

# شبیه‌سازی اعوجاج پس از ماشین‌کاری قطعات نازک و بلند با استفاده از روش مرگ‌المان‌ها در آباکوس به وسیله کدنویسی پایتون

داود مهرجوا<sup>۱</sup>، حسین لکزیان<sup>۲</sup> و\*

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\*مسئول مکاتبات: lexian@mut.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

جدارنازک  
ماشین‌کاری  
آباکوس  
اعوجاج  
مرگ‌المان

فرآیند ماشین‌کاری قطعات نازک و بلند یکی از چالش‌های بزرگ و مهم صنعت است. در هنگام انجام فرآیند ماشین‌کاری قطعات جدارنازک اعوجاج و تغییر فرم ایجاد شده در حین و پس از ساخت باعث معیوب شدن قطعه می‌گردد. یکی از بهترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها جهت بررسی و کاهش این تغییر فرم‌ها روش المان محدود است. این پژوهش به بررسی روش‌های ماشین‌کاری قطعات جدارنازک و بدست آوردن شرایط لازم جهت بهبود این فرآیند به صورت عددی می‌پردازد. برای این منظور یک قطعه جدارنازک آلومینیومی با رعایت کلیه شرایط تست تجربی در نرم‌افزار آباکوس به کمک کدنویسی در نرم‌افزار پایتون شبیه‌سازی شد. در انجام شبیه‌سازی از تکنیکی نوین، به نام مرگ‌المان استفاده شده است. این تکنیک از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری الگو برداری شده و جهت شبیه‌سازی قطعه مذکور بسیار کاربردی است. شبیه‌سازی مذکور با لحاظ نمودن تمامی فاکتورهای مؤثر انجام شده و نتایج تحلیل عددی فرآیند ماشین‌کاری با داده‌های تجربی مقایسه و صحت‌گذاری شد. بیشترین تغییر فرم برای تحلیل عددی ۱۳ میلی‌متر و برای تست تجربی ۱۵ میلی‌متر اعلام شد، که نشان می‌دهد نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق نزدیکی با نتایج تست تجربی دارند. همچنین در راستای بهینه‌سازی و برطرف نمودن مشکلات ایجاد شده در تست تجربی (تغییر فرم ۱۵ میلی‌متری) پیشنهاد استفاده همزمان از تکیه‌گاه غلتشی به همراه گیربندی و کیومی مطرح و شبیه‌سازی لازم با در نظر گرفتن شرایط جدید انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده میزان تغییر فرم تحلیل عددی با استفاده طرح پیشنهادی به میزان ۸ برابر کمتر شده و به عدد ۲ میلی‌متر رسید.

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۷  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

## ۱ مقدمه

دستیابی به کیفیت مطلوب، تنش پسماند در قطعه ایجاد گردد. که این امر کارکرد آن را با مشکل مواجه می‌سازد.

بررسی و تحقیقاتی که تاکنون در راستای انجام ماشین‌کاری قطعات نازک انجام شده را می‌توان به دو دسته اصلی مطالعات تئوری و مطالعات تجربی تقسیم‌بندی نمود که در زیر به شرح این روش‌ها پرداخته شده است.

نینگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۳ به بررسی تغییر فرمی که هنگام ماشین‌کاری قطعات نازک از جنس Ti-6Al-4V رخ می‌دهد پرداختند [۳]. آنها از روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار Ansys برای تحلیل تغییر فرم در ماشین‌کاری یک قطعه جدارنازک استفاده کردند. آن‌ها از یک روش جبرانی از طریق برنامه‌نویسی NC جهت ماشین‌کاری قطعات جدارنازک، استفاده کردند. سیستم جبران NC شامل مدل برش نیروی یک مدل تغییر شکل ماشین‌کاری و مدل جبران NC می‌شود. در این روش بر اساس میزان انحراف ایجاد شده در قطعه، اصلاحات و تغییراتی در برنامه‌نویسی ماشین‌کاری اعمال خواهد شد. در واقع سیستم جبران NC می‌تواند یک فرمان جبران، بر اساس تغییر فرم حاصل از ماشین‌کاری، به برنامه NC بفرستد. روش مذکور سبب افزایش دقت و کیفیت در تولید این گونه قطعات خواهد شد.

بسیاری از قطعات مورد استفاده در صنعت هوافضا معمولاً دارای ساختارهایی با دیواره‌های نازک هستند [۱]. با توجه به اهمیت استفاده از قطعات جدارنازک در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی، اخیراً توجه ویژه‌ای به منظور ساخت اینگونه قطعات صورت گرفته است. استفاده از قطعات جدارنازک می‌تواند جایگزین مناسبی برای مجموعه‌های مونتاژی مانند سازه‌های ورق‌کاری باشد. چرا که با این کار دیگر نیازی به عملیات مونتاژ، اپراتور، تجهیزات و کارگاه مونتاژ نیست، خطاهای ناشی از مونتاژ از بین خواهد رفت، زمان تولید قطعه، صرفاً زمان ماشین‌کاری آن خواهد بود و سازه‌های جدارنازک که از طریق ماشین‌کاری ساخته می‌شوند، دقت بالایی خواهند داشت [۲]. از طرفی این گونه قطعات صلبیت خود را در اثر تغییر شکل حاصل از برش در هنگام انجام ماشین‌کاری بسیار آسان از دست خواهند داد. حتی در فرزند CNC، که در آن ابزار دقیقاً بر اساس حد فاصل دیواره نازک کنترل می‌گردد، این مورد رخ خواهد داد [۱]. برای این منظور می‌بایست از روش‌ها و ترفندهای خاصی جهت ماشین‌کاری این قطعات استفاده شود. روش ماشین‌کاری غیر صحیح در این زمینه باعث می‌شود تا علاوه بر عدم

حالت ناپایداری در محدودیت دیواره شامل دیواره‌ی آزاد، دیوار محدود شده به یک انتها و دیواره‌ی که از طریق دو انتها محدود شده، مقایسه خود را انجام داده‌اند [۸]. آن‌ها نشان دادند بیشترین مقدار تغییر فرم در حالتی خواهد بود که دیواره به یک انتها محدود است.

آتویاما<sup>۷</sup> و همکارش در سال ۲۰۰۶ به بررسی نقش قید و بندها جهت تثبیت قطعات نازک در حین عملیات ماشین‌کاری پرداختند [۹]. آن‌ها نشان دادند که قید و بندها می‌بایست نیروی یکنواختی به قطعه وارد کنند تا از تغییر شکل قطعات جلوگیری شده و میزان تغییر شکل به حداقل برسد.

در سال ۲۰۱۲، اسمیت<sup>۸</sup> و همکارانش بحث قید و بندهای از پیش ساخته قطعات جدارنازک را در هنگام ماشین‌کاری مورد بررسی قرار دادند [۲]. آن‌ها استفاده از نوعی سازه از پیش ساخته شده‌ای را مطرح کردند که یکبار مصرف بوده و وظیفه نگهداری قطعات نازک را هنگام ماشین‌کاری بر عهده دارند. این نگهدارنده‌ها را می‌توان از طریق جوشکاری، ریخته‌گری، چسباندن و فورج به دست آورد. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از یک سازه یکبار مصرف می‌توان ماشین‌کاری قطعات نازک با جنس‌های فلز، سرامیک و پلیمر را انجام داد.

وو<sup>۹</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که روش ماشین‌کاری یک‌طرفه تغییر شکل زیادی در اینگونه قطعات ایجاد می‌کند [۱۰]. بنابراین در مطالعه خود روش ماشین‌کاری شبه‌متقارن را مطرح نمودند که در آن تغییر فرم از طریق براده‌برداری متقارن کاهش یابد. آن‌ها نشان دادند که بیشترین تغییر شکل در روش متقارن، ۲۰٪ روش یک‌طرفه است، لذا به این نتیجه رسیدند که روش ماشین‌کاری متقارن در کاهش تنش پسماند بسیار مؤثر است. همچنین آن‌ها نشان دادند در وضعیتی که قطعه به صورت متقارن ماشین‌کاری گردد تنش پسماند در هر دو سمت آن به طور یکسان ظاهر شده و تغییر فرم کمتری در اثر ماشین‌کاری ایجاد خواهد شد. ولی اگر قطعه به طور نامتقارن (یک‌طرفه) ماشین‌کاری گردد تنش پسماند در دو سمت قطعه یکنواخت نبوده و قطعه کار دچار تغییر فرم بیشتری نسبت به حالت متقارن می‌شود.

