



Design and Fabrication of Ultrasonic Horns to Enhance the Amplitude of Vibration in Emulsion Homogenization

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mirzaei D.¹,
Amini S.^{1*}

How to cite this article

Mirzaei D. Amini S., Design and Fabrication of Ultrasonic Horns to Enhance the Amplitude of Vibration in Emulsion Homogenization. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(02):93-105.

¹ Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kahan, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kahan, Iran.

Phone: -

Fax: -

amini.s@kashanu.ac.ir

Article History

Received: April 18, 2021

Accepted: August 21, 2021

ePublished: December 25, 2022

ABSTRACT

Today, the application of ultrasonic tools in various processes such as machining, welding, homogenizing, etc., has become widespread. One of the most important and key components in the transfer of acoustic energy in emulsion homogenization applications is the ultrasonic horn. This part is stable from the point of view of energy, but the amount of vibration amplitude can be changed by changing the shape and material. The purpose of this paper is to analyze the multistage ultrasonic horn to achieve the desired vibration amplitude in various applications. Optimal horn design has been done with the aim of increasing the amplitude of vibration, increasing and distributing the wave transmission surface and considering the strength of the horn, the appropriate length to diameter ratio to achieve uniform cavitation in the emulsion. The goal is to achieve a horn with a high amplification factor and a larger and wider radiation area at the end and lateral area of the horn. The high vibration amplitude and wave propagation area at the tip and the lateral area of the horn increase the amount of cavitation in the emulsion process, and the wider the wave propagation regions, the more efficient the homogenization process will be.

Keywords Ultrasonic Horn, Amplification factor, Emulsion, numerical and analytical method, Optimization

CITATION LINKS

[1] Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. [2] Optimization of nanoemulsions processed by high-pressure homogenization ... [3] Enhancing rosemary oil-in-water microfluidized nanoemulsion properties through formulation optimization by response surface methodology. [4] Minimising oil droplet size using ultrasonic emulsification. [5] The characteristics of water-in-biodiesel emulsions produced using ultrasonic homogenizer. [6] A computational and experimental study on acoustic pressure for ultrasonically formed oil-in-water emulsion. [7] Designing and characterizing a multi-stepped ultrasonic horn for enhanced sonochemical performance. [8] Design of ultrasonic concentrators. [9] Solid Cone in Longitudinal Half-Wave Resonance. [10] The design and construction of solid concentrators for ultrasonic energy. [11] Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis. [12] Novel horn designs for power ultrasonics. [13] Design and construction of an acoustic horn for high power ultrasonic transducers. [14] Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. [15] Design of a Bézier-profile horn for high displacement amplification. [16] Finite element analysis of ultrasonic stepped horn. [17] A nonrational B-spline profiled horn with high displacement amplification for ultrasonic welding. [18] Continuous-flow production of a pharmaceutical nanoemulsion ... [19] Analytical modeling and finite element simulation of exponential horns with rectangular cross-section. [20] Designing and characterizing a multi-stepped ultrasonic horn ... [21] Investigation of acoustic and geometric effects on the sonoreactor performance. [22] A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers ... [23] Characterising the cavitation activity generated by an ultrasonic horn at varying tip-vibration amplitudes. [24] A hollow exponential ultrasonic horn for aluminum melt ... [25] Invention of a new ultrasonic horn in 3D ultrasonic vibration assisted turning. [26] Improving the surface energy of titanium implants by the creation of hierarchical textures ... [27] Acoustic horn design for joining metallic wire with flat metallic sheet by ultrasonic vibrations. [28] Effect of concentrated flaxseed protein on the stability and rheological properties of soybean ... [29] Influence of the emulsion components and preparation method on the laboratory-scale preparation ...

طراحی و ساخت هورن التراسونیک به منظور تقویت دامنه ارتعاش در همگن سازی امولسیون

داود میرزایی

مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه کاشان، کاشان

سعید امینی*

مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده

امروزه کاربرد ابزارهای التراسونیک در فرآیندهای مختلف از جمله ماشین کاری، جوش کاری، همگن ساز و غیره، گسترده گردیده است. یکی از اجزای مهم و کلیدی در انتقال انرژی اکوستیکی در کاربردهای همگن سازی امولسیون، هورن التراسونیک می باشد. این قطعه از دیدگاه انرژی پایستار می باشد ولی می توان با تغییرات شکل و جنس، میزان دامنه ارتعاشی را تغییر داد. هدف از این مقاله، تحلیل هورن التراسونیک چند پله ای برای دستیابی به دامنه ارتعاش مورد نظر در کاربردهای گوناگون می باشد. طراحی بهینه هورن با هدف افزایش دامنه ارتعاش، افزایش و توزیع سطح انتقال امواج و در نظر گرفتن استحکام هورن، نسبت طول به قطر مناسب برای دستیابی به یکنواختی کاویتاسیون در امولسیون انجام شده است. هدف دستیابی به هورن با ضریب تقویت کنندگی بالا و مساحت انتشار بزرگتر و گسترده تر در انتها و طول هورن می باشد. بالا بودن دامنه ارتعاش و گستردگی مساحت انتشار امواج در نوک و طول هورن موجب افزایش میزان کاویتاسیون در فرآیند امولسیون می گردد و هرچقدر بتوان نواحی انتشار موج را گسترده تر نمود، بازدهی فرآیند همگن سازی افزایش خواهد یافت.

کلیدواژه ها: هورن التراسونیک، ضریب تقویت شونده، امولسیون، روش تحلیلی و عددی، بهینه سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

فناوری تولید امولسیون ها در صنایع مختلف شامل صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی، بهداشتی و آرایشی، از جایگاه ویژه و شناخته شده ای برخوردار است. با توجه به کاربرد گسترده امولسیون ها در این صنایع، بررسی روش های نوین در تولید و بالابردن کیفیت آن بسیار حائز اهمیت است.

تاکنون پژوهش های متعددی در زمینه ساخت نانوامولسیون ها با استفاده از روش های مختلف [1-3]، انجام شده است. در این پژوهش ها روش های مختلفی همچون همگن ساز های مکانیکی، فشار بالا و میکروفلوئید ساز ها مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر روش های مرسوم روش همگن سازی آلتراسونیک به عنوان یکی از روش های جدید شناخته می شود که پژوهش های گسترده ای در این زمینه وجود دارد [4,5].

با توجه به هدف پژوهش که بهینه سازی هورن باربل به منظور افزایش دامنه ارتعاش و سطح انتشار امواج اکوستیکی برای افزایش کاویتاسیون در امولسیون سازی می باشد مروری بر تحقیقات گسترده در این زمینه انجام گردیده است. جویس تیونگ و همکاران [6]، تاثیر موقعیت های مختلف هورن التراسونیک، بر روی اندازه ذرات امولسیونی و نیز تاثیر فشار اکوستیکی شبیه سازی شده را بر روی نتایج آزمایش مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر آن است که شدت فشار اکوستیکی نقش مهمی در شکل گیری ذرات ریز امولسیونی ایفا می کند. بیشتر ناحیه هایی که فشار اکوستیکی بالاتر از آستانه کاویتاسیون داشتند. ذراتی به اندازه ۲۵۰ نانومتر و با شاخص پراکندگی ۰/۲ الی ۰/۳ پدید آوردند. آقای وی و همکارانش [7]، برای اینکه کاویتاسیون انتشار یافته در هورن های عادی (که معمولا در زیر سر انتهایی هورن می باشد) را گسترش داده و در بدنه اصلی هورن نیز این ارتعاش ها به کاویتاسیون تبدیل گردد، هورن جدیدی را بر اساس معادله دینامیک موج، ارائه نموده است. طرح ارائه شده به صورت پله ای شکل بوده و دارای یک سر مخروطی در انتها برای افزایش مساحت سطح انتشار کاویتاسیون می باشد. مرکولوف در سال ۱۹۵۷، تعدادی هورن التراسونیک با اشکال هندسی مخروطی، نمایی و هذلولی را بررسی کرد و نتیجه گرفت که بیشترین کارایی را پروفیل هذلولی دارد [8]. در سال ۱۹۶۰ انسمنیگر نوعی پروفیل مخروطی شکل از جنس فولاد را بررسی کرد و ضریب بهره مشابه پژوهش مرکولوف را به دست آورد. در سال ۱۹۷۶ امزا و همکاران [9] اثرات جرم هورن را بر مودهای ارتعاشی مورد مطالعه تحلیلی قرار دادند و نتیجه گرفتند پروفیل هذلولی بهتر است [10].

در سال ۱۹۹۵ آمین و همکارانش [11]، از روش حل عددی و روش اجزاء محدود، برای طراحی شکل هورن استفاده کردند. آن ها ابتدا هورن های پله ای، مخروطی و نمایی را با روش تعادل و همچنین با روش اجزاء محدود بررسی نمودند.

آن ها نتیجه گرفتند که ضریب بهره هورن پله ای بیشتر از دو هورن دیگر و مقدار آن برابر است با توان دوم نسبت قطر ها و ضریب بهره هورن نمایی بسیار کمتر از هورن پله ای بوده و برابر با توان اول نسبت قطر ها است. هورن مخروطی کمترین ضریب بهره را در مقایسه با دو هورن دیگر دارد. ضریب بهره برای هورن پله ای، مخروطی و نمایی به ترتیب برابر ۱۶/۳، ۴/۳ و ۴ به دست آمد. سپس آن ها به معرفی شکل هورن دو مخروطی پرداختند که شامل یک سوراخ در ابتدا برای اتصال به ترانسیدوسر است. ضریب بهره این هورن ۷/۳ به دست آمد که مقدار آن بیشتر از هورن نمایی است. مقدار ضریب بهره هورن طراحی شده کمتر از هورن پله ای است اما در عوض میزان تنش در طول این هورن به مراتب کمتر از هورن پله ای است. هورن طراحی شده از ترکیب دو هندسه استوانه ای در ابتدا و انتها و دو مخروط در وسط ساخته شده است. آن ها علاوه بر هورن دو مخروطی، تمهیداتی در طراحی به کار بردند یک هورن

زیرا اندازه ذرات امولسیون در این مقیاس نسبت به دو مقیاس دیگر، ریزتر شده که نتیجه آن، امولسیون پایدارتر است.

