



## طراحی و ساخت ابزار برش آلتراسونیک برای برش کامپوزیت‌های پایه پلیمری

سبا جوادیان<sup>۱</sup>، محمد مرادی<sup>۱</sup>، امین‌الله محمدی<sup>۲\*</sup>، پیمان مصدق<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: amin1@iut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۶ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

ابزار برش آلتراسونیک

هورن

آنالیز مودال

شبیه‌سازی عددی

الیاف کربن

### چکیده

ویژگی‌هایی نظیر خواص مکانیکی عالی، مقاومت به حرارت بالا، مقاومت در برابر خوردگی و چگالی کم، باعث شده که کامپوزیت‌هایی نظیر الیاف کربن در صنایع مختلف مانند پزشکی، هوافضا و خودروسازی کاربرد فراوانی داشته باشند. با این حال، به دلیل خصوصیت‌هایی نظیر هدایت حرارتی ضعیف، کیفیت پایین سطح برش و استحکام زیاد، برش آن‌ها با روش‌های مرسوم به‌سختی امکان‌پذیر است. هدف از انجام این پروژه، طراحی و ساخت نوعی ابزار برش با کمک امواج آلتراسونیک است که باعث کاهش نیروی برش و افزایش کیفیت سطح برش قطعه‌کار از جنس الیاف کربن می‌شود. در این تحقیق به طور خاص به طراحی و ساخت قسمت هورن ابزار برش پرداخته شده است. ابتدا با انجام محاسبات تحلیلی، هورن پله‌ای طراحی شده و در ادامه با افزودن قسمت مخروطی با زوایای مختلف به آن، اثر تغییر زاویه بر روی تقویت دامنه، فاصله مودال و توزیع تنش توسط روش شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان دهنده تاثیر ناچیز تغییر زاویه قسمت مخروطی بر روی آن‌ها می‌باشد. در نهایت نمونه بهینه از طراحی ساخته شده است. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که استفاده از امواج آلتراسونیک اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نیروی برش تا یک شانزدهم و بهبود قابل توجهی در کیفیت و مقدار مستقیم بودن لبه‌ی برش قطعه‌کار از جنس الیاف کربن نسبت به حالت بدون آلتراسونیک داشته است.

## Designing and manufacturing of the ultrasonic cutting tools for cutting of polymeric based composites

Saba Javadian<sup>1</sup>, Mohammad Moradi<sup>1</sup>, Aminollah Mohammadi<sup>2\*</sup>, Peiman Mosaddegh<sup>3</sup>

1- BSc Student, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* Corresponding Author's Email: amin1@iut.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 15 February 2024

Accepted: 13 May 2024

#### Keywords:

Ultrasonic Cutting Tools

Horn

Modal Analysis

Numerical Simulation

Carbon Fiber

### Abstract

Characteristics such as excellent mechanical properties, high heat resistance, corrosion resistance and low density have made composites like carbon fiber widely used in various industries including medical, aerospace and automotive. However, due to characteristics such as poor thermal conductivity, low cutting surface quality and high strength, it is difficult to cut it using conventional methods. The aim of this article is to design and build a type of cutting tool that uses ultrasonic waves to reduce the cutting force and improve the cutting surface quality of carbon fiber workpieces. In this research, the design and construction of the horn part of the cutting tool is specifically discussed. First, a stepped horn is designed by performing analytical calculations, and then by adding a conical part with different angles to it, the effect of changing the angle on the amplitude amplification, modal spacing and stress distribution has been investigated by finite element simulation method. The results of numerical simulation show the insignificant effect of changing the angle of the conical part on the result. Finally, the optimized design is built. The results of experimental tests show that the use of ultrasonic waves has a significant effect in reducing the cutting force up to one-sixteenth and significantly improving the quality and straightness of the cutting edge of the carbon fiber workpiece compared to the case without ultrasonic assistance.

### Please cite this article using:

Javadian S, Moradi M, Mohammadi A, Mosaddegh P. Designing and manufacturing of the ultrasonic cutting tools for cutting of polymeric based composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 April 20;11(2):82-90. doi: 10.22034/IJME.2024.442180.1928 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

