

Finite element analysis of deformations and errors caused by temperature changes on the CMM device

Farshad rabiei ^{1,*}

¹ Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
E-mails: F.rabiei@ilam.ac.ir

Abstract

Coordinate measuring device (CMM), one of the measuring devices for reverse engineering that requires constant environmental and environmental conditions. This change of conditions may be unavoidable due to the need of the industry to enter the devices into the workshop environment, and changes are applied to the device structures. This change causes non-uniform deformation and distortion of the structure as well as the code rulers of the device, which affects the measurement results. In this research, in order to investigate the effect of changing environmental conditions on the CMM device and investigate the errors caused by it, the three-dimensional model of the CMM device was designed in ANSYS finite element software and by applying the difference between the ambient temperature and the temperature of the structure, the unstable thermal analysis of the device was performed. has been The overall shape of the structure and the rulers have been changed. For the purpose of validation, the results obtained from the amount of displacement of the rulers and the building of the structure have been compared with the existing analytical relationships, and a very acceptable match is observed. Also, the analysis of deformations and general distortion of the structure has resulted in results regarding the improvement of the design and materials used in the structure.

Keywords

CMM device, temperature change error, unsteady heat transfer

تحلیل اجزا محدود تغییرشکلها و خطاهای ناشی از تغییرات دما بر روی دستگاه CMM

فرشاد ربیعی^{۱*}

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

ایمیل نویسندگان: f.rabiei@ilam.ac.ir

چکیده

دستگاه اندازه‌گیری مختصات^۱ (CMM)، یکی از وسایل اندازه‌گیری جهت مهندسی معکوس بوده که نیازمند شرایط محیطی و دمایی ثابت است. تغییر این شرایط به دلیل نیاز صنعت به ورود این دستگاه‌ها به محیط کارگاهی اجتناب ناپذیر بوده و تغییرات دمایی به سازه دستگاه اعمال می‌شود. این تغییرات منجر به تغییر شکل و اعوجاج غیریکنواخت سازه و نیز خطکش‌های کدی دستگاه می‌شود که نتایج اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر تغییر شرایط محیطی بر روی دستگاه CMM و بررسی خطاهای ناشی از آن، مدل سه‌بعدی دستگاه CMM در نرم افزار اجزا محدود ANSYS طراحی شده و با اعمال اختلاف دمای محیط با دمای سازه، تحلیل حرارتی ناپایای دستگاه انجام شده است. تغییر شکل کلی سازه و خطکش‌ها به دست آمده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج به دست آمده از میزان جابه‌جایی خطکش‌ها و ساختمان سازه با روابط تحلیلی موجود مقایسه شده‌اند که تطابق بسیار قابل قبولی مشاهده می‌شود. همچنین تحلیل تغییرشکلها و اعوجاج کلی سازه منتج به نتایجی در خصوص بهبود طراحی و مواد به کار رفته در سازه شده است.

کلمات کلیدی: دستگاه CMM، خطای تغییر درجه حرارت، انتقال حرارت ناپایا

نام نویسنده مسئول: فرشاد ربیعی

ایمیل نویسنده مسئول: f.rabiei@ilam.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

۱- مقدمه

تغییرشکل‌های حرارتی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. تحقیقات مختلفی برای کاهش خطاهای حرارتی و یا جبران خطا آن صورت گرفته است. سانگ و همکاران از روش المان محدود و با مینیمم کردن زمان مورد نیاز برای رسیدن دمای سازه به دمای محیط برای کنترل تغییرشکل‌های حرارتی سازه‌های ماشین ابزار استفاده کردند [۸]. ایباراکی و همکاران موقعیت مؤثر پروب و تاثیر اختلاف بین انبساط حرارتی قطعه‌کار و خطکش اندازه‌گیری در هنگام تماس با یکدیگر را در حالت پایا و گذرا بررسی کردند [۹]. موقعیت و تعداد سنسورهای اندازه‌گیری با روش‌های تجربی، عددی و شبکه عصبی در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

تفاوت خواص فیزیکی و حرارتی اجزای سازه منجر به انبساط‌های مختلف و ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های ناخواسته‌ای می‌شود که عملکرد دستگاه و خطکش‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق تغییرشکل‌ها و خطاهای ناشی از اعمال اختلاف دما در حالت ناپایا بر روی دستگاه CMM به روش تحلیل اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است تا مجموعه سازه و خطکش‌های اندازه‌گیری را پوشش دهد.