در سال ۱۳۹۲، امامی و همکاران، هورن نمایی با سطح مقطع مستطیلی را مورد بررسی تحلیلی و شبیه‌سازی اجزاء محدود قرار دادند. آن‌ها برای سه هورن با جنس‌های مختلف، عوامل ارتعاشی، شامل فرکانس تشدید و ضریب بهره حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود را با حل تحلیلی مقایسه نمودند که نتایج، تطابق مطلوبی را بین مقادیر حل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزاء محدود، نشان می‌داد[19]. آن‌ها همچنین با استفاده از روابط تحلیلی، به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت مدول یانگ به چگالی (E/ρ) افزایش طول هورن و با افزایش فرکانس تشدید، کاهش طول هورن و علاوه بر این با افزایش طول هورن، ضریب بهره افزایش می‌یابد. ژانگسو وی و همکاران، در سال ۲۰۱۵[20]، با طراحی هورن چند پله‌ای (Multi-Stepped Horn)، به بازده انرژی ۳۱/۵ درصد دست یافتند و با مقایسه آن با یک هورن پله‌ای ساده (که بازده انرژی ۱۳/۵ داشت) نتیجه گرفتند که هورن طراحی شده، توانسته است افزایش مناسبی را در بازده انرژی ایجاد نماید. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که می‌توان از بدنه هورن نیز ارتعاش گرفت و عمل کاویتاسیون فقط در انتهای هورن خلاصه نمی‌شود. علاوه بر انتهای هورن، نواحی دیگری هم در طول هورن وجود دارد که قادر به ارتعاش هستند و می‌توانند ناحیه‌های کاویتاسیون را در سیال ایجاد کنند.

در سال ۲۰۲۰[21] عملکرد سه مدل مختلف راکتور آلتراسونیک مورد بررسی قرار گرفت. اثر عوامل هندسی و اکوستیکی به صورت تک‌عاملی بررسی شده است. نتایج مطالعات پارامتریک نشان داده که بالاترین انرژی کاویتاسیون در فشار منفی در محدوده ۶۰ تا ۸۰ کیلو هرتز اتفاق افتاده است.

در پژوهش[22] یک مدل الکترو مکانیکی ریاضی پیوسته از مبدل‌های التراسونیک لانگوین با در نظر گرفتن سه عامل ایجاد شده است: ارتعاشات سه بعدی، اثرات پیزوالکتریک و عناصر میرایی در نظر گرفته شده است. از آنجا که روش‌های مدار معادل یک سیستم پیوسته را با اجزای گسسته شبیه سازی می‌کنند، نزدیک به یک فرکانس تشدید معتبر هستند. با این حال، یک مدل پیوسته در فرکانس گسترده تر معتبر است. دامنه همچنین می‌تواند تأثیر هندسه‌ها و خصوصیات مواد را در پاسخ فرکانسی مبدل‌ها توصیف کند. با استفاده از مدل ریاضی می‌توان دامنه ارتعاش‌ها، شکل‌مود، فرکانس‌های تشدید کننده و ضد تشدید، ضریب کیفیت مکانیکی و پاسخ فرکانسی را برای مبدل با هندسه خاص و ویژگی‌های ماده به دست آورد.

در پژوهشی در سال ۲۰۲۱[23] با استفاده از دوربین سرعت بالا و سنسورهای اکوستیکی میزان کاویتاسیون در انتهای هورن ۲۰ کیلو هرتز در توان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با جمع آوری داده‌های تجربی میزان کاویتاسیون ایجاد شده در زیر

دیگر پیشنهاد دادند به نحوی که هندسه آن به هورن پله‌ای نزدیک‌تر شود که بتواند ضریب بهره را از ۶/۳ به ۸ ارتقاء دهند.

در سال ۲۰۰۴ شریب و همکاران[12]، یک هورن معرفی کردند که طول کلی سیستم ارتعاشی را کاهش می‌دهد. این کاهش طول، برای فرایند ضربه‌زنی کاربردی است. به عبارتی می‌توان گفت هورن معرفی شده، یک هورن پله‌ای است که به داخل خود تا شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که موده‌های کششی و خمشی می‌توانند برای ایجاد جابه‌جایی زیاد در انتها، اضافه شوند.

در سال ۲۰۰۶، وو و همکاران[13]، یک هورن که با انرژی التراسونیک بالا تحریک می‌شود را مورد مطالعه قرار دادند. ابعاد بهینه هورن به منظور دستیابی به ارتعاشات فرکانس بالا، با تحلیل اجزاء محدود به کمک نرم افزار ANSYS، به دست آمد.

پشکوفسکی و همکاران در سال ۲۰۰۷[14]، با استفاده از روش تحلیلی، هورن پنج عاملی با انطباق‌پذیری مطلوبی را طراحی کردند. آن‌ها با بررسی عوامل هندسی، اثرات عوامل مختلف هندسی پنج عامل را بر روی ضریب بهره بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش منطقی مقدار ضریب بهره، می‌توان کاویتاسیون بیشتری در سیال ایجاد کرد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰[15]، یک هورن با پروفیل بزیر (Bézier) را برای ضریب بهره بیشتر معرفی کردند. طراحی آن‌ها بر اساس منحنی بزیر بود. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندمنظوره و روش اجزاء محدود، ضریب بهره هورن را بهینه کردند و با ساخت آن و انجام آزمایش‌های تجربی، مشخصات طراحی را اعتبارسنجی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هورن ارائه شده جذب بیشتری از توان الکتریکی در آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد. ضریب بهره آن ۷۱٪، بیشتر از هورن هذلولی با طول و قطر انتهایی مشابه است و حداکثر تنش آن به مراتب کمتر از هورن هذلولی می‌باشد.

در سال ۲۰۱۱ پھیرا و همکاران[16]، هورن پله‌ای را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند این شکل هورن ضریب تقویت به مراتب بیشتری نسبت به پروفیل‌های نمایی و هذلولی دارد. در سال ۲۰۱۴ نون و همکاران[17]، برای دستگاه جوش التراسونیک پلاستیک یک هورن جدید به نام اونبز (OUNBS (open uniform nonrational B-spline)) ارائه نمودند که جابه‌جایی سر هورن را بیشتر تقویت می‌کند و توزیع تنش ملایم‌تری نسبت به سایر پروفیل‌ها دارد. الکس و پشکوفسکی در سال ۲۰۱۴[18]، یک هورن به نام هورن باربل نیم‌موجی (HBH (Half-wave Barbell Horn)) طراحی کردند. هورن طراحی شده ضریب بهره مناسبی داشت و کاویتاسون مطلوبی در سیال ایجاد می‌نمود. آن‌ها با ارزیابی هورن در یک امولسیون با جریان پیوسته به این نتیجه رسیدند که هرچه قدر دبی سیال کمتر شود، اندازه ذرات ریزتر شده و مطلوب‌تر است.

با به کار بردن هورن باربل در سه مقیاس مختلف آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی، به این نتیجه رسیدند که ایده‌آل‌ترین مقیاس برای تهیه ذرات امولسیونی، مقیاس آزمایشگاهی است

هورن را تابعی از توان ورودی و دامنه ارتعاش سر هورن تعریف می‌نماید.

در پژوهش^[24] به منظور گاززدایی آلومینیوم مذاب، یک هورن آلتراسونیک با سطح نمایی توخالی ارائه شده است. تجزیه و تحلیل عددی نشان داده که با افزایش قطر سوراخ مرکزی، فاکتور تقویت و ضریب شکل هورن افزایش می‌یابد. در این پژوهش، تجزیه و تحلیل و آزمایشات نشان داده که فرکانس‌های رزونانس همه هورن‌ها بسیار نزدیک به فرکانس تنظیم شده هستند و نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از عوامل مناسب می‌توان اثر گاززدایی رضایت بخش‌تری را به دست آورد.

بر اساس مطالعات صورت گرفته در مبحث هورن‌های التراسونیک، نحوه انتخاب و طراحی شکل هندسی هورن، ضریب بهره آن را مشخص می‌کند^[18-25]. از طرفی بر اساس مطالعه پشکوفسکی و همکاران با بالابردن ضریب بهره به طور منطقی و تقویت دامنه ارتعاش خروجی، عمل کاویتاسیون بهتر صورت گرفته است^[18]. پس می‌توان نتیجه گرفت با طراحی مناسب شکل هورن (که سطح تماس آن را با سیال بیشتر می‌کند)، می‌توان به ضریب بهره نسبتاً مناسب و بالا رسید؛ به گونه‌ای که دامنه خروجی تقویت شود و در نتیجه عمل کاویتاسیون بهتر صورت گیرد. از طرفی اگر سعی شود علاوه بر انتهای هورن، از سایر نقاط در طول هورن (مخصوصاً در نقاط پله) ارتعاشات گرفت، نواحی کاویتاسیون بیشتری می‌توان ایجاد کرد و در نتیجه می‌توان یک امولسیون پایدارتر ایجاد کرد. هدف این پژوهش، حل معادلات پیوسته ارتعاشات طولی هورن و دامنه ارتعاش قسمت‌های مختلف طولی هورن و نوک هورن و تحلیل تنش برای قسمت‌های مختلف هورن باربل بعلاوه باربل در حالت پله ای در انتها، برای گسترش سطح انتشار می‌باشد. برای این منظور، برنامه‌ای در نرم افزار متلب نوشته شده است که با بررسی اندازه مناسب هورن بهینه‌سازی با تابع هدف بالاترین ضریب تقویت شوندگی هورن و کمترین تنش در طول هورن و همچنین افزایش سطح انتشار موج را محاسبه می‌نماید. در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج از برنامه بهینه‌سازی، تحلیل مودال و هارمونیک هورن در نرم افزار آباکوس کمک گرفته و فرکانس طبیعی، دامنه ارتعاشی و تنش هورن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در پایان با ساخت نمونه تحلیل شده، نتایج تحلیل ارائه شده است. همچنین برای یک نمونه امولسیون آب و روغن، با استفاده از فاکتورهای ارزیابی کیفی با فاکتور فعالیت و پایداری امولسیون و درصد خامه ای شدن ارزیابی صورت گرفته است.

