بررسی اثر میزان تخلخل بر انتقال حرارت در قالب‌های تزریق پلاستیک ایجادشده به روش ذوب لیزر انتخابی

سید مصطفی میرطبایی[1*]، افشین جودکی[2]، مرتضی طاهرنیا[3]

۱. دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام علی(ع)، تهران
۲. کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
۳. دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

*نویسنده مسئول: mostafamirtabaee1@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

چکیده

امکان ساخت هندسه پیچیده کانال‌های خنک‌کننده منسجم، با روش‌های معمول ماشین‌کاری مقدور نیست، بنابراین با استفاده از فرآیندهای ساخت افزایشی مانند فرآیند ذوب لیزر انتخابی امکان ایجاد کانال‌ها در قالب فراهم می‌شود. قطعات ایجاد شده به روش ذوب لیزر انتخابی همواره با تخلخل مواجه هستند،که این مقدار تخلخل وابسته به پارامترهای فرآیند متغیر می‌باشد، از سوی دیگر توانایی ساخت مواد متخلخل توسط فرآیند ذوب لیزر انتخابی باعث شده است این مواد با توجه به خصوصیاتی نظیر چگالی کمتر و انتقال حرارت بهتر در صنایع هوا فضا، خودرو، مصارف پزشکی و مبدل‌های حرارتی نظر محققان را جلب کند و با توجه به این‌که تخلخل علاوه بر تاثیر مستقیم بر روی خواص مکانیکی بر روی انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد. در این پژوهش به بررسی اثر تخلخل بر انتقال حرارت در قالب پرداخته شد، ابتدا مدل و قالب طراحی شده است و به‌منظور بررسی اثر تخلخل چهار مدل شبیه‌سازی با درصد تخلخل‌های حجمی ۰، ۱۰، ۲۰و۳۰ در نرم‌افزار انجام و تحلیل گردید. بررسی و تحلیل نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد تخلخل در قالب سبب افزایش سریع‌تر دما در قالب می‌شود. علاوه بر آن با افزایش درصد تخلخل در قالب نرخ کاهش دما در قالب بیشتر می‌شود و عملیات خنک کاری قطعه سریع‌تر رخ می‌دهد. بررسی نتایج بیشینه گرادیان حرارتی ماده بدون تخلخل در مقایسه با ماده ۳۰ درصد تخلخل، افزایش ۲۱درصدی گرادیان حرارتی در ماده متخلخل را نشان داده است. علاوه بر آن بیشینه شار حرارتی ماده بدون تخلخل در مقایسه با ماده ۳۰ درصد تخلخل، کاهش۲۲ درصدی شار حرارتی در ماده متخلخل را نتیجه داده است.

واژه‌های کلیدی : قالب تزریق پلاستیک، تخلخل، انتقال حرارت، ساخت افزایشی، ذوب لیزر انتخابی

مقدمه

در حال حاضر، قالب‌گیری تزریقی فرآیندی است که بیشترین استفاده را برای تولید قطعات پلاستیکی دارد[۱].کانال‌های خنک‌کننده منسجم[1] فاصله یکنواختی بین سطوح قالب و کانال‌ها دارند، به‌طوری‌که اثر خنک‌کنندگی بهتر از کانال‌های خنک‌کننده معمولی است. کیفیت قطعه نهایی و زمان چرخه را می‌توان توسط قالب با کانال‌های خنک‌کاری منسجم بهبود بخشید. کانال‌های خنک‌کننده منسجم با هندسه یک قطعه مطابقت دارند و با روش‌های معمول سوراخ‌کاری نمی‌توان کانال‌های خنک کاری منسجم پیچیده تولید کرد. به‌منظور ایجاد کانال‌های خنک‌کننده منسجم از فرآیندهای ساخت افزودنی[2] مانند ذوب لیزری انتخابی[3] استفاده می‌شود[۲]. فرآیند ذوب لیزر انتخابی توسط مجموعه‌ای از پارامترهای پردازشی کنترل می‌شود که تاثیر مستقیمی بر تراکم نسبی قطعات ساخته‌شده دارند[۴و۳]. پارامترهای تاثیر گزار بر مقدار تخلخل شامل توان لیزر، زمان اسکن[۵]،