هدف از این مطالعه بررسی فرآیند ماشین‌کاری قطعه آلومینیومی نازک و بلند، تعیین اعوجاج پس از ماشین‌کاری و همچنین بهینه و کمینه‌سازی این اعوجاج است. برای این منظور نویسندگان از روش نوینی برای شبیه‌سازی این فرآیند به کمک روش المان محدود در نرم افزار آباکوس<sup>۱۰</sup> استفاده کردند که تا کنون انجام نشده است. با توجه به کاربردی بودن روش ارائه شده در این تحقیق و همچنین نوین بودن آن، نتایج این تحقیق می‌تواند دستاورد مهمی برای صنعت به ارمغان آورد.

## ۲ مطالعه عددی

به منظور شبیه‌سازی المان محدود فرآیند ماشین‌کاری می‌توان از دو روش استفاده نمود. روش اول روشی است که در آن ماده از طریق برخورد مستقیم ابزار با سطح قطعه (درگیری فیزیکی ابزار با قطعه‌کار) به عنوان براده برداشته شده و نهایتاً قطعه نهایی تولید خواهد شد. روش دوم که روش نوینی بوده، روش ماشین‌کاری به روش مرگ المان<sup>۱۱</sup> هست. در این روش جهت برداشت

شواگانگ<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به منظور بهینه نمودن موقعیت قید و بندها در فرزکاری محیطی یک قطعه‌کار جدارنازک، یک مدل المان محدود به همراه یک مدل نیروی برشی دقیق را در تحقیق خود ارائه نمودند [۴]. مدل المان محدود آنها، تغییرات ضخامت قطعه‌کار در فرزکاری محیطی را در نظر گرفته است. آن‌ها نشان دادند که این قید و بندها با توجه به سطح فرارگیری، مستقیماً بر خطاهای سطح در فرزکاری محیطی قطعه نازک تاثیر می‌گذارند، از این رو بررسی آنها بر روی بهینه‌سازی موقعیت قید و بندها در سطح فرارگیری متمرکز گردید. همچنین آن‌ها نشان دادند که در نخستین مرحله، مکان اولیه قید و بندها با فرارگیری قید و بند در محلی با بیشترین تغییر شکل، تعیین می‌شوند. در دومین مرحله، یک الگوریتم ابتکاری مطرح می‌شود تا موقعیت قید و بندها را بهینه نماید.

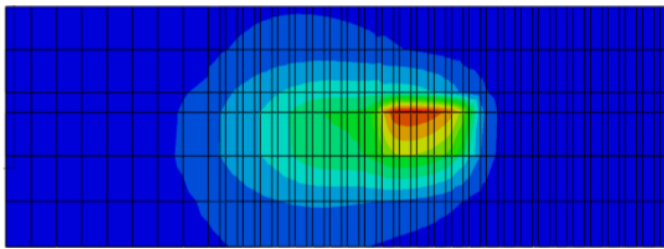
جیتندر<sup>۳</sup> و همکارش در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که ارتعاشات بخش صلب و تغییر فرم الاستیک-پلاستیک ایجاد شده در فرزکاری سرعت بالای قطعات جدارنازک با جنس AL7075 دلیل اصلی تغییر در هندسه و ابعاد آنها هستند [۵]. این مشکلات از طراحی چیدمان قید و بند، ترتیب عملیات، انتخاب چگونگی مسیر ابزار و مقدار برش متغیر ایجاد می‌گردد. آن‌ها یک مرور کلی در روش المان محدود با در نظر گرفتن اثرات قید و بند، توالی عملیات، مسیر ابزار و پارامترهای برش انجام دادند. مزایای مدل مطرح شده انجام محاسبات کارآمد کوتاه ترمومکانیکال هماهنگ با میدان شبیه‌سازی فرزکاری قطعات منشوری پیچیده شامل هر حالتی از ماشین‌کاری مانند پله ها، شیارها، بخش‌های تودرتو و ... است. سگوی<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۸ تحقیقات خود را بر روی فرزکاری قطعات جدار نازک انجام دادند [۶]. مسأله اصلی در تحقیق آن‌ها وجود دینامیک متغیر در قطعه بوده که این امر به دلیل تغییر پارامترها و موقعیت ابزار ایجاد می‌شود. آن‌ها تجزیه و تحلیلی از طریق انجام شبیه‌سازی المان محدود جهت شناسایی محل تغییر فرم انجام دادند. سپس با توجه به تحلیل انجام شده در محل‌هایی که دچار تغییر فرم بودند مهارکننده‌هایی قرار داده و مجدداً تحلیل خود را انجام دادند و نتایج به دست آمده را با کار تجربی خود مورد مقایسه نمودند.

لئونل<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰ ارزیابی ارتعاشات ماشین‌کاری قطعه‌کار جدارنازک آلومینیومی را در شرایط نرخ تولید بالا با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار دادند [۷]. کار آن‌ها با یک تست ماشین‌کاری طراحی شده خاص، با درگیری برش بالا و با در نظر گرفتن دینامیک برش مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها پارامترهای دینامیک سیستم را با استفاده از آنالیز المان محدود در حالت پله به پله به دست آوردند. تحقیق آن‌ها بر روی آنالیز نیروی برش، دامنه و فرکانس ارتعاش و ارزیابی وجود ارتعاش پایه‌گذاری شده بود. آن‌ها ارتعاشات پارامترهای دینامیک را به روش المان محدود محاسبه نموده تا حذف مواد و وضعت لبه برش را به دست آورند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جهت بهبود شبیه‌سازی ماشین‌کاری قطعات جدارنازک می‌بایست مدل نیروی برشی شامل مدل‌سازی برخورد و پدیده شخم ناشی از ارتعاشات توسعه یابد.

شریکرشنا<sup>۶</sup> و همکارش در سال ۲۰۱۶ مقایسه‌ای با در نظر گرفتن سه

<sup>2</sup>Shaogang <sup>3</sup>Jitender <sup>4</sup>Seguy <sup>5</sup>Lionel <sup>6</sup>Shrikrishna <sup>7</sup>Aoyama <sup>8</sup>Smith <sup>9</sup>Wu <sup>10</sup>Abaqus <sup>11</sup>element death

جهت فرآیند ماشین‌کاری به منظور برداشت ماده از روی قطعه (انجام براده برداری) از تکنیک مرگ المان استفاده می‌شود، در واقع با حذف المان‌هایی که فرز از روی آن‌ها عبور داشته، ماده برداشته خواهد شد. جرم، گرمای ویژه و سایر اثرات المان‌های مرده نیز صفر در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین حل مسأله به چند مرحله تقسیم و در هر مرحله گروه جدیدی از المان‌ها حذف می‌گردند. برای مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر جهت بارگذاری از یک منبع حرارت از نوع جریان گرما<sup>۱۳</sup> استفاده شده است. با توجه به منبع حرارت مذکور، شار حرارتی در مرکز پرتوی انرژی بوده و با فاصله گرفتن از آنجا، بصورت نمایی کاهش می‌یابد. شکل ۲ نمایانگر محدوده منبع حرارتی است.



شکل ۲: محدوده منبع حرارت

میزان بارگذاری لازم که به صورت جریان حرارت در نرم افزار وارد شده است از طریق رابطه (۱) به دست آمده است

$$U_w = K_c h_m a_p V H_w \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $K_c$  برابر با فشار برش بر حسب  $N/mm^2$  است [۱۲، ۱۰].  $h_m$  ضخامت براده تغییر شکل نیافته<sup>۱۴</sup> بوده و برحسب mm است.  $a_p$  مقدار بار عمقی برحسب mm،  $V$  سرعت برشی برحسب m/s است و  $H_w$  ضریبی بین ۰/۴ تا ۰/۴۵ [۱۱].