۲- مشخصات دستگاه

دستگاه CMM مورد استفاده در بررسی، مدل zeiss prismo7 می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. ابعاد سازه موجود (بدون احتساب سیستم پروب و پروب‌گیر و حماله) $1.2m \times 1.2m \times 1m$ و دقت دستگاه $1\mu m$ می‌باشد. دستگاه دارای دو پایه‌ی ریلی و کشویی از جنس فایبر گلاس، بستر گرانیته و سیستم پروب‌گیر و حماله از جنس سرامیک می‌باشد. پایه‌های ریلی و کشویی بر روی بالشتکی از هوا قرار گرفته‌اند که حرکت در راستای Y را میسر می‌کنند. سیستم پروب‌گیر و حماله هم توانایی حرکت در راستای X و Z را دارا می‌باشند. سه خطکش کدی دستگاه توسط چسب به سازه اتصال یافته‌اند.

دستگاه‌های اندازه‌گیری CMM به طور گسترده‌ای در بررسی هندسه و ابعاد قطعات مکانیکی، مشخصات اندازه‌گیری، مهندسی معکوس و بهبود فرایندهای ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرد اگرچه دستگاه‌های CMM به وسیله‌ی دقت بالای آنها معرفی می‌شوند اما هنوز مسائل مربوط به عدم دقت و عدم صحت در آنها مطرح است. منابع این خطاها به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

۱) قطعات و پروب‌های دستگاه اندازه‌گیری

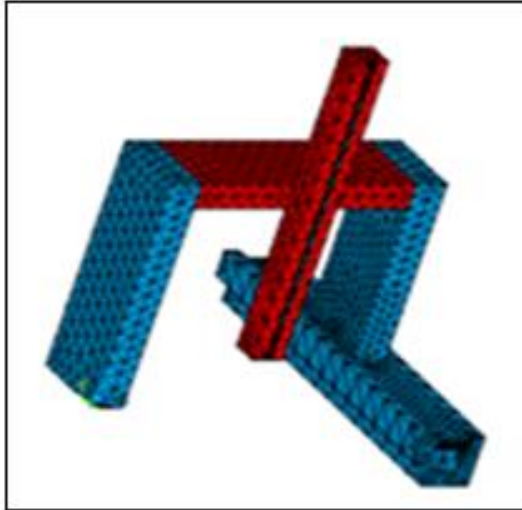
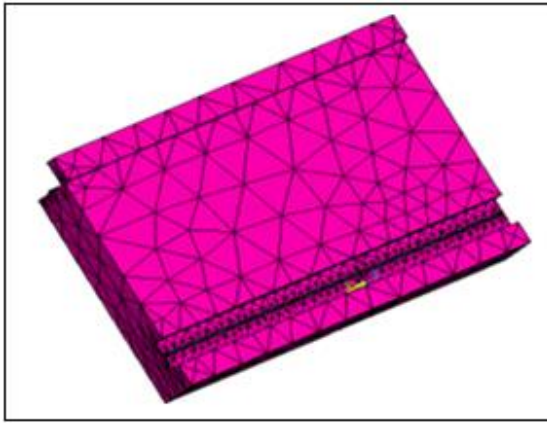
۲) استراتژی نمونه‌رَداری

۳) پردازش داده

۴) محیط اندازه‌گیری [۱].