۲- روش حل

۲-۱- روش تحلیلی

در این قسمت ابتدا به تحلیل معادله موج صفحه‌ای در یک قطعه پرداخته می‌شود. برای حل فرضیات زیر را در نظر گرفته شده است.

- موج انتشار یافته در قطعه مورد نظر طولی است.

- امواج از نوع مسطح می‌باشند؛ یعنی سطح به سطح منتقل می‌شوند.

- فشار جانبی بر روی قطعه مورد نظر وجود ندارد.
- حداکثر قطر قطعه مورد نظر کوچکتر یا مساوی با یک چهارم طول موج باشد.
- نرخ تغییرات قطر نسبت به طول در حد مجاز باشد تا قطعه مورد نظر زود دچار خستگی نشود.
- قطعه مورد نظر همگن و ایزوتروپ است.
- میرایی در قطعه وجود ندارد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EA(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho A(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

معادله (۱) را معادله موج صفحه‌ای یک بعدی می‌نامند. این موج با استفاده از خاصیت الاستیک ماده باعث ایجاد ارتعاشات در قطعه می‌شود. در پژوهش حاضر منظور از قطعه، هورن مورد نظر است که در ادامه به طراحی آن پرداخته می‌شود. بنابراین معادله (۱) معادله کلی ارتعاش آزاد هورن التراسونیک است. در مبحث هورن‌های همگن‌ساز التراسونیک معمولاً موج‌های طولی مدنظر هستند؛ بنابراین در در مبحث ارتعاشات آزاد این هورن‌ها، به بررسی مود طولی (کششی)، پرداخته می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۱)، مشاهده می‌شود معادله دیفرانسیلی از نوع مشتقات جزئی است که در آن x ، فاصله از ابتدای هورن بر حسب متر، t کمیت زمان بر حسب ثانیه، u جابه‌جایی طولی (در راستای محور) بر حسب متر، $A(x)$ سطح مقطع هورن (در فاصله x) بر حسب متر مربع، E مدول الاستیسیته بر حسب نیوتون بر متر مربع و ρ چگالی هورن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است. معادله فوق از دو متغیر مستقل x و t تشکیل شده است که در ادامه با روش جداسازی متغیرها، معادله با مشتقات جزئی به معادله دیفرانسیلی ساده تبدیل می‌شود.

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{1}{A(x)} \frac{dA}{dx} \frac{du}{dx} + k^2 u = 0 \quad (2)$$

که در آن کمیت k ، عدد موج است. این کمیت بیانگر فرکانس زاویه‌ای یک موج است که به صورت دور بر واحد طول یا رادیان بر واحد طول بیان می‌شود. به عبارت دیگر، عدد موج تعداد موج‌های موجود در واحد طول است.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c} \quad (3)$$

ω فرکانس طبیعی هورن است که در پژوهش حاضر برابر با فرکانس طبیعی هید التراسونیک می‌باشد.

برای هورن‌های با سطح مقطع ثابت مانند استوانه، معادله به صورت رابطه (۴) و حل آن به صورت رابطه (۵) است.

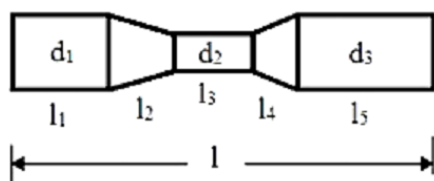
$$\frac{d^2 u}{dx^2} + k^2 u = 0 \quad (4)$$

$$u = A \cos(kx) + B \sin(kx) \quad (5)$$

مطابق با هندسه شکل ۲ صورت گرفته که به هورن باربل معروف است. با توجه به پژوهش^[14] طراحی هورن باربل بر اساس ایده افزایش مساحت انتشار موج و تقویت دامنه ارتعاش برای کاربردهای همگن سازی توان بالا در حجم های بالا بهینه سازی شده است. هورن باربل از پنج عامل تشکیل شده است که شامل سه عامل استوانه ای و دو عامل مخروطی می باشد و همواره با توجه به تعداد عوامل براساس طول موج کامل طراحی می گردد. مطابق شکل ۲، هورن از طرف عامل اول با طول L_1 به ترانسدیوسر پیچ می شود و انتهای هورن یعنی عامل با طول L_5 در سیال قرار می گیرد. معمولاً طراحی این نوع هورن با محاسبات تحلیلی به گونه ای صورت می گیرد که طول عامل اول و سوم با هم و طول عامل دوم و چهارم نیز با هم برابر باشد^[18]. معمولاً طول عامل پنجم از چهار عامل دیگر بزرگ تر با هدف دستیابی به بیشینه دامنه ارتعاش در نوک هورن می باشد. معمولاً قطر عامل اول و پنجم برابر است و قطر عامل سوم کسری از دو قطر دیگر است. $\frac{d_1}{d_3}$ می تواند یکی از اعداد ۱/۵، ۲، ۳/۵، ۳، ۴/۵، ۵/۴ و نهایتاً ۵ باشد. هرچه این نسبت بزرگ تر باشد، ضریب بهره بالاتر رفته اما در عوض تنش در عامل سوم به مراتب افزایش یافته و عمر خستگی را کم می کند، از طرفی انتقال ارتعاشات به راحتی صورت نمی گیرد که برای رفع نسبی این مشکل طول عوامل مخروطی را افزایش می دهند. در شکل ۳ دو نمونه هورن باربل نمایش داده شده است^[14].

۲-۳- تحلیل معادلات هورن باربل

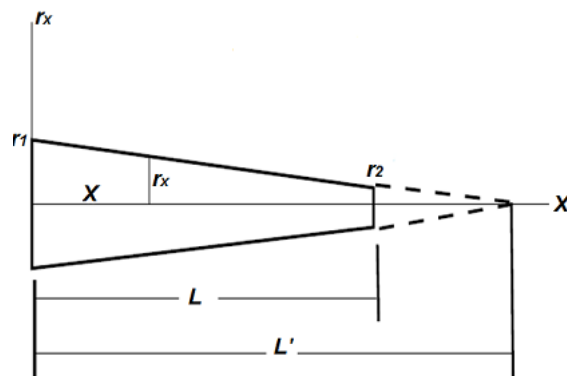
اکنون با نوشتن معادلات دیفرانسیلی و حل تحلیلی برای هورن باربل، ضریب بهره آن محاسبه می گردد. برای این کار مطابق شکل ۴، برای هر المان، یک دستگاه مختصات نسبی انتخاب می گردد و پاسخ عمومی معادله دیفرانسیلی برای هر عامل، مطابق معادله (۱۰-۱۱)، به دست می آید.



شکل ۲ شماتیکی از هورن باربل



شکل ۳ دو نمونه هورن باربل^[12]



شکل ۱ شماتیک هورن مخروطی

ضریب های معادله، با شرایط مرزی مشخص می گردد. برای هورن مخروطی با توجه به تغییر سطح مقطع (شکل ۱)، رابطه شعاع بر حسب طول از قواعد تشابه مثلثات در هندسه استفاده شده و مطابق رابطه (۶) خواهد بود.

$$r_x = r_1(1 - \alpha x), \quad \alpha = \frac{r_1 - r_2}{Lr_1} \quad (6)$$

بنابراین با توجه به رابطه های (۴) و (۵)، معادله دیفرانسیل موج در هورن مخروطی، به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{2\alpha}{\alpha - 1} \frac{du}{dx} + k^2 u = 0 \quad (7)$$

با حل معادله دیفرانسیلی (۷)، پاسخ عمومی معادله هورن مخروطی به صورت رابطه (۸)، نوشته می شود.

$$u = F \left(\frac{u_0}{F} \cos(kx) + \frac{-\alpha u_0}{Fk} \sin(kx) \right) \quad (8)$$

در هورن های مخروطی بر خلاف هورن های استوانه ای، طول ایده آل، برابر با $\frac{\lambda}{2}$ نخواهد بود؛ به طوری که مقدار آن کمی بیشتر از $\frac{\lambda}{2}$ خواهد شد. برای طراحی هورن های مخروطی از رابطه (۹)، برای به دست آوردن طول استفاده می شود.

$$\frac{2\pi f L}{c} \left[\cot \frac{2\pi f L}{c} - \left(\frac{1}{\alpha L} \right)^2 \frac{2\pi f L}{c} \right] = 1 \quad (9)$$

و بنابراین فاکتور تقویت دامنه برای این هورن عبارت است از:

$$G = \left| \frac{u_{out}}{u_{in}} \right| = \frac{r_1}{r_2} \left(\cos \frac{2\pi f L}{c} - \frac{c}{2\pi f L} \alpha L \sin \frac{2\pi f L}{c} \right) \quad (10)$$

جابه جایی در انتهای هورن بیشتر از ابتدای هورن است. بنابراین ضریب بهره هورن مخروطی، بالاتر از هورن استوانه ای است و این مزیت هورن مخروطی است. ولی از طرفی در هورن مخروطی، مساحت انتها نسبت به ابتدا کمتر است. در مبحث همگن سازی، این امر باعث می شود که سطح تماس هورن مخروطی نسبت به هورن استوانه ای با سیال نسبتاً کم باشد و ناحیه کاویتاسیونی کمتری ایجاد کند. در ادامه با ارائه یک مدل هورن، نشان داده می شود که می توان همزمان دو عامل ضریب بهره و سطح تماس را نسبتاً بالا برد.

