



ارائه یک روش تجربی به منظور اندازه‌گیری نیروهای عکس‌العمل جاسازها در قیدوبندهای فرزکاری

محفوظ سهرابی فرد، محمدجواد ناطق*

آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین‌های ابزار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

کلمات کلیدی:

سفتی تماسی

سفتی قیدوبند

سیستم جاسازی قطعه‌کار

قیدوبندهای فرزکاری

نیروی عکس‌العمل جاسازها

خلاصه: سفتی تماسی میان قطعه‌کار و سامانه جاسازی قیدوبند، یکی از عوامل تعیین‌کننده میزان پایداری قطعه‌کار در حین فرآیند ماشینکاری می‌باشد. اما محاسبه این سفتی تماسی مستلزم اندازه‌گیری دقیق نیروهای تکیه‌گاهی در محل جاسازها می‌باشد که در اثر عواملی نظیر نیروی بست‌ها، نیروهای ماشینکاری، نیروی وزن قطعه‌کار و اثرات اصطکاک میان قطعه‌کار و اجزاء قیدوبند ظاهر می‌شوند. تاکنون روش‌های تحلیلی متعددی به منظور محاسبه این نیروها ارائه شده است اما از آنجائی که دستگاه حل معادلات نیروهای جاسازها در سامانه جاسازی ۳-۲-۱ شامل شش معادله و هجده مجهول می‌باشد، لذا برای حل این معادلات غالباً از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود که در آن تخمین نیروهای عکس‌العمل جاسازها و از آنجا محاسبه سفتی تماسی، همراه با خطاهایی خواهد بود که پی بردن به میزان این خطاها به دلیل ساده‌سازی‌های اعمال شده به مدل‌های تحلیلی، مستلزم داشتن یک معیار دقیق مبتنی بر یک روش تجربی می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش یک روش تجربی به منظور محاسبه نیروهای عکس‌العمل جاسازها ارائه شده است که در آن تمامی عوامل موثر بر سفتی تماسی نظیر موقعیت هر کدام از جاسازها و بست‌ها، اصطکاک میان اجزاء سیستم جاسازی با قطعه‌کار، نیروی بست‌ها، نیروهای ماشینکاری، نیروی وزن قطعه‌کار در نظر گرفته شده است. از این روش می‌توان به عنوان معیاری مناسب به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی و روش‌های بهینه‌سازی در محاسبه نیروی عکس‌العمل جاسازها استفاده نمود.

۱- مقدمه

نیروهای ماشینکاری و نیروی وزن قطعه‌کار به کمک تجهیزاتی نظیر دینامومتر و لودسل امکان پذیر می‌باشد. اما اندازه‌گیری نیروهای عکس‌العمل جاسازها در برابر این بارگذاری‌های خارجی آسان نخواهد بود. چراکه در یک قیدوبند فرزکاری با سامانه جاسازی ۳-۲-۱ شش عدد جاساز وجود دارد که شش درجه آزادی قطعه‌کار را در فضای سه بعدی مهار نموده است. با در نظر گرفتن دو مولفه نیروی مماسی و یک مولفه نیروی عمودی (نرمال) برای هر جاساز در مجموع هجده مجهول وجود دارد که با اضافه شدن n عدد بست به مجموعه، تعداد مجهولات $2n$ عدد اضافه خواهد شد. چراکه مولفه نرمال نیروی بست‌ها (با توجه به کالیبره بودن بست‌های مورد استفاده) معلوم بوده و تنها مقادیر مؤلفه‌های مماسی مجهول خواهند ماند. این تعداد از

طراحی یک قیدوبند کارآمد به منظور ماشینکاری دقیق قطعات پیچیده صنعتی یک نیاز مهم برای ارتقای سطح کیفی محصولات صنعتی می‌باشد. یک قیدوبند کارآمد، قیدوبندی است که بتواند سفتی تماسی متناسب با جنس و هندسه قطعه‌کار را تامین نماید حال آنکه دارای کمترین اجزاء، دسترسی باز به قطعه‌کار و کوتاه‌ترین سیکل تنظیم و پیاده/سوار کردن قطعه‌کار، باشد. زمانی که یک قطعه‌کار در داخل قیدوبند جاسازی و مقید می‌شود، قسمت‌های مختلف قیدوبند تحت یک بارگذاری خارجی، که از طریق قطعه‌کار انتقال می‌یابد، قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری نیروهای خارجی نظیر

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nategh@modares.ac.ir



جاسازه‌های پایه استفاده شد، در هیچ کدام از پژوهش‌های مذکور روشی تجربی به منظور اندازه‌گیری مستقیم نیروهای عکس‌العمل جاسازها ارائه نشده است. در مورد استفاده از کاغذ فوجی نیز، این کاغذ یک بار مصرف بوده و از روی طیف رنگ ایجاد شده می‌توان محدوده نیروهای استاتیکی را با دقت ۲۰ الی ۳۰ درصد تخمین زد که بنا به متغیر بودن نیروی جاسازها در فرآیند و نیز ضرورت تکرار آزمایش‌ها در شرایط مختلف، کاغذ فوجی برای استفاده در این پژوهش مناسب نمی‌باشد. در این پژوهش راهکار مناسب و مقرون به صرفه‌ای ارائه می‌شود که در آن با تعبیه نوعی از سنسورهای نیرو در محل تماس قطعه کار با سامانه جاسازی بتوان نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در محل جاسازها را به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود.

۲- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر قطعه کار در سامانه جاسازی

۱-۲-۳

چیدمان اجزای قیدوبند بر اساس سامانه جاسازی استاندارد ۱-۲-۳ و همچنین دیاگرام نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در محل جاسازها و بست‌ها، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد قطعه کار در یک فضای سه بعدی توسط شش عدد جاساز و با اعمال نیروی بست در دو جهت مهار شده و کل مجموعه تحت بارگذاری خارجی شامل نیروهای ماشینکاری و وزن قطعه کار (G_w) قرار گرفته است.

در این شکل مؤلفه‌های نیروی تماس در جاساز \vec{t}_m و بست \vec{t}_b به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_i = (R_i^x & R_i^y & R_i^z) \\ \mathbf{C}_j = (C_j^x & C_j^z & C_j^z) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن R_i^k و C_j^k به ترتیب مؤلفه‌های نرمال و مماسی (اصطلاحاً) نیروی عکس‌العمل جاسازها و بست‌ها در امتداد محور k بوده و اندیس‌های i و j به ترتیب از ۱ تا ۶ و از ۱ تا ۳ تعریف می‌شوند. با ملاحظه شکل ۱ می‌توان دریافت که به ازای n عدد جاساز در مجموع $(3n)$ مؤلفه نیروی مجهول (شامل مؤلفه‌های مماسی و عمودی نیروی عکس‌العمل جاسازها) وجود دارد. لذا در یک سامانه جاسازی ۱-۲-۳ با شش عدد جاساز، وجود هجده معادله لازم می‌باشد

