J. Energy Conversion
Volume: 11, Issue 4, 2025, 33-49

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص: ۴۹-۳۳

تأثیر جنس و موقعیت مکانی اسپیندل بر رفتار ارتعاشاتی دستگاه فرز دروازه‌ای

حجت الله محسنی تکلو[۱]، مصطفی امیدی بیدگلی[۲*]، سیدمحمد حسینی[۳]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مکاترونیک، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران، mohsenihojat48@gmail.com
*۲-استادیار، گروه مکانیک، واحد بادرود، دانشگاه آزاد اسلامی، بادرود، ایران، mostafaomidibidgoli@gmail.com
۳-استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، ایران mohammad.hosseini@hormozgan.ac.ir
دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱، پذیرش:۱۴۰۳/۱۱/۲۳

چکیده

در این مقاله فرکانس طبیعی سیستم برحسب محل قرارگیری ارتفاع و مکان جانبی اسپیندل محاسبه شده و با تغییر در ساختار سازه بهترین فرم برای کاهش ارتعاشات ناخواسته معرفی شد. فرکانس طبیعی در محدوده ۲۸-۴۸ هرتز قرار دارد که به مراتب کم‌تر از فرکانس موتور یا همان اسپیندل است، با اطمینان می‌توان بیان کرد که پدیده تشدید یا رزونانس رخ نخواهد داد. براساس شکل مودهای استخراج شده متناظر با شش فرکانس طبیعی اول سیستم, هر دو جنس آلومینیوم و فولاد برای سازه دستگاه بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر موقعیت اسپیندل در راستای ارتفاع، تغییرات چشم‌گیری برفرکانس طبیعی سازه و شکل مودهای متناظر با آن‌ها ندارد. در تغییر مکان جانبی اسپیندل در مود ششم مشاهده شد که فرکانس طبیعی متناظر با آن زمانی‌که اسپیندل در دو طرف سازه قرار داشته باشد، ۲۵درصد بیش‌تر از زمانی است که اسپیندل در وسط میز کار قرار دارد. هم‌چنین از این تحلیل مشخص گردید که بازه فرکانسی یاد شده در قسمت قبلی (۴۸-۲۸ هرتز) به ۲۸-۶۳ هرتز تغییر کرده است.

***عهده‌دار مکاتبات:** mostafaomidibidgoli@gmail.com

کلمات کلیدی: دستگاه سی‌ان‌سی، ارتعاشات، فرکانس طبیعی، مود فرکانسی

نحوه استناد به این مقاله حجت الله محسنی تکلو، مصطفی امیدی بیدگلی، سیدمحمد حسینی. تأثیر جنس و موقعیت مکانی اسپیندل بر رفتار ارتعاشاتی دستگاه فرز دروازه‌ای. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی**. ۱۴۰۳; ۱۱ (۴) : ۴۹-۳۳.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

۱- مقدمه

در قطعات ماشین‌کاری، پارامتر زبری سطح یا همان ناهمواری سطح به‌عنوان یک پارامتر کارآمد برای سنجش کیفیت ماشین‌کاری موردتوجه قرار می‌گیرد؛ بنابراین باید سعی شود تا شرایط ماشین‌کاری و پارامترهای تراش و به‌طورکلی نوع دستگاه تراش و .... را به‌گونه‌ای به‌کار برد تا حداقل ارتعاش در سیستم در حین تراش به‌وجود آید و نتیجه آن زبری سطح بهتر و کیفیت بالاتر محصول خواهد بود. البته، با وجود تلاش‌های بسیار زیاد محققان در این حوزه، گاهی پدیده‌های ناخواسته ارتعاشی مانند چتر[1] (ارتعاشات ناخواسته) در سیستم اتفاق می‌افتدکه باید آن‌ها را شناسایی نمود و راه‌حل مناسبی برای رفع و یا کاهش آن‌ها ارائه داد. به‌طورکلی، شناخت رفتار ارتعاشی چنین سیستم‌های بسیار مهم است.

در گذشته برای تولید قطعات از دستگاه‌های مختلف مانند تراش، فرز، سوراخ‌کاری و غیره به‌صورت دستی استفاده می‌شد. درنتیجه پارامترهای ماشین‌کاری به‌طور مستقیم با حالات جسمی و روحی اپراتور و نیز خطاهای انسانی در ارتباط بوده و از طرف دیگر کیفیت سطح نهایی محصول به شرایط ماشین‌کاری بستگی داشت. محققان سعی کردند تا با استفاده از قدرت برنامه‌نویسی و نیز کنترل عددی، برخی از این شرایط را به‌طور اتوماتیک انجام دهند. بنابراین ماشین‌آلات با عملکرد اتوماتیک وارد بازار و صنعت شدند. پس‌ازآن، محققان به این مهم پی‌بردند که بهتر است برای افزایش سطح کیفیت محصول نهایی که نیاز به استفاده از چندین نوع ماشین است، قطعه‌کار از روی دستگاه باز نشود؛ بنابراین پیشنهاد کردند که یک قطعه‌گیر همگانی برای ماشین‌های دیگر ارائه شود. ولی به طبع جابه‌جا کردن دستگاه و یا استفاده از دستگاه‌های پورتابل و یا باز و بسته کردن قطعه‌گیر نیز مشکلات قبلی را به همراه داشت؛ بنابراین آن‌ها دستگاه کنترل عددی کامپیوتری سی‌ان‌سی[2] را ابداع کردند که در آن‌ها، قطعه‌کار از ماشینی به ماشین دیگر جابه‌جا نمی‌شود و از طرف دیگر، ابزارهای مختلف در این ماشین‌ها به‌گونه‌ای تعبیه شده است که بنابر درخواست و کاربرد آن‌ها، به‌صورت اتوماتیک و با دقت بالا جابه‌جا می‌شود و این‌کار باعث افزایش سطح کیفیت محصول نهایی شد.

بااین‌وجود، یکی از معمول‌ترین مشکلاتی که در حین عملیات ماشین‌کاری اتفاق می‌افتد پدیده چتر یا ارتعاشات ناخواسته در سیستم است که تأثیرات بدی روی کیفیت سطح، دقت ابعادی، عمر ابزار و عمر دستگاه می‌گذارد. ازآن‌جایی‌که دقت ماشین‌های سی‌ان‌سی در حد میکرون است، این ارتعاشات ناخواسته بیش از دیگر ماشین‌ها اثرات خود را نشان می‌دهد. پارامترهای مختلفی می‌توانند منجر به ایجاد ارتعاشات ناخواسته در سیستم شوند ازجمله، ابزار، سازه، دستگاه و غیره.

در طراحی اولیه، تمامی این مسائل مورد بررسی قرار می‌گیرد و بنابراین در دستگاه‌های سی‌ان‌سی بزرگ که توسط شرکت‌های شناخته‌شده تولید می‌شوند، این پدیده ایجاد نمی‌شود. البته ممکن است در گذر زمان و فرسایش برخی از قسمت‌ها، این پدیده اثرات خود را نشان دهد. ولی مهم‌ترین نکته‌ای که قابل‌تأمل است، ایجاد ارتعاشات ناخواسته در دستگاه‌های سی ا ن‌سی رومیزی است. چراکه محصول کوچک بوده است و برخی از طراحان برای ساخت ارزان‌قیمت آن، دقت زیادی در امر طراحی اولیه آن، در نظرگرفتن تمامی پارامترهای مؤثر، معیارهای شکست و ارتعاشات را به‌کار نمی‌برند. گاهی اوقات نیز، باوجود تمامی محاسبات موردنظر و دقت عمل تیم مهندسی و طراحی این‌گونه ماشین‌آلات، اتفاقاتی در تراش یک قطعه رخ می‌دهد که به حالت ناپایداری رسیده و به‌طور پیش‌بینی نشده با پدیده چتر روبه‌رو می‌شویم.

یکی از این حالات که هدف اصلی این پژوهش نیز می‌باشد، ارتعاشات سازه‌ای است. بدین معنی که در اثر تغییر در سازه، این ارتعاش در سیستم اتفاق می‌افتد و هیچ رابطه‌ای بین آن و ابزار گیرنده و دیگر اجزای سیستم وجود ندارد. برای مثال در ماشین‌های رومیزی، اسپیندل[3] در قسمت بالایی دستگاه قرار دارد که بسته به نوع دستگاه از طریق راهنماهای افقی و عمودی قابلیت حرکت دارد. حال اگر ماده اولیه دارای قطعات بزرگ (ضخامت) باشد، آنگاه به‌ناچار باید ارتفاع اسپیندل را بالا برد تا بتواند بر روی قطعه‌کار سوار شود و ماشین‌کاری را انجام دهد. این تغییرات ارتفاع منجر به تغییرات در ارتعاشات سیستم می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر فرکانس طبیعی سیستم با این تغییر ارتفاع تغییر می‌کند. این بدین معناست که با فرکانس طبیعی مربوط به سازه دستگاه سی‌ان‌سی رومیزی وابسته به ارتفاع قرارگیری اسپیندل دارد.