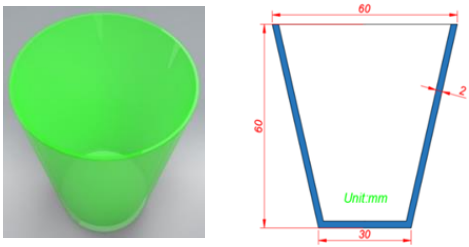
[1] Conformal Cooling Channels (CCC)
[2] Additive Manufacturing (AM)
[3] Selective Laser Melting (SLM)

ضخامت لایه پودر[۶]، اندازه پودر[۷و۸] و دیگر موارد می‌باشد. بنابراین قطعات ساخته شده به روش ذوب لیزر انتخابی همواره با تخلخل مواجه هستند که این مقدار تخلخل متغیر می‌باشد. از سوی دیگر توانایی ساخت مواد متخلخل توسط فرآیند ذوب لیزر انتخابی باعث شده است این مواد با توجه به خصوصیاتی نظیر چگالی کمتر و انتقال حرارت بهتر در صنایع هوا فضا، خودرو، مصارف پزشکی و مبدل‌های حرارتی، نظر محققان را جلب کند و تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه مواد متخلخل صورت گرفته است[۱۰و۹]. ساختار متخلخل به‌طور مستقیم علاوه بر مقاومت مکانیکی بر روی انتقال حرارت نیز تاثیر دارد[۱۱]. در دهه گذشته، فرآیندهای تولید افزودنی به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرارگرفته است که می‌تواند از توسعه نمونه اولیه تا تولید قطعات نهایی را شامل شود. کرنر و همکاران[۱۲] در مورد ادغام ساخت افزودنی و قالب‌گیری تزریقی نشان دادند که استفاده از ساخت افزودنی در تولید قالب‌های تزریقی می‌تواند زمان ابزارسازی را کاهش دهد. بررسی آن‌ها همچنین نشان داد که استفاده از ساخت افزودنی می‌تواند کارایی خنک‌سازی قالب را بهبود بخشد، که منجر به کاهش زمان چرخه و بهبود کیفیت قطعه نهایی می‌شود. وانگ و همکاران[۱۳] قالب با کانال‌های خنک‌کننده منسجم با استفاده از فرایند ذوب لیزر انتخابی ساختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از کانال‌های خنک‌کننده می‌توان به سرعت‌های خنک‌کننده متفاوتی در قالب ذوب لیزر انتخابی دست یافت. ژیلونگ و همکاران[۱۴] به بررسی مورفولوژی، جریان و انتقال حرارت در مواد متخلخل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد ضریب انتقال حرارت در مواد متخلخل بیشتر است. ونگ و همکاران[۱۵] به بررسی انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پیچیده ساخته‌شده به روش ذوب لیزر انتخابی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که انتقال حرارت بهبود یافته و مبدل‌های حرارتی ساخته‌شده به روش ذوب لیزر انتخابی دارای رسانایی بالاتری هستند. استپانوف و همکاران[۱۶] به بررسی اثر مقادیر مختلف تخلخل در مبدل‌های حرارتی پرداختند. آن‌ها دریافتند با افزایش درصد تخلخل شدت انتقال حرارت در مبدل حرارتی بیشتر می‌شود. الکهاری و همکاران[۱۷] رسانایی حرارتی پودر فلز ساخته شده از طریق ذوب لیزر انتخابی را مورد بررسی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داده است تخلخل سبب افزایش هدایت حرارتی می‌شود.

