Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 12, No. 2, 2025

(Research Article)
Analyzing the influence of acoustic hologram manufacturing accuracy and sound transducer excitation frequency on the sound pressure profile

B. Ghavami Namin, Y.Hojjat*
Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University
Revised: 2024/09/08, Accepted: 2025/01/28

Abstract

In this study, two influential parameters in acoustic holography using 3D-printed holograms are examined: errors arising from fabrication, which depend on the precision of the 3D printer used, and errors in the excitation frequency of the high-frequency transducer, which depend on the accuracy of the power generator employed. A mathematical model was first introduced to describe each of these errors. Subsequently, using these models, the impact of these errors on the quality of the acoustic pressure profile on the target plane, as a measure of process performance, was analyzed for different operating frequencies.The results indicate that the impact of fabrication errors, given the precision of current printers, is negligible approximately 0.02%. In contrast, variations in error due to the transducer's applied frequency reach approximately 30%. Additionally, it was observed that the sensitivity of the phenomenon to both errors increases at higher frequencies. An experimental investigation of the effect of frequency on the quality of the pressure profile was also conducted, confirming the analytical results.

Keywords: Acoustic holography, 3D Printing, Amplitude and phase modulation, Transducer.

pp. 50-59 (In Persian)

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

* Corresponding Author Email: yhojjat@modares.ac.ir

مقاله پژوهشی

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۳، دوره: ۱۲، شماره ۲، صفحات: ۵۰-۵۹

تحلیل تأثیر دقت ساخت هولوگرام صوتی و بسامد تحریک تراگذار صوتی بر بنیم‌رخ فشار صوتی

بهزاد قوامی نمین، یوسف حجت*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۹

چکیده

در این مطالعه، دو مورد از شبه‌سنج‌های اثرگذار در هولوگرافی صوتی به کمک هولوگرام‌های چاپ سه-بعدی شده مورد بررسی قرار می‌گیرند که عبارت‌اند از خطاهای ناشی از ساخت که به دقت چاپگر سه-بعدی مورداستفاده بستگی دارد و خطای موجود در بسامد تحریک تراگذار بسامد بالا که در به دقت مولد توان مورداستفاده وابسته است. به‌منظور بررسی هرکدام از این خطاها، ابتدا الگوی برای توصیف ریاضی این خطاها معرفی گردید. در ادامه با استفاده از این الگوها، تأثیر این خطاها بر کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی در صفحه هدف به عنوان معیاری از عملکرد فرآیند و به ازای بسامدهای کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، تأثیر خطای ساخت با توجه به دقت چاپگرهای موجود ناچیز بوده و در حدود ۰٫۰۲ درصد است. در مقابل، محدوده تغییرات خطای ناشی از بسامد اعمالی به تراگذار در حدود ۳۰ درصد است. هم‌چنین مشاهده شد حساسیت پدیده به هردوی خطاها در بسامدهای بالا بیش‌تر است. بررسی تجربی اثر تأثیر بسامد بر کیفیت نیم‌رخ فشار نیز انجام گرفت که نتایج تحلیلی را تأیید می‌نمود.

کلیدواژه‌ها: هولوگرام صوتی، چاپ سه-بعدی، مدولاسیون دامنه و فاز، تراگذار.

۱. مقدمه

امواج صوتی ازجمله پدیده‌هایی هستند که امروزه در زمینه‌های مختلف از قبیل صنعت، پزشکی و غیره کاربرد بسیار یافته‌اند. تمرکز و هدایت دقیق این امواج در کاربردهای مذکور از اهمیت بسیاری برخورداراست. لذا طراحی و ایجاد یک نیم‌رخ پیوسته و یکنواخت دلخواه از میدان‌های صوتی در پژوهش‌های اخیر موردتوجه قرارگرفته است [۱].

با توجه به ماهیت موجی صوت و مشابهت آن با امواج الکترومغناطیسی به‌ویژه نور باعث شده تناظر بسیاری بین متغیرهای این دو نوع موج دریافته شود. ازجمله‌ی آن‌ها قابلیت ذخیره نیم‌رخ‌های دامنه و اختلاف فاز در نقشه‌هایی موسوم به هولوگرام است.

استفاده از مفهوم هولوگرام که در نور برای بازسازی سه-بعدی تصاویر شناخته‌شده است، اخیراً در امواج صوتی نیز به‌منظور ایجاد تمرکز و بازسازی دلخواه موج مطرح‌شده است. به‌این‌ترتیب بسیاری از محدودیت‌هایی که به علت استفاده از روش‌هایی نظیر آرایه فازی [۲] و سامانه‌های موج سطحی به وجود می‌آمد تا حدودی برطرف گردید.

ذخیره‌سازی فضایی پروفایل فاز و یا دامنه جبهه موج دلخواه اساس تکنیک هولوگرافی است. به‌گونه‌ای که امکان بازآفرینی مجدد جبهه موج موردنظر از طریق پدیده تداخل امواج در هنگام قرار دادن هولوگرام در مجاورت منبع موج مناسب و همدوس فراهم باشد. در کاربردهای نوری از رایانه برای ایجاد هولوگرام استفاده می‌شود و دیگر نیازی به‌عکس برداری از صحنه فیزیکی نیست.

سامانه‌های هولوگرافیکی صوتی به دو دسته سامانه‌های فعال و سامانه‌های غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. در سامانه‌های فعال مدولاسیون فاز اعمالی به تراگذارها به‌عنوان صفحه هولوگرافیک توصیف می‌شود به‌گونه‌ای که زمانی که یک علامت مرجع به آن اعمال می‌شود، میدان صوتی را استخراج

* نویسنده پاسخگو: yhojjat@modares.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

می‌کند [۳و۴]. ازجمله مزایای این دستگاه‌ها قابلیت ویرایش پویای جبهه موج و انعطاف‌پذیری بالا است. بااین‌وجود به‌منظور افزایش کیفیت جبهه موج خروجی و نیازمند تعداد بالایی از المان‌های تراگذار است که هرکدام به‌صورت جداگانه قابل آدرس‌دهی باشند.