[1] Chatter
[2] Computer numerical control (CNC)
[3] spindle

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

علاوه‌براین، در برخی موارد، این تغییر ارتفاع منجر به ناپایداری در سیستم و گاهی ایجاد ارتعاشات ناخواسته در سازه و به‌عبارت‌دیگر در سیستم و به‌طور دقیق‌تر در اسپیندل می‌کند. ازآن‌جایی‌که اسپیندل دربرگیرنده سه‌نظام و یا ابزارگیر است، این ارتعاشات منجر به لرزش ابزار شده و منجر به ناهمواری بیش‌ازحد انتظار در سطح قطعه نهایی و کاستن کیفیت محصول نهایی می‌شود. با توجه به موارد مطرح‌شده در بالا، بررسی اصولی این موضوع در ماشین‌های سی‌ان‌سی رومیزی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین در این پژوهش، سعی می‌گردد تا یک دستگاه رومیزی سی‌ان‌سی موجود در بازار به‌عنوان هدف در نظر گرفته شود. سپس به مدل‌سازی سه‌بعدی آن پرداخته و آنالیز مودال توسط شبیه‌سازی المان محدود انجام شود.

رائو و همکاران [۲-۱] به بررسی اثر پارامترهای ماشین‌کاری فولاد ضدزنگ ۳۰۴ توسط دستگاه سی‌ان‌سی و ابزار کاربیدی روکش شده با نانوآلیاژ پرداختند. سانتاکومار و همکاران [۳] به بررسی اثر ضخامت روکش به‌کار رفته در ابزار را بر روی کارآیی فرزکاری در عملیات ایجاد یک پاکت در قطعه‌کار از جنس آلیاژ تیتانیوم گرید ۵ پرداختند.

گو و همکاران [۴] به بررسی روش‌های جبران خطای افست در ماشین‌ابزار سی‌ان‌سی با هدف افزایش دقت ابعادی در عملیات ماشین‌کاری پرداختند. در این پژوهش روش‌های مختلف جبران خطای مرتبط با خطاهای جدول، فیکسچر، قطعات و ... در حین ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهشی دیگر و به‌منظور افزایش دقت ابعادی، باربوسا و همکارانش [۵] به طراحی و ساخت یک دستگاه سی‌ان‌سی جدید پرداختند. در این دستگاه، عامل اپراتور و یا به‌عبارت‌دیگر خطای انسانی حذف شده است و از یک ربات ۶ محوره استفاده می‌کند. همچنین بورال و چاکرابورتی [۶] در سال ۲۰۲۱ به تجزیه و تحلیل خرابی‌های ماشین سی‌ان‌سی به‌دلیل خطاهای انسانی پرداختند.

بریلینگر و همکارانش [۷] به پیش‌بینی انرژی مصرفی موردنیاز برای دستگاه سی‌ان‌سی با استفاده از روش‌های نوین هم‌چون یادگیری ماشین پرداختند. در پژوهشی دیگر ژیائو و همکارانش [۸]، رویکرد جدیدی برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین‌کاری در دستگاه سی‌ان‌سی با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های تولید ارائه شده است. آن‌ها به بهینه‌سازی چند هدفه با متغیرهای ورودی شامل سرعت فرزکاری، میزان پیش‌روی در هر دندانه و سرعت اسپیندل پرداختند. کاشی‌زاده و استاد احمد قرابی [۹] به مطالعه پدیده چتر در ماشین‌ابزار و روش‌های کنترل آن پرداختند. در سال ۲۰۲۲، ژانگ و همکارانش [۱۰] سعی کردند تا پارامترهای فرزکاری با راندمان بالا را در عملیات خشن‌تراشی با هدف نظارت و کاهش پدیده سایش در ابزار انجام دهند. هم‌چنین لئو و همکارانش [۱۱] به ارائه روشی جهت تشخیص پدیده چتر در عملیات سنگ‌زنی پرسرعت میل بادامک بر اساس روش بهینه‌سازی پارامتریک پرداختند. مولر و همکارانش [۱۲] به بررسی ماشین‌کاری قطعات بزرگ از جنس پلیمر تقویت‌شده با جنس الیاف کربن توسط یک سیستم رباتیک متحرک مبتنی بر دستگاه سی‌ان‌سی قابل‌حمل در صنعت هوافضا پرداختند.

روگوو و قربانی [۱۳] به بهینه‌سازی زبری سطح و ارتعاشات در ماشین‌کاری آلومینیوم سری ۲۰۰۰ با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش تاگوچی پرداختند. هم‌چنین، قربانی و همکارانش [۱۴] یک مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی به‌منظور به‌دست‌آوردن رابطه بین عمر سرویس‌دهی ابزار تراش و پروسه تراشکاری انجام دادند. علاوه‌براین، در پژوهشی دیگر قربانی و همکارانش [۱۵] به بررسی اثر استفاده از مواد کامپوزیتی به‌عنوان جایگزین برای نگهدارنده ابزار بر روی ارتعاشات در حین ماشین‌کاری پرداختند. طبق مطالب بیان‌شد، اکثر پژوهش‌های انجام شده مرتبط با دستگاه‌هایسی‌ان‌سی صنعتی و در مقیاس بزرگ بوده‌اند و تعداد کمی مقاله در مورد دستگاه‌های مینی سی‌ان‌سی به چاپ رسیده است. به‌طورمثال، در تحقیقی لپسومسوپ و همکارانش [۱۶] به بررسی تجربی و طراحی سنسور نیروی سه محوره در دستگاه مینی سی‌ان‌سی پرداختند. لیو و همکاران [۱۷] به تحقیق در مورد ارتعاشات ناشی از دستگاه بر صفحات نازک مثل تیغه‌ها و غیره پرداختند.

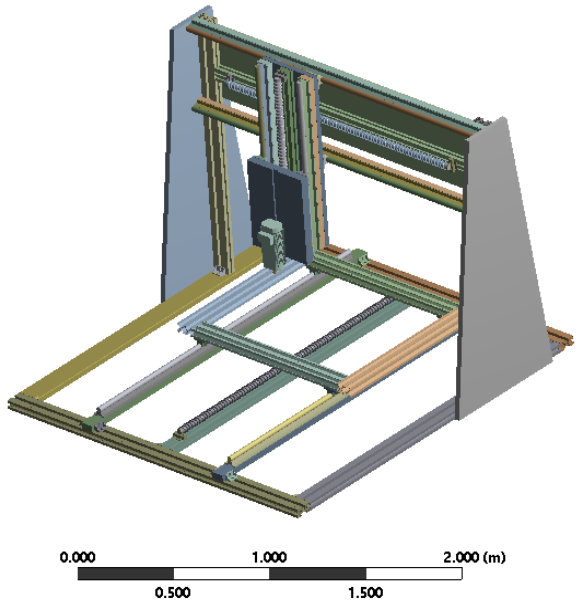
ژیائو و همکارانش [۱۸] در مورد سی‌ان‌سی‌های با وزن سبک استفاده از میراگرها را مناسب دانستند و ابزارهای رایج را براساس آنالیز المان محدود تحلیل نموده‌اند. النقار و همکارانش [۱۹] به بررسی و مانیتور کردن دستگاه براساس روش IOT پرداخته‌اند. کومار و همکارانش [۲۰] تحقیق خود را به سمت مواد نو و جدید تغییر داده و اثر استفاده از مواد کامپوزیتی را بررسی نمودند. دمیر و همکاران [۲۱] جهت بررسی و تحلیل کیفیت سطح به سمت رویکرد شبکه عصبی و هوش مصنوعی رفتند. موو و همکاران [۲۲] به بررسی و تحلیل اثر چتر در تحقیق خود پرداخته‌اند و تمرکز خود را بر بخش اسپیندل گذاشته‌اند. کیم و همکاران [۲۳] به‌طور ویژه به بررسی سازه در قسمت نگهداره اسپیندل پرداخته است. رواناشادیس و همکاران [۲۴] به استخراج پارامترهای مودال دستگاه سی‌ان‌سی پرداخته و هر دو روش المان محدود و تجربی را انجام دادند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

۲- مدل‌سازی هندسی دستگاه تراش سی‌ان‌سی رومیزی

تمامی قسمت‌های یک دستگاه ماشین تراش سی‌ان‌سی رومیزی با ابعاد واقعی و جزئیات کامل در نرم‌افزار سالیدورک به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. بیش‌ترین توجه بر روی ساختار و ساختمان این دستگاه شامل بستر، میزکار، میله‌های راهنما و مکان نصب اسپیندل و غیره می‌باشد. محور Y در راستای ارتفاع دستگاه و هم‌راستا با جهت حرکت اسپیندل به‌منظور تراش قطعات با ضخامت‌های متفاوت است. هم‌چنین محور Z در راستای حرکت جانبی اسپیندل بوده و محور X در راستای حرکت قطعه‌کار و یا میز به سمت جلو و عقب می‌باشد. نمایی از هندسه مدل مونتاژ شده در شکل (۱) نشان داده شده است. پس‌از این مرحله، فایل مدل مونتاژ شده با پسوند STP ذخیره و در نرم‌افزار انسیس ورکبنچ[1] بازخوانی شده است.



