



## بررسی تجربی اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر روی نیروی اصطکاک لغزشی در جهت طولی

داود شاهقلیان قهفرخی<sup>1</sup>، محمود سلیمی<sup>2\*</sup>، محمود فرزین<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\*اصفهان، کدپستی 8415683111، salimi@cc.iut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 خرداد 1394

پذیرش: 22 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

بررسی تجربی

ارتعاشات آلتراسونیک

نیروی اصطکاک لغزشی

سیستم آزمون

### چکیده

زمانی که دو جسم روی سطح مشترکی لغزش می‌کنند، زبری‌های آن‌ها با یکدیگر درگیر شده و اصطکاک را بوجود می‌آورند. با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به یکی از این دو جسم درگیر، نیروی اصطکاک لغزشی بین دو جسم کاهش می‌یابد. این خاصیت در فرآیندهای شکل‌دهی و ماشین کاری کاربرد بسیار زیادی دارد. در این تحقیق به بررسی تجربی اثر ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی بر روی نیروی اصطکاک پرداخته شده است. برای این منظور سیستم آزمون طراحی و ساخته شد. اجزای اصلی این سیستم آزمون شامل ژنراتور، ترانسدیوسر، متمرکز کننده، جسم درگیر اول و جسم درگیر دوم می‌باشد. برای بررسی اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی بر روی نیروی اصطکاک، سیستم آزمون بر روی دستگاه ماشین تراش نصب گردید و آزمایش‌ها برای 8 نوع شرایط عملکردی انجام گرفت. در ادامه اثر هر یک از پارامترهای سرعت امواج آلتراسونیک، زبری و جنس سطوح در حال تماس بر میزان کاهش نیروی اصطکاک در اثر اضافه شدن ارتعاشات آلتراسونیک بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که گستره کاهش نیروی اصطکاک در اثر اضافه شدن ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی برای شرایط عملکردی مختلف بین 40 تا 100 درصد می‌باشد همچنین با افزایش سرعت امواج آلتراسونیک نیروی اصطکاک بطور چشم‌گیری کاهش می‌یابد بطوری که با افزایش قابل توجه سرعت می‌توان نیروی اصطکاک بین دو جسم را به صفر رسانید. نتایج همچنین نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک در سطحی که زبری کمتری دارا می‌باشد، کاهش بیشتری دارد و سطوح آلومینیوم-آلومینیوم، قابلیت کاهش نیروی اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح آلومینیوم - فولاد دارند.

## Experimental study of the effect of ultrasonic vibrations on sliding friction force in longitudinal direction

Davoud Shahgholian Ghahfarokhi, Mahmoud Salimi\*, Mahmoud Farzin

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 8415683111, Isfahan, salimi@cc.iut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 May 2015

Accepted 13 July 2015

Available Online 15 August 2015

Keywords:

Experimental Study

Ultrasonic Vibrations

Sliding Friction Force

Experimental Set-up

### ABSTRACT

When two bodies slide on each other the asperities are engaged and friction is created. By superposing ultrasonic vibrations to one of the bodies, the friction force is reduced. This phenomenon is widely used in metal forming and metal cutting. In this research, experimental study of the effect of ultrasonic vibrations has been on sliding friction force in longitudinal direction. For this purpose, set-up was designed and fabricated. The main components of the set-up, including generators, transducers, first engaged body and second engaged body. The Set-up was installed on the machine lathe for investigation of the effect of ultrasonic vibrations on sliding friction force in longitudinal direction. The experiments were performed for eight different performance conditions. Next, the effect of each parameter ultrasonic wave velocity, roughness and material of contact surfaces were studied on the reduction of the friction force due to addition of ultrasonic vibrations. The result show that range of reduction friction force due to addition of ultrasonic vibrations in longitudinal direction is between 40 to 100% for the different performance conditions; also, friction force significantly reduced by increasing ultrasonic wave velocity so that friction force can be brought to zero by significant increase in ultrasonic wave velocity. The results also show that friction force has a greater reduction for the surface that has less roughness. Aluminum-aluminum surfaces can achieve reduction friction force from aluminum - steel surfaces.

### 1- مقدمه

فراسونیک<sup>1</sup> یا فروصوت می‌گویند و به امواجی که فرکانس نوساناتش بیشتر از

انسان قادر است موج‌های صوتی با فرکانس 20 تا 20000 سیکل در ثانیه را بشنود. موج‌های صوتی با فرکانس کمتر از 20 سیکل در ثانیه را این

1- Infrasonic

Please cite this article using:

D. Shahgholian Ghahfarokhi, M. Salimi, M. Farzin, Experimental study of the effect of ultrasonic vibrations on sliding friction force in longitudinal direction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 187-198, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.9.22.4]

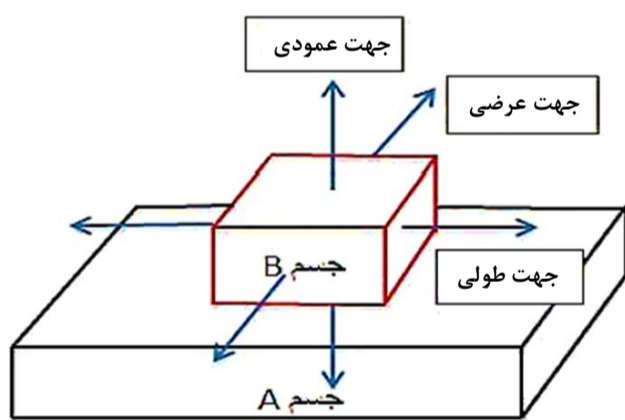
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-07]

زبری‌ها در حضور نوسانات آلتراسونیک در جهت طولی و عرضی ارائه کردند. شاهقلیان و سلیمی [14] به مدل‌سازی اصطکاک لغزشی در حضور نوسانات آلتراسونیک پرداختند آن‌ها یک مدل الاستیک-پلاستیک از تماس سطوح ارائه دادند که قابلیت پیش‌بینی نیروی اصطکاک بین دو جسم در حضور نوسانات آلتراسونیک را دارا می‌باشد. آن‌ها نتایج مدل ارائه شده را با نتایج تجربی مقایسه کردند و بیان داشتند که اختلاف مدل آن‌ها کمتر از 10 درصد می‌باشد.

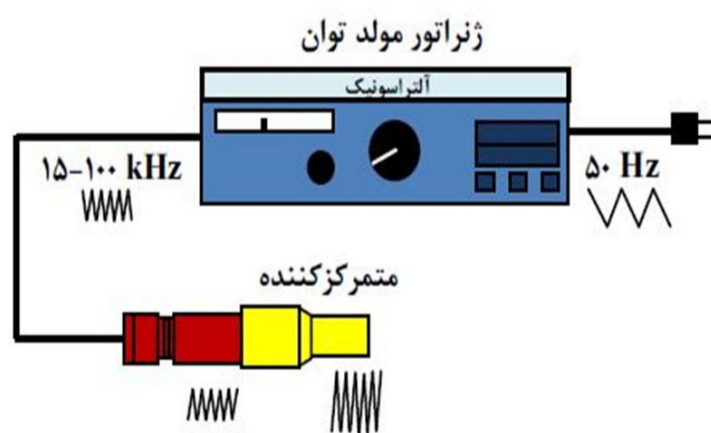
همان‌گونه که در ابتدای این تحقیق اشاره شد، اعمال نوسانات آلتراسونیک به یکی از دو جسم درگیر، باعث کاهش نیروی اصطکاک بین دو جسم می‌گردد که این خاصیت دارای کاربردهای صنعتی فراوانی می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تجربی اثر ارتعاشات آلتراسونیک بر روی نیرو و ضریب اصطکاک لغزشی در جهت طولی پرداخته خواهد شد. اثر جنس، زبری و تغییر سرعت ارتعاشات آلتراسونیک که ناشی از تغییر دامنه ارتعاشات می‌باشد، بررسی خواهد شد. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر ارتعاشات آلتراسونیک طولی بر روی نیرو و ضریب اصطکاک بین دو جسم در حال تماس می‌باشد. برای این منظور تجهیزات و سیستم آزمونی، طراحی و ساخته می‌شود تا بتوان آزمایش‌های مورد نیاز را با آن انجام داد.

## 2- شناخت اجزاء سیستم آلتراسونیک

برای تولید و انتقال امواج آلتراسونیک به ابزار یا قطعه کار مورد نظر، نیاز به طراحی، کاربرد و استفاده از تجهیزات خاصی می‌باشد. در شکل 2 مجموعه‌ای از یک سیستم آلتراسونیک نشان داده شده است. بطور کلی اجزاء سیستم آلتراسونیک شامل ژنراتور مولد توان<sup>3</sup>، ترانسدایوسر<sup>4</sup> و متمرکز کننده<sup>5</sup> (هورن) می‌باشد.



شکل 1 سه جهت اعمال نوسانات آلتراسونیک به جسم



شکل 2 شماتیک یک سیستم آلتراسونیک [16]

20 کیلو هرتز باشد امواج آلتراسونیک<sup>1</sup> یا مافوق صوت گویند. این امواج دارای دامنه کم و فرکانس نوسانات بالایی می‌باشند که دارای کاربردهای گوناگونی در فرآیندهای شکل‌دهی و ماشین‌کاری می‌باشد.

نوسانات آلتراسونیک بین دو جسم همانند یک روانکار جامد عمل می‌کند و باعث کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی می‌شود به همین دلیل کاربردهای بسیاری در فرآیندهای شکل‌دهی دارا می‌باشد که در این زمینه تحقیقات فراوانی انجام گرفته است.

موروکاوا و جین [1] به بررسی کاهش نیروی مورد نیاز در فرآیند کشش سیم پرداختند. هانگ و همکارانش [2] یک تحلیل عددی برای فرآیند کله‌زنی با امواج آلتراسونیک ارائه کردند. اکبری موسوی و همکارانش [3] کاهش 30 درصدی در نیروی اصطکاک در فرآیند اکستروژن توأم با آلتراسونیک را نشان دادند. ژائو و همکارانش [4] به تأثیر نوسانات بر روی فرآیند فشار در ابعاد میکرو پرداختند. افتخار شهری و همکارانش [5] به بررسی تحلیلی و عددی برای فرآیند هیدروفورمینگ لوله در حضور ارتعاشات آلتراسونیک پرداختند. پاک و همکارانش [6] به بررسی اثر اعمال نوسانات آلتراسونیک به ابزار در فرآیند شکل‌دهی افزایشی ورق‌های فلزی پرداختند براساس نتایج تجربی، آن‌ها بیان داشتند که نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی بین 33 تا 63 درصد کاهش یافته است. کریستیان بانجت [7] به بررسی تأثیر نوسانات آلتراسونیک بر روی میکرو-اکستروژن پرداخت و بیان داشت که زمانی که نوسانات آلتراسونیک به فرآیند میکرو-اکستروژن اضافه شود، نیروی شکل‌دهی بین 10 تا 25 درصد کاهش می‌یابد. همچنین بهبود کیفیت سطح توسط این نوسانات را می‌توان از نتایج دیگر کار او برشمرد. رسولی و همکارانش [8] تأثیر نوسانات آلتراسونیک بر روی فرآیند شکل‌دهی چرخشی لوله را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها به بررسی نیروی شکل‌دهی و خصوصیات قطعه کار در اثر ارتعاشات طولی فراصوتی در راستای محوری قطعه کار پرداختند و بیان کردند، تغییرات نیرو را می‌توان به اثرات سطحی مرتبط با تغییر سطح تماس، تغییر شرایط اصطکاک سطوح و کار پلاستیک اعمال شده بر روی سطح نسبت داد.

