



شبیه سازی حرارتی ساخت افزایشی به روش رسوب مستقیم فلز بدون سابروتین نویسی

حسن معراجی

دانشگاه تربیت مدرس

دکتر رضا میراسمعیلی

دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

امروزه ساخت افزایشی توجه افراد و محققان بسیار زیادی را در زمینه تولید قطعات به خود جلب کرده است. این فرایند دارای آینده بسیار درخشانی بوده و به زودی به عرصه تولیدات صنعتی کمک شایانی خواهد کرد. در بحث ساخت افزایشی فلزات، مشابهت بسیار زیادی با جوشکاری وجود دارد. همانگونه که قطعات قبل از جوشکاری باید از نظر جوش پذیری بررسی شوند، در ساخت افزایشی نیز این مساله مهم است. شبیه سازی به عنوان یک راه حل وارد عمل شده و امکان ساخت افزایشی مواد مختلف را با انجام محاسبات المان محدود بررسی می کند. با استفاده از این روش، می توان به صورت دقیق تری مشکلات محتمل در فرایند تولید را پیش بینی کرده و راه حل های مناسب برای آنها پیدا کرد. اما ممکن است به دلیل پیچیدگی در این فرایند و نیاز به کدنویسی، این مساله برای همه مقدور نباشد. در پژوهش حاضر شبیه سازی ساخت افزایشی رسوب مستقیم سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ بر روی زیرلایه از جنس فولاد کربنی ۱۵۲۴ بدون هیچگونه کدنویسی انجام شده و نتایج قابل قبولی در مقایسه با کارهای مشابه بدست آمده است. با استفاده از اعمال مستقیم فرمول توزیع حرارت، شبیه سازی حاضر با اختلاف تقریبی ۱۳ درصدی با حالتی که کدنویسی شده است آنالیز حرارتی را انجام داد.

واژگان کلیدی: شبیه سازی، ساخت افزایشی، رسوب مستقیم فلز، آباکوس، المان محدود



۱- مقدمه

با پیشرفت چشمگیر تکنولوژی و بالارفتن پیچیدگی قطعات و آلیاژهای متنوع، ساخت افزایشی به عنوان یک روش جایگزین پیشرفته در تولید شناخته شده و کم کم پای خود را به عرصه صنعتی و مدرن باز می‌کند. ساخت افزایشی فلزات به جهت داشتن جنیه تولید ذوب و انجماد، بسیار شبیه به جوشکاری است. در این فرایند به واسطه یک منبع حرارت، فلز پرکننده ذوب شده و با انجماد و تکرار این فرایند به صورت لایه به لایه، شکل سه‌بعدی ایجاد می‌شود. اما مساله‌ای که اهمیت دارد این است که چقدر از مشکلات موجود در جوشکاری، در ساخت افزایشی فلزات هم دخیل است؟ بی شک مقدار زیادی به یکدیگر شباهت دارند. ایجاد تنش پسماند، عیوب مختلف از قبیل ترک، حفره و ... می‌تواند در ساخت افزایشی فلزات نیز رخ دهد.

شبیه‌سازی به عنوان یکی از راه‌های موثر قادر به انجام پیشبینی‌های حرارتی و مکانیکی با انجام محاسبات المان محدود است. اما با توجه به پیچیدگی ایجاد توزیع حرارت به صورت صحیح در این فرایند، نیاز به کدنویسی برای آن وجود دارد که کار ساده‌ای نیست. اما می‌توان با استفاده از بخش‌های متنوع نرم‌افزار آباکوس، این فرمول‌های حرارتی را مستقیماً وارد شبیه‌سازی کرده و از دشواری انجام آن تا حد زیادی کاسته شود.

با انجام شبیه‌سازی می‌توان تا حدودی از عیوب احتمالی و امکان ساخت افزایشی قطعه‌ای خاص با متغیرهای فرایندی از پیش تعیین شده اطلاع حاصل نمود. مثلاً می‌توان از طریق آنالیز حرارتی، بزرگی منطقه متأثر از حرارت را بدست آورد. یا با استفاده از آنالیزهای مکانیکی در شبیه‌سازی، میزان تنش پسماند را در جهات مختلف اندازه‌گیری کرد. هدف از تحقیق حاضر، انجام این فرایند با سهولت بیشتر برای عموم بوده و با استفاده روش پیش رو می‌توان نتایج نزدیکی با شبیه‌سازی‌های مشابه که از راه‌های دشوارتر انجام شده است را کسب کرد.



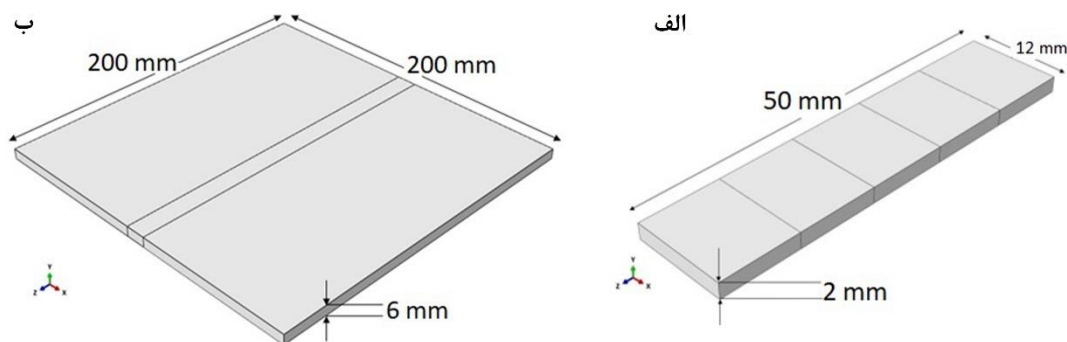
۲- روش تحقیق

در این پژوهش از نرم افزار آباکوس برای شبیه‌سازی حرارتی استفاده شد. مدل مورد استفاده در این نرم‌افزار بصورت غیرمتقارن بوده و تمامی مدل به صورت یکپارچه تحت فرایند شبیه‌سازی قرار گرفت. در ادامه بخش‌های مربوط به مراحل مدلسازی و اجرای شبیه‌سازی پرداخته شد.

