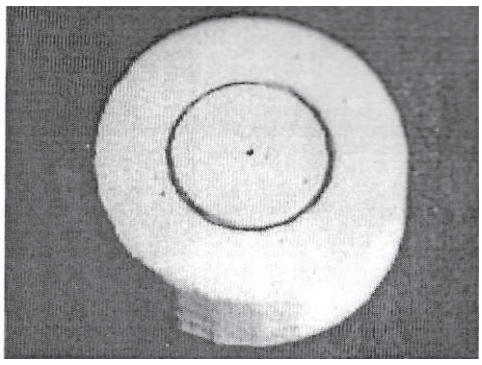
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

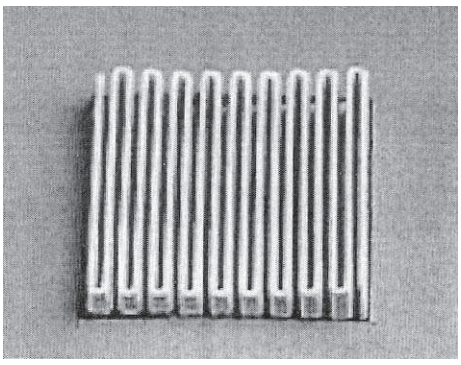


شکل ۷- ریز ساختار ۳-۳ نردبانی سرامیک PZT قبل از پر شدن با اپوکسی[۲۲].

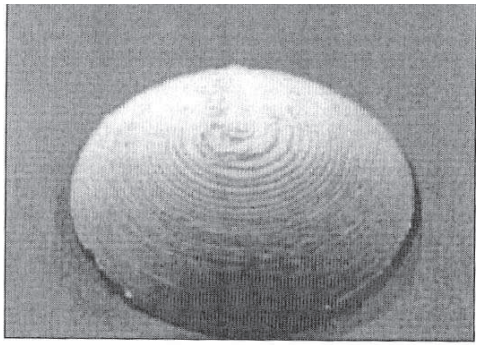
در شکل شماره (۸) ساختار Radial-poled Moonie مشاهده می‌شود. ساختار بعدی ساخته شده از کامپوزیت پلیمر /PZT با پیوستگی۲-۲ در شکل (۹) آورده شده است. از دیگر ساختارهای بدست آمده از این ترکیب با دقت ابعادی مناسب، محرک گنبدی شکل (شکل ۱۰) می‌باشد. ابعاد این ساختار به قطر ۳۰mm و ضخامت ۴mm می‌باشد[۱۸].



شکل ۸- طرح Radial-poled Moonie



شکل ۹- طرح ۲-۲ PZT/پلیمر [۱۸]



شکل ۱۰-محرک گنبدی شکل از جنس /PZT پلیمر [۱۸].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

در حالت بلوری نیز این روش به طور کامل برای ساخت داربست‌های متخلخل استخوان موفقیت‌آمیز بوده است. همین‌طور برای ساخت مدل سه بعدی ابزار داخلی بدن به کمک عکس MRI مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲۱].

۵- خواص نمونه‌های ساخته شده به روش لایه نشانی سرامیک مذاب

جدول(۱) مقایسه خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی سرامیک مذاب، پرس ایزو استاتیک سرد و اکستروژن را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود خواص مکانیکی و دانسیته در روش لایه نشانی سرامیک مذاب به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. جدول (۲) نیز مقایسه‌ای بین خواص پیزو الکتریک نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی سرامیک مذاب و پرس ایزو استاتیک[۲۰].

