مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۲۹۶-۳۰۰

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی قطعه‌گیر تولید کننده ارتعاش دوبعدی برای سنگ‌زنی در حضور ارتعاشات فراصوتی

امیرحسین مجتهدزاده فارابی[۱]، دکتر جواد اکبری[۲]، دکتر محمدرضا موحدی[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف ، تهران
۳- استاد، مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵/۱۶۳۹، movahhed@sharif.edu

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی نوعی قطعه‌گیر جدید برای عملیات سنگ‌زنی در حضور ارتعاش فراصوتی ارائه شده است. این قطعه‌گیر قادر به تولید ارتعاش دوبعدی توسط یک مبدل پیزوالکتریک می‌باشد. برای انجام این پژوهش نوعی قطعه‌گیر ویژه طراحی شده است که امکان تبدیل ارتعاشات یک‌بعدی به دوبعدی را فراهم می‌سازد. در قطعه‌گیر طراحی شده با استفاده از یک محرک پیزوالکتریک، حرکت دوبعدی بیضوی شکل به قطعه‌کار داده می‌شود که دلیل آن وجود شکل مودهای عمود بر هم و وجود اختلاف فاز مناسب در بازه فرکانسی مناسب می‌باشد. این امر منجر به وجود آمدن حرکت دوبعدی در پی اعمال یک نیروی خطی است که توسط مبدل پیزوالکتریک تولید می‌شود. برای به دست آوردن نتایج هرچه بهتر و مطمئن شدن از صحت نتایج به‌دست آمده، قطعه‌گیر طراحی شده در مراحل مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از آنالیز استاتیکی توانایی تحمل نیروهای ماشین‌کاری توسط قطعه‌گیر بررسی می‌شود. سپس با آنالیز مودال، مودهای ارتعاشی مختلف قطعه کار بررسی شده و با آنالیز هارمونیک، جابجایی‌های حداکثر و اختلاف زاویه فاز در قطعه کار در فرکانس‌های کاری مختلف به دست می‌آید.

کلید واژگان: سنگ‌زنی ، ارتعاش فراصوت دوبعدی ، ارتعاش بیضوی

Simulation of 2D vibration fixture for ultrasonic vibration assisted of grinding

Amirhossein Mojtahedzade Faraby, Javad Akbari, MohammadReza Movahhedy*

School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155/1639 Tehran, Iran, movahhed@sharif.edu

ABSTRACT

FEM simulation of a new type of fixture for ultrasonic-assisted grinding was performed. This fixture could produce 2D vibration by one piezo-actuator. A special fixture was designed for conducting this research that was able to convert 1D vibration to 2D. The designed fixture can produce elliptical vibration by using one piezo-actuator because of special format with appropriate mode-shapes and suitable phase angle in suitable frequency. The designed fixture was analyzed in different processes for gathering the best results and being sure for accuracy of the results. The ability of fixture to undergo machining forces was studied by static analyzing. Finally, different natural frequency and mode shapes of fixture were examined in modal analyzing and the maximum movement and phase angel in fixture were studied by harmonic analysis.

Keywords: Elliptical Ultrasonic Vibration, Grinding, 2D Ultrasonic Vibration.

۱- مقدمه

با توجه به رشد روز افزون صنعت، مواد جدید مهندسی از قبیل سرامیک‌های مهندسی کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. خواص فیزیکی و شیمیایی، ضریب استحکام بالا و مقاومت به سایش زیاد آن‌ها، از جمله علل جذابیت کاربرد آن‌ها می‌باشد که باعث کاربرد فراوان آن‌ها در بخش‌های مختلف صنایع نظامی، نیروگاهی، ماشین‌سازی و غیره شده است. اما مشکلی که همواره کاربردهای گسترده آن را محدود کرده است؛ سختی ماشین‌کاری این مواد می باشد که هزینه‌های تولید آن‌ها را بسیار بالا می‌برد. ازجمله روش‌های تسهیل کننده براده‌برداری، می‌توان به سنگ‌زنی در حضور ارتعاش فراصوتی اشاره کرد. استفاده از سنگ‌زنی به کمک ارتعاش فراصوتی ایجاد قطعات با هندسه پیچیده و دقت ابعادی بالا و کیفیت سطح مناسب را امکان‌پذیر می‌کند.