زمانی که سطوح بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند بین آن‌ها اصطکاک دینامیکی به وجود می‌آید اگر به سطوح در حال تماس بصورت میکرو نگرسته شود، دیده می‌شود که سطوح دارای زبری<sup>2</sup> هستند و در واقع این زبری‌ها هستند که با یکدیگر درگیر شده و اصطکاک را به وجود می‌آورند. تحقیقات نشان می‌دهد اگر به یکی از دو جسمی که بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند، نوسانات آلتراسونیک داده شود، باعث کاهش نیروی اصطکاک می‌گردد. همان‌گونه که در شکل 1 دیده می‌شود می‌توان در سه جهت طولی، عرضی و عمودی به یک جسم نوسان وارد کرد.

لیتمن و همکارانش بصورت تئوری [9] و تجربی [10] تأثیر نوسانات آلتراسونیک را بر روی ضریب اصطکاک در جهت طولی و جهت عرضی بررسی کردند و رابطه بین سرعت نسبی دو جسم و ضریب اصطکاک به دست آوردند. کومار و هوچینگ [11] نیز بصورت تجربی تأثیر نوسانات را در جهت طولی و عرضی بررسی کرد و بیان کرد که نوسانات طولی تأثیر بیشتری در کاهش نیروی اصطکاک نسبت به نوسانات عرضی دارند. پوپوف و همکارانش [12] بصورت تجربی تأثیر نوسانات را برای گستره‌ای از مواد بررسی کرد و بیان کرد که این نوسانات تأثیر کمتری بر روی مواد نرم نسبت به مواد ترد دارا می‌باشند. دانگ و داپینیو [13] یک مدل الاستیک-پلاستیک از تغییر شکل

3- Generator  
4- Transducer  
5- Horn

1- Ultrasonic  
2- Asperity

شبیه‌سازی اجزاء محدود و از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

### 3-3-2- انتخاب شکل متمرکز کننده

شکل متمرکز کننده استفاده شده در این تحقیق به صورت ترکیبی از متمرکز کننده استوانه<sup>1</sup> و مخروطی<sup>2</sup> در نظر گرفته شد تا هم دارای مزایای متمرکز کننده استوانه‌ای و هم دارای مزایای متمرکز کننده مخروطی باشد. به عبارت دیگر شکل در نظر گرفته شده باعث تقویت دامنه در خروجی، انتقال خوب ارتعاشات و توزیع یکنواخت‌تر تنش می‌باشد [18].

### 3-3-3- انتخاب جنس متمرکز کننده

در یک مجموعه ارتعاشی انرژی آلتراسونیک از ترانسدیوسر به متمرکز کننده منتقل می‌شود. از طرفی دیگر انرژی صوتی هنگام عبور از یک سطح به سطحی دیگر کاملاً منتقل نشده، مقداری از آن بازتاب و مقداری هم در بین سطح مشترک دو ماده تلف می‌شود پس اولین نتیجه‌ای که گرفته می‌شود این است که هر چه جنس متمرکز کننده به جنس ترانسدیوسر نزدیک‌تر باشد، انرژی بیشتری به متمرکز کننده منتقل خواهد شد. همچنین یکی از وظایف اصلی متمرکز کننده انتقال ارتعاشات آلتراسونیک می‌باشد. پس باید جنس متمرکز کننده به گونه‌ای انتخاب گردد که دمپینگ ارتعاشی آن بسیار کم بوده و در نهایت منجر به اتلاف انرژی نشود بطور مثال چدن یک انتخاب ضعیفی می‌باشد. دلیل آن این است که در چدن ذرات ریز گرافیت باعث جذب انرژی صوتی می‌گردد.

از بحث‌های بالا نتیجه گرفته می‌شود که جنس متمرکز کننده باید دو خصوصیت مکانیکی و آکوستیکی خوب را با هم دارا باشد. خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت به خستگی بالا، تنش تسلیم بالا، چقرمگی شکست خوب و مقاومت به سایش خوب و خصوصیات آکوستیکی شامل اتلاف انرژی کم، میرایی ارتعاشات پایین<sup>3</sup> و سرعت صوت بالا می‌شود. محققین از جنس‌های گوناگونی مانند آلیاژهای تیتانیوم، فولاد و آلومینیوم برای ساخت متمرکز کننده‌ها استفاده کرده‌اند.

جنس متمرکز کننده استفاده شده در این تحقیق نیز آلومینیوم سری 7075 تی 6 انتخاب گردید تا با ترانسدیوسر استفاد شده در این تحقیق همجنس باشد. همچنین جسم بسته شده بر سر متمرکز کننده نیز از همین جنس انتخاب گردید که توسط یک پیچ مغزی فولادی به متمرکز کننده بسته می‌شود. که خواص مکانیکی آن‌ها در جدول 1 آمده است.

### 3-3-4- انتخاب بسامد متمرکز کننده

بسامد متمرکز کننده<sup>4</sup> بسامدی است که در آن بسامد، متمرکز کننده به حالت تشدید<sup>5</sup> خواهد رسید. در انتخاب بسامد تشدید متمرکز کننده باید به دو نکته توجه کرد: (1) بسامد انتخابی در محدوده بسامد دستگاه آلتراسونیک باشد. بطور مثال اگر به ترتیب حداقل و حداکثر بسامد تولیدی توسط ژنراتور 5 کیلوهرتز و 70 کیلوهرتز باشد، نمی‌توان متمرکز کننده‌ای با بسامد کمتر از 5 کیلوهرتز و بیشتر از 70 کیلوهرتز طراحی کرد. (2) بسامد تشدید متمرکز کننده در محدوده بسامد ترانسدیوسر قرار داشته باشد. بازه بسامد ترانسدیوسر مورد استفاده در این مطالعه بین 19/5 تا 20/5 کیلوهرتز قرار دارد و باید طراحی به گونه‌ای باشد که بسامد تشدید متمرکز کننده در این بازه قرار گیرد.

ژنراتور مولد توان ولتاژ فرکانس برق شهری (50 Hz) را به ولتاژ فرکانس بالا (15-100 kHz) تبدیل می‌کند. ولتاژ فرکانس بالا جهت تحریک مکانیکی ترانسدیوسر استفاده می‌شود. ترانسدیوسر آلتراسونیک انرژی الکتریکی دریافت شده از ژنراتور را به نوسانات مکانیکی تبدیل می‌کند سپس ارتعاشات مکانیکی انتهای ترانسدیوسر توسط متمرکز کننده به قطعه یا ابزار مورد نظر انتقال می‌یابد [16,15].

## 3- طراحی سیستم آزمون و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی

### 3-1- ژنراتور

ژنراتور مورد استفاده در این تحقیق دارای 3000 وات توان بوده و محدوده‌ی بسامد آن بین 5 تا 70 کیلوهرتز می‌باشد. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این ژنراتور اسکن کردن ابزار ارتعاشی در محدوده بسامد مورد نظر می‌باشد. در واقع با اسکن کردن ابزار ارتعاشی بسامد تشدید مجموعه قبل از استارت ژنراتور بدست می‌آید. این قابلیت باعث می‌شود از وجود هرگونه مشکل قبل از راه‌اندازی کامل ژنراتور باخبر شده و از صدمات احتمالی وارده به مجموعه جلوگیری شود. این ژنراتور با نرم‌افزار لب‌ویو کنترل می‌گردد.

### 3-2- ترانسدیوسر

به دلیل نیاز به بسامدهای آلتراسونیک از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک استفاده شده است. این ترانسدیوسر قادر است بسامد 19/5 تا 20/5 کیلوهرتز را برای فرآیند ارتعاشی فراهم کند. این ترانسدیوسر ساخت شرکت سوئیسی MPI با توان 1200 وات می‌باشد.

### 3-3- طراحی متمرکز کننده

بخش مهمی از یک سیستم آلتراسونیک، تمرکز دهنده یا انتقال دهنده ارتعاشات به ابزار است که با توجه به شرایط مسئله طراحی می‌گردد و دارای شکل‌های گوناگونی می‌باشد.

### 3-3-1- روش طراحی متمرکز کننده

سه روش عمده و مهم برای طراحی متمرکز کننده وجود دارد که عبارتند از روش تحلیلی، روش تجربی و روش عددی.

روش تحلیلی روشی است که بر اساس حل معادله موج پایه‌گذاری شده است. از این روش بطور محدود برای طراحی متمرکز کننده استفاده می‌گردد. حل معادلات بسیار پیچیده و وقت‌گیر از معایب چشم‌گیر این روش می‌باشد. همچنین حل معادلات برای شکل پروفیل‌های ساده امکان‌پذیر می‌باشد. روش تجربی بر اساس ساخت و تست متمرکز کننده توسط ژنراتور می‌باشد. این روش علاوه بر وقت‌گیر بودن و دقت نامناسب، در صورتی که مجموعه ارتعاشی ما به غیر از متمرکز کننده شامل قطعات دیگری نیز باشد، رسیدن به بسامد طراحی مورد نظر برای کل مجموعه ارتعاشی بسیار مشکل می‌باشد. روش عددی یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روش‌ها برای طراحی متمرکز کننده می‌باشد. با این روش می‌توان متمرکز کننده‌ها با ابعاد و شکل پروفیل‌های متفاوت و ترکیبی از آن‌ها را آنالیز مودال کرد. این روش از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده در حالی که نسبت به سایر روش‌ها راحت‌تر و وقت کمتری را می‌گیرد [17].

بنابراین با توجه به موارد فوق و با توجه به اینکه متمرکز کننده استفاده شده در این تحقیق دارای شکل پیچیده‌ای است، نمی‌توان از روش تحلیلی و روش آزمایشگاهی استفاده کرد. پس برای تحلیل متمرکز کننده از

1- Cylindricalhorn  
2- Conical horn  
3- Low Oscillation Damping  
4- Horn Frequency  
5- Resonance

جدول 1 خواص مکانیکی متمرکز کننده و دیگر اجزاء

نام	جنس	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسن
متمرکز کننده	آلومینیوم	2810	71/7	0/33
پیچ مغزی	فولاد	7800	210	0/29
جسم درگیر اول	آلومینیوم	2810	71/7	0/33

در صورت قرار نگرفتن در این بازه، بازده متمرکز کننده بعنوان یک تقویت کننده پایین خواهد آمد. حداکثر بازده متمرکز کننده بعنوان یک تقویت کننده انرژی آلتراسونیک وقتی به دست می آید که بسامد تشدید متمرکز کننده دقیقاً با بسامد تشدید ترانسدیوسر یکسان باشد.

