

شناسایی ارتعاشات سامانه های دورانی با استفاده از روش پردازش تصویر

جواد حسین زاده
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک طراحی کاربردی
دانشگاه صنعتی امیر کبیر

j.h_mech@aut.ac.ir

خسرو معدنی پور
استادیار پژوهشگر لیزر، اپتیک و
فوتونیک
دانشگاه صنعتی امیر کبیر

madanipour@aut.ac.ir

فیروز بختیاری نژاد*
استاد دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیر کبیر

baktiari@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۴

چکیده

در این مقاله روشی نوین جهت بررسی ارتعاشات عرضی یک سامانه ارتعاشی با استفاده از روش پردازش تصویر ارائه شده است. روش های اپتیکی مانند تکنیک انحراف سنجی، تکنیک ماره، هولوگرافی دیجیتال و... از روش های متداول در این راستا می باشند. در این مقاله از روش انحراف سنجی برای مطالعه ارتعاشات دیسک چرخان استفاده شده است. با تصویر برداری از دیسک چرخان، تصاویر مربوط به آن استخراج می شود. با بررسی قاب به قاب تصاویر به وسیله تکنیک پردازش تصویر در حوزه فرکانس، نمایه سه بعدی دیسک که همان شکل مود یا پاسخ ارتعاشی دیسک مرتعش است، در هر قاب به دست می آید. با معلوم بودن تعداد قاب بر ثانیه توسط دوربین مورد استفاده، فرکانس ارتعاشات نیز به دست می آید. برای بررسی صحت نتایج، داده های به دست آمده با داده های حاصل از حل معادله ارتعاشات اجباری عرضی خطی دیسک چرخان مقایسه شده است. در بهترین حالت خطای RMS نمودارهای حاصل از آزمایش با نمودارهای تحلیلی به میزان ۰/۱۹ شد که نزدیک بودن نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نظریه و دقت روش مورد استفاده را تأیید می کند.

واژگان کلیدی: ارتعاشات دیسک چرخان، پردازش تصویر، تکنیک انحراف سنجی، تبدیل فوریه تصویر، الگوریتم های بازگشایی فاز گسسته

۱. مقدمه

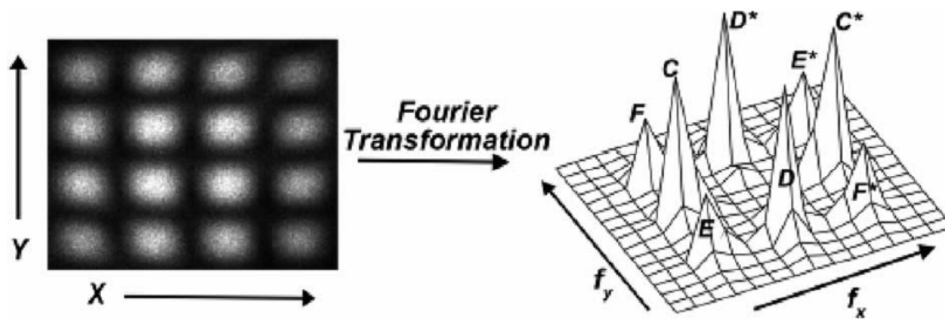
سامانه های مکانیکی است. بسیاری از دستگاه ها و قطعات از چنان حساسیتی برخوردار می باشند که لزوم پایش وضعیت

در دنیای امروز پایش وضعیت ارتعاشی قطعات مکانیکی از جمله موارد مهم در بحث نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

ارتعاشی آن‌ها به صورت بلادرنگ غیر قابل انکار است. در این راستا ارائه روش‌های اندازه‌گیری غیر مخرب و در عین حال ساده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این مقاله ارائه یک روش غیر تماسی جدید در بحث اندازه‌گیری ارتعاشات می‌باشد که به طور خاص یک دیسک چرخان به عنوان سامانه ارتعاشی نمونه انتخاب شده است. دیسک‌های چرخان کاربردهای بسیاری در صنعت دارند. از جمله این کاربردها می‌توان به تیغه‌های دایروی، روتور توربین‌ها، لوح فشرده کامپیوترها، صفحات سانتریفوژها و ... اشاره کرد. روش پردازش تصویر از جمله روش‌های غیر تماسی در بحث شناسایی ارتعاشات است. همین غیر تماسی بودن این روش می‌تواند به عنوان نقطه قوت آن مطرح شود. در روش‌های تماسی معمولاً حساسه مورد نظر به جسم مرتعش متصل شده و سیگنال‌های ارتعاشی را به طور مستقیم از جسم می‌گیرد که این به نوبه خود با تغییر جرم و اینرسی جسم مورد مطالعه، نتایجی به دور از واقعیت ارائه می‌دهد. حساسه‌های تماسی در اجسامی که ابعاد آن‌ها در مقایسه با ابعاد خود حساسه بسیار بزرگ بوده و می‌توان از ابعاد حساسه صرف‌نظر کرد، تأثیر چندانی در نتایج ندارند. ولی در اجسامی که حساسیت‌شان بالا بوده و یا از ابعاد کوچکتری برخوردارند، اهمیت این موضوع ظاهر می‌گردد.

حساسه‌های غیر تماسی نیز مشابه حساسه‌های تماسی هستند، اما در این مورد برای حس کردن لازم نیست حتماً با شیء در تماس باشند. عموماً این حساسه‌ها از نظر ساخت از نوع پیشین دشوارترند ولی سرعت و دقت بالاتری را در اختیار سامانه قرار می‌دهند. از مزایای این حساسه‌ها می‌توان به سرعت سوئیچینگ زیاد، طول عمر زیاد، عدم نیاز به نیرو و فشار، عدم ایجاد نویز در هنگام سوئیچینگ و ... یاد کرد. از جمله این حساسه‌های غیر تماسی می‌توان به حساسه‌های نوری اشاره کرد. حساسه‌های نوری طبقه‌ای از حساسه‌ها هستند که در آنها، امواج نوری به عنوان ورودی محسوب می‌گردند. این حساسه‌ها حضور و رفتار امواج نوری را آشکار

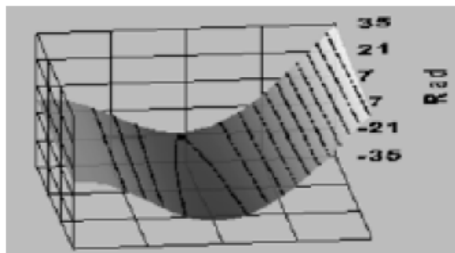
می‌کنند. با استناد به این ویژگی، این حساسه‌ها توانایی آشکارسازی حضور مستقیم یک شیء را دارند. همچنین، با استفاده از فرایند مدولاسیون این حساسه‌ها، می‌توان سایر کمیت‌های مورد نظر را به‌طور غیر مستقیم آشکارسازی کرد. به این صورت که مثلاً ساختمان حساسه‌ای را طوری طراحی می‌کنند که به ازای ورودی یک شعاع نوری خاص، خروجی آن طیف فرکانسی آن نور باشد. ایرادی که این حساسه‌ها دارند این است که معمولاً به‌صورت نقطه‌ای عمل می‌کنند. یعنی برای حصول اطلاعات میدانی از یک سامانه، نیاز به چندین حساسه و نیز یکپارچه‌سازی اطلاعات به‌دست آمده از آن‌ها است. در این بین روش‌های دیگری نیز مطرح شدند که در آن‌ها اطلاعات به‌صورت میدانی به‌دست می‌آیند. رویه‌نگاری^۱ سطوح روشی است که از آن می‌توان برای اندازه‌گیری ارتعاشات استفاده نمود. رویکرد اصلی این روش -ها تعیین نمایه سه بعدی سطح است. روش انحراف سنجی^۲ از جمله این روش‌هاست که در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که در این مقاله نیز از روش انحراف سنجی استفاده شده است. روش انحراف سنجی در اندازه‌گیری ارتعاشات روشی جدید است که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. به جرأت می‌توان گفت که سابقه استفاده از این روش در اندازه‌گیری ارتعاشات فقط در یک دهه اخیر است. در سال ۲۰۰۴ تا^۳ [۱] و دیگران از این روش برای اندازه‌گیری ارتعاشات با فرکانس بسیار کم استفاده کردند. آن‌ها در این تحقیق خود از روش مکانی برای تحلیل الگوها استفاده نموده‌اند. روشی موسوم به روش اسکن فاز مبنای استخراج فاز در تحقیق آن‌ها بود. در سال ۲۰۰۵ نیز میشل^۴ [۲] از این روش و همچنین روش شیفت فازی برای تحلیل مودال یک صفحه یک سر گیر دار استفاده کرده است. ییلماز^۵ و دیگران نیز با استفاده از یک فیبر نوری چهار هسته‌ای الگوهایی مانند شکل ۱ را برای مطالعه ارتعاشات یک قطعه مرتعش ایجاد نمودند [۳]. آن‌ها در این تحقیق خود از روش میانگین زمانی تبدیل فوریه استفاده کرده‌اند.