علاوه‌بر این، با استفاده از سنگ‌زنی به کمک ارتعاش فراصوتی می‌توان با کاهش نیروی ماشین‌کاری، انرژی سنگ‌زنی را کاهش داد که این امر می‌تواند منجر به کاهش دمای ماشین‌کاری، کاهش ایجاد ترک و دقت ابعادی بهتر شود. در سال‌های اخیر استفاده از ماشین‌کاری به کمک ارتعاش فراصوتی در ساخت ابزارآلات فوق دقیق از فولاد و مواد اپتیک با هندسه‌های پیچیده و صافی سطح بالا رواج یافته است.

علاوه‌بر موارد فوق ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات، برای ماشین‌کاری دقیق قطعات بزرگ که از موادی باقابلیت ماشین‌کاری پایین نظیر آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای پایه نیکل، فولادهای با سختی بالا و سرامیک‌ها ساخته می‌شوند، به خدمت گرفته می‌شود. ماشین‌کاری به‌کمک ارتعاشات فراصوت در فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری نظیر تراش‌کاری، سوراخ‌کاری و سنگ‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرد و امروزه تلاش‌های زیادی در رابطه با گسترش

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Mojtahedzade Faraby, J. Akbari, M. Movahhedy, Simulation of 2D vibration fixture for ultrasonic vibration assisted of grinding, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 296-300, 2015. (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.78.8]

استفاده از این روش در فرآیندهای مختلف صورت می‌گیرد [۱].

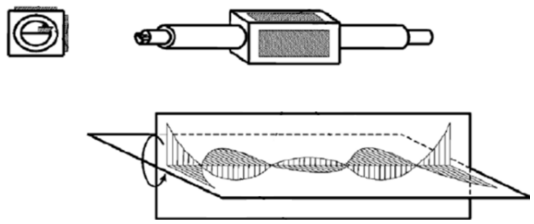
برای ایجاد ارتعاشات مکانیکی یک‌بعدی با فرکانس بالا، پرکاربردترین روش استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک است. این عملگرها از تعدادی دیسک پیزوالکتریک که بر روی هم قرار داده شده‌اند تشکیل‌شده‌اند. این عملگر پیزوالکتریک را مبدل (ترنسدیوسر) فراصوت نیز می‌نامند. این مبدل به‌وسیله یک مولد ولتاژ تحریک شده ارتعاش مکانیکی با فرکانس تحریک به وجود می‌آورد.

از آن‌جایی‌که معمولاً دامنه ارتعاش تولید شده توسط مبدل کافی نیست، قطعه واسطی به نام تمرکزدهنده (هورن) به گونه‌ای طراحی می‌شود که فرکانس طبیعی و شکل مود مطلوب را برای ایجاد تحریک در قطعه‌کار یا ابزار داشته باشد. بنابراین مبدل به هورن و هورن به قطعه‌کار متصل می‌شود. در ایجاد ارتعاشات دوبعدی، همین اصول مورد توجه قرار می‌گیرد، با این تفاوت که علاوه بر نکات فوق، نکات زیر نیز حائز اهمیت است.

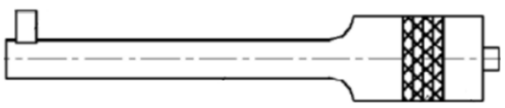
- برای ایجاد ارتعاش دو بعدی با یک محرک باید دو شکل مود مناسب انتخاب گردد و با تنظیم هندسه، سعی در نزدیک کردن فرکانس طبیعی این دو شکل مود به یکدیگر نمود.
- علاوه بر وجود دو شکل مود مناسب با فرکانس طبیعی نزدیک به هم، لازم است حرکت ارتعاشی ایجاد شده در این دو شکل مود با یکدیگر دارای اختلاف فاز باشند.