**۱- مقدمه**

نیاز به روش‌های جدید برش و ماشین‌کاری موادی با خصوصیات ویژه در صنایعی همچون پزشکی، هوافضا، محصولات غذایی و بسته‌بندی، سبب تحقیقاتی برای ابداع شیوه‌های جدید برش شده است. یکی از این روش‌ها فناوری برش با کمک امواج آلتراسونیک می‌باشد. در اوایل دهه پنجاه میلادی اولین تلاش‌ها برای به‌کارگیری فناوری آلتراسونیک در برش استخوان توسط کاتونا با ابزار مته دندان‌پزشکی گزارش شده است [۱]. نیلسن و همکاران [۲]، استفاده از یک ابزار برش‌دندانی با ارتعاش مکانیکی ۲۵ کیلوهرتز و دوغاب‌ساینده را در آزمایش‌های تجربی مطالعه کردند. طبق آزمایش‌های آن‌ها، بهترین نرخ برش در توان ۴۰۰ وات بوده و با افزایش سختی مواد، برش با سهولت بیشتری انجام شده است. استفاده از امواج آلتراسونیک برای برش در چندین دهه اخیر مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است. محدودیت‌هایی در طراحی ابزار و مبدل آلتراسونیک و فقدان روش‌های مناسب برای کنترل دقیق توان و فرکانس، توسعه این فناوری را تا دهه نود میلادی به تاخیر انداخت. استفاده از روش المان محدود و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، به تحلیل دقیق‌تر و درک بهتری از رفتار ارتعاشی و عملکرد سیستم و همچنین طراحی ابزارهای برش آلتراسونیک کمک می‌کند. در پژوهشی که کاردونی و لوکاس [۳] در سال ۲۰۰۵ میلادی به منظور کاهش تنش در ابزار برش آلتراسونیک انجام دادند و دریافتند که مدل‌های المان محدود می‌توانند به طور مؤثری برای پیش‌بینی مشخصه‌های مودال سیستم ارتعاشی و بهبود طراحی سیستم‌های برش استفاده شوند. به‌طور خاص، برای سیستم‌های برش چند تیغه‌ای، کاهش تنش در مکان‌های شکست تیغه‌های برش با تغییر هندسه‌ی اجزا با حفظ فرکانس تنظیم‌شده‌ی سیستم و تقویت دامنه مورد نیاز، حاصل می‌شود. در سال ۲۰۰۶ لوکاس و همکاران [۴] با انجام تحقیقات تجربی بر روی استخوان ران گاو وابستگی سرعت ارتعاش نوک تیغه و فرکانس تنظیم شده را به حرارت ایجاد شده گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که با کاهش فرکانس تنظیم شده، تغییرات دمایی زیادی در نوک تیغه قابل مشاهده است و تغییرات در هندسه‌ی تیغه و هورن بر روی برهمکنش‌های خطی و غیرخطی مودال تأثیرگذار می‌باشد. در سال ۲۰۲۱ موغال و همکاران [۵] به ارزیابی هندسه‌های مختلف هورن آلتراسونیک به‌منظور دستیابی به تقویت ارتعاش بالاتر و به‌حداقل‌رساندن تنش‌ها برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های لانه‌زنبوری با کمک امواج آلتراسونیک پرداختند. آنالیز ارتعاشی المان محدود بر روی هورن‌های آلتراسونیک فولادی از نظر مود فرکانسی، دامنه ارتعاش و تنش انجام شد. مطابق با نتایج حاصل از بررسی‌های عددی، عملکرد هورن‌های ترکیبی پله‌ای، به‌ویژه هورن‌های پله‌ای-کاتنوییدی، پله‌ای-بزیبر و پله‌ای-نمایی توخالی از نظر تقویت ارتعاش، ضریب ایمنی و عمر عملکردی نسب به سایر هندسه‌ها بهتر می‌باشد. در کاربردهای مختلف برش آلتراسونیک، عملکرد ابزار برش به پارامترهای برش و طراحی هندسه‌ی تیغه‌ها وابسته می‌باشد [۶]. تحلیل پروفیل‌های پیچیده باروش‌هایی محاسباتی و تجربی به راحتی امکان‌پذیر نیست. استفاده از روش اجزا محدود برای طراحی بهینه‌ی هورن ابزار برش آلتراسونیک به صورتی که ضریب تقویت دامنه، توزیع تنش و فاصله‌ی فرکانسی مناسبی داشته باشد، امری ضروری است. در عین حال صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی می‌تواند به دو شیوه‌ی مقایسه با نتایج آزمایش‌های تجربی و یا روش تحلیلی صورت گیرد.

در این تحقیق، در طراحی ابزار برش آلتراسونیک اثر زاویه قسمت مخروطی بر روی پارامترهایی شامل فرکانس تشدید، شکل طولی ارتعاش، جداسازی فرکانس اصلی از سایر فرکانس‌ها، ضریب افزایش دامنه و حداکثر تنش ایجاد شده به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری ارزیابی شده و پس از انتخاب مقادیر مناسب، هورن و تیغه ابزار برش طراحی و ساخته شده است. همچنین آزمایش‌های برش بر روی قطعه‌کار از جنس الیاف کربن برای بررسی عملکرد ابزار برش نیز انجام شده است.

**۲- طراحی هورن ابزار برش آلتراسونیک**

در طراحی ابزار برش آلتراسونیک، دستیابی به حداکثر دامنه‌ی خروجی با توان ورودی کمینه مطلوب می‌باشد. آرنولد و همکاران [۷] نشان دادند که افزایش دامنه ابزار آلتراسونیک در فرکانس ارتعاش ثابت، باعث کاهش نیروی برش می‌شود. علاوه بر فرکانس تشدید، محدودیت‌های هندسه ابزار برش باید موردتوجه قرار گیرد.

## ۲-۱- تعیین پارامترهای طراحی هورن

موادی با انتقال بالای امواج صوتی در ابزار برش آلتراسونیک استفاده می‌باشد. امیدانس آکوستیکی<sup>۱</sup> کم اجزا و اختلاف کمتر آن بین اجزای تشکیل‌دهنده ابزار برش موجب عبور موج با مقاومت کم و میزان بازتابش کمتر آن در محل اتصال اجزا می‌شود. برای جنس هورن از موادی مانند آلومینیوم 7075-T6 یا تیتانیوم Ti-Al6-V4 با حد خستگی بالا و امیدانس آکوستیکی پایین استفاده می‌شود [۸]. در این تحقیق، از آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 به دلیل قیمت مناسب و قابلیت ماشین‌کاری خوب استفاده شده است.