فرآیند ذوب لیزر انتخابی در ساخت کانال‌های خنک‌کننده منسجم در قالب‌های تزریق پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، این فرآیند همواره با تخلخل همراه است و باید توجه داشت تخلخل علاوه بر خواص مکانیکی بر انتقال حرارت تاثیرگذار می‌باشد، و انتقال حرارت و سرعت سرد شدن قالب در فرآیند تزریق پلاستیک از اهمیت به سزایی برخورد دار است. با توجه به تحقیقاتی که در زمینه انتقال حرارت مواد متخلخل صورت گرفته است، مشخص شده است که مواد متخلخل دارای انتقال حرارت بیشتری می‌باشند. در این پژوهش سعی گردیده است با توجه به تحقیقات کمی که در مبحث انتقال حرارت قالب های تزریق پلاستیک ساخته‌شده به روش ذوب لیزر انتخابی انجام شده است با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی اثر مقادیر مختلف تخلخل در انتقال حرارت قالب تزریق پلاستیک پرداخته شود.

روش پژوهش

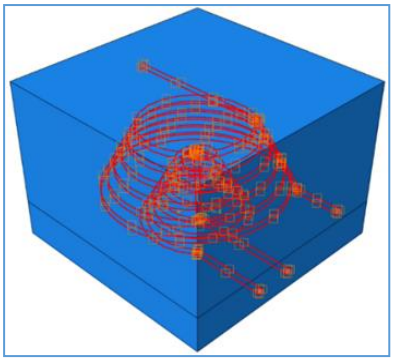
برای مدل اصلی، کانال‌های خنک‌کننده و قالب‌های تزریق با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز طراحی گردید. شکل (۱) سطح مقطع و مدل قطعه قالب‌گیری تزریقی را نشان می‌دهد.



شکل۱: مقطع و مدل قطعه قالب تزریق

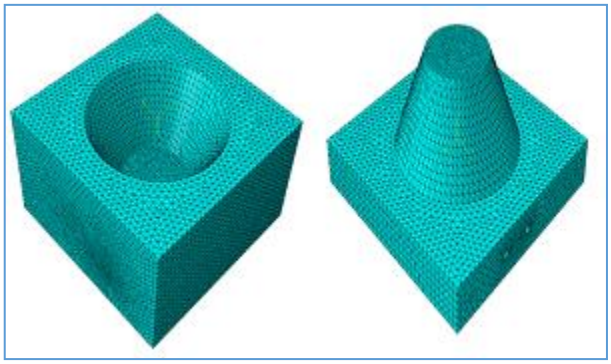
مدل اصلی یک لیوان آب با ابعاد ۶۰ میلی‌متر در قطر بیرونی بالایی، ۳۰ میلی‌متر در قطر بیرونی پایین، ۶۰ میلی‌متر ارتفاع و ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر با حجم مدل ۱۷/۳ سی‌سی می‌باشد. جهت خنک کاری بهتر قطعه از کانال مارپیچ استفاده شده است که به دلیل مارپیچ بودن و حفظ فاصله یکسان تا جداره لیوان نرخ خنک کاری در تمام سطوح قطعه یکسان می‌باشد.

شکل (۲) تصویر شماتیک کانال‌های خنک‌کننده منسجم برای هر دو بلوک قالب را نشان می‌دهد. دلیل اصلی انتخاب لیوان آب به‌عنوان محصول قالب‌گیری تزریقی این است که لبه بالایی لیوان به‌عنوان یک سطح جداکننده قرارگرفته است که می‌تواند به راحتی هسته[1] و حفره[2] را از هم جدا کند. علاوه بر این، هندسه‌های کانال خنک‌کننده منسجم طراحی شده برای هسته و حفره باهم همپوشانی ندارند.