۲-۱- ایجاد مدل سه‌بعدی

به طور کلی مدل سه‌بعدی مورد استفاده در این شبیه‌سازی از دو بخش لایه و زیر لایه تشکیل شده است. منظور از لایه دقیقاً همان لایه‌های ساخت افزایشی است. یعنی در این فرایند، قطعه سه بعدی به صورت لایه به لایه ایجاد شده و برای شبیه‌سازی نیز نیاز به تعریف این بخش از مدل است. همچنین منظور از زیرلایه همان صفحه فلزی است که فرایند ساخت افزایشی بر روی آن انجام می‌گردد.

شکل ۱ نشان دهنده هر دو بخش (لایه و زیرلایه) از مدل سه بعدی است. مدل مربوط به لایه که نمایانگر خط جوش در فرایند ساخت افزایشی است، به پنج قسمت مساوی در راستای طولی خود تقسیم شد تا از با استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی (تولد و مرگ)، هر بخش آن با نزدیک شدن منبع گرما به آن، فعال گردد. در مدل مربوط به زیرلایه، قسمت وسط دقیقاً منطبق بر لایه‌ها بوده و ایجاد این قسمت به این علت است که مش‌های تعریف شده در آن ناحیه (زیر لایه‌ها) تحت حرارت قرار گرفته و برای افزایش دقت محاسبات می‌بایست این ناحیه در زیر لایه دارای مش‌های ریزتری باشد. بدین ترتیب این بخش در زیرلایه در قسمت Part تعریف شد تا مش‌های ریزتری در این ناحیه اختیار شود.



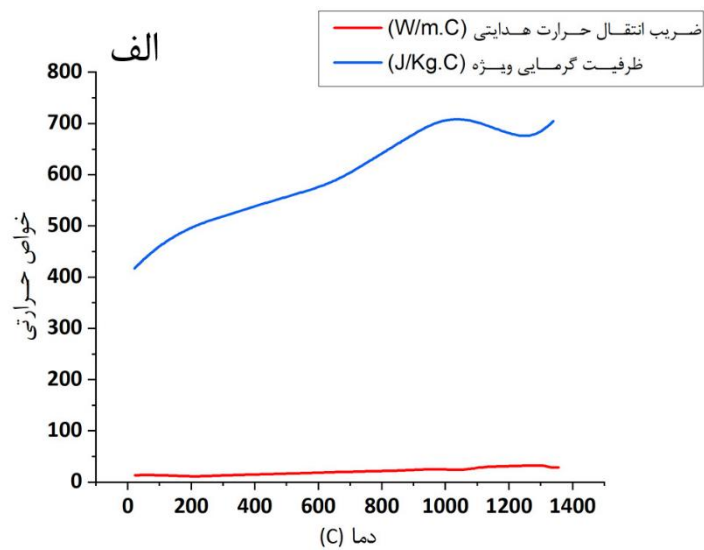
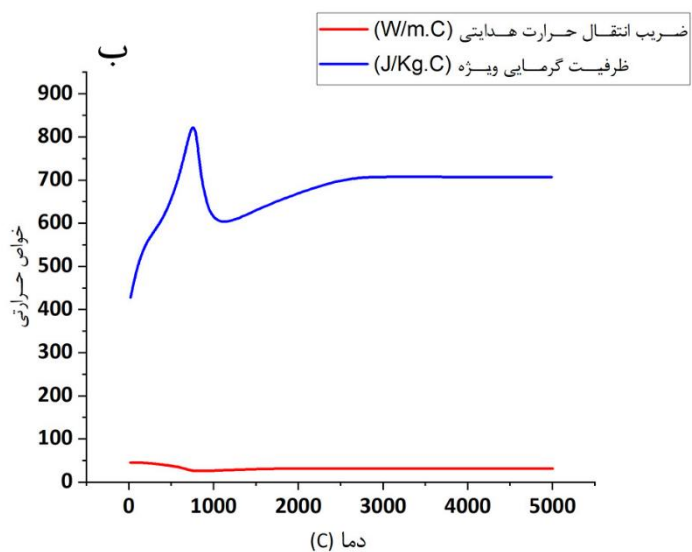
شکل ۱. مدل سه بعدی ایجاد شده به همراه ابعاد (الف) مدل مربوط به لایه (ب) مدل مربوط به زیرلایه

۲-۲- تعریف خواص مواد

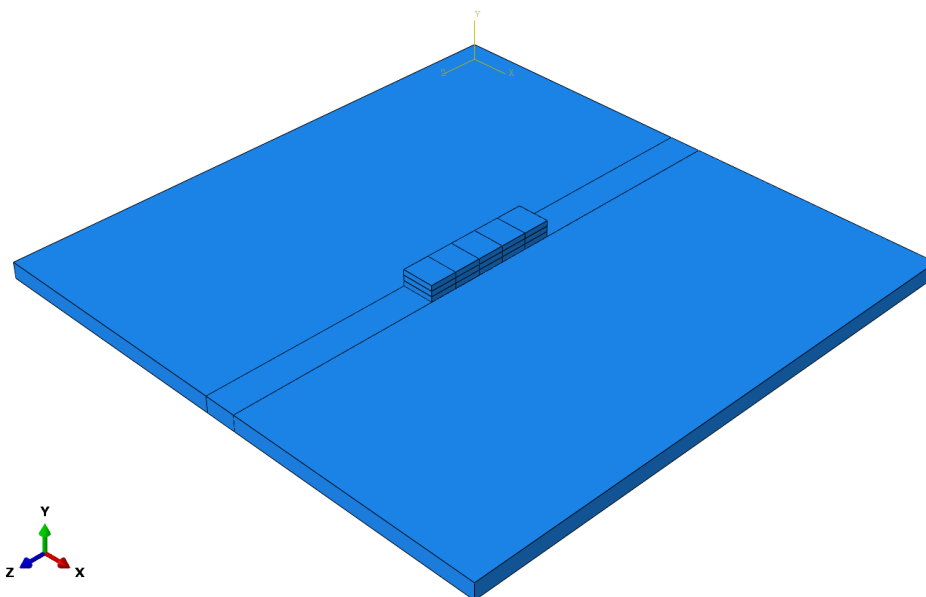
در کار (Bonifaz 2019) که این شبیه‌سازی با استفاده از سابروتین نویسی انجام شد، لایه‌های ساخته شده از جنس آلیاژ INC-738-LC و زیرلایه از جنس فولاد ساده کربنی AISI-1524 است. پس خواص هر کدام از آنها به صورت جداگانه تعریف شد. چون آنالیز شبیه‌سازی صورت گرفته از نوع حرارتی است، فقط خواص حرارتی از جمله رسانش، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی وارد گردید. دو خاصیت اول وابسته به دما بوده و داده‌های آن‌ها به صورت نموداری در پژوهش (Bonifaz 2019) آورده شده است. پس با استفاده از ابزار Digitizer، این داده‌ها و اعداد از نمودارها به صورت عددی و وابسته به دما استخراج گردید و به نرم افزار آباکوس وارد شد. شکل ۲ نشان دهنده خواص حرارتی وابسته به دما در زیرلایه و لایه است. همچنین چگالی زیرلایه و لایه به ترتیب برابر با ۷۸۲۰ و ۸۱۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب اتخاذ شد.