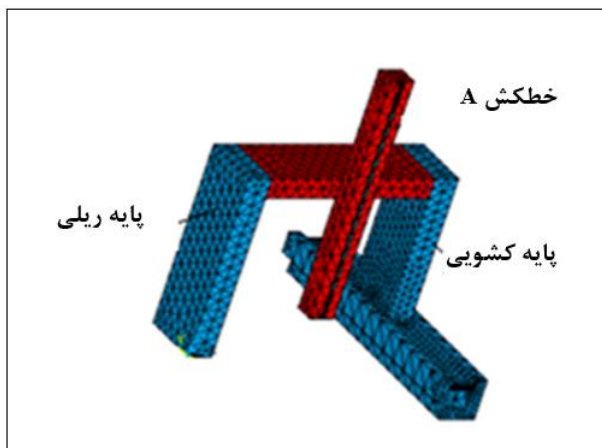
ثابت شده است که سهم جابه‌جایی‌های حرارتی سازه ماشین‌های ابزار ممکن است بیش از ۵۰٪ کل خطای ماشین‌کاری باشد [۴-۲]. از طرفی در دنیای صنعتی امروز رشد فزاینده‌ای برای استفاده از سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر وجود دارد به همین دلیل دستگاه‌های CMM بیشتر در خارج اتاق تحت کنترل و نزدیک کارگاه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از طرفی دمای محیط معمولاً با دمای بین المللی استاندارد وسایل اندازه‌گیری که از نظر تئوری دمای 20° سانتی‌گراد در نظر گرفته شده متفاوت است. بنابراین انحراف دمای حاصل از شرایط کارگاهی بر روی فرایند اندازه‌گیری باید مد نظر قرار داده شود [۵، ۶]. انواع مختلفی از خطاهای حرارتی در طول اندازه‌گیری اتفاق می‌افتد. این اختلاف از دو مساله نشأت می‌گیرد. یکی توزیع دما در سازه ماشین و دیگری انتخاب المان‌های موجود در سازه می‌باشد. از موارد فوق نیاز به جبران خطای حرارتی به خوبی احساس می‌شود. به دلیل مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم، از روش‌های غیرمستقیم برای جبران خطای

¹ Coordinate Measurement Machine: CMM



شکل شماره ۳: دو قسمت مجزای سازه، تصویر بالا بستر گرانیتی سازه تصویر پایین قسمت متحرک سازه.

سازه‌ی متحرک از یک پایه ریلی و یک پایه کشویی فایبر گلاسی (آبی رنگ)، یک ستون افقی و یک سیستم حماله و پروب‌گیر سرامیکی تشکیل شده است (قرمز رنگ)، بر روی حماله خطکش A قرار دارد که توسط چسب به حماله سرامیکی متصل شده است (شکل ۴).



شکل شماره ۴: دو قسمت مجزای سازه، تصویر بالا بستر گرانیتی سازه تصویر پایین قسمت متحرک سازه.

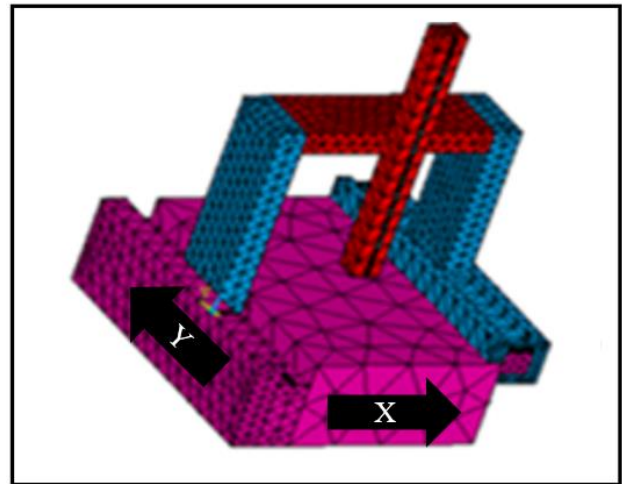
دستگاه برای $20^{\circ}C$ استاندارد شده و تغییر دمای $10^{\circ}C$ برای آن در نظر گرفته شده است.



شکل شماره ۱: دستگاه CMM.

۳- آنالیز المان محدود سازه CMM

مدل دستگاه CMM در نرم افزار ANSYS طراحی شده است (شکل ۲). سطوح تماسی از طریق قید Glue Volumes به هم متصل شده‌اند که انتقال حرارت در اتصالات را ممکن می‌سازد. سیال پیرامون سازه هوای ساکن با ضریب انتقال حرارت $h=60 (W/m^2.K)$ و دمای آن $30^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. دمای اولیه‌ی سازه $20^{\circ}C$ (دمای استاندارد) است. المان Coupled Field نوع 98 Scaler Tet به دلیل قابلیت رفتار حرارتی-سازه‌ای آن مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع المان‌ها از نوع Global، مش‌زنی از نوع Free و شکل مش از نوع Tet مورد استفاده قرار گرفته است.

