

بررسی تجربی اثر حوضچه‌ی هوایی عمق متغیر بر ارتعاشات اسپیندل هوایی در ماشین‌کاری نانومتریک

محمد آخوندزاده* (ه‌ری)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

مهرداد وحدتی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲ - ۳، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۳۸، (پادداشت نشی)

ارتعاشات پایین اسپیندل هوایی برای رسیدن به دقت‌های در حدود نانومتر در ماشین‌کاری فوق‌دقیق بسیار مهم است. سرعت دورانی، نحوه‌ی تغذیه‌ی هوای فشرده، پارامترهای حوضچه‌ی هوایی و... از جمله پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات اسپیندل هستند. در این تحقیق پارامترهای عمق حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. عمق حوضچه‌ی هوایی در این تحقیق به صورت متغیر در نظر گرفته شد. برای کف حوضچه‌ی هوایی شش حالت انتخاب شده است: تخت، مخروطی، هرمی، کروی با دو شعاع متفاوت، و عمق ثابت؛ برای سرعت دورانی نیز سه حالت در نظر گرفته شده است. در مجموع، تعداد ۱۸ آزمایش انجام گرفت. برای بررسی ارتعاشات از دستگاه ۶۰ VibroTest استفاده شده و در پایان نتایج آزمایشات با استفاده از DOE تحلیل شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حوضچه‌ی کف هرمی در سرعت دورانی پایین ارتعاشات کم‌تری ارائه می‌دهند.

واژگان کلیدی: ماشین‌کاری فوق‌دقیق، اسپیندل هوایی، نانوماشین‌کاری، حوضچه‌ی هوایی، ارتعاشات.

m_akhondzadeh@iauhvaz.ac.ir
vahdati@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

افزایش تقاضا برای ساخت دقیق قطعات رایانه‌ی، الکترونیکی، انرژی هسته‌ی^۱ و کاربردهای دفاعی منجر به پیدایش فرایندهای ماشین‌کاری فوق‌دقیق (UPM)^۲ شده است. آینه‌های نوری^۳، دیسک‌های حافظه‌ی کامپیوتری و غلتک‌های مربوط به ماشین‌های فتوکپی، با سطح پرداخت در حدود نانومتر و دقت شکل در حدود میکرون یا زیرمیکرون، نمونه‌هایی از این قطعات‌اند. مهم‌ترین مشخصات ماشین‌های فوق‌دقیق عبارت‌اند از: ساختمان ماشین‌ابزار با سختی بالا، فرکانس طبیعی بالا و خصوصیات میرایی (استهلاک) خوب، پایداری حرارتی و مکانیکی بالا. ارتعاشات پایین، محورهای حرکتی بسیار دقیق و کنترل با دقت بالا.

ماشین‌های فوق‌دقیق قسمت‌های حرکتی مهمی دارند: کشویی‌ها، اسپیندل هوایی، و سیستم محرکه. اسپیندل یک عضو کلیدی ماشین‌ابزار فوق‌دقیق است، زیرا خطای حرکتی اسپیندل اثر مهمی بر کیفیت سطح و دقت قطعات ماشین‌کاری شده دارد. اکثر اسپیندل‌های استفاده شده در ماشین‌های ابزار فوق‌دقیق از نوع آنروستاتیک و هیدروستاتیک هستند، که هر دو دارای دقت حرکتی بالا و قابلیت سرعت چرخشی بالا هستند. سختی اسپیندل آنروستاتیک پایین‌تر از اسپیندل هیدروستاتیک با روغن است، اما تغییر شکل حرارتی آن کم‌تر است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۶.

وجود لایه‌ی هوا^۴ در اسپیندل هوایی موجب فوایدی نظیر اصطکاک کم، تعریف دقیق محورها و فقدان سایش است. این لایه‌ی هوا مانع از تماس دو فلز با یکدیگر و در نتیجه سبب کاهش اصطکاک و حرارت و نیز کاهش انتقال ارتعاش دستگاه به سطح قطعه‌کار می‌شود. هوا قبل از ورود به این فاصله، ابتدا وارد یک حوضچه می‌شود و سبب کاهش اثراتی همچون چکش هوایی^۵ می‌شود.

