کاهش دامنه ارتعاشات در سازه فولادی بدنه یک ماشین فرز دروازه‌ای ساخته شده به روش جوشکاری

دکترمحمد جعفر استاد احمدقرابی[1*]، مهدی آرمانی نژاد[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی** ، سمنان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی** ، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی: ۱۷۹-۳۵۱۴۱، jafarghorabi@gmail.com

چکیده

بدنه ماشین‌های ابزار عمدتا از جنس چدن یا فولاد هستند. بدنه‌های فولادی معمولا بروش جوشکاری ساخته می‌شوند تا در تیراژ کم نیز مقرون به صرفه باشند. از طرفی، ارتعاشات ایجاد شده حین براده‌برداری تأثیر مستقیم بر کیفیت سطح قطعه‌کار دارد. از این‌رو کاستن از لرزه و ارتعاش یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی طراح است. این امر بطرق مختلفی می‌تواند صورت پذیرد که از جمله آن افزایش چغرمگی سازه در برابر ارتعاش است. در این مقاله به روش دنده‌گذاری پرداخته شده که سه نوع مختلف بررسی شده است. و بدین منظور روشی بهینه جهت کاهش نرمی ارائه گردیده است.

کلیدواژگان

دنده‌گذاری، چغرمگی سازه، ارتعاشات ماشین ابزار

Reduction of vibrations amplitude using ribs in the welded steel structure in the cross beam of a gantry milling machine

Mohammad Jafar Ostad-Ahmad-Ghorabi[1] , Mahdi Armaninejad[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, jafarghorabi@gmail.com

Abstract

Body of machine tool is mainly made of cast iron or welded structures. But in service, the so called self-excited vibrations (chatters) decrease the surface and dimension quality of work pieces. Welded joints used in body structure, help to reduce the level of vibrations amplitude inherently. The present work outlines analytical evaluation of welded structures to reduce the amplitude of vibrations. Different rib modes for cross beam of a gantry milling machine have been studied. The results show that vertical rib mode has the most effect by decreasing more than 97% of the vibration amplitude compared to no-rib mode.

Keywords

rib-mode, structure stiffness, vibration in machine tool

۱- مقدمه

امروزه صنایع تولید قطعات مکانیکی که تأمین‌کننده بخش مهمی از احتیاجات مصرف کنندگان، کارگاه‌ها و کارخانجات است، بطور وسیعی به ماشین‌های ابزار وابسته هستند. بدین ترتیب تلاش برای بهبود کار و افزایش بازدهی این ماشین‌ها یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های صنعت‌گران است تا با افزایش سرعت و کیفیت براده برداری، از هزینه‌های موجود بکاهند. استفاده از روش جوشکاری برای ساخت سازه‌های بدنه ماشین ابزارهای مدرن که بنا بر نیاز کاربران بصورت سفارشی ساخته می‌شوند جهت کاهش هزینه بسیار متداول است. این سازه‌ها اگر بطور صحیح طراحی شوند در میرایی ارتعاشات بویژه از نوع خودبرانگیخته که منجر به پدیده نامطلوب لرزه می‌شوند، بمقدار زیادی می‌کاهند. جهت بررسی میزان کاهش یا افزایش دامنه ارتعاشات در سازه ها روش‌های گوناگونی بکار گرفته می‌شود. به طور کلی این روش‌ها به دوگروه تحلیلی و تجربی تقسیم می‌شوند که هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. روش‌های تجربی که مبتنی بر اندازه‌گیری هستند، نیازمند تجهیزات دقیق و گران قیمتی است که نتایج حاصله دارای خطا نیز بوده و انجام آن می‌تواند زمانبر باشد. همچنین نمونه‌ای باید ساخته شود که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. آزمون تجربی مودال، یکی از روش‌های به دست آوردن پاسخ فرکانسی است. در روش‌های تحلیلی معمولاً مدلی دینامیکی از ماشین و بارهای اعمالی تهیه می‌شود که در مواردی نیازمند ساده‌سازی است و میزان خطا را افزایش می‌دهد. هندسه ابزار، هندسه تماس آن با سطح قطعه‌کار، بارهای وارد بر اتصالات باید به خوبی مدل‌سازی شود. سپس روابط استاتیکی یا دینامیکی مربوطه نوشته می‌شود تا معادلات مربوط به جابجایی سر ابزار که ایجاد کننده خطای سطح است و یا ارتعاشات سر ابزار که عامل افزایش ناهمواری سطح قطعه کار است حاصل شود. از آنجا که یک عامل ناهمواری، ارتعاشات ماشین ابزار و بویژه ابزار است، مدل کردن این ارتعاشات ضروری است. یکی ازمهم‌ترین چالش‌های ماشین‌کاری به خصوص در ماشین‌کاری پرسرعت وقوع ناپایداری در اثر ارتعاشات لرزشی است. پیش‌بینی محدوده‌های ارتعاشات پایدار، مستلزم به دست آوردن پاسخ فرکانسی ابزار است. استفاده از روش‌های مدل‌سازی کمک می‌کند تا در مرحله طراحی بسیاری از ایرادات آن برطرف شود.