ما[1] و همکارانش با استفاده از دو عملگر پیزوالکتریک بر روی ابزار تراش‌کاری با مقطع استوانه‌ای (شکل ۱) و تحریک عملگرها با اختلاف فاز، شکل‌مود سوم خمشی نگه‌دارنده ابزار را در دو صفحه متعامد تحریک کردند تا در محل نصب ابزار حرکت بیضوی به‌وجود آید. روش فوق ساده‌ترین روش برای ایجاد ارتعاش دوبعدی است که در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده بر روی تراش‌کاری به کمک ارتعاشات دوبعدی، از آن استفاده شده است [۲].

لی[2] و همکارش از نگه‌دارنده ابزاری (شکل ۲) برای ایجاد ارتعاش دوبعدی استفاده کردند. ویژگی اصلی این هورن، ایجاد ارتعاش دوبعدی به‌وسیله یک محرک یک‌بعدی است. او با استفاده از جرم ابزار که خارج از محور تحریک قرار داشت به نوعی باعث ایجاد یک نامتقارنی بر روی مجموعه شد. با توجه به نامتقارنی ایجاد شده و تحریک ابزار در راستای محور نگه‌دارنده آن، شکل مود ارتعاشات طولی و خمشی به‌طور همزمان با یکدیگر تولید شده و موجب به وجود آمدن حرکت بیضوی شد. هرچند در عمل حرکت به وجود آمده با یک محرک با آنچه در محاسبات به‌دست آمده بود اختلاف داشت ولی این روش خود ایده نوینی در ایجاد حرکت دو بعدی بود [۳].



شکل ۱ شکل شماتیک نگه‌دارنده ابزار طراحی شده ما [۲]



شکل ۲ شکل شماتیک نگهدارنده ابزار طراحی شده لی [۳]

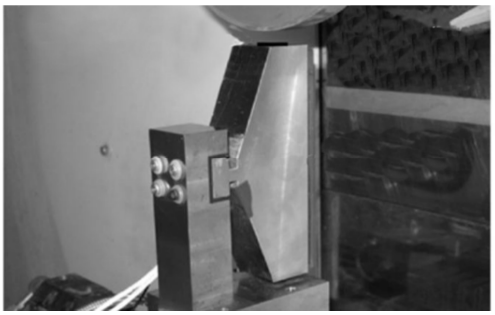
لیانگ[3] و همکارانش از هورنی مشابه شکل ۳ برای ایجاد ارتعاش دوبعدی در فرآیند سنگ‌زنی استفاده کردند. آن‌ها در طراحی این هورن از دو صفحه پیزوالکتریک استفاده کردند و در تحلیل المان محدود انجام شده نشان دادند که هرگاه تحریک دو پیزوالکتریک با یکدیگر هم‌فاز باشند؛ حرکت افقی، هرگاه دو تحریک در فاز مخالف باشند حرکت عمودی و هرگاه دو تحریک اختلاف فازی برابر با ۹۰ درجه داشته باشند حرکت دایروی حاصل خواهد شد.

براساس آزمایش‌های انجام شده ایجاد ارتعاش در راستای محور سنگ باعث افزایش کیفیت سطح و کاهش دما نسبت به سنگ‌زنی عادی می‌شود ولی ایجاد ارتعاش عمود بر راستای محور سنگ نسبت به ایجاد ارتعاش در راستای محور سنگ با کاهش صافی سطح همراه است درحالی‌که نیروی سنگ‌زنی نیز کاهش می‌یابد. در ارتعاشات دوبعدی نتایجی مابین نتایج فوق بدست آمده است که این نتایج بیانگر آن است که با استفاده از این روش علاوه‌بر افزایش صافی سطح نیروهای ماشین‌کاری نیز به میزان قابل قبولی کاهش می‌یابد [۴].

همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین به‌وضوح دیده می‌شود؛ سنگ‌زنی به کمک ارتعاش فراصوتی نسبت به روش‌های پیشین سنگ‌زنی بازدهی و کارآمدی بیشتری دارد. هرچند نحوه ارتعاش در این گونه از سنگ‌زنی‌ها به گونه‌ای است که عمل سنگ‌زنی بهینه شود؛ اما در این پژوهش‌ها به تولید ارتعاش دو بعدی توسط یک مبدل پیزوالکتریک خطی در جهت بهینه‌سازی فرایند سنگ‌زنی پرداخته نشده است. در پژوهش پیش‌رو، قطعه‌گیری ارائه شده است که در آن توسط یک مبدل پیزوالکتریک، ارتعاش دوبعدی در فرایند سنگ‌زنی ایجاد می‌گردد.

۲- مراحل طراحی

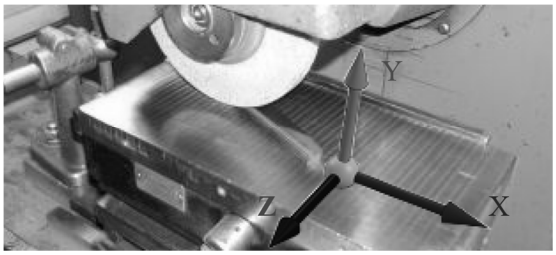
در این پژوهش، در مراحل مختلف طراحی، از ابتدای انتخاب هندسه اولیه تا انتخاب طرح نهایی، همواره از نرم‌افزار المان محدود به‌صورت موازی با دیگر ابزارهای طراحی استفاده شده است. در مرحله طراحی درمجموع آنالیزهای مودال، استاتیک و هارمونیک در محیط نرم‌افزار انسیس به‌کار گرفته شده است. فرایند طراحی شامل سه بخش می‌باشد که به ترتیب طراحی قطعه‌گیر، طراحی هورن و بهینه‌سازی مجموع این دو می‌باشد. در مدل ارائه شده امکان ارتعاش قطعه‌کار در صفحات XY و YZ وجود دارد. اما برای مشابه بودن تحلیل‌ها، تنها تحلیل‌ها در صفحه YZ مورد بررسی قرار می‌گیرد. جنس هورن و قطعه‌گیر باید به‌گونه‌ای باشد که از یک سو ضریب میرایی پایینی داشته باشد تا در حد امکان از میرا شدن ارتعاشات تولیدی جلوگیری شود که این خاصیت معمولاً در اجسام سخت دیده می‌شود. از سویی دیگر توانایی



شکل ۳ نگهدارنده قطعه کار ساخته شده توسط لیانگ [۴]

1. Ma
2. Li
3. Liang

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.78.8]



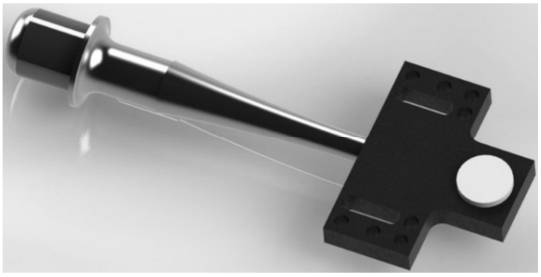
شکل ۴ جهت‌های میز سنگ‌زنی

جابجایی الاستیک بهینه نیز داشته باشد. از این‌رو جسم باید مدول الاستیک آن تا حد امکان پایین باشد تا قابلیت جابجایی الاستیک زیادی داشته باشد.

