



بررسی ارتعاشات پرهای توربین با دی با استفاده از ویدئوگرامتری

سینا جراحی زاده^{۱*}، فرشید فرنود احمدی^۲

۱- دانشجوی دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه نقشه برداری دانشگاه تبریز

چکیده:

امروزه کنترل کیفیت نقش مهمی در بازده محصولات صنعتی دارد. یکی از ابعاد کنترل کیفیت، کنترل کیفیت هندسی محصولات صنعتی می‌باشد. به طور کلی سیستم‌های اندازه‌گیری صنعتی را می‌توان به روش‌های ژئوماتیکی و غیرژئوماتیکی دسته بندی نمود. فتوگرامتری برد کوتاه روش ژئوماتیکی و تکیکی برای اندازه‌گیری دقیق موقعیت سه‌بعدی نقاط می‌باشد. ویدئوگرامتری به عنوان ساخه‌ای از فتوگرامتری برد کوتاه توانایی اندازه‌گیری دقیق موقعیت سه‌بعدی نقاط اجسام متحرک را دارا می‌باشد. بررسی ارتعاشات سازه‌های صنعتی متحرک و بهویژه سازه‌های دور به منظور جلوگیری از آسیب یا افزایش بهره‌وری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. توربین با دی به عنوان یک سازه صنعتی دور تولید کننده انرژی الکتریکی، نمونه‌ای از این سازه‌ها می‌باشد و بررسی ارتعاشات پرهای آن به جهت بالا باردن بازدهی مورد توجه می‌باشد. در این تحقیق، ضمن تشریح روش مناسب جهت اندازه‌گیری مختصات سه‌بعدی سازه‌های صنعتی متحرک با استفاده از ویدئوگرامتری، نتایج حاصل از بکارگیری روش ارائه شده برای بررسی ارتعاشات پرهای توربین با دی تبیین شده است.

واژه‌های کلیدی: فتوگرامتری، ویدئوگرامتری، ارتعاش، توربین با دی.

۱- مقدمه

امروزه کنترل کیفیت هندسی قطعات ساخته شده در صنعت، یکی از ارکان اصلی و مورد توجه برای تولید محصولاتی با کیفیت بالا می‌باشد. اهمیت فرآیند کنترل کیفیت، زمانی افزایش می‌باید که محصولات ساخته شده خود برای کارهای دقیق و ظریف مورد استفاده قرار گیرند. در این حالت وجود خطای در تولید یک محصول دیگر به معنای کاهش کارایی محصول نخواهد بود، بلکه در عمل به معنای عدم دستیابی به هدف مورد نظر در تولید محصول خواهد بود. به طور کلی در مورد تولیدات صنعتی، کیفیت دو مولفه دارد که عبارت انداز [۱]:

۱- کیفیت طراحی

۲- کیفیت انطباق

ابزارهایی که جهت کنترل کیفیت به کار می‌روند باید به گونه‌ای انتخاب شوند که هزینه سیستم کنترلی تا حد امکان کاهش یابد، دقت مورد نیاز را در اختیار ما قرار دهد و توانایی بررسی انطباق بین، محصول تولید شده با مشخصات فنی محصول یا همان تلورانس‌ها را دارا باشند، که تلورانس‌ها خود به دو دسته تلورانس‌های هندسی و تلورانس‌های ابعادی دسته بندی می‌شوند [۱]. به عنوان مثال بررسی انطباق محصولی به شکل مکعب، با شکل واقعی مکعب تلورانس هندسی و میزان انطباق ابعاد محصول تولید شده با محصول اولیه (یا طراحی) تلورانس ابعادی می‌باشد.

روشهای اندازه گیری صنعتی را می‌توان به روش‌های ژئوماتیکی یا غیرژئوماتیکی دسته بندی نمود. از جمله روش‌های غیرژئوماتیکی می‌توان، ماشین اندازه گیری مختصات (CMM^۱) و ژئوماتیکی فتوگرامتری بردکوتاه، لیزر اسکنر و سیستم‌های نقشه برداری را نام برد [۲]. از جمله این سیستم‌هایی که در تعدادی از تحقیقات پیشین برای اندازه گیری‌های صنعتی استفاده شده است، می‌توان سیستم‌های زیر را نام برد:

۱- سیستم اندازه گیری تماسی- نوری که برای اندازه گیری و تجزیه هندسه اشیا، طراحی و پیاده شده است. این سیستم متشکل از دقت اندازه گیری تماسی^۲ با توجه به شناسایی نقاط اندازه گیری و سرعت میدان نوری ساخت یافته^۳ می‌باشد، که این سیستم جزء روش‌های اسکن نور می‌باشد و برای بهبود روش‌های اندازه گیری به کار می‌رود [۳].