در این مطالعه رفتار سازه‌های جوشی در اثر ارتعاشات تحلیل و بررسی شده و راهکارهایی جهت کاهش دامنه آن ارائه می‌گردد. بدین منظور براساس

معادلات حاکم بر ارتعاشات این سازه‌ها، یک مدل اجزای محدود از ساختار ماشین فرز دروازه‌ای مورد نظر مورد تحلیل عددی واقع می‌شود. تأثیر انواع حالتهای دنده گذاری روی دامنه ارتعاشات ساختار بررسی می‌گردد و در نهایت به بررسی تابع پاسخ فرکانسی

(FRF)[1] در مورد حالتهای مختلف دنده گذاری در بدنه ماشین مورد نظر پرداخته خواهد شد. در این تحلیل از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

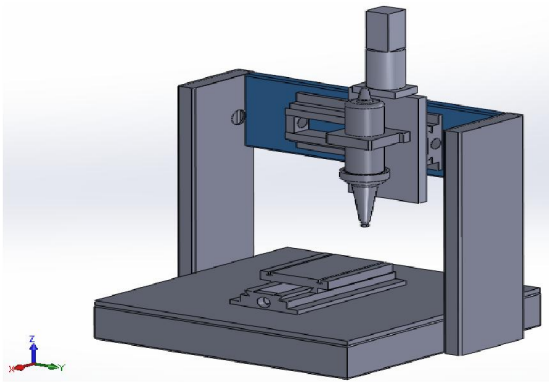
۲- تحقیقات انجام شده

آلتینتاس و بوداک [۱] روشی برای تعیین محدوده پایدار ماشین فرز با تیغه انگشتی ارائه کردند. در این روش از پاسخ فرکانسی ماشین فرز در نوک ابزار به عنوان نماینده دینامیک ماشین فرز استفاده شده است.

شیگرو و همکارانش[۲] مشخصات دینامیکی سازه‌های جوشکاری شده را بررسی نمودند. آن‌ها در این مقاله تأثیر جوش روی مشخصات دینامیکی بر پایه نتایج تجربی را استخراج نمودند. ابتدا مشخصات دینامیکی نمونه‌های ساده جوشکاری شده را اندازه‌گیری کرده و سپس تأثیر جوش روی ارتعاشات و قابلیت اطمینان به روش نظری را با استفاده از یک مدل تحلیلی بررسی کردند.

سینگ و همکارش در سال ۲۰۱۲ [۳] میرایی در سازه‌های جوشی با ضخامت‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. مدل میرا شده سازه با اطلاعات اندازه‌گیری شده تطابق خوبی داشت.

هدف ما در این مطالعه بررسی کاهش دامنه ارتعاشات در ماشین فرز دروازه ای با استفاده از راهکار دنده گذاری جوشی در سازه ماشین مورد تحلیل است. محل مد نظر که دامنه ارتعاشات آن باید کاهش یابد، نوک ابزار است که منجر به بهبود کیفیت براده برداری می‌شود. مجموعه ابزار، اسپیندل و موتور ۵ کیلوواتی آن بر روی حماله افقی بدنه حرکتی عرضی دارند و دنده گذاریها ی جوشی در این قسمت انجام می‌شود. ابعاد حماله ۱۰۰۰mm×۳۵۰mm×۱۰۰mm است.



شکل ۱ مدل هندسی ماشین فرز

۳- تعریف خواص مواد و مراحل تحلیل

کلیه اجزای بدنه ماشین فرز از جنس فولاد بوده که خواص آن مطابق جدول زیر است:

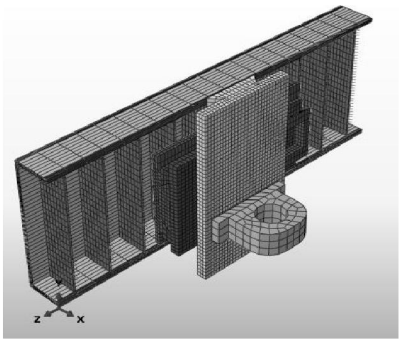
جدول۱ مشخصات خواص فیزیکی مواد

جنس	ضریب پواسون	چگالی (Kg/m^3)	مدول یانگ (Pa)
فولاد Ck45	۰/۲۹	۷۸۷۰	۲۰۰×۱۰^۹
فولاد St50	۰/۳	۷۸۰۰	۲۱۰×۱۰^۹