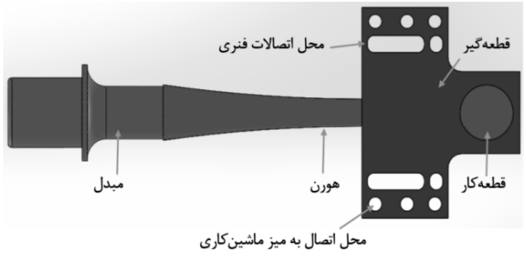
از طرف دیگر قطعه‌گیر باید توانایی تحمل نیروهای ماشین‌کاری را نیز داشته باشد و در مقابل نیروهای ماشین‌کاری تغییر شکل الاستیک آن حداقل باشد تا دقت‌های ابعادی قطعه حفظ شود. ازاین‌رو در طراحی هورن از آلیاژ آلومینیم ۷۰۲۳ و در طراحی قطعه گیر از فولاد استفاده شده است.

نحوه اتصال قطعه‌گیر به هورن و هورن به مولد پیزوالکتریک به‌وسیله پیچ می‌باشد. طراحی به‌گونه‌ای انجام شده است که حتی‌الامکان از تمرکز تنش و خستگی مجموعه جلوگیری شود. طراحی قطعه‌گیر به نحوی است که مودهای ارتعاشی که برای ارتعاش بیضوی استفاده می شوند؛ در فاصله نزدیک فرکانسی به یکدیگر قرار داشته باشند تا در هنگام ارتعاش در یک فرکانس مشخص، دو شکل مود تحریک شود که این امر باعث به وجود آمدن حرکت چرخشی در قطعه‌کار می‌شود. در شکل ۵ طرح اولیه مجموعه مشاهده می‌شود. در تحلیل‌های انجام شده بر طرح اولیه، علی‌رغم وجود دو شکل مود عمود بر هم در نزدیکی یکدیگر و وجود حرکت دوبعدی، در راستای طولی جابجایی بسیار بیشتری نسبت به راستای دیگر مشاهده شد که موجب شبه خطی شدن حرکت می‌شود.

برای تقویت جابجایی در راستای دیگر مبدل با اندکی تغییر زاویه نسبت به حالت قبلی قرار گرفت (شکل۷). انتظار می‌رود با تغییری اندک در امتداد اعمال تحریک پیزوالکتریک، دامنه ارتعاش در راستای جانبی افزایش یابد.



شکل ۵ طراحی اولیه قطعه گیر



شکل ۶ اجزای قطعه گیر طراحی شده

شکل ۷ ایده جدید قطعه‌گیر با امتداد ورودی زاویه‌دار

بدین منظور امتداد پیزوالکتریک با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور تمرکز دهنده طراحی گردید که به موجب آن ابعاد اولیه هورن نیز دچار تغییر شد. در نتیجه برای ایجاد حرکت دوبعدی، ایده تغییر زاویه مبدل پیزوالکتریک و استفاده از دو شکل مود عمود بر هم ایجاد شد که در چند مرحله این ایده و قطعه‌گیر طراحی‌شده مورد تحلیل قرار گرفت.

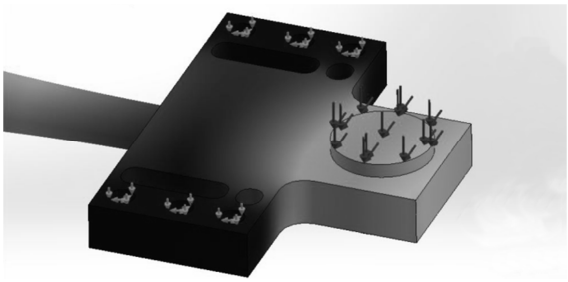
۳- آنالیز استاتیکی

سیستم فراصوتی طراحی‌شده باید توانایی تحمل نیروهای سنگ‌زنی را به موازات وظیفه انتقال این ارتعاشات داشته باشد. در مراحل میانی طراحی برای اطمینان از پایداری و استحکام سیستم در برابر بارهای وارده، از آنالیز استاتیک استفاده شده است. در مرحله طراحی نیز جنس قطعه‌کار به نحوی انتخاب شده است که از یک سو توانایی استحکام بالا و از سویی دیگر ضریب میرایی پایینی داشته باشد. برای بالا بردن ضریب اطمینان و کاهش خطای ساده‌سازی، نیروهایی چند برابر نیروهای معمول سنگ‌زنی، مقداردهی شده است (به ترتیب ۳۰۰ و ۴۰۰ نیوتن برای نیروی عمودی و مماسی). در شکل ۸، محور ابرازگیر در راستای Z دستگاه سنگ‌زنی قرار دارد که تغییرات جابجایی آن به نمایش درآمده است.