این امر موجب پیچیده شدن مدار شیفت فاز و ادوات الکترونیکی، برای تحریک مستقل و سنکرون‌کردن تراگذارها می‌شود، برای کاهش تعداد المان‌های فعال از روش‌های مختلفی مانند استفاده از هولوگرام‌های صوتی پیوسته است که به آن‌ها سامانه‌های هولوگرافیکی غیرفعال نیز گفته می‌شود و به دودسته سامانه‌های چاپ سه-بعدی و سامانه‌های ابر ماده[۵و۶] تقسیم‌بندی می‌شوند.

هر دو روش کنترل فاز کامل ۰ تا ۳۶۰ درجه را فراهم می‌آورد. این دستگاه‌ها با یک منبع صوت ویرایش جبهه موج را فراهم می‌آورند. ازجمله معایب روش هولوگرافی غیرفعال برخلاف روش فعال نداشتن قابلیت تغییر تصویر و عدم پویایی و انعطاف‌پذیری در تغییر تصویر است [۷و۸].

هولوگرام صوتی پیوسته چاپ سه-بعدی شده که اولین بار توسط ملده و همکاران [۹] معرفی شده است قابلیت بازسازی جبهه‌ی موج را با پراش محدود در میدان‌های فشار و درنتیجه ایجاد ستون‌های دلخواه فراصوت را دارا است. از نمونه‌سازی سریع برای ساخت هولوگرام استفاده گردیده است.

در پروسه بازسازی نیم‌رخ میدان یک موج صفحه‌ای گذرا از هولوگرام عبور می‌کند و با توزیع فاز موردنظر ظاهر می‌شود و به‌منظور ایجاد نیم‌رخ دو-بعدی موردنظر در صفحه موردنظر دچار شکست می‌شود و درنهایت به سمت جلو مسیر خود را در پیش می‌گیرد. به علت اینکه هولوگرام توسط چاپ سه-بعدی ساخته‌شده است حاصل‌ضرب علامت در پهنای باند آن فقط توسط سایز قابل ساخت توسط چاپگر و تفکیک‌پذیری چاپگر محدود می‌شود.

به‌منظور دستیابی به تصویر نیم‌رخ فشار با پیوستگی و یکنواختی مناسب شبه‌سنج‌های طراحی بسیاری دخیل هستند که توسط برخی از پژوهشگران موردبررسی قرارگرفته است یکی از این بررسی‌ها توسط بختیاری‌نژاد و همکاران[۱۰] انجام‌گرفته است که در آن اثر بسامد کاری و قطر فرستنده‌ای که در تماس با هولوگرام و به‌تبع آن ابعاد هولوگرام مورد بررسی قرارگرفته است.

نیم‌رخ فشار به‌دست‌آمده توسط هولوگرام صوتی پیوسته، ثابت و غیرقابل تغییر است. این امر قابلیت ایجاد تغییر در نیم‌رخ فشار را از بین می‌برد. یکی از روش‌های از بین بردن این مشکل استفاده از هولوگرام‌های چند بسامدی است به‌گونه‌ای که در هر بسامد تحریک در صفحه تصویر نیم‌رخ فشار متفاوتی ایجاد شود. این روش توسط براون و همکاران [۱۰و۱۱] معرفی گردیده است.

مشابه این روش در هولوگرافی نوری پرکاربرد است. در پژوهشی که توسط کاکس و همکاران [۱۳] انجام‌گرفته است قابلیت‌ها و محدودیت‌های ترکیب هولوگرام پیوسته با آرایه فازی به‌منظور افزایش پویایی هولوگرام مورد بررسی قرارگرفته است. در این روش پیشنهادی می‌توان با اعمال گرادیان فاز به آرایه فازی، خروجی موج صفحه‌ای را می‌توان منحرف نمود. شبه‌سنج‌های دخیل در چاپ سه-بعدی از قبیل خواص صوتی مواد مورداستفاده و دقت دستگاه و هندسه هولوگرام خود می‌تواند در کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی مؤثر باشد.

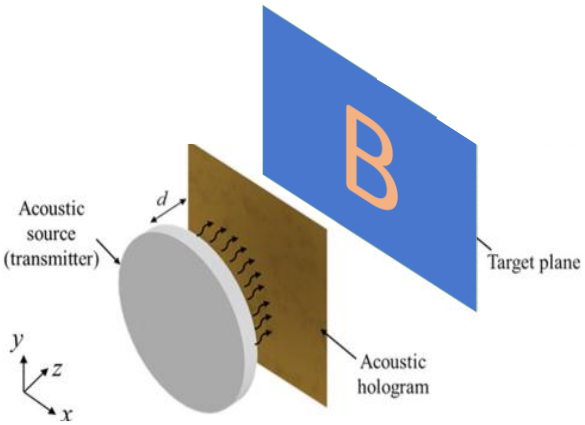
فری و همکاران [۱۴و۱۵] در پژوهشی چگونگی انتخاب بهترین پلیمرها را برای چاپ سه-بعدی هولوگرام‌های صوتین، به‌طور خاص برای اصلاح عدم تمرکز امواج صوتی در سامانه متمرکز سازی امواج صوتی در جمجمه، موردبررسی قراردادند.

یکی دیگر از مواردی که می‌تواند در ساخت هولوگرام مؤثر باشد تأثیر خطاهای ناشی از خود چاپگر در چاپ هولوگرام است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته می‌شود و تأثیر این خطا در بسامدهای مختلف طراحی برای هولوگرام بررسی می‌شود. یکی دیگر از موارد مؤثر در تصویر صوتی در صفحه هدف، خطای احتمالی در بسامد تحریک تراگذار است که توسط منبع تغذیه با تقویت‌کننده توان اعمال می‌شود. در این پژوهش نیز تأثیر این خطا مورد بررسی قرار خواهدگرفت.

۲. مواد و روش

الگوسازی تحلیلی و بررسی اثر خطاهای به وجود آمده در ساخت هولوگرام صوتی چاپ سه-بعدی شده و خطای بسامد تحریک تراگذار ناشی از منبع تغذیه بر کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی در صفحه تصویر مدنظر است. با بررسی این خطاها در بسامدهای کاری مختلف می‌توان به برآوردی برای محدوده قابل‌قبول برای این خطاها در بسامدهای مختلف متناسب با کاربرد موردنظر دست یافت.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]



شکل ۱ اصول عملکرد هولوگرام صوتی.