۲-۳- مونتاژ مدل سه بعدی

در این شبیه‌سازی، یک دیواره متشکل از ۳ لایه (پاس جوش) به واسطه ساخت افزایشی ایجاد شد. پس در مازول Assembly از نرم افزار آباکوس، مدل سه بعدی مربوط به لایه، ۳ بار روی یک دیگر قرار گرفته و این لایه‌ها دقیقاً در وسط زیر لایه مطابق شکل ۳ مونتاژ گردیدند.



شکل ۲. خواص حرارتی وابسته به دما در الف) لایه ب) زیر لایه.



شکل ۳. مونتاژ نهایی مدل های سه بعدی در نرم افزار.

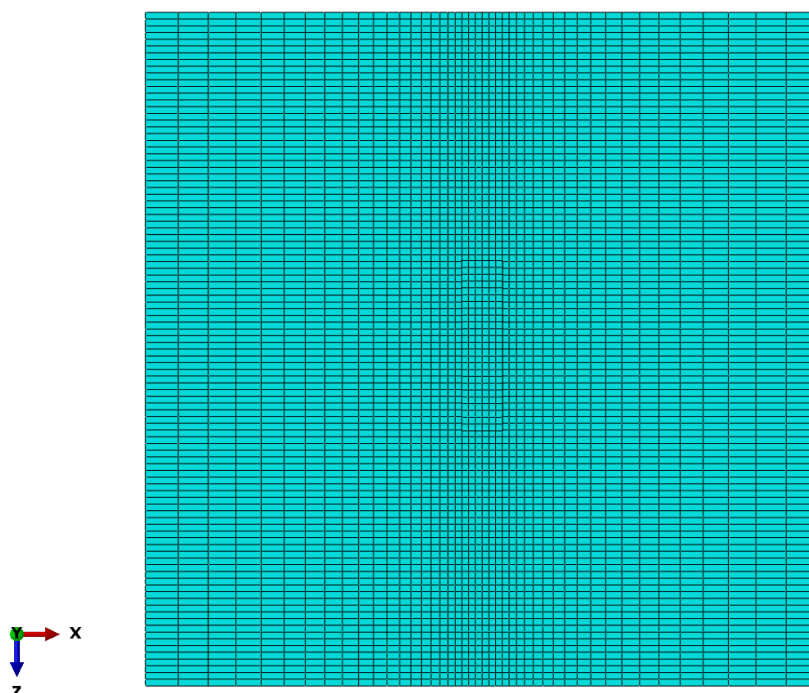


۲-۴- مش زنی

مش های مورد استفاده در این فرایند شبیه سازی از نوع Hex بوده و تکنیک آن Structured می باشد. رویکرد مش زنی در این شبیه سازی بدین صورت است که با نزدیک شدن به خط جوش در راستای محور مختصاتی X ، به دلیل اینکه این نواحی تحت الشعاع حرارت قرار می گیرند، نیازمند مش های ریزتری برای افزایش دقت محاسبات هستند و از طرفی برای بهینه سازی زمان آنالیز، آن نواحی که متأثر از حرارت نیستند، مش های درشت تری دارند. شکل ۴ نمای بالای این مش زنی را نشان داده که به وضوح تغییر اندازه مش ها با نزدیک شدن به خط مرکزی جوش قابل رویت است.

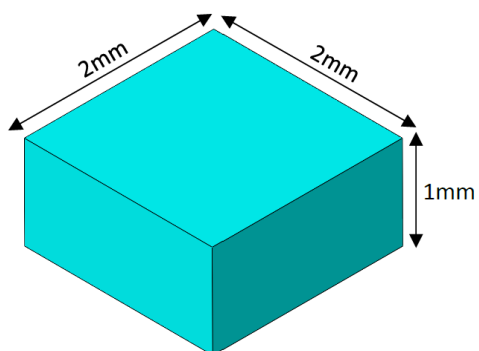
همچنین مش ها در بخش وسط زیرلایه دارای اندازه یکسانی با لایه ها بوده، کمترین اندازه را داشته و ابعاد آنها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

نکته بسیار مهم در مش زنی، هم راستایی مش های لایه و زیرلایه در امتداد هم است. این هم راستایی باعث افزایش دقت محاسبات و انجام شبیه سازی بدون خطای نرم افزار گردید. هم راستایی مش های لایه و زیرلایه در شکل ۶ نمایش داده شده است. تعداد کل المان های موجود در مونتاژ مدل، ۲۷۳۰۰ عدد بوده که تعداد ۲۶۷۰۰ عدد از آنها از نوع DCC3D8 و ۶۰۰ عدد از آنها از نوع DC3D8 است. تعداد کل گره^۱ های موجود هم ۳۳۴۵۳ عدد است.