میزان حداکثر جابجایی قطعه‌کار در راستای عمودی در حدود ۱/۵ میکرون و جابجایی آن در راستای افق در حدود ۳ میکرون می‌باشد که نشان دهنده توانایی بالای ابزارگیر در تحمل نیروهای اعمال شده به قطعه می‌باشد. لازم به ذکر است جابجایی‌های ذکر شده جابجایی استاتیک بوده و جابجایی‌های ناشی از حرکت فراصوتی دستگاه در آن محاسبه نشده است.

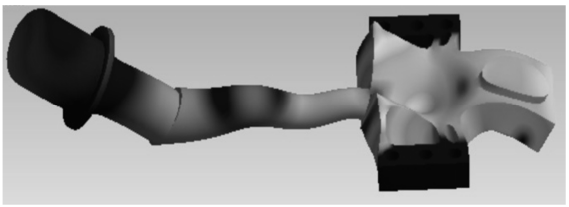
٤- آنالیز مودال

برای به‌دست آوردن جابجایی نسبی، شکل مدها و فرکانس‌های سیستم فراصوتی در تمامی مراحل طراحی از آنالیز مودال استفاده شده است. از آنالیز مودال بعد از مشخص شدن طرح بهینه توسط الگوریتم تاگوچی برای ارزیابی و اصلاحات نهایی سیستم نیز استفاده شده است. از آن‌جایی‌که سیستم دارای حرکت ارتعاشی می‌باشد نیازمند تحلیل مودال می‌باشد که در واقع با این

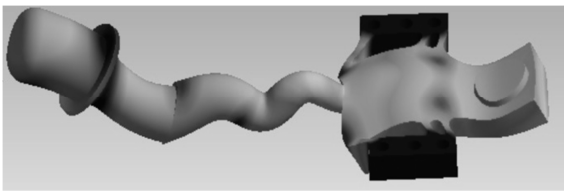


شکل ۸ جابجایی استاتیکی در حضور نیروهای سنگ‌زنی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.78.8]



شکل ۹ شکل مود ارتعاشی طولی



شکل ۱۰ شکل مود ارتعاشی خمشی

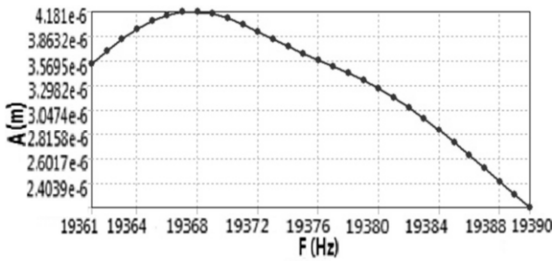
تحلیل شکل مودهای طبیعی سیستم و همچنین میزان جابجایی نسبی هرکدام یک از نقاط جسم به دست می‌آید. همان‌طور که از نتایج آنالیز مودال که در اشکال۹ و ۱۰ آمده است دیده می شود؛ جسم دارای دو شکل مود نزدیک به هم بوده که شکل ۹ شکل مود طولی در فرکانس ۱۹۹۴۲ هرتز و شکل ۱۰ شکل مود خمشی با فرکانس ۱۹۹۸۰ هرتز را نشان می‌دهد.

توجه شود که این بستر به گونه‌ای طراحی شده است که این دو شکل مود در فاصله بسیار کم فرکانسی برابر ۳۸ هرتز با هم قرار گیرند. از این ابزارگیر می‌توان برای ایجاد ارتعاش در صفحات XY و YZ استفاده کرد.