ذکر این نکته ضروری است که در بسیاری از موارد مجموعه ارتعاشی تنها شامل یک قطعه (متمرکز کننده) نبوده و طراح با یک مجموعه ارتعاشی شامل متمرکز کننده و چند قطعه دیگر مواجه می باشد. در این حالت باید بسامد تشدید مجموعه با هم در محدوده بسامد ترانسدیوسر قرار بگیرد. در این تحقیق از بسامد 20 کیلوهرتز مطابق با بسامد تشدید ترانسدیوسر برای طراحی استفاده شد.

### 3-3-5- محاسبه طول موج و اندازه ماکزیمم قطر متمرکز کننده و ابعاد متمرکز کننده

طول موج از تقسیم سرعت موج به بسامد طراحی بدست می آید. سرعت موج نیز بستگی به جنس ماده دارد و از جذر تقسیم مدول یانگ به چگالی ماده بدست می آید. از طول موج بدست آمده می توان برای محاسبه طول و قطر متمرکز کننده استفاده کرد. سرعت صوت از رابطه (1) به دست می آید [19]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{71.7 \times 10^9}{2813.9}} = 5047 \text{ m/s} \quad (1)$$

سپس طول موج با استفاده از رابطه (2) محاسبه می گردد [20].

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5047}{20000} = 0.252 \text{ m} = 252 \text{ mm} \quad (2)$$

پیشنهاد شده است که بزرگترین قطر متمرکز کننده از یک چهارم طول موج کوچکتر یا مساوی آن باشد. در صورت بزرگتر بودن از این مقدار ارتعاشات عرضی در متمرکز کننده قابل توجه بوده که در نهایت باعث کاهش انرژی می شود [21]. بنابراین قطر ماکزیمم متمرکز کننده از رابطه (3) به دست می آید.

$$D_{\max} = \frac{\lambda}{4} = 63 \text{ mm} \quad (3)$$

طول متمرکز کننده از  $L = n \frac{\lambda}{2}$  محاسبه خواهد شد که در آن  $n$  عددی صحیح می باشد. برای  $n=1$  و  $n=2$  به ترتیب هورن با طول نیم موج و تمام موج به دست می آید. از هر دو نوع متمرکز کننده می توان بر حسب شرایط استفاده کرد. از این رابطه در صورتی می توان استفاده کرد که ابزار ارتعاشی ما فقط شامل متمرکز کننده باشد. در صورتی که ابزار ارتعاشی شامل چند قطعه باشد (در این تحقیق ابزار ارتعاشی شامل متمرکز کننده، پیچ مغزی و قطعه بسته شده بر سر هورن می باشد) باید از نرم افزارهای اجزاء محدود برای رسیدن به ابعادی که در آن مجموعه ارتعاش طولی در بسامد مورد نظر داشته باشد، استفاده کرد ولی می توان از این ابعاد بعنوان یک مقدار اولیه در نرم افزار اجزاء محدود استفاده کرد.

### 3-3-6- شبیه سازی اجزاء محدود ابزار ارتعاشی در نرم افزار آباکوس

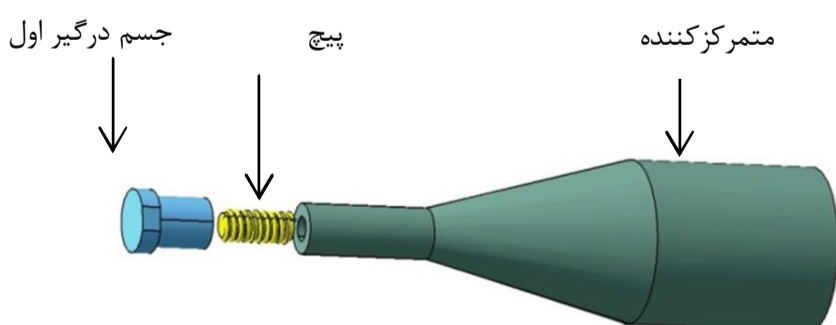
برای شبیه سازی اجزاء محدود ابزار ارتعاشی، ابتدا طرح اولیه آن مطابق شکل 3 در نرم افزار کتیا<sup>1</sup> طراحی گردید. که در این طراحی طول متمرکز کننده و جسم درگیر اول (جسم بسته شده بر سر آن) آن 252 میلی متر، قطر بزرگ متمرکز کننده 51 میلی متر و قطر کوچک متمرکز کننده 16 میلی متر در نظر گرفته شد.

برای تحلیل ابزار ارتعاشی از نرم افزار آباکوس<sup>2</sup> استفاده شد. ابتدا شکل طراحی شده در نرم افزار کتیا وارد نرم افزار آباکوس گردید و پس از تعیین مشخصات هر قطعه از لحاظ خواص مکانیکی در نرم افزار، یک مسئله خطی فرکانسی برای آن تعریف شد. برای تحلیل از مش C3D10 استفاده شد و تعداد المانها 78729 انتخاب گردید، همچنین استقلال از نوع و تعداد مش انجام شد که تغییر قابل توجهی در فرکانس تشدید نداشت. پس از اتمام تحلیل مطابق آنچه در شکل 4 دیده می شود مقدار فرکانس تشدید طولی 19966 هرتز به دست آمد.

### 3-4- گیره بندی متمرکز کننده

ارتعاش طولی متمرکز کننده به دلیل اثر پواسون باعث تغییر در ابعاد متمرکز کننده در سه جهت می شود. از طرفی برای آماده سازی یک سیستم ارتعاشی نیاز به گیره بندی سیستم یا مجموعه در نقاط خاصی می باشد که در این نقاط مجموع حرکت نداشته باشد در اصل این نقاط، نقاط تکیه گاه مجموعه می باشند. به دلیل اینکه مجموعه، در حال ارتعاش آلتراسونیک می باشد، این نقاط بایستی به دقت انتخاب شوند تا اولاً در این نقاط جابجایی وجود نداشته باشد، ثانیاً از ایجاد حرارت جلوگیری شود. چراکه انتخاب نادرست این نقاط علاوه بر اینکه مودهای ارتعاشی را تغییر می دهد، باعث گرم شدن بسیار شدید سیستم شده و موجب خرابی ترانسدیوسر نیز می شود. برای پیدا کردن این نقاط دو روش وجود دارد، یا می توان به کمک نرم افزارهای اجزاء محدود این نقاط را تعیین کرد و یا می توان به کمک آزمایش های بعد از ساخت متمرکز کننده و با استفاده از آزمایش پاشش پودر نقاط را تعیین نمود. ولی به دلیل دقت بالای نرم افزارهای اجزاء محدود و مقرون به صرفه بودن ساخت چندین متمرکز کننده، در این تحقیق برای پیدا کردن این نقاط از نرم افزار آباکوس استفاده گردید که شکل 5 منحنی تغییر طول متمرکز کننده را در راستای محور متمرکز کننده نشان می دهد.

در شکل 5 مشاهده می شود نقاطی وجود دارد که ارتعاش در آن در تمام جهت صفر می باشد. این مکانها به نقاط گره معروف هستند که این گره ها در شکل مشخص می باشند. گره اولی در فاصله 63 میلی متری و گره دومی در



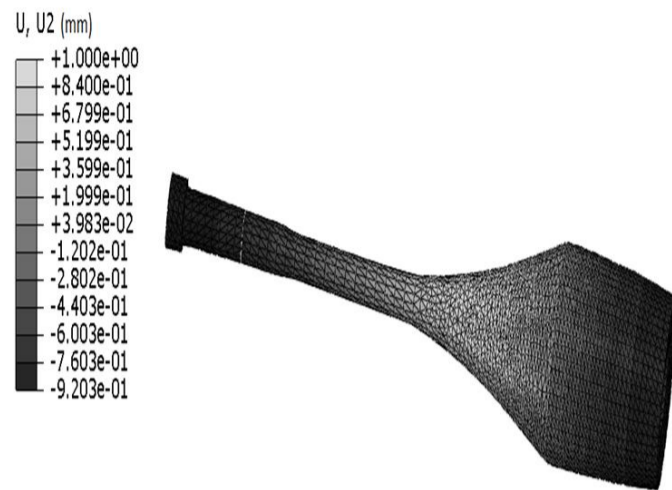
شکل 3 ابزار ارتعاشی طراحی شده در نرم افزار کتیا

1- Catia  
2- Abaqus





شکل 6 تحلیل نهایی ابزار ارتعاشی به منظور محاسبه فرکانس تشدید



شکل 4 تحلیل ابزار ارتعاشی به منظور یافتن فرکانس تشدید

بوجود می‌آید. نیروی اصطکاک بوجود آمده بین دو جسم توسط دینامومتر اندازه‌گیری می‌گردد. شکل 7 بطور شماتیک این تماس را نشان داده است.

### 3-7- دینامومتر

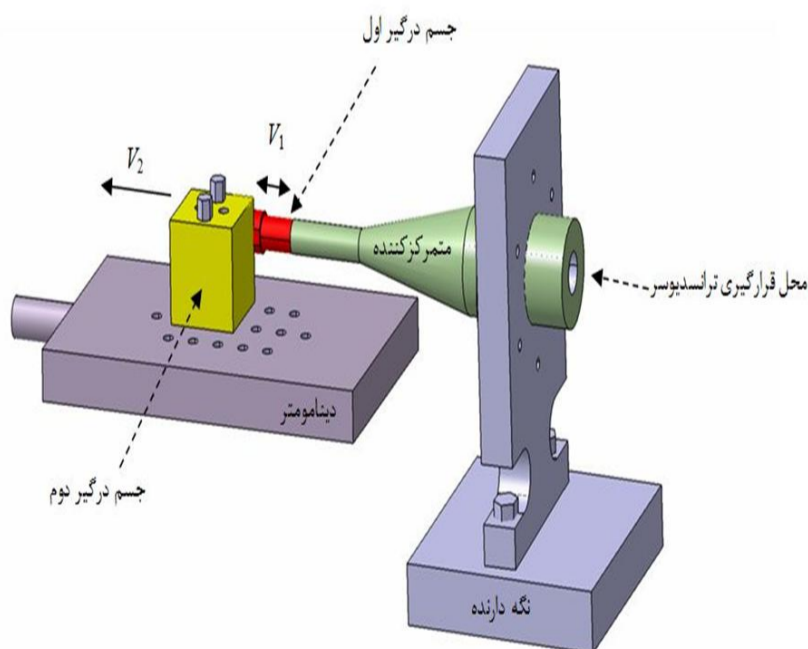
دینامومتر برای اندازه‌گیری نیرو در سه جهت طولی، عرضی و عمودی بکار می‌رود. دینامومتر استفاده شده در این تحقیق ساخت شرکت کیستلر می‌باشد. این دینامومتر با نرم‌افزار داینووار<sup>1</sup> کار می‌کند. در این تحقیق دینامومتر نیروی عمودی و نیروی اصطکاک با و بدون نوسانات آلتراسونیک بین دو جسم را اندازه‌گیری می‌کند.

### 3-8- نگه‌دارنده‌های متمرکز کننده

به منظور نصب و موقعیت‌دهی تجهیزات ساخته شده بر روی دستگاه تراش، نیاز به ابزاری برای نگه داشتن متمرکز کننده یا همان ابزار ارتعاشی بود که این نگه‌دارنده‌ها طراحی و ساخته شدند. لذا نگه‌دارنده پس از تعیین اندازه‌ها و موقعیت مورد نظر ساخته شد، به نحویکه ابزار ارتعاشی به آن پیچ شده و در محل ابزارگیر دستگاه تراش نصب گردید (شکل 8).