۲-۲ طراحی هورن باربل

همان طور که گفته شد می توان هورنی طراحی نمود که دو عامل ضریب بهره و سطح تماس بالا را با هم دارا باشد. از این رو هورنی

کد بهینه‌سازی دارای تابع هدف ضریب بهره تعریف شده در رابطه (۱۶) و توابع قید که محدوده‌های پارامترهای عامل هورن می‌باشد. برای اینکه مقدار بهینه انتخاب شود همه حالت‌های ممکن بررسی شده و مقدار تابع هدف برای همه مقادیر مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً با مقادیر

$$\begin{aligned} kL_1 &= kL_3 = 1.3 \\ kL_2 &= kL_4 = 0.62 \\ kL_5 &= 2.3 \\ \Rightarrow G &= 9.589 \end{aligned} \quad (17)$$

۴-۲- تحلیل معادلات هورن چند پله‌ای

در این قسمت نشان داده می‌شود علاوه بر بهینه‌سازی عوامل اصلی هورن باربل می‌توان در عامل پنجم با توجه به نمودار سینوسی دامنه ارتعاش که حالت صعودی در این عامل دارد، پله‌هایی ایجاد نمود تا بتوان از این تغییر سطوح مقطع نیز ارتعاشات طولی دریافت نمود. در نتیجه نواحی بیشتری از کاویتاسیون در سیال را ایجاد نمود. اکثر هورن‌های موجود در آزمایشگاه‌ها و صنعت به گونه‌ای طراحی شده‌اند که تنها سطح انتهایی آن‌ها، انتقال دهنده ارتعاشات است و تنها در زیر این سطح، ناحیه‌ی کاویتاسیونی ایجاد می‌شود. اکنون با در دست داشتن مقادیر بهینه قبلی kL_1 ، kL_2 و kL_5 ، طول المان پنجم مطابق شکل ۵، به ۵ عامل استوانه‌ای تبدیل می‌شود. با این کار علاوه بر این که نواحی انتقال دهنده ارتعاش زیاد می‌شود، ضریب بهره نیز بالا می‌رود. مطابق شکل ۵، در نقاط پله (در طول المان پنجم)، با توجه به اینکه یک سطح آزاد و عمود به جهت انتشار امواج طولی ایجاد می‌گردد، در اثر ارتعاشات فشار مثبت و منفی ایجاد شده و نواحی کاویتاسیونی در سیال پدید می‌آید. با توجه به ساختاری که این هورن دارد می‌توان آن را هورن باربل چند پله‌ای (Multi-stepped Barbell horn) نامید. از آن جایی که معادلات u_1 تا u_5 ، پیش از این نوشته شده است (۱۱-۱۵)، اکنون پاسخ عمومی معادلات دیفرانسیلی u_6 تا u_9 ، مطابق روابط قبلی (۱۱-۱۵)، بر اساس سطح مقطع آن قسمت و پیوستگی نیرو و جابجایی نوشته می‌شود.

$$u_6 = A_6 \cos kx + B_6 \sin kx \quad 0 < x < L_6 \quad (18)$$

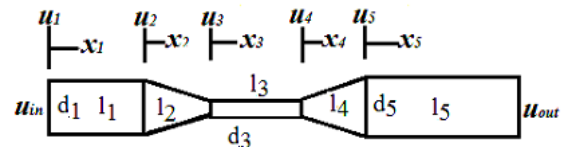
$$u_7 = A_7 \cos kx + B_7 \sin kx \quad 0 < x < L_7 \quad (19)$$

$$u_8 = A_8 \cos kx + B_8 \sin kx \quad 0 < x < L_8 \quad (20)$$

$$u_9 = A_9 \cos kx + B_9 \sin kx \quad 0 < x < L_9 \quad (21)$$

با روش کمینه سازی که در قسمت قبل بیان گردید نتایج در برنامه متلب بهترین حالت برای بیشترین ضریب بهره بدین صورت ارائه گردید:

$$\begin{aligned} kL_1 &= kL_3 = 1.3 \\ kL_2 &= kL_4 = 0.62 \\ kL_5 &= kL_6 = kL_7 = kL_8 = kL_9 = \frac{2.3}{5} = 0.46 \\ G &= 15.72 \end{aligned} \quad (22)$$



شکل ۴) شماتیک هورن باربل به همراه اندازه

$$u_1 = A_1 \cos kx + B_1 \sin kx \quad 0 < x < L_1 \quad (11)$$

$$u_2 = F_2(A_2 \cos kx + B_2 \sin kx) \quad 0 < x < L_2 \quad (12)$$

$$u_3 = A_3 \cos kx + B_3 \sin kx \quad 0 < x < L_3 \quad (13)$$

$$u_4 = F_4(A_4 \cos kx + B_4 \sin kx) \quad 0 < x < L_4 \quad (14)$$

$$u_5 = A_5 \cos kx + B_5 \sin kx \quad 0 < x < L_5 \quad (15)$$

با نوشتن شرایط مرزی برای اولین معادله، ثابت‌های A_1 و B_1 بدست می‌آید و در ادامه برای چهار معادله دیگر با نوشتن دو شرط پیوستگی جابه‌جایی و نیرو در نقاط شروع و پایان عوامل، ثابت‌های A_2 تا B_5 به دست می‌آید. در نهایت ضریب بهره هورن باربل، به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$G = \left| \frac{u_{out}}{u_{in}} \right| = \frac{A_5 \cos kL_5 + B_5 \sin kL_5}{A_1} \quad (16)$$

در پژوهش حاضر، معادله‌های (۱۱-۱۵) به صورت کامل بر حسب عوامل هندسی و فیزیکی در نرم‌افزار متلب (MATLAB)، کد نویسی شده‌اند. عوامل ورودی در جدول (۱)، ارائه شده است.

جنس انتخاب شده برای هورن، استیل ۳۱۶ می‌باشد. کد متلب به گونه‌ای نوشته شده است که kL_1 و kL_2 و kL_5 به عنوان متغیرهای مستقل و ضریب بهره به عنوان متغیر وابسته باشد تا بتوان تاثیر تغییرات مقادیر متغیرهای مستقل را در مقدار ضریب بهره مشاهده کرد. همان‌طور که اشاره شد هورن باربل از نوع تمام‌موج است بنابراین طول کل آن باید (با در نظر داشتن دو المان مخروطی) نزدیک به λ باشد یا به طور معادل، پارامتر kL برای طول کل باید نزدیک به عدد 2π باشد یعنی مجموع عوامل kL_1 تا kL_5 باید نزدیک به 2π باشد. با نوشتن کد تابع بهینه‌سازی چهارمتغیره با روش مونت کارلو (سه متغیر مستقل و یک متغیر وابسته) در نرم‌افزار متلب، مقدار بیشینه ضریب بهره بر حسب مقادیر بهینه عوامل kL_1 ، kL_2 و kL_5 به دست می‌آید.

جدول ۱) تعداد المان‌های هورن نهایی و فرکانس طبیعی معادل

پارامتر ورودی	مقدار
فرکانس (Hz)	۲۰۰۰۰
جنس	فولاد استیل ۳۱۶
مدول یانگ (Gpa)	۲۰۰
سرعت صوت (m/s)	۵۷۴۰٫۴
جابجایی ورودی (μ)	۲
شعاع المان اول (m)	۰٫۰۲۵
نسبت شعاع المان اول به المان سوم	۳٫۵
نسبت شعاع المان اول به المان پنجم	۱٫۴

جدول ۲) تعداد المان‌های هورن نهایی و فرکانس طبیعی معادل

تعداد المان	فرکانس طبیعی	درصد تغییرات (%)
۲۳۱۵۰	۲۰۰۱۳	-
۳۷۰۵۸	۲۰۰۰۶	۰/۰۳۵
۶۴۲۶۲	۲۰۰۰۰	۰/۰۳
۹۶۷۱۱	۱۹۹۹۶	۰/۰۲
۱۲۴۸۰۲	۱۹۹۹۶	۰
۱۵۴۲۸۲	۱۹۹۹۶	۰

جدول ۳) مقایسه ضریب بهره در روش تحلیلی و عددی (آنالیز هارمونیک)

هورن	ضریب بهره (تحلیلی)	ضریب بهره (عددی)	درصد خطای نسبی (%)
هورن نهایی	۱۵	۱۴/۷۳	۱/۸۳

۳-۱- تحلیل مودال

در ادامه مدل‌های رسم شده به همراه نتایج تحلیل مودال، نشان داده می‌شود.

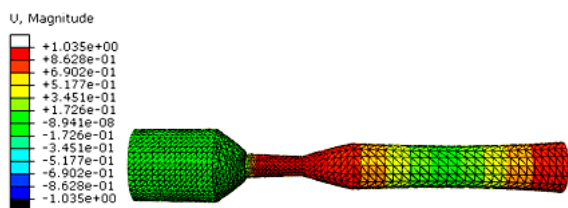
مدل اول: ابعاد به دست آمده از رابطه (۱۷)، مدل شد. شکل ۶، فرکانس طبیعی در شکل مود طولی را نمایش می‌دهد (فرکانس رزونانس ۱۹۹۶۹).

$$\begin{aligned} kL_1 &= kL_3 = 1.3 \\ kL_2 &= kL_4 = 0.62 \\ kL_5 &= 2.3 \end{aligned} \quad (23)$$

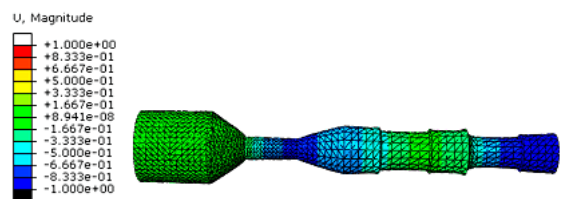
$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{20000 \times 2 \times \pi}{5740.4} = 21.8911$$

مدل دوم: ابعاد به دست آمده از رابطه (۲۲)، مدل شد. شکل ۷، فرکانس طبیعی در مود طولی هورن را نمایش می‌دهد (فرکانس رزونانس ۱۹۵۶۴).