برای کاربردهایی مانند برش‌کاری و ماشین‌کاری، جوشکاری و شست‌وشوی آلتراسونیک بازه‌ی فرکانسی ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود. حداقل مقدار مناسب برای فاصله مودال، ۵۰۰ هرتز می‌باشد. پس از انتخاب محدوده‌ی فرکانسی مناسب، ابعاد قسمت‌های مکانیکی سیستم آلتراسونیک شامل ترانسدیوسر، هورن و تیغه به گونه‌ای طراحی شده که در مود ارتعاشی طولی و در فرکانس رزونانس تحریک و مرتعش شوند. طراحی بر اساس فرکانس رزونانس موجب می‌شود با کمترین انرژی و توان، بیشتر دامنه و جابه‌جایی ابزار حاصل شود. در بازه‌ی فرکانسی ابزار برش آلتراسونیک، فرکانس‌های پایین عملکرد بهتری در برش مواد ترد داشته و فرکانس‌های نزدیک به ۴۰ کیلوهرتز برای برش مواد نرم بهتر می‌باشد [۹]. در این پژوهش با توجه به جنس انتخاب شده برای برش، ترانسدیوسر با فرکانس ۲۲ کیلوهرتز مبنای طراحی و ساخت ابزار قرار گرفت.

در ابزار برش آلتراسونیک دامنه‌ی حرکتی در حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر می‌باشد. برای برش اجسام نرم از دامنه‌های حرکتی کمتر و فرکانس بیشتر و برای اجسام ترد از دامنه‌های حرکتی بیشتر و فرکانس کمتر استفاده می‌شود [۹]. میزان جابه‌جایی نوک ابزار می‌تواند متأثر از دو عامل میزان دامنه ورودی و ضریب تقویت دامنه‌ی هورن باشد. ضریب تقویت دامنه متأثر از مشخصات هندسی، ابعادی و جنس هورن بوده و با در نظر گرفتن نوع کاربرد وسیله، میزان تحمل تنش قطعات و حد مجاز اتلاف انرژی تعیین می‌شود [۱۰].

در انتخاب هندسه‌ی هورن ابزار برش آلتراسونیک، مقدار تقویت دامنه، توزیع تنش، روش ساخت و عدم ترکیب مودهای ارتعاشی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌ها طراحی هستند. در بین هندسه‌های رایج، هورن پله‌ای پرکاربردترین هندسه بوده و بیشترین میزان تقویت دامنه را به میزان نسبت مساحت‌ها دارد [۱۱]. در هورن پله‌ای تلفات انرژی و تمرکز تنش در محل تغییر ناگهانی سطح مقطع، از سایر هندسه‌ها بیشتر است و به دلیل فاصله کم بین فرکانس تشدید و ضد تشدید، با تغییر کوچکی در شرایط استفاده، هورن از حالت تشدید خارج می‌شود که می‌توان با ترکیب هندسه‌های مختلف و تغییرات جزئی در ابعاد، این موارد را اصلاح نمود [۹]. البته این موضوع ممکن است کاهش جزئی تقویت دامنه هورن را داشته باشد.

در این تحقیق ابتدا هندسه‌ی هورن به صورت پله‌ای انتخاب شده است و ابعاد آن به روش حل تحلیلی تعیین و طراحی و برای مدل‌سازی ابتدایی و تحلیل اجزا محدود استفاده می‌شود. سپس اصلاح‌هایی از نظر زاویه بر روی هندسه اعمال شده و با کمک حل اجزا محدود تغییرات شاخصه‌های عملکردی بررسی خواهد شد.

## ۲-۲- تعیین ابعاد، شبیه‌سازی و تحلیل اجزا محدود هورن ابزار برش

در ابتدا با توجه به مشخصات جدول ۱ و استفاده از روابط ۱ و ۲، طول هورن با زاویه مخروط ۹۰ درجه (هورن پله‌ای متقارن) به دست آمده است [۱۲]. سپس ابعاد هورن با زوایای دیگر و تغییرات شاخصه‌های عملکردی هر یک، توسط روش اجزا محدود تعیین و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نمایی از ابزار برش آلتراسونیک به همراه ترانسدیوسر با فرکانس تشدید ۲۲۰۰۰ هرتز در شکل ۱ نشان داده شده است.