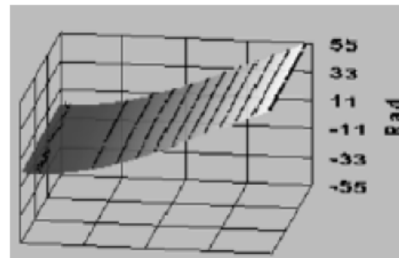
شکل ۱. الگوهای تشکیل شده از چهار فیبر نوری و تبدیل فوریه این الگوها [۳]

تحلیل الگوی اینان بود [۴]. در شکل ۲، شکل مدهای اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها نشان داده شده است.

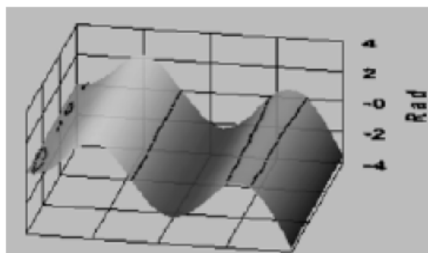
در سال ۲۰۰۷ نیز رودریگز^۶ و دیگران ارتعاشات یک تیر یک سر گیردار را که تحت فرکانس بسیار کم و دامنه بزرگ ایجاد ارتعاش می‌کند را به دست آوردند. تبدیل فوریه نیز روش



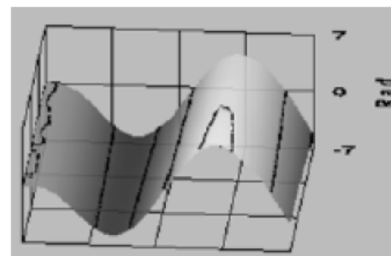
(ب)



(الف)



(د)

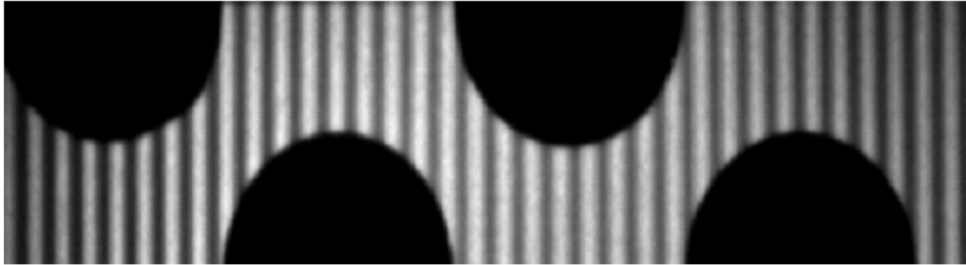


(ج)

شکل ۲. شکل مدهای اندازه‌گیری شده تیر یک سر گیردار (الف) مود اول (ب) مود دوم (ج) مود سوم (د) مود چهارم [۴]

مقاله باعث شده است که برای بازگشایی فاز آن از الگوریتم‌های وابسته به مسیر استفاده گردد. شکل ۳ این تیر را با الگوهای تابیده شده بر روی آن نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های مربوط به فاز گسسته و پیوسته قدرت روش بازگشایی فاز در استخراج صحیح لبه‌های تیر به خوبی نمایان است.

همچنین فو^۷ در سال ۲۰۱۰ از الگوهای موازی برای اندازه‌گیری ارتعاشات اجباری تیر یک سر گیردار که تحت فرکانس بسیار کم (۲/۴ هرتز) توسط یک شیکر ارتعاش می‌کرد، استفاده نمود [۵]. او در این مقاله از سه روش تبدیل فوریه، تبدیل فوریه پنجره کوتاه و تبدیل موجک پیوسته یک بعدی استفاده نموده است. پیچیدگی شکل تیر مورد آزمایش در این



(الف)



(ب)

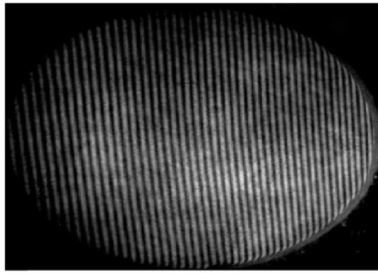


(ج)

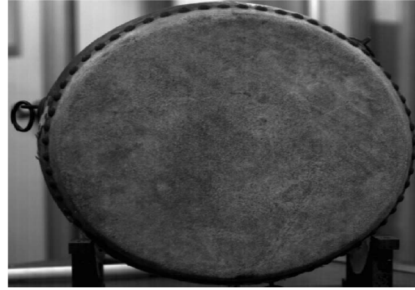
شکل ۳. آزمایش اندازه‌گیری ارتعاشات تیر یک سرگردار (الف) الگوهای موازی تابیده شده بر روی تیر (ب) فاز گسسته حاصل (ج) فاز پیوسته [۵]

دوربین CCD سرعت بالا (۱۰۰۰ قاب بر ثانیه) شکل مود ارتعاشی آن را به دست آوردند. شکل زیر این نتایج را نشان می‌دهد.

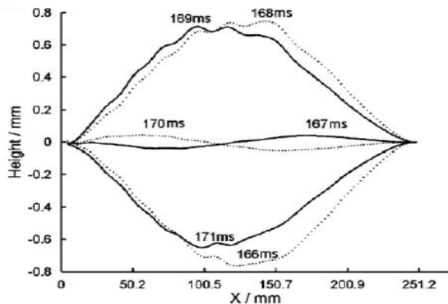
سو و ژانگ^۸ نیز در سال ۲۰۱۰ آزمایش جالبی را بر روی یک طبل انجام دادند [۶]. آن‌ها با استفاده از الگوهای تابیده شده توسط لیزر بر روی یک طبل، با استفاده از یک



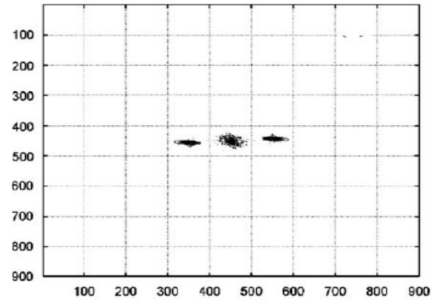
(ب)



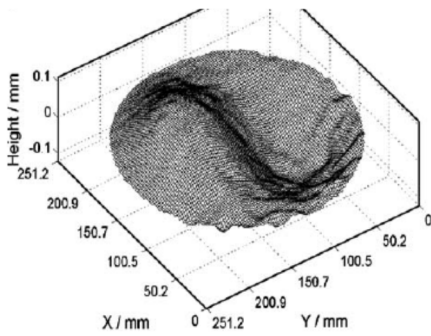
(الف)



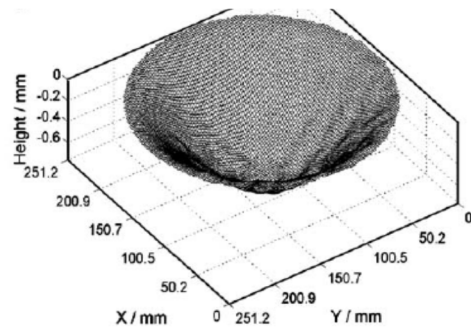
(د)