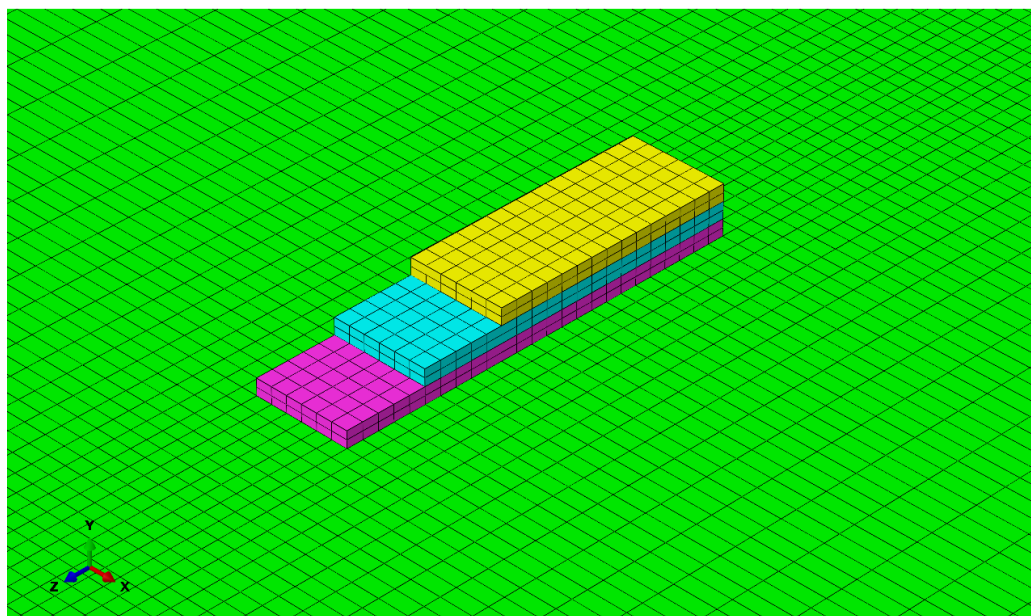


شکل ۴. تغییرات ابعاد مش ها در مدل سه بعدی.

¹ Node



شکل ۵. ابعاد کوچک ترین مش به کار گرفته شده در شبیه سازی.

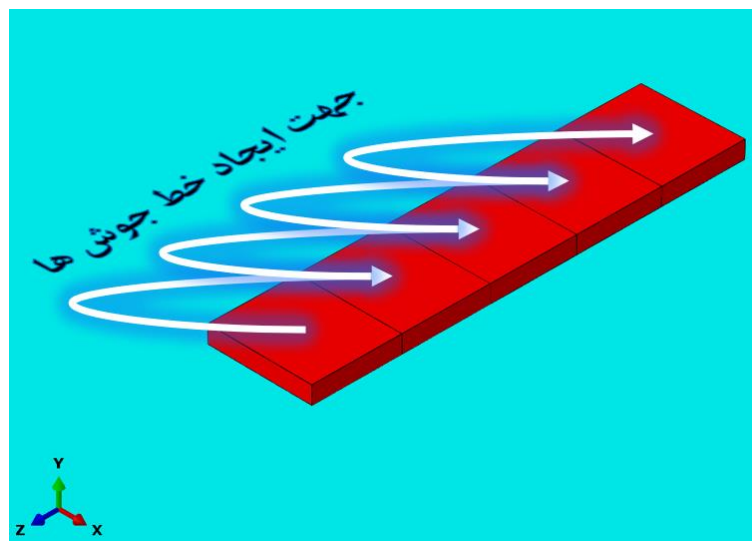


شکل ۶. نمای سه بعدی از هم راستایی مش های لایه و زیر لایه.



۵-۲- تعریف مراحل شبیه سازی

در این بخش مراحل مربوط به شبیه سازی از ابتدای فرایند ساخت افزایشی و ایجاد خط جوش ها تا انتهای این فرایند و سرمایش تا دمای محیط در ماژول Step تعریف شد. در این شبیه سازی ایجاد خط جوش های ساخت افزایشی در راستای طولی با استفاده از تکنیک تولد و مرگ^۲ انجام شد. هر خط جوش مطابق شکل ۷ به پنج قسمت مساوی در جهت Z تقسیم گردید. در ابتدا تمامی پنج بخش در حالت غیر فعال (مرگ) قرار می گیرند. سپس با حرکت منبع حرارتی، بخش های خط جوش یکی پس از دیگری فعال (متولد) شده و حرارت به آن ها اعمال گردید. پس در تعریف مراحل ابتدا یک مرحله به نام Death ساخته شد که تمامی بخش های خط جوش را در حالت مرگ قرار داده و سپس به ازای هر خط جوش پنج مرحله تعریف شده و در پایان ساخت افزایشی که سه خط جوش تکمیل گردید، کل قطعه سرد شد. پس یک مرحله به نام Cooling نیز در این شبیه سازی به مراحل قبلی اضافه گردید. طبق توضیحات فوق مجموعاً هفده مرحله در این بخش تعریف شد. با احتساب تمامی مراحل شبیه سازی، مرحله مرگ المان ها ۰/۱ ثانیه، ایجاد هر بخش از خط جوش ۵ ثانیه و سرمایش کلی قطعه ۷۰۰۰ ثانیه به طول انجامید. پس کل زمان فرایند برابر ۷۰۷۵/۱ ثانیه بوده و طبق معادله ۱ محاسبه گردید.



شکل ۷. طرحواره اجرای تکنیک تولد و مرگ در خط جوش ها.

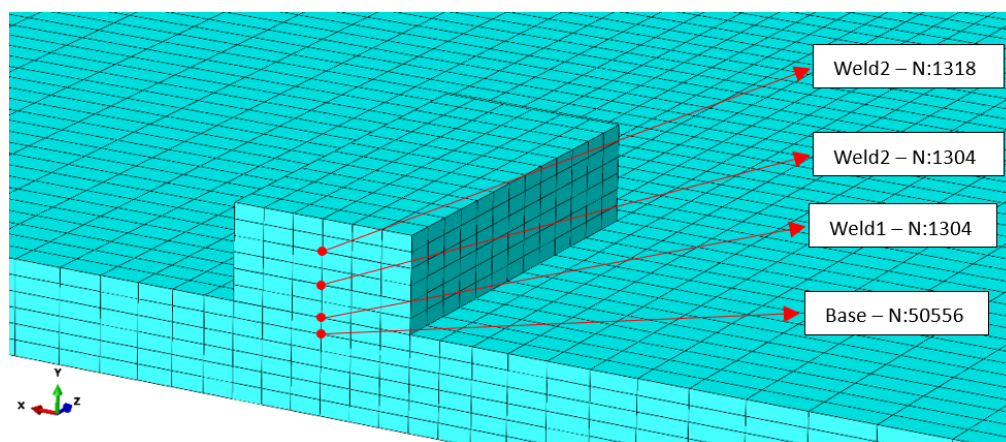
$$\text{Total time} = \text{Death time} + \text{Manufacturing time} + \text{Cooling time} = 0.1 + (15 \times 5) + 7000 = 7075.1 \text{ s}$$

معادله ۱. محاسبه زمان کل فرایند ساخت افزایشی در شبیه سازی.