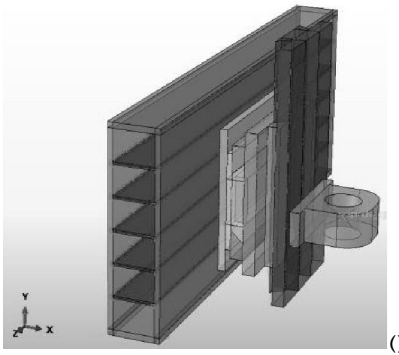
بررسی دامنه ارتعاشات سازه مورد نظربا انجام تحلیل مودال مقید انجام گرفته و مدلسازی هندسی مسأله نیز تماماً درنرم افزار آباکوس انجام شده است. تحلیل شامل دو گام زمانی است: گام اول تحلیل استاتیکی بر مبنای نیروی وزن و گشتاور موتور اسپیندل و گام دوم تحلیل دینامیک مودال است.

جهت بارگذاری و تعیین شرایط مرزی مسأله به منظور بررسی دامنه ارتعاشات حماله افقی ماشین فرز، می‌توان فرض کرد که ماهیت بار اعمالی ناشی از گشتاور ناشی از موتوراسپیندل باشد. از این‌رو در موقعیت مرکز جرم اسپیندل نقطه مرجع فرضی در نظر گرفته می‌شود که بار گشتاور از آنجا به مجموعه دستگاه منتقل می‌شود در سطوح لغزشی در مجموعه ریل‌های نگهدارنده اسپیندل ضریب اصطکاک ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین کلیه بارهای حاصل از وزن اجزا به صورت بار متمرکز ۱۰ کیلوگرمی بر روی مرکز جرم اسپیندل در نظر گرفته شده است.

به منظور شبکه‌بندی و تشکیل ساختار مدل اجزای محدود، کلیه المان‌ها از نوع سه بعدی خشتی ۸ گره‌ای تنشی (C3D8R) انتخاب شده‌اند. نوارهای دنده‌گذاری به ضخامت ۵ میلیمتر و از نوع پوسته در نظر گرفته شده‌اند. المان انتخابی برای هندسه نوارهای دنده گذاری از نوع چهار گره‌ای S4R هستند. برای مدلسازی اتصال جوشی در اجزا از دستور Tie استفاده شده است.

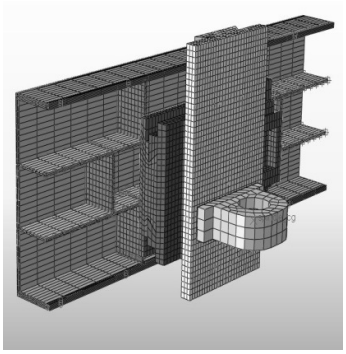


(الف)



(ب)

1-Frequency Response Function



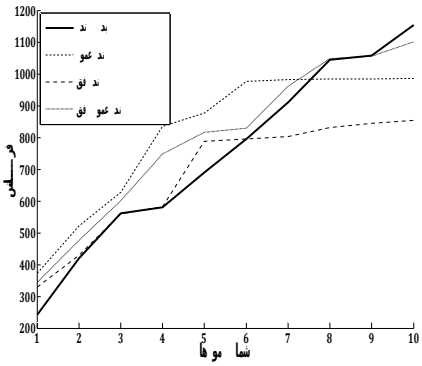
(ج)

شکل ۲ اضافه کردن دنده گذاری (الف)عمودی (ب) افقی و(ج)ترکیبی به مدل اجزای محدود

به منظور مقایسه کاهش دامنه ارتعاشات بین انواع دندانه‌گذاری، سه آرایش افقی، عمودی و ترکیبی با طول تقریبی ۳۰۰ سانتیمتر از نوار دنده‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. شکل۲ اضافه کردن دنده گذاری عمودی، افقی وترکیبی در مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد و جدول ۲ نیز مشخصات آن‌را بیان می‌دارد