نمونه	لایه نشانی سرامیک مذاب	اکستروژن	پرس ایزو استاتیک سرد
کامپوزیت FDC صفحه ای	>۹۶	>۹۸	۵۷
کامپوزیت برشکاری	>۹۸	>۹۹	>۹۹
نمونه بالک FDC	X-Y٪۱۶/۶ ± ٪۱/۳ Z :٪۱۹/۳ ± ٪۱/۶	٪۱۸ در همه جهات	٪۱۶ در همه جهات
نمونه پرس شده	۸۲۴ ± ۱۱۰	۸۲۰ ± ۱۵۰	۸۶۷ ± ۵۰
	۳۵۴ ± ۱۰	۳۴۵ ± ۱۰	۳۶۵ ± ۵

جدول ۲-مقایسه‌ای بین خواص پیزو الکتریک نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به روش‌های مختلف[۲۰].

نمونه	Z(MRayl)	دانسیته (kg/m3)	d_{33} (pC/N)	ضریب اتلاف دی الکتریک	K_p(٪)	K_t (٪)	درصد حجمی PZT
کامپوزیت FDC صفحه‌ای	۸/۳۴	۲۸۸۰	۳۹۷ ± ۱۶	۰/۰۲۳	۳۲	۶۸	۲۷
کامپوزیت برشکاری	۹/۷۵	۲۷۷۰	۳۴۴ ± ۲۰	۰/۰۲۲	۳۱	۶۳	۲۵
نمونه بالک FDC	۳۰/۵۴	۷۷۰۰	۶۶۴ ± ۴	۰/۰۲۳	۷۱	۵۴	۱۰۰
نمونه پرس شده	۳۶/۶۶	۷۸۰۰۰	۶۴۵	۰/۰۲۲	۶۸	۵۶	۱۰۰

٦- نتیجه گیری

سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های پلیمر-سرامیک پیزوالکتریک هم از طریق روش مستقیم و هم غیرمستقیم نمونه‌سازی سریع ساخته می‌شوند. در روش مستقیم لایه نشانی سرامیک مذاب، خواص بهتری در مقایسه با روش‌های سنتی حاصل شده است. کامپوزیت‌های سه بعدی ساخته شده به این روش خواص الکترومکانیکی و ابعادی بسیار مناسبی دارند. بر اساس مطالعات انجام شده، ساختارهای ساخته شده به این روش خواص پیزو الکتریک بسیار خوبی را نیز در مقایسه با سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهد این روش امکان ساخت کامپوزیت‌هایی با تناوب‌های فازی کنترل شده، جزء حجمی، میکرو و ماکرو ساختارهای متغیر را فراهم می‌کند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]

از دیگر مزایای این روش امکان ساخت انواع قطعات پیچیده سرامیکی (حتی ابعاد کمتر از چند میلیمتر) در مدت زمان کم (چند ساعت) می‌باشد که این قابلیت‌ها در روش‌های ساخت کامپوزیت‌های سنتی وجود ندارند.