شکل۲ : کانال‌های خنک‌کننده منسجم

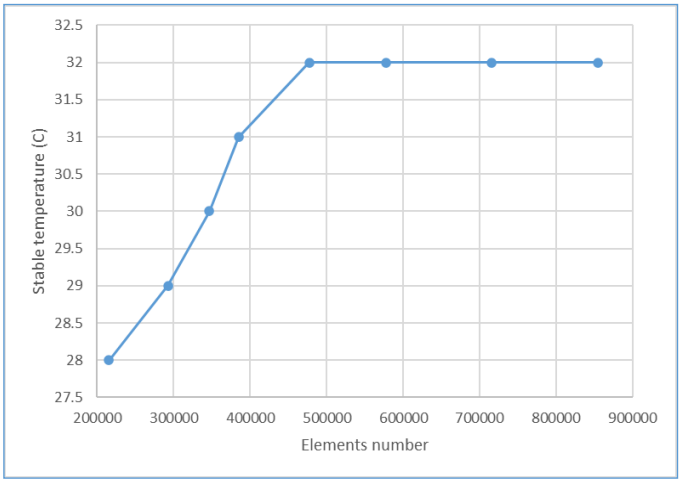
به‌منظور بررسی اثر تخلخل در انتقال حرارت قالب شبیه‌سازی چهار مدل صورت گرفت. موارد به ترتیب شامل تخلخل‌هایی با درصد حجمی ۰، ۱۰، ۲۰و ۳۰ می‌باشند. ابتدا در نرم‌افزار انسیس ماده متخلخل همگن شبیه‌سازی شد و پارامترهای آن محاسبه گردید. پس از آن مدل طراحی شده وارد نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس گردید. جنس قالب فولاد گرم کار در نظر گرفته شد و مطابق شکل (۳) با توجه به نوع المان انتخابی DC3D10، شبکه بندی انجام گردید. این المان به‌صورت چهاروجهی و از نوع المان مرتبه دو می‌باشد.



شکل۳: المان بندی بلوک‌های قالب

[1] core
[2] cavity

با توجه به نمودار همگرایی شکل (۴)، تعداد ۴۷۸ هزار المان به عنوان تعداد بهینه المان‌ها انتخاب گردید. با افزایش تعداد المان‌ها بیش از مقدار مذکور، تغییری در دمای حالت پایا مشاهده نگردید اما زمان حل عددی به شدت افزایش داشته است.



شکل۴ : نمودار همگرایی المان و دما

سایر متغیرهای بدین‌صورت تنظیم شدند: دمای مذاب۸۲ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب و ماده خنک‌کننده ۲۷ درجه سانتی‌گراد، مدت‌زمان تزریق ۴/۷ ثانیه.