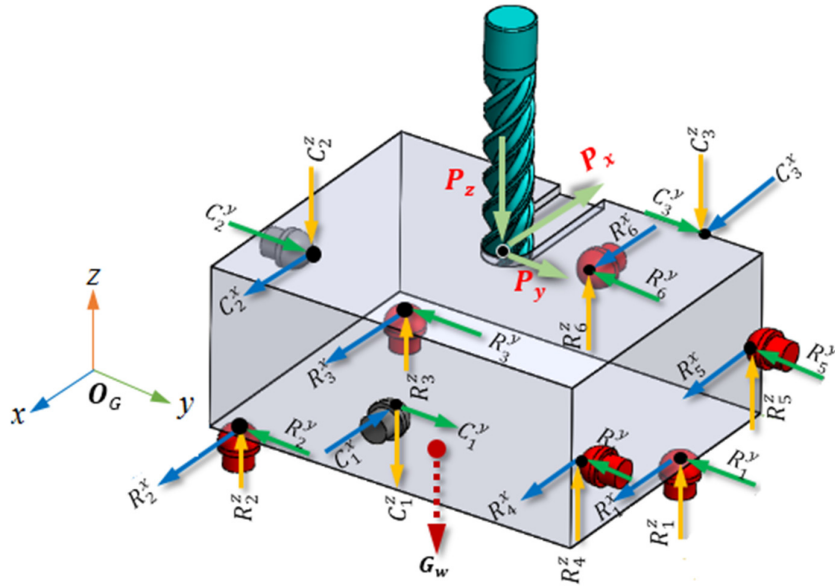
مجهولات توسط شش معادله تعادل نیروها و گشتاورهای وارده بر قطعه کار قابل محاسبه نخواهد بود. برخی از محققان [۱] به منظور رفع نامعینی دستگاه معادلات مذکور از فرضیاتی نظیر بهره‌گیری از سطوح محدودکننده در فضای نیرو-ممان و فرض الاستیک بودن نقاط تماس و تعریف معیار پایداری به صورت لزوم قرارگیری نیرو-ممان‌ها بر روی این سطح محدودکننده، استفاده نموده‌اند. کوگان [۲] نیز فرض نمود سطوح قطعه کار و قیدوبند نسبت به یکدیگر عمودند. استفاده از فرض میزان افزایش یکنواخت نیروهای اصطکاک برای تمام سطوح تماس مختلف با قطعه کار و در نتیجه حل دوبعدی معادلات تعادل استاتیکی نیز توسط وو و همکاران [۳] مطرح گردید. ایشان در پژوهشی دیگر [۴] از فرض قابلیت جابجایی نقاط تماس و محاسبه نیروهای عکس‌العمل نقاط جاسازی استفاده نمود. اصل حداقل اندازه^۱ برای مدل تماس قطعه کار صلب و اجزای قیدوبند نیز توسط برخی از محققان [۵ و ۶] مطرح گردید. شاوکی و عبدل آل [۷] نیز از تئوری مکانیک تماس سطوح تخت با سطوح نیم‌کروی در تخمین نیروهای عکس‌العمل جاسازها استفاده نمودند. آسانته [۸] نیز به منظور تخمین نیروهای عکس‌العمل جاسازها و از آنجا محاسبه سفتی تماس میان قطعه کار و جاسازهای سرکروی قیدوبند یکسری ساده‌سازی‌هایی را به روابط اعمال نمود. همچنین از احتمالات و روش یادگیری ماشینی برای رفع نامعینی [۹]، و از روش اصل کمترین مقدار نیروها به منظور محاسبه مقادیر نیروهای عکس‌العمل جاسازها و از آنجا بهینه‌سازی سامانه جاسازی [۱۰ و ۱۱] نیز استفاده شد. در سال‌های اخیر لی و همکاران [۱۲] نیز به کمک الگوریتم ژنتیک، یک مدل بهینه‌سازی طراحی قیدوبندها را با هدف محاسبه تقریبی نیروها و از آنجا تعریف ساختار سفتی متغیر^۲ به منظور بهبود کیفیت سطح قطعه کار ارائه نمودند که نتایج بدست آمده ۹/۱ درصد افزایش کیفیت سطح را نشان داد. کریگ و همکاران [۱۳] با ارائه یک طرح جدید برای فیکسچر با پر نمودن فضای میان جاسازها توسط یکسری پین‌های انعطاف‌پذیر^۳ که قابلیت تطابق با سطح قطعات شکل‌آزاد را دارا می‌باشد، به دنبال بهینه‌سازی نیروهای تکیه‌گاهی با هدف کاهش نیروهای بست بودند. اما بجز تحقیق ملکاته و همکاران [۱۴ و ۱۵] که در آن از کاغذ یکبار مصرف فوجی^۴ به منظور اندازه‌گیری تجربی نیروی عکس‌العمل

1 - The minimum norm principle

2 - Variable Stiffness Structure (VSS)

3 - Flexure pins

4 - Fuji paper



شکل ۱. دیاگرام نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی در محل جاسازها و بست‌ها
Fig. 1. Diagram of the reaction forces at the locating and clamping points

شده که مقادیر مختلف این نیرو به ازای میزان جمع‌شدگی فنر استاندارد بکار رفته در آن، قابل اندازه‌گیری می‌باشد. شکل ۲ فرآیند محاسبه تجربی نیروهای عکس‌العمل در محل جاسازها و همچنین نیروی بست‌ها در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

در این شکل و \mathbf{R}_i و \mathbf{C}_j به ترتیب بردارهای نیروی عکس‌العمل جاسازها و بست‌ها و R_i^k و C_j^k به ترتیب مؤلفه‌های نرمال و مماسی (اصطکاکی) نیروی عکس‌العمل جاسازها و بست‌ها در امتداد محور k بوده و اندیس‌های i و j به ترتیب از ۱ تا ۶ و از ۱ تا ۳ تعریف می‌شوند.

۳-۱- طراحی سیستم جاسازی قیدوبند فرزکاری

به منظور ساده‌سازی، هندسه قطعه‌کار به صورت مکعب مستطیل و جنس آن از آلومینیوم سری ۷۰۷۵، در نظر گرفته شد و بر همین اساس یک قیدوبند فرزکاری با سیستم جاسازی ۳-۲-۱ مطابق شکل ۳ طراحی شد.

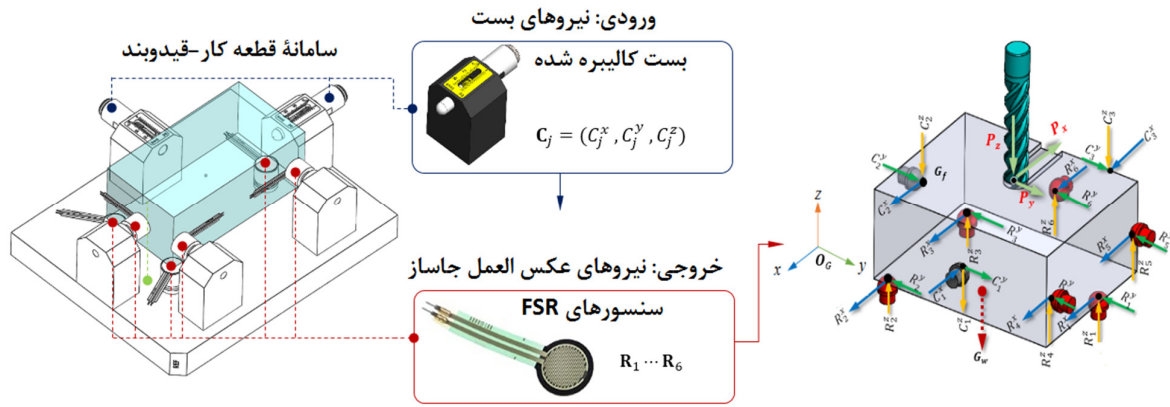
همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، در این پژوهش به منظور تمرکز بیشتر بر روی اثر تغییرات سفتی تماسی، از دو بست در جهات x و y استفاده شد. طراحی بست‌ها به گونه‌ای صورت گرفت که قابلیت اعمال سفتی تماسی متغیر را داشته باشند که جزئیات آن در ادامه آمده است.