۲- سیستم اندازه گیری سه بعدی مبتنی بر نور ساخت یافته تک رنگ^۴: این سیستم از پروژکتورهای عکس برداری و دوربین‌های فیلم برداری تشکیل شده که تطبیق بین عکس‌ها با استفاده از الگوهای نوری صورت می‌گیرد. نتیجه تست نشان داده است که تفاوت دقت بین این روش و CMM حدود ۰/۱۲ میلی متر می‌باشد [۴].

۳- سیستم اندازه گیری یکپارچه‌ای که با تلفیق CMM، سنسور نور ساخت یافته^۵، یک کاوشگر ماسه^۶ و یک میز دوار^۷ ارایه شده است. این روش میتواند بر برخی از اشکالات یک سنسور نور ساخت یافته تجاری، مانند: کالیبراسیون پارامترهای بیرونی و تناب از پارامترهای ذاتی غلبه کند [۵].

¹ coordinate measuring machines

² accuracy of contact measurement

³ speed of full-field structure

⁴ monochromatic structured light patterns

⁵ structured-light sensor

⁶ trigger probe

⁷ rotation of the table

اما این سیستم ها توانایی اندازه گیری اجسام کوچک و CMM ها نهایتاً اجسام تا حجم 100 متر مکعب را دارند و نمی توانند برای اندازه گیری اجسام بزرگ استفاده شوند. با این حال زمان اندازه گیری اجسام بزرگ همیشه امکان بردن اجسام بزرگ به این CMM ها وجود ندارد. به همین دلایل برای اندازه گیری اجسام بزرگ و یا غیرقابل حمل، سیستم های اندازه گیری قابل حمل میتوانند بهترین راه حل باشند [۶].

در این میان فتوگرامتری بردکوتاه می تواند به عنوان یک ابزار کارآمد مطرح باشد. فتوگرامتری بردکوتاه روشی است برای مدل سازی سه بعدی جسم، اندازه گیری هندسی و محاسبه مختصات سه بعدی نقاط استفاده از دو یا چند عکس که دارای پوشش می باشد. به طور کلی یک سیستم فتوگرامتری به عنوان یک سیستم با عملکرد خوب در سه خصوصیت مدلسازی سه بعدی، توانایی دست یابی به دقت و صحت بالا و تعیین میزان اعتمادپذیری شناخته شده است [۷].

اصطلاح ویدئوگرامتری که تقریباً از ۲۰ سال پیش معرفی شده است، به معنای ضبط و نمایش همزمان تصاویر حاصل شده از چند وسیله ویدئویی و پردازش آنها با استفاده از الگوریتم های توسعه یافته در فتوگرامتری می باشد [۸].

در ویدیوگرامتری، تصاویر به صورت متوالی که اصطلاحاً یک سکانس گفته می شود، ضبط می شوند. بنابراین در این جا عملأً از نظر تعداد تصاویر محدودیتی نداریم. در طول سالهای گذشته ویدیوگرامتری به یک تکنیک اندازه گیری بسیار مناسب برای کاربردهایی مانند: اندازه گیری در تونل باد [۹]، معماری [۱۰]، ردبایی ذرات [۱۱]، علوم دریایی [۱۲]، کاربردهای صنعتی [۱۳]، نقشه برداری متحرک [۱۴]، تحلیلهای جنایی مثل شناسایی مجرمین [۱۵] و پژوهشی [۲۰] تبدیل شده است.

برخی از محصولات صنعتی متحرک می باشند و نیاز است در حالت متحرک اندازه گیری های هندسی بر روی محصول صورت گیرد و ویدئوگرامتری این توانایی را دارد، ویدئوگرامتری می تواند به عنوان راهکار مناسبی برای اندازه گیری بر روی محصولات متحرک مطرح گردد.