ارتعاشات پایین اسپیندل هوایی برای رسیدن به دقت‌های در حدود نانومتر بسیار مهم است. از پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات اسپیندل می‌توان به سرعت دورانی، نحوه‌ی تغذیه‌ی هوای فشرده -- شامل قطر سوراخ تغذیه، عوامل حوضچه‌ی هوایی، فشار هوای موجود در فاصله بین روتور و استاتور -- و... اشاره کرد.

در این تحقیق اثر پارامترهای عمق حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی بر ارتعاشات اسپیندل هوایی بررسی شده است. در تحقیقات قبلی عمق حوضچه‌ی هوایی در سراسر آن یکسان بود. اما در تحقیق حاضر برای بهبود وضعیت ارتعاشات اسپیندل هوایی، عمق حوضچه‌ی هوایی به صورت متغیر در نظر گرفته شده و اثر آن بر ارتعاشات اسپیندل هوایی بررسی شده است.

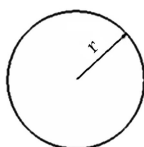
۲. پیشینه‌ی تحقیق

در سال ۱۹۸۵ اثر تغییرات عمق حوضچه‌ی هوایی بر سختی، ظرفیت بار و آهنگ

جدول ۱. سطوح انتخابی برای پارامترهای مورد تحقیق.

سطح	(A)	(B)
	حالت کف حوضچه	سرعت دورانی (rpm)
۱	تخت	۱۸۰۰
۲	مخروطی	۲۵۵۶
۳	هرمی	۳۶۰۰
۴	کروی (شعاع = ۲۵mm)	
۵	کروی (شعاع = ۵۰mm)	
۶	عمق ثابت	

جدول ۲. ابعاد انتخابی برای حوضچه‌های عمق متغیر.

ابعاد حوضچه هوایی (mm)	شکل حوضچه هوایی
$r_1 = 113$	

در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ سطوح انتخابی برای پارامترهای فوق ارائه شده است. تعداد آزمایشات انجام شده مجموعاً برابر ۱۸ آزمایش است.

به منظور انجام این تحقیق، برای پارامتر شکل حوضچه‌ی هوایی، شکل دایره انتخاب می‌شود. همچنین عمق تمامی حوضچه‌ها در مرکزشان، یعنی محل ورود هوا به حوضچه، برابر ۶ میلی‌متر است. برای پارامتر اندازه حوضچه‌ی هوایی از مساحت آن استفاده شده است. ابعاد حوضچه‌ی هوایی مورد نظر که دایره است، در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین تعداد ۳ حوضچه‌ی هوایی در نظر گرفته شده، که در پیرامون استاتور در فواصل زاویه‌ی برابر قرار گرفته‌اند.

در شکل ۱ سطح برش‌خورده‌ی حوضچه‌های عمق متغیر نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در شکل‌های الف تا د عمق حوضچه نسبت به سطح بیرونی استاتور نسبت به مرکز حوضچه متغیر است. همچنین در شکل ه- عمق حوضچه در تمام سطح حوضچه ثابت است.

برای سهولت در ساخت قطعات و اجرای ساده‌ی اندازه‌گیری‌ها، روتور به صورت خارجی -- طوری که روتور حول استاتور بچرخد -- در نظر گرفته شده است. جنس استاتور و روتور از فولاد ضدزنگ انتخاب شده است. اختلاف قطر داخلی روتور و قطر خارجی استاتور ۵۰ میکرون است؛ به عبارتی ضخامت لایه‌ی هوا برابر ۲۵ میکرون انتخاب شده است.

برای انجام آزمایشات و تأمین حرکت دورانی اسپیندل، دستگاه تراش انتخاب شده است. بنابراین برای رسیدن به سرعت‌های مورد نظر نسبت قطر پولی محرک به قطر روتور، برابر ۳/۶ در نظر گرفته شده است.