² Birth & Death



در ماژول Step، از بخش Field output خروجی محاسبات فقط روی (Nodal temperature) NT قرار گرفت. با انجام این کار، تمامی محاسبات و شبیه سازی به صورت حرارتی بوده و خروجی دمای هر گره را مشخص کرد. تعریف گره ها برای انجام محاسبات حرارتی مطابق کار (Bonifaz 2019) انجام شد. علت این کار مقایسه قابل اتکای نتایج در حالت شبیه سازی با سابروتین و بدون آن است. این نقاط در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. گره های تعریف شده برای انجام محاسبات حرارتی بر روی آنها.

۶-۲- تعریف فعل و انفعالات

در این بخش فعل و انفعالات بخش های مدل سه بعدی ایجاد شده با یکدیگر و همچنین با محیط اطراف با استفاده از ماژول Interaction در نرم افزار آباکوس اعمال شد. چهار مورد در این بخش به شبیه سازی اعمال شد که عبارت است از:

- فعال سازی و غیرفعال سازی بخش های خطوط جوش جهت اعمال تکنیک تولد و مرگ
- مکانیزم همرفت انتقال حرارت از قطعه به محیط
- مکانیزم تشعشع انتقال حرارت از قطعه به محیط
- مقید سازی سطوح بین لایه ای از طریق تکنیک Tie

ابتدا یک Interaction تعریف گردید تا تمام بخش های خطوط جوش را در حالت مرگ قرار دهد (Deactive). در این قسمت، تمامی خطوط جوش غیر فعال گردیدند. در Interaction های بعدی باید بخش های خطوط جوش در جهت انجام

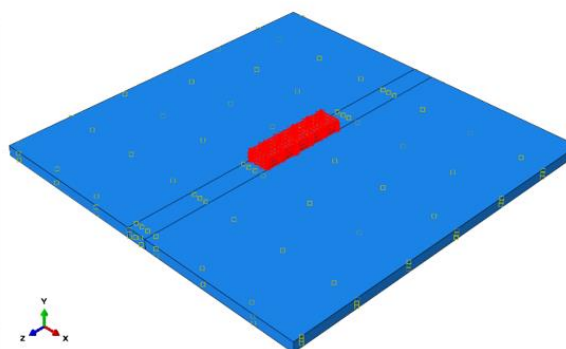
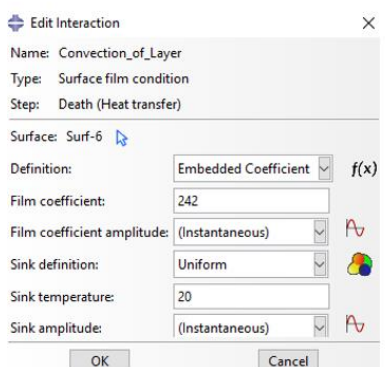
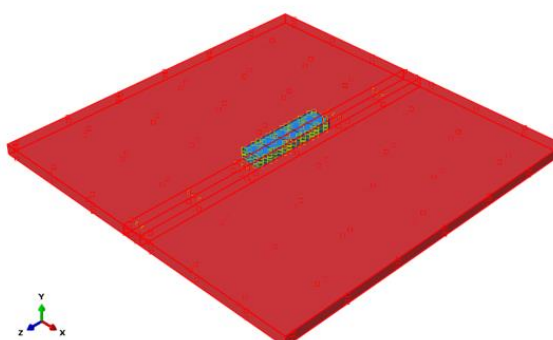
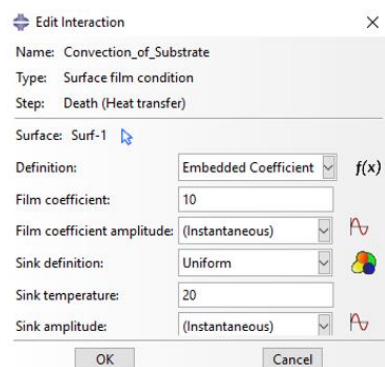
جوشکاری یکی پس از دیگری فعال شده و بدین وسیله پانزده Interaction تعریف گردید. جهت انجام لایه های جوشکاری شده به صورت

یک جهته بوده و رفت و برگشتی نیست. پس این مساله در همین مرحله با انتخاب ترتیبی بخش های خطوط جوشکاری لحاظ گردید.

بعد از اتمام ایجاد Interaction های مربوط به تولد و مرگ، Interaction های دفع حرارت قطعه ایجاد شدند. قطعه مربوطه به طور کلی از طریق دو مکانیزم همرفت و تشعشع، حرارت ورودی را به محیط اطراف دفع می‌کند اما نکته ای حائز اهمیت وجود

دارد و آن این است که این فرایند جوشکاری از نوع GMAW بوده و تحت شار گاز محافظ قرار می‌گیرد. به همین علت، مکانیزم همرفت لایه های جوش شده که در معرض گاز محافظ قرار دارند فوق العاده فعال‌تر از دیگر مواضع قطعه بوده و دارای ضریب

انتقال حرارت سطحی برابر با $242 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ بوده در حالی که در دیگر مواضع قطعه برابر $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ است. البته این Interaction ها در کار (Bonifaz 2019) به روش سابروتین نویسی FILM انجام شده که در این شبیه‌سازی ساده‌سازی صورت گرفته و Interaction های از نوع Surface film condition تعریف گردید که جزئیات آنها مطابق شکل ۹ است.



شکل ۹. جزئیات Interaction های مربوط به مکانیزم همرفت و سطوح انتخاب شده برای هر کدام از آنها.

همچنین مکانیزم دفع حرارت از طریق تشعشع نیز در کار (Bonifaz 2019) با سابروتین FILM انجام گرفته است، اما در این پژوهش به دلیل ساده سازی، یک Interaction از نوع Surface film radiation بوده، دمای ۲۰ درجه برای آن انتخاب شده و همچنین ضریب تشعشع آن برابر با ۰/۷ است. در این Interaction تمامی سطوح قطعه و لایه ها برای آن انتخاب گردیدند. همچنین سطوح تماسی بین لایه ها و بین لایه و زیر لایه ها، از طریق قید Constraint از نوع Tie روی یکدیگر مقید شده تا انتقال حرارت بین سطوح تماسی انجام پذیرد.