بحث و نتیجه گیری

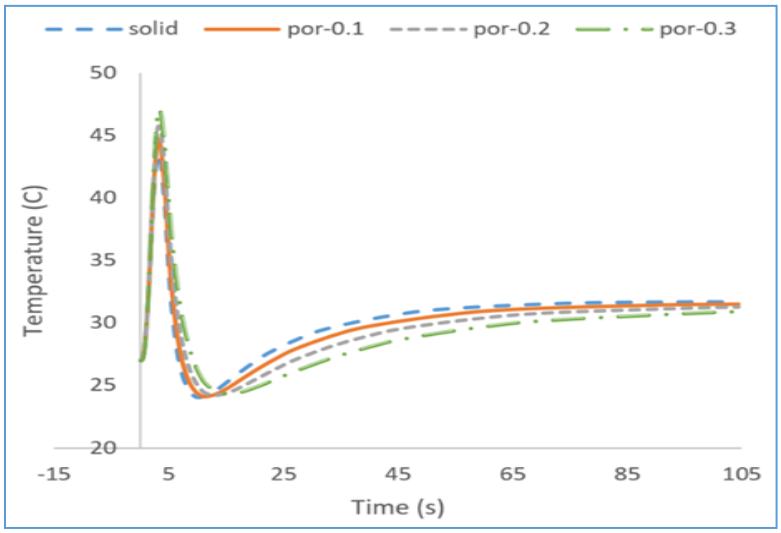
انتقال حرارت

پس از شبیه‌سازی، انتقال حرارت در یک نقطه یکسان و در عمق قالب با مقادیر مختلف تخلخل مورد بررسی قرار گرفت. بررسی افزایش دما در بازه زمانی۳ تا ۴ ثانیه در شکل (۵) نشان می‌دهد، که بیشترین افزایش دما در تخلخل۳۰ درصد با دمای۴۷/۱ سانتی‌گراد رخ داده است و پس از آن تخلخل ۲۰ درصد با بیشترین دمای ۴۵/۷، تخلخل ۱۰ درصد با بیشترین دمای ۴۴/۶ و در آخر ماده بدون تخلخل با بیشترین دمای ۴۳/۵ سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به این موضوع که هدایت حرارتی و عملکرد انتقال حرارت در مواد متخلخل بیشتر است[۱۸]، دلیل انتقال حرارت بیشتر مواد متخلخل بالا بودن مساحت سطح آن‌ها می‌باشد[۲۰]. با استفاده از نتایج حاصله از شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت افزایش درصد تخلخل سبب افزایش انتقال حرارت در قالب می‌شود، عمق نفوذ حرارت در قالب با افزایش درصد تخلخل بیشتر می‌شود.

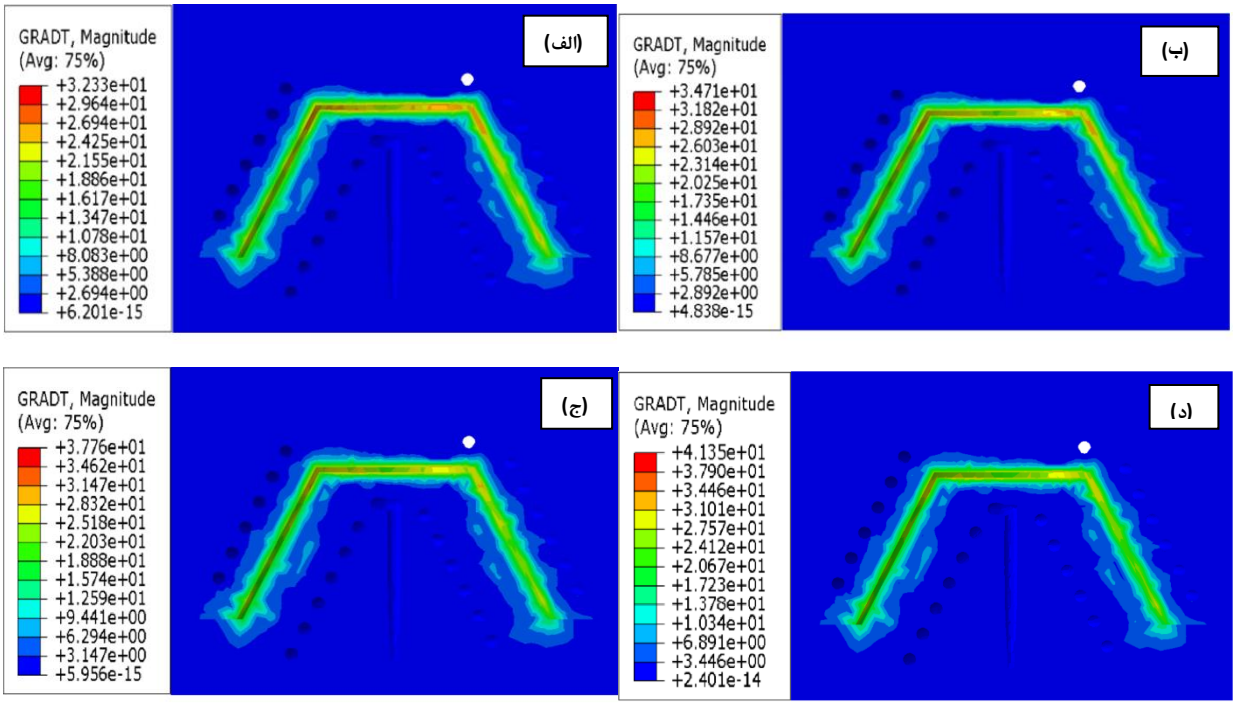
بررسی قالب در بازه زمانی ۴۵ تا ۱۰۵ ثانیه در شکل (۵) نشان می‌دهد، که افت حرارت در مواد متخلخل بیشتر است و درصد تخلخل در نرخ خنک کاری مواد تاثیر گزار می‌باشد. به‌گونه‌ای که با افزایش درصد تخلخل نرخ خنک کاری در مواد بیشتر می‌شود که خود یک ویژگی مثبت برای خنک کاری سریع‌تر قطعات می‌باشد. لازم به ذکر است که باید مقاومت مکانیکی قالب با درصد تخلخل‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد و درصد تخلخل بهینه برای خواص مکانیکی و انتقال حرارتی لحاظ شود.