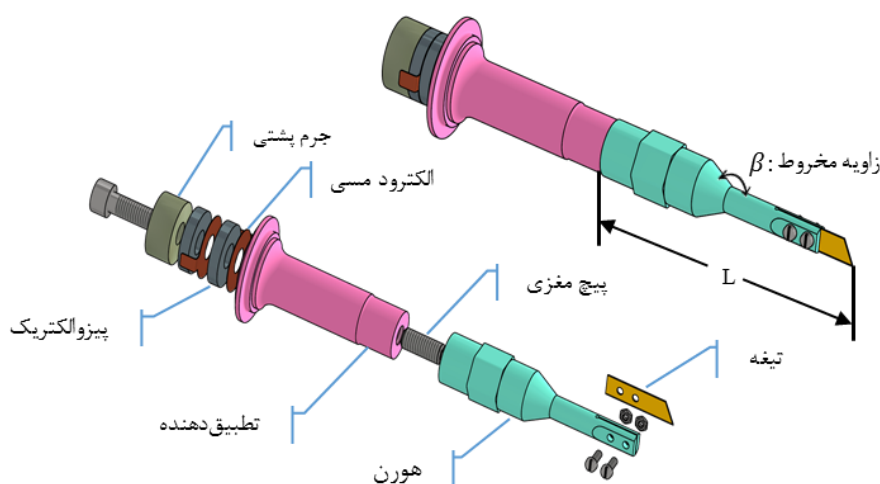
$$L = \frac{c}{2f} = 114.8(mm) = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

<sup>۱</sup> Acoustic Impedance

جدول ۱ مشخصات ابزار برش آلتراسونیک

نوع قطعه	جنس	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
هورن	Al 7075-T6	۲۸۱۰	۷۱٫۷	۰٫۳۳
تیغه	SPK	۷۷۰۰	۲۱۰	۰٫۲۹
پیچ	St304	۷۸۶۸	۲۰۷	۰٫۲۹۲

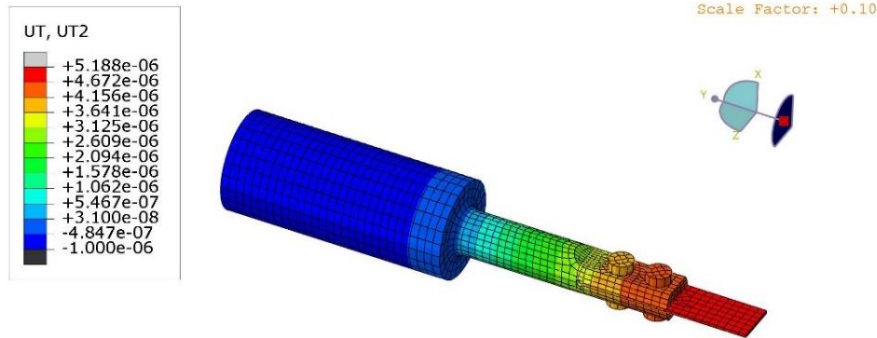


شکل ۱ نمایی انفجاری از مدل سه بعدی ابزار برش آلتراسونیک

با اجرای تحلیل‌های مودال بر روی ابزار برش با توجه به ابعاد و هندسه حاصل از حل تحلیلی و بررسی نتایج آن، اصلاحات لازم بر روی مجموعه اعمال می‌شود. نرم‌افزارهای المان محدود همچون آباکوس می‌توانند با استفاده از حل عددی معادلات و با در نظر گرفتن شرایط واقعی حاکم بر مسئله، نتایج دقیق‌تر ارائه کنند. ابعاد و هندسه نهایی طراحی شده به روش حل تحلیلی با لحاظ کردن نتایج شبیه‌سازی اصلاح می‌شوند. در حل اجزا محدود، المان‌ها می‌توانند اندازه، نوع، اجزای تشکیل‌دهنده و درجه حل متفاوتی داشته باشند. در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۲۲ مدل‌سازی با مش‌زنی با اندازه و نوع‌های مختلف بررسی شده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، با کاهش اندازه مش زمان حل مسئله افزایش می‌یابد و این در حالی است که نتایج تغییرات بسیار ناچیزی دارند؛ بنابراین در این تحقیق با توجه به نکات ذکر شده، المان مکعبی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با اندازه‌ی مش ۲ میلی‌متر برای گسسته‌سازی و حل مسئله انتخاب شده است. در شکل ۲ تصویری از شبیه‌سازی هورن با ابعاد و مشخصات ذکر شده در جدول ۱ در نرم‌افزار آباکوس آورده شده است.

جدول ۲ بررسی میزان وابستگی نتایج به اندازه مش

نوع المان	اندازه مش (mm)	تعداد مش	زمان حل (s)	فرکانس طولی مرتبه اول (Hz)
C3D20R	4	448	15	21329
C3D20R	3	760	16	21289
C3D20R	2	4002	23	21262
C3D20R	1	25422	118	21239



ODB: Job-1.odb Abaqus/Standard 2022 Sun Feb 04 21:45:45 Iran Standard Time 2024  
 Step: Step-2  
 Increment 3: Frequency = 2.2000E+04  
 Primary Var: UT, UT2 Complex: Real  
 Deformed Var: UT Deformation Scale Factor: +2.128e+02