برای انتقال حرکت دورانی پولی محرک به روتور، و کمینه‌سازی تأثیر عدم توازی محورهای پولی محرک و روتور بر تعادل روتور، اورینگ انتخاب شده است. همچنین مقدار فشار هوا برابر ۱/۵ bar، و قطر روزه‌های تغذیه‌ی هوا به درون حوضچه‌ها برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

برای نگه داشتن مجموعه‌ی اسپیندل هوایی و انجام آزمایشات، یک پایه‌ی نگه‌دارنده طراحی شده که روی سوپرت عرضی دستگاه تراش نصب می‌شود.

جریان باتاقان هوایی بررسی شد.^[۱] در مطالعه‌ی مذکور باتاقان مورد آزمایش دارای حوضچه‌هایی به شکل X و از جنس برنج بود. در سال ۲۰۰۰ تحقیقی در مورد طراحی باتاقان‌های آنروستاتیک برای کاربرد سیستم‌های ماشین ابزار با دقت نانومتر ارائه شد.^[۲] سپس در سال ۲۰۰۲ رفتار استاتیکی و پایداری دینامیکی باتاقان‌های طولی آنروستاتیک مستطیلی شیاردار مورد تحلیل قرار گرفت.^[۳] سطح این باتاقان دارای شیارهایی به شکل X بود و محققین با حل معادلات تعادل جریان برای شیارها، رفتار استاتیکی باتاقان را تحلیل کردند. آنان با ساخت و آزمایش باتاقان به نتایجی در زمینه‌ی مقایسه‌ی توزیع فشار در باتاقان شیاردار و بدون شیار، بررسی اثر عرض‌ها و عمق‌های مختلف شیار بر ظرفیت بار، سختی و آهنگ جریان گاز در باتاقان دست یافتند. در تحقیقی دیگر^[۴] یک باتاقان طولی آنروستاتیک قوسی با چهار شیار محوری و چهار شیار محیطی به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۰۲ یک سیستم باتاقان هوایی آنروستاتیک با چندین میکروسوراخ ارائه شد^[۵] که طی آن به جای استفاده از مواد متخلخل از چندین میکروسوراخ استفاده شده بود. محققین این باتاقان را هم با شبیه‌سازی و هم به صورت عملی مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۳ یک روش ارزیابی دقت شعاعی اسپیندل هوایی هیدرواستاتیک با در نظر گرفتن حرکت شعاعی مرکز چرخش ارائه شد.^[۶] در سال ۲۰۰۴ پایداری سیستم اسپیندل با باتاقان‌های گرد گازی با محدودکننده‌های شیاری غیریکنواخت مورد تحلیل و آزمون قرار گرفت^[۷] و با محدودکننده‌ی با شیار یکنواخت مقایسه شد. در سال ۲۰۰۹ تحقیقی در مورد اصلاح و بهینه‌سازی ابعاد شیارهای باتاقان‌های گرد با شیارهای جناقی ارائه شد^[۸] که به طراحی اسپیندل‌های دقیق با مشخصات خروج از مرکزیت بهبود یافته کمک می‌کرد.

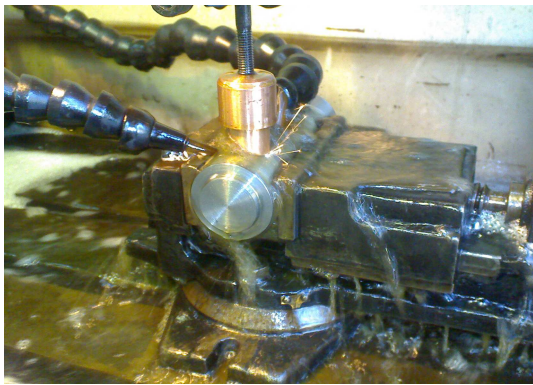
در سال ۲۰۰۹ تأثیر حوضچه‌های هوایی بر پایداری سیستم روتور - باتاقان آنروستاتیک بررسی شد.^[۹] در مطالعه‌ی مذکور تأثیرات تعداد سوراخ‌های تغذیه و مکان آنها بر پایداری یک اسپیندل آنروستاتیک، با استفاده از معادله‌ی بی‌بعد رینولدز حاصل از ناوی - استوکس و معادلات پیوستگی بررسی شد. در سال ۲۰۱۰ یک کشویی خطی آنروستاتیک با متعادل‌کننده فزری گرد برای ماشین دریل PCB ارائه شد.^[۱۰] بدان منظور یک باتاقان گازی دایروی محدودکننده‌ی مرکب، که سه شیار کم عمق مستقیم و قوسی روی آن ماشین‌کاری شده بود، با استفاده از معادلات تعادل جریان تحلیل، و رفتار باتاقان‌های هوایی طولی دایروی شیاردار تشریح شد. همچنین با ساخت این دستگاه آزمایشاتی روی آن انجام شد.