### ۳.۲ شبیه‌سازی

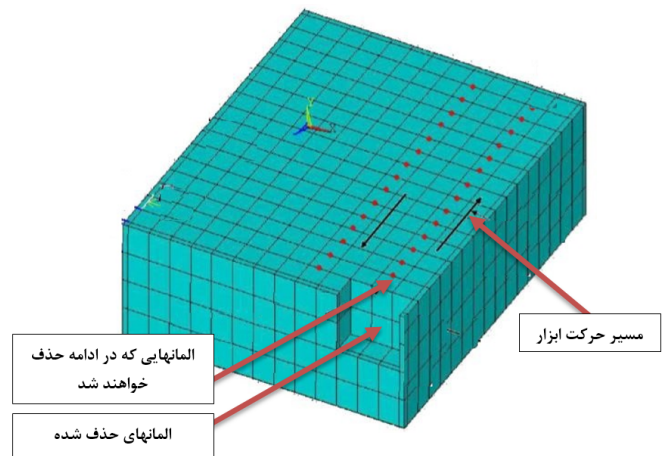
جهت شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. با توجه به حجم باربرداری و تعداد مراحل فوق‌العاده زیاد این قطعه در این فرآیند بایستی از یک نرم‌افزار کمکی برای کدنویسی، وارد کردن اطلاعات و تغییر در برخی دستورها استفاده کرد. در این پژوهش از نرم‌افزار پایتون<sup>۱۵</sup> استفاده شده است.

#### ۱.۳.۲ مراحل شبیه‌سازی اجزاء محدود ماشین‌کاری به روش مرگ المان

شبیه‌سازی ماشین‌کاری به روش مرگ المان جهت قطعه مورد مطالعه در نرم افزار آباکوس شامل مراحل زیر است که در زیر به صورت کلی به آنها اشاره شده است.

- مدل‌سازی قطعه مورد مطالعه مطابق نقشه و اطلاعات موجود
- مشخص نمودن پارامترهای مربوط به جنس قطعه، مطابق نقشه موجود
- وارد کردن قطعه به محیط مونتاز
- تعیین گام‌های حل مطابق شرایط آزمون تجربی

ماده از سطح قطعه، درگیری مستقیم ابزار با قطعه‌کار وجود ندارد. در این فرآیند اثر برش و برداشت ماده از قطعه‌کار به صورت منبع حرارتی ظاهر می‌شود و همچنین برای انجام فرآیند براده‌برداری عمل حذف و یا مرگ المان‌ها استفاده خواهد شد. در واقع در نرم‌افزار المان‌هایی که در مسیر ماشین‌کاری هستند حذف می‌شوند [۱۱]. در این پژوهش جهت انجام شبیه‌سازی از روش دوم (روش مرگ المان) استفاده شده است. شکل ۱ نمایانگر قطعه‌ای است که در آن حذف المان انجام می‌گردد.



شکل ۱: استفاده از روش مرگ المان [۱۱].

### ۱.۲ دلیل انتخاب روش مرگ المان جهت شبیه‌سازی

از آنجایی که قطعه‌ای انتخاب شده دارای مشخصات خاصی از جمله جدارنازک بودن، وجود پره‌هایی در وسط قطعه و نسبت بزرگتر طول به سایر ابعاد (قطعه بلند و جدارنازک هست) شبیه‌سازی آن بسیار دشوار است. علاوه بر این به علت حجم بالای ماشین‌کاری و همچنین لزوم به دست آوردن شکل و میزان تغییر فرم، شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری قطعه مورد نظر را با روش‌های معمول و قدیمی غیر ممکن ساخته است و یا زمان حل را بسیار زیاد می‌کند. لذا می‌بایست از روش دیگری جهت انجام شبیه‌سازی استفاده کرد، از این رو روش مرگ المان جهت انجام شبیه‌سازی این فرآیند انتخاب شده است.

### ۲.۲ تئوری ماشین‌کاری به روش مرگ المان

در مدل‌سازی فرآیند ماشین‌کاری، سه حوزه‌ی حرارت، متالورژی و مکانیک در تقابل با یکدیگر هستند. لذا در شبیه‌سازی این فرآیند بایستی دو دسته معادله‌ی دیفرانسیل حرارتی و مکانیکی به صورت هم‌زمان حل گردند. از این رو در روش اجزای محدود از روش زوج‌شده حرارت و جابجایی<sup>۱۲</sup> برای تحلیل این فرآیند استفاده می‌شود [۱۲].

به منظور مدل کردن مراحل ماشین‌کاری و براده‌برداری از روش مرگ المان‌ها استفاده گردیده است. در اجرای این روش از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری الگو برداری شده است. به گونه این که در شبیه‌سازی جوشکاری ابتدا مرگ المان و سپس تولد المان خواهیم داشت. در استفاده از این تکنیک

<sup>12</sup>coupled temperature displacement <sup>13</sup>heat flux <sup>14</sup>undeformed chip thickness <sup>15</sup>Python

با توجه به اطلاعات آزمون تجربی و همچنین با توجه به روابط زیر، برای هر گام به دست آمده است. رابطه (۲) جهت به دست آوردن زمان گام‌های حل استفاده می‌شود.

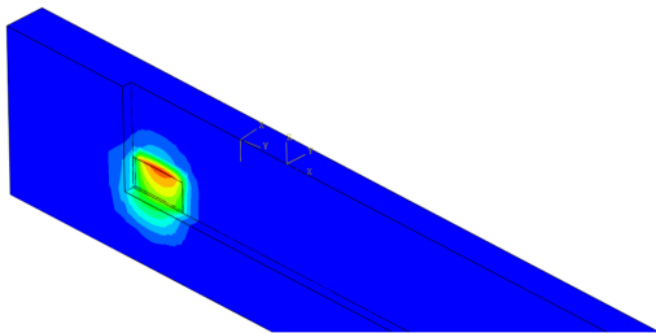
$$V = 2000 \text{ mm/min}$$

$$\Delta t = \frac{12}{2000/60} \quad (2)$$

$$\Delta t = 0.36 \text{ s}$$

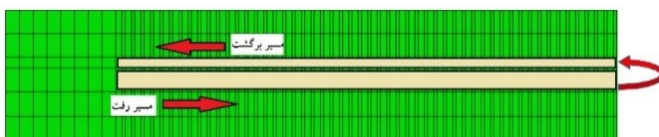
### ۵.۳.۲ تعیین تماس‌های مورد نیاز با المان‌ها جهت ایجاد شرایط مرگ المان

در این مرحله می‌بایست کلیه المان‌هایی که در مسیر باربرداری قرار دارند حذف شوند. لذا با توجه به تعداد گام‌های موجود، در این بخش می‌بایست تماس‌های لازم تعریف گردد. تعریف تماس به گونه‌ای است که در هر گام ۱۶ حل تعداد مشخصی از المان‌ها حذف خواهد شد. شکل ۴ نمونه‌ای از حذف المان را که در گام اول انجام شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمونه‌ای از حذف المان در گام اول

در ادامه کارریا، در کل مسیر ماشین‌کاری تکنیک مرگ المان همچنان ادامه می‌یابد تا کل فرآیند ماشین‌کاری به اتمام برسد. تعداد تماس‌هایی که جهت حل مسأله تعریف شده است مطابق تست تجربی بوده که در زیر به شرح این موضوع پرداخته شده است. با توجه به حجم و میزان باربرداری ابزار در مرحله ۱۴، با حرکت رفت و برگشتی ماشین‌کاری لازم را انجام می‌دهد. در شکل ۵ مسیر رفت و برگشت ابزار نشان داده شده است. طول مسیر رفت برابر با طول مسیر برگشت بوده و اندازه آن ۸۴۸ میلی‌متر است. شکل ۵ مسیر حرکت ابزار را نشان می‌دهد.