### 3-9- تجهیزات استفاده شده دیگر

به منظور محافظت از ترانسدیوسر در مقابل رطوبت و همچنین برای خنک سازی آن در حین فرآیند که یک عمل ضروری می‌باشد، محافظی برای این تجهیز ساخته شده است. این محافظ از جنس پلی‌آمید بوده و به نگه‌دارنده متمرکز کننده، پیچ می‌شود. با تعبیه ورودی‌هایی برای عبور جریان برق و



شکل 7 شماتیک درگیری جسم اول و دوم

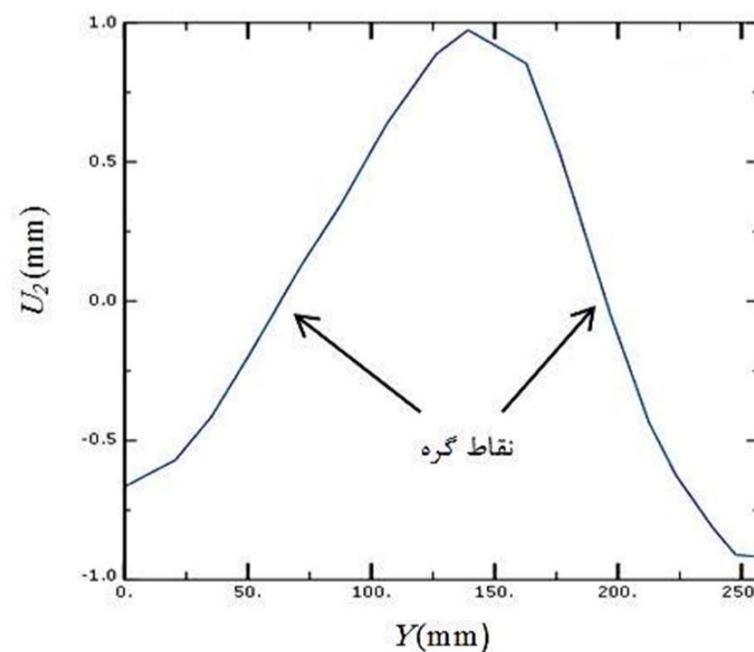
فاصله 193 میلی‌متری از ابتدای متمرکز کننده قرار دارند. در گره اولی برای متمرکز کننده فلنچی ایجاد گردید تا ابزار هم دارای گیربندی باشد و محل گیربندی بر روی متمرکز کننده به صورت یکپارچه ساخته شد. سعی شد تا حد امکان گره دوم در نزدیکی محل اتصال جسم به متمرکز کننده قرار گیرد. بنابراین طراحی نهایی ابزار ارتعاشی دوباره در نرم‌افزار آباکوس وارد شده و آنالیز مودال انجام گرفت. فرکانس تشدید جدید ابزار ارتعاشی که شامل متمرکز کننده و جسم درگیر اول در سر آن می‌باشد همانگونه که در شکل 6 مشاهده می‌شود برابر 19976 هرتز می‌باشد.

### 3-5- جسم درگیر اول

منظور از جسم درگیر اول همان جسم بسته شده بر سر متمرکز کننده می‌باشد که در این تحقیق از عبارت جسم درگیر اول استفاده می‌گردد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد جنس جسم درگیر اول آلومینیوم می‌باشد. این جسم توسط یک پیچ مغزی به سر متمرکز کننده بسته می‌شود و با مرتعش شدن متمرکز کننده آن نیز به ارتعاش درمی‌آید (شکل 7).

### 3-6- جسم درگیر دوم

جسم درگیر دوم جسمی است که با جسم درگیر اول تماس داده می‌شود تا اصطکاک، بین آن‌ها به وجود آید. این جسم بر روی دینامومتر بسته شده و سپس دینامومتر توسط فیکسچری بر روی ماشین تراش بسته می‌شود. زمانی که جسم اول مرتعش شده، جسم دوم نیز توسط ماشین تراش دچار حرکت طولی شده و با جسم اول درگیر می‌شود و اصطکاک بین جسم اول و دوم



شکل 5 نمودار تغییر طول ابزار ارتعاشی در راستای طولی



معرف زاویه فاز می‌باشد. فرکانس تشدید بدست آمده از نرم افزار برابر 19976 می‌باشد که مقدار تجربی بدست آمده از ژنراتور برابر 19920 می‌باشد. که اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند که این اختلاف بسیار کم نشان دهنده دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد. علت این اختلاف کم را نیز می‌توان، عدم در نظر گرفتن اتلاف انرژی بین سطوح تماس در نرم افزار یا عدم رعایت تفرانس موجود در ساخت متمرکز کننده دانست.

#### 5- نحوه انجام آزمایش

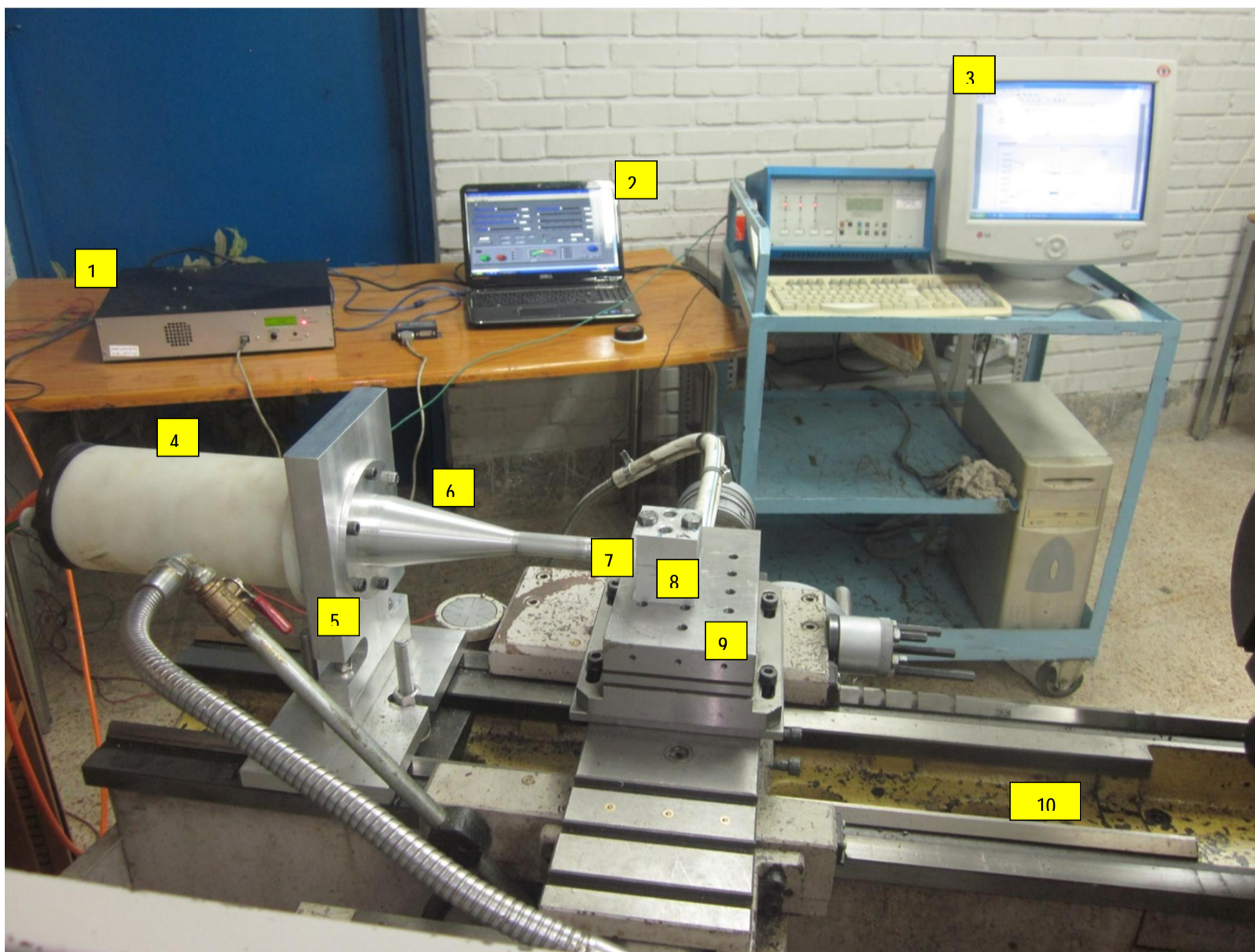
نحوه انجام آزمایش مطابق شکل 8 بدین گونه می‌باشد که ابتدا ماشین تراش را روشن کرده و آن را در حالت اتومات در جهت طولی با یک پیشروی مشخص قرار می‌دهیم. با اتومات قرار دادن ماشین تراش جسم درگیر دوم که بر روی دینامومتر بسته شده است، شروع به حرکت کرده و با جسم درگیر اول تماس پیدا می‌کند. اجازه داده می‌شود تا چند ثانیه این تماس به طول انجامد چرا که در این حالت نیروی اصطکاک بین دو جسم توسط دینامومتر بدست خواهد آمد. پس از گذشت این چند ثانیه، ژنراتور را روشن می‌کنیم تا جسم درگیر اول شروع به ارتعاش بکند. همزمان که جسم اول در حال ارتعاش طولی می‌باشد با جسم درگیر دوم نیز در حال تماس می‌باشد و جسم درگیر دوم از مقابل آن می‌گذرد. بنابراین در این حالت می‌توان نیروی اصطکاک بین دو جسم در حضور ارتعاشات آلتراسونیک را اندازه‌گیری کرد. پس با انجام این

جریان هوا در این محافظ، عمل خنک‌سازی و برق‌رسانی ترانسدیوسر انجام می‌گیرد. همچنین برای تأمین هوای تمیز و عاری از هرگونه مواد زائد و همچنین ثابت نگه داشتن فشار آن در مقدار مناسب، از تجهیز تنظیم کننده فشار هوا استفاده شده است. این تجهیز با جداسازی هرگونه آلودگی از هوا، ترانسدیوسر مورد استفاد را با جریان هوای کم فشار در دمای مناسب نگه می‌دارد. برای اندازه‌گیری دامنه نوسانات آلتراسونیک از ویبرومتر لیزری استفاده شد که مدل دستگاه استفاده شده در این تحقیق VH 1664 می‌باشد.

#### 4- نصب سیستم آزمون بر روی ماشین ابزار

تجهیزات طراحی و ساخته شده مطابق شکل 8 بر روی ماشین تراش نصب گردیدند. ماشین تراش مذکور ساخت شرکت آژاکس و مدل آن AI-725 می‌باشد. نمای کلی سیستم آزمون در شکل 8 آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، جسم درگیر دوم به کمک حرکت افقی ساپورت ماشین تراش حرکت داده می‌شود و جسم اول نیز مرتعش می‌شود با تماس این دو جسم نیروی اصطکاک توسط دینامومتر اندازه‌گیری می‌گردد.