که شروط برقراری تعادل برای قطعه‌کار تنها شش معادله را بدست می‌دهد. برای حل این دستگاه معادلات، شروط و قیودی که غالباً متضمن برقراری تماس میان قطعه‌کار و جاساز می‌باشد، به معادلات اضافه خواهد شد که در نهایت با ایجاد یک تابع هدف برای اندازه‌گیری و بهینه‌سازی آن، در صورت وجود جواب، تنها پایداری سیستم ارزیابی خواهد شد.

در این پژوهش با فرض اینکه شکل قطعه‌کار به صورت مکعب مستطیل بوده و میان اجزاء قیدوبند (جاسازها و بست‌ها) و قطعه‌کار تماس اصطکاکی برقرار می‌باشد و همچنین با فرض صلب بودن اجزاء قیدوبند و قطعه‌کار در نقاط تماس‌شان با یکدیگر، یک سامانه جاسازی ۳-۲-۱ با شش جاساز و دو عدد بست به گونه‌ای طراحی شده که بتوان با اعمال مؤلفه نرمال نیروی بست، نیروهای عکس‌العمل جاسازها را به صورت کنترل شده‌ای اعمال و اندازه‌گیری نمود که جزئیات آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

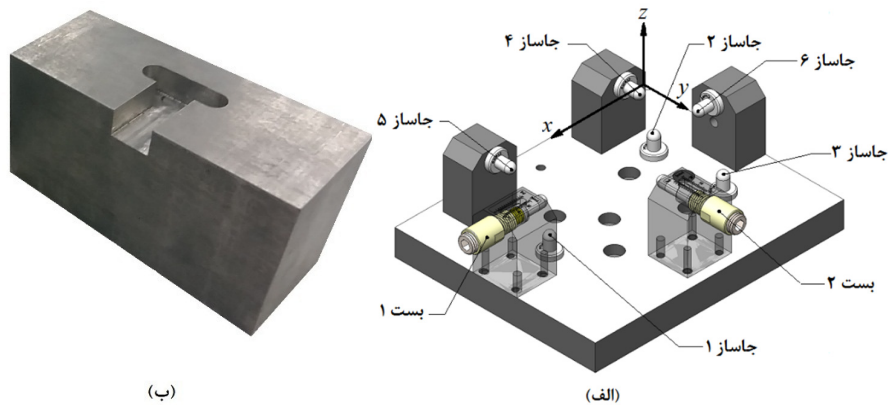
۳-۲ طرح آزمایش

در این پژوهش سعی بر آن است تا به روش تجربی و به کمک حسگرهایی که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقادیر نیروهای عکس‌العمل جاسازها اندازه‌گیری شود. همچنین نیروی بست هم توسط سازوکاری که در بخش ۳-۲ توضیح داده شده است، اعمال



شکل ۲. فرآیند پیشنهادی به منظور محاسبه تجربی نیروهای عکس‌العمل در محل جاسازها و همچنین نیروی بست‌ها

Fig. 2. The proposed process for experimental calculation of reaction forces at the locating points as well as the clamping forces



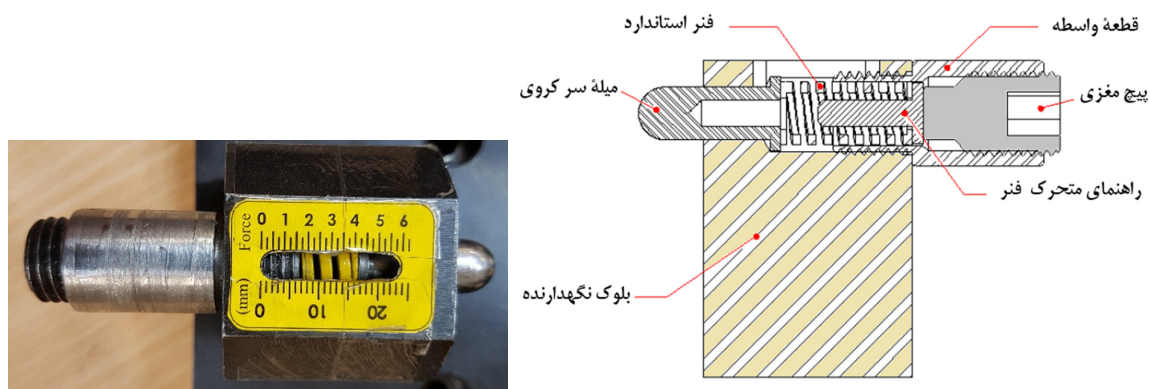
شکل ۳. الف) سامانه جاسازی ۳-۲-۱ برای قیدوبند فرزکاری - ب) قطعه‌کار مورد آزمایش
Fig. 3. a) 3-2-1 Locating system for milling fixture - b) test workpiece

۳-۲- طراحی بست‌ها

مطابق شکل ۴ طراحی بست‌ها به گونه‌ای است که بتوان با پیچاندن پیچ مغزی میزان فشردگی فنر را تنظیم نموده و از آنجا بتوان سفتی تماسی متغیری را روی نقاط تماس قطعه‌کار با سامانه جاسازی، ایجاد کرد. بدین ترتیب هرچه میزان فشردگی ایجاد شده در فنر (توسط پیچ مغزی) بیشتر باشد، میزان پس‌زدگی بین سرکروی بست (و از آنجا میزان سفتی تماسی) بیشتر خواهد بود. شایان ذکر است از آنجایی که حرکت قطعه‌کار در جهت منفی محور عمودی Z (به سمت پائین) توسط سه جاساز پایه (جاسازهای شماره ۱ و ۲ و ۳) محدود شده و همچنین مهار حرکت قطعه‌کار در جهت مثبت (به سمت بالا) مبتنی بر مؤلفه‌های اصطکاکی جاسازهای ۴ و ۵ و ۶ می‌باشد، لذا در این پژوهش از تعبیه بست در راستای محور Z صرف نظر نموده و مطابق شکل ۵ از دو عدد بست افقی (در راستای

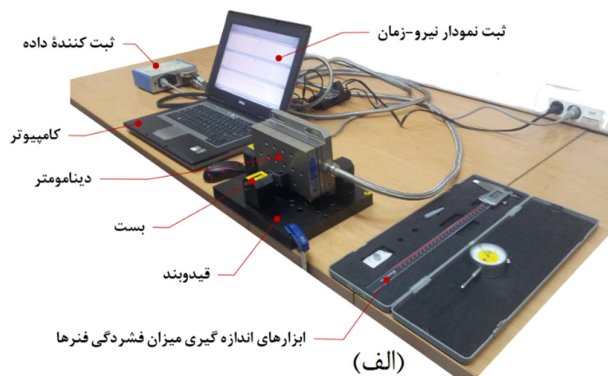
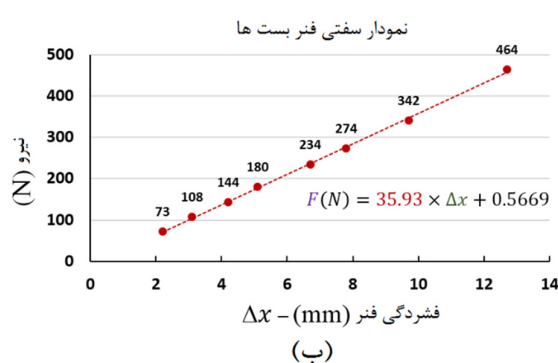
محورهای x و y) استفاده شد.