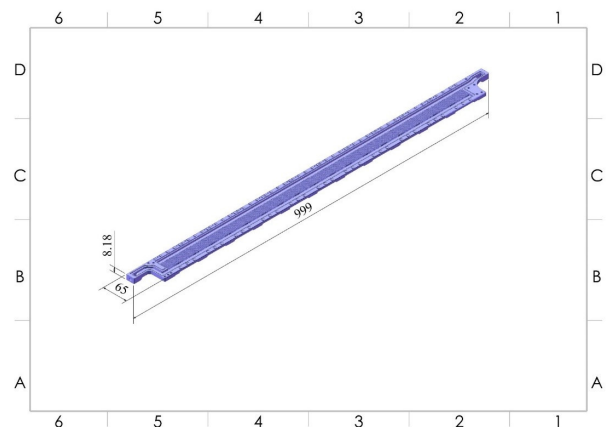
شکل ۵: مسیر رفت و برگشت ابزار

در هر مسیر رفت یا برگشت تعداد ۷۱ المان برداشته می‌شود. ابزار مطابق آنچه که در تست تجربی استفاده شده است، فرز ۴ پر و دارای قطر ۶ میلی‌متر است. از آنجایی که میزان عرض براده‌برداری ۸/۵ میلی‌متر است، لذا ابزار در مسیر رفت ۶ میلی‌متر از عرض قطعه را براده‌برداری می‌کند و پس از اتمام

- مشخص نمودن المان‌هایی از قطعه که می‌بایست ماشین‌کاری شوند.
- تعیین تماس‌های مورد نیاز با المان‌های مورد نظر، جهت ایجاد شرایط مرگ المان
- اعمال بارگذاری مورد نظر با توجه به شرایط آزمون تجربی
- تعیین شرایط گیربندی و سایر شرایط مرزی لازم
- ایجاد شرایط خنک‌کاری برای قطعه در حین
- ماشین‌کاری مطابق آزمون تجربی
- ایجاد مش در قطعه، با لحاظ نمودن سایز مناسب برای آن
- نهایتاً حل مسأله و به دست آوردن نتایج لازم

### ۲.۳.۲ هندسه قطعه‌کار

قطعه‌کار مورد مطالعه، قطعه‌ای از جنس Al5083 بوده که ابعاد آن  $1000 \times 8/1 \times 67$  میلی‌متر است، که در نهایت پس از ماشین‌کاری، ضخامت باقیمانده در کف قطعه  $2/68$  میلی‌متر خواهد شد. قطعه خام اولیه تنش‌گیری شده است و تنش باقی مانده در آن بسیار اندک است. شکل ۳ ابعاد و هندسه قطعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ابعاد و هندسه قطعه کار

### ۳.۳.۲ جنس قطعه مورد مطالعه

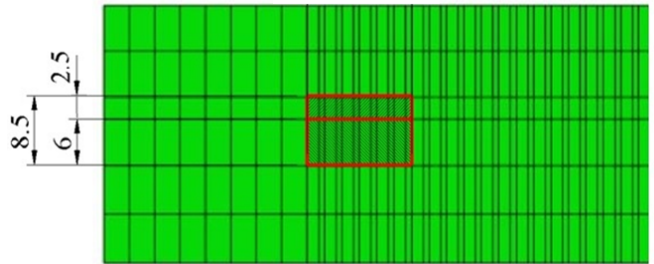
مدل مکانیکی قطعه به صورت الاستیک-پلاستیک کامل (عدم وجود کار سختی در مواد) فرض گردیده است و به همین صورت در نرم‌افزار اعمال شده است. جنس قطعه از Aluminium 5083 بوده و با توجه به متغیر بودن خواص مواد نسبت به درجه حرارت‌های مختلف، ضروری است که مقادیر وابسته به دمای آن‌ها در دماهای مختلف را در نرم‌افزار لحاظ نمود.

### ۴.۳.۲ تعیین گام‌های حل

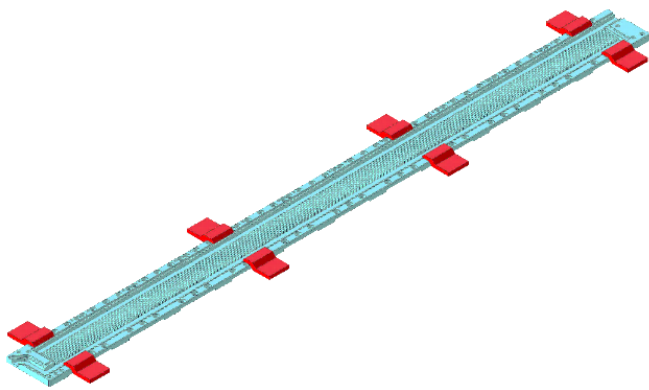
به منظور تعریف گام‌های حل در نرم‌افزار آباکوس، گام مورد استفاده از نوع کوپل حرارت-مکانیکی صریح است. تعداد گام‌های تعریف شده جهت حل این قطعه رابطه مستقیم با تعداد مجموعه المان‌هایی دارد که می‌بایست براده‌برداری شده و یا حذف شوند. که در این مسأله با توجه به شرایط و هندسه قطعه این تعداد گام برابر ۹۹۷ است. مقدار زمان مربوط به هر گام،

<sup>16</sup>step

مسیر رفت، ابزار ۲/۵ میلیمتر حرکت عرضی داشته و در مسیر برگشت مقدار بار باقی مانده (۲/۵ میلیمتر) را نیز حذف خواهد کرد. شکل ۶ نشانگر عرض المان جهت براده برداری هست.



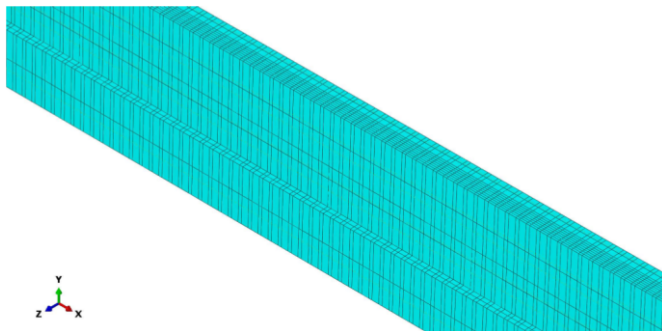
شکل ۶: عرض ماشین کاری



شکل ۸: نحوه گیره بندی

### ۷.۳.۲ مش بندی قطعه کار

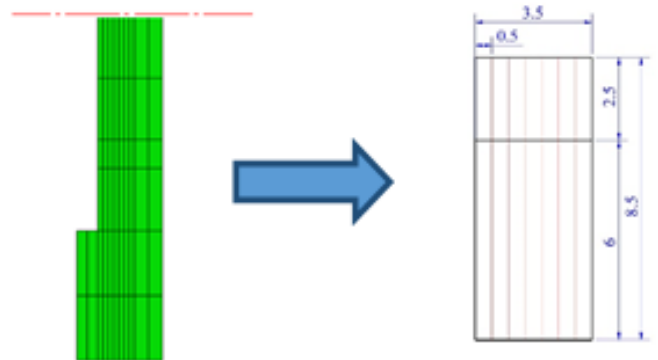
در شبیه سازی های صورت گرفته، از المان خطی شش وجهی سه بعدی و هشت نقطه ای (C3D8T) استفاده گردید. تعداد کل المان های قطعه کار برابر با ۴۲۲۰۶ عدد هست. تعداد المان هایی که در ابتدا ماشین کاری می شوند ( المان های وسط قطعه کار که حذف آن ها باعث جدار نازک شدن کف قطعه خواهد شد) ۹۹۴۰ المان و تعداد المان هایی که جهت ایجاد پره ها باید حذف شوند نیز ۹۹۴۰ هستند. شکل ۹ مش بندی قطعه کار مورد نظر را نشان می دهد.



شکل ۹: مش بندی قطعه

از لحاظ عمقی نیز پس از هر مسیر رفت و برگشت ابزار به میزان ۰/۵ میلیمتر پایین تر رفته و مجدداً مسیر رفت و برگشت را طی می کند. مسیر رفت و برگشت ۷ بار تکرار شده و ماشین کاری قطعه به پایان می رسد. شکل ۷ نمایانگر مقطع عرضی قطعه بوده که تعداد بار عمقی نیز در آن مشخص است.

شکل ۷ نمایانگر عمق ماشین کاری هست.