پس از آنکه ابزار ارتعاشی ساخته شد و بر روی دستگاه تراش نصب گردید فرکانس تشدید آن توسط ژنراتور بدست آمد. مقدار فرکانس تشدید بدست آمده از ژنراتور مطابق شکل 9 برابر 19920 هرتز می‌باشد. محور افقی شکل 9 نشان دهنده فرکانس ابزار ارتعاشی می‌باشد و محور عمودی این شکل

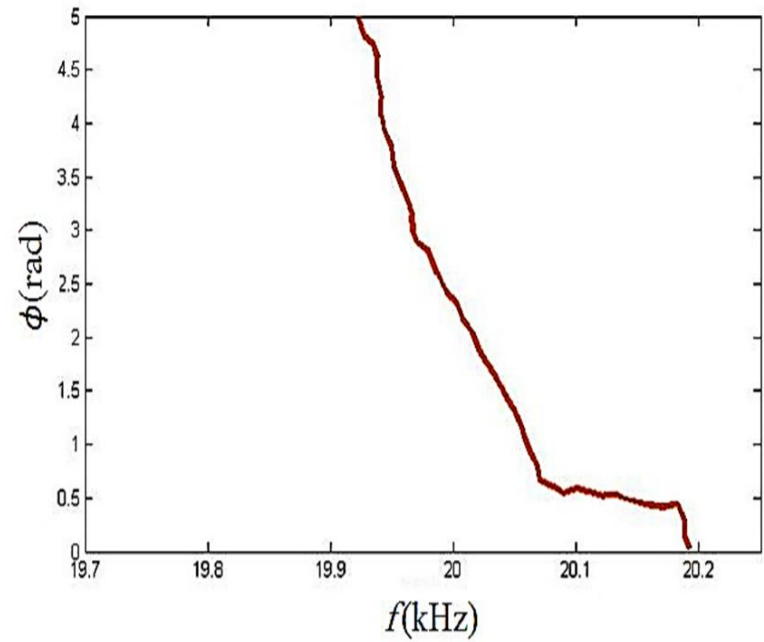


شکل 8 نمای کلی سیستم آزمون

1- ژنراتور 2- نرم‌افزار کنترل ژنراتور 3- نرم‌افزار نمایش و ثبت نیرو 4- محافظ ترانسدیوسر 5- نگه‌دارنده متمرکزکننده 6- متمرکزکننده 7- جسم درگیر اول 8- جسم درگیر دوم 9- دینامومتر 10- ماشین تراش

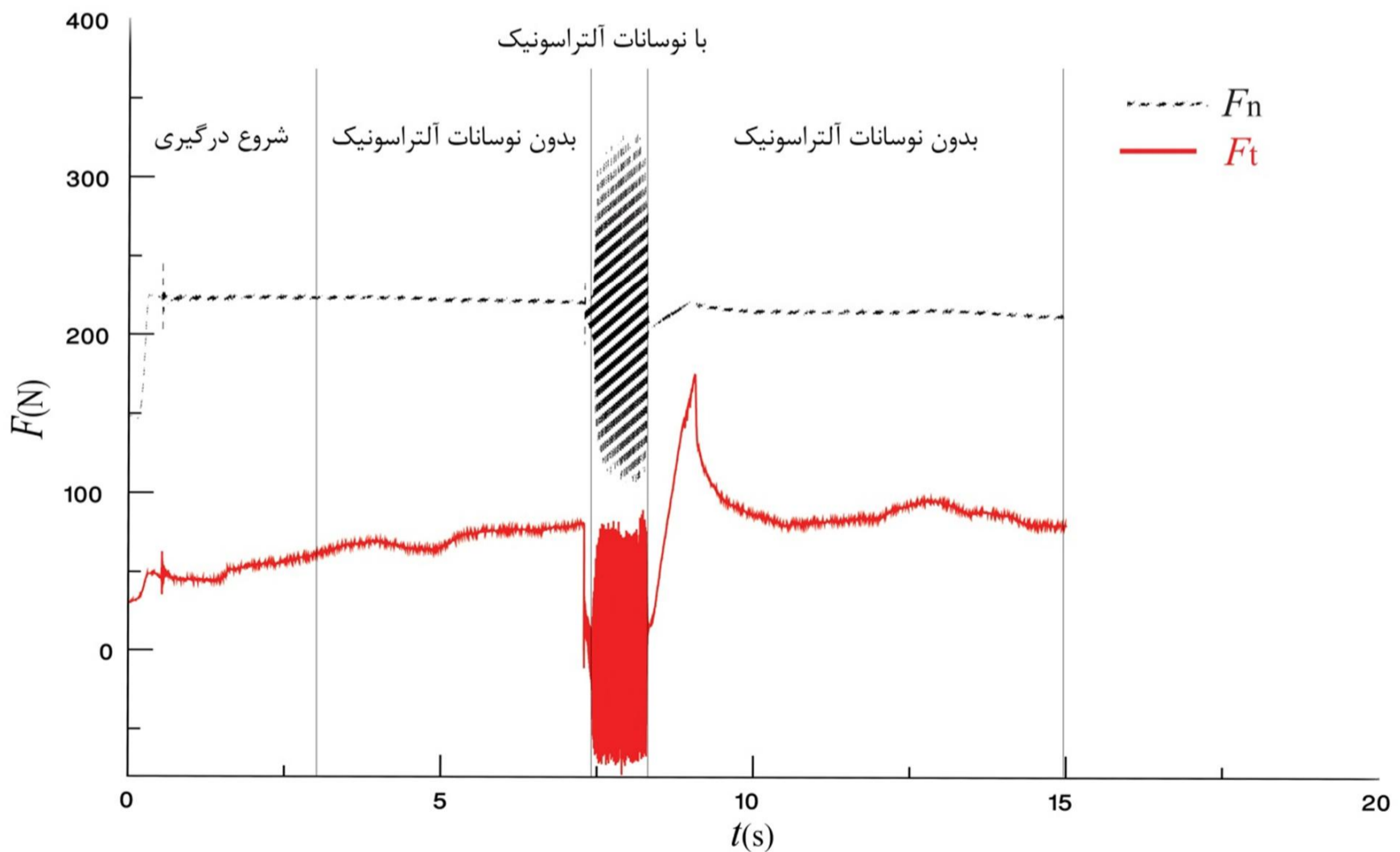
زمان بین جسم درگیر اول و دوم که توسط دینامومتر اندازه‌گیری شده است، آورده شده است. جنس جسم اول و دوم آلومینیوم می‌باشد. دامنه سرعت جسم درگیر اول  $V_1 = 300 \mu\text{m/s}$  و سرعت جسم درگیر دوم  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$  می‌باشد. زبری میانگین سطح دوم برای این حالت  $R_a = 5.20 \mu\text{m}$  می‌باشد. در شکل 10 دو نمودار دیده می‌شود  $F_n$ ، نشان‌دهنده نیروی عمودی بین دو جسم درگیر می‌باشد و  $F_t$ ، نشان‌دهنده نیروی اصطکاک بین دو جسم درگیر می‌باشد.

در این شرایط کاری تقریباً برای اینکه دو جسم بطور کامل بایکدیگر درگیر شوند سه ثانیه طول می‌کشد بنابراین از ثانیه 0 تا ثانیه 3 را می‌توان شروع درگیری نامید. این سه ثانیه چون شروع درگیری می‌باشد معمولاً دارای پایداری کاملی نیست و نتایج آن دارای دقت کمی می‌باشد و جز تحلیل به حساب نمی‌آید. پس از اینکه دو جسم به‌طور کامل با یکدیگر درگیر شدند اجازه داده می‌شود تا چند ثانیه این درگیری بطول انجامد تا بتوانیم نیروی اصطکاک معمولی (بدون نوسانات آلتراسونیک) بین دو جسم را بدست آوریم که در شکل 10 این مرحله از ثانیه 3 تا ثانیه 7/5 بطول انجامیده است. در مرحله بعدی ژنراتور را روشن کرده و مادامی که دو جسم با یکدیگر درگیر هستند جسم اول را مرتعش می‌کنیم تا بتوانیم نیروی اصطکاک بین دو جسم را در حضور نوسانات آلتراسونیک اندازه‌گیری کنیم. همانگونه که در شکل 10 مشخص است این مرحله تقریباً به مدت 1 ثانیه بطول انجامیده است. سپس در مرحله آخر ژنراتور را خاموش کرده و بنابراین با پایان درگیری دو جسم، فرآیند داده‌برداری به پایان می‌رسد. پرشی که در ثانیه 9 در شکل 10 دیده می‌شود ناشی از توقف سریع ارتعاشات آلتراسونیک جسم اول می‌باشد که موجب ایجاد ضربه‌ای می‌گردد و بنابراین این پرش را بوجود می‌آورد. همان‌گونه که در شکل 10 مشخص است با وارد کردن ارتعاشات به جسم اول، هردو نیرو عمودی و اصطکاک دچار تغییرات نوسانی می‌شوند.



شکل 9 مقدار فرکانس تشدید به دست آمده از ژنراتور

آزمایش دینامومتر یک نمودار نیرو- زمان مطابق شکل 10 به ما می‌دهد که از این نمودار می‌توان نیروی عمودی بین دو جسم، نیروی اصطکاک بدون ارتعاشات آلتراسونیک و نیروی اصطکاک با ارتعاشات آلتراسونیک را بدست آورد. آزمایش‌ها برای دو جنس آلومینیوم و فولاد St 304 برای جسم درگیر دوم و سرعت‌های مختلف جسم درگیر اول (مرتعش شونده) و برای زبری‌های مختلف سطح جسم درگیر دوم انجام خواهد گرفت. لازم به توضیح است که سطح جسم درگیر اول صیقلی می‌باشد ولی برای این که اثر زبری‌ها نیز در اصطکاک دیده شود، سطح جسم درگیر دوم دارای زبری‌های مختلفی می‌باشد که این زبری‌ها توسط ماشین فرز برروی وجه‌های مختلف جسم درگیر دوم ایجاد گردیده است. بعنوان یک نمونه از آزمایش‌های انجام شده، در شکل 10 نمودار نیرو-



شکل 10 نیرو- زمان برای دو سطح درگیر آلومینیومی و  $R_a = 5.20 \mu\text{m}$ ،  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$ ،  $V_1 = 300 \mu\text{m/s}$



دیده می‌شود که میانگین نیروی عمودی قبل و بعد از اعمال ارتعاشات 221 نیوتن می‌باشد و هیچ‌گونه تغییری در آن رخ نداده است. این درحالی است که میانگین نیروی اصطکاک قبل از اعمال ارتعاشات 70 نیوتن و بعد از اعمال ارتعاشات 6/8 نیوتن می‌باشد پس دیده می‌شود، میانگین نیروی اصطکاک در اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک 90 درصد کاهش یافته است. دلیل این موضوع اینگونه است؛ زمانی که ارتعاشات آلتراسونیک به جسمی وارد می‌شود این جسم دارای حرکت رفت و برگشتی می‌باشد به عبارت بهتر این جسم در نصف دوره تناوب خود روبه جلو و در نصف دوره تناوب بعدی روبه عقب حرکت می‌کند. بنابراین زمانی که این جسم مرتعش با جسم دیگری در حال تماس باشد در نصف دوره تناوب اول هم جهت باهم حرکت می‌کنند و در نصف دوره تناوب بعدی در خلاف جهت یکدیگر عمل می‌کنند. پس بطور کلی نیروی اصطکاک بصورت متناوب تا مادامی که ارتعاشات آلتراسونیک حضور دارد دچار تغییر می‌شود و جهت آن از مثبت به منفی تغییر می‌کند. پس میانگین نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد.