جدول ۲مشخصات دنده گذاری

مدل	طول دنده گذاری	وزن دنده گذاری	طول جوش
بدون دنده گذاری	–	–	–
دنده عمودی(۹نوار)	۲۹۷سانتیمتر	۹/۲۷کیلوگرم	۷۳۸سانتیمتر
دنده افقی(۳نوار)	۲۹۴سانتیمتر	۹/۳۶کیلوگرم	۶۰۰سانتیمتر
دنده ترکیبی(۲نوار افقی،۳نوار عمودی)	۲۹۵سانتیمتر	۹/۳۳کیلوگرم	۷۴۲سانتیمتر



شکل۳ مقایسه اثر دنده گذاری بر فرکانس طبیعی ۱۰ مودال (برای طول دنده گذاری ۳۰۰ سانتیمتر)

نمودار شکل ۳ اثر دنده‌گذاری بر فرکانس طبیعی ۱۰ مود اول (برای طول دنده‌گذاری ۳۰۰ سانتیمتر) را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، دنده‌گذاری عمودی بیشترین تأثیر در افزایش فرکانس طبیعی مودهای اصلی و دنده‌گذاری افقی کمترین تأثیر را دارد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

جهت تحلیل تابع پاسخ فرکانسی سازه مورد نظر ابتدا بار ضربه ای ۸۰۰۰ نیوتن به قسمت پشت ماشین فرز، یعنی منطقه‌ای که مد نظر جهت تحلیل میرایی است اعمال شده و خروجی شتاب و جابجایی در قسمت سر اسپیندل ثبت می‌شود. این روند برای ۴ حالت مندرج در جدول ۲ انجام شده است.

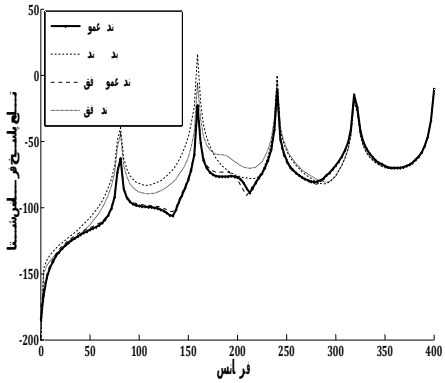
بار ضربه ای در مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه اعمال می‌شود. در مرحله بعد خروجی های بدست آمده در برنامه آباکوس یعنی نیروی اعمالی ، شتاب وجابجایی های بدست آمده در سر اسپیندل در هر ۴ حالت، استخراج و به عنوان ورودی یا داده‌های برنامه matlab جهت محاسبات تابع پاسخ فرکانسی مورداستفاده قرار می‌گیرد [۴].

زمان کلی جهت انجام تحلیل تابع پاسخ فرکانسی ۲/۵ ثانیه و فاصله زمانی بین هر شتاب ثبت شده ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر پس از اعمال بار ضربه‌ای ۸۰۰۰ نیوتن، شتاب و جابجایی سر اسپیندل در مدت زمان ۲/۵ ثانیه با بازه‌های زمانی۰/۰۰۱ ثبت می‌شود. در این‌صورت تعداد ۲۵۰۰ خروجی شتاب و جابجایی در دست خواهد بود.

نتایج بدست آمده از تابع پاسخ فرکانسی در شکل۴ حاکی از کاهش قابل توجه مقدار لگاریتمی قدرمطلق این تابع برای حالت دنده گذاری عمودی نسبت به سایر حالتهای است. در

مرحله بعد جهت مقایسه مقادیر تابع پاسخ فرکانسی از مقادیر آن بصورت خطی استفاده شده است.

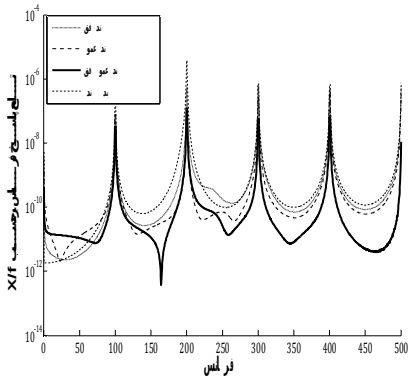
تابع پاسخ فرکانسی (FRF) در واقع تابعی در حوزه فرکانس است که پاسخ یک سازه به نیروی اعمال شده را به صورت تابعی از فرکانس بیان می‌کند. در تابع پاسخ فرکانسی، پاسخ می‌تواند بصورت جابجایی، سرعت یا شتاب باشد



شکل۴ نمودار تابع پاسخ فرکانسی FRF برای حالت های مختلف دنده گذاری جوشی درماشین فرز

با توجه به نمودار تابع پاسخ فرکانسی برای خروجی‌های شتاب در قسمت قبلی، در این مرحله نمودار برای جابجایی‌های خروجی بر حسب نیروی ورودی رسم می‌شوند. با توجه به اینکه هدف در این قسمت محاسبه میزان کاهش تابع و به عبارتی کاهش دامنه ارتعاشات است، میزان توابع

خروجی جابجایی بر حسب نیرو با استفاده از کد نویسی در محیط متلب محاسبه شده و با توجه به مقادیر آن‌ها، در نمودارخطی رسم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۵).