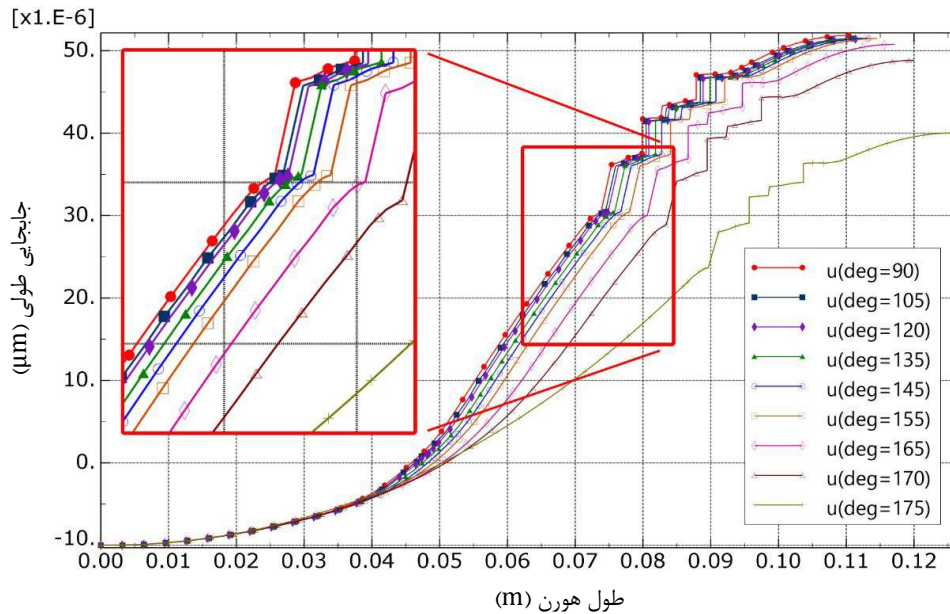
شکل ۲ تصویری از شبیه سازی هورن در نرم افزار آباکوس

تغییر ناگهانی سطح مقطع در هورن‌های پله‌ای، تمرکز تنش زیادی را ایجاد می‌کند. در این تحقیق، زاویهٔ مخروط هورن بررسی و نتایج آن به صورت اجمالی در جدول ۳ بیان شده است. در تمام این تغییرات، پیش‌فرض‌هایی مطابق آن‌چه در جدول ۱ ذکر شده، در نظر گرفته می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش زاویه قسمت مخروطی از ۹۰ تا ۱۷۰ درجه، مقادیر تنش و ضریب تقویت دامنه تغییرات زیادی ندارند؛ ولی با تغییر زاویه به ۱۷۵ درجه و صرفاً با ۵ درجه افزایش زاویه، حداکثر تنش هورن و ضریب تقویت دامنه مجموعه، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با تطبیق محل حداکثر تنش و نمونه‌های مدل‌سازی شده، مشخص می‌شود که مقدار حداکثر تنش در مقطعی در نزدیکی پیچ‌های نگهدارندهٔ تیغه است که با توجه به محل آن باید از مقدار تنش پیچ، تیغه و هورن کمتر باشد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ایجاد شکستگی‌هایی در نمودار جابه‌جایی طولی به دلیل کاهش سطح مقطع اجزا و وجود جنس‌های مختلف در مقطع مورد نظر، قابل مشاهده است. فاصله مودال برای نمونه‌ها با زاویه مخروط ۹۰ تا ۱۴۵ درجه، از محدودهٔ مناسب فاصله‌ی مودال ۵۰۰ هرتزی کمتر است.

با در نظر گرفتن موارد گفته شده، نمونه با زاویه مخروط ۱۵۵ درجه انتخاب شده است. طبق نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود، ضریب تقویت دامنه‌ی طولی این مجموعه تقریباً پنج برابر است و در عین حال دامنه‌ی ارتعاشات عرضی ایجاد شده در نوک تیغه، کمتر از یک درصد می‌باشد. فاصله‌ی فرکانسی کافی با مودهای ارتعاشی قبلی و بعدی برای جلوگیری از تداخل‌های نامطلوب ارتعاشی لازم رعایت شده است. همچنین حداکثر تنش‌های ایجاد شده در هورن در محدوده مجاز هستند.

