مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11، ص‌ص 377-386

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

آنالیز مودال پره توربین بادی با استفاده از ماشین بینایی

سید جواد حسینی نیا[1]، خلیل خلیلی[2]،سید محمد امام[3*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
*بیرجند، کدپستی 9719866981، sy.m.emam@birjandut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 مرداد 1394
پذیرش: 02 مهر 1394
ارائه در سایت: 17 آبان 1394

کلید واژگان:
آنالیز مودال عملیاتی
بینایی استریو
پره توربین بادی
ماشین بینایی

چکیده

آزمون مودال یکی از روش‌های کاربردی جهت شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها می‌باشد. بازرسی عملکرد سازه جهت جلوگیری از قرارگیری در شرایط تشدید و تخریب، از طریق انجام این آزمون و به‌دست آوردن مودهای ارتعاشی، امکان‌پذیر می‌باشد. با توجه به این‌که هر نقطه از سازه تحت ارتعاش، دارای جابجایی، سرعت و شتاب خاص است، با اندازه گیری هرکدام از این سه مورد در یک بازه زمانی مشخص و پردازش داده‌های مربوط به آن، می‌توان پارامترهای مودال سازه را به دست آورد. در این تحقیق از روش غیر تماسی بینایی استریو جهت داده-برداری از پره توربین بادی 2.5kW به طول 3m، تحت آزمون مودال عملیاتی، استفاده شده است. ابتدا فرایند کالیبراسیون دوربین‌ها و سپس استخراج داده‌های سه‌بعدی از تصاویر ضبط شده حین آزمون، صورت گرفته است و پس از آن با تحلیل داده‌ها، پارامترهای مودال پره استخراج گردیده. در آخر، پارامترهای مودال به دست آمده توسط سیستم بینایی استریو با پارامترهای مودال به دست آمده از دو روش آنالیز المان محدود و آزمون شتاب سنج مقایسه شده‌اند و مشخص شد سیستم بینایی جهت یافتن فرکانس طبیعی اولین مود مناسب بوده و از صحت کافی برخوردار است. همچنین فرکانس طبیعی اولین مود در مقایسه با نتایج المان محدود و روش شتاب سنج، به ترتیب 10.36% و 2.67% اختلاف نشان داده است.

Modal analysis of wind turbine blade using machine vision

Sayed Javad Hosseininia[1], Khalil Khalili[1], Sayed Mohammad Emam[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran
*P.O.B. 9719866981, Birjand, Iran, sy.m.emam@birjandut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 August 2015
Accepted 24 September 2015
Available Online 08 November 2015

Keywords:
Operational modal analysis
stereo vision
wind turbine blade
machine vision

ABSTRACT

Modal analysis is one of the applicable methods used to identify the dynamic characteristics of structures. Inspection of structures to avoid resonance conditions can be achieved by extracting vibration modes using modal analysis. Since every point of the vibrating structure has its own characteristics such as the displacement, speed and acceleration, the measurement of these parameters in a specific time interval can be used to extract modal parameters. In this study, stereo vision as a non-contact measuring system is used to obtain the displacement of several points of the blade of a 2.5kW wind turbine with a length of 3m under the operational modal condition. At first, the camera calibration process is performed and then the three-dimensional data of the turbine blade are extracted from images recorded during the test. Consequently, modal parameters of the blade are calculated by analyzing the data. Finally, modal parameters obtained by three different methods including the stereo vision system, the finite element analysis and the testing accelerometer are compared. The results show that visually obtained data are sufficiently accurate to find the natural frequency of the first mode of the blade. The first natural frequency mode extracted by the stereo vision system shows a difference of 10.36% and 2.67% compared to those obtained by finite element method and the accelerometer, respectively.

1- مقدمه

کاهش روز افزون منابع سوخت‌های فسیلی از یک سو و بحران زیست محیطی به‌وجود آمده ناشی از افزایش مصرف سوخت از سوی دیگر، کارشناسان مربوطه را به سوی تحقیقات بیشتر در خصوص اکتشاف منابع جدید انرژی دوستدار محیط زیست و تجدیدپذیر رهنمون کرده است. توربین‌های بادی از جمله سیستم‌های مهم تولید انرژی با استفاده از نیروی تجدید پذیر باد می‌باشند. عوامل متعددی در طراحی توربین‌های بادی جهت بالا بردن راندمان تولید انرژی وجود دارد. طراحی و تحلیل ایرفویل پره‌ها، مسأله خستگی سازه و بروز پدیده تشدید در پره توربین برخی از پارامترهای مهم در این راستا هستند، لذا تحلیل عملکرد پره‌ها با استفاده از آزمون‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از آزمایشاتی که جهت بررسی رفتار دینامیکی روی پره‌های توربین بادی صورت می‌گیرد آنالیز مودال پره‌ها و به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی پره در دوره‌های کاری می‌باشد تا بدین وسیله محدوده عملکرد مطمئن پره به لحاظ عدم بروز پدیده تشدید در شرایط مختلف کاری به‌دست آید. علاوه‌بر آزمون‌های ارزیابی جهت بررسی ظرفیت تحمل بار سازه تحت بارهای بحرانی و آزمون‌های مرتبط با