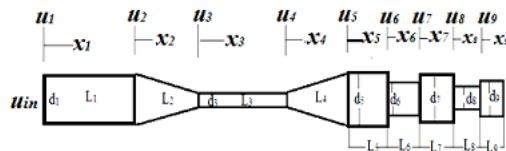
$$\begin{aligned} kL_1 &= kL_3 = 1.3, \\ kL_2 &= kL_4 = 0.62 \\ kL_5 &= kL_6 = kL_7 = kL_8 \\ &= kL_9 = \frac{2.3}{5} = 0.46 \end{aligned} \quad (24)$$



شکل ۶) نمایش فرکانس طبیعی هورن و شکل مود طولی مدل اول



شکل ۷) نمایش فرکانس طبیعی هورن و شکل مود طولی مدل دوم



شکل ۸) شماتیک هورن باربل چند پله‌ای

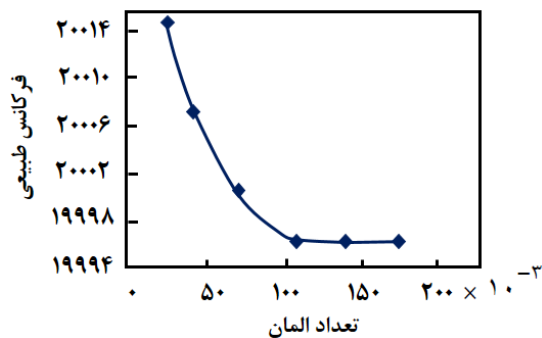
۳- روش عددی

یکی از مؤثرترین و کارآمدترین روش‌ها برای طراحی و ارزیابی هورن، روش عددی است. حل عددی از دقت بسیار بالایی برخوردار است اما در مقایسه با روش تحلیلی سرعت حل نسبتاً کمتری دارد. روش المان محدود (Finite Element Method)، یک روش برای حل عددی است و حل تقریبی برای بسیاری از مسائل پیچیده در رشته‌های مهندسی را ارائه می‌کند. با استفاده از روش المان محدود هر نوع هندسه را می‌توان مورد مطالعه قرار داد؛ مانند تغییر شکل اعضا و یا هندسه عوامل که معمولاً با استفاده از روش تحلیلی بسیار مشکل است. توسط المان محدود می‌توان شکل‌های اصلی هورن و همچنین ترکیب آن‌ها را بررسی کرد و نتایج حاصل از این حل عددی را با نتایج حل تحلیلی مقایسه نمود تا از طراحی نهایی هورن اطمینان پیدا شود.

در این قسمت از نرم‌افزار شبیه‌سازی المان محدود آباکوس (Abaqus)، برای ارزیابی روش تحلیلی، استفاده می‌شود. معمولاً برای حل عددی هورن‌های التراسونیک در روش اجزاء محدود، از آنالیز مودال (Modal Analysis) و هارمونیک (Harmonic Analysis) استفاده می‌شود. بنابراین هورن طراحی شده، ابتدا با استفاده از هر دو تحلیل مودال و هارمونیک، مورد ارزیابی قرار گرفت و از صحت طراحی اطمینان حاصل شد. سپس برای مقایسه عملکرد هورن ساخته شده با یک هورن دیگر، اثر آن‌ها در زمان‌های مختلف سونیکاسیون، بر روی صفات خامه‌ای شدن و اندیس‌های فعالیت و پایداری امولسیون، بررسی گردید و برای هر صفت مشخص شد که کدام هورن در چه زمانی از سونیکاسیون، ایده‌آل‌ترین تیمار است. با مطالعه صورت گرفته در پیشینه تحقیق، برای هورن‌های التراسونیک از مش چهار وجهی (هرم مثلث القاعده) استفاده می‌شود و در نتیجه نوع عامل آن C3D10 در نظر گرفته می‌شود. با تغییر تعداد مش در تحلیل فرکانسی هورن فوق جدول ۲ حاصل گردیده است [24].

جدول ۳ مقایسه نتیجه آنالیز مودال و حل تحلیلی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج هر دو حل بسیار به هم نزدیک بوده و این امر دقت بالای حل تحلیلی را در این پژوهش ثابت می‌کند.

برای بررسی دامنه ارتعاش و تنش در طول هورن از حلگر دینامیک مستقیم استفاده گردیده است و با تعریف دامنه فرکانس ۲۰ کیلو هرتز و دامنه ورودی ۲ میکرون تغییرات دامنه ارتعاش در طول هورن و البته نوک هورن بررسی شده است و نتایج مقایسه ای در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱۰) نمودار همگرایی مش

جدول ۴ مقایسه نتیجه تحلیل مودال و حل تحلیلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج هر دو حل بسیار به هم نزدیک بوده و این امر دقت بالای حل تحلیلی را در این پژوهش ثابت می‌کند.

۲-۳- تحلیل هارمونیک

نمایش شکل مود در تحلیل مودال، اطلاعاتی از جابه‌جایی در اختیار نمی‌گذارد. در واقع بردارهای ویژه در شکل مودها، جابه‌جایی نسبی نقاط را نمایش می‌دهند و هرگز نمی‌توان اعداد این نتایج را به عنوان جابه‌جایی مطلق و واقعی حاصل از ارتعاش دانست. از این رو برای مشاهده جابه‌جایی‌های واقعی در طول هورن از آنالیز هارمونیک در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد و در انتها ضریب بهره هورن گزارش گردید.

نمودار جابه‌جایی به عنوان تابعی از طول هورن، در شکل ۱۲-الف (در فرکانس طبیعی ۲۰۰۰۰ هرتز با انداز مش ۰/۰۰۳۲) نشان داده شده است. محور عمودی جابه‌جایی نقاط هورن و محور افقی طول هورن بر حسب متر است. شکل ۱۱ نیز مقایسه نمودار جابه‌جایی در طول هورن با استفاده از روش تحلیلی (که حاصل از کدنویسی در نرم‌افزار متلب می‌باشد) و عددی را نشان می‌دهد. نسبت دامنه در انتهای هورن به ابتدای هورن به عنوان ضریب تقویت شونده تعریف می‌گردد. جدول ۵، مقایسه نتیجه حاصل از روش تحلیلی و روش عددی (آنالیز هارمونیک) را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود این دو مقدار بسیار به هم نزدیک بوده و این امر نیز همانند نتیجه تحلیل مودال برای فرکانس طبیعی، دقت بالای حل تحلیلی را در پژوهش حاضر اثبات می‌کند.

هورن بهینه‌سازی شده در نهایت پس از حل عددی ساخته شد و با استفاده از ژنراتور و ترانسیدوسر شرکت MPI تحریک کرده و ارزیابی تجربی آن انجام گردید (شکل ۱۲).

جدول ۴) مقایسه نتایج آنالیز مودال و حل تحلیلی برای هورن نهایی

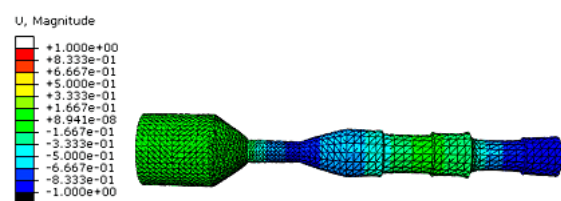
هورن	فرکانس طبیعی (تحلیلی)	فرکانس طبیعی (عددی)	درصد تغییرات نسبی (%)
هورن نهایی	۰/۰۲	۱۹۹۹۶	۲۰۰۰۰

مدل سوم: برای نزدیک شدن به عدد ۲۰۰۰۰ هرتز، $kL1$ و $kL3$ به ۱/۱ کاهش و $kL2$ و $kL4$ را به ۰/۶۳۵ افزایش یافت؛ بقیه ابعاد مطابق با مدل دوم است. شکل ۸، فرکانس طبیعی در مود طولی هورن را نمایش می‌دهد (فرکانس رزونانس ۱۹۷۶۹).

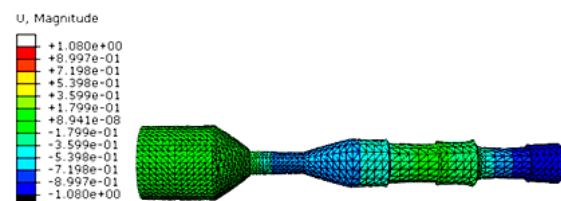
مدل نهایی: در روش تحلیلی فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود و در معادله موج برای تحلیل دامنه ارتعاش مورد استفاده قرار می‌گیرد لذا با تغییرات ایجاد شده در هندسه با بهینه‌سازی، فرکانس تغییراتی در حدود ۱۰ یا ۲۰ فرکانس شیف‌ت می‌کند. با توجه به اینکه مدل نهایی تحلیلی ممکن است فرکانس مورد نظر را در حل عددی تعقیب ننماید بنابراین تغییراتی در قسمت انتهایی با توجه به کم شدن جرم لحاظ می‌گردد این تغییر جزئی در مقادیر $kL8$ و $kL9$ ، مقادیر نهایی اصلاح گردید؛ شکل ۹، فرکانس طبیعی در مود طولی هورن را نمایش می‌دهد (فرکانس رزونانس ۲۰۰۰۶).