شکل ۱- نمایی از هندسه مونتاژ شده دستگاه تراش سی‌ان‌سی رومیزی مورد بررسی در این تحقیق

۳- تعریف خواص ماده در نرم‌افزار المان محدود

به‌طور معمول برای ساخت سازه دستگاه‌های سی‌ان‌سی رومیزی از جنس فولادکربنی CK45 و در برخی موارد که سبک‌سازی مدنظر باشد و پرتابل بودن دستگاه نیز از اهداف طراحان باشد، از آلیاژهای آلومینیومی استفاده می‌شود. ازاین‌رو، با توجه به دستگاه مورد بررسی که در دسترس می‌باشد و به‌کارگیری متخصصان در این حوزه، دو جنس آلومینیوم که در انتقال حرارت نیز به سیستم کمک کند و فولاد که از نظر استهلاک ارتعاشات مناسب‌تر از آلومینیوم است برای مرحله اول این تحقیق در نظر گرفته شد. بنابراین آلیاژ آلومینیوم و فولاد با مشخصات مکانیکی به ترتیب مطابق با جدول (۱) و جدول (۲) در نرم‌افزار برای تمامی قسمت‌های مدل تعریف شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی	Kg/m^3	۲۷۷۰
استحکام تسلیم کششی	Pa	۲/۸×۱۰^۸
استحکام تسلیم فشاری	Pa	۲/۸×۱۰^۸
استحکام نهایی کششی	Pa	۳/۱×۱۰^۸
مدول الاستیک	GPa	۷۱
ضریب پواسون	.....	۰/۳۳

[1] ANSYSWORKBENCH

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

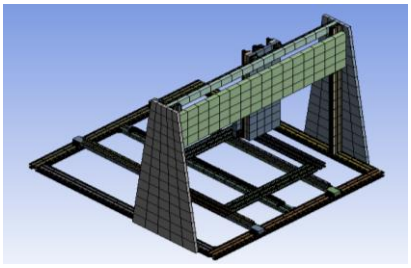
جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد

پارامتر	واحد	مقدار
چگالی	Kg/m^3	۷۸۵۰
استحکام تسلیم کششی	Pa	۳/۵۵×۱۰^۸
استحکام تسلیم فشاری	Pa	۳/۵۵×۱۰^۸
استحکام نهایی کششی	Pa	۵/۷×۱۰^۸
مدول الاستیک	GPa	۲۰۰
ضریب پواسون	.....	۰/۳۳

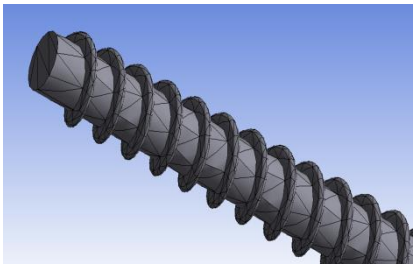
۴- شبکه‌بندی مدل

برای شبکه‌بندی قسمت‌های مختلف از روش شبکه‌بندی اتوماتیک در نرم‌افزار المان محدود انسیس استفاده شده است. در ادامه دو نوع تحلیل انجام می‌شود. یکی تحلیل ارتعاشات آزاد و بدون هیچ‌گونه اعمال قید بر روی مدل و بررسی فرکانس‌های طبیعی سیستم بدین ترتیب که سه فرکانس اول باید صفر باشد؛ به‌عبارت دیگر سازه مورد نظر به‌راحتی بتواند در راستاهای مختلف حرکت انتقالی را داشته باشد. هم‌چنین مطالعه شکل مودهای به‌دست‌آمده که متناظر با سه فرکانس طبیعی اول، جدایش بین مولفه‌های مختلف یا قسمت‌های متفاوت در مدل مونتاژ به‌وجود نیاید که نشان از تعریف صحیح مدل و اتصالات است. در غیر این‌صورت نیاز است تا مراحل مونتاژ با دقت بیش‌تری انجام گردد. در تحلیل دوم که مرسوم به آنالیز حساسیت پاسخ به مش می‌باشد لازم است تا همگرایی مش مورد بررسی قرار گیرد؛ به‌عبارت‌دیگر، تعداد المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی مدل که به اندازه المان‌ها بستگی دارد نباید تأثیر چشم‌گیری بر روی پاسخ داشته باشد تا از شبکه‌بندی مدل نیز اطمینان حاصل شود. به‌طورکلی بهتر است تا شبکه‌بندی به‌صورت ۴وجهی باشد و تا حد امکان از شبکه‌بندی مثلثی جلوگیری شود. هم‌چنین هرقدر کیفیت همگن بودن شبکه مش بندی بیش‌تر باشد، پاسخ با قابلیت اطمینان بالاتر حاصل خواهد شد. نمایی کلی از مدل شبکه‌بندی شده که شامل ۱۰۷۷۸۲ المان است را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد. با توجه به شکل، سعی شده است تا شبکه‌بندی چهارضلعی برای همه قسمت‌ها استفاده شود مگر آنکه ناحیه مورد نظر دارای پیچیدگی هندسی باشد که نتوان از این نوع مش استفاده کرد. برای مثال پیچ‌های راهنما که دارای رزوه با طول گام مشخص برای حرکت می‌باشند را نمی‌توان بدین‌صورت شبکه‌بندی نمود و به‌ناچار از المان‌های سه‌ضلعی استفاده شده است.

پارامتر کیفیت شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار برای هر دو المان به‌کار گرفته‌شده شامل Tet10 و Hex20 محاسبه شده و مطابق با شکل (۳) استخراج شده است. بدین‌ترتیب که میانگین کیفیت شبکه‌بندی برابر با ۰/۵۶ گزارش شده است. این مقدار همواره بین دو عدد یک و صفر است. عدد یک بهترین حالت ممکن شبکه‌بندی است و عدد صفر یعنی مش‌بندی غیرقابل‌قبول است.



شبکه‌بندی چهارضلعی



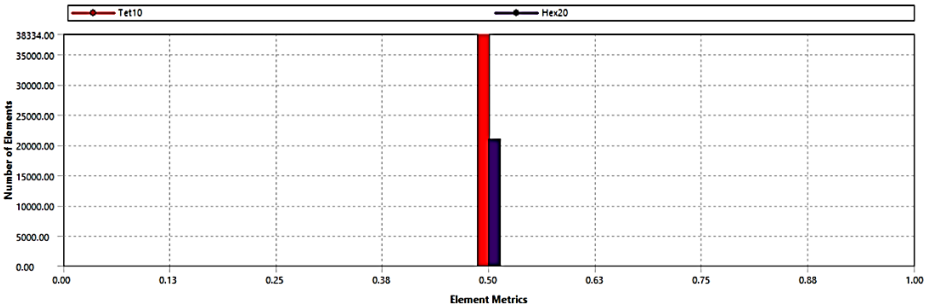
شبکه‌بندی سه‌ضلعی

شکل ۲. شبکه‌بندی مدل و پیچ راهنما

مقدار نصف به بالا مطلوب بوده و بستگی به حساسیت نتایج تحلیل در صنایع و ارتباط مستقیم موضوع با امنیت انسان و غیره هرقدر مقدار این عدد بالاتر و نزدیک به یک باشد، بهتر است. عدد ۰/۵۶ مورد قبول بوده و نیازی به استفاده از شبکه با اندازه‌های کوچک‌تر نمی‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

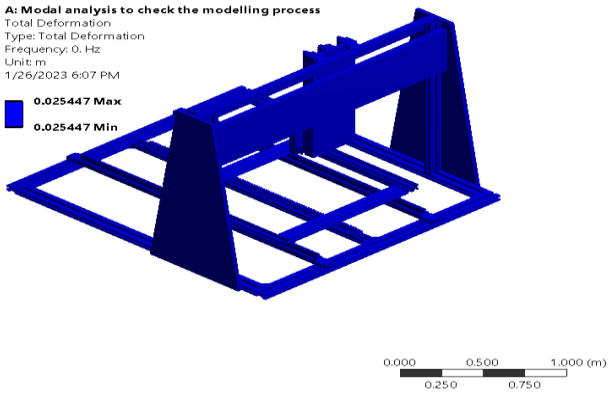
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]



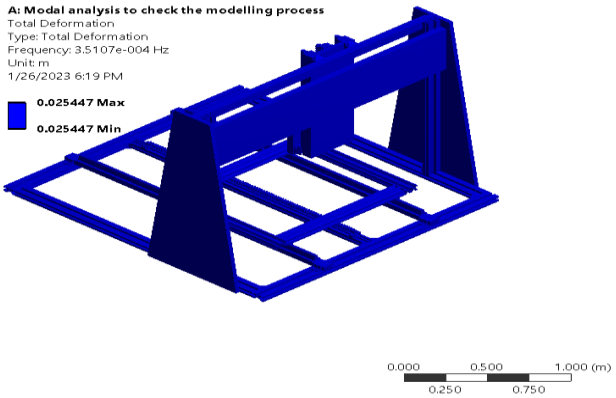
شکل ۳- گزارش کیفیت مش‌ریزی استخراج شده از نرم‌افزار

۵- صحت و اعتبارسنجی مدل‌سازی هندسی و مونتاژ سیستم

طبق مطالب بیان شده, برای بررسی صحت مدل‌سازی هندسی و مونتاژ سیستم کافی است تا تحلیل ارتعاشات آزاد انجام شود و سه فرکانس طبیعی اول و شکل مودهای متناظر با آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده شامل فرکانس طبیعی و شکل مود متناظر در شکل (۴) گزارش شده است. این قسمت از پژوهش با در نظر گرفتن فولاد st52 انجام شده و نتایج ارایه شده مختص به‌کارگیری این ماده در ساخت دستگاه است.