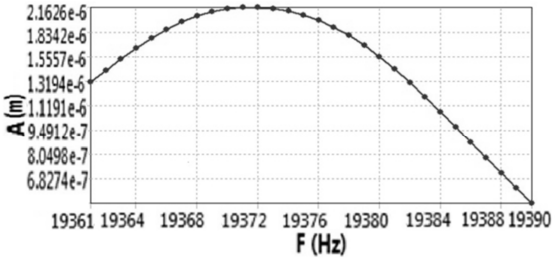
۵- آنالیز هارمونیک

از آن‌جایی که آنالیز مودال تنها توانایی شناسایی شکل مودها و فرکانس طبیعی را دارد، لذا برای اندازه‌گیری حداکثر جابجایی، جهت جابجایی و اختلاف زاویه فاز موجود در جابجایی‌ها ملزم به استفاده از آنالیز هارمونیک هستیم. از طرفی در آنالیز هارمونیک توانایی مشخص کردن میزان ضریب میرایی ماده انتخاب شده در سیستم را خواهیم داشت که موجب هر چه دقیق‌تر شدن نتایج می‌شود.

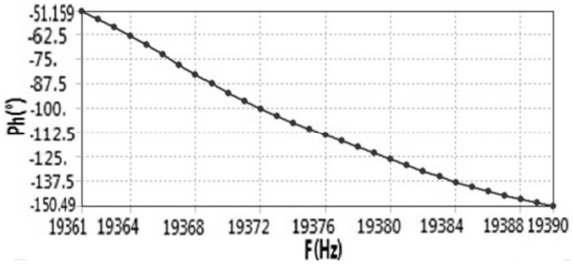
در آنالیز هارمونیک نیروهایی معادل نیروی مماسی و عمودی سنگ‌زنی و نیروی اعمالی از طرف مولد ارتعاشات فراصوتی را می‌توان به‌صورت شرایط مرزی به سیستم اعمال نمود و همچنین ضرایب میرایی مواد به‌کاررفته را نیز در نظر گرفت و نهایتاً پاسخ‌های بهتری نسبت به آنالیز مودال به‌دست آورد. با توجه به نتایج آنالیز مودال دو شکل مود عمود بر هم با یکدیگر اختلاف فرکانسی در حدود ۳۸ هرتز دارند. ماکزیمم جابجایی در جهت Z برابر ۵ میکرون و ماکزیمم جابجایی در جهت Y حدود ۲ میکرون می‌باشد که نتایج آن در اشکال ۱۱ و ۱۲ آمده است. از طرفی با توجه به اشکال ۱۳ و ۱۴



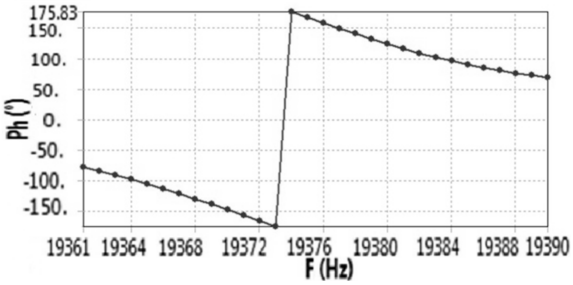
شکل ۱۱ تغییرات جابجایی قطعه کار در جهت طولی در فرکانس های مختلف در حضور نیروی هارمونیک



شکل ۱۲ تغییرات جابجایی قطعه کار در جهت عرضی در فرکانس های مختلف در حضور نیروی هارمونیک



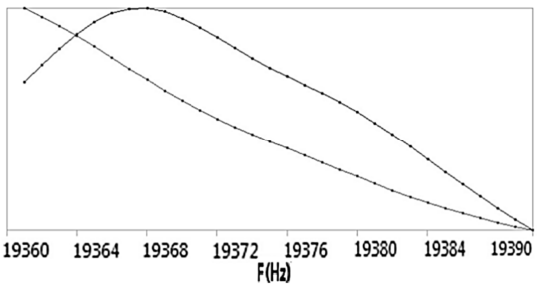
شکل ۱۳ تغییرات زاویه فاز قطعه کار در جهت طولی در فرکانس های مختلف در حضور نیروی هارمونیک