(ج)



(و)



(ه)

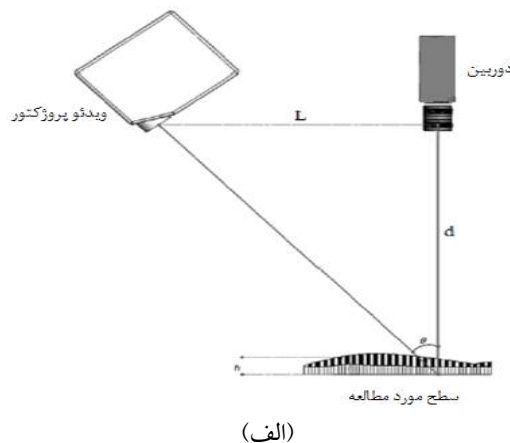
شکل ۴. نتایج حاصل از تحلیل ارتعاشات طبل (الف) شکل طبل مورد آزمایش (ب) الگوهای تاییده شده بر روی آن (ج) تبدیل فوریه الگوهای تغییر شکل یافته (د) دامنه ارتعاشات (ه) شکل مود ارتعاشی (و) شکل مود ارتعاشی [۶]

شده بر روی جسم منحرف می‌شوند. با عکس‌برداری از خطوط منحرف شده و با استفاده از روش‌های مختلف پردازش الگو، می‌توان نمایه سه بعدی سطح را به مقدار کمی استخراج نمود [۷].
از مزایای عمده روبه‌نگاری با این روش این است که چون الگوهای^{۱۰} منحرف شده بر روی جسم عمدتاً از نوع الگوهای باز می‌باشند، تحلیل آن‌ها ساده‌تر بوده و تنها با یک بار عکس‌برداری و با در اختیار داشتن تنها یک قاب از عکس،

۲. روبه‌نگاری به روش انحراف سنجی

این روش که به روش تصویر کردن خطوط^۹ نیز معروف است، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای روبه‌نگاری اپتیکی می‌باشد. در این روش ابتدا خطوطی موازی بر روی سطح مورد نظر تابانده می‌شود. این خطوط ممکن است به واسطه ایجاد ساختار تداخل نوری و یا اینکه توسط کامپیوتر ایجاد شده و به کمک ویدئو پروژکتور بر روی سطح تابانده شوند. به دلیل ناهمواری‌های موجود بر روی سطح، خطوط افکنده

می‌توان به راحتی و با دقت بالایی به نمایه سه بعدی سطح دست یافت. علاوه بر آن در صورت استفاده از ویدئو پروژکتور به دلیل ابزارآلات ساده و چیدمان راحت آن در مقایسه با سایر روش‌ها باعث شده تا بیشتر مورد توجه قرار بگیرد.



(الف)

شکل ۵ چیدمان ابزار آلات مورد نیاز در این روش و همچنین رویه نگاری چهره انسان را به همراه نمایه سه بعدی بازسازی شده آن نمایش می‌دهد.



(ب)

شکل ۵. (الف) چیدمان ابزار آلات روش انحراف سنجی [۸] (ب) رویه نگاری چهره انسان با روش انحراف سنجی [۷]

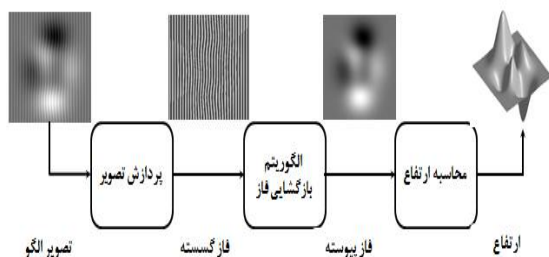


شکل ۶. روش‌های مختلف پردازش الگو

سپس خطوط منحرف شده بر روی سطح، توسط دوربین دیجیتالی عکسبرداری می‌شود. در مرحله بعد، تصاویر حاصل شده باید پردازش شوند. در بخش بعدی روش‌های پردازش این الگوها توضیح داده می‌شود.

۳. روش‌های مختلف پردازش الگو

آنچه در این بخش مورد مطالعه قرار می‌گیرد استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر جهت تحلیل الگوهای انحراف سنجی و دستیابی به مقادیر عددی و یا گرافیکی به منظور نمایش نمایه سه بعدی سطوح است. با توسعه و کاهش قیمت تجهیزات پردازش دیجیتالی تصاویر، تلاش زیادی در پردازش الگوها انجام شده است که هدف تمامی آن‌ها حصول دقت بیشتر، افزایش سرعت و خودکار کردن فرآیند اندازه‌گیری می‌باشد. به‌طور کلی، تحلیل الگوها به دو روش شدتی و فازی تقسیم می‌شود. در شکل ۶ این تقسیم‌بندی به شکل واضح‌تری مشخص است.



شکل ۷. مراحل مختلف پردازش الگوها به روش فازی [۱۱]

به دلیل این که در این مقاله از روش‌های فازی استفاده شده است، از تشریح روش شدتی خودداری کرده و برای اطلاعات بیشتر، مراجع مربوطه معرفی می‌شوند [۹، ۱۰].

۴. تحلیل الگوها به روش فازی

اصولا زمانی که خطوط نوری با فرکانس ثابت بر روی سطحی بتابد، به واسطه تغییرات ارتفاعی سطح، فرکانس خطوط عوض شده و باعث تغییر شکل آن‌ها می‌شود. این تغییر شکل‌ها باعث تغییر در فاز این خطوط بر اساس تغییرات ارتفاع سطح می‌گردد. با تعیین فاز پیوسته در هر نقطه برای تصاویر نمونه و مرجع و تعیین اختلاف آن‌ها می‌توان با استفاده از روابط فاز بر حسب ارتفاع، و یا استفاده از روش سعی و تکرار و کالیبراسیون، ارتفاع را در هر نقطه از تصویر به‌دست آورد [۱۲].

دو رویکرد عمده در تحلیل الگوها به روش فازی عبارتند از روش‌های مبتنی بر تبدیل یا تحلیل در حوزه فرکانس و روش جابه‌جایی فاز^{۱۱} در حوزه مکان. محل استفاده و میزان کارایی هر کدام از رویکردهای فوق بستگی به نوع تصویر و کاربرد آن می‌باشد. به عنوان مثال اگر تعداد تصاویر به‌دست آمده از سطح محدود باشند، روش جابه‌جایی فاز در حوزه مکان می‌تواند روش مناسبی برای تحلیل تصاویر فوق باشد. در غیر این صورت روش‌های تحلیل فرکانسی به کار می‌آیند. روش مبتنی بر تبدیل، عمدتا همان روش تبدیل فوریه می‌باشد. روش تبدیل فوریه مزیتی که نسبت به روش جابه‌جایی فاز دارد این است که برای تحلیل الگوها تنها به یک قاب نیاز دارد. در نتیجه به‌وسیله این روش می‌توان سطوح متحرک را نیز مورد تحلیل قرار داده و نمایه سه بعدی آن‌ها را به‌دست آورد [۱۳]. در روش جابه‌جایی فاز از چندین قاب برای تحلیل الگوها استفاده می‌شود. به همین دلیل از این روش برای تحلیل سطوح متحرک نمی‌توان استفاده کرد. اما با جابه‌جایی دیجیتالی فاز می‌توان این امکان را برای سطوح متحرک نیز فراهم نمود [۱۴].