یکی از سازه های دواری که امروزه جهت تولید انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته توربین های بادی می باشند، از طرفی امروزه بررسی ارتعاشات در انواع سازه های دوار همانند توربین های بادی به دلایل مختلف از جمله مشخص شدن میزان تطبیق بازه های کاری توربین (سرعت دورانی و فرکانس های طبیعی) از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این تحقیق با توجه به این که توربین بادی خود اهمیت بالایی در تولید انرژی دارد و از طرفی یک سازه دوار است، ممکن است در زمان دوران پرهای آن دچار ارتعاش و در نهایت خمش شوند و میزان بازدهی را کاهش دهد

با توجه به لزوم کنترل کیفیت توربین در محل احداث و قابلیت حمل سیستم ویدئوگرامتری، هزینه پایین، توانایی دست یابی به دقت و صحت بالا، تعیین میزان اعتماد پذیری، توانایی خودکار شدن سیستم کنترل، عدم پیچیدگی و توانایی اندازه گیری جسم در حرکت و نیاز به این قابلیت در این تحقیق از فتوگرامتری بردکوتاه به شکل ویدئوگرامتری استفاده خواهد شد.

۲- متداول‌تری

برای اندازه گیری با استفاده از ویدئوگرامتری نیاز به ثبت حرکت توربین با استفاده از چند ویدئو می باشد. به منظور به دست آوردن نتایج بهتر و دقیق تر لازم است عملیات تارگت گذاری انجام شود که عملیات تارگت گذاری با توجه به

نظر کارشناسان در نقاط کلیدی باید انجام بگیرد. عملیات تارگت گذاری علاوه بر نقاط کلیدی باید در نقاط ثابت اطراف توربین صورت بگیرد که در صورت عدم وجود نقاط ثابت در اطراف توربین باید نقاط ثابت ایجاد شوند.

پس از عملیات تارگت گذاری باید از حرکت پره های توربین، زمانی که به سرعت مشخص شده برسد، توسط چندین دوربین ویدئویی، تصویربرداری گردد. تهیه ویدئو از محصول متحرک مستلزم همزمان بودن ویدئوهای گرفته شده با دوربینهای ویدئویی می باشد.

پس از ثبت ویدئوهای تصویری هر ویدئو را استخراج کرد و سپس باید فریم های همزمان را انتخاب کرد.

با استفاده از فریم های تصویری همزمان شده، عملیات مثلث بندي صورت میگیرد و بر اساس معادلات شرط هم خطی پرتوهای متناظر تقاطع داده می شود و مختصات نقاط در فضای شی محاسبه می گردد [۱۶].

در فرایند کار بر اساس طراحی پس از استخراج مختصات نقاط در حال حرکت، با توجه به این که استخراج مختصات در حالت ثابت دقت بالایی دارد، به منظور ارزیابی دقت و برای به دست آوردن داده های مورد نیاز برای مقایسه در حالت ثابت توربین نیز تصویر برداری شد.

مختصات تعدادی از نقاطی که اطمینان داشتیم فاصله بین آن ها چه در حالت متحرک و چه در حالت ثابت برابر است و تغییری نمی کند مانند نقاط روی محور گردش پره توربین، در حالت ثابت استخراج شد و فاصله بین نقاط اندازه گیری شده در حالت ثابت مبنایی برای مقایسه فاصله در حالت متحرک و ارزیابی دقت شد. که به منظور به دست آوردن دقت از رابطه (۱) استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta r^2}{n}} \quad (1)$$

که در اینجا Δr اختلاف فاصله بین نقاط ثابت انتخاب شده و n تعداد نقاط می باشد.

در نهایت پس از استخراج مختصات نقاط در حال حرکت در زمان های مختلف ، با مقایسه آنها مقدار ارتعاشات (خمش) پره توربین به دست می آید.

۳- انجام عملیات اندازه گیری بر روی توربین بادی

در این تحقیق از دو دوربین سونی 300 hx و نیکون d5200 استفاده شده است که در حدود فاصله ۶ متری از توربین قرار گرفته اند. عملیات تارگت گذاری علاوه بر نقاط ثابت اطراف توربین، در قسمتهای مشخص شده با پیکان در شکل (۱) بر روی توربین و با توجه به نظر کارشناس صورت گرفته است.