اگر  $F_n$  میانگین نیروی عمودی بین دو جسم،  $F_t$  میانگین نیروی اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک و  $F_{t\text{ultra}}$  میانگین نیروی اصطکاک با نوسانات آلتراسونیک تعریف شود، ضریب اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک و با نوسانات آلتراسونیک به ترتیب مطابق رابطه (4) و (5) بدست می‌آیند.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{ultra}} = \frac{F_{t\text{ultra}}}{F_n} \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $\mu_{\text{ultra}}$  میانگین ضریب اصطکاک بین دو جسم در لحظاتی که ارتعاشات آلتراسونیک وارد می‌گردد، می‌باشد. درصد کاهش نیرو یا ضریب اصطکاک در اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بصورت رابطه (6) می‌باشد.

$$P_e = \frac{F_t - F_{t\text{ultra}}}{F_t} \times 100 = \frac{\mu - \mu_{\text{ultra}}}{\mu} \times 100 \quad (6)$$

بنابراین با توجه به روابط (4) تا (6) برای شرایط کاری شکل 10 مقادیر نیروی عمودی و اصطکاک با و بدون آلتراسونیک و ضریب اصطکاک با و بدون نوسانات آلتراسونیک در جدول 2 آمده است.

همان‌گونه که در جدول 2 دیده می‌شود با اعمال نوسانات آلتراسونیک در شرایط عملکردی شکل 10 می‌توان 90 درصد نیرو یا ضریب اصطکاک را کاهش داد.

### 1-5- نحوه اندازه‌گیری زبری

در این تحقیق برای اندازه‌گیری زبری سطوح از دستگاه زبری‌سنج سوزنی ساخت شرکت میتویوتو ژاپن استفاده شد که در شکل 11 نشان داده شده است. این دستگاه ارتفاع زبری‌ها را بر حسب فاصله‌ای که نوک سوزن با گام نیم میکرومتر حرکت می‌کند را در قالب یک فایل اکسل در اختیار کاربر قرار می‌دهد که در این فایل میانگین ارتفاع زبری‌ها ( $R_a$ ) و انحراف معیار زبری‌ها

جدول 2 مقادیر تجربی بدست آمده از شرایط عملکردی شکل 10

پارامتر	مشخصه	مقدار
نیروی عمودی	$F_n$	N 221
میانگین نیروی اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک	$F_t$	N 70
میانگین نیروی اصطکاک با نوسانات آلتراسونیک	$F_{t\text{ultra}}$	N 6/8
ضریب اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک	$\mu$	0/31
ضریب اصطکاک با نوسانات آلتراسونیک	$\mu_{\text{ultra}}$	0/03
درصد کاهش نیرو یا ضریب اصطکاک	$P_e$	%90

### 6- نتایج

بطور کلی 8 آزمایش با شرایط عملکردی مختلف انجام شد. بدین دلیل این 8 آزمایش در نظر گرفته شد تا بتوان اثر سرعت امواج، زبری سطح و جنس بر روی ضریب اصطکاک با و بدون ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی بررسی گردد. بنابراین در این 8 آزمایش با تغییر شرایط عملکردی اثر هر کدام از پارمترهای مذکور بررسی خواهد شد. هر کدام از آزمایش‌ها سه نوبت تکرار شد و میانگین نتایج این آزمایش‌ها در جدول 3 آورده شده است.

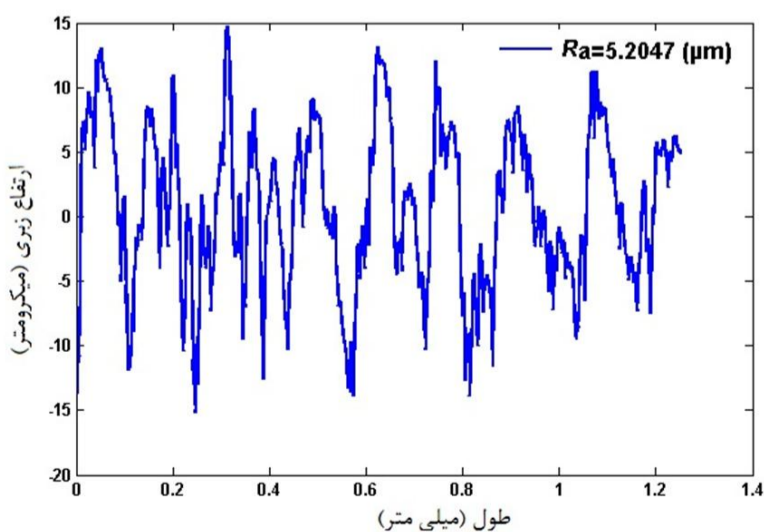
همان‌گونه که از جدول 3 مشخص است، محدوده کاهش نیرو یا ضریب اصطکاک بین 40 تا 100 درصد می‌باشد که کمترین کاهش مربوط به شرایط عملکردی 7 و بیشترین کاهش مربوط به شرایط عملکردی 3 می‌باشد که در آن 100 درصد نیرو یا ضریب اصطکاک کاهش یافته است و این بدین معنی است که در این حالت اصطکاک بین دو جسم وجود ندارد و به عبارت بهتر دو جسم روی یکدیگر بدون اصطکاک می‌لغزند. لازم به ذکر است که نتایج جدول 3 برای سرعت جسم درگیر دوم  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$  می‌باشد و همان‌گونه که در ابتدای مقاله ذکر شد جنس جسم درگیر اول آلومینیوم می‌باشد.

### 6-1- بررسی اثر سرعت نسبی بین دو جسم بر روی کاهش نیرو اصطکاک

سرعت نسبی بین دو جسم بصورت اختلاف بین سرعت جسم درگیر دوم با سرعت جسم درگیر اول تعریف می‌گردد که بصورت رابطه (7) می‌باشد.



شکل 11 زبری‌سنج استفاده شده در این تحقیق

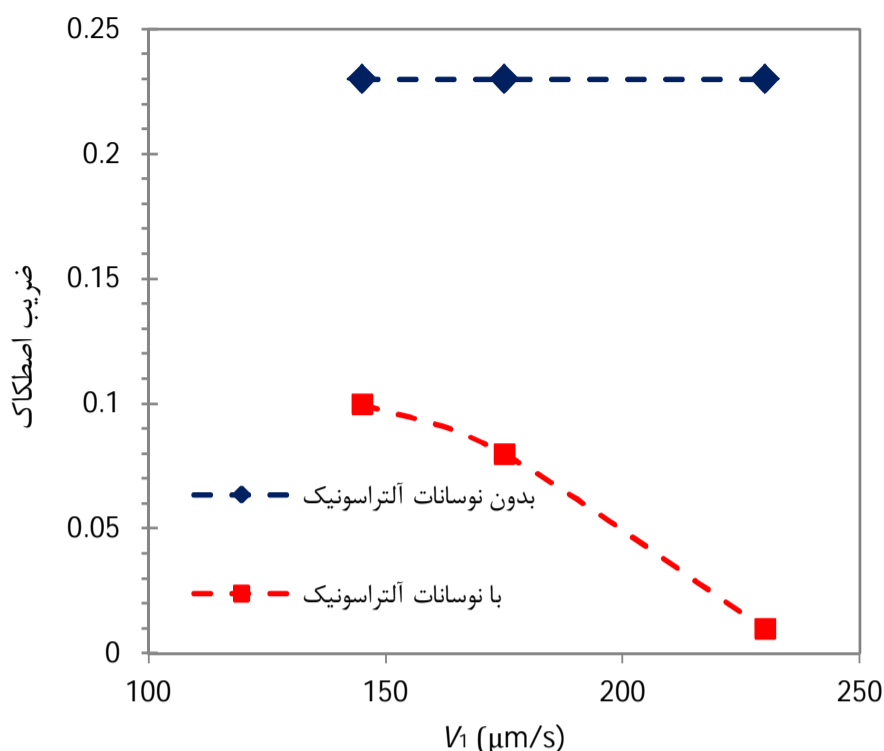


شکل 12 پروفیل زبری سطح جسم درگیر دوم با جنس آلومینیوم



جدول 3 مقادیر تجربی بدست آمده از آزمایش برای شرایط عملکردی مختلف و سرعت جسم درگیر دوم  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$

شرایط عملکردی	جنس جسم دوم	$R_a (\mu\text{m})$	$V_1 (\mu\text{m/s})$	$\mu$	$\mu_{\text{ultra}}$	$P_e (\%)$
1	آلومینیوم	4/38	145	0/23	0/10	57
2	آلومینیوم	4/38	175	0/23	0/08	65
3	آلومینیوم	4/38	230	0/23	0	100
4	آلومینیوم	5/20	175	0/33	0/12	63
5	آلومینیوم	5/20	230	0/33	0/07	78
6	آلومینیوم	5/20	300	0/33	0/03	90
7	فولاد	5/20	175	0/37	0/22	41
8	فولاد	5/20	230	0/37	0/18	51



شکل 13 نمودار ضریب اصطکاک بر حسب سرعت امواج آلتراسونیک برای دو سطح درگیر آلومینیومی با زبری 4/38 و  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$

### 6-2- بررسی اثر زبری سطح بر کاهش نیروی اصطکاک

پارامتر مشخص کننده زبری سطح، زبری میانگین یا  $R_a$  می باشد. زمانی که گفته می شود سطحی از سطح دیگر زبرتر است این بدین معنی است که دارای  $R_a$  بزرگتری می باشد. زبری های استفاده شده در این تحقیق دارای دو مقدار 4/38 و 5/20 میکرومتری می باشند. که هدف این قسمت بررسی اثر این دو زبری بر میزان کاهش نیروی اصطکاک می باشد. زمانی که زبری سطح افزایش می یابد، نیروی اصطکاک بین دو جسم نیز افزایش می یابد. نمودار ضریب اصطکاک دو سطح برای زبری های مختلف و با جنس آلومینیوم و برای دو سرعت 175 و 230 میکروثانیه در شکل 14 رسم گردیده است. دیده می شود برای دو سطح با شرایط مساوی، سطحی که دارای زبری بزرگتری می باشد قابلیت کاهش نیروی اصطکاک کمتری نسبت به سطحی که دارای زبری کمتری داراست را دارد. بعبارت بهتر در یک سرعت یکسان، نیروی اصطکاک در سطحی که دارای زبری کمتری می باشد کاهش بیشتری دارد.

همان گونه که در جدول 3 و شکل 14 دیده می شود در سرعت 175 میکرومتر بر ثانیه مقدار کاهش نیروی اصطکاک برای سطحی با زبری 4/38، 65 درصد می باشد که این مقدار برای سطح با زبری 5/20 مقدار 63 درصد می باشد و یا در سرعت 230 میکرومتر بر ثانیه مقدار کاهش نیروی اصطکاک برای سطحی با زبری 4/38، 100 درصد می باشد و برای سطحی با زبری 5/20، 78 درصد می باشد. بنابراین از بحث های فوق می توان فهمید که هر چه زبری کمتر باشد کاهش نیروی اصطکاک بیشتری در حضور نوسانات آلتراسونیک طولی دیده می شود.