شکل ۷: میزان عمق ماشین کاری

### ۸.۳.۲ کدنویسی پایتون

زبان برنامه نویسی پایتون، یک زبان برنامه نویسی تفسیری، داینامیک و شی گرا هست، زبان پایتون سه قابلیت اصلی یک زبان سطح بالا یعنی سهولت بیشتر، فهم ساده تر و توسعه سریع تر را پیاده سازی می کند. که می توان از آن در محدوده های وسیع از نرم افزارها و تکنولوژی ها بهره جست. این زبان برنامه نویسی روش های بسیار قدرتمند و حرفه ای برای کار با زبان ها و ابزارهای مختلف را به آسانی هرچه تمام تر فراهم می کند. به این منظور این زبان دارای کتابخانه های بسیار گسترده ای هست.

زبان پایتون بصورت گسترده ای در نرم افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل محدودیت های موجود در محیط گرافیکی آباکوس، روابط اسکریپت نویسی آباکوس این امکان را در محیط ایجاد می کند که بتوان با ایجاد دستور در محیط پایتون بهره بیشتری را از قابلیت های نرم افزار آباکوس به دست آورد. از مهمترین اقداماتی که محیط پایتون قادر به انجام آن است، می توان به ایجاد فرآیندهای تکراری، تغییرات خودکار مدل هندسی،

### ۶.۳.۲ بارگذاری و شرایط مرزی

در فرآیند ماشین کاری با استفاده از مرگ المان، هیچ نیروی مکانیکی وجود نداشته و تمام نیروها، از گرادیان دمایی بوجود می آید؛ بنابراین شار حرارتی وارده، همان نیروی وارده به قطعه خواهد بود. شرایط مرزی قطعه کار از لحاظ گیره بندی مکانیکی نیز به شرح زیر هست: سطح فوقانی قطعه از طریق ۸ عدد روبند مهار شده است. ۴ عدد روبند در یک سمت قطعه و ۴ عدد روبند دیگر در سمت دیگر، قطعه را مهار نموده است. این گیره بندی در نرم افزار آباکوس با مهار کردن هر سه درجه آزادی در محل تماس روبندها با قطعه کار صورت گرفته است. علاوه بر این می بایست درجات آزادی مربوط به میز دستگاه نیز مشخص گردد، لذا در نرم افزار آباکوس جهت تعیین آن و با توجه به وجود روبندهای فوق، کلیه درجات آزادی مربوط به زیر قطعه به صورت کاملاً بسته تعیین می شود.

شکل ۸ نمایانگر چگونگی مهار و محل گیره بندی قطعه هست.

خواص مواد، شرایط مرزی و المان، دسترسی به نتایج تحلیل و بازخورد این نتایج در تحلیل بعدی اشاره کرد.

### ۹.۳.۲ استفاده از پایتون در شبیه‌سازی ماشین‌کاری با آباکوس

در تحلیل‌های ماشین‌کاری تعداد مراحل و حجم باربرداری زیاد، باعث ازدیاد گام‌های لازم برای تعریف مسأله خواهد شد. برای حل این گونه مسایل در نرم‌افزار آباکوس استفاده از روش معمولی و دستی، جهت تعریف گام‌های حل، اعمال بارگذاری بر روی المان‌ها، تعریف مجموعه المان، تعریف تماس‌های موجود و... امکانپذیر نبوده و صحیح نیست. چرا که این امر بسیار زمانبر بوده و احتمال بروز خطا وجود خواهد داشت. از این رو جهت حل این مسائل، کدنویسی پایتون بسیار کاربردی و مفید خواهد بود.

در قطعه‌ی مورد مطالعه نیز نمی‌توان صرفاً از طریق نرم‌افزار آباکوس به هدف رسید. چرا که علاوه بر پیچیدگی مسأله و جدارنازک بودن قطعه، طول قطعه نیز زیاد است. علاوه بر موارد مذکور مسیری که تحت باربرداری قرار دارد، بسیار طولانی است. طولانی بودن مسیر باربرداری باعث خواهد شد، المانهایی که می‌بایست در مسیر ماشین‌کاری حذف شوند نیز زیاد گردند. تعداد المانهایی که در در ابتدا ماشین‌کاری می‌شوند ۹۹۴۰ المان و تعداد المانهایی که جهت ایجاد پره‌ها باید حذف شوند نیز ۹۹۴۰ هستند. به دلیل وجود موارد مذکور جهت انجام شبیه‌سازی این قطعه نیاز به تعریف موارد زیر وجود دارد:

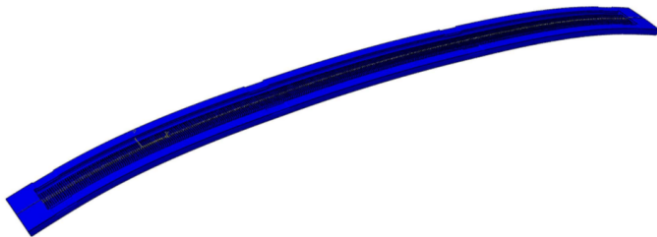
۱. تعریف تعداد ۱۰۰۰ استپ
  ۲. تعریف تعداد ۱۰۰۰ تاریخچه نتایج متناسب با ۱۰۰۰ استپ
  ۳. تعریف تعداد ۱۰۰۰ زمینه نتایج متناسب با ۱۰۰۰ استپ
  ۴. تعریف تعداد ۱۰۰۰ مجموعه المان که با توجه به حرکت رفت و برگشتی ابزار و حرکت عمقی آن خود شامل ۱۴ مرحله تعریف مجموعه المان هست.
  ۵. تعریف تعداد ۱۰۰۰ تماس جهت مرگ المان که با توجه به حرکت رفت و برگشتی ابزار و حرکت عمقی آن خود شامل ۱۴ مرحله تعریف مجموعه المان هست.
  ۶. تعریف نیروی جاذبه جهت تمامی استپ‌ها
  ۷. تعریف تعداد ۱۴۰ سطح جهت خنک‌کاری
  ۸. تعریف ۱۴۰ تماس جهت خنک‌کاری متناسب با سطوح خنک‌کاری
- بنابراین با توجه به مواردی که ذکر گردید تعداد پارامترهایی که می‌بایست در هر مرحله تعریف گردد بسیار زیاد است. اگر جهت تعریف این موارد از روش معمول و دستی استفاده شود، این امر بسیار زمانبر بوده و علاوه بر آن امکان بروز خطا نیز در تعریف پارامترها بالا خواهد رفت. صرف زمان زیاد و احتمالاً ایجاد خطا موجب ناکارآمدی روشهای دستی می‌شود.
- لذا جهت تعریف ماژول‌های مختلف در نرم‌افزار آباکوس نیاز به برنامه نویسی مناسبی جهت ساده نمودن کار با آباکوس هست. از این رو برای رفع این مشکل از برنامه‌نویسی پایتون در آباکوس استفاده شده است. استفاده از این نوع کدنویسی سرعت تعریف موارد مذکور فوق را بسیار سریع و ساده نموده است، که جهت انجام شبیه‌سازی این قطعه نیز T در اکثر مراحل کدنویسی

صورت گرفته است.

کدهای پایتون استفاده شده برای این قطعه در بخش پیوست به طور خلاصه قابل مشاهده است

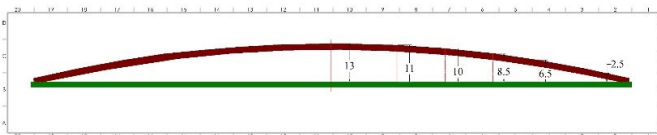
### ۳ نتایج و ارزیابی

پس از اتمام شبیه‌سازی و بررسی نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس، تغییراتی در فرم و هندسه قطعه ایجاد گردید. تغییر فرم ایجاد شده به گونه‌ای بود که قطعه از وسط خیز برداشته و خیز ایجاد شده نیز به سمت بالا (محدب) هست. هندسه تغییر فرم در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰: هندسه تغییر فرم حاصل از شبیه‌سازی

علاوه بر آن میزان حداکثر تغییر فرم قطعه ۱۳ میلی‌متر و در وسط قطعه به وجود آمده است. جهت مقایسه این تغییر فرم قطعه حاصل از شبیه‌سازی بر روی قطعه ایده‌آل قرار گرفته است. شکل ۱۱ میزان حداکثر تغییر فرم و مقایسه آن را با قطعه ایده‌آل نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: مقایسه حداکثر تغییر فرم قطعه حاصل از شبیه‌سازی با قطعه ایده‌آل

همانگونه که مشاهده می‌شود قطعه قرمز رنگ قطعه حاصل از شبیه‌سازی بوده و قطعه سبز رنگ قطعه ایده‌آل (بدون هیچ تغییر فرم) هست. جهت مشاهده بهتر میزان تغییر فرم و مقایسه قطعه تغییر شکل یافته با قطعه ایده‌آل، تغییر فرم با مقیاس ۱ : ۵ لحاظ شده و قطعات بر روی هم قرار گرفته‌اند. (اعداد با مقیاس ۱ : ۱ و هندسه تغییر فرم با مقیاس ۱ : ۵ ذکر شده‌اند.)