مراجع

1. Jaffe et al., 1971 B. Jaffe, W. R. Cook and H. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic, New York (1971).
2. Safari A., V. F Janas., "Processing of Fine Piezoelectric Ceramic/polymer Composites for Transducer Applications", Ferroelectrics, Vol. 196, 1997, pp. 187-190.
3. Safari A., R k panda. Janas V. F "Ferroelectricity; Materials characteristics and applications", Advanced ceramic materials: Key engineering Materials, Vol. 5, 1996, pp. 35-71.
4. Bown L., Next “Generation Acoustic Transducer Materials;1-3 Piezocomposite and Beyond”, Acoustic seminar, February 4, 2000.
5. Smith A., Arden W., "Piezo-composite Materials For Acoustical Imaging Transducers", 21st International Symposium on Acoustical Imaging, March 1994.
6. Tseng A. A., Tanaka M., "Advanced Deposition Techniques for Freeform Fabrication of Metal and Ceramic Parts", Rapid Prototyping journal, Vol. 7, No.1, 2001pp. 6-17.
7. Weeren R. V., Agawala M., Safari A., Whalen P., "Quality of Parts Processed by Fused Deposition", Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 1, 2001, pp. 6-17.
8. Jafari M. A., Han W., Mohammadi F., Safari A., "A Novel System for Fused Deposition of Advanced Multiple Ceramics", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 3, 2000, pp.161-174.
9. Bellini A., "New Developments in Fused Deposition Modeling of Ceramics", Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, No. 4, 2005, pp. 214-220.
10. Dufaud S. O, Corbel., Stereolithography of PZT ceramic suspensions, Rapid prototyping Journal, Vol. 8, No. 2, 2002, pp. 83-90.
11. Licciulli A., Greco A., Maffezzoli A., "Development of a pre-ceramic Suspension for the free form fabrication of ceramic parts by Stereolithography" Journal of Material Science, Vol. 36, 2001, pp. 99-105.
12. Kathuria Y. P., "Microstructuring by Selective Laser Sintering of Metallic Powder" Surface and coating Technologies, Vol. 116, 1999, pp. 643-647.
13. Lee C. H., Gaffney T. M Thomas C. L., "Soft Tooling For Low Production Manufacturing of Larg Structures" Solid Free form Fabrication Symposium Proceedings, University of Texas at Austin,Texas, Aug. 1996, pp.207-214.
14. Wu S., Rangarajan S., Dai C., Lanarana A., Safari A., "Warm isostatic Pressing of GS44 Si3N4 FDC Part for Defect Removal", Material and Design, Vol. 24, 2003, pp. 681-686.
15. Jafari M. A., Han W., Mohammadi F., Safari A., "A Novel System for Fused Deposition of Advanced Multiple Ceramics", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 3, 2000, pp .161-174.
16. Allahverdi M., Danforth S. C., Jafari M., Safari A., "Processing of Advanced Electroceramic Components by Fused Deposition Technique", Journal of European ceramic Soc, Vol. 21, 2001, pp. 1485-90.
17. Bandyopadhyay A., Safari A., Panda R. K., "Processing of Piezoelectric by Fused Deposition Technique", J. Am Ceram Soc, Vol. 80, No. 6, 1997, pp. 1366-72.
18. Venkataraman N., Rangarajan S., Safari A., "Feedstock Material Property-Process Relationships in Fused Deposition Of Ceramics (FDC)", Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 4, 2000, pp. 244-252.
19. Mcnulty F., Shanefield J., Danforth C., Safari A., "Dispersion of Lead Zirconate Titnate for Fused Deposition of Ceramics", J.Am ceram. Soc, Vol. 82, No. 7, 1999, pp. 1757-60.
20. Mukesh K. A., Bandyopadhyay A., Safari A., "FDC, Rapid Fabrication of Structural Components", Am Ceram Soc Bulletin, Vol. 75, No. 11, November 1996, pp.59-65.
21. Bandyopadhyay A., Danforth S. C., Safari A., "Effects of Processing History on Thermal Debinding", Journal of Materials Science, Vol. 35, 2000, pp. 3983-3988.
22. Bandyopadhyay A., Panda R. K., McNulty T. F., Mohammadi F., Safari A., "Piezoelectric Ceramics and Composites via Rapid Prototyping Techniques", Rapid prototyping Journal, Vol. 4, No. 1, 1998, pp. 37-49.
23. Grida I., Evants J. R., "Extrusion Freeforming of Ceramics through Fine Nozzles", Journal of European Ceramic Society, Vol. 23, 2003, pp. 629-635.
24. Venkataraman N., Rangrajan S., Mattheewson M. J., Safari A., "Mechanical and Rheological Properties of Feedstock Material for Fused Deposition of Ceramics and Metals (FDC and FDMet) and Their Relationship to Process Performance", Solid Freeform Fabrication Proceeding, 1999, pp.351-36.
25. Stanely M., "Fused Deposition Modeling for Product Development", Prototyping Technology International, 1997.
26. Gwenaelle M. Lous., Ivan A. Cornejo., Safari A., "Fabrication of Piezoelectric Ceramic/polymer Composite Transducers Using FDC", J. Am Ceram Soc, Vol. 83, No. 11, 2000, pp. 124-28.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1389.6.2.1.7]