۲-۱. روش استخراج ابر نقاط هولوگرام

در شکل۱ شمایی از نحوه عملکرد سامانه هولوگرافیکی صوتی نشان داده شده است. به‌منظور طراحی هولوگرام از روش طیف زاویه‌ای بازگشتی[1] استفاده می‌شود. این روش در طراحی هولوگرام‌های نوری رایج بوده ولی اخیراً در طراحی هولوگرام‌های صوتی نیز به شکل مؤثری مورداستفاده قرار گرفته است.

در این روش از موج فشار به‌صورت جمع امواج صفحه‌ای نمایش داده می‌شود و در سطح فرستنده می‌توان نوشت[۹]:

$$p.(x,y,z=0)=|p.|(x,y,z=0)e^{j\Delta\phi(x,y,z)}$$
$$=\sum_{k_x}\sum_{k_y}P.(k_x,k_y,z=0)e^{j(k_x^2+k_y^2+k_z^2)} \quad (1)$$

که در آن $|p_0|$ و $\Delta\phi$ به ترتیب دامنه و فاز نسبی فشار صوتی مختلط بوده و j یکه موهومی است. که در آن $k^2=k_x^2+k_y^2+k_z^2$ و $k=\frac{\omega}{c}$ عدد موج و c سرعت سیال در ناحیه سیال است. طیف زاویه‌ای موج فشار در $z=0$ ثابت $P_0(k_x,k_y,z=0)$ با استفاده از تبدیل فوریه دو-بعدی به دست می‌آید:

$$P.(k_x,k_y,0)$$
$$=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}p.(x,y,0)e^{-j(xk_x+yk_y)}dxdy \quad (2)$$

روش طیف زاویه‌ای با استفاده از اطلاعات طیف زاویه‌ای فشار در هر صفحه دلخواه موازی با صفحه هدف(به‌عنوان‌مثال صفحه در صفحه $Z=0$) طیف زاویه فشار را در صفحه هدف به دست می‌آورد که به آن انتشار به جلو گفته می‌شود:

$$P(k_x,k_y,z)=P.(k_x,k_y,0)H(k_x,k_y,z) \quad (3)$$

که در آن $H(k_x,k_y,z)$ تابع انتشار است که رابطه آن به این شکل است:

$$H(k_x,k_y,z)=e^{jk_zz}=e^{jz\sqrt{k^2-k_x^2+k_y^2}} \quad (4)$$

به‌این‌ترتیب می‌توان توزیع فشار را در هر صفحه دلخواه z با استفاده از تبدیل فوریه معکوس دو-بعدی به دست می‌آید.

$$p(x,y,z)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}P(k_x,k_y,z)e^{j(xk_x+yk_y)}dk_xdk_y \quad (5)$$

به همین صورت می‌توان از طیف زاویه بازگشتی برای انتشار میدان فشار از صفحه هدف به سمت عقب[2] در صفحه $z=0$ که متناظر با صفحه فرستنده است نیز استفاده کرد[۱۳].

$$P.(k_x,k_y,0)=P(k_x,k_y,z)H(k_x,k_y,-z) \quad (6)$$

که در آن $H(k_x,k_y,-z)$ تابع انتشار به عقب است که به این صورت نوشته می‌شود:

$$H(k_x,k_y,-z)=e^{-jk_zz}=e^{-jz\sqrt{k^2-k_x^2+k_y^2}} \quad (7)$$

تئوری طیف زاویه‌ای[3] معرفی‌شده در این بخش برای هولوگرافی صوتی میدان نزدیک به کار می‌رود. هولوگرافی صوتی میدان نزدیک روشی است که برای شناسایی منبع صوتی و به‌صورت ویژه برای یک مسئله معکوس یا به عبارتی بازگشت به عقب فشار صوتی از یک صفحه هدف به یک صفحه نزدیک به منبع صوتی است.

نقشه فازی که در هولوگرام ذخیره می‌شود می‌توان به‌صورت یک توپوگرافی سطح درآورده شود که برای ساخت هولوگرام پیوسته قابل‌استفاده است. برای این کار المان هولوگرام صوتی یک ضخامت اولیه(t_0) دارد با جدا کردن ماده در پیکسل واقع در موقعیت (x,y) منجر به ایجاد اختلاف فاز موردنظر می‌شود.

$$\Delta\phi(x,y)=(k.-k_h)\Delta t(x,y) \quad (8)$$
$$t(x,y)=t.-\Delta t(x,y)$$

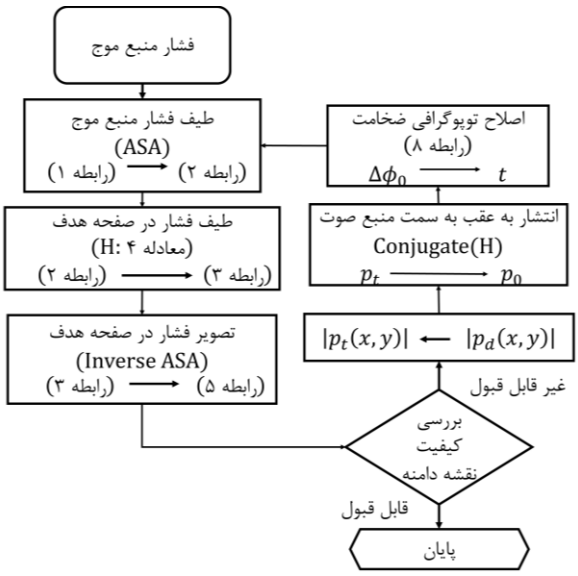
که در آن $\Delta\phi$ و Δt به ترتیب اختلاف فاز و اختلاف ارتفاع متناظر با آن در نقطه (x,y) است[۹]. به‌این‌ترتیب می‌توان با استفاده از ضریب عبور موج فشار منتشرشده توسط هولوگرام را اصلاح نمود. الگوریتم مورداستفاده برای استخراج هولوگرام موسوم طیف زاویه‌ای بازگشتی در شکل ۲ نشان داده شده

[1] IASA; Iterative Angular Spectrum Approach

[2] ASA; Angular Spectrum Aproach

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

اســـت. اســـاس این الگوریتم به‌کارگیری تئوری طیف زاویه‌ای است.