توزیع دما در سطح قطعه‌کار بر اثر عبور شار حرارت، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این توزیع دما مربوط به گام هفتم حل هست. در ابتدای مسیر، شارحرارتی کاملاً واضح است اما در ادامه به تدریج ناپدید می‌شود. در گام بعدی نیز همین چرخه مجدداً در راستای مسیر حرکت ابزار تکرار خواهد شد و نهایتاً ماشین‌کاری قطعه به پایان خواهد رسید. در این گام حل میزان حداکثر دما ۱۰۱ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲ نمایانگر توزیع دما در سطح قطعه‌کار بر اثر عبور شار حرارت هست.

و تئوری در قوس وسط قطعه هست. بیشترین مقدار تغییر فرم که در حالت تجربی به وجود آمده است حدود ۱۵ میلیمتر گزارش شده است. و بیشترین تغییر فرم در حالت شبیه سازی ۱۳ میلیمتر به دست آمده است. که این دو مقدار نسبت به هم اختلاف کمی دارند. با توجه به موارد ذکر شده در بالا می توان گفت شبیه سازی انجام شده تطابق نزدیکی با تست تجربی دارد.

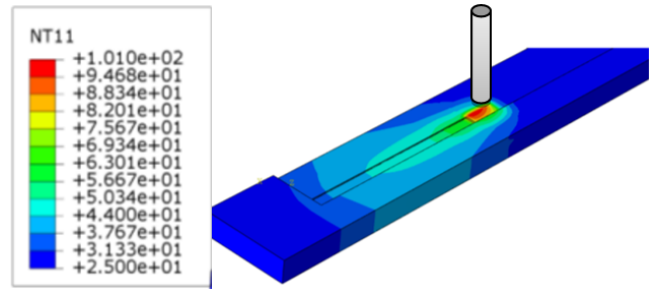
### ۲.۳ پیشنهاد و طرح ایده جهت کاهش اعوجاج

پس از انجام شبیه سازی برای قطعه مذکور با استفاده از روش مرگ المان در نرم افزار آباکوس، میزان تغییر فرم حاصله به دست آمد. پس از آن مقایسه میزان اعوجاج و تغییر فرم حاصل از شبیه سازی با حالت تست تجربی صورت گرفت. از آنجایی که این میزان تغییر شکل (در هر دو حالت تست تجربی و تئوری) در قطعه مذکور بیش از حد مجاز هست، نمی توان از این گونه قطعه تولیدی، جهت کارکرد مشخص شده استفاده کرد و در واقع قطعه حاصله معیوب خواهد بود. لذا قطعه مورد مطالعه نیازمند انجام بررسی ها و ارایه طرحی جهت کاهش میزان تغییر فرم هست.

استفاده از طرح ها و ایده های تجربی نیازمند انجام تست و آزمون های متعدد بوده که همین امر با سعی و خطا همراه خواهد بود. علاوه بر این موضوع، هزینه و زمان زیادی می بایست صرف این کار شود، چرا که زمان ماشین کاری این قطعه بر روی دستگاه حدود ۱۵۰ ساعت به طول می انجامد. بنابراین استفاده از روش تجربی مقرون به صرفه نبوده و کاربردی نیست. از این رو با توجه طرح پیشنهادی، با لحاظ نمودن شرایط جدید، شبیه سازی لازم بر روی قطعه انجام شد. با استفاده از این روش نتیجه حاصله بسیار کم هزینه تر از حالت تجربی حاصل گردید.

طرح و ایده جدید در ابتدا به صورت ظاهری و شماتیک مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. بررسی و مطالعات اولیه انجام شده در مورد طرح مذکور نتیجه ای مناسب و رضایت بخش داشت، لذا جهت بررسی های بیشتر، شبیه سازی جدیدی در راستای روش مطرح شده، انجام گرفت. شبیه سازی مربوطه با کمک نرم افزار آباکوس و با استفاده از روش مرگ المان و همچنین با کمک کدنویسی پایتون مجدداً انجام شد. چگونگی انجام شبیه سازی در ادامه شرح داده شده است.

در این طرح تغییر نحوه گیره بندی و مهار قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه سازی انجام شده کلیات پارامترها و شرایط مربوطه مطابق شبیه سازی انجام شده در حالت اولیه، هست. با این تفاوت که در شبیه سازی جدید شرایط مرزی (گیره بندی قطعه) متفاوت خواهد بود. در حالت قبل گیره بندی قطعه به گونه ای لحاظ شد که ۸ عدد روبند قطعه را از بالا به طور کامل گرفته و پس از اتمام فرآیند ماشین کاری این روبندها باز خواهند شد. علاوه بر این وجود میز دستگاه نیز باعث می شود ۸ روبند فوق کار خود را بهتر انجام داده و قطعه در حین ماشین کاری هیچ حرکتی در هیچ سمت نداشته باشد. این حالت در نرم افزار آباکوس از طریق گرفتن هر ۳ درجه آزادی اصلی انجام گرفته است. حال جهت کاهش اعوجاج و تغییر فرم، در طرح پیشنهادی جدید تغییر شرایط مرزی، مطابق تصویر شماره ۱۴ در شبیه سازی لحاظ خواهد شد. به گونه ای که قطعه بر روی استند با گیره بندی و کیوی می



شکل ۱۲: نحوه توزیع دما در گام هفتم در مسیر رفت

### ۱.۳ صحه گذاری نتایج تحلیل عددی ماشین کاری به روش مرگ المان و مقایسه آن با داده های تست تجربی

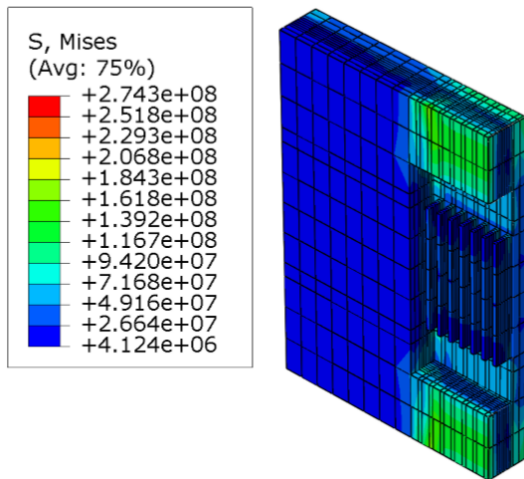
در انجام شبیه سازی ساده سازی هایی انجام شده و علاوه بر آن برخی شرایط به طور دقیق و کامل مشابه شرایط تست تجربی در مدل المان محدود لحاظ نمی گردند. لذا با توجه به موارد مذکور احتمال رسیدن به نتایجی متفاوت از نتایج تجربی وجود خواهد داشت. جهت اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده صحیح بوده و می توان به آن استناد نمود، می بایست نتایج حاصله با نتایج تست تجربی مقایسه و در صورت وجود مغایرت، آن مغایرت ها بررسی شوند. به این منظور اطلاعاتی از تست تجربی در شبیه سازی لحاظ گردیده است که شامل موارد زیر هست. اطلاعات مربوط به سرعت برش، سرعت پیشروی، عده دوران، نوع و قطر تیغه فرز، تعداد و نوع گیره بندی، عمق بار، ضخامت براده و سایر مسایل مهمی که جهت انجام شبیه سازی لازم هست. برخی از این داده ها در محاسبات مربوط به شبیه سازی و برخی دیگر از آن مستقیماً در مراحل شبیه سازی اعمال و رعایت گردیده است.