شکل ۱: تصویر نقاط تارگت گذاری بر روی توربین

به منظور همزمان کردن دو ویدئو از دو روش شامل:

۱- استفاده از یک کورنومتر

۲- هم زمان کردن ساعت دو دوربین

می توان استفاده کرد که در این تحقیق از متد اول استفاده شد.

سپس حدود ۳ دقیقه از حرکت توربین تصویر برداری شد. برای استخراج فریم های تصویری از نرم افزار Free Video To jpg Converter استفاده گردید و از زوج فریم هایی که دارای زمان برابر بودند، جهت استخراج مختصات استفاده شد.

پس از استخراج مختصات نقاط مشخص شده بر روی توربین در حال حرکت، بردار اختلاف بین مختصات نقطه ثابت وسط توربین و مختصات تمامی نقاط روی پره ها در زمان های مختلف توسط روابط (۲) محاسبه گردید.

$$\Delta X = X_p - X_c$$

$$\Delta Y = Y_p - Y_c \quad \text{روابط (۲)}$$

$$\Delta Z = Z_p - Z_c$$

که در این رابطه اندیس c برای نقطه وسط توربین و اندیس p برای نقاط علامت گذاری شده روی پره های توربین می باشد.

به منظور ارزیابی دقت، فاصله نقاطی که در شکل (۲) با پیکان نشان داده شده در حالت ثابت و متحرک استخراج گردید که در صورت عدم وجود خطای باید فاصله این نقاط برابر می بود اما این تفاوت به وجود آمده نشان دهنده بی دقتی یا خطای می باشد که تقریباً مقدار $\frac{1}{3}$ سانتی متر بود. جدول (۱) طول های اندازه گیری شده در حالت ثابت و متحرک را نشان می دهد.



شکل ۲: تصویر نقاط استفاده شده برای تعیین دقیق سیستم

جدول ۱: فواصل اندازه گیری شده بین دو نقطه مشخص شده

فواصل	فاصله بین نقطه ۱ و ۲	فاصله بین نقطه ۱ و ۳	فاصله بین نقطه ۲ و ۳
ثابت	۶/۸۹۹	۷/۲۶۱	۶/۷۰۴
متحرک	۶/۵۱۶	۷/۴۴۸	۷/۰۱۲

درنهایت با مقایسه نظیر به نظیر بردارهای بدست امده در زمان های مختلف میزان خمش حساب شد. که نتایج این محاسبات برای یک نقطه نمونه از هر پره در جهت عمود بر پره در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: میزان ارتعاش برای یک نقطه در جهت عمود بر پره

پره زمان	۱	۲	۳
۱	-۳/۲۸۰	-۴/۷۳۷	-۰/۰۲۶
۲	-۴/۶۸۷	-۴/۳۹۹	-۱/۱۰۲
۳	-۴/۲۸۱	-۳/۷۸۵	۰/۵۷۴
۴	-۳/۹۷۵	-۲/۶۳۸	۲/۴۰۶
۵	-۳/۳۳۵	-۱/۴۲۵	۲/۱۱۲
۶	-۲/۵۸۱	۰/۰۲۴	۵/۰۵۷
۷	-۱/۷۸۴	۱/۰۷۲	۴/۷۸۰
۸	-۱/۱۳۳	۱/۷۷۸	۸/۵۸۷
۹	-۰/۴۳۱	۲/۸۱۰	۸/۰۴۲
۱۰	-۰/۵۶۷	۲/۸۶۵	۹/۳۲۵

۴- نتایج و پیشنهادها

این تحقیق نشان می دهد که فتوگرامتری بر دکوتاه در حالت ویدئویی آن ، روش مناسبی برای تعیین جابجایی و تغییر شکل اجسام متحرک می باشد. همان گونه که در این تحقیق دیده شد این روش برای توربین بادی $0/3$ سانتی متر دقیق داشت که بیشترین جابجایی به مقدار $9/351$ سانتی متر را که در بازه دقیق سیستم اندازه گیری بود شناسایی کرد.