شکل ۲ الگوریتم طیف زاویه‌ای بازگشتی.

در این الگوریتم در هر مرحله ابتدا کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی در صفحه هدف (p_t) با نیم‌رخ مطلوب (p_d) مقایسه شده و در صورت قابل‌قبول نبودن نتیجه با حفظ نیم‌رخ فاز نیم‌رخ دامنه فشار صوتی در صفحه هدف $|p_t|$ با نیم‌رخ فشار مطلوب $|p_d|$ جایگزین می‌شود. این فرآیند تا رسیدن نیم‌رخ فشار صوتی به شکل مطلوب ادامه پیدا می‌کند.

۲-۲. بررســـی اثر خطاهای احتمالی بر کیفیت نیم‌رخ فشـــار صوتی

به‌منظور بررسـی کیفیت نیم‌رخ فشـار معیاری تعریف شـد. در این معیار به این نکته توجه گردید که دامنه فشـار در صـفحه تصویر برای نقاطی که فشار آن‌ها غیر صفر است به یک فشار میانگین نزدیک است هرقدر فشار یک نقطه نسبت به میانگین متفاوت باشـد نشـان‌دهنده نایکنواختی در نیم‌رخ فشـار پایین بودن کیفیت تصویر است به‌این‌ترتیب نسبت دامنه فشار در هر نقطه به میانگین فشـار کل نقاط که مقدار آن‌ها مخالف صـفر است، برای تصـویر هدف و تصـویری که از محاسـبات به دست می‌آید، محاسـبه گردید و تفاوت این دو مقدار به‌عنوان معیاری از کیفیت تصویر در نظر گرفته شد.

با توجه به اینکه در صـفحه تصـویر تمامی پیکسـل‌های با فشـار غیر صـفر، دامنه فشـار برابر دارند، نسـبت مذکور برای صـفحه هدف برابر یک است و رابطه معیار کیفیت بر این اساس بدست خواهد آمد.

$$E_{ij} = \left| 1 - \frac{P_{ij}}{\text{mean}(P_{ij})} \right| \qquad (۹)$$

$$e = \text{RMS}(E_{ij})$$

معیار رایج برای بررسـی کیفیت تصـویر فشـار صـوتی در صـفحه هدف در سایر پژوهش‌ها، استفاده بازده بازآفرینی تصویر[1] است.

$$\eta = \frac{\sum_{i\in T} p_i^2}{\sum_{i\in I} p_i^2} \qquad (۱۰)$$

که در آن T پیکسل‌هایی هستند که مقدار فشار در آن‌ها غیر صفر بوده و I کل صفحه تصویر است.

به این منظور تصویر نیم‌رخ فشار صوتی مطابق شکل ۳ (الف) برای انجام بررسـی‌های لازم در نظر گرفته شـده اسـت. علت استفاده از این شکل پیچیدگی نسبتاً مناسب (تصویر حرف B) از نظر تمرکز امواج است. نقشه ضخامت (توپوگرافی) هولوگرام و نیم‌رخ فشـار نهایی برای بسـامد ۲/۵ مگاهرتز و تصـویر هدف در فاصـــله ۲۰ میلی‌متری از ســـطح هولوگرام به ترتیب در شکل‌های ۳ (ب) و ۳ (ج) آورده است.

۲-۲-۱. اثر خطای ناشی از ساخت با چاپ سه-بعدی

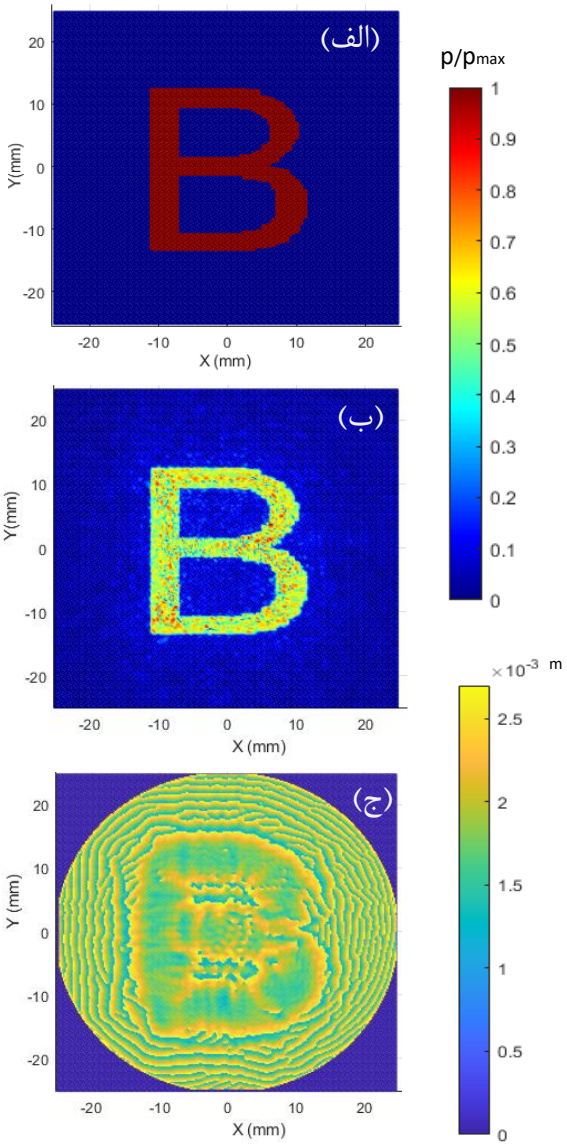
ازآنجایی‌که این خطا ماهیت تصـــادفی دارد، این خطا در هر نقطه از صفحه هولوگرام به‌صورتی عددی تصادفی مابین مثبت و منفی دقت ســـاخت چاپر ســـه-بعدی خواهد بود. به‌منظور الگوسازی این خطا، مضربی از یک ماتریس از اعداد تصادفی بین ۱> R_{ij} >۱- در مقادیر خطای ساخت، به نیم‌رخ ضـــخامت هولوگرام اضـــافه شـــد. و با اســـتفاده از نیم‌رخ این هولوگرام برای صفحه تصویر در فاصله ۲۰ میلی‌متری از سطح هولوگرام طراحی‌شده است.

$$t_{ij}{}^e = t_{ij} + R_{ij} \qquad (۱۱)$$

که در آن $t_{ij}{}^e$ نقشـه ضـخامت هولوگرام اسـت که دارای خطای ساخت است. درنهایت کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی بدست آمده از این نیم‌رخ ضـخامت (رابطه ۹ و ۱۰) به ازای مقادیر مختلف خطا محاسبه شد.