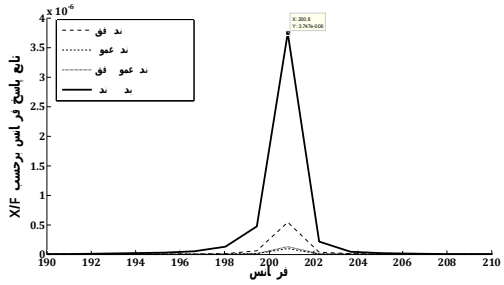
شکل ۵ نمودار FRF برای جابجایی های خروجی برحسب فرکانس

در واقع شکل ۵ تابع پاسخ فرکانسی برحسب فرکانس بصورت خطی برای حالتهای مختلف دنده‌گذاری عمودی، افقی، ترکیبی و حالت بدون دنده-گذاری را نشان می‌دهد. جهت مشاهده بهتر کاهش دامنه ارتعاشات حالتهای مختلف در اوج دوم یعنی بین فرکانسهای ۱۹۰ هرتز و ۲۱۰ هرتز میزان این تغییرات در نمودار شکل ۶ بزرگنمایی شده است.

مقادیر تابع پاسخ فرکانسی برای اوج دوم خروجی‌های جابجایی که در دو نمودار قبل نشان داده شده‌اند، جهت مقایسه بهتر در جدول ۳ آمده است. درصد کاهش دامنه ارتعاشات برای ۳ حالت افقی، عمودی، ترکیبی نسبت به حالت بدون دنده گذاری که در آن میزان ارتعاشات خروجی بیشترین مقدار را داراست، در سطر آخر آورده شده است.

جدول۳درصدکاهش دامنه ارتعاشات درحالتهای مختلف دنده گذاری با استفاده از نمودارFRF

چیدمان ورقه ها	مقدار تابع پاسخ فرکانسی	درصد کاهش دامنه ارتعاشات
بدون دنده گذاری	۱۰$^{-۶}$×۳/۷۴۷	-
دنده افقی	۱۰$^{-۷}$×۲/۱۱۱	۹۴/۳۶
دنده عمودی	۱۰$^{-۷}$×۱/۰۱۳	۹۷/۲۹
دنده ترکیبی	۱۰$^{-۷}$×۱/۲۶۶	۹۶/۶۲



شکل ۶ نمودار تابع پاسخ فرکانسی (X/F(FRF برحسب فرکانس (بصورت خطی)برای حالتهای مختلف دنده گذاری

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده در خصوص درصد کاهش دامنه ارتعاشات در حالتهای مختلف، دوحالت عمودی و ترکیبی بهترین حالتهای دنده‌گذاری است و با توجه به اینکه دنده گذاری عمودی شکل ساختاری ساده تری از لحاظ مونتاژ نسبت به حالت ترکیبی داراست، این حالت دنده گذاری جهت کاهش دامنه ارتعاشات در ماشین فرز مورد نظر مطلوب است. از طرفی این حالت دنده گذاری یعنی حالت عمودی با کاهش میزان ۹۷/۲۹درصد از دامنه ارتعاشات نسبت به حالت بدون دنده گذاری بهترین حالت درمیان حالات دیگر خواهد بود. درواقع با استفاده از دنده‌گذاری عمودی پاسخ ارتعاشی یا دامنه ارتعاشات سیستم به میزان ۹۷/۲۹ درصد نسبت به حالت بدون دنده گذاری درماشین فرز مورد نظرکاهش می یابد. دنده‌گذاری روشی ساده و در عین حال کارامد برای جلوگیری از ارتعاشات ناخواسته است که در سازه‌های دیگری غیر از ماشین‌ابزار نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد.

۶- مراجع

[1]- E. Budak, Y. Altintas, Analytical prediction of chatter stability in milling—Part I:general formulation; Part II: application to common milling systems, Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 120 (1998) 22 - 36 .

[2]- Shigeru Aoki, "Dynamic characteristics of welded structures", Nuclear Engineering and Design 160 (1996) 379-385

[3]Bhagat Singh and Bijoy Kumar Nanda, "Estimation of damping in layered welded structures with unequal thickness", Shock and Vibration 19 (2012) 1463–1475

[4]http://www.matweb.com