۵. تبدیل فوریه

این روش برای اولین بار توسط فردی به نام میتسو تاکدا^{۱۲} در سال ۱۹۸۲ ارائه شد [۱۵]. شکل ۸ الگوریتم کلی این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۸. الگوریتم تحلیل الگو به روش تبدیل فوریه

تابع تراگسیل الگوها به‌وسیله رابطه ریاضی زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \quad (۱)$$

$$\cdot \cos[2\pi(f_{0x}x + f_{0y}y) + \phi(x, y)]$$

در این رابطه $f_{0x}x$ و $f_{0y}y$ فرکانس‌های حامل در راستای محور x و y هستند. $\phi(x, y)$ فاز تصویر است که در بردارنده اطلاعات مورد نیاز از سطح می‌باشد. $a(x, y)$ و $b(x, y)$ نیز به ترتیب روشنایی پس زمینه و نمایانی الگوها می‌باشند. برای استخراج فاز، ابتدا تابع \cos به‌صورت تابع نمایی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp[2\pi i(f_{0x}x + f_{0y}y)] + c^*(x, y) \exp[2\pi i(f_{0x}x + f_{0y}y)] \quad (۲)$$

که در آن:

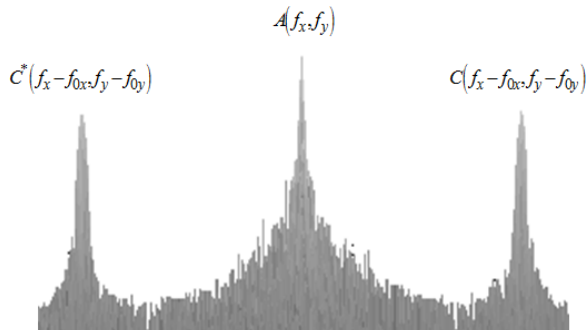
$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (۳)$$

$$c^*(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[-i\phi(x, y)]$$

با گرفتن تبدیل فوریه دوبعدی از رابطه ۲ داریم:

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + C^*(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) \quad (4)$$

حروف بزرگ نمایانگر تبدیل فوریه جمله متناظر در رابطه ۲ است. شکل ۹ تبدیل فوریه دوبعدی الگوهای باز را نشان می‌دهد.



شکل ۹. تبدیل فوریه دو بعدی الگوهای باز [۳۵]

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، طیف فرکانسی حاصل شامل سه بخش مجزا می‌باشد که این به دلیل وجود فرکانس‌های حامل است. بخش وسط مربوط به تغییرات زمینه یا مقدار DC فرکانس است. در صورتی که خطوط الگوها موازی محور x ها و یا محور y ها باشند، به ترتیب فرکانس‌های حامل f_{0x} و f_{0y} برابر با صفر خواهند بود. پیک مربوط به $C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y})$ حاوی اطلاعات مربوط به الگوهای تغییر شکل یافته که در واقع همان تغییرات سطح است، می‌باشد. برای دستیابی به این اطلاعات، نیاز است تا این پیک فرکانسی به وسیله یک فیلتر میان‌گذر جدا شده و مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت نیز برای استخراج اطلاعات مربوط به تغییرات سطح، باید فرکانس‌های حامل نیز حذف شوند. حذف فرکانس‌های حامل به دو صورت امکان‌پذیر است. حذف در حوزه فرکانس‌ها و حذف در حوزه مکان. در حوزه فرکانس، حذف فرکانس‌های حامل با انتقال پیک فرکانسی فیلتر شده به مرکز مستطیل فرکانسی صورت می‌پذیرد. با این انتقال عبارت:

$C(f_x, f_y)$ به $C(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y})$ تبدیل می‌شود. اما در حوزه زمان روند، متفاوت است. بدین صورت که ابتدا الگوها بر روی سطح مرجعی که جسم مورد نظر بر روی آن قرار گرفته است، نمونه‌برداری می‌شوند. سپس همزمان با پردازش تصویر الگوهای تاییده شده بر روی جسم و به دست آوردن فاز پیوسته آن، تصویر مربوط به الگوهای سطح مرجع نیز پردازش شده و فاز پیوسته آن نیز به دست می‌آید. با کم کردن فاز تصویر مرجع از فاز تصویر اصلی عمل حذف فرکانس‌های حامل در حوزه مکان انجام می‌شود [۵]. پس از دستیابی به $C(f_x, f_y)$ ، با عکس تبدیل فوریه گرفتن از آن عبارت $C(x, y)$ به دست می‌آید. فاز تصویر با یکی از دو روش زیر به دست می‌آید [۱۲] و [۱۳]:

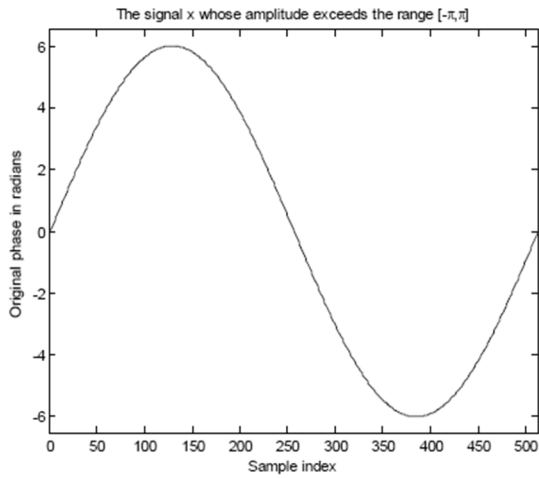
$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(c(x, y))}{\text{Re}(c(x, y))} \right) \quad (5)$$

$$\phi(x, y) = \text{Im}(\log(c(x, y))) \quad (6)$$

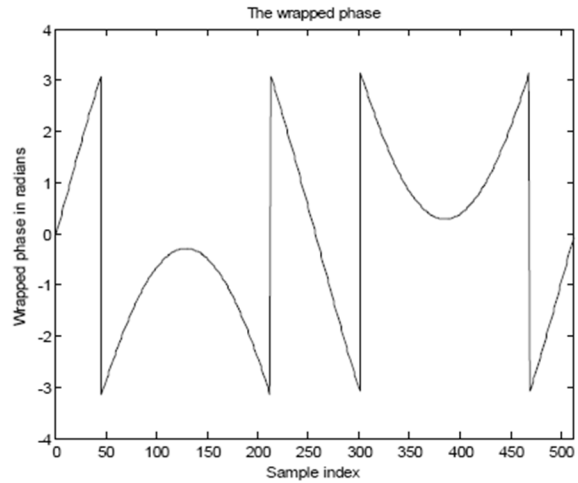
همان‌طور که در روابط ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، رابطه فاز به دلیل وجود عبارت \tan^{-1} دارای گسستگی است. به همین جهت فاز به دست آمده از روابط فوق، به فاز گسسته^{۱۳} معروف است. برای به دست آوردن ارتفاع، نیاز به وجود فاز پیوسته^{۱۴} می‌باشد. این فاز پیوسته از طریق رفع گسستگی فاز بدست آمده از روابط ۵ و ۶ به دست می‌آید. در سیگنال‌های یک بعدی پیوستگی فاز به صورت افزودن ضرایب صحیحی از 2π به فاز گسسته در نقاط ناپیوسته حاصل می‌شود.

$$\phi_{\text{unwrapped}}(x, y) = \phi_{\text{wrapped}}(x, y) + 2k\pi \quad (7)$$

$k=0, \pm 1, \pm 2$



(ب)

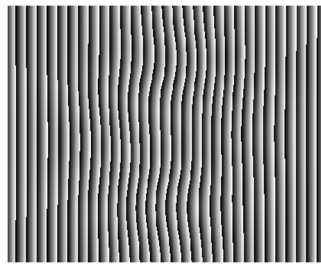


(الف)

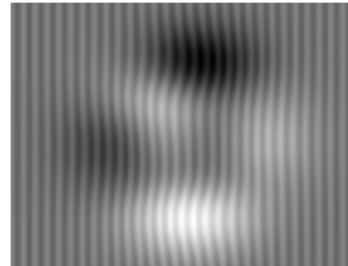
شکل ۱۰. (الف) فاز گسسته (ب) فاز پیوسته یا فاز واقعی [۱۴]

بعدی یا همان تصاویر، به‌طور کلی از الگوریتم‌های بازگشایی فاز استفاده می‌شود.