[1] Image Reconstruction Efficiency

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]



شکل ۳ (الف) نیم‌رخ فشار صوتی مرجع (ب) نیم‌رخ فشار محاسبه‌شده و (ج) ابر نقاط بدست آمده برای هولوگرام.

۲-۲-۲. اثر خطای بسامد اعمالی توسط منبع تغذیه

نوساناتی که ممکن است در بسامد کاری تنظیم‌شده بر منبع تغذیه راه‌انداز تراگذار صوتی ایجاد شود نیز می‌تواند منبع ایجاد خطا بوده و در کیفیت نیم‌رخ فشار نهایی تأثیرگذار باشد به این منظور در آزمایش‌های تجربی در هنگام تنظیم بسامد، بسامد خروجی آن‌ها دارای خطایی به‌صورت درصدی از بسامد خروجی است، در این تحلیل فرض شده است که بیشینه ±۱۰ درصد بسامد تنظیم‌شده خطا در بسامد تولیدی مولد تحریک تراگذار بسامد بالا ایجاد می‌شود. اثر این خطا در عدد موج محیط انتشار موج و ماده هولوگرام بروز کرده و موجب به وجود آمدن خطا در توزیع فاز جبهه موج ارسالی از هولوگرام می‌شود.

۲-۳. آزمایش تجربی

به‌منظور بررسی تجربی اثر تغییرات بسامد بر نیم‌رخ فشار صوتی یک آزمون تجربی در نظر گرفته شد. به این منظور ابتدا با استفاده از الگوریتم آی‌ای‌اس‌ای[1] یک هولوگرام برای تشکیل تصویر حرف V در صفحه تصویر به فاصله ۱۵ میلی‌متر از صفحه هولوگرام طراحی شد.

بسامد طراحی برای این هولوگرام ۱۰۵۰ کیلوهرتز است. تصویر مرجع موردنظر به همراه تصویر ایجادشده توسط هولوگرام در صفحه هدف به روش تحلیلی به ترتیب در شکل۴ (الف) و ۴(ب) نشان داده شده است. هولوگرام با استفاده از روش پردازش نور دیجیتال[2] با چاپگر سه-بعدی (۷۰μm ×۵۰μm ×۵۰μm) ANYCUBIC چاپ سه-بعدی می‌شود که در مقایسه با حداقل اندازه وکسل موردنظر (۰٫۲۶۳ میلی‌متر) دقت قابل‌قبولی دارد.

ماده مورداستفاده برای طراحی و ساخت هولوگرام‌ها رزین فتورزیست[3] است. خواص صوتین ماده پخت شده به‌طور تجربی با سرعت سنجی صوتی[4] بر یک نمونه چاپ‌شده سه-بعدی با قطر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر ارزیابی شد. خواص مکانیکی و صوتی رزین چاپگر سه-بعدی و محیط انتشار(آب) در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۵ مجموع آزمایش قابل مشاهده است.

صفحه تصویر هولوگرام ساخته‌شده برای نمایش نیم‌رخ فشار صفحه تصویر در سطح آب در نظر گرفته شد که در اثر ناحیه پرفشار صوتی دچار تغییر شکل شده و تصویر نیم‌رخ فشار صوتی را به‌صورت برجستگی در سطح آب نمایش دهد. مجموعه آزمایشی شامل یک مخزن آب شیشه‌ای است که با آب دیونیزه شده پر شده است. تراگذار شامل یک دیسک پی‌زِدتی-۴[5] به قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر است و بر یک پشتی آلومینیومی نصب‌شده است.

[1] IASA
[2] Digital Light process(DLP)
[3] ANYCUBIC GRAY
[4] Acoustic Velocimetry
[5] PZT-4

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

جدول۱. خواص صوتی ماده هولوگرام و محیط انتشار صوت.

خواص	رزین چاپ سه‌بعدی	محیط انتشار موج
چگالی	$۱۱۵۰\frac{kg}{m^3}$	$۹۹۸\frac{kg}{m^3}$
مدول الاستیک	۱٫۲GPa	-
ضریب پوواسون	۰٫۳۴	-
سرعت صوت	$۲۳۵۴\frac{m}{s}$	$۱۵۰۰\frac{m}{s}$

قسمت پشتی تراگذار به هوا باز است و با استفاده از لاستیک سیلیکونی و درپوش پلی متیل متاکریلات[1] آب‌بندی‌شده است. برای به دست آوردن دامنه موج مناسب، تراگذار در نزدیکی بسامدهای تشدید تحریک می‌شود.

تراگذار مستقیماً با استفاده از تقویت‌کننده آرِاف[2] کلاس ایی[3] هدایت می‌شود. گریس خلأ[4] برای نصب هولوگرام‌های ساخته‌شده بر تراگذار به دلیل اتصال صوتی خوب و سادگی مونتاژ و جداسازی هولوگرام‌ها استفاده شد.