در ساخت بست‌ها، مطابق شکل ۴ از فنرهای استاندارد (مقطع مستطیلی به ابعاد $2 \times 2/6$ میلی‌متر و قطر بیرونی ۱۲ میلی‌متر) استفاده شد. فنرها جهت حصول اطمینان از میزان سفتی‌شان، به صورت جداگانه مطابق شکل ۵ مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور محاسبه مقدار دقیق سفتی فنر بکار رفته در بست‌ها، از دینامومتر استفاده شد. همانطور که در شکل ۵-الف ملاحظه می‌شود، نیروی بست به صورت مستقیم در جهت عمودی به دینامومتر اعمال شده و نیروی ذخیره شده در فنر به ازای مقادیر مختلف جمع‌شدگی آن، اندازه‌گیری شد. در هر بار آزمایش، میزان جمع‌شدگی فنر به کمک شاخص نصب شده بر روی بست توسط ابزار کولیس اندازه‌گیری شده و متناظر با این میزان جمع‌شدگی فنر، مقدار متوسط نیروی توسط دینامومتر ثبت شده و در نهایت منحنی آن مطابق شکل ۱۰-ب به دست آمد.



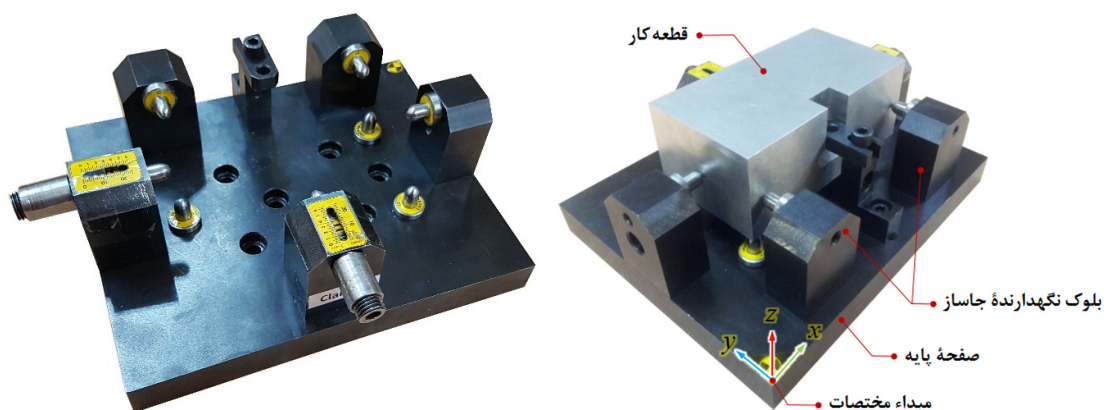
شکل ۴. اجزاء بست مورد استفاده در قیدوبند

Fig. 4. Clamp components used in milling fixture



شکل ۵. آزمون تجربی محاسبه سفتی فنر بکار رفته در بست های قیدوبند (الف). مجموعه آزمایشگاهی (ب). نمودار سفتی فنر

Fig. 5. Experiments for calculating spring stiffness used in fixture clamps (a). Experiment setup (b). Spring stiffness diagram



شکل ۶. سیستم قیدوبند-قطعه کار

Fig. 6. Fixture-workpiece system

برابر است. مؤلفه نرمال نیروی بست‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب در راستای محورهای x و y می‌باشد که مقدار آن با توجه به سفتی و میزان فشردگی فنر به کار رفته در آن، قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌شود، مقدار سفتی فنر بدست آمده از روش تجربی برابر با $35/93$ نیوتن بر میلی‌متر می‌باشد که تقریباً با مقدار نامی اعلام شده در کاتالوگ سازنده آن (36 نیوتن بر میلی‌متر)

جدول ۱. مختصات واقعی نقاط جاسازی و بست‌ها نسبت به مبدا مختصات

Table 1. The actual coordinates of the locating and clamping points relative to the origin of the coordinates

موقعیت جاسازها نسبت به مبدا مختصات			قطر جاساز	جاساز
r_i^x (mm)	r_i^y (mm)	r_i^z (mm)	(mm)	
۱۹۵/۷	۱۰۰/۹	۲۰/۶	۹/۸	$i = 1$
۵۵/۶	۶۶	۲۰/۷	۹/۹	$i = 2$
۵۵/۶	۱۳۵/۹	۲۰/۶	۹/۸	$i = 3$
۶۰/۶	۶۰/۱	۴۹	۹/۹	$i = 4$
۱۹۰/۷	۶۰	۴۹	۹/۸	$i = 5$
۴۹/۶	۱۰۰/۸	۴۹	۹/۹	$i = 6$
موقعیت بست‌ها نسبت به مبدا مختصات			قطر بست	بست
r_j^x (mm)	r_j^y (mm)	r_j^z (mm)	(mm)	
۱۹۹/۸	۱۰۰/۷	۴۸/۹	۱۰	$j = 1$
۱۲۵/۸	۱۴۰/۳	۴۸/۷	۹/۸	$j = 2$

لازم است این مقاومت حساس به نیرو مابین جاساز و قطعه کار قرار گیرد. اما از آنجائی که تماس به صورت نقطه‌ای می‌باشد، لذا اعمال فشار نقطه‌ای به حسگر نیرو منجر به آسیب دیدگی آن خواهد شد. بدین منظور از یک قطعه واسطه (آداپتور) مطابق شکل ۷ استفاده شد که انطباق آن با جاساز به صورت جذب و روان و حتی الامکان بدون لقی می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل ۷ ملاحظه می‌شود که تماس قطعه کار با جاساز از طریق قطعه واسطه و مقاومت حساس به نیرو برقرار خواهد شد.

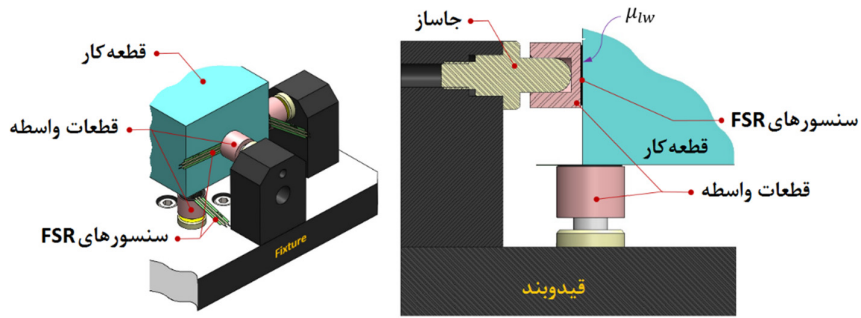
در شکل ۷ پارامتر μ_{fr} معرف ضریب اصطکاک کولمب میان مقاومت حساس به نیرو و قطعه کار آلومینیومی می‌باشد. خروجی مقاومت حساس به نیرو به صورت ولتاژ (و در برخی موارد اهم) بوده که لازم بود این ولتاژ با اعمال یک ضریب به نیرو تبدیل شود. به منظور محاسبه ضریب تبدیل به روش تجربی و با استفاده از دینامومتر عمل شد. دینامومتر همانند شکل ۸-الف به فک ثابت گیره تکیه داده شده است و فک متحرک گیره، مقاومت حساس به نیرو را توسط یک قطعه واسطه به دینامومتر فشار می‌دهد. با پیچاندن پیچ گیره فک متحرک به سنسور فشار وارد نموده و نمودار نیرو - زمان از لحظه شروع تا آستانه تحمل مقاومت حساس به نیرو توسط دینامومتر ثبت گردید. شایان ذکر است لحظه‌ای که نمودار نیرو-زمان افت پیدا می‌کند، همان آستانه لغزش بوده و بیشترین مقدار نیرو در این لحظه ثبت شده و در محاسبه ضریب اصطکاک مورد استفاده قرار گرفت.

پس از نهایی شدن طراحی، سیستم قیدوبند با قابیت اعمال سفتی تماسی متغیر به صورت شکل ۶ ساخته شد. در جدول ۱ موقعیت نقاط جاسازی و بست‌های بکار رفته در قیدوبند شکل ۶ نشان داده شده است که در آن r_i^k و r_j^k به ترتیب مؤلفه‌های بردار موقعیت جاساز i ام و بست j ام در امتداد محور k می‌باشد.