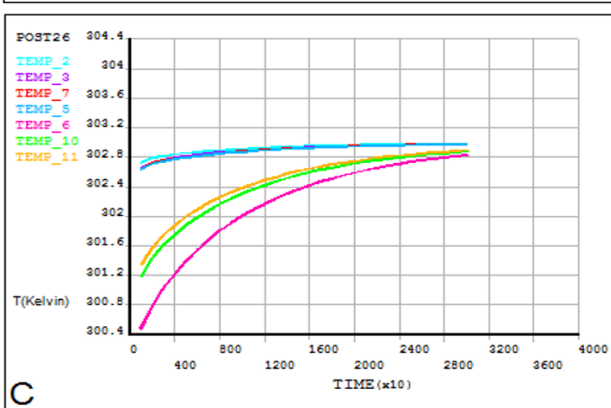
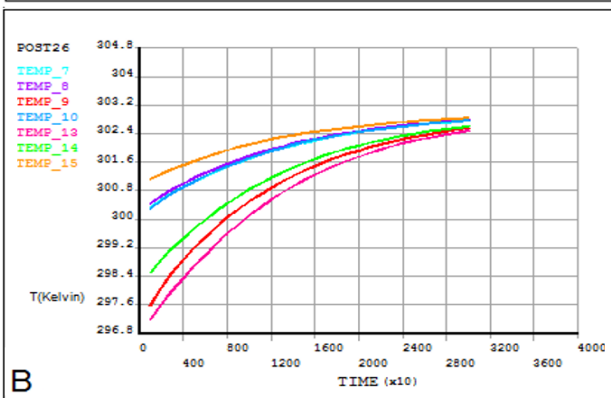
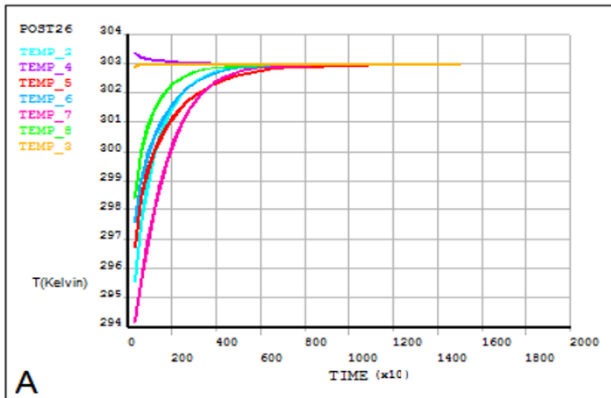


شکل شماره ۲: نمای کلی سازه‌ی CMM.

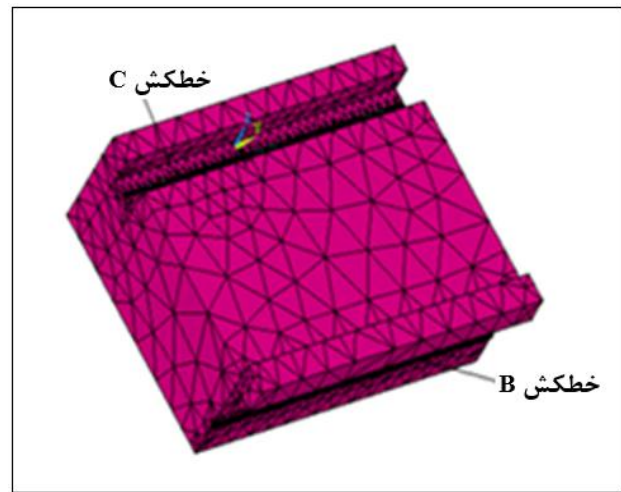
قیود مرزی مدل با دستگاه واقعی تقریباً یکسان می‌باشد. سازه را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم کرد چرا که اتصال ما بین آنها از طریق بالشتک هوا ایجاد شده است (شکل ۳).

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی و حرارتی مواد

گرمای مخصوص $\frac{J}{Kg^{\circ}C}$	رسانندگی حرارتی $\frac{W}{m^{\circ}C}$	ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{^{\circ}C}$	چگالی $\frac{Kg}{m^3}$	نسبت پواسون	مدول یانگ (Pa)	
1000	0.058	8×10^{-6}	145	0.17	7×10^{-6}	شیشه
200	0.33	12×10^{-6}	1.8	0.45	10^{10}	چسب
800	2.07	10^{-6}	2600	0.2	2×10^{11}	سرامیک
795	0.036	7×10^{-6}	105	0.26	8.18×10^{10}	فایبرگلاس
820	130	8×10^{-6}	10000	0.2	2×10^{10}	گرانیت



بر روی بستر گرانیتی دو خطکش B و C قرار دارد که توسط چسب به بستر گرانیتی متصل شده اند (شکل ۵).