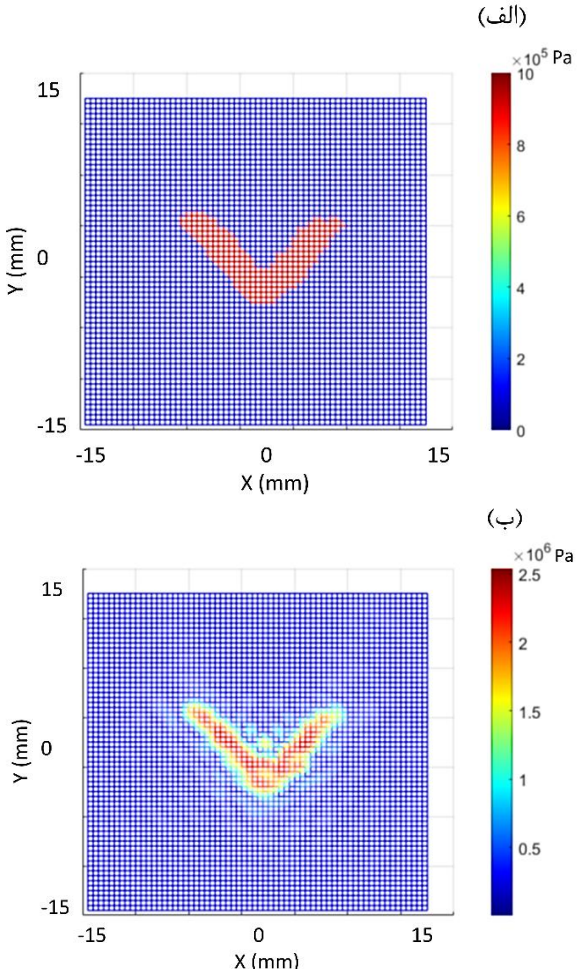
مجموعه تراگذار و هولوگرام در داخل مخزن آب غوطه‌ور می‌شود و فاصله صفحه هولوگرام از سطح آزاد آب تا فاصله صفحه هدف طراحی‌شده (z=15 میلی‌متر)، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده‌شده است، تنظیم می‌شود.

۳. نتایج

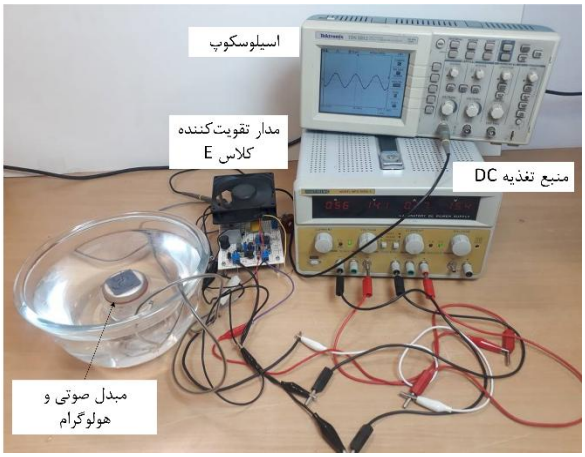
در شکل ۶ تغییرات کیفیت نیم‌رخ فشار برحسب خطاهای مختلف ساخت به ازای بسامدهای مختلف نشان داده شده است. محدوده خطای در نظر گرفته شده برای بررسی از ۰٫۰۱تا ۰٫۲ میلی‌متر است که بیشینه خطای چاپگرهای سه‌بعدی موجود است. این اثرات خود را در نیم‌رخ فاز موج ارسالی از صفحه هولوگرام بروز خواهند داد.

تغییرات کیفیت نیم‌رخ فشار نسبت به خطای بسامد به ازای بسامدهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه قابل مشاهده است، محدوده تغییرات خطا در کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی ناشی از هرکدام با یکدیگر متفاوت است.

در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج بازده بازآفرینی تصویر فشار صوتی به ترتیب برای خطای ساخت و بسامد نشان داده شده است.



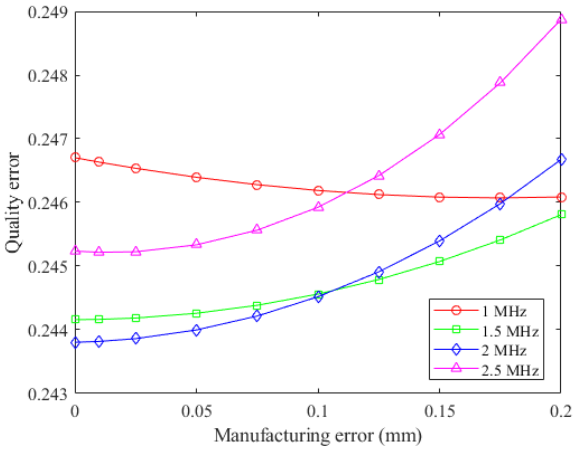
شکل ۴(الف) نیم‌رخ فشار صوتی مرجع (ب) نیم‌رخ فشار محاسبه‌شده.



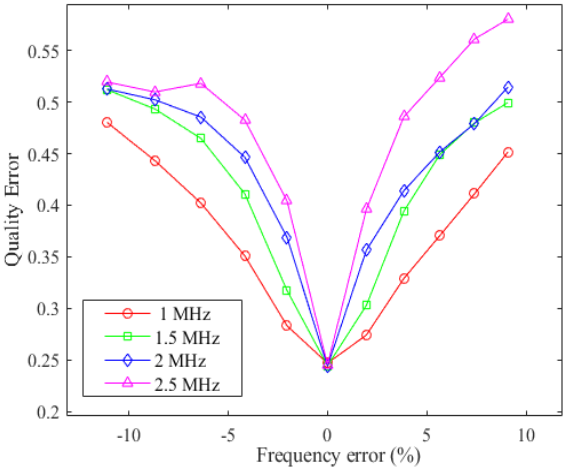
شکل ۵ مجموعه آزمایش.

[1] PMMA
[2] RF
[3] E
[4] DUPONT™ Molykote

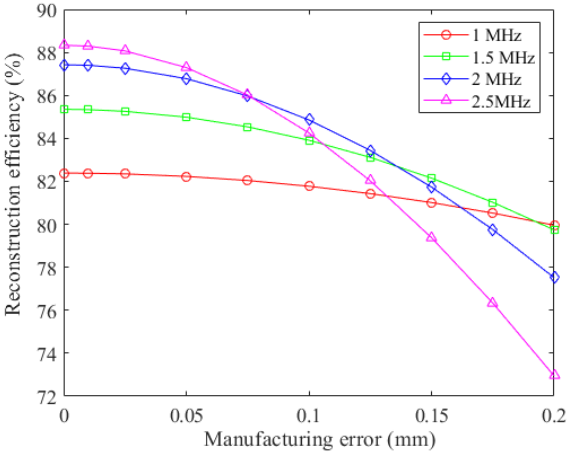
[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]



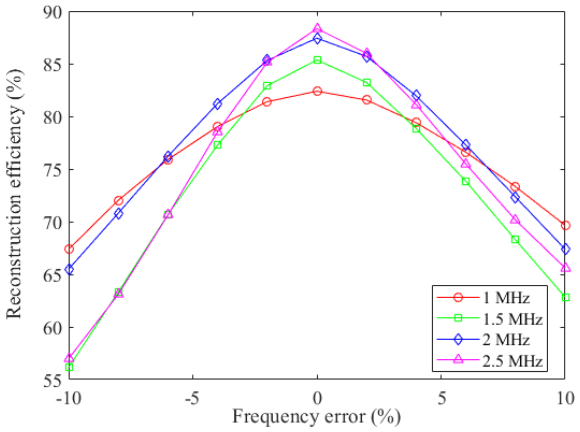
شکل ۶ اثر خطای ساخت ناشی از چاپگر سه-بعدی بر خطای کیفیت نیمرخ فشار صوتی.