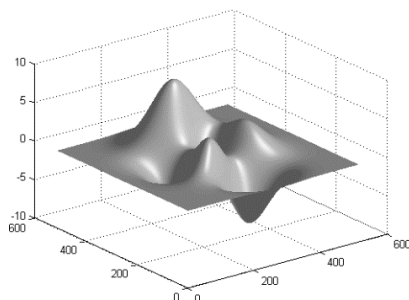
رابطه ۷ شکل کلی الگوریتم پیوسته‌سازی و شکل ۱۰ پیاده‌سازی این الگوریتم را برای یک سیگنال یک بعدی نشان می‌دهند. برای رفع گسستگی فاز در سیگنال‌های دو



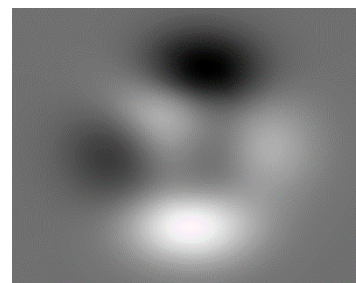
(ب)



(الف)



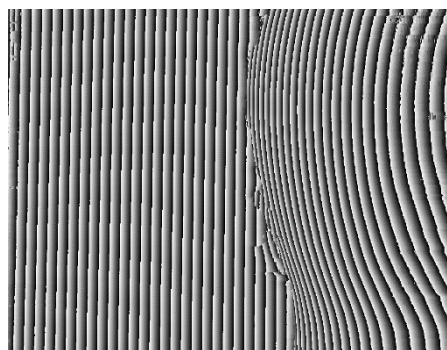
(د)



(ج)

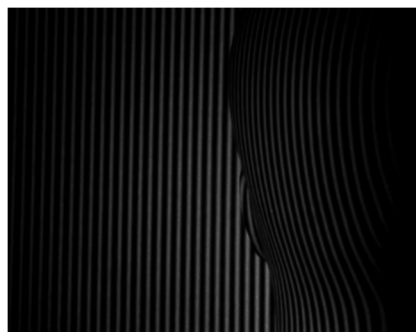
شکل ۱۱. پیاده‌سازی روش تبدیل فوریه (الف) خطوط منحرف شده بر روی تابع Peak (ب) فاز گسسته الگوهای تغییر شکل یافته (ج) فاز پیوسته حاصل از رفع گسستگی شکل ب (د) نمایش فاز پیوسته به‌صورت سه بعدی [۱۵]

روش تبدیل فوریه را جهت استخراج پروفایل سر یک مانکن نشان می‌دهد.

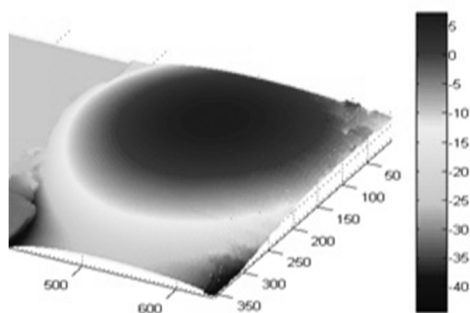


(ب)

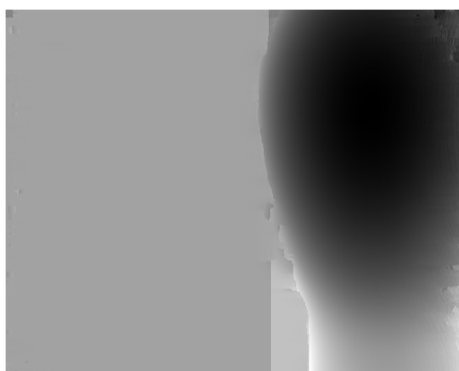
شکل ۱۱ نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش تبدیل فوریه را بر روی یک تصویر نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نیز پیاده‌سازی



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۲. پیاده‌سازی روش تبدیل فوریه (الف) خطوط منحرف شده بر روی سر یک مانکن (ب) فاز گسسته الگوهای تغییر شکل یافته (ج) فاز پیوسته حاصل از رفع گسستگی شکل ب (د) نمایش فاز پیوسته به صورت سه بعدی

بررسی پیکسل به پیکسل تصویر می‌باشد که به اسکن خط به خط معروف است [۲۰].

کار اصلی در عمل بازگشایی فاز گسسته دیفرانسیل گیری در طول یک مسیر از داده‌ها به صورت زیر است:

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n-1} \quad (۸)$$

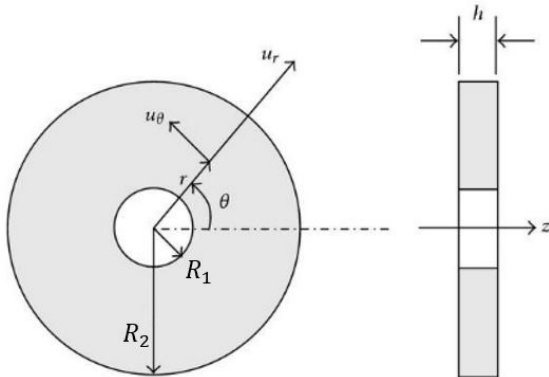
که در آن n شماره پیکسل است. هرگاه قدرمطلق این اختلاف از مقدار 2π تجاوز کند، این گسستگی با اضافه و یا کم کردن مقدار 2π به فاز جبران می‌شود.

اما در بسیاری از موارد وجود نویز در تصاویر اجتناب ناپذیر است. علاوه بر وجود نویز، پرش در تصویر، وجود حفره و یا پله در تصویر از عوامل دیگری هستند که باعث می‌شوند تا

۶. الگوریتم‌های بازگشایی فاز برای سیگنال‌های دوبعدی

فاز نهایی به دست آمده، فازی گسسته بین مقادیر π و $-\pi$ می‌باشد که این امر ناشی از وجود ترم \tan^{-1} در روابط استخراج فاز است. اصطلاح باز کردن فاز به معنی پیوسته سازی فاز در طول یک مسیر است تا ناپیوستگی‌های 2π را از بین ببرد. برای این منظور هرگاه فاز از مقدار π به صفر ببرد، به اندازه 2π به آن افزوده و هرگاه از صفر به π ببرد به اندازه 2π از آن می‌کاهد. در صورتی که تصویر عاری از هر گونه نویز و گسستگی باشد، ساده‌ترین راه برای گشایش فاز

داخلی ۴۰ میلی‌متر فرض شده است. شکل ۱۳ طرح شماتیک این دیسک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. شکل شماتیک دیسک توخالی

در ابتدا مسئله ارتعاشات آزاد خطی دیسک مذکور با ابعاد گفته شده حل می‌شود. معادله ارتعاشات عرضی خطی دیسک دایروی در مختصات قطبی به صورت زیر است [۲۵]:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \nabla^4 w + \rho \frac{h^3}{12} \left[\Omega^2 \nabla^2 w - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 w \right] + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

در اینجا h ضخامت کل صفحه بوده و شرایط مرزی برای مسئله مورد نظر عبارت است از:

در شعاع داخلی دیسک دو شرط مرزی به صورت زیر را داریم:

$$\begin{aligned} @ r = R_1 \quad & 1) \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \\ & 2) \quad w = w_0 e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (10)$$

با توجه به معادله ۱۰ ارتعاشات اجباری در شرط مرزی شماره ۲ مشهود است. بدین صورت که جابه‌جایی شعاع داخلی دیسک به صورت هارمونیک است که این حرکت هارمونیک توسط دستگاه تحریک کننده ایجاد می‌شود. سایر شرایط مرزی همانند ارتعاشات آزاد می‌باشد. در لبه خارجی دیسک نیز دو شرط مرزی دیگر مطابق رابطه ۱۱ خواهیم داشت [۲۵]، که معادله اول بیانگر خمش در لبه آزاد و معادله دوم

روش اسکن خط به خط به خوبی جواب ندهد [۲۴]. بنابراین وجود الگوریتم‌هایی برای بازگشایی فاز در دو بعد لازم و ضروری است. این الگوریتم‌ها به‌طور کلی به دو دسته الگوریتم‌های وابسته به مسیر و الگوریتم‌های مستقل از مسیر تقسیم بندی می‌شوند.