نگارندگان در سال ۲۰۱۳ اثر تعداد و اندازه‌ی حوضچه‌های هوایی بر ارتعاشات اسپیندل هوایی مورد بررسی قرار دادند.^[۱۱] در همین سال، در تحقیقی دیگر اثر پارامترهای شکل و عمق حوضچه‌ی هوایی مورد مطالعه قرار داده^[۱۲] و دریافتند که اسپیندل‌های هوایی با حوضچه‌های هوایی مستطیلی و دایروی کم‌ترین ارتعاشات را دارند.

۳. روش تحقیق

۳.۱. طراحی

به منظور بررسی ارتعاشات اسپیندل هوایی دو پارامتر عمق حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل هوایی انتخاب شده است. در بررسی اثر عمق حوضچه‌ی هوایی بر ارتعاشات اسپیندل هوایی، حوضچه‌هایی با عمق متغیر^۶ انتخاب شده‌اند؛ برای شکل کف این حوضچه‌ها ۵ حالت در نظر گرفته شده است: تخت^۷، مخروطی^۸، هرمی^۹ و کروی^{۱۰} با دو شعاع مختلف. برای پارامتر سرعت دورانی نیز سه سطح یا حالت



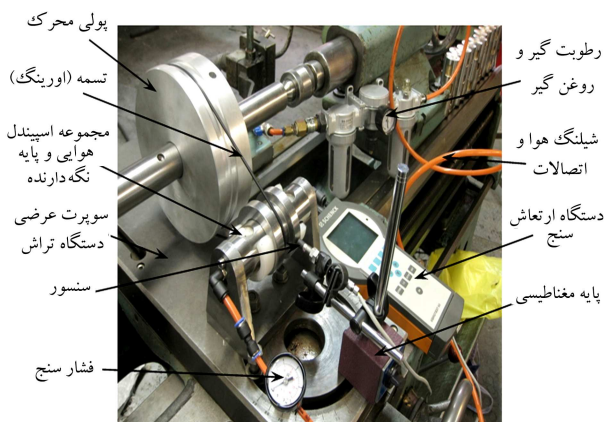
شکل ۲. فرایند ماشین‌کاری حوضچه‌های هوایی با EDM.



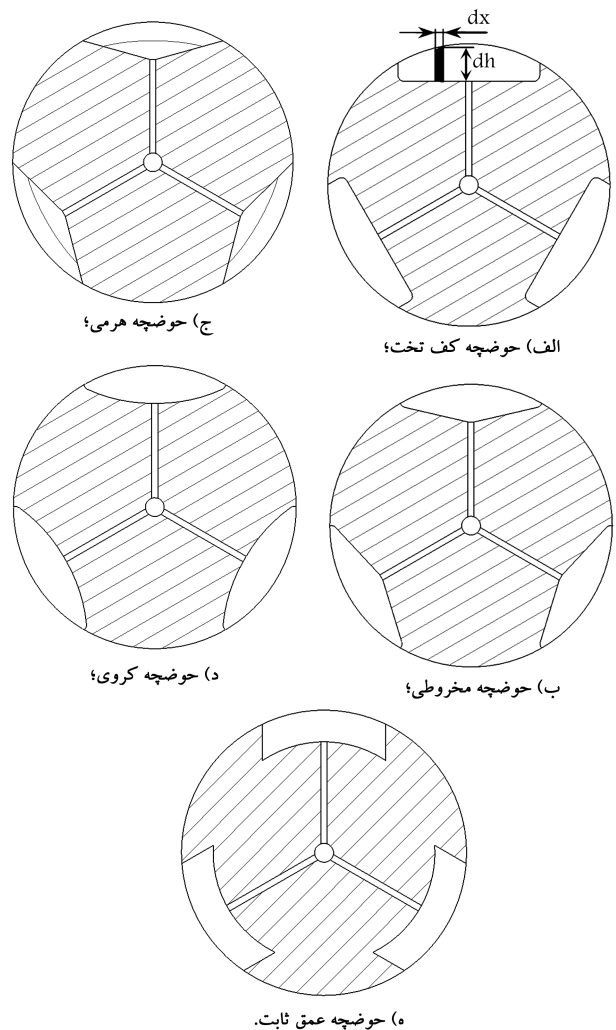
شکل ۳. مجموعه‌ای استاتورهای ساخته شده.