۷-۲- اعمال حرارت

در این بخش بارگذاری حرارتی از نوع Surface heat transfer در ماژول Load نرم افزار برای هر بخش از هر خط جوش تعریف گردید. این حرارت اعمالی فقط روی سطح بالای هر بخش اعمال می گردد چرا که منبع حرارت در این نوع جوشکاری از بالا حرارت را اعمال می کند. همچنین توزیع حرارت در این شبیه سازی از نوع گوسین بوده و در کار (Bonifaz 2019) با استفاده از سابروتین DFLUX تعریف گردیده است. اما در این شبیه سازی از سابروتین نویسی برای اعمال حرارت استفاده نشده و با وارد کردن فرمول توزیع حرارت گوسین، این مرحله انجام گردیده است. فرمول توزیع حرارت گوسین با سابروتین نویسی مطابق معادله ۲ است.

$$q(x, z, t) = \frac{3Q}{\pi C^2} \exp\{-3[(z - vt)^2 + x^2]/C^2\}$$

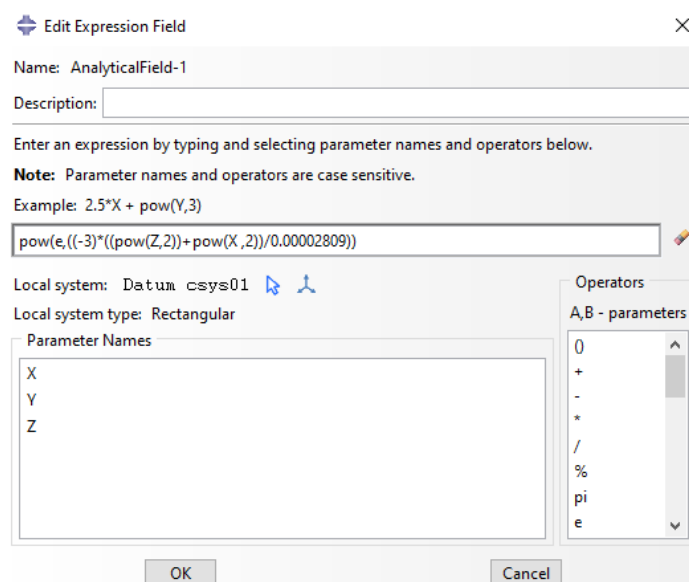
معادله ۲. فرمول توزیع حرارت گوسین مورد استفاده در شبیه سازی با سابروتین نویسی.

در معادله ۲، q برابر حاصل ضرب میان ولتاژ، آمپراژ و بازده جوشکاری است. C پارامتر توزیع حرارت بوده و بر حسب میلی متر است. همچنین این فرمول بیانگر توزیع حرارت دو بعدی (در دو راستای x و z) بر حسب زمان است اما به دلیل عدم انجام سابروتین نویسی، از زمان در این فرمول صرف نظر گردیده و فرمول جدید مطابق معادله ۳ تعریف گردید.

$$q(x, z) = \frac{3Q}{\pi C^2} \exp\{-3[z^2 + x^2]/C^2\}$$

معادله ۳. فرمول توزیع حرارت گوسین بدون سابروتین نویسی

در این قسمت پانزده بارگذاری حرارتی در ساخت افزایشی برای هر بخش از خط جوش تعریف شده و توزیع آن از نوع Analytical field انتخاب گردید. در بخش Analytical field صرفاً بخش نمایی از معادله ۳ وارد شد. روش وارد کردن این فرمول در آباکوس مطابق شکل ۱۰ است.



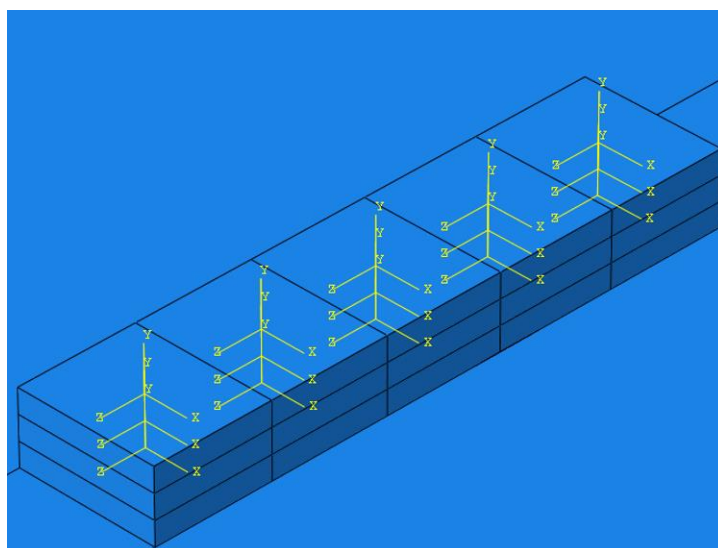
شکل ۱۰. فرمول نویسی توزیع حرارت گوسین در آباکوس.

هرکدام از این فرمول های وارده در مرکز سطح بالایی هر بخش از خط جوش تعریف گردیدند. پس برای هر بخش درست در مرکز سطح بالای آن، یک مبدا مختصات مطابق شکل ۱۱ تعریف شده و توزیع حرارت روی آن محور ها اعمال گردید.

متغیر های جوشکاری مورد استفاده در این شبیه سازی مطابق جدول ۱ است:

جدول ۱. متغیر های جوشکاری در شبیه سازی

مقدار	نوع پارامتر
5.3	C (mm)
200	جریان الکتریکی (A)
10.5	ولتاژ (V)
0.7	بازده فرایند



شکل ۱۱. ایجاد پانزده مبدا مختصات در نرم افزار برای هر بخش از خط جوش.

در هر بارگذاری Local system بر روی محور مختصات مربوطه تعریف شد.

مقدار حرارت ورودی اعمالی در هر بارگذاری مطابق معادله ۴ محاسبه گردید.