شکل ۷ اثر خطای بسامد تحریک بر خطای کیفیت نیمرخ فشار صوتی.



شکل ۸ اثر خطای ساخت ناشی از چاپگر سه-بعدی بر بازده بازآفرینی تصویر فشار صوتی.



شکل ۹ اثر خطای بسامد تحریک بر بازده بازآفرینی تصویر فشار صوتی.

تناظر نتایج این دو شکل با نتایج شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده است در مورد این معیار تاکنون مقادیر گزارش‌شده برای بسامدهای کاری مشابه بالای ۶۰ درصد است[۱۶] که در پژوهش حاضر نیز این مقدار در بسامدهای طراحی بررسی‌شده بالاتر از ۸۰ درصد است. با افزایش بسامد طراحی، به علت کوتاه شدن طول‌موج و ریز شدن پیکسل‌ها، بازده بازآفرینی تصویر افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ تغییرات تصویر نیمرخ فشار بر سطح آب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بافاصله گرفتن از بسامد طراحی بر آب نیز کاهش می‌یابد و ناپیوستگی‌هایی در تصویر نمایان می‌شود.

۴. بحث

با توجه به نتایج حاصل‌شده از کیفیت فشار در اثر خطاهای ساخت، مشاهده می‌شود در بسامدهای پایین حساسیت کیفیت نیمرخ فشار صوتی به خطاهای ناشی از ساخت کم است. این در حالی است که در بسامدهای بالا با افزایش خطای ساخت، خطای کیفیت نیمرخ فشار صوتی افزایش پیدا می‌کند. این موضوع با شیب کم نمودارهای مربوطه به بسامدهای کاری پایین‌تر قابل مشاهده است. بیش‌ترین خطای ایجادشده برای همین استدلال در مورد بازده بازآفرینی تصویر قابل‌ذکر است. در این نمودار مشاهده می‌شود، بیشینه تغییرات بازده بازآفرینی تصویر برای بسامد ۱ و ۱٫۵ مگاهرتز به ترتیب ۲ درصد و۵٫۶۲ درصد است درحالی‌که برای بسامدهای ۲ و ۲٫۵ مگاهرتز این مقدار ۹٫۹ درصد و ۱۵٫۳۹ درصد است. بااین‌حال،

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

در محدوده بسامدهای مورد بررسی این تغییرات قابل‌قبول بوده و دقت چاپگرهای موجود برای ساخت هولوگرام مناسب می‌باشند.

در مورد کیفیت نیم‌رخ فشار تحت تأثیر خطای ناشی از مولد توان برای تحریک تراگذار مشاهده می‌شود در بسامدهای بالا این خطا قابل‌توجه است و با افزایش بسامد اثر این خطا بر کیفیت افزایش می‌یابد این بیشینه تغییرات برای بسامد ۱ مگاهرتز در حدود ۲۳ درصد و برای بسامد ۲٫۵ مگاهرتز در حدود در حدود ۳۳ درصد است. همین نتیجه را می‌توان از نتایج بازده بازآفرینی تصویر بدست آورد. به‌گونه‌ای که بیشینه کاهش بازدهی برای بسامد ۱ مگاهرتز در حدود ۱۵٫۰۱ درصد و بسامد ۲٫۵ مگاهرتز ۳۱٫۳۵ درصد است.

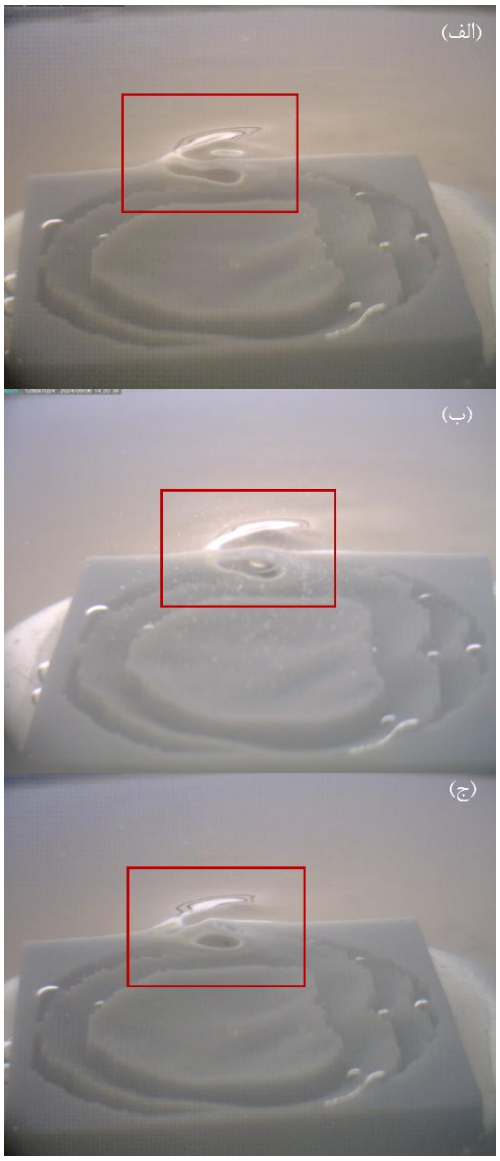
از طرفی می‌توان دریافت تأثیر خطای بسامد بسیار بیش‌تر از خطای ساخت است (این مقدار برای دقت ساخت در حدود۰٫۰۲ درصد و برای بسامد۳۰ درصد است.) بنابراین انتخاب تجهیزی با دقت بسامد بالا در اولویت بیش‌تری نسبت به انتخاب چاپگر دقیق است.