شکل ۴. روتور پس از تکمیل مراحل ساخت.



شکل ۵. تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات.



شکل ۱. سطح برش خورده حوضچه‌های عمق متغیر و عمق ثابت.

۲.۳ ساخت

قطعات طراحی شده با استفاده از عملیات مختلف تولیدی ساخته شده‌اند. از جمله این عملیات می‌توان به کف‌تراشی، روتراشی و سوراخ‌کاری استاتورهای فولادی، ماشین‌کاری حوضچه‌های هوایی با ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی (EDM) (۱)، سوراخ‌کاری روزنه‌های تغذیه‌ی ۱ میلی‌متری با فرایند سوپر دریل (نوعی فرایند تخلیه‌ی الکتریکی)، قلاویرکاری محل اتصال استاتور به پایه‌ی نگه‌دارنده، سنگ‌زنی سطح خارجی استاتورها و سطح داخلی روتور با دستگاه سنگ محور و پرداخت آنها با سنباده‌ی بسیار نرم اشاره کرد. در شکل ۲ فرایند ماشین‌کاری حوضچه‌ها با استفاده از تخلیه‌ی الکتریکی، در شکل ۳ استاتورهای ساخته‌شده، و در شکل ۴ روتور پس از تکمیل مراحل ساخت نشان داده شده است.

۳.۳ تجهیزات آزمایش

در شکل ۵ تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات نشان داده شده است. این تجهیزات عبارت‌اند از:

-- اسپیندل هوایی و پایه‌ی نگه‌دارنده آن که قبلاً ساخته شده‌اند؛

جدول ۳. مقادیر جابه‌جایی اندازه‌گیری شده با دستگاه ارتعاش‌سنج.

مقدار جابه‌جایی (μm)	پارامترها		شماره آزمایش
	(B) سرعت دورانی	(A) حالت کف حوضچه	
۱۲,۸۳۴	۱	۱	۱
۱۳,۰۲۵	۲	۱	۲
۱۲,۶۴۹	۳	۱	۳
۱۰,۶۳۴	۱	۲	۴
۱۰,۶۸۱	۲	۲	۵
۱۱,۴۵۴	۳	۲	۶
۹,۵۷۵	۱	۳	۷
۱۰,۹۱۲	۲	۳	۸
۱۰,۴۶۵	۳	۳	۹
۱۰,۳۴۷	۱	۴	۱۰
۱۲,۳۵۷	۲	۴	۱۱
۱۳,۴۱۷	۳	۴	۱۲
۱۰,۷۱۹	۱	۵	۱۳
۱۱,۳۱۵	۲	۵	۱۴
۱۳,۲۶۷	۳	۵	۱۵
۱۴,۸۲۳	۱	۶	۱۶
۱۷,۸۷۱	۲	۶	۱۷
۱۷,۵۶۱	۳	۶	۱۸

جدول ۴. آنالیز واریانس (ANOVA) نتایج آزمایشات.