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. J. Hosseininia, K. Khalili, S. M. Emam, Modal analysis of wind turbine blade using machine vision, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 377-386, 2015 (in Persian)

خستگی آن، آنالیز مودال از دیگر آنالیزهایی است که به‌صورت رایج جهت تعیین مشخصات دینامیکی پره مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر با توجه به حرکت به سوی ساخت پره‌های منعطف‌تر و طویل‌تر، مسائل پایداری در سازه‌های پره توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال یک مساله شناخته شده در مسائل پایداری، وقوع پدیده ناپایداری در جهت لبه است که می‌تواند نهایتا به از کار افتادگی کل مجموعه منجر شود. یکی از مهم‌ترین دلایل شکست پره توربین بادی، قرار گرفتن در محدوده ارتعاشی تشدید می‌باشد. علت ایجاد پدیده تشدید در شرایط عملیاتی پره‌ها، قرار گرفتن محدوده ارتعاش پره در محدوده فرکانسی طبیعی و مودهای ارتعاشی آن می‌باشد. بنابراین جهت جلوگیری از این پدیده، باید مودهای ارتعاشی که تحت آن پره وارد محدوده تشدید می‌شود شناسایی گردند و از قرار گرفتن ارتعاش پره در آن محدوده فرکانسی جلوگیری شود. به‌طور خلاصه ضرورت و اهمیت بحث تحلیل مودال پره توربین بادی به شرح زیر می‌باشد [1].

1- یافتن فرکانس‌های طبیعی پره جهت دوری از تعداد دورهایی که سبب تشدید شده و یا در نزدیکی دورهای بحرانی کار می‌کنند.
2- اصلاح پروفیل پره جهت اجتناب از تشدید.
3- افزایش راندمان توربین و عملکرد بهتر در اثر کنترل تغییر شکل‌های پره تحت تاثیر ارتعاش و در نتیجه عمر بیشتر پره و هزینه پایین تعویض و یا تعمیر پره‌ها.

تحقیقات زیادی در زمینه آنالیز مودال پره توربین بادی انجام شده است که همگی سعی بر شناسایی رفتار دینامیکی پره در شرایط مختلف عملیاتی داشته‌اند. همچنین، روش‌های متفاوتی جهت انجام آزمون مودال ارائه گردیده است. به‌طورکلی، آزمون مودال روی پره توربین بادی شامل تحریک سازه پره و اندازه‌گیری شتاب، سرعت و یا جابجایی نقاط مختلف آن در بازه‌ای مشخص از زمان می‌باشد. از طرفی، با توجه به این‌که هر نقطه از پره مرتعش، دارای جابجایی، سرعت و شتاب مختص به خود در زمان می‌باشد، با اندازه گیری هرکدام از این سه مورد در یک بازه زمانی مشخص و پردازش داده‌های مربوط به آن، می‌توان پارامترهای مودال سازه را به‌دست آورد. بنابراین با توجه به امکان دست یافتن به پارامترهای مودال پره از طریق اندازه‌گیری جابجایی‌های سه بعدی نقاط پره در بازه‌ای از زمان، در این تحقیق از تکنیک غیرتماسی بینایی استریو جهت داده برداری از نقاط پره تحت آزمون مودال استفاده شده است. در تحقیق صورت گرفته توسط آقای آگویار و همکارانش، صحت روش‌های متفاوت کالیبراسون دوربین‌ها، روش‌های اندازه‌گیری در بینایی استریو، میزان خطا در کاربردهای خاص و اندازه‌گیری سه‌بعدی بدنه خودرو مورد بررسی قرار گرفته است [2]. از روش استریو جهت اندازه‌گیری فاصله و بازیابی مدل سه بعدی اشیاء استفاده شده است [3]. همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC) و پیشرفت‌های جدید آن و همچنین تصاویر دینامیکی، فرصت‌های جدیدی را برای بازرسی، نظارت بر سلامت ساختار و همچنین آزمون‌های ارتعاشی در پره توربین بادی ایجاد کرده است [4]. در تحقیقات ارائه شده در این زمینه، مقدمه‌ای بر استفاده از بینایی استریو جهت اندازه‌گیری جابجایی‌های سه بعدی توربین‌ها تحت شرایط معمول و بحرانی و همچنین شرایط اجرای روش روی توربین بادی ارائه گردیده است [5]. اندازه پره توربین بادی تاثیر زیادی در میزان تولید انرژی دارد، از این‌رو جهت اندازه‌گیری تغیر شکل‌های وارده بر توربین بادی تحت شرایط عملیاتی، تکنیک‌های ویدئومتری مورد بررسی و معرفی شده است [6]. در تحقیق صورت گرفته روی سازه تحت ارتعاش در محدوده فرکانسی 12Hz به‌کمک دو عدد دوربین با سرعت 40 تصویر بر ثانیه، ارتعاشات سازه مورد بررسی قرار گرفته است که سیگنال ارتعاش به‌دست آمده از روش هدف تحقیق با نتاج روش لیزر منطبق بوده است [7]. بررسی و بهبود صحت اندازه‌گیری و داده-برداری توسط پرنده‌های بدون سرنشین و به کمک سیستم استریو در حالت وجود لرزش، انجام شده است [8]. روش‌های آنالیز مودال بر اساس تصاویر اپتیکی، شتاب سنج و لیزر، با اندازه گیری پارامترهای دینامیکی یک سازه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که در نتیجه آن، تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش اپتیکی و دیگر روش‌ها به دست آمده است [9].