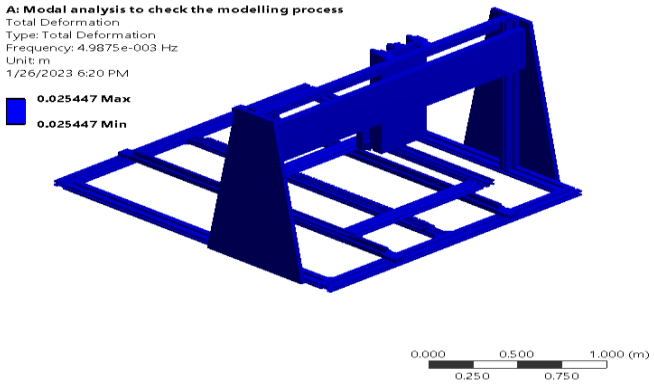
مود متناظر با فرکانس طبیعی اول (0Hz)



مود متناظر با فرکانس طبیعی دوم (0.000351 Hz)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]



مود متناظر با فرکانس طبیعی سوم (0.00498 Hz)

شکل ۴- اشکال مود متناظر با سه فرکانس طبیعی.

۶- نتایج تحلیل ارتعاشات آزاد با هدف بررسی صحت مدل‌سازی هندسی و مونتاژ سیستم

با توجه به شکل (۴)، سه فرکانس طبیعی حالت آزاد - آزاد سیستم یا صفر و یا نزدیک به عدد صفر هرتز است. از طرف دیگر، شکل مود متناظر با هر یک از سه فرکانس طبیعی اول با یکدیگر یکسان بوده و حتی میزان جابه‌جایی کل نیز یکی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وظیفه مدل‌سازی هندسی و مونتاژ سیستم از دیدگاه اتصالات و سایر موارد صحیح می‌باشد و مشکلی برای ادامه تحلیل‌ها به‌وجود نخواهد آمد.

۶-۱- استخراج معادلات ارتعاشی دستگاه سی‌ان‌سی رومیزی

برای سیستم‌هایی با چند درجه آزادی پارامترهای جرم و دمپر و فنر به‌صورت ماتریس با اندازه ابعادی (مرتبه) معادل با درجه آزادی سیستم می‌باشد. بدین ترتیب که معادلات ارتعاشات به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$[m]\ddot{\vec{x}}(t)+[c]\dot{\vec{x}}(t)+[k]\vec{x}(t)=f(t) \qquad (۱)$$

که در آن:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & .. & .. \\ 0 & m_2 & .. & .. & .. \\ 0 & 0 & m_3 & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & m_n \end{bmatrix}\begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ .. \\ .. \\ .. \\ \ddot{x}_n(t) \end{pmatrix}+\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & .. & .. \\ 0 & m_2 & .. & .. & .. \\ 0 & 0 & m_3 & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & m_n \end{bmatrix}\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ .. \\ .. \\ .. \\ \dot{x}_n(t) \end{pmatrix}+ \qquad (۲)$$

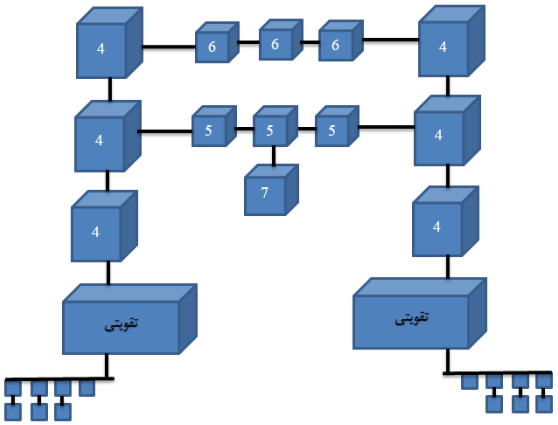
$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & .. & .. \\ 0 & k_2 & .. & .. & .. \\ 0 & 0 & k_3 & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & k_n \end{bmatrix}\begin{pmatrix} x_1(t) \\ .. \\ .. \\ .. \\ x_n(t) \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} F_1(t) \\ .. \\ .. \\ .. \\ F_n(t) \end{pmatrix}$$

لذا به ازای هر یک درجه آزادی سیستم، یک فرکانس طبیعی وجود دارد. برای مثال اگر سیستمی با n درجه آزادی وجود داشته باشد آن‌گاه n فرکانس طبیعی نیز خواهیم داشت.

تمامی روابط ارتعاشی ارائه شده در بالا برای یک سیستم با اجزای ناپیوسته می‌باشد ولی برای یک ماشین تراش سی‌ان‌سی رومیزی، سیستم به‌صورت اجزای پیوسته است به‌عبارت دیگر جرم، دمپر و سختی فنر با هم در یک مجموعه قرار می‌گیرند و هرکدام دارای یک جزء جداگانه نیستند. بنابراین معادلات ارتعاشی این سیستم متفاوت است. برای به‌دست آوردن روابط ارتعاشی باید از تعدادی سیستم

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

چندجرمی پیوسته استفاده شود. بدین منظور یک مدل ساده شده برای سازه دستگاه سی‌ان‌سی رومیزی با نام‌گذاری زیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- شماتیکی از مدل المانی در نظر گرفته شده برای دستگاه سی ان سی رومیزی

بنابراین اجزای مختلف شامل موارد ذیل است:

۱- المان‌های پایه (فونداسیون) شامل سه المان ردیف پایین در هر دو سمت از شکل شماتیک

۲- المان‌های میز یا بستر شامل چهار المان ردیف پایین در هر دو سمت از شکل شماتیک

۳- المان‌های صفحات تقویت‌کننده که در شکل شماتیک مشخص شده است

۴- المان‌های ستون که با شماره‌گذاری در شکل شماتیک مشخص شده است

۵- المان‌های نگهدارنده اسپیندل که با شماره‌گذاری در شکل شماتیک مشخص شده است

۶- المان‌های تیر برای نگهدارنده بالایی که با شماره‌گذاری در شکل شماتیک قابل مشاهده است

۷- المان اسپیندل که با شماره‌گذاری در شکل شماتیک قابل تشخیص است

این سیستم شامل چندین نوع المان مختلف است که با فرض ساده‌سازی سه نوع المان شامل جسم صلب، جسم الاستیک و اتصال سحطی بین المان‌های مختلف در نظر گرفته شده است که هر کدام از آن‌ها دارای روابط مختص خود می‌باشند که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۶- المان‌های اتصال سطحی

برای این نوع المان رابطه $Z_0=T^k Z_I$ برقرار است، بدین ترتیب که Z_0 ارتعاشات خروجی از المان است و در پی آن Z_I ارتعاش ورودی به المان است و T^k نیز ماتریس انتقال است. این ماتریس انتقال شامل هردو پارامتر سختی فنر و نیز دمپینگ (مستهلک کننده) ماده بوده و به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

$$T^k = \begin{pmatrix} I_{6\times6} & k \\ 0_{6\times6} & I_{6\times6} \end{pmatrix} \quad (۳)$$

که در آن:

$$k = \mathrm{diag}\left(\frac{-1}{k_x + jwc_x} \frac{-1}{k_y + jwc_y} \frac{-1}{k_z + jwc_z} \frac{-1}{k_\alpha + jwc_\alpha} \frac{-1}{k_\beta + jwc_\beta} \frac{-1}{k_\gamma + jwc\gamma} \right) \quad (۴)$$

جایی که k_x، k_y و k_z سختی‌های معادل در راستاهای x و y و z است و همچنین دمپرهای معادل در این راستاها عبارت‌اند از C_x، C_y و C_z، هم‌چنین سختی‌های معادل چرخش k_α، k_β و k_γ به ترتیب در جهت چرخش حول محورهای x و y و z بوده و به همین ترتیب دمپرهای چرخش حول محورهای مختلف برابر است با C_α، C_β و C_γ.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