P-Value	F _۰	مجدور میانگین	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
۰,۰۰۰	۲۳,۲۷	۱۵,۷۰۰	۵	۷۸,۵۰۱	A
۰,۰۱۶	۶,۴۶	۴,۳۵۹	۲	۸,۷۱۸	B
		۰,۶۷۵	۱۰	۶,۷۴۶	Error
			۱۷	۹۳,۹۶۵	Total

براساس نتیجه‌ی حاصل از تحلیل واریانس، تمامی پارامترهای مورد تحقیق بر مقدار ارتعاش اسپیندل هوایی مؤثرند (جدول ۴). به‌منظور یافتن سطوحی از این پارامترها که در آن مقدار ارتعاش کم‌تر است، نمودارهای اثر اصلی و تعامل اثر پارامترهای مورد تحقیق به‌وسیله‌ی نرم‌افزار MiniTab رسم شده است. در شکل ۷ نمودار توزیع نرمال مانده‌ها برای نتایج آزمایشات نشان داده شده است. در شکل ۸ و ۹ به‌ترتیب اثر پارامترهای حالت کف حوضچه و سرعت دورانی روتور بر ارتعاشات اسپیندل هوایی نشان داده شده است.

چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر جابه‌جایی حاصل از آزمایشات از توزیع نرمال برخوردار است. پس از مطالعه‌ی نمودار اثر حالت کف حوضچه‌ی هوایی بر ارتعاشات اسپیندل هوایی می‌توان دریافت که کم‌ترین مقدار ارتعاش در



شکل ۶. تنظیمات محیط اندازه‌گیری مقدار ارتعاش در دستگاه ارتعاش‌سنج ۶۰ VibroTest.

-- دستگاه تراش برای انجام آزمایشات روی سوپرت عرضی آن (سوپرت بالایی آن باز شده و به جای آن پایه‌ی نگه‌دارنده نصب شده است)؛

-- پولی انتقال دور برای انتقال حرکت دورانی سه نظام دستگاه تراش به روتور؛

-- رطوبت‌گیر و روغن‌گیر برای گرفتن و جذب آب و سایر مایعات معلق در هوای فشرده ناشی از کار کردن کمپرسور و جلوگیری از ورود آنها به لقی هوا؛

-- فشارسنج برای اطمینان از مقدار فشار هوای ورودی به استاتور؛

-- شیلنگ هوا برای انتقال هوای فشرده از رطوبت‌گیر به فشارسنج و استاتور؛

-- تسمه برای انتقال حرکت دورانی پولی محرک به روتور؛

-- کمپرسور هوا برای تأمین هوای فشرده برای آزمایشات؛

-- مجموعه‌ی اندازه‌گیری ارتعاش متشکل از دستگاه ۶۰ VibroTest برای اندازه‌گیری و ثبت مقادیر ارتعاش، حساسه‌ی (سنسور) جابه‌جایی‌سنج IN-۰۸۵ برای اندازه‌گیری ارتعاش، پایه‌ی مغناطیس برای نگه‌داشتن حساسه و پرکننده‌ی ۱/۵ میلی‌متری برای تنظیم موقعیت حساسه نسبت به سطح روتور.

تنظیماتی که برای اندازه‌گیری با دستگاه ارتعاش‌سنج باید انجام داد عبارت‌اند از:

• نوع حساسه: IN-۰۸۵؛

• دامنه‌ی اندازه‌گیری: peak (p)؛

• واحد اندازه‌گیری: میکرون (μm)؛

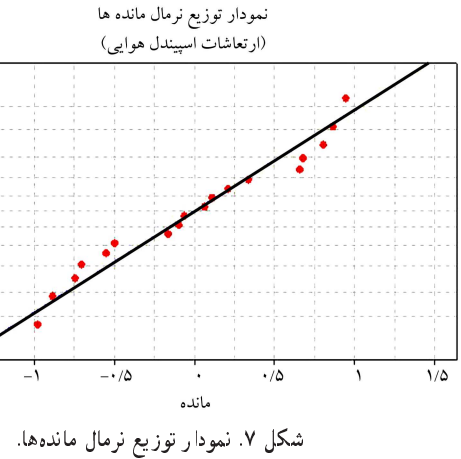
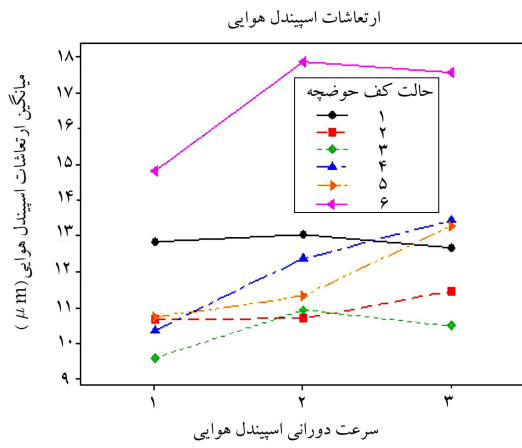
• فرکانس‌های حد بالا و حد پایین ۱۰-۱۰۰۰ Hz.