۳-۳- اندازه‌گیری مؤلفه نرمال نیروی عکس‌العمل جاسازها

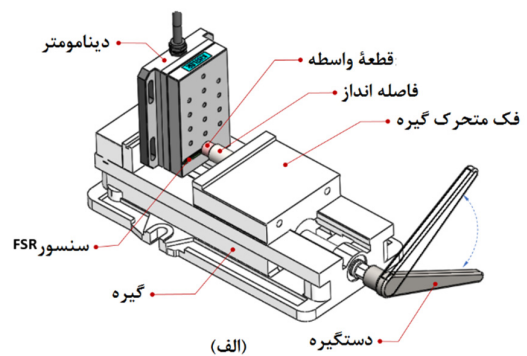
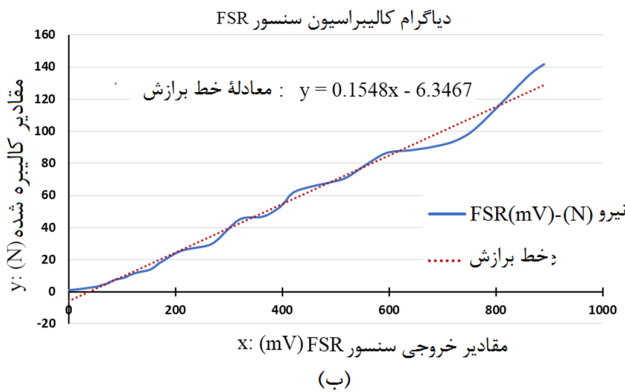
همان‌گونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد دستگاه معادلات محاسبه مؤلفه‌های مماسی و نرمال نیروی عکس‌العمل جاسازها در سامانه جاسازی ۳-۲-۱ با ۶ عدد جاساز، به صورت نامعین بوده و حل آن با روش‌های مرسوم میسر نخواهد بود که در این پژوهش سعی بر آن است مؤلفه‌های مماسی و نرمال نیروی عکس‌العمل جاسازها به روش تجربی اندازه‌گیری شود. برای این منظور از مقاومت حساس به نیرو^۱ استفاده شد. این نوع حسگرها تغییر فشار را با تغییر در مقاومت خود نشان می‌دهند به طوری که با افزایش فشار مقاومت دو سر آنها کاهش می‌یابد. ابعاد کوچک و هزینه نسبتاً پایین این نوع حسگرها باعث استفاده آسان از آنها شده است. در این پژوهش نیز به منظور اندازه‌گیری مؤلفه نرمال نیروی عکس‌العمل هر کدام از جاسازها، از مقاومت حساس به نیرو مدل ۴۰۲ استفاده شد که به منظور استفاده

1 - Force Sensitive Resistor (FSR)



شکل ۷. نحوه قرارگیری مقاومت حساس به نیرو در نقاط تماس میان قطعه کار و اجزاء قیدوبند

Fig. 7. The placement of the FSR sensors at the contact points between the workpiece and the fixture components



شکل ۸. الف) مجموعه آزمایشگاهی کالیبراسیون مقاومت حساس به نیرو، ب) منحنی تبدیل خروجی مقاومت حساس به نیرو

Fig. 8. a) FSR sensor calibration setup, b) FSR sensor output conversion curve to force

حساس به نیرو در محدوده (۷۰۰ mV - ۱۰۰ N) تقریباً خطی بوده و بعد از آن غیر خطی می‌باشد. در این پژوهش از قسمت خطی نمودار استفاده شده و معادله خط برازش یافته در این قسمت به صورت نشان داده شده در شکل ۸-ب بدست آمده و کالیبراسیون مقاومت حساس به نیرو بر این اساس انجام شد. پس از کالیبره نمودن ولتاژ خروجی این حسگرها بر اساس مقادیر نیرو، مقادیر مؤلفه نرمال نیروی عکس‌العمل جاسازها به دست خواهد آمد. اما به منظور محاسبه مؤلفه های مماسی (اصطکاکی) نیروی عکس‌العمل جاسازها، لازم است ضریب اصطکاک در محل نقاط تماس میان قطعه کار و اجزای قیدوبند تعیین شود که روش اندازه‌گیری آن در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

۳-۴- اندازه‌گیری مؤلفه‌های مماسی (اصطکاکی) نیروی عکس‌العمل

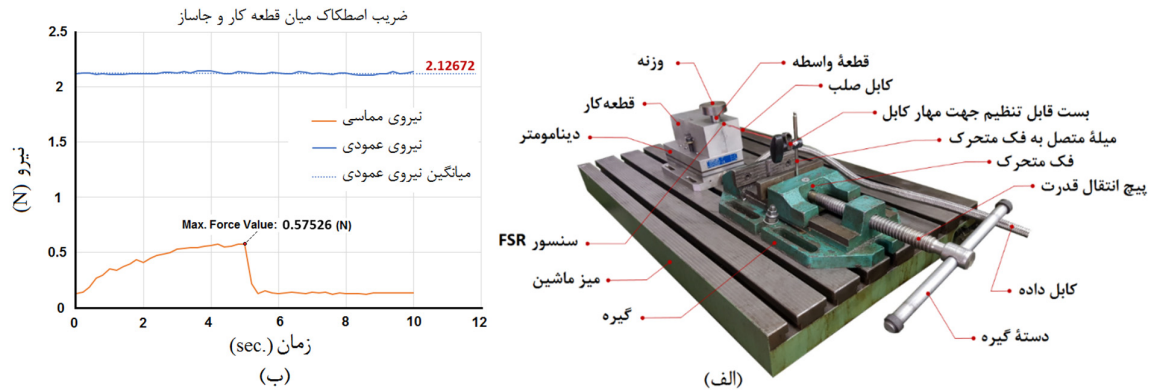
جاسازها

به منظور محاسبه مؤلفه‌های مماسی (اصطکاکی) نیروی

از طرفی دیگر خروجی مقاومت حساس به نیرو به کمک مدار راه انداز آن در کامپیوتر (توسط نرم‌افزار رابط داکلایت^۱) ثبت گردید که خروجی این سنسور اعدادی در مقیاس میلی‌ولت می‌باشد. مقادیر ولتاژ خروجی مقاومت حساس به نیرو و همچنین مقادیر ثبت شده توسط دینامومتر به صورت همزمان ثبت شده و در نهایت منحنی شکل ۸-ب ترسیم گردید. (لازم به ذکر است که آزمون کالیبراسیون سنسور سه بار مطابق شکل ۸ تکرار شده و میانگین مقادیر ثبت شده در نظر گرفته شد.) در این نمودار مقادیر ولتاژ خروجی مقاومت حساس به نیرو در مقابل مقادیر نیروی ثبت شده توسط دینامومتر به صورت منحنی آبی رنگ ترسیم شده است که با برازش یک نمودار خطی بر منحنی (خط چین)، رابطه خطی تبدیل مقادیر ولتاژ به نیرو (برحسب نیوتن) محاسبه گردید که در شکل ۸-ب نشان داده شده است.