۳-۶- المان‌های جسم صلب

برای این نوع المان خواهیم داشت: $Z_0 = T^R Z_I$ که در آن T^R ماتریس انتقال ارتعاش از جسم صلب است که درآن J_1 نشان دهنده ممان اینرسی جسم صلب است.

$$T^R = \begin{pmatrix} I_{3\times3} & -P_{I0} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & I_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ mw^2 I_{3\times3} & -mw^2 P_{IC} & I_{3\times3} & 0_{3\times3} \\ mw^2 P_{IC} & -w^2\left(mP_{I0}P_{IC}+J_1\right) & P_{I0} & I_{3\times3} \end{pmatrix} \quad (۵)$$

۴-۶- المان‌های جسم الاستیک

برای این نوع المان نیز داریم $Z_0 = T^F Z_I$ که در آن T^F ماتریس انتقال کلی ارتعاش است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T^F = U_n U_{n-1}, ..., U_2 U_1 \quad (۶)$$

که در آن:

$$U_i = \begin{bmatrix} -\dfrac{\left(k_{11}^i - w^2 m_{11}^i\right)}{\left(k_{12}^i - w^2 m_{12}^i\right)} & I \\ \left(k_{21}^i - w^2 m_{21}^i\right) + \dfrac{\left(k_{11}^i - w^2 m_{11}^i\right)\left(k_{22}^i - w^2 m_{22}^i\right)}{\left(k_{12}^i - w^2 m_{12}^i\right)} & \left(k_{22}^i - w^2 m_{22}^i\right) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

حال با توجه به مدل المانی در نظر گرفته شده برای دستگاه سی‌ان‌سی رومیزی و معادلات ارتعاشی ارائه شده برای هر نوع از المان می‌توان معادله کلی ارتعاش سیستم را استخراج و سپس آن را حل نمود که به‌دلیل پیچیدگی بیش از حد، این کار توسط نرم‌افزار المان محدود انسیس انجام شده است.

۵-۶- فرکانس‌های طبیعی سیستم

در طراحی می‌بایست اندازه فرکانس‌های تحریک از فرکانس‌های طبیعی سیستم بیشتر باشد. در اینجا، فرکانس تحریک همان فرکانس موتور اسپیندل و یا دوران آن است. چون فرکانس موتور استفاده شده در اسپیندل بالا و یا در برخی از مدل‌ها بسیار بالا است، باید سعی شود تا حد امکان فرکانس طبیعی سیستم دارای مقادیر پایین باشند؛ بنابراین، در طراحی مجدد ساختار دستگاه تراش سی‌ان‌سیرومیزی می‌توان چنین بیان نمود که هرچقدر فرکانس‌های طبیعی اول سیستم کوچک‌تر باشند، پایداری سیستم از نظر ارتعاشی و به‌وجود آمدن پدیده تشدید بهتر است. فرکانس‌های طبیعی سیستم در دو حالت جنس آلومینیوم و فولاد ساختمانی محاسبه می‌شود. ثابت بودن میز به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود و به تعیین جنس مناسب از نقطه نظر ارتعاشی برای دستگاه تراش سی ان سی رومیزی با هدف تراش سنگ‌های قیمتی و زیورآلات پرداخته می‌شود.

شش فرکانس طبیعی اول سیستم با درنظر گرفتن جنس آلومینیوم و فولاد در جدول (۳) و شکل مودهای متناظر با آن‌ها نیز به ترتیب در شکل (۶) و (۷) نشان داده شده است.

جدول ۳. ۶- فرکانس طبیعی سی‌ان‌سی از جنس Al و St (بر حسب هرتز)

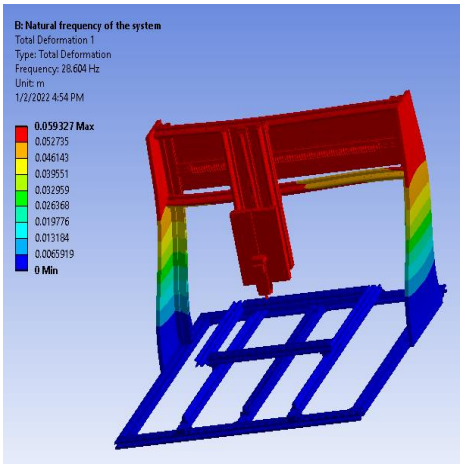
شماره مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶
اندازه فرکانس(Al)	۲۸/۶۰۴	۳۶/۰۱۷	۳۷/۲۰۹	۳۹/۷۶	۴۷/۰۴۱	۴۷/۶۹۲
اندازه فرکانس(St)	۲۸/۵۴۴	۳۵/۸۹	۳۶/۹۸۵	۳۹/۷۳۷	۴۶/۸۷۶	۴۷/۵۹۵

مطابق جدول (۳) فرکانس طبیعی سیستم در بازه ۲۸-۴۸ هرتز قرار دارد که به‌مراتب خیلی کمتر از فرکانس موتور یا اسپیندل مورد استفاده در دستگاه می‌باشد. لذا می‌توان با اطمینان کافی بیان کرد که در این سیستم پدیده تشدید رخ نخواهد داد.

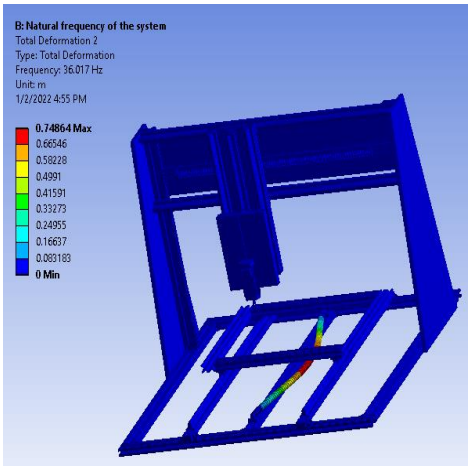
با توجه به شکل مودهای متناظر با هر یک از فرکانس طبیعی اول سیستم در شکل‌های (۶) و (۷) به وضوح مشخص است که تغییر جنس سازه هیچ‌گونه تاثیری بر شکل مود سازه ندارد و صرفاً میزان و مقدار تغییر شکل دست‌خوش تغییرات قرار می‌گیرد که مقدار آن در برخی از شکل مودها قابل توجه است. برای مثال در شکل مود اول، با تغییر جنس از آلومینیوم به فولاد در حدود ۲/۴ میلی‌متر از تغییر شکل کلی سازه کاسته می‌شود. علاوه براین، نتایج نشان می‌دهند که این سازه دارای (۴) نقطه‌ضعف ازنظر پایداری ارتعاشاتی دارد که دقیقاً با واقعیت دستگاه و اتفاقاتی که در حین کار با دستگاه رخ می‌دهد هم‌خوانی دارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

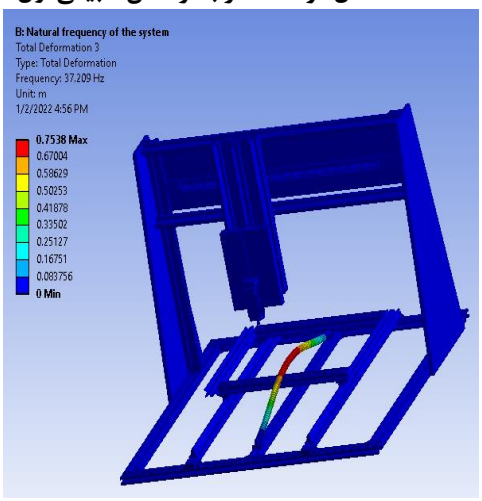
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]



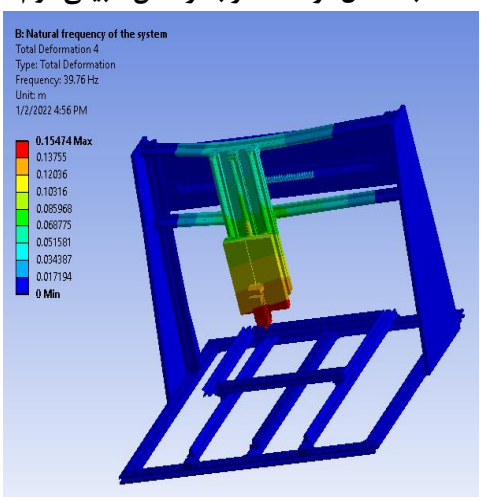
الف) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی اول



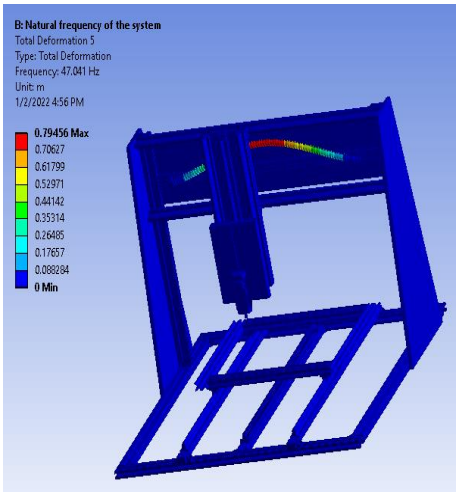
ب) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی دوم