در شکل ۶ تنظیمات لازم برای دستگاه ارتعاش‌سنج ۶۰ VibroTest نشان داده شده است.

سرعت‌هایی که باید به‌منظور دست‌یابی به سرعت‌های دورانی ۱۸۰۰ rpm، ۲۵۵۶ و ۳۶۰۰ روی دستگاه تراش تنظیم کرد عبارت‌اند از: ۷۱۰، ۵۰۰ rpm و ۱۰۰۰.

۴. نتایج

در جدول ۳ مقادیر جابه‌جایی اندازه‌گیری شده با دستگاه ارتعاش‌سنج نشان داده شده است.

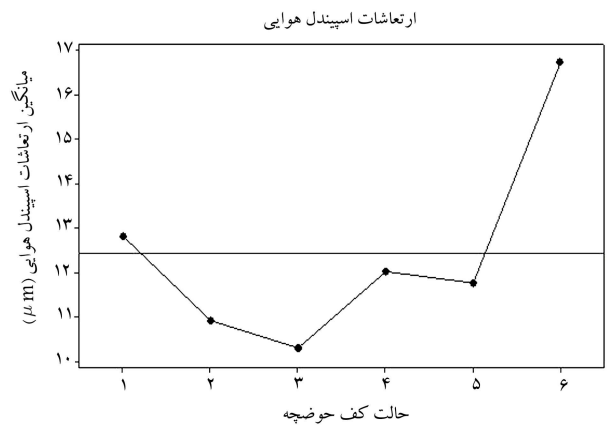


شکل ۷. نمودار توزیع نرمال مانده‌ها.

شکل ۱۰. نمودار تعامل اثر پارامترهای حالت کف حوضچه و سرعت دورانی روتور بر ارتعاشات اسپیندل هوایی.

اسپیندل با حوضچه‌های هوایی کف هرمی مشاهده می‌شود. همچنین حوضچه‌های عمق ثابت بیشترین ارتعاش را دارند. نمودار اثر سرعت دورانی اسپیندل هوایی بر ارتعاشات اسپیندل نشان می‌دهد که در سرعت دورانی پایین‌تر، ارتعاشات کم‌تری رخ داده و با افزایش سرعت دورانی روتور بر ارتعاشات اسپیندل هوایی نیز افزوده می‌شود. در شکل ۱۰ نمودار تعامل اثر پارامترهای حالت کف حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل بر ارتعاشات اسپیندل هوایی نشان داده شده است.

براساس نمودار تعامل اثر پارامترهای حالت کف حوضچه‌ی هوایی و سرعت دورانی اسپیندل، کم‌ترین ارتعاشات در اسپیندل با حوضچه‌های کف هرمی در سرعت ۱۸۰۰ rpm مشاهده می‌شوند.

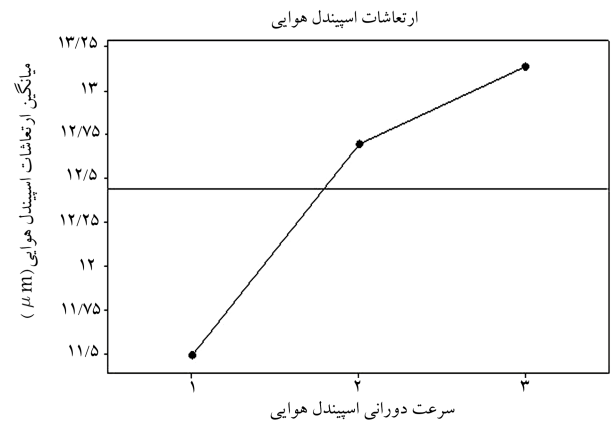


شکل ۸. نمودار اثر حالت کف حوضچه بر ارتعاشات اسپیندل هوایی.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصله و نمودارهای رسم شده، مقدار ارتعاشات اسپیندل هوایی در حوضچه‌های با عمق متغیر کم‌تر از حوضچه‌های با عمق ثابت است. دلیل این کاهش ارتعاشات را می‌توان در کاهش تدریجی عمق حوضچه‌ی هوایی، از محل روزنه‌ی ورودی هوا به سمت لبه‌های حوضچه‌ی هوایی دانست.