در تمامی نرم افزارهای المان محدود از جمله آباکوس، نتایج در صورتی قابل قبول هستند که بحث هم‌گرایی مش رعایت شده باشد. هرچه اندازه دانه‌ها ریزتر باشد در نتیجه تعداد عوامل مش بالاتر رفته و نتایج از صحت بالاتری برخوردار شده و به حالت واقعی نزدیک‌تر می‌شود. معمولاً پژوهشگران برای بهینه نمودن اندازه مش تغییرات را به صورتی ایجاد می‌نمایند تا درصد تغییر نسبی عامل مورد نظر کمتر از ۵ درصد شود و به صفر میل کند.

در پژوهش حاضر نیز به این بحث پرداخته شد و مطابق جدول ۲، تعداد عوامل به همراه نتیجه متناظر آن‌ها (فرکانس طبیعی)، آورده شد. همان‌طور مشاهده می‌شود درصد تغییرات نسبی بسیار کوچک است. شکل ۱۰، نیز نمودار فرکانس طبیعی بر حسب تعداد عامل را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودار از نقطه ۹۶۷۱۱ عامل، مجانب افقی یافته و هم‌گرایی مش را ثابت کرده است.



شکل ۸) نمایش فرکانس طبیعی هورن و شکل مود طولی مدل سوم



شکل ۹) نمایش فرکانس طبیعی هورن و شکل مود طولی مدل نهایی

۲۰ کیلوهرتز بر آن میتوان توسط دستگاه اسپلوسکوپ شکل موج ولتاژ بر واحد زمان را مشاهده و میزان دامنه ارتعاش را اندازه گیری کرد. تمام مراحل بالا را با اتصال هورن به ترانسدیوسر هم آزمایش می شود و میزان دامنه ارتعاش در هر دو حالت حاصل می شود. در جدول ۶، دامنه ارتعاش و ضریب بهره تجربی با دو روش دیگر (تحلیلی و عددی) مقایسه گردیده است.

۴- ارزیابی کیفی هورن طراحی شده در کاربرد همگن سازی امولسیون

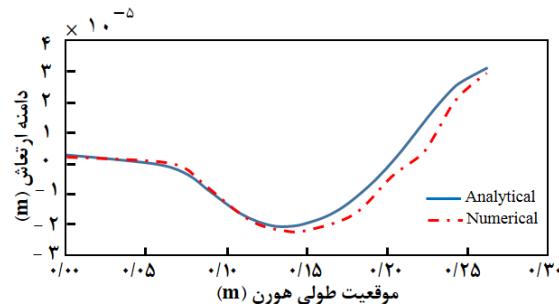
برای ارزیابی، هورن طراحی شده با یک هورن تجاری شرکت آدیکو مدل (APU500b) با توان نامی ۵۰۰ وات فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و مساحت سر پراب ۱۲ میلیمتر مقایسه گردید و عملکرد آن در ایجاد امولسیون نسبتاً پایدار آب و روغن به طور مقایسه ای بررسی شد. برای انجام آزمایش ها و بررسی آنالیز آماری نتایج، از آزمایش فاکتوریل و طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. فاکتور A، برای نوع هورن و فاکتور B، برای زمان های اعمال سونیکاسیون انتخاب گردید. A1 و A2، به ترتیب بیانگر هورن طراحی شده و هورن تجاری می باشند. B1، B2 و B3، به ترتیب بیانگر زمان دو، سه و چهار دقیقه سونیکاسیون است. بنابراین می توان گفت آزمایش از ۶ تیمار (هر تیمار بیانگر امولسیون است که توسط یکی از هورن ها و در یکی از زمان های سونیکاسیون انجام شده است) و هر آزمایش به صورت مستقل و در شرایط کاملاً یکسان نسبت به سایرین، سه مرتبه تکرار شد. شاخص خامه ای شدن و اندیس فعالیت و پایداری امولسیون به عنوان صفات آزمایش برای اثبات پایداری نسبی مورد بررسی قرار گرفتند.

۴-۱- ارزیابی کیفی با فاکتور پایداری خامه ای شدن امولسیون

برای ارزیابی پایداری خامه ای شدن هنگامی که امولسیون نهایی آماده شد؛ مقدار مشخصی از آن در استوانه مدرج با دقت مناسب ریخته شد و در دمای اتاق به مدت ۱۸۰ دقیقه نگهداری گردید. اندیس خامه ای شدن (CI)، به صورت چشمی با اندازه گیری ارتفاع لایه سرم در استوانه مدرج، با گذشت زمان هر ۳۰ دقیقه یکبار، تعیین شد. اندیس خامه ای شدن از رابطه (۲۵)، محاسبه می گردد [28].

$$(25) \quad \text{ارتفاع لایه سرم (فاز پایین) امولسیون} = \frac{\text{اندیس خامه ای شدن}}{\text{ارتفاع کل امولسیون}}$$

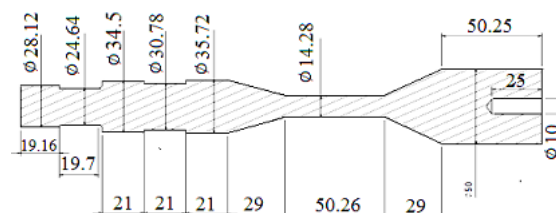
نمودار ۱۳، اندیس خامه ای شدن را به عنوان تابعی از زمان، برای هر ۶ تیمار نشان می دهد که با توجه به چگالی و غلظت پایین امولسیون، این اعداد انتظار می رفت. همان طور که در نمودار ۱۳، مشاهده می شود، برای هر ۶ تیمار، با گذشت زمان، اندیس خامه ای شدن، افزایش یافته است. جدول ۷، مقدار اندیس خامه ای شدن را برای هر تیمار در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه، نشان می دهد.



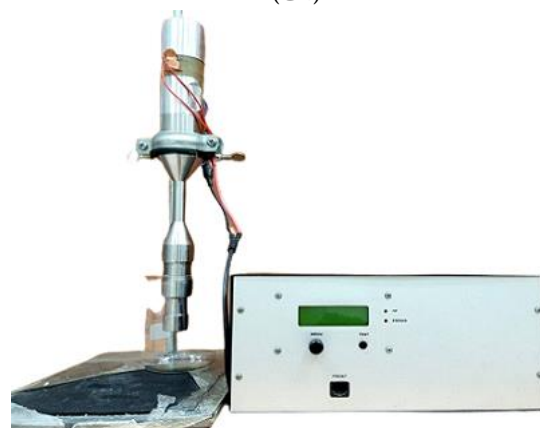
شکل ۱۱) مقایسه نمودار جابه جایی در طول هورن نهایی حاصل از آنالیز هارمونیک و روش تحلیلی

جدول ۵) مقایسه ضریب بهره در روش تحلیلی و عددی (آنالیز هارمونیک)

هورن	ضریب بهره (تجربی)	ضریب بهره (عددی)	ضریب بهره (تحلیلی)
هورن نهایی	۱۴/۸۲	۱۴/۷۳	۱۵



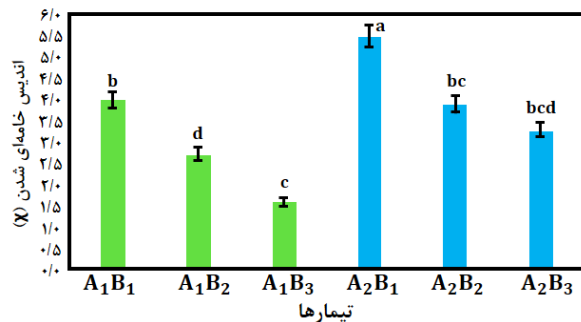
(الف)



(ب)

شکل ۱۲) (الف) شکل نهایی هورن طراحی و تحلیل شده (ب) هورن باربل چندپله ای به همراه ژنراتور و ترانسدیوسر شرکت MPI

در آزمون تجربی میزان دامنه ارتعاش سر هورن با سنسور ادی کارنت (Eddy current) (gap-sensor model AEC 5502A-01) اندازه گیری شد. این سنسور بر اساس سازوکار میدان الکترومغناطیس عمل نموده و دامنه ارتعاش در فرکانس های بالا اندازه گیری می نماید. جهت اندازه گیری ابتدا سنسور فاصله سنج را در میان دو فک گیره مهار کرده و همچنین ترانسدیوسر را توسط استندهای آزمایشگاهی بالای گیره به صورت عمودی مهار می شود فاصله بین ترانسدیوسر و نوک سنسور ۰/۵ میلیمتر باید قرار گیرد. با اتصال ترانسدیوسر به ژنراتور التراسونیک و تنظیم میزان فرکانس



شکل ۱۴) اندیس خامه‌ای شدن نهایی تیمارها بعد از ۱۸۰ دقیقه (کدهای متفاوت a تا d بیانگر اختلاف معنادار در $P < 0.05$ است)

سونیکاسیون کمترین مقدار اندیس خامه‌ای شدن را داشت؛ یعنی کمترین میزان دوفاز شدن را پیدا کرد و در نتیجه پایدارترین امولسیون را بین ۶ تیمار مورد آزمایش (در شرایط کاملاً یکسان) پس از گذشت ۱۸۰ دقیقه، حاصل کرد.