ارزیابی این روش نشان داد که :

۱- مقدار بیشینه خطأ در مقایسه حالت ثابت و حالت متحرک $\frac{1}{3}$ سانتی متر می باشد.

۲- همان گونه که انتظار می رود ، سیستم فتوگرامتری نیز نشان می دهد که با دور شدن از مرکز ، میزان ارتعاشات و تغییرشکل افزایش می یابد که بیشترین ارتعاش یک پره مقدار 0.642 سانتی متر برای نقطه نزدیک وسط توربین ، مقدار 4.562 سانتی متر نقطه وسط توربین و مقدار 3.51 سانتی متر برای نقطه انتهایی پره در جهت عمود بر پره می باشد.

۳- میزان ارتعاشات نشان داد که بیشترین ارتعاش در جهت عمود بر هر پره می باشد.

۴- با توجه به اینکه ارتعاشات ، بیشتر از مقدار بیشینه خطای سیستم می باشند ، پس می توان گفت پرههای توربین ارتعاش داشته و می توان به مقادیر بدست آمده به عنوان تغییر شکل واقعی اعتماد کرد.

با توجه به این که میزان تغییر شکل پره توربین در امتداد سه بعد به همراه زمان مربوط به آن قابل اندازه گیری است ، خروجی این کار می تواند به عنوان ورودی برای تحلیل سری های زمانی ، مثلا استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی جهت مدل سازی تغییر شکل اجسام متحرک مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] D. C. Montgomery, Statistical quality control. Wiley New York, 2009.
- [2] H. Setan and M. S. Ibrahim, "Precise measurement and 3D modelling for industrial applications," in Proceedings of 11th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Santorini (Greece), 2003, pp. 25-38.
- [3] J. Ślądek, P. M. Błaszczyk, M. Kupiec, and R. Sitnik, "The hybrid contact-optical coordinate measuring system," Measurement, vol. 44, no. 3, pp. 503-510, 2011.
- [4] J. Xu, N. Xi, C. Zhang, J. Zhao, B. Gao, and Q. Shi" ,Rapid 3D surface profile measurement of industrial parts using two-level structured light patterns," Optics and Lasers in Engineering, vol. 49, no. 7, pp. 907-914, 2011.
- [5] X. Zexiao, W. Jianguo, and Z. Qiumei, "Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 45, no. 12, pp. 1474-1486, 2005.
- [6] W. Cuypers, N. Van Gestel, A. Voet, J.-P. Kruth, J. Mingneau, and P. Bleys, "Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology," Optics and Lasers in Engineering, vol. 47, no. 3, pp. 292-300, 2009.
- [7] A. Gruen, "Digital close-range photogrammetry: progress through automation," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 3 , pp. 122-135, 1994.
- [8] F. Remondino and A. Roditakis, "Human figure reconstruction and modeling from single image or monocular video sequence," in 3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on, 2003 ,pp. 116-123: IEEE.
- [9] S. S. Graves and A. W. Burner, "Development of an intelligent videogrammetric wind tunnel measurement system," in International Symposium on Optical Science and Technology, 2001, pp. 120-131: International Society for Optics and Photonics.

- [10] S.-Y. Lin and J. P. Mills, "A non-contact monitoring system for investigating as-built membrane roof structures," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, pp. 161-166, 2006.
- [11] J. Willneff, "A spatio-temporal matching algorithm for 3 D particle tracking velocimetry," Mitteilungen- Institut fur Geodasie und Photogrammetrie an der Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich, 2003.
- [12] M. R. Shortis and E. S. Harvey, "Design and calibration of an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna populations," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, pp. 792-799, 1998.
- [13] G. Ganci and H. Handley, "Automation in videogrammetry," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, pp. 53-58, 1998.
- [14] R. Roncella, F. Remondino, and G. Forlani, "Photogrammetric bridging of GPS outages in mobile mapping," in Electronic Imaging 2005, 2005, pp. 308-319: International Society for Optics and Photonics.
- [15] L. M. Klasen and O. Fahlander, "Using videogrammetry and 3D image reconstruction to identify crime suspects," in Enabling Technologies for Law Enforcement and Security, 1997, pp. 162-169: International Society for Optics and Photonics.
- [16] K. B. Atkinson, "Close range photogrammetry and machine vision," 2001.