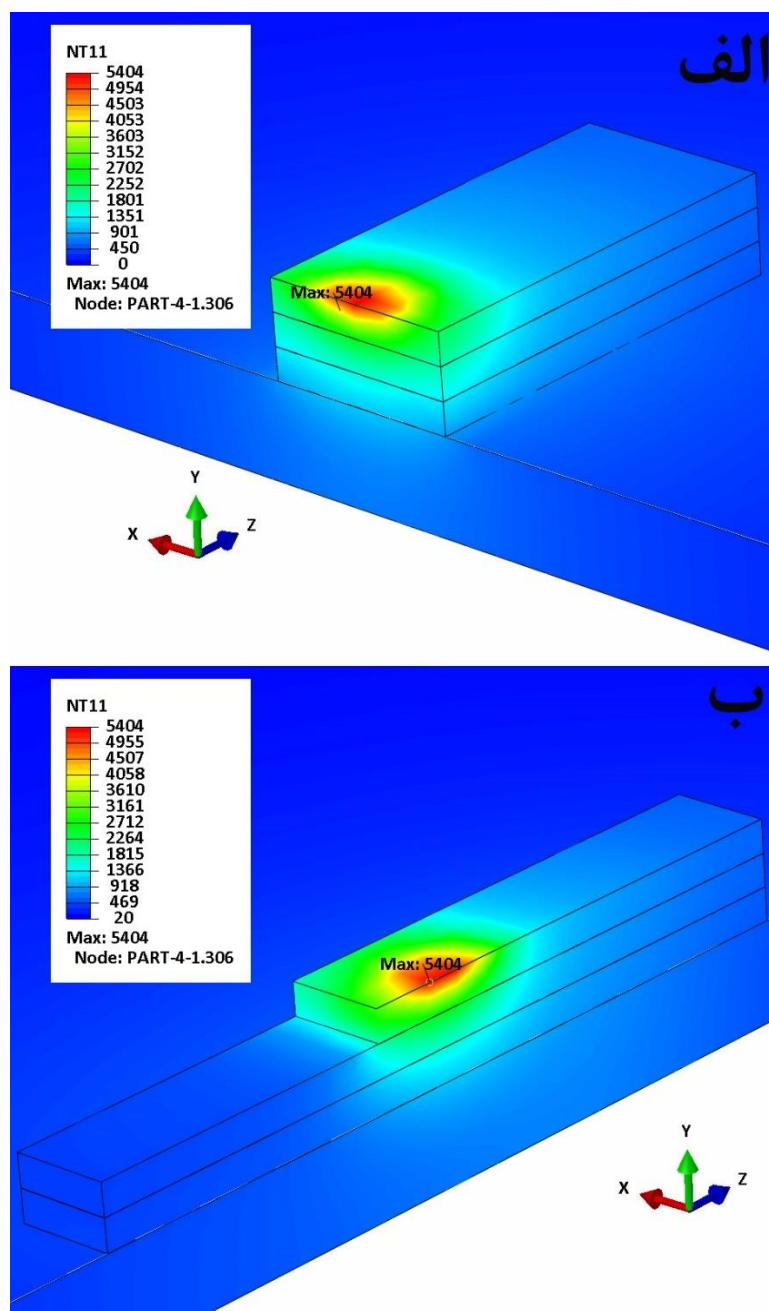
$$\text{Magnitude of heat input} = \frac{3Q}{\pi C^2} \times t = \frac{3\eta vi}{\pi C^2} \times t = \frac{3 \times 0.7 \times 10.5 \times 200}{\pi (5.3 \times 10^{-3})^2} \times 5 = 1.25 \times 10^8 \text{ J/m}^2$$

معادله ۴. محاسبه مقدار حرارت ورودی در فرایند.

در معادله ۴، متغیرهای η ، v و i به ترتیب برابر با بازده فرایند، ولتاژ و شدت جریان هستند.

۳- یافته ها

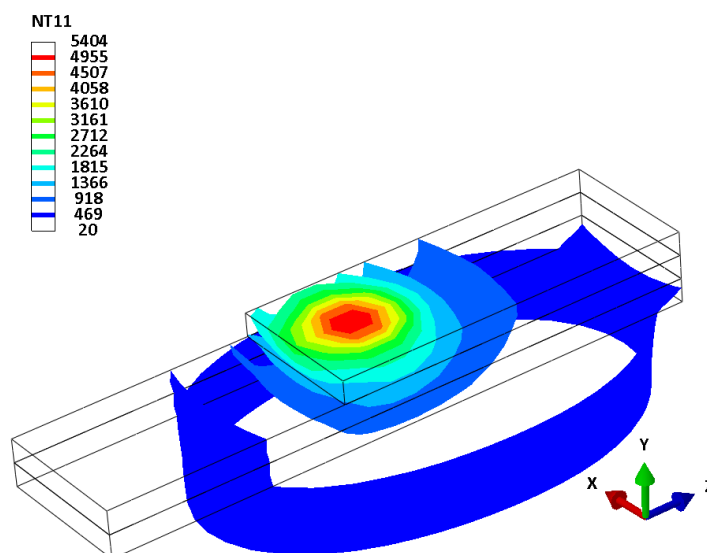
بعد از پایان تمامی مراحل شبیه سازی، محاسبات المان محدود موفقیت آمیز بوده و زمان آن به ۲۱ دقیقه رسید. کانتورهای دمایی شبیه سازی مربوطه در راستای صفحات XY و YZ مقطع زده شده و نتایج توزیع حرارت و بیشینه حرارت اعمالی در شبیه سازی مطابق است. حداکثر دمای ایجاد شده طبق کار (Bonifaz 2019) برابر با ۶۲۳۵/۶ درجه سلسیوس است. حداکثر دمای ایجاد شده در این پژوهش نیز به مقدار ۵۴۰۴ درجه رسید و نسبت حالت محاسبات کدنویسی شده ۱۳/۳ درصد کاهش داشته که خطای قابل قبولی است. شکل ۱۲ نشان دهنده مقطع عرضی و طولی کانتورهای دمایی حاصل از شبیه سازی بوده و محل بیشینه دمای وارده و توزیع حرارت در آن مشخص است. همچنین اعمال حرارت به صورت کاملاً موضعی بوده و نشان از عملکرد صحیح فرمول توزیع حرارت گوسین در شبیه سازی فعلی دارد.



شکل ۱۲. کانتور های دمایی حاصل از شبیه سازی الف) مقطع عرضی ب) مقطع طولی.