نوع دیگری از اطلاعات دریافتی از تست تجربی این قطعه اطلاعاتی است که پس از ساخت قطعه به دست آمده است. این اطلاعات شامل نوع و شکل تغییر فرم حاصله از فرآیند تست تجربی و همچنین میزان این تغییر فرم هست. در شکل ۱۳ تصویری از قطعه مورد مطالعه که از طریق تست تجربی ساخته شده است قابل مشاهده است. در ادامه به شرح، بررسی و مقایسه نتایج تست تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی پرداخته شده است. شکل ۱۳ نشانگر قطعه حاصل از تست تجربی هست.



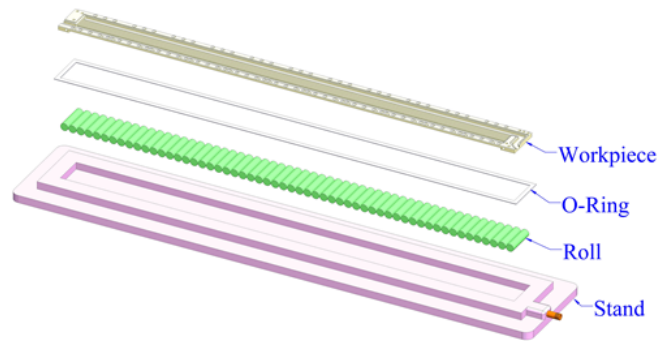
شکل ۱۳: قطعه حاصل از تست تجربی

تغییر فرم حاصل از تست تجربی مشابه تغییر فرم به دست آمده از شبیه سازی هست. به گونه ای که تغییر فرم در هر دو تست تجربی و تئوری به صورت محدب بوده و بیشترین تغییر فرم حاصله در هر دو تست تجربی

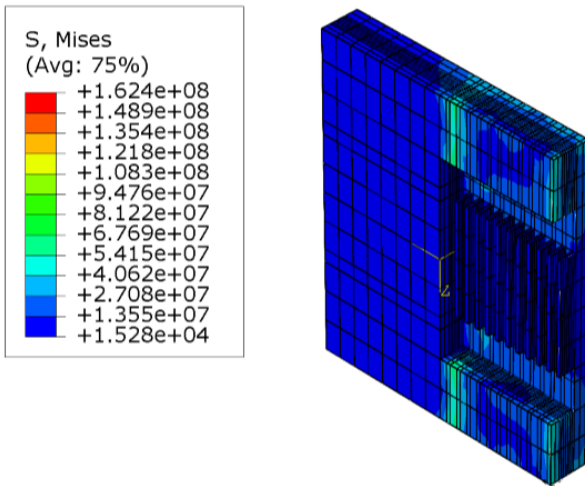


شکل ۱۶: تنش پسماند ایجاد شده در قطعه با توجه به شبیه سازی اول

قرار گرفته و همزمان در زیر قطعه از تعدادی غلتک استفاده خواهد شد. پس از قرار گیری قطعه بر روی غلتکها سیستم وکیوم در گیره بندی فعال و سپس عملیات ماشین کاری انجام خواهد شد. وجود همزمان گیربندی وکیومی به همراه غلتک در زیر قطعه باعث خواهد شد که تنش هایی که باعث ایجاد اعوجاج و تغییر فرم در قطعه می شود، در راستای طول قطعه کار آزاد شده و میزان تغییر فرم کاهش یابد. شکل ۱۴ استفاده همزمان غلتک در زیر قطعه و همچنین استفاده از گیربندی وکیومی جهت ساخت قطعه را نشان می دهد.

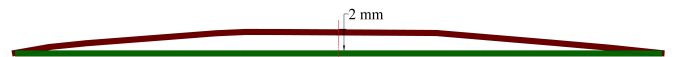


شکل ۱۴: استفاده همزمان از گیره بندی وکیومی و غلتک در زیر قطعه



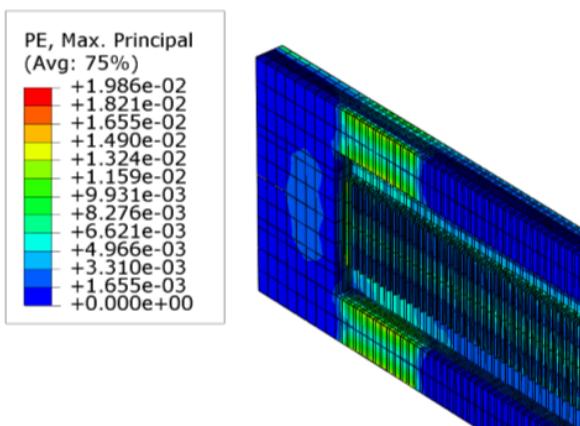
شکل ۱۷: تنش پسماند ایجاد شده در قطعه با توجه به شبیه سازی دوم

پس از اعمال شرایط مرزی جدید مطابق آنچه در بالا ذکر گردید شبیه سازی جدید انجام و نتایج حاصل از شبیه سازی جدید به دست آمد. پس از بررسی نتایج میزان تغییر فرم حاصل از شبیه سازی جدید ۲ میلیمتر به دست آمد که این میزان جابه جایی بسیار کمتر از حال قبل بوده و در نتیجه تغییر فرم قطعه در این وضعیت ناچیز هست. در شکل ۱۵ میزان تغییر فرم قطعه ای که از طریق شبیه سازی جدید به دست آمده است قابل مشاهده است. (قطعه قرمز رنگ قطعه حاصل از شبیه سازی جدید هست.)



شکل ۱۵: مقایسه حداکثر تغییر فرم قطعه حاصل از شبیه سازی جدید با قطعه ایده آل

از بررسی کرنش های به دست آمده از شبیه سازی اول و دوم نیز مشخص می گردد که میزان کرنش در شبیه سازی دوم کمتر از کرنش موجود در شبیه سازی اول هست. مقدار کرنش شبیه سازی اول به عدد  $10^{-2} \times 198$  رسیده و در حالی که این میزان تنش در شبیه سازی دوم  $10^{-2} \times 172$  به دست آمده است. این تفاوت میزان تنش نیز به دلیل تفاوت در گیره بندی هست. شکل ۱۸ و ۱۹ نشانگر میزان کرنش پلاستیک در دو حالت شبیه سازی هست.



شکل ۱۸: کرنش پلاستیک در شبیه سازی اول

### ۳.۳ مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده

مقایسه میزان تغییر فرم شبیه سازی دوم نسبت به حالت قبل نشان می دهد میزان اعوجاج و تغییر فرم به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. به گونه ای که در دومین شبیه سازی انجام شده میزان اعوجاج و تغییر فرم ۸ برابر کمتر از حال اصلی شده است (در حالت اولیه ۱۳ میلیمتر بوده که در شبیه سازی دوم این عدد به ۲ میلیمتر رسیده است) علاوه بر این مورد تنش پسماند ایجاد شده در شبیه سازی دوم کمتر از حالت های قبل هست.

به گونه ای که تنش پسماند در شبیه سازی اصلی به عدد ۲۷۴ MPa رسیده است و در حالی که این میزان تنش در شبیه سازی دوم ۱۶۲ MPa به دست آمده است. این تفاوت میزان تنش پسماند به دلیل تفاوت در گیره بندی هست. شکل ۱۶ و شکل ۱۷ میزان تنش موجود در شبیه سازی اول و تنش حاصله از شبیه سازی دوم را نشان می دهد. شکل ۱۶ و ۱۷ تنش پسماند حاصل از شبیه سازی اول و دوم را نشان می دهد.