این پدیده بدین علت رخ می دهد، زمانی که سطح دارای زبری بیشتری باشد بنابراین دارای نیروی اصطکاک بیشتری می باشد و برای کاهش این نیروی اصطکاک باید انرژی بیشتری مصرف شود تا اصطکاک کاهش یابد بنابراین با سرعت قبلی نمی توان همان کاهش که در قسمت سطح با زبری کمتر رخ می دهد را داشت و باید سرعت افزوده شود تا به همان کاهش که در حالت سطح با زبری کمتر دارد، برسیم.

$$V_{\text{rel}} = V_2 - V_1 \cos(2\pi ft) \quad (7)$$

در رابطه (7)  $f$  فرکانس ارتعاشات آلتراسونیک و  $t$  زمان می باشد.

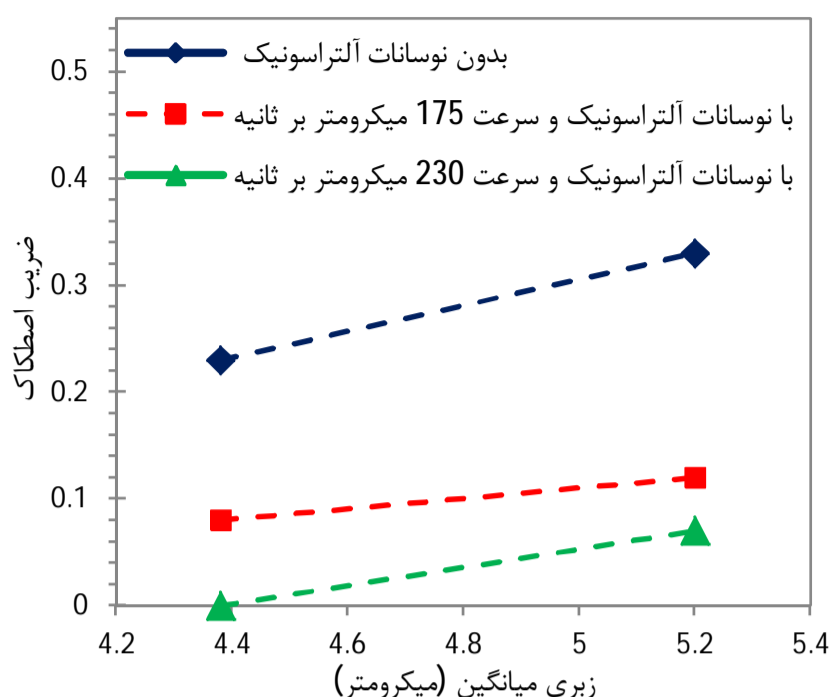
از آنجایی که در کل این تحقیق سرعت جسم درگیر دوم  $V_2 = 130 \mu\text{m/s}$  در نظر گرفته شده است بنابراین با افزایش (کاهش) سرعت جسم اول موجب کاهش (افزایش) سرعت نسبی بین دو جسم می گردد. در شکل 13 نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بین دو جسم با سرعت های مختلف جسم درگیر اول و برای جنس آلومینیوم برای هر دو جسم، در زبری میانگین 4/38 رسم گردیده است.

همان گونه که در شکل 13 مشاهده می گردد، زمانی که سرعت از 145 میکرومتر بر ثانیه به 175 میکرومتر بر ثانیه می رسد تفاوت نیروی اصطکاک کاهش یافته در دو حالت 8 درصد می باشد این در حالی است، زمانی که سرعت از 175 میکرومتر بر ثانیه به 230 میکرومتر بر ثانیه می رسد این تفاوت در نیروی اصطکاک به 35 درصد می رسد. بنابراین با افزایش سرعت، نیروی اصطکاک شدت کاهش می یابد و این نیرو تأثیر بسیار زیادی از سرعت جسم مرتعش شونده داراست. علت این کاهش نیروی اصطکاک با افزایش سرعت جسم مرتعش شونده را می توان در دو دلیل جست و جو کرد:

1. زمانی که سرعت زیاد می گردد، ناحیه تماس بین دو سطح کاهش یافته و بنابراین نیروی تماسی یا اصطکاک کاهش می یابد.

2. اصطکاک در اثر درگیری زبری ها بایکدیگر بوجود می آید، زمانی که سرعت بین دو جسم زیادتر می گردد، درگیری زبری ها با یکدیگر کمتر شده و بنابراین نیروی اصطکاک کاهش می یابد.

نکته قابل توجهی که در شکل 13 دیده می شود این می باشد که اگر سرعت جسم مرتعش شونده به مقدار قابل توجهی افزایش یابد، با ثابت ماندن بقیه شرایط نیروی اصطکاک بین دو جسم به صفر کاهش می یابد. این بدین معنی می باشد که سرعت جسم مرتعش شونده بقدری زیاد است که فرصت درگیری زبری ها با یکدیگر ایجاد نمی شود و دو جسم بدون اصطکاک روی یکدیگر می لغزند.



شکل 15 نمودار ضریب اصطکاک بر حسب جنس دو جسم درگیر با میانگین زبری  $V_2 = 130 \mu m/s$  و  $5/20$

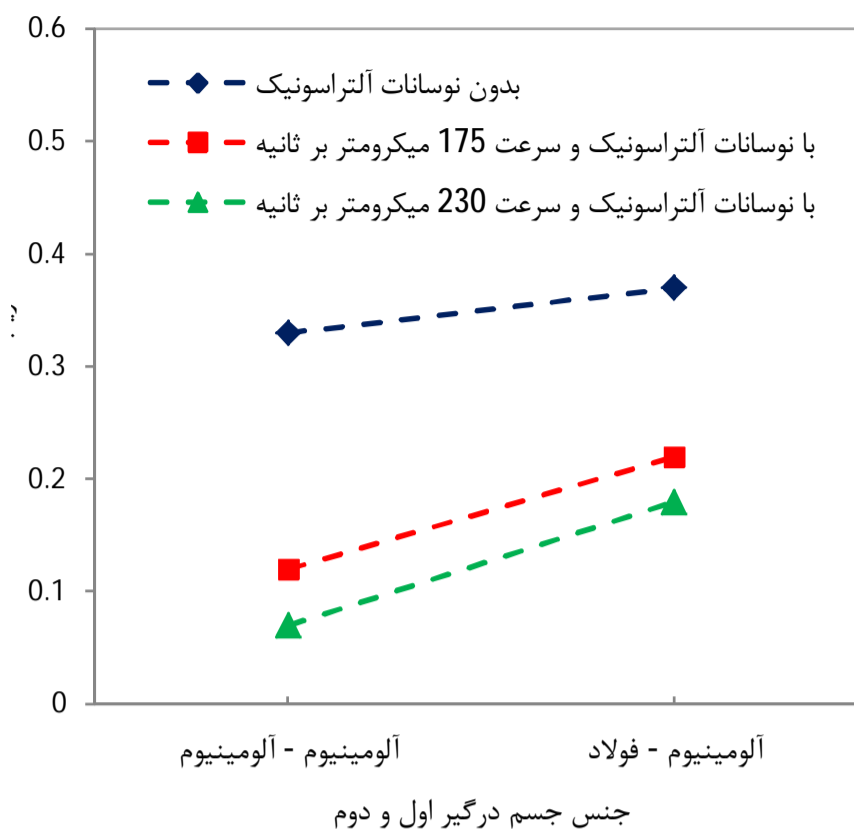
پارامتر سرعت جسم مرتعش شونده، زبری و جنس در کاهش بیشتر نیروی اصطکاک در اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی به ترتیب در شکل‌های 13، 14 و 15 بررسی شد و دیده شد که با افزایش سرعت جسم مرتعش شونده، کاهش زبری سطوح درگیر و هم‌جنس بودن سطوح، کاهش بیشتری در نیروی اصطکاک در حضور نوسانات آلتراسونیک مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان سرعت و هم‌جنس بودن را عامل مثبتی برای کاهش بیشتر نیروی اصطکاک در حضور نوسانات آلتراسونیک طولی دانست و زبری را عامل منفی در این کاهش تلقی کرد.

حال اگر نمودار میزان کاهش نیروی اصطکاک برای شرایط عملکردی مختلف رسم شود، باید دیده شود که ماکزیمم کاهش در نیروی اصطکاک مربوط به حالتی است که دارای بیشترین سرعت، کمترین زبری و دو سطح هم‌جنس باشند. نمودار شکل 16 صحت این گفته را تأیید می‌کند. مطابق شکل 16 دیده می‌شود که بیشترین کاهش مربوط به شرایط عملکردی 3 می‌باشد که در آن سرعت 300 میکرومتر بر ثانیه، زبری میانگین  $4/38$  می‌باشد و دو سطح درگیر از یک جنس می‌باشند بنابراین دیده شد که در شرایط عملکردی 3 سرعت در بالاترین سطح در نظر گرفته شده و زبری در پایین‌ترین سطح در نظر گرفته شده می‌باشد.

### 7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

زمانی که دو جسم روی سطح مشترکی لغزش می‌کنند، زبری‌ها با یکدیگر درگیر شده و اصطکاک بوجود می‌آید. با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به یکی از این دو جسم نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد و بعبارتی این نوسانات همانند یک روانکار جامد عمل می‌کنند. این خاصیت در فرآیندهای شکل‌دهی و ماشین‌کاری دارای کاربرد بسیار زیادی است. با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق به بررسی تجربی اثر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک در جهت طولی بر روی نیروی اصطکاک لغزشی پرداخته شد. برای این منظور سیستم آزمونی طراحی شد و این سیستم آزمون بر روی ماشین تراش نصب گردید و آزمایش‌ها برای 8 نوع شرایط عملکردی مختلف انجام شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارت است از:

1. طراحی، شبیه‌سازی اجزاء محدود و ساخت متمرکز کننده استوانه‌ای - مخروطی - استوانه‌ای با قابلیت تقویت دامنه ارتعاشات و انتقال خوب



شکل 14 نمودار ضریب اصطکاک بر حسب زبری سطح برای دو سطح درگیر آلومینیومی با  $V_2 = 130 \mu m/s$

### 3-6- بررسی اثر جنس بر کاهش نیروی اصطکاک

تا این قسمت، بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده برای دو جسم درگیر هم‌جنس بوده است. هدف این قسمت بررسی اثر جنس با ثابت نگه داشتن بقیه شرایط بر روی میزان کاهش نیروی اصطکاک در حضور نوسانات آلتراسونیک طولی می‌باشد. از نتایج جدول 3 دیده شد که ضریب اصطکاک بین جسم درگیر اول و دوم آلومینیومی  $0/33$  می‌باشد و ضریب اصطکاک بین جسم درگیر اول آلومینیومی با جسم درگیر دوم فولادی  $0/37$  می‌باشد. بنابراین نیروی اصطکاک بین جسم درگیر اول و دوم آلومینیومی کمتر از نیروی اصطکاک بین جسم درگیر اول آلومینیومی با جسم درگیر دوم فولادی می‌باشد. دلیل این تفاوت این می‌باشد که فولاد دارای سختی برشی بیشتری از آلومینیوم می‌باشد و به همین دلیل نیروی اصطکاک بزرگتری تولید می‌کند. نمودار ضریب اصطکاک دو سطح برای دو جنس آلومینیوم-آلومینیوم و آلومینیوم-فولاد و برای دو سرعت 175 و 230 میکروثانیه و برای زبری میانگین  $5/20$  در شکل 15 رسم گردیده است.