۴-۱- ارزیابی کیفی با فاکتور فعالیت و پایداری امولسیون

برای بررسی فاکتور فعالیت و پایداری امولسیون بعد از آماده سازی امولسیون، هر دو دقیقه یکبار تا مدت زمان ۱۰ دقیقه، ۰/۱ میلی‌لیتر از امولسیون با ۱۰ میلی‌لیتر SDS ۰/۱٪ وزنی رقیق شد. جذب امولسیون رقیق شده در ۵۰۰ نانومتر، اندازه‌گیری گردید. اندیس فعالیت امولسیونی (Emulsion Activity Index) از جذب اندازه‌گیری شده در لحظه صفر و با استفاده از رابطه (۲۶)، محاسبه می‌گردد [29].

$$EAI \left(\frac{m^2}{g} \right) = \frac{2T}{(1 - \phi)C} \quad (26)$$

در رابطه (۲۶) T (کدورت) می‌باشد و از رابطه (۲۷)، محاسبه می‌شود.

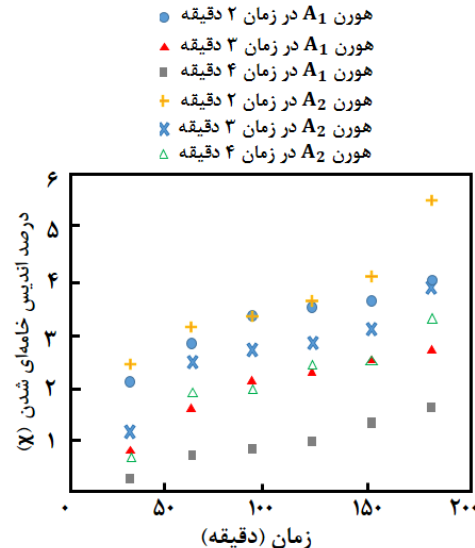
$$T = \frac{2.303A}{L} \quad (27)$$

پارامتر A ، میزان جذب در لحظه صفر یعنی بلافاصله بعد از تشکیل امولسیون و L طول مسیر عبور پرتو در سل دستگاه اسپکتروفتومتر است. ϕ حجم بخشی روغن و C غلظت ژلاتین در محلول می‌باشد. برای تعیین اندیس پایداری امولسیون (Emulsion Stability Index) نیز از رابطه (۲۸) استفاده می‌شود.

$$ESI(min) = \frac{T_0 t}{\Delta T} \quad (28)$$

پارامتر T_0 کدورت در زمان صفر، ΔT تغییرات کدورت بین زمان صفر تا ده دقیقه است و t بازه زمانی است.

برای ارزیابی ویژگی تیمارها، از آنالیز کدورت در ۵۰۰ نانومتر استفاده شد. کدورت در لحظه صفر نشان‌دهنده فعالیت امولسیونی و بعد از ده دقیقه به عنوان شاخصی برای پایداری امولسیون به کار می‌رود. همان‌طور که در شکل ۱۵، نشان داده شده است، هورن A1 در زمان چهار دقیقه سونیکاسیون عدد جذب بالاتری را در همه لحظه‌ها دارد که نشان‌دهنده بالاتر بودن اندیس فعالیت امولسیونی آن می‌باشد.



شکل ۱۳) نمودار تغییر درصد اندیس خامه‌ای شدن تیمارها در طی زمان ۱۸۰ دقیقه (هر عدد میانگین سه تکرار جداگانه است)

جدول ۶) اندیس خامه‌ای شدن برای هر تیمار در طول زمان ۱۸۰ دقیقه

تیمار	اندیس خامه‌ای شدن در گذر زمان	۳۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۹۰ دقیقه	۱۲۰ دقیقه	۱۵۰ دقیقه	۱۸۰ دقیقه
A1B1	۰/۰۲۱	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰
A1B2	۰/۰۰۸	۰/۰۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷
A1B3	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶
A2B1	۰/۰۲۴	۰/۰۳۱	۰/۰۳۳	۰/۰۳۶	۰/۰۴۱	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵
A2B2	۰/۰۱۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹
A2B3	۰/۰۰۷	۰/۰۱۹	۰/۰۲۰	۰/۰۲۴	۰/۰۲۵	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳

جدول ۷) نتایج تجزیه واریانس برای شاخص خامه‌ای شدن

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	محاسبه شده	F	مقدار P
فاکتور A (هورن)	۱	۰/۰۰۰۹۶۸	۰/۰۰۰۹۶۸	۶۸/۰۶۲۵	۴/۷۴۷۲۲۵	۰/۰۰۰۰۰۳
فاکتور B (زمان)	۲	۰/۰۰۱۵۸۶	۰/۰۰۰۷۹۳	۵۵/۷۵	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۰۰۰۰۰۱
سونیکاسیون						
اثر متقابل	۲	۰/۰۰۰۰۲۱۳	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۷۵	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۴۹۳۲۷
خطا	۱۲	۰/۰۰۰۱۷۱	۰/۰۰۰۰۱۴			
خطا کل	۱۷	۰/۰۰۲۷۴۶				

مطابق با جدول تحلیل واریانس ۷، فرض H_0 برای فاکتور A و فاکتور B رد شد؛ به این معنا که در ۶ تیمار به کار رفته در آزمایش، حداقل دو تیمار وجود دارد که اثر آن‌ها روی صفت اندیس خامه‌ای شدن تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد، دارد. اثر متقابل معنادار نبود، یعنی تأثیر زمان روی هر دو هورن روی صفت شاخص خامه‌ای شدن یکسان می‌باشد. با اجرای آنالیز آماری برای این ۶ تیمار و آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح ۵ درصد، این نتیجه به دست آمد که مطابق با شکل ۱۴، هورن A1 یعنی امولسیون حاصل از هورن طراحی شده در زمان ۴ دقیقه

جدول ۸) نتایج تجزیه واریانس برای اندیس فعالیت امولسیون

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه شده	جدول F	مقدار P
فاکتور A (هورن)	۱	۹۸۰/۴۵۹	۹۸۰/۴۵۹	۱۷/۹۲۷	۴/۷۴۷۲۲۵	۰/۰۰۱۱۶
فاکتور B (زمان)	۲	۹۱۷۵/۴۳	۴۵۸۷/۷۱۵	۸۳/۸۸۱	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۰۰۰۰۰۰۱
اثر متقابل	۲	۸۲/۸۵	۴۱/۴۲۵	۰/۷۵۷	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۴۹
خطا	۱۲	۶۵۶/۳۲	۵۴/۶۹۳			
خطا کل	۱۷	۱۰۸۹۵/۰۵۹				

جدول ۹) مقادیر اندیس فعالیت و پایداری امولسیون برای تیمارهای آزمایش

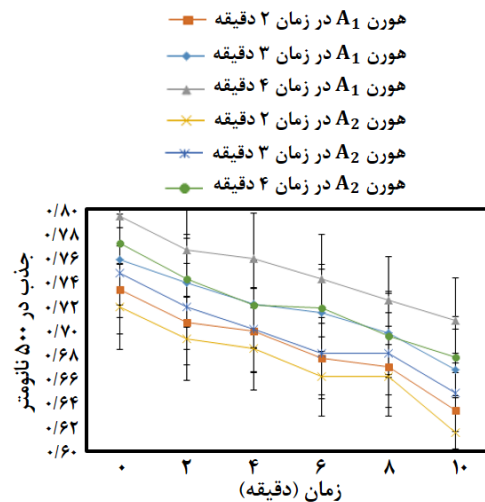
تیمار	EAI (m ² /g)	ESI (min)
A ₁ B ₁	۶/۷۳۴±۷۱۱/۴۲۵	۰/۱۵۵±۷۳/۲۵
A ₁ B ₂	۸/۳۹۲±۷۳۶/۳۱۴	۰/۱۹۳±۸۵/۲۴
A ₁ B ₃	۵/۹۴۳±۷۷۰/۵۷۶	۰/۲۸۶±۹۲/۱۵۸
A ₂ B ₁	۴/۳۶۱±۶۹۸/۴۹۶	۰/۴۰۸±۶۸/۶۳۵
A ₂ B ₂	۵/۰۹۳±۷۲۵/۶۴۷	۰/۱۸۳±۷۴/۹۵۵
A ₂ B ₃	۴/۷۷۲±۷۴۹/۸۸۹	۰/۲۵۲±۸۰/۸۸۴

جدول ۱۰) نتایج تجزیه واریانس برای اندیس پایداری امولسیون

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه شده	جدول F	مقدار P
فاکتور A (هورن)	۱	۲۸۲/۵۴۶	۲۸۲/۵۴۶	۴۲/۷۷۱	۴/۷۴۷۲۲۵	۰/۰۰۰۰۰۲۷
فاکتور B (زمان)	۲	۷۲۸/۱۷۹	۳۶۴/۰۸۹	۵۵/۳۷۲	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۰۰۰۰۰۰۹
اثر متقابل	۲	۳۳/۲۵۴	۱۶/۶۲۷	۲/۵۲۹	۳/۸۸۵۲۹۴	۰/۱۲۱۲۳۱
خطا	۱۲	۷۸/۹۰۴	۶/۵۷۵			
خطا کل	۱۷	۱۱۲۲/۸۸۲				

۵- نتایج

در پژوهش حاضر، هورن باربل با اعمال تغییراتی به منظور بهتر شدن دامنه ارتعاش و مساحت سطح انتشار امواج التراسونیک، مورد بررسی تحلیلی و عددی و تجربی قرار گرفته است. معادلات ارتعاشی مقاطع مختلف این هورن به صورت جداگانه و به صورت پیوسته حل گردید و نتایج آن با حل عددی و در نهایت تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تجربی و عددی خطای نسبی کمی را نسبت به نتایج تحلیلی به همراه دارد و عملکرد هورن باربل با معیار مقایسه‌ای ضریب بهره، عملکرد بهتر و مساحت انتشار موج بزرگتری دارد که در نهایت منجر به بازدهی بهتر آن می‌گردد. عملکرد هورن طراحی شده و هورن تجاری مورد مقایسه، در سه زمان دو، سه و چهار دقیقه سونیکاسیون (داخل امولسیون آب و روغن) و با سه تکرار جداگانه برای هر هورن، در هر زمان برای



شکل ۱۵) نمودار تغییرات میزان جذب امولسیون برای ۶ تیمار آزمایش در گذر زمان ۰ تا ۱۰ دقیقه (هر عدد میانگین سه تکرار جداگانه است)

مطابق با جدول آنالیز واریانس ۸، فرض H₀ برای فاکتور A و فاکتور B رد شد، به این معنا که در ۶ تیمار به کار رفته در آزمایش، حداقل دو تیمار وجود دارد که اثر آن‌ها روی صفت اندیس فعالیت امولسیون تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد دارد.