گرادیان حرارتی

در بخش انتقال حرارت، بررسی گرادیان حرارتی ماده یکی از مباحث حایز اهمیت می‌باشد. با افزایش زیاد گرادیان حرارتی در دماهای بالا احتمال بروز شوک حرارتی و ترک‌خوردگی بر اثر انبساط و انقباض بیشتر می‌شود. در ادامه در شکل (۶) کانتورهای گرادیان حرارتی ارائه شده است.

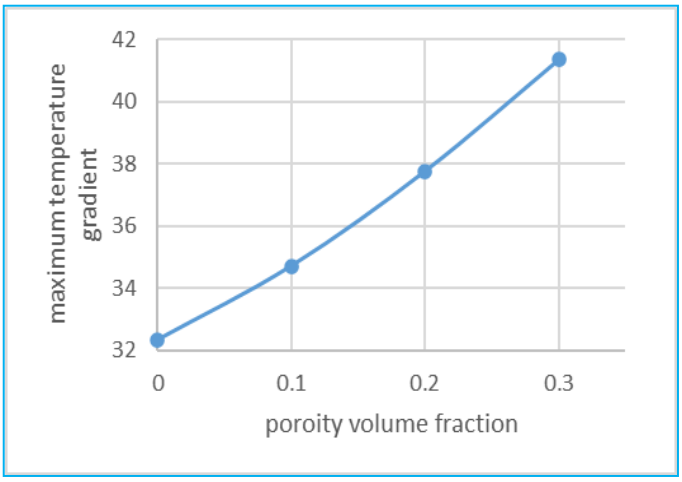


شکل۵: تغییرات دمایی قالب برای مقادیر مختلف تخلخل



شکل۶: کانتورهای گرادیان حرارتی برآیند در قالب با درصد تخلخل‌های : الف) بدون تخلخل، ب)۱۰درصد، ج)۲۰ درصد و د)۳۰ درصد.