همان‌گونه که در جدول 3 و شکل 15 دیده می‌شود در سرعت 175 میکرومتر بر ثانیه مقدار کاهش نیروی اصطکاک برای سطوح آلومینیوم-آلومینیوم، 63 درصد می‌باشد که این مقدار برای سطوح آلومینیوم - فولاد 41 درصد می‌باشد و یا در سرعت 230 میکرومتر بر ثانیه مقدار کاهش نیروی اصطکاک برای سطوح آلومینیوم-آلومینیوم، 78 درصد می‌باشد و برای سطوح آلومینیوم-فولاد، 51 درصد می‌باشد. دیده شد که سطوح آلومینیوم-آلومینیوم، قابلیت کاهش نیروی اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح آلومینیوم-فولاد دارد. بعبارت بهتر در یک سرعت یکسان، نیروی اصطکاک آلومینیوم-آلومینیوم کاهش بیشتری دارد. بنابراین از بحث‌های فوق می‌توان به این نتیجه رسید که هرچه جسم دارای سختی برشی بیشتری باشد اگر در حضور نوسانات آلتراسونیک طولی قرار گیرد نسبت به جسمی که دارای سختی برشی کمتری است دارای کاهش اصطکاک کمتری می‌باشد.

بطور کلی دیده شد که با اضافه شدن نوسانات آلتراسونیک به یکی از دو جسم درگیر، نیرو یا ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و همچنین اثر سه



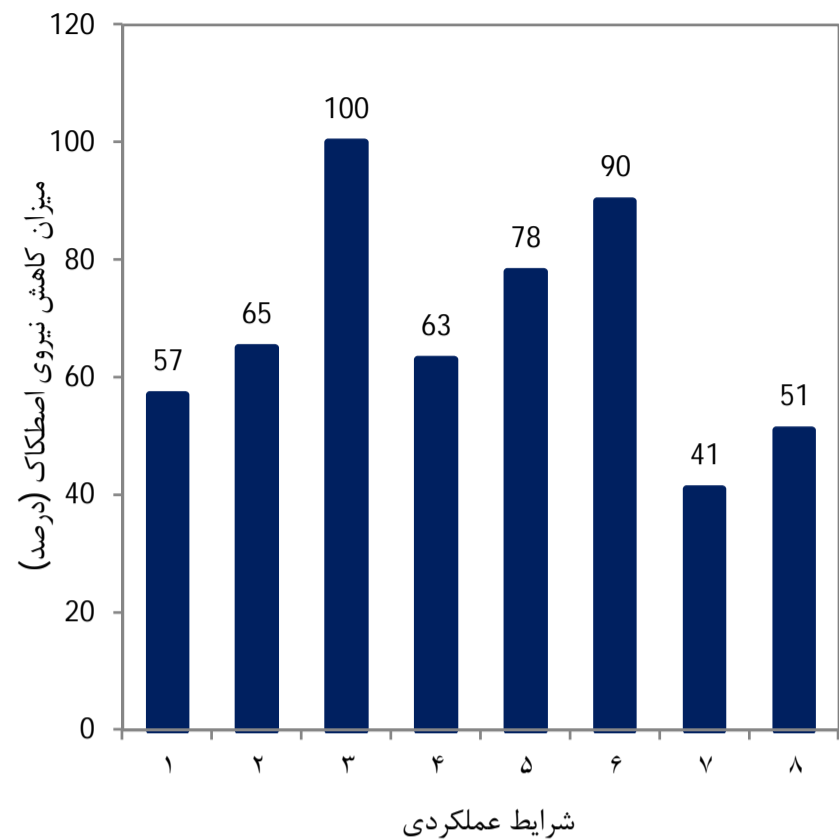
نیروی عمودی بین دو جسم (N)	$F_n$
میانگین نیروی اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک (N)	$F_t$
میانگین نیروی اصطکاک با نوسانات آلتراسونیک (N)	$F_{t,ultra}$
فرکانس ارتعاشات آلتراسونیک (Hz)	$f$
طول متمرکز کننده (m)	$L$
درصد کاهش نیرو یا ضریب اصطکاک	$P_e$
زمان (s)	$t$
سرعت جسم درگیر اول (مرتعش شونده) ( $ms^{-1}$ )	$V_1$
سرعت جسم درگیر دوم ( $ms^{-1}$ )	$V_2$
سرعت نسبی بین دو جسم درگیر ( $ms^{-1}$ )	$V_{rel}$
<b>علائم یونانی</b>	
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
طول موج ارتعاشات آلتراسونیک (m)	$\lambda$
ضریب اصطکاک بدون نوسانات آلتراسونیک	$\mu$
ضریب اصطکاک با نوسانات آلتراسونیک	$\mu_{ultra}$
<b>زیرنویس‌ها</b>	
بیشینه	Max
آلتراسونیک	Ultra
نسبی	rel

### 9- قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از مدیر آزمایشگاه آلتراسونیک دانشگاه صنعتی اصفهان جناب آقای دکتر امین‌الله محمدی به خاطر همکاری ایشان در انجام تست تجربی ابراز می‌دارد.

### 10- مراجع

- [1] M. Murakawa, M. Jin, The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 81-86, 2001.
- [2] Z. Huang, M. Lucas, M. J. Adams, Influence of ultrasonics on upsetting of a model paste, *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1, pp. 43-48, 2002.
- [3] S. Mousavi, H. Feizi, R. Madoliat, Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 187, pp. 65,661-7,2007.
- [4] Z. Yao, G.-Y. Kim, L. Faidley, Q. Zou, D. Mei, Z. Chen, Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 3, pp. 640-646, 2012.
- [5] S. Y. A. B. S.E.Eftekhari Shahri, K.khalili, B.S.Kong, Ultrasonic tube hydroforming, a numerical and analytical study, *Modares Mechanical Engineering*, 2013. (In Persian)
- [6] A. Pak, H. Deilami Azodi, M. Mahmoudi, Investigation of Ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 106-114, 2014). (In Persian)
- [7] B. CRISTINA JANETA *MICROFORMING AND ULTRASONIC FORMING*, Vol. North Carolina State University, Master of Science thesis, 2006.
- [8] M. Rasoli, A. Abdullah, M. Farzin, A. F. Tehrani, A. Taherizadeh, Influence of ultrasonic vibrations on tube spinning process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6, pp. 1443-1452, 2012.
- [9] W. Littmann, H. Storck, J. Wallaschek, Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations, *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 71, No. 8, pp. 549-554, 2001.
- [10] H. Storck, W. Littmann, J. Wallaschek, M. Mracek, The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors, *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1, pp. 379-383, 2002.
- [11] V. Kumar, I. Hutchings, Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, *Tribology International*, Vol. 37, No. 10, pp. 833-840, 2004.
- [12] V. L. Popov, J. Starcevic, A. E. Filippov, Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry



شکل 16 میزان کاهش نیروی اصطکاک بر حسب شرایط مختلف کاری

- ارتعاشات در فرآیند اصطکاک لغزشی.
- به دست آوردن نقاط گره در متمرکز کننده و طراحی و ساخت فلنچ و ابزار گیره‌بندی متمرکز کننده و طراحی و ساخت نگه‌دارنده‌های ابزار ارتعاشی برای نصب متمرکز کننده روی ماشین تراش.
- فرکانس تشدید بدست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود توسط نرم‌افزار آباکوس 19976 هرتز می‌باشد و فرکانس تشدید بدست آمده از ژنراتور 19920 هرتز می‌باشد که اختلاف بسیار کمی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی به دست آمد (کمتر از 1%). این اختلاف بسیار کم نشان دهنده دقت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.
- محدوده کاهش نیروی اصطکاک در اثر اضافه شدن نوسانات آلتراسونیک در جهت طولی برای شرایط عملکردی مختلف، 100-40 درصد می‌باشد.
- برای دو جسم درگیر آلومینیومی با زبری سطح 4/38 میکرومتر و سرعت نوسانات آلتراسونیک 230 میکرومتر بر ثانیه و سرعت جسم درگیر دوم 130 میکرومتر بر ثانیه، نیروی اصطکاک بصورت 100 درصد کاهش یافت.
- کاهش زبری سطح بین دو جسم درگیر باعث افزایش اثر ارتعاشات آلتراسونیک برروی کاهش نیروی اصطکاک بین دو جسم درگیر می‌گردد.
- با افزایش سرعت نوسانات آلتراسونیک نیروی اصطکاک به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد بطوری که با افزایش قابل توجه سرعت می‌توان نیروی اصطکاک بین دو جسم را به صفر رسانید.
- سطوح آلومینیوم-آلومینیوم، قابلیت کاهش نیروی اصطکاک بیشتری نسبت به سطوح آلومینیوم - فولاد دارد.

### 8- فهرست علائم

سرعت صوت در جسم جامد ( $ms^{-1}$ )	$c$
قطر ماکزیمم متمرکز کننده (m)	$D_{max}$
مدول یانگ (Pa)	$E$

- 2008 .
- [17] D. Shahgholian Ghahfarokhi, M. Salimi, M. Farzin, Experimental Study and finite element simulation of Cylindrical-conical-cylindrical horns with Circular crosssection: Application on ultrasonic vibrations Sliding friction process *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 31-38, 2015. (In Persian)
- [18] Z. P. F. D. G. Dongming, F. Yaying, Design of horn using four-end network method [J], *Acta Acustica*, Vol. 6, pp. 014, 2002 .
- [19] C. Hellier, C. Hellier, *Handbook of nondestructive evaluation*: McGraw-Hill New York, 2001 .
- [20] A. I. Markov, E. Neppiras, *Ultrasonic machining of intractable materials*: Ilife Books, 1966 .
- [21] D. Ensminger, F. B. Stulen, *Ultrasonics: Data, Equations and Their Practical Uses*: CRC Press, 2008 .
- friction processes, *Tribology letters*, Vol. 39, No. 1, pp. 25-30, 2010 .
- [13] S. Dong, M. J. Dapino, Elastic-plastic cube model for ultrasonic friction reduction via Poisson's effect, *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 343-350, 2014 .
- [14] D. Shahgholian Ghahfarokhi, M. Salimi, Modeling of sliding friction with superimposed ultrasonic oscillation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 302-310, 2015. (In Persian) .
- [15] E. mohsen, m. H. Sadeghi, Analytical Modling and finite element simulation of exponential horns with rectangular cross-section: Application on ultrasonic assisted grinding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. vol.13, NO 14, pp. 185-189, 2013. (In Persian)
- [16] S. Amini, H. Soleimanimehr, M. Nategh, A. Abudollah, M. Sadeghi, FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool, *Journal of materials processing technology*, Vol. 201, No. 1, pp. 43-47,