جدول ۳ نتایج آنالیز حساسیت زاویه مخروط هورن در نرم‌افزار آباکوس

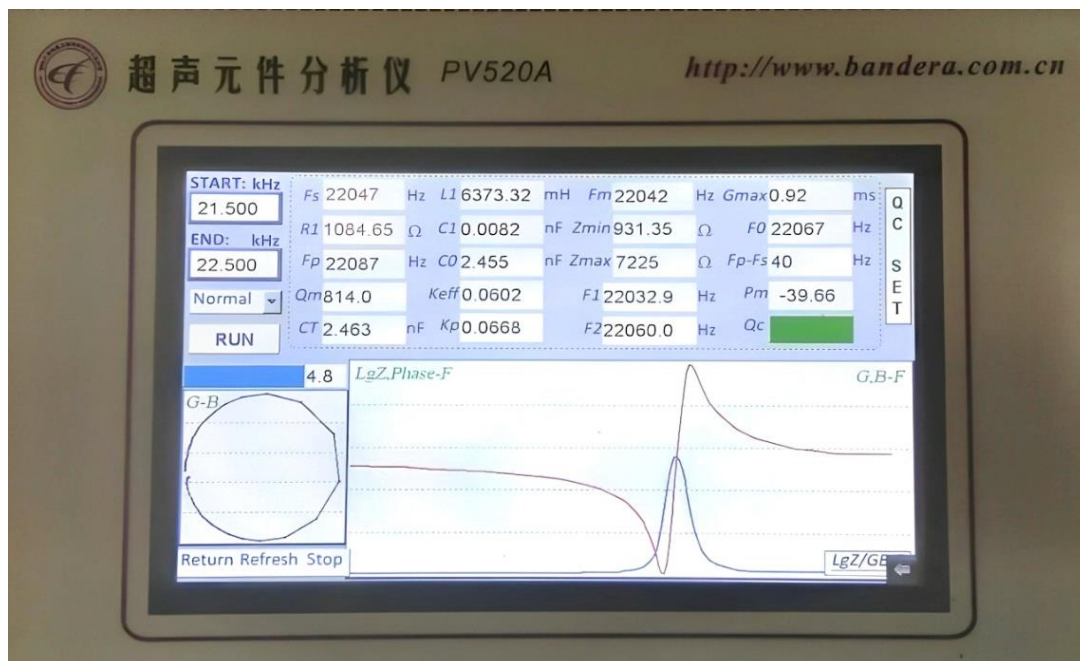
طول هورن (mm)	زاویه‌ی تبدیل (degree)	فرکانس رزناس (Hz)	تشدید قبلی (Hz)	تشدید بعدی (Hz)	تقویت دامنه -	حداکثر تنش (MPa)
93.4	90	21975	<15000	22413	5.198	115.8
93.7	105	21959	<15000	22405	5.156	115.7
94.4	120	21967	<15000	22307	5.130	115.6
95.4	135	21984	<15000	22184	5.117	115.9
96.3	145	21969	<15000	22014	5.105	116.0
97.8	155	21983	21408	24315	5.128	115.6
100.3	165	21989	20603	23410	5.042	114.2
103.2	170	21965	19633	22332	4.848	110.2
۱۰۹,۳	175	۲۱۹۷۲	۲۰۵۲۵	۲۴۸۶۲	۳,۹۷۷	۹۰,۱



شکل ۳ نمودار جابجایی طولی در طول هورن

### ۲-۳- صحت سنجی ابزار برش توسط دستگاه تحلیل گر امپدانس

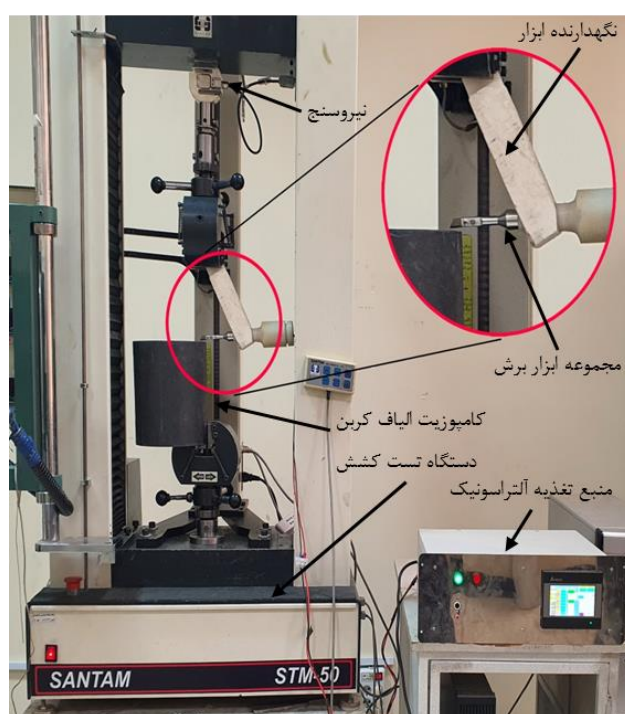
به منظور اطمینان از عملکرد صحیح ابزار برش آلتراسونیک ساخته شده و مقایسه‌ی نتایج تئوری با نتایج عملی و اندازه‌گیری فرکانس رزونانس آن، از دستگاه تحلیل گر امپدانس مدل PV520A از شرکت باندررا الکترونیکس استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، فرکانس رزونانس ابزار برش آلتراسونیک توسط این دستگاه ۲۲۰۴۷ هرتز اندازه‌گیری شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل مودال عملی نمونه‌ی ساخت ه شده با شبیه‌سازی عددی مدل، خطای بسیار اندکی به مقدار ۰/۲۸ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۴ صحت سنجی ابزار برش ساخته شده به وسیله‌ی دستگاه تحلیل گر امپدانس

### ۳- انجام و تحلیل آزمایش‌ها

آزمایش‌هایی با هدف اندازه‌گیری و مقایسه‌ی نیرو و کیفیت سطح برش توسط ابزار برش آلتراسونیک در توان‌های ۰، ۹۰ و ۱۲۰ وات انجام شده است. در هر مرحله آزمایش، برش قطعه‌کاری از جنس الیاف کربن با ضخامت یک میلی‌متر و با سرعت ثابت ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. از بین پارامترهای خروجی قابل کنترل و اندازه‌گیری در این آزمایش، کیفیت سطح برش و نیروی لازم برش مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت نتایج و جلوگیری از خطاهای احتمالی، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است. طول برش باید به اندازه‌ای باشد که نیروهای برشی به حالت پایدار برسند. در هر مرحله آزمایش، طولی برابر با ۴۰ میلی‌متر برش داده شده است. در شکل ۵ نمایی از فرایند انجام آزمایش و تجهیزات شامل دستگاه تست کشش، منبع تغذیه آلتراسونیک با امکان تنظیم فرکانس و توان، ورق الیاف کربن و مجموعه ی هورن، ترانسدیوسر و تیغه نشان داده شده است.