براساس نمودارهای اثر اصلی و تعامل اثر پارامترهای مورد بررسی این تحقیق بر ارتعاشات اسپیندل هوایی، اسپیندل با حوضچه‌های کف هرمی در سرعت دورانی پایین از ارتعاشات کم‌تری برخوردارند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اسپیندل هوایی با حوضچه‌های عمق ثابت در سرعت‌های دورانی بالاتر بیشترین ارتعاشات اسپیندل هوایی را دارند.



شکل ۹. نمودار اثر سرعت دورانی روتور بر ارتعاشات اسپیندل هوایی.

پانویس‌ها

1. nuclear energy
2. ultra precision machining (UPM)

3. optical mirrors
4. air gap
5. air Hammer
6. variable depth

7. flat
8. conical
9. pyramidal
10. spherical
11. electro discharge machining (EDM)

منابع (References)

1. Boffey, D.A., Barrow, A.A. and Deardent, J.K. "Experimental investigation into the performance of an aerostatic industrial thrust bearing", *Tribology International*, **18**(3), pp. 165-168 (1985).
2. Stout, K.J. and Barrans, S.M. "The design of aerostatic bearings for application to nanometer resolution manufacturing machine systems", *Tribology International*, **33**, pp. 803-809 (2000).
3. Chen, M.F. and Lin, Y.T. "Static behavior and dynamic stability analysis of grooved rectangular aerostatic thrust bearings by modified resistance network method", *Tribology International*, **35**, pp. 329-338 (2002).
4. Chen, M.F., Chen, Y.P. and Lin, C.D. "Research on the arc type aerostatic bearing for a PCB drilling station", *Tribology International* **35**, pp. 235-243 (2002).
5. Fan, K.C., Ho, C.C. and Mou, J.I. "Development of a multiple-microhole aerostatic air bearing system", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **12**, pp. 636-643 (2002).
6. Noguchi, S. and Miyaguchi, K. "An evaluation method of radial accuracy for hydrostatic air spindles considering radial movement of the rotating center", *Precision Engineering*, **27**, pp. 395-400 (2003).
7. Park, J.K. and Kim, K.W. "Stability analyses and experiments of spindle system using new type of slot-restricted gas journal bearings", *Tribology International*, **37**, pp. 451-462 (2004).
8. Hirayama, T., Yamaguchi, N., Sakai, S., Hishida, N., Matsuoka, T. and Yabe, H. "Optimization of groove dimensions in herringbone-grooved journal bearings for improved repeatable run-out characteristics", *Tribology International*, **42**, pp. 675-681 (2009).
9. Chen, C.H., Yang, D.W., Kang, Y., Hwang, R.M. and Shyr, S.S. "Influence of orifices on stability of rotor-aerostatic bearing system", *Tribology International*, **42**, pp. 1206-1219 (2009).
10. Chen, M.F., Huang, W.L. and Chen, Y.P. "Design of the aerostatic linear guideway with a passive disk-spring compensator for PCB drilling machine", *Tribology International*, **43**, pp. 395-403 (2010).
11. Akhondzadeh, M. and Vahdati, M. "Experimental investigation on effect of number and size of rectangular air pockets on air spindle vibrations in nanomachining", *Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **227**(2), pp. 281-285 (2013).
12. Akhondzadeh, M. and Vahdati, M. "An experiment on the shape and depth of air pocket on air spindle vibrations in ultra precision machine tools", *Proc IMechE Part B, Journal of Engineering Manufacture*, **227**(4), pp. 616-620 (2013).