شکل ۱۴ تغییرات زاویه فاز قطعه کار در جهت عرضی در فرکانس های مختلف در حضور نیروی هارمونیک

مشخص است که در این بازه فرکانسی، جابجایی قطعه‌کار با هم دارای اختلاف زاویه فاز بیشتر از ۵۰ (درجه بوده که در نزدیکی فرکانس ۱۹۹۶۵ هرتز این اختلاف فاز نزدیک به ۹۰ درجه می‌شود. این اختلاف زاویه فاز موجب به وجود آمدن حرکتی بیضی‌گون در قطعه‌کار می‌شود.

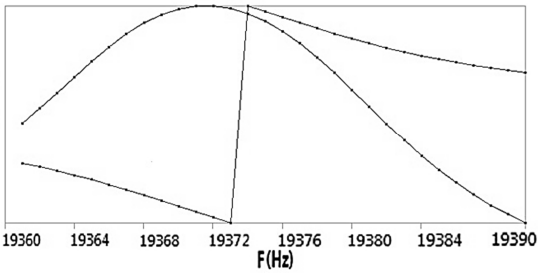
در اشکال ۱۵ و ۱۶ نمودار نرمال شده فرکانسی اختلاف فاز جابجایی نشان داده شده است. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود؛ نمودار در فرکانسی مابین دو شکل مود طبیعی دارای اختلاف فاز ۹۰ درجه می‌باشد که بهترین شرایط برای ایجاد سنگ‌زنی در حضور ارتعاش فراصوتی دوبعدی فراهم می‌شود.



شکل ۱۵ نمودار نرمال شده جابجایی تغییر فاز رای جابجایی در جهت طولی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.78.8]



شکل ۱۶ نمودار نرمال شده جابجایی تغییر فاز برای جابجایی در جهت عرضی

در این حالت جابجایی جسم در این بازه فرکانسی از دو شکل مود طبیعی کمتر می‌باشد. بدین‌صورت حرکت یک‌بعدی ارتعاشی مولد پیزوالکتریک به‌وسیله یک قطعه‌گیر طراحی شده تبدیل به حرکت دوبعدی بر روی قطعه می‌شود.

٦- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به روند طراحی و شبیه‌سازی یک قطعه‌گیر پرداخته شده است که توانمندی آن را دارد که حرکت یک‌بعدی مولد پیزوالکتریک را به حرکت دوبعدی بیضوی شکل تبدیل کند. بدین منظور از یک طرح ابتکاری و با توجه به اصل تغییرات فاز در محدوده شکل مود طبیعی به‌گونه‌ای استفاده شده است که فرکانس ارتعاش را در محدوده بازه فرکانسی بین دو فرکانس طبیعی جسم که عمود بر هستند، قرار داده می‌شود. ازآن‌جایی‌که دو شکل مود در فاصله نزدیک فرکانسی به هم قرار دارند در صورت وجود ارتعاش در این بازه ارتعاشی موجب تحریک شدن هر دو شکل مود می‌شوند. از طرفی دو شکل مود نیز با یکدیگر دارای یک اختلاف زاویه فاز می‌باشد که موجب به وجود آمدن حرکت دوبعدی در قطعه‌کار می‌شود.

۷- مراجع

[1] Ebrahimpor.r, *study of miling force in eiptical ultrasonic Vibration assisted Miling*, Thesis, Sharif University Of Technology, 1390. (In Persian)

[2] C. Ma, E. Shamoto, T. Moriwaki, L. Wang, tudy of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture 44*, pp. 1305–1310, 2004.

[3] X. Li, D. Zhang, Ultrasonic elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precision cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 180, No. 1–3, pp. 91-95, 12/1/, 2006.

[4] Z. Liang, Y. Wu, X. Wang, W. Zhao, A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in monocrystal silicon machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 8, pp. 728-736, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.78.8]