شکل شماره ۵: بستر گرانیتی و خطکشهای B و C.

پایه‌های ریلی و پایه کشویی در راستای Y می‌توانند حرکت کنند و پایه ریلی دارای مقداری لقی محدود در راستای Y می‌باشد که می‌تواند حرکتی جزئی در این راستا داشته باشد. بستر گرانیتی هم بر روی زمین قرار دارد.

خواص مکانیکی و حرارتی اجزای سازنده سازه در جدول ۱ ذکر شده است.

۴- نتایج

پس از پایان تحلیل زمان لازم برای پایداری حرارتی سازه استخراج شده است که برای قسمت متحرک حدود $15000 S$ و برای بستر گرانیتی حدود $30000 S$ می‌باشد. اهمیت این زمان در این است که میزان تغییر شکل و جابه‌جایی سازه در این زمان به حالت ثابت می‌رسد.

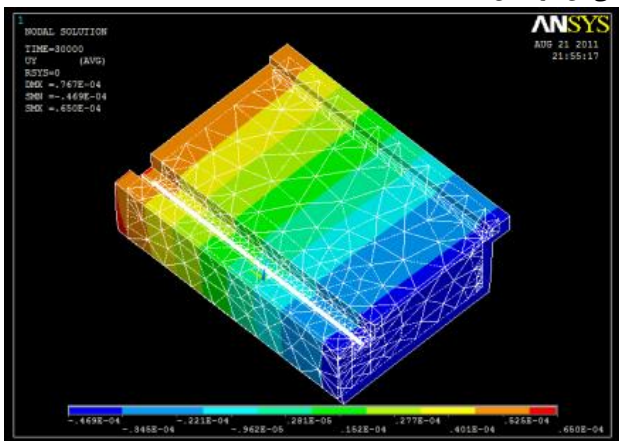
تغییرات دما برای هفت نقطه از هر یک از خطکش‌ها، پایه ریلی و پایه کشویی در شکل ۶ بر حسب زمان نشان داده شده است:

نتایج مربوط به تغییر شکل کلی قسمت متحرک در پایان 15000 s که مربوط به زمان پایداری حرارتی این قسمت است در شکل ۷ آمده است. نقطه-چین ها حالت اولیه سازه را نشان می دهند:

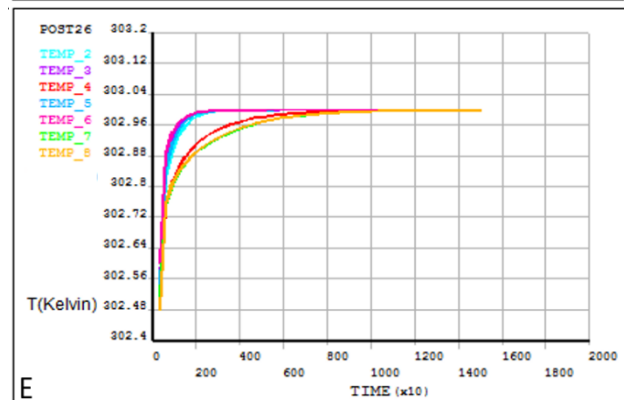
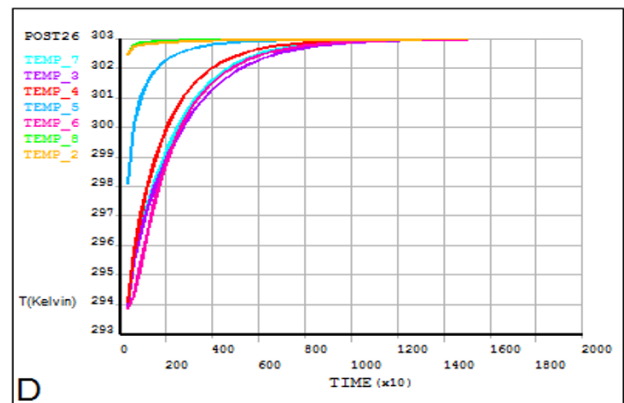


شکل شماره ۷: تغییر شکل کلی قسمت متحرک سازه.

بستر گرانیتهی پس از 30000 s به تعادل حرارتی می رسد که تغییر شکل کلی آن در شکل ۸ آمده است:



شکل شماره ۸: تغییر شکل کلی بستر گرانیتهی.