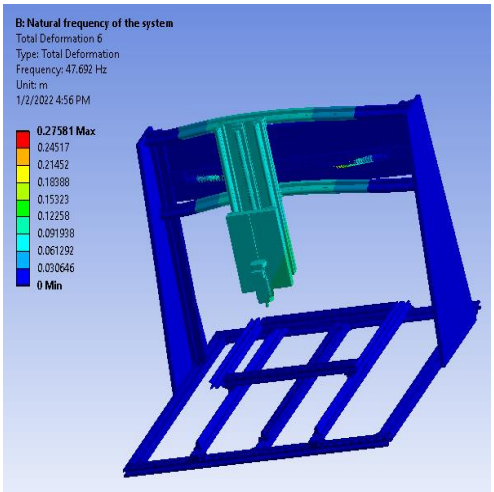
ج) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی سوم



د) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی چهارم



و) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی پنجم

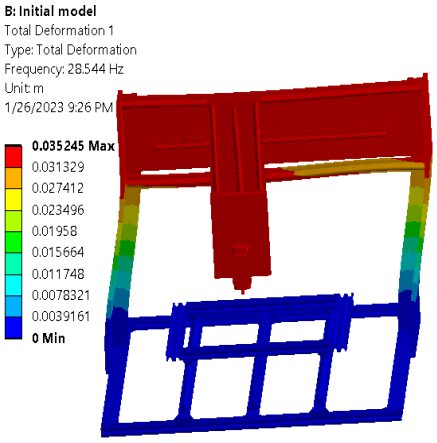


ه) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی ششم

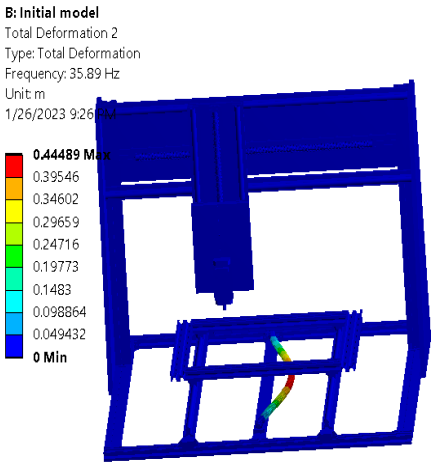
شکل ۶. مودهای متناظر با فرکانس‌های طبیعی دستگاه تراش (Al) سی‌ان‌سی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

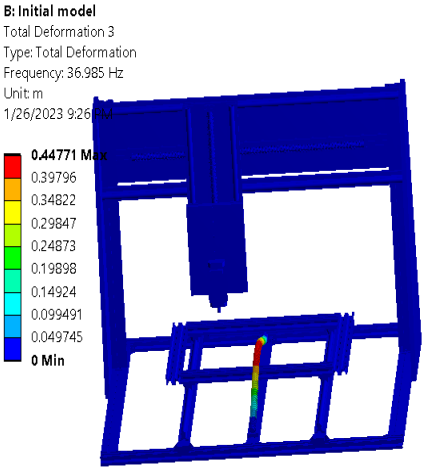
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]



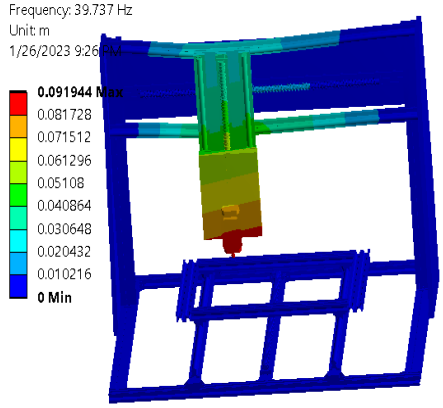
الف) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی اول



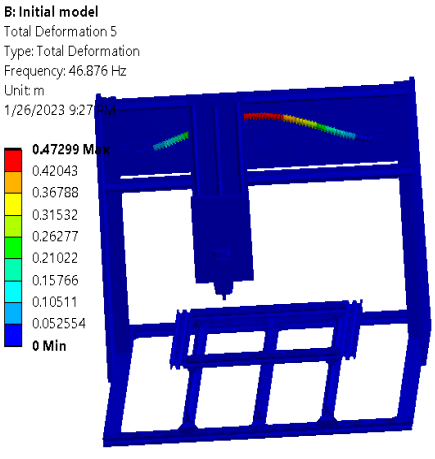
ب) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی دوم



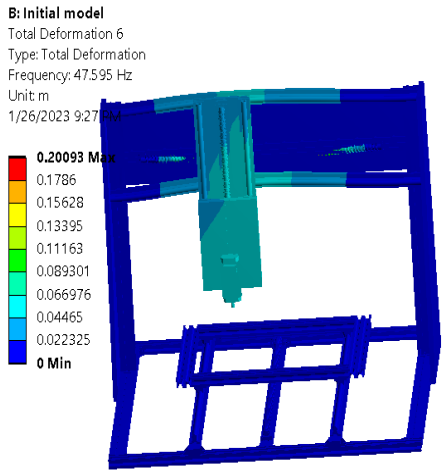
ج) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی سوم



د) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی چهارم



و) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی پنجم



ه) شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی ششم

شکل ۷. مودهای متناظر با فرکانس‌های طبیعی دستگاه تراش (St) سی‌ان‌سی

در شکل مود اول مشاهده می‌شود که قسمت نگه‌دارنده اسپیندل و سازه از دو طرف دارای حرکت جانبی است که این موضوع در این پژوهش مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا بتوان ارتعاش در راستای جانبی را کاهش داد. در واقعیت نیز در هنگام تراش، این مورد به‌وضوح مشخص است. قسمت دوم، ناپایداری میله راهنمای وسط میز می‌باشد که حرکت روبه‌جلو و عقب قطعه‌کار یا میز متحرک را با استفاده از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

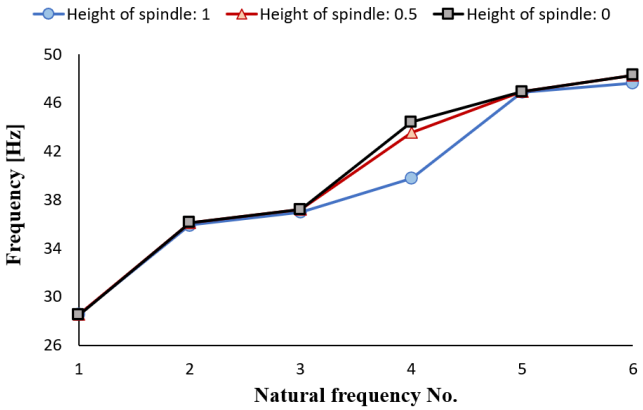
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

یک استپ موتور در انتها و پیچ راهنما و بوشینگ دو سر آن‌ها را که به‌صورت هرزگرد می‌باشد برعهده دارد؛ در دستگاه سی‌ان‌سی موجود در کارگاه (جنس سازه از آلیاژ آلومینیومی است) نیز دیده شد که به‌دلیل ارتعاش به‌وجودآمده در حین تراش، رابط‌ها یا پایه‌های نگهدارنده استپ موتور به میز و نیز بوشینگ دچار شکست و خرابی شده است، به‌طوری‌که در حال حاضر استپ موتور ثابت نیست. شکل مود سوم نیز در جهت مخالف شکل مود دوم و با همان مضمون و توضیحات می‌باشد. شکل مود چهارم نشان‌دهنده قسمت سوم بحرانی و آن نیز کلگی اسپیندل و قسمت اتصال موتور به نگهدارنده است. ازآن‌جایی‌که در دستگاه موجود در کارگاه، این قسمت‌ها از جنس آلومینیوم ساخته شده است، می‌توان پیش‌بینی نمود که وزن موتور استفاده شده نسبت به نگه‌دارنده آلومینیومی آن سنگین‌تر بوده و شکل مود حاضر تأثیر این موضوع است. با این وجود که استفاده از جنس فولاد برای سازه دستگاه تراش رومیزی منجر به از بین رفتن مشکل مذکور و شکل مود نمی‌شود، ولی در هر صورت باعث می‌گردد تا دامنه تغییر شکل تحت این شکل مود کاهش یابد. شکل مود پنجم و ششم نیز مرتبط به میله راهنمای حرکت اسپیندل به چپ و راست می‌باشد که در اثر همان وزن موتور و یا اسپیندل و در ادامه شکل مود چهارم رخ داده است. باتوجه به مطالب بیان شده در بالا، در این پژوهش صرفاً به شکل مود اول که مربوط به سازه نگه‌دارنده اسپیندل به‌خصوص کنترل کناره‌های دستگاه می‌باشد، توجه خواهد شد. در جمع‌بندی می‌توان با توجه به دامنه ارتعاشاتی و تغییر شکل متناظر با شکل مودهای ارایه شده در این گزارش بیان کرد که جنس فولاد منجر به بهبود مشخصات ارتعاشاتی سیستم می‌گردد که در مقایسه با ابعاد دستگاه خیلی قابل توجه نبوده و افزایش هزینه ماده اولیه در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم و سبک سازی منطقی نیست تا از فولاد برای سازه دستگاه تراش رومیزی سی‌ان‌سی استفاده کرد. با این وجود، برای کالایی هم‌چون سنگ‌های قیمتی، زیورآلات و جواهرات که دقت ابعادی و نوع تراش برای آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است پیشنهاد می‌گردد تا از جنس فولاد به‌عنوان جنس سازه استفاده شود که در مقایسه با جنس آلومینیوم منجر به کاهش دامنه ارتعاشات می‌گردد و در پی آن دقت ابعادی در حین تراش‌کاری را افزایش می‌دهد. از این‌رو، تمامی تحلیل‌های آتی با در نظر گرفتن جنس فولاد ساختمانی برای سازه دستگاه تراش رومیزی انجام شده است.