الگوریتم‌های بازگشایی وابسته به مسیر

یکی از راه‌های دست‌یابی به یک فاز پیوسته مطلوب این است که عمل بازگشایی فاز از یک پیکسل با کیفیت خوب آغاز شود. منظور از با کیفیت بودن پیکسل این است که پیکسل مورد نظر عاری از هرگونه نویز باشد. کیفیت پیکسل‌ها براساس معیارهای مختلفی تحت عنوان نقشه‌های کیفیت^{۱۵} تعیین می‌شوند. نقشه‌های کیفیت متفاوتی برای تشخیص پیکسل‌های با کیفیت وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بستگی به نوع مسئله کاربرد دارند [۲۱]، [۲۲].

الگوریتم‌های بازگشایی مستقل از مسیر

در این روش عمل بازگشایی فاز به صورت سراسری و مستقل از یک مسیر خاص می‌باشد. هدف اصلی در این الگوریتم، کمینه کردن مینیمم مربع فاصله بین گرادیان فاز تخمین زده شده و فاز واقعی است. یکی از این الگوریتم‌ها به نام روش مینیمم مربع بی وزن است [۲۳].

۷. حل تحلیلی مسئله ارتعاشات اجباری دیسک

نازک توخالی

آزمایشات انجام شده در این مقاله بر روی یک دیسک آلومینیومی به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر است. برای انجام آزمایش ارتعاشات اجباری، این دیسک از مرکز، به سیستم دوار موتور DC متصل می‌شود. در نتیجه در مرکز آن، در دایره‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر صلبیت بسیار زیادی به آن وارد می‌گردد. به همین دلیل، در حل معادلات ارتعاشات اجباری، دیسک مذکور یک دیسک توخالی به قطر

بیانگر برش در لبه آزاد است که هر دو برابر با صفر هستند.

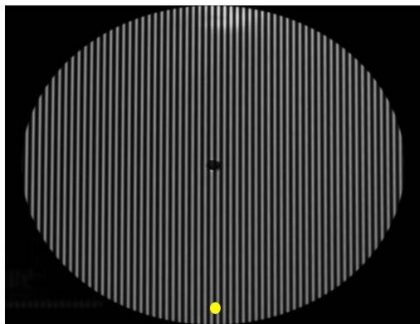
جواب معادله دیفرانسیل ۹ به صورت رابطه ۱۲ می باشد.

$$\text{@}r = R_2 \quad 3) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \left[\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right] = 0 \quad (11)$$

$$4) \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w + \frac{(1-v)}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right) + \frac{(1-v^2)\rho}{E} \left(\Omega^2 \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\partial^3 w}{\partial r \partial t^2} \right) = 0$$

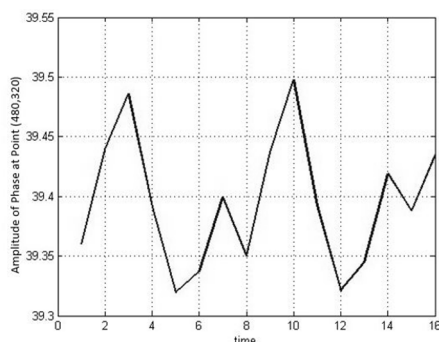
$$w(r, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n J_n(\alpha r) + B_n Y_n(\alpha r) + C_n I_n(\beta r) + D_n K_n(\beta r) \right] \times \left[E_n \cos(n\theta) + F_n \sin(n\theta) \right] \times e^{i\omega t} \quad (12)$$

شکل ۱۵ موقعیت یک نقطه از دیسک مذکور را حین چرخش و شکل تغییرات مقدار فاز تصویر در نقطه مذکور طی زمان را که با استفاده از روش رویه‌نگاری اپتیکی بدست آمده است، نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. موقعیت نقطه مورد مطالعه بر روی تصویر دیسک

چرخان

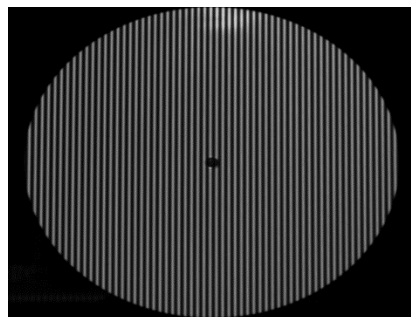


شکل ۱۶. نمودار مقدار فاز نقطه مشخص شده در شکل ۱۵ بر

حسب تعداد قاب

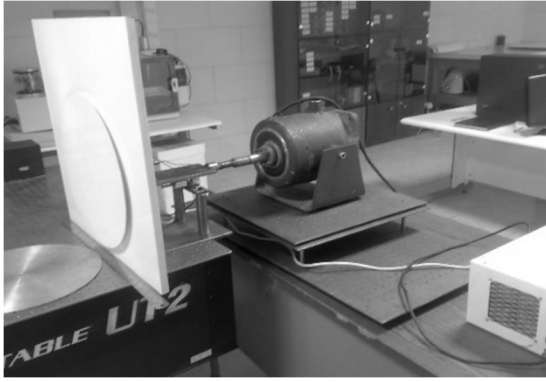
۸. شناسایی ارتعاشات با روش انحراف سنجی و تبدیل فوریه

منظور از شناسایی ارتعاشات در اینجا، به دست آوردن فرکانس ارتعاش و همچنین استخراج شکل پاسخ ارتعاشی یک سیستم به تحریک خارجی است. برای انجام این آزمایش یک دیسک فولادی ناهمگون انتخاب می‌شود. به طوری که این دیسک زمان چرخش، به طور ناهمگون چرخیده و دارای یک لنگی می‌باشد. روش انجام این آزمایش به این صورت است که الگوهای موازی بر روی دیسک ناهمگونی که توسط موتور DC با سرعت دورانی ۲ دور بر ثانیه به چرخش در می‌آید، تابیده می‌شود. در شکل ۱۴ الگوهای تابیده شده بر روی دیسک مذکور نشان داده شده است.

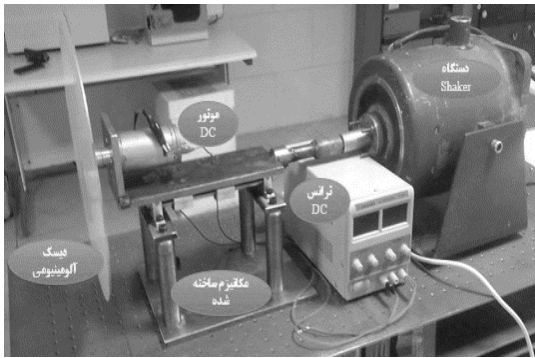


شکل ۱۴. الگوهای موازی تابیده شده بر روی دیسک ناهمگون

فولادی



(الف)



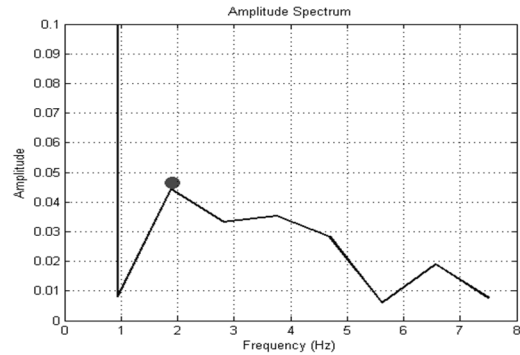
(ب)



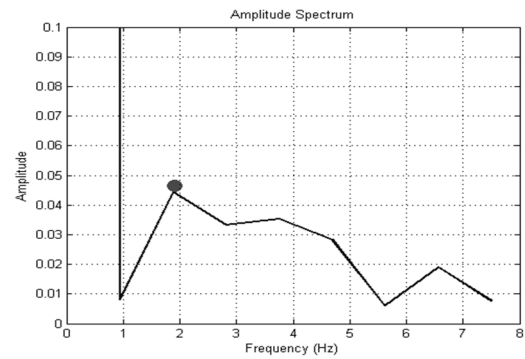
(ج)

شکل ۱۸. چیدمان آزمایش ارتعاشات دیسک چرخان

با توجه به نمودار شکل ۱۶ به وضوح روند متناوبی موقعت یک نقطه از دیسک مشهود است که دقت روش اپتیکی را در استخراج فرکانس ارتعاشات نشان می‌دهد.