## آ کدهای پایتون

۱. کد پایتون مربوط به تعریف گام های حل

```
for i in range(997): mdb.models['Model-1'].
CoupledTempDisplacementStep(deltmx=1000.0,
initialInc=0.18, maxInc=0.18,
maxNumInc=100000, minInc=1e-05,
name='Step-%d'%(997-i), nlgeom=ON ,
previous='Initial', timePeriod=0.36)
```

۲. کد مربوط به بارگذاری جهت مسیر رفت فرزکاری

```
for i in range(71):mdb.models['Model-1'].
BodyHeatFlux(createStepName='Step-%d'%(i+1),
magnitude=7.24E8, name='Load-%d'%(i+1),
region=mdb.models['Model-1'].
rootAssembly.sets['Set-%d'%(i+1)])
```

۳. کد مربوط به بارگذاری جهت مسیر برگشت فرزکاری

```
for i in range(71):mdb.models['Model-1'].
BodyHeatFlux(createStepName=
'Step-%d'%(i+72), magnitude=1.74E9,
name='Load-%d'%(i+72),
region=mdb.models['Model-1'].
rootAssembly.sets['Set-%d'%(i+72)])
```

۴. کد مربوط به تعریف Set

```
for i in range(71):mdb.models['Model-1'].
rootAssembly.Set(elements=mdb.
models['Model-1'].rootAssembly.
instances['Part-1-1'].elements[(i*10+5656):
(i*10+5666)], name='Set-%d'%(i+1))
```

۵. کد پایتون مربوط به مرگ المان

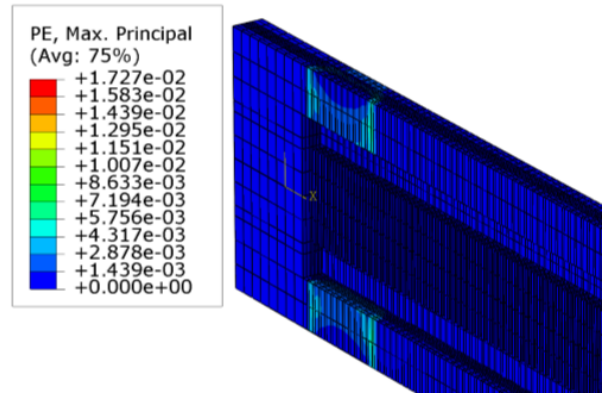
```
for i in range(994):mdb.models['Model-1'].
ModelChange(activeInStep=
False, createStepName='Step-%d'%(i+2),
includeStrain=False, name='Int-%d'%(i+1),
region=mdb.models['Model-1'].
rootAssembly.sets['Set-%d'%(i+1)],
regionType=ELEMENTS)
```

۶. کد پایتون مربوط به تعریف History Output Request

```
for i in range(997):mdb.models['Model-1'].
HistoryOutputRequest(createStepName=
'Step-%d'%(i+1), frequency=2, name=
'H-Output-%d'%(i+1), variables=
('ALLAE', 'ALLCD', 'ALLDMD', 'ALLEE', 'ALLFD',
'ALLIE', 'ALLJD', 'ALLKE', 'ALLKL', 'ALLPD',
'ALLQB', 'ALLSE', 'ALLSD', 'ALLVD', 'ALLWK',
'ETOTAL', 'FTEMP', 'HFLA', 'HTL', 'HTLA',
'RADFL', 'RADFLA', 'RADTL', 'RADTLA',
'VFTOT', 'SJD', 'SJDA', 'SJDT', 'SJDTA',
'WEIGHT'))
```

۷. کد پایتون مربوط به تعریف Field Output Request

```
for i in range(997):mdb.models['Model-1'].
FieldOutputRequest(createStepName='Step-
%d'%(i+1), frequency=2, name=
'F-Output-%d'%(i+1), variables=PRESELECT)
```



شکل ۱۹: کرنش پلاستیک در شبیه سازی دوم

## ۴ نتیجه گیری

روش مرگ المان تکنیک مناسبی جهت شبیه سازی ماشین کاری قطعه مورد مطالعه هست. به گونه ای که با اعمال صحیح شرایط تست تجربی در شبیه سازی، میزان تغییر فرم حاصل از شبیه سازی ۱۳ میلیمتر به دست آمد که این مقدار در حالت تجربی ۱۵ میلیمتر هست. بنابراین استفاده از روش مرگ المان برای قطعه مورد مطالعه مناسب بوده و تطابق نزدیک نتایج شبیه سازی با نتایج تست های تجربی را در بر خواهد داشت.

در ماشین کاری قطعه جدار نازک مورد مطالعه نوع گیربندی، با توجه به شرایط قطعه بسیار حایز اهمیت بوده و می بایست مورد توجه قرار گیرد. به گونه ای در قطعه مورد مطالعه با تغییر نوع گیربندی (از گیربندی ثابت به گیربندی وکیومی همراه با استفاده از غلتک) میزان تغییر فرم برابر کوچکتر از شبیه سازی اولیه شده و به عدد ۲ میلیمتر رسیده است. علاوه بر آن میزان تنش و کرنش را نیز کاهش داده به گونه ای که در این قطعه میزان تنش از ۲۷۴ MPa به ۱۶۲ MPa رسید. و کرنش نیز از  $10^{-2} \times 198$  به  $10^{-2} \times 172$  تقلیل یافت.

علاوه بر میزان تغییر فرم به دست آمده از طریق شبیه سازی، هندسه تغییر فرم در شبیه سازی قطعه مورد مطالعه، همانند تغییر فرم قطعه حاصل از تست تجربی هست. که این فاکتور مناسبی جهت اعتبارسنجی کار انجام شده با تست تجربی هست. که از آن نیز می توان به عنوان بخشی از صحت سنجی شبیه سازی استفاده کرد.

در تحلیل های ماشین کاری به دلیل وجود تعداد مراحل و حجم باربرداری زیاد، تعداد گام های لازم جهت حل مسأله زیاد خواهد شد. با زیاد شدن گام های حل سایر مراحل تعریف مسأله نیز متناسب با آن افزایش خواهد یافت. در حل این مسایل در نرم افزار آباکوس جهت تعریف اکثر مراحل مسأله از جمله تعریف گام های حل، اعمال بارگذاری بر روی المان ها، تعریف مجموعه المان، تعریف تماس های موجود و... استفاده از روش معمولی و دستی صحیح نیست. چرا که تعریف دستی این موارد علاوه بر اینکه به شدت زمان بر بوده، امکان رخ دادن خطا نیز وجود دارد. لذا در این گونه مسائل استفاده از کدنویسی پایتون به همراه نرم افزار آباکوس بسیار کارآمد بوده و علاوه بر تسریع و سادگی کار شبیه سازی موجب کاهش خطا در تعریف مراحل مختلف در آباکوس خواهد شد.

## مراجع

- [1] Tsai, Jer-Shyong and Liao, Chung-Li. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces. *Journal of Materials Processing Technology*, 94(2-3):235-246, 1999.
- [2] Smith, Scott, Wilhelm, Robert, Dutterer, Brian, Cherukuri, Harish, and Goel, Gaurav. Sacrificial structure preforms for thin part machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(1):379-382, 2012.
- [3] Ning, He, Zhigang, Wang, Chengyu, Jiang, and Bing, Zhang. Finite element method analysis and control stratagem for machining deformation of thin-walled components. *Journal of materials processing technology*, 139(1-3):332-336, 2003.
- [4] Liu, Shaogang, Zheng, L, Zhang, ZH, and Wen, DH. Optimal fixture design in peripheral milling of thin-walled workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8):653, 2006.
- [5] Rai, Jitender K and Xirouchakis, Paul. Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6):629-643, 2008.
- [6] Seguy, Sébastien, Campa, Francisco Javier, De Lacalle, Luis Norberto López, Arnaud, Lionel, Dessein, Gilles, and Aramendi, Gorka. Toolpath dependent stability lobes for the milling of thin-walled parts. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 4:pp-377, 2008.
- [7] Arnaud, Lionel, Gonzalo, Oscar, Seguy, Sébastien, Jau-regi, Haritz, and Peigné, Grégoire. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5-8):479-488, 2011.
- [8] Joshi, Shrikrishna Nandkishor and Bolar, Gururaj. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98(3):343-352, 2017.
- [9] Aoyama, T and Kakinuma, Y. Development of fixture devices for thin and compliant workpieces. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(1):325-328, 2005.
- [10] Wu, Qiong, Li, Da-Peng, and Zhang, Yi-Du. Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy aeronautical monolithic components using the quasi-symmetric machining method. *Metals*, 6(4):80, 2016.
- [11] Mashayekhi, M and Hedayati, H. Effect of welding sequence and hydrotest process on welding residual stresses in stainless steel sus304 pipes. 2011.
- [12] Öktem, H, Erzurumlu, Tuncay, and Kurtaran, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of materials processing technology*, 170(1-2):11-16, 2005.