با توجه به نمودار شکل ۸-ب، ملاحظه می‌شود که رفتار مقاومت

1 - Docklight



شکل ۹. الف) مجموعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب اصطکاک مقاومت حساس به نیرو با قطعه کار، ب) منحنی نیرو-زمان بدست آمده جهت اندازه‌گیری ضریب اصطکاک قطعه کار با مقاومت حساس به نیرو

Fig. 9. a) Experimental setup for measuring the friction coefficient between the FSR sensor and the workpiece, b) The force-time curve obtained to measure the friction coefficient of the workpiece with the FSR sensor

با توجه به نمودار بدست آمده در شکل ۹-ب به ازای حداکثر نیروی مماسی (افقی) 0.57526 نیوتنی، وزنه $2/127$ نیوتنی در آستانه حرکت قرار گرفت. لذا با توجه به نسبت نیروی مماسی (افقی) بر نیروی عمودی، مقدار تجربی ضریب اصطکاک ایستایی کولمب میان مقاومت حساس به نیرو و قطعه کار مطابق رابطه (۲) برابر با 0.27 اندازه‌گیری شد.

$$\mu_{iw} = \frac{F_{Tangential}}{F_{Normal}} = \frac{0.57526}{2.12672} \cong 0.27 \quad (2)$$

بدین ترتیب با بدست آمدن ضریب اصطکاک استاتیک، مؤلفه‌های مماسی نیروی عکس‌العمل جاسازها نیز اندازه‌گیری می‌شوند. جدول (الف) پیوست مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروی عکس‌العمل جاسازها (R_i^k) را به ازای حالات مختلف اعمال نیروهای بست (جدول ۲)، نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که نیروی اصطکاک بدست آمده از حاصل ضرب ضریب اصطکاک در مؤلفه نرمال نیروی عکس‌العمل جاساز در دو راستای مماسی با هم برابر در نظر گرفته شده است.

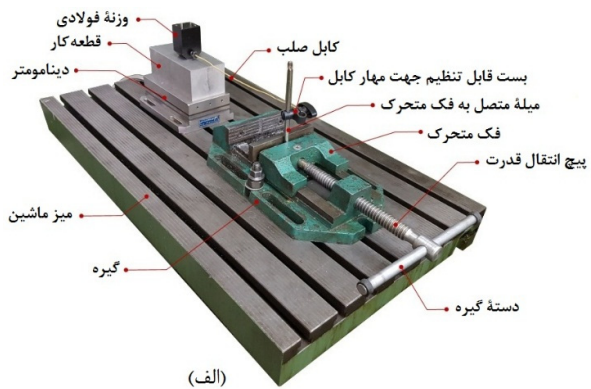
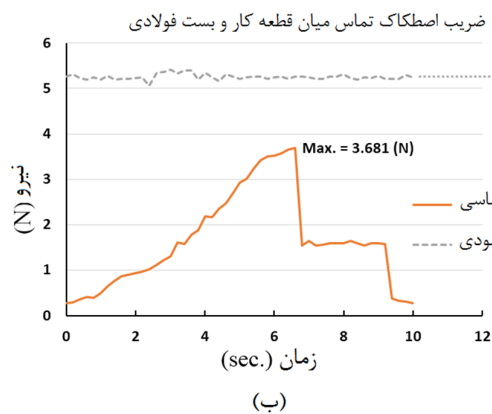
۳-۵- اندازه‌گیری مؤلفه‌های مماسی (اصطکاکی) نیروی بست‌ها
به منظور محاسبه مؤلفه‌های اصطکاکی نیروی بست، لازم است ابتدا ضریب اصطکاک میان المان فولادی بست و قطعه کار آلومینیومی (μ_{iw})، را اندازه‌گیری نمود. بدین منظور یک مجموعه آزمایشگاهی مطابق شکل ۱۰-الف به منظور اندازه‌گیری ضریب اصطکاک واقعی

عکس‌العمل جاسازها، لازم است ابتدا ضریب اصطکاک میان مقاومت‌های حساس به نیرو و قطعه کار آلومینیومی (μ_{iw})، به صورت تجربی اندازه‌گیری شود. در صورت پایین بودن سفتی تماسی میان قطعه کار و جاسازها، قطعه کار در حین فرآیند دچار ارتعاشاتی با دامنه محدود خواهد شد که خود مبین لغزش‌های میکروسکوپی قطعه کار می‌باشد. اما از آنجائیکه لغزش‌ها و دامنه حرکت بسیار ناچیز است، لذا در محاسبات از ضریب اصطکاک استاتیکی کولمب استفاده شد. در این آزمایش اجزای تماسی (شامل مقاومت حساس به نیرو و واسطه فولادی) مطابق شکل ۹-الف بر روی قطعه کار مورد آزمایش (که بر روی دینامومتر نصب شده است) قرار گرفته و یک وزنه $2/127$ نیوتنی به عنوان نیروی نرمال بر روی اجزای تماسی قرار می‌گیرد. سپس دنباله مقاومت حساس به نیرو به وسیله یک سیم صلب به یک میله متصل به فک متحرک گیره، وصل شده و با پیچاندن آرام پیچ گیره یک نیروی مماسی (افقی) به دنباله سنسور اعمال می‌شود. این نیرو به صورت لحظه‌ای توسط دینامومتر اندازه‌گیری شده و تا زمانی اعمال می‌شود که مجموعه حسگر، آداپتور و وزنه در آستانه حرکت (لحظه‌ای که نمودار نیرو-زمان افت پیدا می‌کند) قرار گیرد. بدین ترتیب به منظور محاسبه ضریب اصطکاک ایستایی کولمب میان مقاومت حساس به نیرو و قطعه کار آلومینیومی، نیروی مماسی از لحظه اعمال تا آستانه حرکت مجموعه توسط دینامومتر مطابق شکل ۹-ب ثبت گردید. در این شکل خط افقی بیانگر ثابت بودن مؤلفه عمودی نیرو در حین آزمایش می‌باشد.

جدول ۲. مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروی بست‌های شماره ۱ و ۲ در وضعیت‌های مختلف

Table 2. Normal and tangential components of clamps No. 1 and 2 in different positions

مؤلفه‌های نیروی بست‌ها (N)						وضعیت بست‌ها
C_1^x	C_1^y	C_1^z	C_2^x	C_2^y	C_2^z	
۱۴۶	۹۲/۱	۹۲/۱	۹۱	۱۴۴	۹۱	$C_j^{(-)}$
۲۹۳	۱۸۴/۹	۱۸۴/۹	۱۸۱/۷	۲۸۸	۱۸۱/۷	$C_j^{(0)}$
۴۳۷	۲۷۵/۷	۲۷۵/۷	۲۷۲/۶	۴۳۲	۲۷۲/۶	$C_j^{(+)}$



شکل ۱۰. الف) مجموعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بست فولادی با قطعه کار، ب) منحنی نیرو-زمان بدست آمده جهت اندازه‌گیری ضریب اصطکاک قطعه کار با بست فولادی

Fig. 10. a) Experimental setup for measuring the coefficient of friction between steel clamp and workpiece, b) Force-time curve obtained to measure the coefficient of friction between workpiece and steel clamp

اعمال شده به تماس میان قطعه کار و سامانه جاسازی، سه مقدار کمینه، متوسط و بیشینه نیروی بست‌ها و در وضعیت‌های مختلف مورد نیاز است که مقادیر کمینه و بیشینه به ترتیب در ازای کمترین و بیشترین میزان جمع‌شدگی فنر بست‌ها بدست آمد. مقدار متوسط نیروی بست‌ها ($C_j^{(0)}$) نیز با میانگین‌گیری از مقادیر کمینه و بیشینه محاسبه شد. بدین ترتیب تمامی مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروی بست‌ها مطابق جدول ۲ قابل محاسبه می‌باشد.

ستون اول جدول ۲ وضعیت‌های مختلف اعمال نیروی بست‌ها را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای $C_j^{(-)}$ ، $C_j^{(0)}$ و $C_j^{(+)}$ به ترتیب بیانگر حالت اعمال حداقل نیرو، حد متوسط نیرو و حداکثر نیروی بست زام می‌باشد.