۶-۶- اثر ارتفاعو تغییر مکان عرضی اسپیندل بر رفتار ارتعاشاتی سازه

در این قسمت از پژوهش، فرآیند مونتاژ سیستم چندین بار تکرار شده است با این تفاوت که هر بار، اسپیندل در یک ارتفاع مشخص قرار داده شده است؛ به‌عبارت‌دیگر، فرض شده است که در هر بار نیاز است تا قطعه‌ای با ضخامت متفاوت تراشیده شود. بنابراین تغییر ارتفاع اسپیندل از میزکار رخ خواهد داد. پس‌ازآن، تحلیل ارتعاشاتی تکرار شده است تا فرکانس‌های طبیعی سیستم و شکل مودهای متناظر با آن‌ها به‌دست آید. به‌طور کلی در این مرحله، هدف دست‌یابی به میزان تغییرات رفتار ارتعاشاتی سازه در اثر ارتفاع کاری اسپیندل است. همان‌طور که در بخش قبل مشخص است، محل قرارگیری اسپیندل در پایین‌ترین ارتفاع ممکن (متناسب با نازک‌ترین ضخامت قطعه کار) بوده است؛ بنابراین یکی از حالات مورد بررسی زمانی است که اسپیندل در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد و ارتفاع دیگر بین دو حالت نیز در نظر گرفته‌شده است.

در شکل (۸)، تغییرات فرکانس طبیعی سازه دستگاه سی‌ان‌سی برحسب تغییرات ارتفاع قراگیری اسپیندل بررسی‌شده است. ارتفاع صفر بدین معناست که اسپیندل در بالاترین نقطه قرار دارد و ارتفاع ۱ یعنی اسپیندل در پایین‌ترین ارتفاع قرار دارد؛ بنابراین اعداد بیان‌شده برای ارتفاع اسپیندل (بین صفر و یک) نسبی بوده که باتوجه به طول کلی میله راهنمای بالا و پایین رفتن اسپیندل بیان شده است.



شکل ۸- تغییرات فرکانس طبیعی سازه دستگاه سی‌ان‌سی از جنس فولاد برحسب تغییرات ارتفاع قراگیری اسپیندل

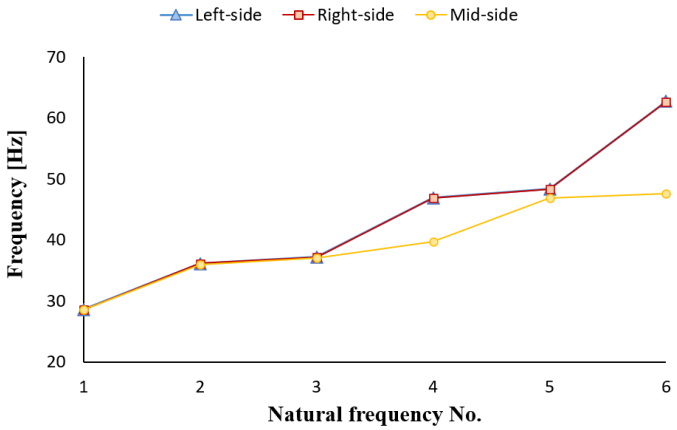
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، با تغییر ارتفاع اسپیندل، تغییرات چشم‌گیری در فرکانس طبیعی سازه رخ نمی‌دهد و شکل مودها نیز تغییر آن‌چنانی ایجاد نمی‌شود. فقط در شکل مود چهارم مشخص است که تغییرات ارتفاعی اسپیندل تأثیر کوچکی داشته که مربوط به وزن اسپیندل است که وارد بر نگه‌دارنده قائم است و با بالا رفتن اسپیندل از خم‌شدن کله‌گی جلوگیری می‌شود؛ بنابراین، باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این مرحله، می‌توان بیان نمود که تغییرات ارتفاع اسپیندل تأثیر چشم‌گیری بر رفتار ارتعاشی سازه، حداقل در بحث فرکانس طبیعی سازه، ندارد.

برای بررسی اثر تغییر مکان عرضی، هر بار اسپیندل در یک فاصله عرضی از دیواره‌های کناری قرار می‌گیرد. در تمامی این حالت، ارتفاع اسپیندل نسبت به میز کار کم‌ترین حالت ممکن را دارد تا اثر وزن اسپیندل بر روی سازه نیز مورد توجه قرار گرفته باشد. از آنجاکه در هنگام تراش با قطعه‌کار دارای طول بزرگ، لازم است تا اسپیندل از یک سمت میز کار به سمت دیگر حرکت کند ضرورت تحلیل حاضر دارای اهمیت است.

تغییرات فرکانس طبیعی سازه دستگاه سی‌ان‌سی رومیزی با در نظر گرفتن فولاد برای سازه آن برحسب تغییر مکان جانبی اسپیندل در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- تغییرات فرکانس طبیعی سازه دستگاه سی‌ان‌سی از جنس فولاد ساختمانی برحسب تغییر مکان جانبی اسپیندل

با توجه به شکل (۹)، در سه فرکانس طبیعی اول سازه هیچ‌گونه تغییری ایجاد نمی‌شود بلکه با افزایش شماره فرکانس طبیعی، فرکانس طبیعی نیز افزایش پیدا می‌کند تا جایی که در مود ششم، فرکانس طبیعی متناظر با آن زمانی که اسپیندل در هر طرف سازه قرار داشته باشد، ۲۵٪ بیش‌تر از زمانی است که اسپیندل در وسط میز کار قرار دارد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی این مود و دیگر مودها برای حالتی که اسپیندل در گوشه سمت راست و یا گوشه سمت چپ قرار دارد، کاملاً یکسان است و این به‌دلیل تقارن کامل هندسی، وزنی و غیره می‌باشد که حاکی از صحت مدل‌سازی و نیز شبیه‌سازی می‌باشد. باتوجه به این‌که در پیدایش پدیده تشدید، لازم است تا فرکانس تحریک تا حد لازم و کافی به یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم نزدیک باشد و از طرفی بازه فرکانسی موتور اسپیندل استفاده شده بسیار بالا و در حد چندین هزار هرتز است؛ بنابراین فرکانس‌های طبیعی قسمت بالایی موردنظر است و فرکانس‌های طبیعی اولیه خطرساز نمی‌باشند. هم‌چنین از این تحلیل مشخص گردید که بازه فرکانسی یاد شده در قسمت قبلی (۴۸-۲۸ هرتز) به ۲۸-۶۳ تغییر می‌کند؛ بنابراین، در این بازه‌ها نیز امکان به‌وجود آمدن پدیده تشدید ارتعاشاتی وجود ندارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر تغییر جنس سازه سی‌ان‌سی بر رفتار ارتعاشاتی آن پرداخته شود و از بین جنس‌های پیشنهادی شامل آلومینیوم و فولاد بهترین انتخاب برای جنس دستگاه تراش جواهرات گزارش می‌شود. در مرحله بعدی، به بررسی اثر موقعیت‌های اسپیندل بر ارتعاش سیستم بررسی می‌گردد. در این راستا، اهم دستاوردهای این پژوهش عبارت‌اند از:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

فرکانس طبیعی سیستم با در نظر گرفتن هر دو جنس آلومینیوم و فولاد برای سازه سی‌ان‌سی در طرح اولیه در بازه ۲۸-۴۸ هرتز قرار دارد که به‌مراتب خیلی کم‌تر از فرکانس موتور یا اسپیندل مورد استفاده در دستگاه می‌باشد. لذا می‌توان با اطمینان کافی بیان کرد که در این سیستم پدیده تشدید رخ نخواهد داد.