شکل ۱۷ نیز تبدیل فوریه نمودار شکل ۱۶ را نشان می‌دهد که فرکانس ۲ هرتز در آن با تقریب بسیار خوبی نمایان است.



شکل ۱۷. تبدیل فوریه نمودار شکل ۱۶

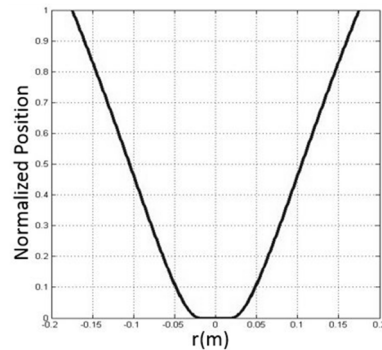
برای به دست آوردن شکل مود ارتعاش دیسک چرخان آزمایشی که ترتیب داده شده است بدین صورت است که دیسک آلومینیومی علاوه بر چرخش با سرعت Ω توسط موتور DC، توسط یک محرک کننده الکترومکانیکی به فرکانس ω از مرکزش تحت حرکت رفت و برگشتی قرار دارد. شکل ۱۸ المان‌ها و چیدمان آزمایش فوق را نشان می‌دهد.

فرکانس چرخش به میزان 1000 rpm و فرکانس تحریک به میزان 23 Hz است.

برای صحنه‌گذاری نتایج حاصل از آزمایش نیز حل تحلیلی پاسخ ارتعاشی دیسک چرخان تحت ارتعاشات اجباری هارمونیک به صورت شکل ۱۹ بدست می‌آید.



(ب)

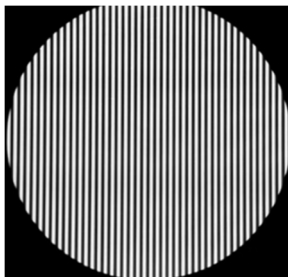


(الف)

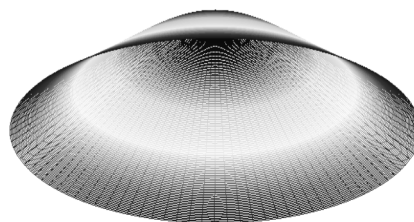
شکل ۱۹. (الف) شکل مود نرمال شده ارتعاشات دیسک چرخان تحت تحریک مرکزی (ب) پاسخ سامانه ارتعاشی دیسک چرخان به فرکانس تحریک ۲۳ هرتز

فرکانس تحریک و چرخش دیسک مطابق با روش تحلیلی، به ترتیب 1000 rpm و 23Hz است.

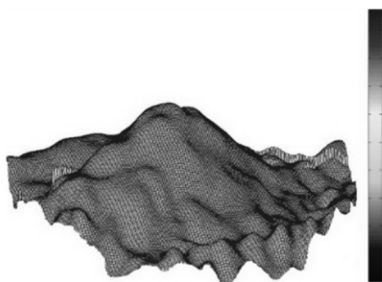
نتایج حاصل از آزمایش در مقایسه با نتایج تحلیلی برای پاسخ ارتعاشی دیسک چرخان در شکل ۲۰ ارائه شده است.



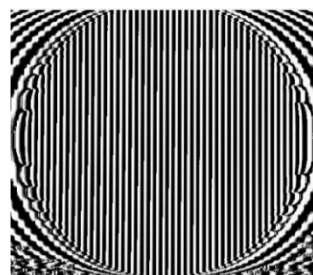
(ب)



(الف)

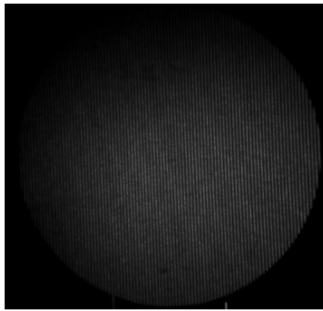


(د)



(ج)

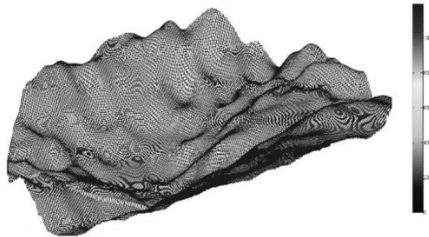
شکل ۲۰. نتایج حاصل از تحلیل ارتعاشات دیسک آلومینیومی با الگوهای تابانده شده با ویدئو پروژکتور (الف) شکل مود حاصل از حل تحلیلی (ب) الگوی تابیده شده به سطح (ج) فاز گسسته حاصل شده (د) شکل فاز پیوسته حاصل شده



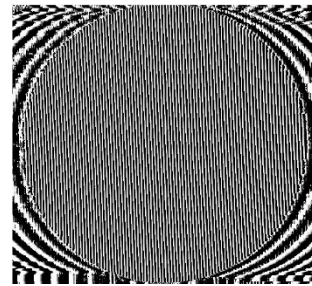
(ب)



(الف)



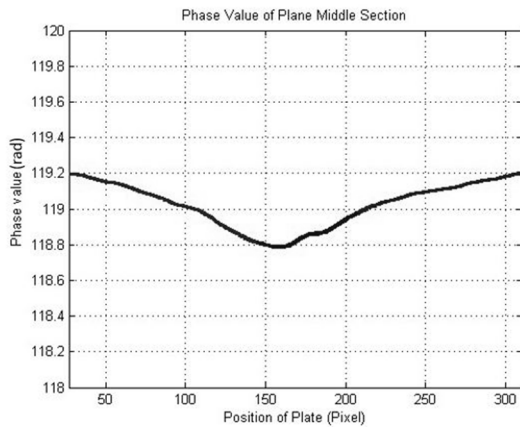
(د)



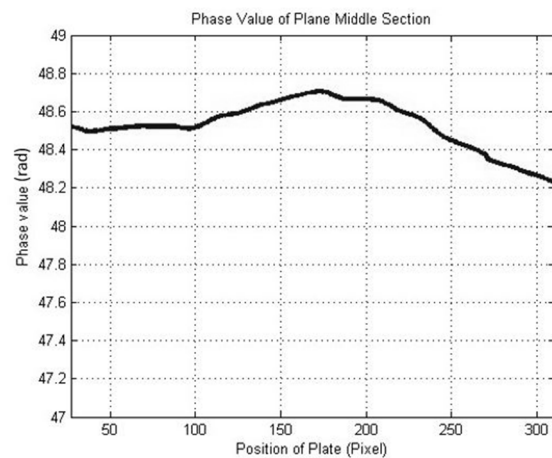
(ج)

شکل ۲۱. نتایج حاصل از تحلیل ارتعاشات دیسک آلومینیومی با الگوهای تابانده شده با لیزر (الف) شکل مود حاصل از حل تحلیلی (ب) الگوی تابیده شده به سطح (ج) فاز گسسته حاصل شده (د) شکل فاز پیوسته حاصل شده

نمای برش خورده نتایج حاصل از آزمایش نشان داده شده در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ نیز به ترتیب در شکل‌های شکل ۲۲ و شکل ۲۳ نشان داده شده است.