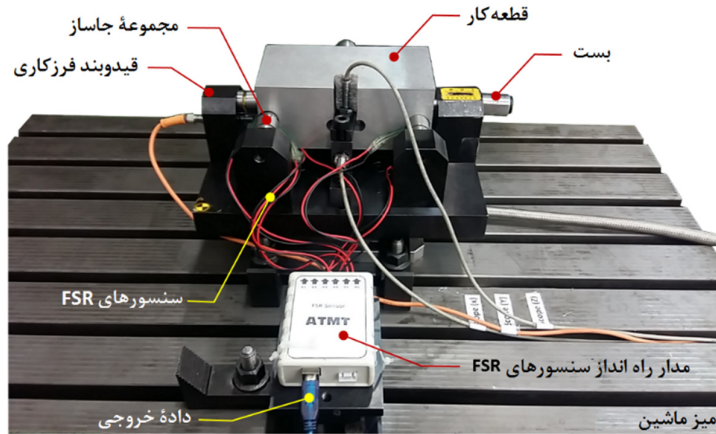
شکل ۱۱ مجموعه آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری نیروهای عکس‌العمل جاسازها را نشان می‌دهد که در آن قطعه کار آلومینیومی داخل قیدوبند با سامانه جاسازی ۳-۲-۱ در حالتی که مقاومت

نقاط تماس قطعه کار و بست قیدوبند در نظر گرفته شد. در این آزمایش یک وزنه ۵/۸۳۴ نیوتنی از فولادی هم جنس با بست بر روی قطعه کار آلومینیومی قرار داده و یک نیروی مماسی از لحظه اعمال تا آستانه حرکت وزنه توسط دینامومتر ثبت شد که نمودار نیرو-زمان حاصل از این آزمایش به صورت شکل ۱۰-ب می‌باشد.

با توجه به نسبت نیروی مماسی (افقی) بر نیروی عمودی، مقدار تجربی ضریب اصطکاک استاتیک کولمب میان بست فولادی و قطعه کار آلومینیومی مطابق رابطه (۳) برابر با ۰/۶۳ اندازه‌گیری شد.

$$\mu_{ew} = \frac{F_{Tangential}}{F_{Normal}} = \frac{3.68089}{5.83342} \cong 0.631 \quad (3)$$

با توجه به مشخص بودن مؤلفه نرمال نیروی بست‌ها، مقدار ضریب اصطکاک محاسبه شده در رابطه (۳) مقادیر نیروهای مماسی در محل تماس قطعه کار با بست‌ها نیز محاسبه شد. بسته به میزان سفتی



شکل ۱۱. سیستم قطعه‌کار- قیدوبند مجهز به مقاومت حساس به نیرو
 Fig. 11. Workpiece-fixture system equipped with FSR sensors

جدول ۳. مؤلفه‌های نرمال و مماسی (اصطکاکی) نیروی عکس‌العمل جاسازها به ازای اعمال حالات مختلف نیروی بست‌ها

Table 3. Normal and tangential (frictional) components of the locator reaction force for different states of the clamping forces

$C_1^{(-)}, C_2^{(-)}$	$C_1^{(0)}, C_2^{(-)}$	$C_1^{(-)}, C_2^{(0)}$	$C_1^{(0)}, C_2^{(0)}$	$C_1^{(+)}, C_2^{(-)}$	$C_1^{(-)}, C_2^{(+)}$	$C_1^{(+)}, C_2^{(0)}$	$C_1^{(0)}, C_2^{(+)}$	$C_1^{(+)}, C_2^{(+)}$	وضعیت بست‌ها:	مؤلفه‌های نیروی عکس‌العمل جاسازها (N)
۲۰۵	۳۲۳	۳۲۶	۴۱۱	۴۵۶	۴۶۰	۵۲۲	۵۲۳	۶۱۴	$C_{1,2}^*$	
۱۹/۴۷	۳/۱۰	۲/۴۳	۴/۸۵	۳/۴۳	۱۴/۱۵	۵/۹۸	۴/۴۴	۰/۲۳	R_1^x	
۱۹/۴۷	۳/۱۰	۲/۴۳	۴/۸۵	۳/۴۳	۱۴/۱۵	۵/۹۸	۴/۴۴	۰/۲۳	R_1^y	
۷۲/۱۲	۱۱/۴۷	۹/۰۱	۱۷/۹۵	۱۲/۷۲	۵۲/۴۰	۱۲/۱۴	۵۳/۴۸	۰/۸۵	R_1^z	
۵۳/۲۷	۳/۴۷	۸/۴۲	۱/۶۱	-۱/۲۲	۱۱/۳۹	۱۶/۰۶	۴/۳۷	-۰/۹۲	R_2^x	
۵۳/۲۷	۳/۴۷	۸/۴۲	۱/۶۱	-۱/۲۲	۱۱/۳۹	۱۶/۰۶	۴/۳۷	-۰/۹۲	R_2^y	
۱۹۷/۳۰	۱۲/۸۵	۳۱/۱۸	۵/۹۶	-۴/۵۳	۴۲/۱۹	۵۹/۵۰	۱۶/۱۹	-۳/۴۲	R_2^z	
۱۱۲/۵۵	۱۱/۲۸	۲۳/۹۸	۱۱۳/۰۷	۲۰/۹۹	۱۱/۷۳	۳۶/۴۰	۱۱/۳۷	۲/۰۵	R_3^x	
۱۱۲/۵۵	۱۱/۲۸	۲۳/۹۸	۱۱۳/۰۷	۲۰/۹۹	۱۱/۷۳	۳۶/۴۰	۱۱/۳۷	۲/۰۵	R_3^y	
۴۱۶/۸۶	۴۱/۷۷	۸۸/۸۱	۴۱۸/۷۷	۷۷/۷۶	۴۳/۴۴	۱۳۴/۸۰	۴۲/۱۰	۷/۵۸	R_3^z	
۵۲/۱۳۰	۲۰/۱۸	۴۲/۰۱	۲۱/۶۲	۳۵۸/۲۰	۹۴/۰۸	۱۰۲/۱۳	۲۱۸/۸۲	۱۸۵/۶۱	R_4^x	
۱۹۲/۹۸	۷۴/۷۵	۲۶۶/۷۰	۸۰/۰۶	۱۳۲۶/۶۵	۳۴۸/۶۴	۳۷۸/۲۲	۸۱۰/۴۵	۶۸۷/۴۶	R_4^y	
۵۲/۱۰	۲۰/۱۸	۴۲/۰۱	۲۱/۶۲	۳۵۸/۲۰	۹۴/۰۸	۱۰۲/۱۳	۲۱۸/۸۲	۱۸۵/۶۱	R_4^z	
۳۷/۱۵	۸/۴۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۴	۶۶/۷۷	۲۵/۶۷	۲۶/۴۸	۴۹/۰۴	۹۷/۶۱	R_5^x	
۱۳۷/۵۹	۳۱/۲۰	۸۲/۳۱	۸۲/۳۹	۲۴۷/۲۸	۹۵/۰۷	۹۸/۰۹	۱۸۱/۶۳	۳۶۱/۵۳	R_5^y	
۳۷/۱۵	۸/۴۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۴	۶۶/۷۷	۲۵/۶۷	۲۶/۴۸	۴۹/۰۴	۹۷/۶۱	R_5^z	
۳۱۸/۶۹	۳۶۸/۴۱	۱۱۳/۱۳	۹۲۶/۷۶	۶۶/۷۴	۳۴۳/۰۹	۴۰۰/۳۲	۴۱۷/۰۶	۸۸۲/۶۷	R_6^x	
۸۶/۰۵	۹۹/۴۷	۳۰/۵۴	۲۵۰/۲۲	۱۸/۰۲	۹۲/۶۳	۱۰۸/۰۹	۱۱۲/۶۱	۲۳۸/۳۲	R_6^y	
۸۶/۰۵	۹۹/۴۷	۳۰/۵۴	۲۵۰/۲۲	۱۸/۰۲	۹۲/۶۳	۱۰۸/۰۹	۱۱۲/۶۱	۲۳۸/۳۲	R_6^z	

صورت مجزا نمایش داده می‌شود.