طبق مشاهدات تجربی که با اعمال خطای ۴- درصد و ۵+ درصد به بسامد تحریک ۱۰۴۵ کیلوهرتزی تصویر برجستگی آب که متناظر با فشار صوتی در آن ناحیه است نسبت به تحریک با بسامد طراحی دارای نایکنواختی‌هایی می باشد که علت آن را می‌توان در تغییر در الگوی تداخل امواج در صفحه تصویر نسبت داد که در اثر تغییر الگوی اختلاف فاز تولیدی توسط هولوگرام ایجاد می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله دو مورد از خطاهای احتمالی که ممکن است کیفیت نیم‌رخ فشار صوتی ایجادشده توسط هولوگرام صوتی پیوسته را تحت تأثیر قرار دهد مورد بررسی قرار گرفتند. این خطاها عبارت‌اند از خطای ناشی از چاپگر سه-بعدی و خطای بسامد تولیدی توسط مولد بسامد بالا. برای هرکدام از این خطا یک الگو ریاضی در نظر گرفته شد.

خطاهای ناشی از تغییرات بسامد دارای مقادیر بیش‌تری هستند. در مورد خطاهای ساخت با توجه به دقت چاپرهای موجود این مقدار در حدود ۰٫۰۰۱ است. از طرفی حساسیت به هر دو این خطاها در بسامدهای بالا بیش‌تر است. نتایج تجربی نیز افت کیفیت نیم‌رخ فشار را با تغییر بسامد نسبت به بسامد



شکل ۱۰ تصویر فشار صوتی بر آب (الف) بسامد ۱۰۴۵ کیلوهرتز، (ب) ۱۰۰۵ کیلوهرتز و (ج) ۱۰۹۵ کیلوهرتز.

طراحی نشان داد. در پژوهش‌های آتی بررسی خطاهای دیگر ازجمله اثر خطا در فاصله صفحه تصویر و موازی نبود صفحه تصویر و صفحه هولوگرام مدنظر است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای مهندس حسین میرنژاد به‌منظور بازطراحی مدار الکترونیکی برای راه‌اندازی تراگذار صوتی، تقدیر و سپاسگزاری به عمل می‌آورند.

تضاد منافع

مقاله ارائه‌شده فاقد هرگونه تضاد منافع است.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

مراجع

[1] M. Xu, C. Vidler, J. Wang, X. Chen, Z. Pan, W. S. Harley, P. Lee, D. Collins, "Micro-Acoustic Holograms for Detachable Microfluidic Devices", Small, vol. 2024, pp. 2307529, 2024.

[2] K. Uchida, S. Nagaii, H. Kashiwaya, M. Arii, "Availability study of a phased array ultrasonic technique", Nuclear Engineering and Design, vol. 81, no. 2, pp. 309-314, 1984.

[3] A. Marzo, B. Drinkwater, "Holographic acoustic tweezers", Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 116, no. 1, pp. 84-89, 2019.

[4] A. Marzo, S. Seah, B. Drinkwater, D. Sahoo, B. Long, S. Subramanian, "Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects", Nature Communications, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, 2015.

[5] Y. Tian, Q. Wei, Y. Cheng, X. Liu, "Acoustic holography based on composite metasurface with decoupled modulation of phase and amplitude", Applied Physics Letters, vol. 110, no. 19, pp. 191901, 2017.

[6] Y. Xie, C. Shen, W. Wang, J. Li, D. Suo, B. Popa, Y. Jing, S. Cummer, "Acoustic holographic rendering with two-dimensional metamaterial-based passive phased array", Scientific Reports, vol. 6, no. 1, pp. 1-6, 2016.

[7] Z. Ma, K. Melde, A. Athanassiadis, M. Schau, H. Richter, T. Qiu, P. Fischer, "Spatial ultrasound modulation by digitally controlling microbubble arrays", Nature Communications, vol. 11, no. 1, pp. 1-7, 2020.

[8] M. Xu, J. Wang, W. Harley, P. Lee, D. Collins, "Programmable Acoustic Holography using Medium-Sound-Speed Modulation", Advanced Science, vol. 10, no. 23, p. 2301489, 2023.

[9] K. Melde, A. Mark, T. Qiu, P. Fischer, "Holograms for acoustics", Nature, vol. 537, no. 7621, pp. 518-522, 2016.

[10] M. Bakhtiari-Nejad, A. Elnahhas, M. Hajj, S. Shahab, "Acoustic holograms in contactless ultrasonic power transfer systems: Modeling and experiment", Journal of Applied Physics, vol. 124, no. 24, pp. 244901, 2018.

[11] M. Brown, B. Cox, B. Treeby, "Design of multi-frequency acoustic kinoforms", Applied Physics Letters, vol. 111, no. 24, pp. 244101, 2017.

[12] M. Brown, B. Cox, B. Treeby, "Investigating the effect of thickness and frequency spacing on multi-frequency acoustic kinoforms", IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1-4, 2017.

[13] L. Cox, K. Melde, A. Croxford, P. Fischer, B. Drinkwater, "Acoustic hologram enhanced phased arrays for ultrasonic particle manipulation", Physical Review Applied, vol. 12, no. 6, pp. 064055, 2019.

[14] M. Ferri, J. Bravo, J. Redondo, S. Jiménez-Gambín, N. Jiménez, F. Camarena, J. Sánchez-Pérez, "On the evaluation of the suitability of the materials used to 3D print holographic acoustic lenses to correct transcranial focused ultrasound aberrations", Polymers, vol. 11, no. 9, pp. 1521, 2019.

[15] M. Ferri, J. Bravo, J. Redondo, J. Sánchez-Pérez, "Enhanced numerical method for the design of 3D-printed holographic acoustic lenses for aberration correction of single-element transcranial focused ultrasound", Ultrasound in Medicine & Biology, vol. 45, no. 3, pp. 867-884, 2019.

[16] Z. Li, Y. Yang, Q. Lu, X. Wei, C. Hou, Y. Quan, X. Lü, W. Bao, Y. Yang, C. Fei, "Dynamic Acoustic Holography: One-Shot High-Precision and High-Information Methodology", Micromachines, vol. 15, no. 11, pp. 1316, 2024.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]