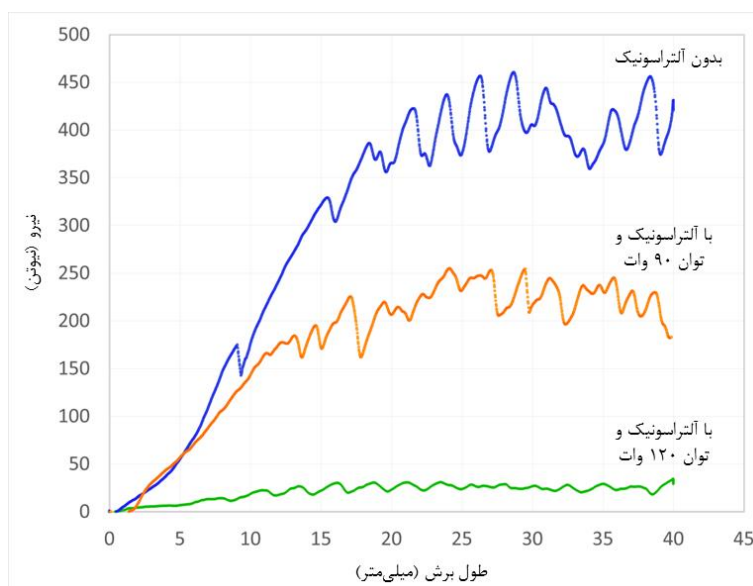
شکل ۵ نمایی از فرایند برش توسط ابزار برش آلتراسونیک بر روی دستگاه STM-50

در جدول ۴ مقادیر حداکثر نیرو در توان‌های متفاوت آلتراسونیک نشان داده شده است. شکل ۶ نمودار حاصل از اندازه‌گیری نیروی برش کامپوزیت الیاف کربن در دو حالت با و بدون اعمال امواج آلتراسونیک را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از برش الیاف کربن با استفاده از امواج آلتراسونیک کاهش نیرویی تا ۱۶ برابر کمتر نسبت به برش بدون آلتراسونیک را نشان می‌دهد. تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی بررسی مکانیزم برش آلتراسونیک، علت کاهش نیروی برش با آلتراسونیک را تبدیل اصطکاک ایستایی به جنبشی بیان نموده‌اند [۱۳]. به دلیل اینکه ابزار به صورت منقطع و ضربه‌ای شروع به برش می‌کند، برش به صورت منقطع انجام می‌شود و نیروی وارده از سوی قطعه‌کار به ابزار کاهش می‌یابد [۱۴]. شکل ۷ نمونه‌ای از کیفیت لبه‌ی برش قطعه‌کار با و بدون امواج آلتراسونیک توسط دستگاه اندازه‌گیری ویدئویی<sup>۱</sup> مدل KIM-3020CU-IM را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصاویر به وضوح دیده می‌شود در برش با امواج آلتراسونیک، کیفیت لبه‌ی برش افزایش یافته و مقدار عدم مستقیم بودن آن کاهش یافته است. بهبود کیفیت سطح برش می‌تواند ناشی از تغییر حالت شکست در اثر تغییر زاویه بین جهت سرعت برش و جهت الیاف باشد [۱۵]. بنابراین برش با ابزار برش آلتراسونیک علاوه بر کاهش نیروهای برش، مکانیزم برش نیز نسبت به حالت بدون آلتراسونیک متفاوت بوده که در نهایت جدایش الیاف کمتر شده و کیفیت ظاهری لبه‌ی برش و مقدار مستقیم بودن آن افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Video Measuring System (VMS)

جدول ۴ اثر توان‌های متفاوت آلتراسونیک بر نیروی برش

توان (W)	حداکثر نیرو (N)
بدون آلتراسونیک (۰)	۴۶۰
۹۰	۲۷۰
۱۲۰	۴۰



شکل ۶ مقایسه‌ی نیروی برش در برش بدون آلتراسونیک و برش با امواج آلتراسونیک با توان‌های ۹۰ و ۱۲۰ وات و سرعت پیشروی ثابت ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه



مقدار عدم مستقیمی لبه‌ی برش: مقدار عدم مستقیمی لبه‌ی برش: مقدار عدم مستقیمی لبه‌ی برش: ۰.۰۲۷۷ میلی‌متر ۰.۰۱۳۷ میلی‌متر ۰.۰۰۲۴ میلی‌متر