حساس به نیرو در محل تماس قطعه‌کار با جاسازها تعبیه شده است، قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تمامی سنسورها از طریق سیم به یک مدار راه‌انداز متصل شده و خروجی هر کدام از سنسورها توسط کابل داده به رایانه انتقال داده شده و توسط نرم‌افزار رابط داکلایت به

۴- نتایج آزمون

در این پژوهش از مقاومت حساس به نیرو مدل ۴۰۲ به منظور

۶. از نیروهای محاسبه شده در این روش تجربی نیز می توان مستقیماً در محاسبه سفتی تماس میان قطعه کار و سامانه جاسازی قیدوبندهای فرزکاری استفاده نمود.

۷. از روش تجربی ارائه شده می توان در فرآیندهای ماشینکاری در مقیاس کوچک^۲ و نیز ماشینکاری مواد انعطاف پذیر به منظور اندازه گیری نیروهای عکس العمل تکیه گاهی و تخمین نیروی بهینه بست ها و در نتیجه جلوگیری از اعمال بیش از حد نیروی بست ها و خطاهای ناشی از آن، استفاده نمود.

فهرست علائم:

علامت

r_{C_j}	بردار موقعیت بست j ام
$r_{C_j}^k$	مولفه بردار موقعیت بست j ام در جهت محور k
r_{C_G}	بردار موقعیت مرکز جرم قطعه کار
μ_{cw}	ضریب اصطکاک میان بست و قطعه کار
μ_{lw}	ضریب اصطکاک میان جاساز و قطعه کار
C_j	بردار نیروی بست j ام
C_j^k	مولفه نیروی بست j ام در جهت محور k
R_i	بردار نیروهای عکس العمل جاساز i ام
R_i^k	مولفه نیروی عکس العمل جاساز i ام در جهت محور k
r_{l_i}	بردار موقعیت جاساز i ام

مراجع

- [1] S.H. Lee, M. Cutkosky, Fixture planning with friction, (1991).
- [2] C. Cogun, The importance of the application sequence of clamping forces on workpiece accuracy, (1992).
- [3] Y. Wu, Y. Rong, W. Ma, S.R. LeClair, Automated modular fixture planning: Accuracy, clamping, and

اندازه گیری تجربی مؤلفه های مماسی و نرمال نیروی عکس العمل جاسازها استفاده شد. این نوع حسگرها تغییر فشار را با تغییر در مقاومت خود نشان می دهند به طوری که با افزایش فشار مقاومت دو سر آنها کاهش می یابد. به منظور افزایش دقت اندازه گیری در استخراج داده ها سعی شد که مقاومت حساس به نیرو توسط یک دینامومتر^۱ کالیبره شود. ضرائب اصطکاک تماس ها نیز به صورت تجربی اندازه گیری شد. در نهایت تمامی مؤلفه های نیروهای عکس العمل در محل جاسازها مطابق جدول ۳ اندازه گیری شد.

مزیت استفاده از این روش نصب آسان سنسورها در محل تماس میان جاساز و قطعه کار به دلیل کوچک بودن اندازه آنها و نیز طول عمر نسبتاً زیاد این سنسورها (به شرط عدم اعمال بارگذاری بیش از ظرفیت) می باشد. همچنین استفاده از این سنسورها در مقایسه با سایر سنسورها مقرون به صرفه تر می باشد. به منظور عملکرد مطمئن حساس به نیرو و در نتیجه حصول بهترین نتایج، بهتر است حتی الامکان سطوح جاساز به موازات پروفیل سطح قطعه کار طراحی و ساخته شود.

۵- نتیجه گیری

با مشاهده نتایج بدست آمده از آزمون، می توان گفت که :

۱. روش تجربی ارائه شده در این پژوهش، می تواند یک راهکار مناسب به منظور صحت سنجی روش های بهینه سازی در محاسبه نیروهای عکس العمل جاسازها در قیدوبندهای فرزکاری باشد.
۲. مقاومت حساس به نیرو به دلیل طول عمر بالا، مقاومت به حرارت بالا، حساسیت و تکرار پذیری مناسب و ابعاد به اندازه کافی کوچک قابلیت بالایی در اندازه گیری نیروهای عکس العمل جاسازها در فضای محدود سامانه جاسازی خواهند داشت.
۳. با توجه به ظرفیت محدود مقاومت حساس به نیرو، بهتر است از بست هایی با قابلیت تنظیم نیرو استفاده شود.
۴. روش تجربی به کار گرفته شده در این پژوهش بر روی قطعات با سطوح تخت و موازی، قابل اجرا بر روی قطعات با هندسه آزاد نیز می باشد.
۵. به منظور ممانعت از آسیب رسانی به مقاومت حساس به نیرو، بهتر است حتی الامکان تماس به صورت نقطه ای نباشد.

- system design for parts with free-form surfaces, in: Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, 2015, pp. 133-129.(in Persian)
- [11] H. Parvaz, M.J. Nategh, Stability analysis of free-form workpieces in fixtures, Modares Mechanical Engineering, 252-245 (2016) (2)16. (in Persian)
- [12] G. Li, S. Du, D. Huang, C. Zhao, Y. Deng, Elastic mechanics-based fixturing scheme optimization of variable stiffness structure workpieces for surface quality improvement, Precision Engineering, (2019) 56 363-343.
- [13] O. Craig, J. Picavea, A. Gameros, D. Axinte, S. Lowth, Conformable fixture systems with flexure pins for improved workpiece damping, Journal of Manufacturing Processes, 652-638 (2020) 50.
- [14] A. Raghu, S.N. Melkote, Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors, International Journal of Machine Tools and Manufacture, (2004) (4)44 382-373.
- [15] S.P. Siebenaler, S.N. Melkote, Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 58-51 (2006) (1)46.
- accessibility analyses, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26-17 (1998) (1)14.
- [4] Y. Kang, Y. Rong, J. Yang, Computer-aided fixture design verification. Part 3. Stability analysis, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, -10)21 849-842 (2003) (11).
- [5] A. Ben-Israel, T.N. Greville, Generalized inverses: theory and applications, Springer Science & Business Media, 2003.
- [6] M.Y. Wang, D.M. Pelinescu, Contact force prediction and force closure analysis of a fixtured rigid workpiece with friction, J. Manuf. Sci. Eng., 332-325 (2003) (2)125.
- [7] G. Shawki, M. Abdel-Aal, Rigidity considerations in fixture design—contact rigidity at locating elements, in: International Journal of Machine Tool Design and Research, 1966, pp. 43-31.
- [8] J.N. Asante, Effect of fixture compliance and cutting conditions on workpiece stability, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (1)48 43-33 (2010).
- [9] E. Nikandrova, J. Laaksonen, V. Kyrki, Towards informative sensor-based grasp planning, Robotics and Autonomous Systems, 354-340 (2014) (3)62.
- [10] H. Parvaz, M.J. Nategh, Analytical model of locating

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Sohrabifard, M. J. Nategh, An Experimental Approach for Determination of Locators Reaction Forces in Milling Fixtures , Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 5615-5626.

DOI: [10.22060/mej.2021.19596.7065](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19596.7065)