شکل شماره ۶: تغییر دمای هفت نقطه‌ی دلخواه از (A) خطکش (B، C، D، E) پایه ریلی و (E) پایه کشویی بر حسب زمان.

میزان جابه‌جایی نقاط ابتدایی و انتهایی هر خطکش پس از رسیدن به تعادل حرارتی و متعاقباً میزان تغییر طول هر یک از خطکش‌ها از نرم‌افزار استخراج شده است. به دست آوردن روابط انتقال حرارت حاکم بر مسأله غیرممکن و یا بسیار مشکل می‌باشد بنابراین برای اعتبار سنجی این مقادیر از رابطه انبساط یک بعدی استفاده شده است:

$$\Delta l = l \alpha \Delta T \quad (1)$$

این رابطه میزان تغییر طول آزاد میله ای به طول l را در اثر تغییر دمای ΔT بیان می‌کند که α ضریب انبساط حرارتی بر حسب یک درجه سانتی‌گراد تغییر دمای میله است.

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی با نتایج نرم افزار

خطکش	نرم افزار (μm)	رابطه تحلیلی (μm)	میزان خطا (درصد)
A	15.2	11.8	28.8
B	100.9	102.4	1.5
C	100.3	102.4	2.0
پایه ریلی	63.6	63	0.9
پایه کشویی	52.5	52.9	0.7

۵- نتیجه گیری

شده‌اند که تطابق بسیار قابل قبولی مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که تغییر درجه حرارت می‌تواند تأثیر زیادی بر روی اعوجاج حرارتی سازه و خطکشها و متعاقباً نتایج اندازه‌گیری داشته باشد. برای کاهش این خطاها می‌بایست پارامترهای تعداد درجه آزادی و نحوه اتصال اجزای مختلف به یکدیگر، خواص حرارتی خصوصاً ضریب انبساط حرارت و طول اجزای مختلف سازه مورد توجه قرار گیرند.

در این تحقیق به منظور بررسی اثر تغییر شرایط محیطی بر روی دستگاه CMM و بررسی خطاهای ناشی از آن، مدل سه‌بعدی دستگاه CMM در نرم افزار اجزا محدود ANSYS طراحی شده و با اعمال اختلاف دمای محیط با دمای سازه، تحلیل حرارتی ناپایای دستگاه انجام شده است. تغییر شکل کلی سازه و خطکش‌ها به دست آمده است. به منظور اعتبار سنجی، نتایج به دست آمده از میزان جابه‌جایی خطکش‌ها و ساختمان سازه با روابط تحلیلی موجود مقایسه

مراجع

- [1] Ito, S., et al., *Measurement of form error of a probe tip ball for coordinate measuring machine (CMM) using a rotating reference sphere*. Precision Engineering, 2020. **61**: p. 41-47.
- [2] Montazerian, A., J.A. Øverli, and S. Goutianos, *Thermal conductivity of cementitious composites reinforced with graphene-based materials: An integrated approach combining machine learning with computational micromechanics*. Construction and Building Materials, 2023. **395**: p. 132293.
- [3] Tavoosi J, Shirkhani M, Azizi A. Control engineering solutions during epidemics: A review. International Journal of Modelling, Identification and Control. 2021;39(2):97-106.
- [4] Balsamo, A., D. Marques, and S. Sartori, A method for thermal-deformation corrections of CMMs. CIRP annals, 1990. 39(1): p. 557-560.
- [5] Štrbac, B., et al., Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments. Measurement, 2020. 158: p. 107692.
- [6] Mian, N.S., S. Fletcher, and A. Longstaff, Reducing the latency between machining and measurement using FEA to predict thermal transient effects on CMM measurement. Measurement, 2019. 135: p. 260-277.
- [7] Lin, H., F. Keller, and M. Stein, Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements. Measurement, 2020. 151: p. 107110.
- [8] Sang, Y., Y. Yan, C. Yao, and G. He, A new scanning lines distribution strategy for the form error evaluation of freeform surface on CMM. Measurement, 2021. 181: p. 109578.
- [9] Ibaraki, S. and R. Okumura, A machining test to evaluate thermal influence on the kinematics of a five-axis machine tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021. 163: p. 103702.
- [10] Lee, K.-H. and G.J. Yun, Design optimization of thermally conductive support structure for laser powder-bed fusion process with part-scale thermal history. Additive Manufacturing, 2022. 51: p. 10262