شکل ۷ مقایسه‌ی کیفیت لبه‌ی برش قطعه کار در برش با و بدون آلتراسونیک

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا با انجام محاسبات تحلیلی، هورن پله‌ای طراحی شده و سپس اضافه کردن قسمت مخروطی شکل با زوایای مختلف، با استفاده از تحلیل اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که اضافه کردن قسمت مخروطی با زوایای مختلف سبب تغییراتی در حدود ۵ درصد در میزان حداکثر تنش و ضریب تقویت دامنه هورن می‌شود. البته با این وجود استفاده از هورن با مخروط میانی باعث افزایش فاصله مود ارتعاشی و همچنین استحکام بیشتر ابزار در مقابل نیروهای حاصل از برش می‌شود و با تغییر یکنواخت‌تر سطح مقطع، اتلاف انرژی امواج به صورت گرما کاهش می‌یابد و می‌تواند با افزایش فاصله‌ی فرکانس تشدید و ضد تشدید، پایداری عملکرد ابزار را در فرکانس تشدید بهبود دهد. زاویه‌ی ۱۵۵ درجه به عنوان زاویه‌ی بهینه تحت شرایط فوق مشخص شده است. با مقایسه‌ی نتایج تحلیل مودال عملی نمونه‌ی ساخته شده با شبیه‌سازی عددی مدل، خطای بسیار اندکی به مقدار ۰/۲۸ درصد اندازه‌گیری شده است.

طبق نتایج حاصله، با استفاده از ابزار برش آلتراسونیک نیروهای برش به طور محسوسی تا یک شانزدهم نسبت به برش بدون امواج آلتراسونیک کاهش یافته است. تماس کمتر ابزار با ناحیه برش و در نتیجه کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه از جمله دلایلی است که برای کاهش نیروهای برش بیان شده است. در تصاویر میکروسکوپی سطح برش به وضوح دیده می‌شود که در برش با امواج آلتراسونیک، کیفیت لبه‌ی برش افزایش و مقدار عدم مستقیم بودن آن کاهش یافته است که می‌تواند در اثر تغییر مکانیزم برش ناشی از تغییر زاویه بین جهت سرعت برش و جهت الیاف باشد.

### فهرست علائم

$L$	طول هورن (m)
$c$	سرعت موج در ماده ( $\text{ms}^{-1}$ )
$f$	فرکانس موج ( $\text{s}^{-1}$ )
$E$	مدول الاستیسیته ( $\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )

### علائم یونانی

$\lambda$	طول موج در جامد (m)
$\rho$	دانسیته جامد ( $\text{kgm}^{-3}$ )

### References

- [1] Bejarano F, Lucas M, Wallace R, Spadaccino AM, Simpson H. Ultrasonic cutting device for bone surgery based on a cymbal transducer. *Physics Procedia*. 2015 Jan 1;63:120-6. doi: 10.1016/j.phpro.2015.03.020
- [2] Nielsen AG, Richards JR, Wolcott RB. Ultrasonic dental cutting instrument: I. *The Journal of the American Dental Association*. 1955 Apr 1;50(4):392-9. doi: 10.14219/jada.archive.1955.0077
- [3] Cardoni A, Lucas M. Strategies for reducing stress in ultrasonic cutting systems. *Strain*. 2005 Feb;41(1):11-8. doi: 10.1111/j.1475-1305.2004.00162.x
- [4] Cardoni A, MacBeath A, Lucas M. Methods for reducing cutting temperature in ultrasonic cutting of bone. *Ultrasonics*. 2006 Dec 22;44:e37-42. doi: 10.1016/j.ultras.2006.06.046
- [5] Mughal KH, Qureshi M, Qaiser A, Khalid F. Numerical Evaluation of State of the Art Horn Designs for Rotary Ultrasonic Vibration Assisted Machining of Nomex Honeycomb Composite. *Research Square*. 2021;5:7-9. doi: 10.21203/rs.3.rs-207300/v1
- [6] Lucas M, MacBeath A, McCulloch E, Cardoni A. A finite element model for ultrasonic cutting. *Ultrasonics*. 2006 Dec 22;44:e503-9. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.115
- [7] Arnold G, Leiteritz L, Zahn S, Rohm H. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. *International Dairy Journal*. 2009 May 1;19(5):314-20. doi: 10.1016/j.idairyj.2008.11.007
- [8] El-Hofy H. *Non-traditional and Advanced Machining Technologies*. CRC Press; 2020 Aug 10.
- [9] P Z. *Modelling and design of ultrasonic bone cutting [dissertation]*. University of Glasgow; 2015.
- [10] Mohammadi A, Abbasi Mobarakeh H, Khodakarami M. Investigation of material removal rate and surface quality of super clear crystal glass workpiece in the ultrasonic machining process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Mar 21;10(1):1-0. doi: 10.22034/IJME.2023.420276.1857 [In Persian]
- [11] Nad M, Cicmancova L. The effect of the shape parameters on modal properties of ultrasonic horn design for ultrasonic assisted machining. In *Proceedings of the 8 th International Conference DAAAM-Industrial Engineering, Tallinn-Estonia 2012 Apr* (pp. 57-62).
- [12] Ensminger D, Stulen FB, editors. *Ultrasonics: data, equations and their practical uses*. CRC press; 2008 Dec 17.
- [13] Ensminger D, Bond LJ. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press; 2024.
- [14] Baraheni M, Janfaghi Shahi V. Enhancing dimensional accuracy of the produced holes in CFRP by ultrasonic vibration assistance. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 May 22;10(3):1-8. doi: 10.22034/IJME.2023.422082.1867 [In Persian]
- [15] Wang X, Song C, Tong J, Li L, Wu M, Zhao B. Study on the influence of ultrasonic-assisted cutting on the surface quality of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Mar;131(5):1989-2000. doi: 10.1007/s00170-022-10524-5