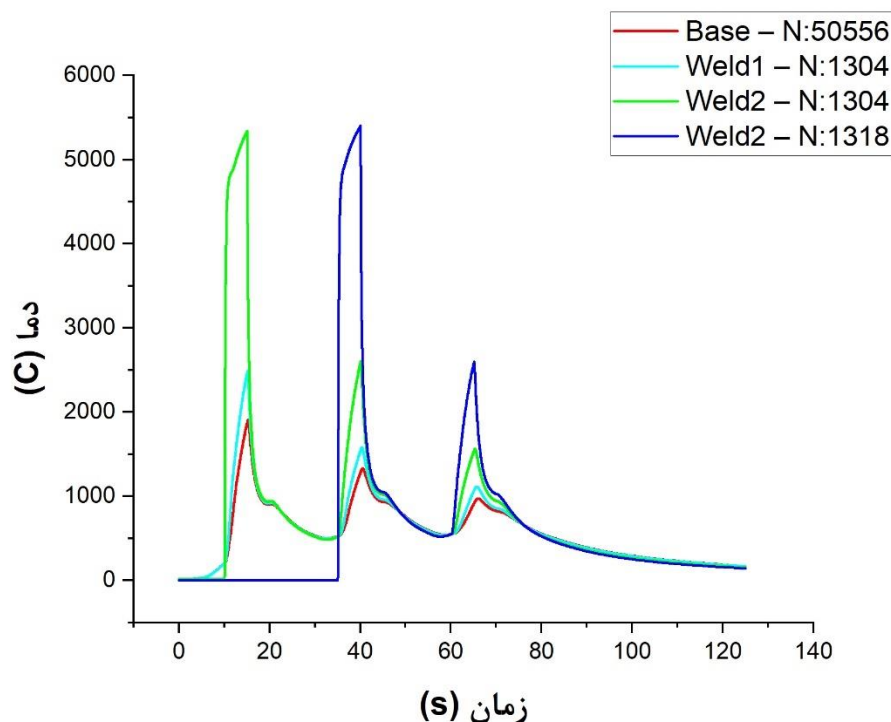


شکل ۱۳ نیز نشان دهنده سطوح همدمای ایجاد شده به واسطه توزیع حرارت گوسین است. مطابق آن، فاصله این سطوح در پشت منبع حرارت متحرک بیشتر بوده که جهت حرکت آن را مشخص می نماید.



شکل ۱۳. کانتور سطوح همدمای اطراف منبع حرارت.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شد، چهار نقطه در راستای ضخامت فلز جوش و فلز پایه انتخاب شد که محاسبات دمایی روی آنها در فرایند شبیه سازی انجام شود. طبق این نمودار های دما-زمان حاصل از این محاسبات المان محدود بر روی این نقاط مطابق شکل ۱۴ است. در این نمودار، منحنی دمایی مربوط به فلز پایه بیشینه دمای کمتری را تجربه کرد. علت این امر، فاصله بیشتر این نقطه در فلز پایه نسبت به منبع حرارت است. طبیعتاً چنین نقطه ای فاصله بیشتر از منبع حرارت نسبت به نقاط دیگر دارد. همچنین تعداد نقاط اسکترم نسبی در این منحنی ها بر تعداد لایه های جوش انجام شده در بالای این نقاط دلالت دارد و تمامی نقاط به جز نقطه Weld2 – N:1318، دارای سه اسکترم نسبی هستند. یعنی در بقیه نقاط به جز نقطه مذکور، سه بار منبع حرارت متحرک از روی آن ها عبور کرده است.



شکل ۱۴. نمودار های دما-زمان در ۴ نقطه انتخابی.

۴- بحث و نتیجه گیری

در کار حاضر، شبیه سازی حرارتی ساخت افزایشی رسوب مستقیم فلز INC-738-LC بر روی زیرلایه فولاد کربنی AISI-1524 صورت گرفت. این شبیه سازی برعکس کار های مشابهی که انجام شده است، بدون اعمال هیچ گونه کدنویسی، توزیع حرارت گوسین ناشی از منبع حرارت قوسی را بر نمونه اعمال کرد و نتایج آن به شرح ذیل است:

- زمانی که کدنویسی در اینگونه شبیه سازی ها اعمال نگردد و صرفا با محاسبات و فرمول های ریاضیاتی، توزیع حرارت صورت پذیرد، اعمال حرارت به صورت فرکانسی بوده و پیوسته به فلز جوش اعمال نمی گردد. در حالی که با کدنویسی می توان منبع حرارت را به صورت پیوسته حرکت داد و متغیر زمان را به آن اضافه کرد.
- کانتور های توزیع حرارت مشابه کار (Bonifaz 2019) بوده و بیشینه دمای تحقیق فعلی با مقاله مذکور حدودا ۱۳/۳ درصد اختلاف داشته و پایین تر بود. علت این امر می تواند به تفاوت در اعمال حرارت موضعی در حالت کدنویسی شده و بدون آن برگردد.
- روند کلی نمودار های دما-زمان در نقاط مشابه مقاله (Bonifaz 2019) نیز مشابهت زیادی داشت.

پیشنهاد می شود شبیه سازی مکانیکی نیز بدون کدنویسی بر روی چنین فرایندی انجام گردد و مشابهت نتایج با کار های انجام شده به واسطه کدنویسی مقایسه گردد.

منابع

Bonifaz, Edison A. 2019. “Modelling of Thermal Transport in Wire+{\thinspace}+{\thinspace}Arc Additive Manufacturing Process.” In *Computational Science -- ICCS 2019*, eds. João M F Rodrigues et al. Cham: Springer International Publishing, 647–59.



Thermal simulation of additive manufacturing by direct metal deposition method without writing subroutine.

Hasan Meraji

Tarbiat Modares University

Dr.Reza Miresmaeili

Tarbiat Modares University

4-1- Abstract

Today, additive manufacturing has attracted the attention of many people and researchers in the field of parts production. This process has a very bright future and will soon help the field of industrial production. In the additive manufacturing of metals, there is a great similarity with welding. Just as the parts must be checked for weldability before welding, this issue is also important in additive manufacturing. Simulation is implemented as a solution and examines the possibility of additive manufacturing of different materials by performing finite element calculations. Using this method, possible problems in the production process can be more accurately predicted and suitable solutions can be found for them. But it may not be possible for everyone due to the complexity of this process and the need for coding. In the present study, the simulation of the additive manufacturing of the direct deposition of Inconel 738 superalloy on the substrate of carbon steel 1524 was performed without any coding, and acceptable results were obtained in comparison with similar works. Using the direct application of the heat distribution formula, the present simulation performed the thermal analysis with an approximate difference of 13% with the coded mode.

4-2- Keywords: Simulation, Additive Manufacturing, Direct Metal Deposition, Abaqus, Final element.