شکل مودهای استخراج شده متناظر با شش فرکانس طبیعی اول سیستم با در نظر گرفتن هر دو جنس آلومینیوم و فولاد برای جنس سازه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای طراحی اعم از سبک‌سازی و هزینه و ... بهتر است تا سازه دستگاه تراش رومیزی مخصوص سنگ‌های قیمتی، زیورآلات و جواهرات از جنس فولاد باشد چرا که در مقایسه با جنس آلومینیوم مستهلک کننده بهتری در مبحث ارتعاشات است.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر موقعیت اسپیندل در راستای ارتفاع، تغییرات چشم‌گیری بر فرکانس طبیعی سازه و شکل مودهای متناظر با آن‌ها ندارد و صرفاً تغییرات ارتفاع اسپیندل تأثیر کوچکی بر شکل مود چهارم داشته که مربوط به وزن اسپیندل است که وارد بر نگهدارنده قائم است و با بالا رفتن اسپیندل از پدیده کله شدن و خم شدن کله‌گی جلوگیری می‌شود.

در بررسی‌های اثر تغییر مکان جانبی اسپیندل بر فرکانس طبیعی سازه نشان داده شده است که در سه فرکانس طبیعی اول سازه هیچ‌گونه تغییری ایجاد نمی‌شود بلکه با افزایش شماره فرکانس طبیعی، فرکانس طبیعی نیز افزایش پیدا می‌کند تا جایی که در مود ششم، مشاهده می‌شود که فرکانس طبیعی متناظر با آن زمانی که اسپیندل در دو طرف سازه قرار داشته باشد، ۲۵٪ بیش‌تر از زمانی است که اسپیندل در وسط میز کار قرار دارد. هم‌چنین از این تحلیل مشخص گردید که بازه فرکانسی یادشده در قسمت قبلی (۴۸-۲۸ هرتز) به ۶۳-۲۸ تغییر می‌کند. بنابراین، در این بازه‌ها نیز امکان به‌وجودآمدن پدیده تشدید ارتعاشاتی وجود ندارد.

مراجع

[1] Rao, v. d. p., Ali, S. R. M, Ali, S. M. S. & Geethika, V. N. .Multi-objective optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated tool. Materials Today: Proceedings, (2018), 5(12), 25789-25797. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.571

[2] Rao, V. D. P., Harsha, N., Ram, N. R. & Geethika, V. N., Optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated carbide cutting tool. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2018), 310(1), 012109. https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012109

[3] Santhakumar, J. Iqbal, U. M. & Prakash, M., Taguchi-Grey Relational Based Multi-Response Optimization on the Performance of Tool Coating Thickness in Pocket Milling. Materials Today: Proceedings, (2018), 5(5), 1342213428. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.336

[4] Gu, J., Agapiou, J. S. & Kurgin, S., CNC machine tool work offset error compensation method. Journal of Manufacturing Systems, (2015), 37, 576585. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.336

[5] Barbosa, M., Silva, F. J. G., Pimentel, C. & Gouveia, R. M., A novel concept of CNC machining center automatic feeder. Procedia Manufacturing, (2018), 17, 952959. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.111

[6] Boral, S. & Chakraborty, S., Failure analysis of CNC machines due to human errors: An integrated IT2F-MCDM-based FMEA approach. Engineering Failure Analysis, (2021), 130, 105768. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105768

[7] Brillinger, M., Wuwer, M., Hadi, M. A. & Haas, F., Energy prediction for CNC machining with machine learning. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, (2021), 35, 715723. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.07.014

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

[8] Xiao, Y., Jiang, Z., Gu, Q., Yan, W. & Wang, R., A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost. Journal of Manufacturing Systems, (2021), 59, 535548. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.023

[9] Kashyzadeh, K. R. & Ostad-Ahmad-Ghorabi, M. J., Study of Chatter Analysis in turning tool and control methods–A Review. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, (2012), 2(4),15.https://www.researchgate.net/publication/235952595_Study_of_Chatter_Analysis_in_Turning_Tool_and_Control_Methods_-_A_Review

[10] Zhang, X. Pan, T. Ma, A. & Zhao, W., High efficiency orientated milling parameter optimization with tool wear monitoring in roughing operation. Mechanical Systems and Signal Processing, (2022), 165, 108394. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108394

[11] Liu, T., Deng, Z., Luo, C., Li, Z., Lv, L. & Zhuo, R., Chatter detection in camshaft high-speed grinding process based on VMD parametric optimization. Measurement, (2022), 187, 110133. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110133

[12] Möller, C., Schmidt, H. C., Koch, P., Böhlmann, C., Kothe, S. M., Wollnack, J. & Hintze, W., Machining of large scaled CFRP-Parts with mobile CNC -based robotic system in aerospace industry. Procedia manufacturing, (2017), 14, 1729. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.11.003

[13] Rogov, V. A. & Siamak, G., Optimization of surface roughness and vibration in turning of aluminum alloy AA2024 using taguchi technique. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering,(2013),7(11),23302339,https://www.academia.edu/7584313/Optimization_of_Surface_Roughness_and_Vibration_in_Turning_of_Aluminum_Alloy_AA2024_Using_Taguchi_Technique

[14] Ghorbani, S., Kopilov, V. V., Polushin, N. I. & Rogov, V. A., Experimental and analytical research on relationship between tool life and vibration in cutting process. Archives of Civil and Mechanical Engineering, (2018), 18(3), 844862. https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.007

[15] Ghorbani, S., Rogov, V. A., Carluccio, A. & Belov, P. S., The effect of composite boring bars on vibration in machining process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2019), 105(1), 11571174. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04298-6

[16] Lapsomthop, W., Wongsirirax, N. & Sawangsri, W., Design and experimental investigation on 3-component force sensor in mini CNC milling machine. Materials Today: Proceedings, (2019), 17, 19311938. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.232

[17] Liu, Y., Wu, B., Luo, M. & Zhang,M., Modeling and Cutting Path Optimization of Shallow Shell Considering its Varying Dynamics During Machining, Procedia CIRP, (2015), 31, 521526. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.059

[18] Xiao, W., Xu, Z., Bian, H. & Li, Z., Lightweight heavy-duty CNC horizontal lathe based on particle damping materials. Mechanical Systems and Signal Processing, (2021), 147, 107127. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107127

[19] Al-Naggar, Y.M., Jamil, N., Hassan, M. F. & Yusoff,A.R., Condition monitoring based on IoT for predictive maintenance of CNC machines, Procedia CIR, .(2021), 102 ,314318. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.054

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

[20] Kumar, R., Jain, A., Jain, R., Comparative structural analysis of CNC milling machine bed using Al-SIC/graphite, al alloy and Al-SIC composite material, Materials Today: (2021), 51(1), 735741.(Cover date: 2022). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.219

[21] Demir, A., Birinci, B. U., & Ozturk, H., Determination of the surface characteristics of medium density fibreboard processed with CNC machine and optimisation of CNC process parameters by using artificial neural network, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, (2021), 35, 929-942. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.10.005

[22] MOU, W., ZHU, S., Giang, Z., & Song, G., Vibration signal-based chatter identification for milling of thin-walled structure. Chinese Journal of Aeronautics, (2022), 35(1), 204-214.https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.029

[23] Kim, J., Hegde, H., Kim, H. Y., & Lee, C.B., Spindle vibration mitigation utilizing additively manufactured auxetic materials. Journal of Manufacturing Processes, (2022), 73, 633-641. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.051

[24] Revanasiddesh, B. V., Taj, A. P., Kumar, N. S. N., & Suesh, B. S., Extraction of modal parameters of CNC lathe bed using finite element and experimental method, Materials Today: Proceedings, (2020), 24(2), 398-405. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.291

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]

The effect of material and location of the spindle on the vibration behavior of Gate milling machine

Hojjatollah Mohseni Takallu[1],Mostafa Omidi bidgoli[2*],Sayyedmohammad Hosseini[3]

[1] Department of Mechanical Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Badroud Branch, Islamic Azad University, Badroud, Iran
[3] Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran

Received: November 2024 Accepted: February 2025

Abstract

In this article, The natural frequency of the system was calculated based on the location of the height and lateral location of the spindle, and by changing the structure of the structure, the best form was introduced to reduce unwanted vibrations. The natural frequency is in the range of 28-48, which is much lower than the frequency of the motor or the spindle, it can be confidently stated that the phenomenon of resonance will not occur. Based on the shape of the extracted modes corresponding to the first six natural frequencies of the system, considering both aluminum and steel for the structure of the device, it has been investigated. The simulation results showed that changing the position of the spindle in the direction of height does not have significant changes on the natural frequency of the structure and the shape of the modes corresponding to them. In changing the lateral position of the spindle in the sixth mode, it was observed that the natural frequency corresponding to when the spindle is located on both sides of the structure is 25% higher than when the spindle is located in the middle of the work table. It was also found from this analysis that the frequency range mentioned in the previous part (48-28 Hz) has changed to 63-28 Hz.

Keywords:CNC, machine, vibrations, natural frequency, frequency mode
*mostafaomidibidgoli@gmail.com

Cite this article as: Hojjatollah Mohseni Takallu,Mostafa Omidi bidgoli,Sayyedmohammad Hosseini. Theeffect of material and location of the spindle on the vibration behavior of Gate milling machine. Journal of Energy Conversion, 2024, 11(4), 33-49.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.530]