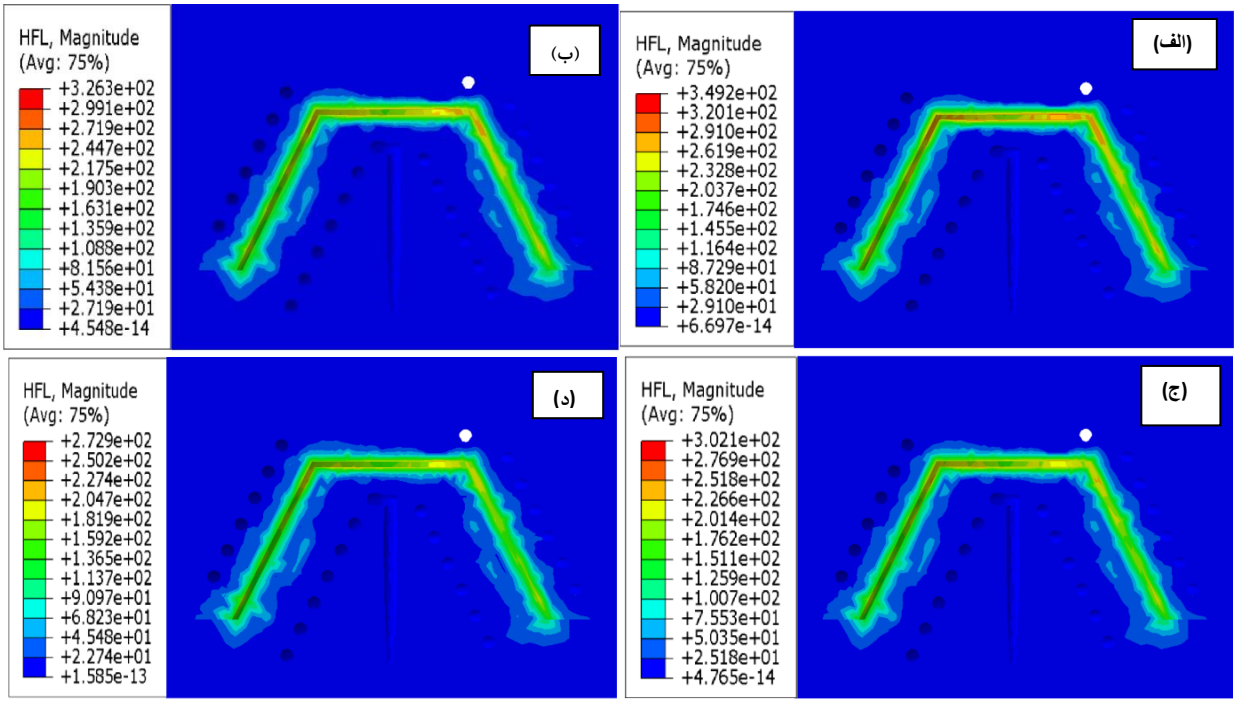
همان‌طور که در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش مقادیر درصد تخلخل، بیشینه گرادیان حرارتی ایجاد شده در قالب نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷: نمودار بیشینه گرادیان حرارتی ایجاد شده در قالب با درصد تخلخل‌های مختلف

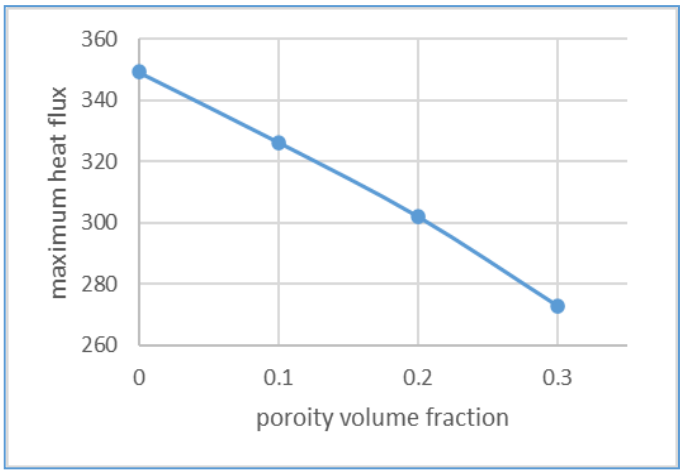
شار حرارتی

در ادامه به بررسی و مقایسه شار حرارتی هر چهار حالت مواد متخلخل شبیه‌سازی شده پرداخته می‌شود که نتایج در شکل (۸) ارایه شده است.



شکل۸: کانتورهای شار حرارتی برآیند در قالب با درصد تخلخل‌های : الف) بدون تخلخل، ب)۱۰درصد، ج)۲۰ درصد و د)۳۰ درصد

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است با افزایش درصد تخلخل شار حرارتی کاهش پیدا می‌کند. همچنین طبق نتایج نمودار شکل (۹) با افزایش مقادیر درصد تخلخل، بیشینه شار حرارتی در قالب کاهش می‌یابد.



شکل ۹ : نمودار بیشینه شار حرارتی ایجاد شده در قالب با درصد تخلخل‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر مقادیر مختلف تخلخل در انتقال حرارت قالب‌های تزریق پلاستیک ایجاد شده به روش ذوب لیزر انتخابی چهار مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با درصد تخلخل‌های (۰،۱۰،۲۰و۳۰) شبیه‌سازی شد که نتایج به شرح زیر حاصل گردید.