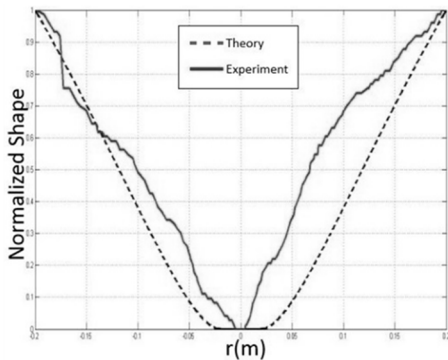
شکل ۲۳. نمای برش خورده از دیسک تغییر شکل یافته در اثر ارتعاشات متناظر با شکل ۲۱ (د)



شکل ۲۲. نمای برش خورده از دیسک تغییر شکل یافته در اثر ارتعاشات متناظر با شکل ۲۰ (د)

شکل‌های شکل ۲۲ و شکل ۲۳ حاصل از برش عرضی فاز پیوسته که به ترتیب در شکل‌های شکل ۲۰ (د) و شکل ۲۱ (د) نشان داده شده‌اند، در این آزمایش، از الگوریتم

همراه خطای RMS نشان داده شده‌اند. حصول خطای RMS در بهترین حالت و به میزان ۰/۱۹ موید آن است که روش اپتیکی توانایی استخراج تغییر شکل دیسک در اثر ارتعاشات را دارا می‌باشد.

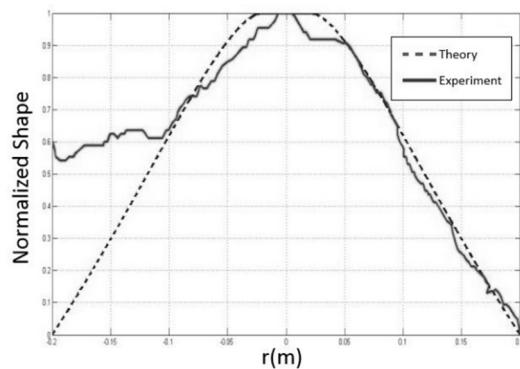


RMS=0.19

مستقل از مسیر، جهت بازگشایی فاز گسسته استفاده شده است.

۹. نتیجه‌گیری

برای مقایسه بهتر نتایج حاصل شده، در شکل ۲۴ نمودارهای اشکال شکل ۲۲ و شکل ۲۳ با نمودار حاصل از حل تحلیلی به



RMS=0.22

شکل ۲۴. نمودارهای نرمال شده حاصل از آزمایش در مقایسه با نمودار نرمال شده حاصل از حل تحلیلی به همراه خطای RMS مربوطه

- استفاده از سایر روش‌های اپتیکی همچون ماره سایه‌ای، ماره افکنشی، هولوگرافی دیجیتال و... که چیدمان آن‌ها بسیار پیچیده‌تر و طبیعتاً دقت-شان به مراتب از روش انحراف سنجی بیشتر است.
- انجام این آزمایشات بر روی سایر سازه‌های مکانیکی از جمله ورق‌های ساکن و...
- ارائه یک نرم‌افزار جامع و بهینه برای اندازه‌گیری ارتعاشات سازه‌ها با روش‌های اپتیکی.

۱۰. فعالیت‌های آتی

از جمله پیشنهادهایی که به عنوان ادامه این کار می‌توان مطرح کرد عبارتند از:

- مطالعه بر روی روابط بین فاز و ارتفاع در روش حاضر برای استخراج دقیق دامنه ارتعاشات. لازم به توضیح است که این روابط صرفاً روابط هندسی بسیار پیچیده‌ای هستند که مستلزم مطالعه پیرامون خصوصیات فیزیکی و هندسی لنزها و روابط مربوط به فواصل کانونی و بزرگ‌نمایی آن‌ها می‌باشد که در قالب یک کار جدید می‌توان به این امور پرداخت.

- [1] Tay, Cho Jui, et al. "Surface profile measurement of low-frequency vibrating objects using temporal analysis of fringe pattern." *Optics & Laser Technology*. vol.36, no.6, 2004, pp.471-476.
- [2] Mitchell, Andrew K. "Optical modal analysis using white-light projected fringes." *Experimental mechanics* vol.45, no.3, 2005 pp.250-258.
- [3] Yılmaz, S. Tunç, et al. "Vibration amplitude analysis with a single frame using a structured light pattern of a four-core optical fibre." *Optics communications*. vol.249, no.4, 2005, pp.515-522.
- [4] Rodriguez-Vera, R., Meneses-Fabian, C., Rayas, J. A., Mendoza-Santoyo, F., del Bosque, L., & del Campestre, C. L. "Measuring 3D shape vibration mode by fringe projection and Fourier transform method", 2007.
- [5] Fu, Yu. "Low-frequency vibration measurement by temporal analysis of projected fringe patterns." *Optics and Lasers in Engineering* vol.48, no.2, 2010, pp.226-234.
- [6] Su, Xianyu, and Qican Zhang. "Dynamic 3-D shape measurement method: a review." *Optics and Lasers in Engineering*. vol.48, no.2, 2010, pp.191-204.
- [7] Zhang, Song. "Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques." *Optics and lasers in engineering*. vol.48, no.2, 2010, pp.149-158.
- [8] Mohammadi, Fatemeh, Khosro Madanipour, and Amir H. Rezaie. "Three dimensional surface topography based on digital fringe projection." *Optical Metrology in Videometrics, Range Imaging, and Applications section of SPIE8085*, 2011, p.80850W-1.
- [۹] محمدی، فاطمه، بازسازی و بهبود نمایه سه بعدی سطح با استفاده از تکنیک ماره، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۱۳۸۹
- [10] Robinson, David W. "Interferogram Analysis", 1st ed, IOP publishing, 1993.
- [11] Abid, Abdulbasit Zaid Ahmed. "Fringe pattern analysis using wavelet transforms." *John Moores University, Liverpool*, 2008.
- [۱۲] خداپرست، محسن، کمی‌سازی و اندازه‌گیری زبری سطح درز سنگی با استفاده از روش پردازش تصویر، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰
- [13] Su, Xianyu, and Qican Zhang. "Dynamic 3-D shape measurement method: a review." *Optics and Lasers in Engineering*. vol.48, no.2, 2010, pp.191-204.
- [14] Degrieck, Joris, Wim Van Paepegem, and Pierre Boone. "Application of digital phase-shift shadow moiré to micro deformation measurements of curved surfaces." *Optics and Lasers in Engineering*, vol.36, no.1, 2001, pp.29-40.
- [15] Takeda, Mitsuo, Hideki Ina, and Seiji Kobayashi. "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry." *JosA* 72, no.1, 1982, pp.156-160.
- [16] Wei, Yao, Dapeng Yan, and Soyoung Stephen Cha. "Comparison of results of interferometric phase extraction algorithms for three-dimensional flow-field tomography." *Optics and lasers in engineering*. vol.32, no.2, 1999, pp.147-155.
- [17] Su, Xianyu, and Wenjing Chen. "Fourier transform profilometry:: a review." *Optics and lasers in Engineering*, vol.35, no.5, 2001, pp.263-284.
- [18] Gdeisat, Munther, and Francis Lilley. "One-dimensional phase unwrapping problem." *signal* 4, 2012, p.6.
- [19] Guo, Hong. *Three-dimensional shape measurement based on Fourier transform and phase shifting method*. Diss. State University of New York at Stony Brook, 2009.
- [20] M. Gdeisat, F. Lilley; "Two-Dimensional Phase Unwrapping Problem"
- [21] Lo, Chi Fung, Xiang Peng, and Lilong Cai. "Surface normal guided method for two-dimensional phase unwrapping." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vo.113, no.9, 2002 pp.439-447.
- [22] Su, Xianyu, and Wenjing Chen. "Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review." *Optics and Lasers in Engineering*, vol.42, no.3, 2004, pp.245-261.
- [23] Ghiglia, Dennis C., and Louis A. Romero. "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods." *JOSA A*, vol.11, no.1, 1994, pp.107-117.

- [24] Loffeld, Otmar, et al. "Phase unwrapping for SAR interferometry—A data fusion approach by Kalman filtering." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.46, no.1, 2008, pp.47-58.
- [25] Baddour, Natalie. "A modelling and vibration analysis of spinning disks". *PhD Dissertation, Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto*, 2001.

پی نوشت

1. Profilometry
2. Deflectometry
3. Tay
4. Mitchell
5. Yilmaz
6. Rodriguez
7. Fu
8. Su & Zhang
9. Line Projection
10. Pattern
12. Phase Shift
13. Mitsu Takeda
14. Wrapped Phase
15. Unwrapped Phase
16. Quality Map