اثر متقابل معنادار نبود، یعنی تاثیر زمان روی هر دو هورن روی صفت فعالیت امولسیون، یکسان است. با اجرای آنالیز آماری برای این ۶ تیمار و آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح ۵ درصد، این نتیجه به دست آمد که مطابق با جدول ۸، اندیس فعالیت امولسیونی برای هورن A₁ در زمان چهار دقیقه سونیکاسیون دارای تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد نسبت به سایر تیمارها است و نشان می‌دهد که بالاترین میزان اندیس فعالیت امولسیون را در مقایسه با سایر تیمارها دارد. هورن A₂ نیز در زمان دو دقیقه سونیکاسیون کمترین مقدار اندیس فعالیت امولسیونی را دارد. همان‌طور که از جدول ۹، مشخص است، میزان فعالیت امولسیونی برای امولسیون‌های حاصل از هورن طراحی شده، بالاتر از امولسیون‌های حاصل از هورن آزمایشگاه صنایع غذایی در زمان‌های سونیکاسیون متناظر می‌باشد.

مطابق با جدول ۱۰، فرض H₀ برای فاکتور A و فاکتور B رد شد، یعنی حداقل دو تیمار وجود دارد که اثر آن‌ها روی صفت اندیس پایداری امولسیون تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد دارد. همان‌طور که از مقادیر ESI در جدول ۹، مشخص است امولسیون حاصل از هورن A₁ در زمان چهار دقیقه سونیکاسیون بالاترین مقدار پایداری را دارد و تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد نسبت به سایر تیمارها پیدا کرده است. میزان پایداری امولسیون برای امولسیون‌های حاصل از هورن طراحی شده بالاتر از امولسیون‌های حاصل از هورن آزمایشگاه صنایع غذایی در زمان‌های سونیکاسیون متناظر می‌باشد.

سعید امینی (نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی، روش‌شناس، درصد مشارکت ۵۰٪
منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- Scholz P, Keck CM. Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. *International journal of pharmaceutics*. 2015;482(1-2):110-7.
- Ruiz-Montañez G, Ragazzo-Sanchez JA, Picart-Palmade L, Calderón-Santoyo M, Chevalier-Lucia D. Optimization of nanoemulsions processed by high-pressure homogenization to protect a bioactive extract of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017;40:35-41.
- Llinares R, Santos J, Trujillo-Cayado LA, Ramírez P, Muñoz J. Enhancing rosemary oil-in-water microfluidized nanoemulsion properties through formulation optimization by response surface methodology. *LWT*. 2018;97:370-5.
- Leong TS, Wooster TJ, Kentish SE, Ashokkumar M. Minimising oil droplet size using ultrasonic emulsification. *Ultrasonics sonochemistry*. 2009;16(6):721-7.
- Karim ZA, Kaur E, Masharuddin SM, Khan MY, Hagos FY. The characteristics of water-in-biodiesel emulsions produced using ultrasonic homogenizer. *Alexandria Engineering Journal*. 2020;59(1):227-37.
- Tiong TJ, Chu JK, Lim LY, Tan KW, Yap YH, Asli UA. A computational and experimental study on acoustic pressure for ultrasonically formed oil-in-water emulsion. *Ultrasonics sonochemistry*. 2019;56:46-54.
- Wei Z, Kosterman JA, Xiao R, Pee GY, Cai M, Weavers LK. Designing and characterizing a multi-stepped ultrasonic horn for enhanced sonochemical performance. *Ultrasonics sonochemistry*. 2015;27:325-33.
- Merkulov, L. G. 1957. Design of ultrasonic concentrations. *Sov. Phys. Acoust.* 3: 230-238.
- Ensminger D. Solid Cone in Longitudinal Half-Wave Resonance. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1960;32(2):194-6.
- Amza G, Drimer D. The design and construction of solid concentrators for ultrasonic energy. *Ultrasonics*. 1976;14(5):223-6.
- Amin SG, Ahmed MH, Youssef HA. Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995;55(3-4):254-60.
- Sherrit S, Badescu M, Bao X, Bar-Cohen Y, Chang Z. Novel horn designs for power ultrasonics. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004;3:2263-2266.
- Roh Y, Lee S, Woo J, Kang K. P20-7 Design and Construction of an Acoustic Horn for High Power Ultrasonic Transducers. In *2006 IEEE Ultrasonics Symposium* 2006; 1922-1925.
- Peshkovsky SL, Peshkovsky AS. Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. *Ultrasonics sonochemistry*. 2007;14(3):314-22.

رسیدن به یک امولسیون نسبتاً پایدار، مورد بررسی قرار گرفتند. برای نشان دادن این پایداری، صفات شاخص خامه‌ای شدن، اندیس فعالیت و پایداری امولسیون، اندازه‌گیری شدند. امولسیون حاصل از هورن طراحی شده، در زمان چهار دقیقه سونیکاسیون، کمترین درصد خامه‌ای شدن را دارد که بیانگر پایدارترین تیمار نسبت به سایر تیمارها بود. همچنین امولسیون حاصل از هورن طراحی شده، در زمان چهار دقیقه سونیکاسیون، بالاترین میزان فعالیت امولسیونی را نتیجه می‌دهد. با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان بیان کرد که هورن ساخته شده، هزینه به مراتب کمتری نسبت به هورن تجاری و عملکرد نسبتاً بهتری دارد.

فهرست علائم

α	شیب زاویه هورن مخروطی
φ	حجم روغن
λ	طول موج
ω	فرکانس طبیعی
A	مساحت سطح مقطع
E	مدول الاستیسیته
c	سرعت صوت
C	غلظت ژلاتین
CI	اندیس خامه ای شدن
d1...d9	قطر المان اول تا نهم
ESI	اندیس پایداری امولسیون
EAI	اندیس فعالیت امولسیون
f	فرکانس
G	ضریب بهره
k	عدد موج
l1...l9	طول المان اول تا نهم
t	زمان
T	فاکتور کدورت
G	ضریب بهره
u	جابجایی طولی
u_0	سرعت اولیه
x	موقعیت طولی

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: داوود میرزایی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، تحلیل‌گر داده‌ها، نگارنده مقدمه، نگارنده بحث، درصد مشارکت ۵۰٪؛

- 23-Yusuf L, Symes MD, Prentice P. Characterising the cavitation activity generated by an ultrasonic horn at varying tip-vibration amplitudes. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;70:105273.
- 24-Wang A, Gao G, Li D, Lu D, Wang M, Shi D, Xu Z. A hollow exponential ultrasonic horn for aluminum melt degassing under power ultrasound and rotating flow field. *Results in Physics*. 2021;21:103822.
- 25-Sajjady SA, Amini S. Invention of a new ultrasonic horn in 3D ultrasonic vibration assisted turning. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(8):1845-54.
- 26-Sajjady SA, Lotfi M, Amini S, Toutounchi H, Bami AB. Improving the surface energy of titanium implants by the creation of hierarchical textures on the surface via three-dimensional elliptical vibration turning for enhanced osseointegration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2019;233(12):1226-36.
- 27-Kumar P, Prakasan K. Acoustic horn design for joining metallic wire with flat metallic sheet by ultrasonic vibrations. *Journal of Vibro engineering*. 2018;20(7).
- 28-Wang B, Li D, Wang LJ, Özkan N. Effect of concentrated flaxseed protein on the stability and rheological properties of soybean oil-in-water emulsions. *Journal of Food Engineering*. 2010;96(4):555-61.
- 29-Einhorn-Stoll U, Weiss M, Kunzek H. Influence of the emulsion components and preparation method on the laboratory-scale preparation of o/w emulsions containing different types of dispersed phases and/or emulsifiers. *Food/Nahrung*. 2002;46(4):294-301.
- 15-Wang DA, Chuang WY, Hsu K, Pham HT. Design of a Bézier-profile horn for high displacement amplification. *Ultrasonics*. 2011;51(2):148-56.
- 16-Behera BC, Sahoo SK, Patra LN, Rout MP, Kanaujia KK. Finite element analysis of ultrasonic stepped horn. *National Institute of Technology, Rourkela-769*. 2011;8.
- 17-Nguyen HT, Nguyen HD, Uan JY, Wang DA. A nonrational B-spline profiled horn with high displacement amplification for ultrasonic welding. *Ultrasonics*. 2014;54(8):2063-71.
- 18-Peshkovsky AS, Bystryak S. Continuous-flow production of a pharmaceutical nanoemulsion by high-amplitude ultrasound: Process scale-up. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2014;82:132-6.
- 19-EMAMI M. Analytical modeling and finite element simulation of exponential horns with rectangular cross-section: Application on ultrasonic assisted grinding. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;13(14):158-95.
- 20-Wei Z, Kosterman JA, Xiao R, Pee GY, Cai M, Weavers LK. Designing and characterizing a multi-stepped ultrasonic horn for enhanced sonochemical performance. *Ultrasonics sonochemistry*. 2015;27:325-33.
- 21-Rashwan SS, Dincer I, Mohany A. Investigation of acoustic and geometric effects on the sonoreactor performance. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;68:105174.
- 22-Karafi M, Kamali S. A continuum electro-mechanical model of ultrasonic Langevin transducers to study its frequency response. *Applied Mathematical Modelling*. 2021;92:44-62.