- به دلیل بالا بودن مساحت سطح مواد متخلخل افزایش درصد تخلخل در قالب، سبب افزایش انتقال حرارت در آن می‌شود و به همین دلیل افزایش دما در قالب متخلخل بیشتر رخ می‌دهد.
- تحلیل نتایج در عمق قالب نشان می‌دهد با افزایش درصد تخلخل در قالب حرارت در عمق بیشتری از قالب نفوذ می‌کند.
- درصد تخلخل بیشتر سبب افت گرمایی بیشتر در قالب شده و نرخ خنک‌کاری در قالب با افزایش درصد تخلخل افزایش می‌یابد.
- افزایش درصد تخلخل در قالب سبب افزایش بیشینه گرادیان حرارتی در قالب می‌شود.
- افزایش درصد تخلخل در قالب سبب کاهش بیشینه شار حرارتی در قالب می‌گردد.

مراجع

[1] Zheng, Z., Zhang, H.-o., Wang, G.-l., & Qian, Y.-p. (2011). Finite element analysis on the injection molding and productivity of conformal cooling channel. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 16, 231-235.

[2] Liu, Y., Yang, Y., & Wang, D. (2016). A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, 647-656.

[3] Gu, D., & Shen, Y. (2009). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. Materials & Design, 30(8), 2903-2910.

[4] Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H., & Coddet, C. (2012). Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. Materials & Design, 35, 120-125.

[5] Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., & Attallah, M. M. (2015). Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A, 628, 188-197.

[6] Andreau, O., Koutiri, I., Peyre, P., Penot, J.-D., Saintier, N., Pessard, E., De Terris, T., Dupuy, C., & Baudin, T. (2019). Texture control of 316L parts by modulation of the melt pool morphology in selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology, 264, 21-31.

[7] Wang, D., Wu, S., Fu, F., Mai, S., Yang, Y., Liu, Y., & Song, C. (2017). Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. Materials & Design, 117, 121-130.

[8] Andani, M. T., Dehghani, R., Karamooz-Ravari, M. R., Mirzaeifar, R., & Ni, J. (2018). A study on the effect of energy input on spatter particles creation during selective laser melting process. Additive Manufacturing, 20, 33-43 .

[9] Stamp, R., Fox, P., O'neill, W., Jones, E., & Sutcliffe, C. (2009). The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 20, 1839-1848.

[10] Jimmy, J., & Prasetyo, V. R. (2022). Sentiment analysis on feedback of higher education teaching conduct: An empirical evaluation of methods.

[11] Huang, G., Min, Z., Yang, L., Jiang, P.-X., & Chyu, M. (2018). Transpiration cooling for additive manufactured porous plates with partition walls. International Journal of Heat and Mass Transfer, 124, 1076-1087.

[12] Hernandez Korner, M. E., Lambán, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Ng Corrales, L. d. C., & Royo, J. (2020). Systematic literature review: integration of additive manufacturing and industry 4.0. Metals, 10(8), 1061.

[13] Wang, L., Wei, Q. S., Xue, P. J., & Shi, Y. S. (2012). Fabricate mould insert with conformal cooling channel using selective laser melting. Advanced Materials Research,

[14] Cheng, Z., Xu, R., & Jiang, P.-X. (2021). Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 170, 120902.

[15] Wong, M., Tsopanos, S., Sutcliffe, C. J., & Owen, I. (2007). Selective laser melting of heat transfer devices. Rapid Prototyping Journal, 13(5), 291-297.

[16] Stepanov, O., Rydalina, N., & Antonova, E. (2020). The use of porous metals in heat exchangers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,

[17] Alkahari, M. R., Furumoto, T., Ueda, T., Hosokawa, A., Tanaka, R., & Abdul Aziz, M. S. (2012). Thermal conductivity of metal powder and consolidated material fabricated via selective laser melting. Key Engineering Materials,

[18] Rashidian, S., & Tavakoli, M. R. (2017). Using Porous Media to Enhancement of Heat Transfer in Heat Exchangers. International Journal of Advanced Engineering, Management and Science, 3(11), 239937.