در این تحقیق با اندازه گیری ابعاد قطعات استاندارد دارای دقت معلوم، درصد خطای سیستم در اندازه گیری ارتعاشات سه بعدی ارائه گردیده است. در نهایت به کمک بینایی استریو آزمون مودال تجربی و استخراج پارامترهای مودال پره توربین بادی تحت شرایط عملیاتی، در پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد صورت گرفته است و نتایج به‌دست آمده از روش ماشین بینایی و دو روش شتاب‌سنج و آنالیز المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه، تکنیک بینایی استریو و طریقه به کارگیری آن در انجام آزمون مودال روی پره توربین بادی ارائه گردیده است.

2- بینایی استریو

سیستم‌های داده برداری جهت کسب اطلاعات سه‌بعدی اشیاء، شامل دو گروه تماسی و غیر تماسی می‌باشند. سیستم‌های غیرتماسی به دو گروه فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند. در یک سیستم غیرفعال، جهت داده برداری و کسب اطلاعات سه بعدی اشیاء هیچ گونه منبع انرژی خارجی مانند نور لیز به کار گرفته نمی‌شود و از حرکات و سایه‌های سطوح و یا سیستم بینایی استریو جهت کسب داده‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود. در مقابل، یک سیستم فعال جهت کسب داده‌های سه‌بعدی از یک انرژی خارجی مانند امواج صوتی یا نور لیزر استفاده می‌کند. از جمله روش‌های فعال می‌توان به مثلث بندی، پالس لیزر و تداخل سنجی اشاره نمود [10]. جهت تهیه تصاویر استریو دو روش وجود دارد. در یک روش، تصویر گیری به‌کمک دو عدد دوربین و به طور هم‌زمان صورت می‌گیرد و در روش دیگر به‌وسیله یک عدد دوربین از دو نمای مختلف از شئ تصویر گرفته می‌شود. در نتیجه در روش دوم به هنگام جابجایی دوربین، برخی خصوصیات صحنه تغیر می‌کنند [3]. بنابراین در بررسی یک سازه تحت ارتعاش ناگزیر به استفاده از روش اول می‌باشیم.

2-1- مدل تصویر برداری دوربین

مدل تصویر برداری دوربین، فرایند نگاشت فضای سه بعدی به دو بعدی می‌باشد. بنابراین طی این نگاشت اطلاعات مربوط به عمق تصویر از دست می‌رود که با استفاده از بینایی استریو اطلاعات مربوط به عمق تصویر بازیابی می‌شوند. شکل1 هندسه تصویر برداری دوربین را نشان می‌دهد. در این سیستم دستگاه مختصات دوربین با (x,y,z) و سیستم دستگاه مختصات کلی با (X,Y,Z) مشخص شده است. بنابراین از تشابه دو مثلث CNP و COQ داریم:

$$\frac{x}{\mathrm{f}} = -\frac{X}{z-\mathrm{f}} = \frac{X}{\mathrm{f}-z} \quad (1)$$

$$\frac{y}{\mathrm{f}} = -\frac{Y}{z-\mathrm{f}} = \frac{Y}{\mathrm{f}-z} \quad (2)$$

از روابط (1) و (2) داریم:

$$x = \frac{\mathrm{f}X}{\mathrm{f}-z} \quad (3)$$

$$y = \frac{\mathrm{f}Y}{\mathrm{f}-z} \quad (4)$$

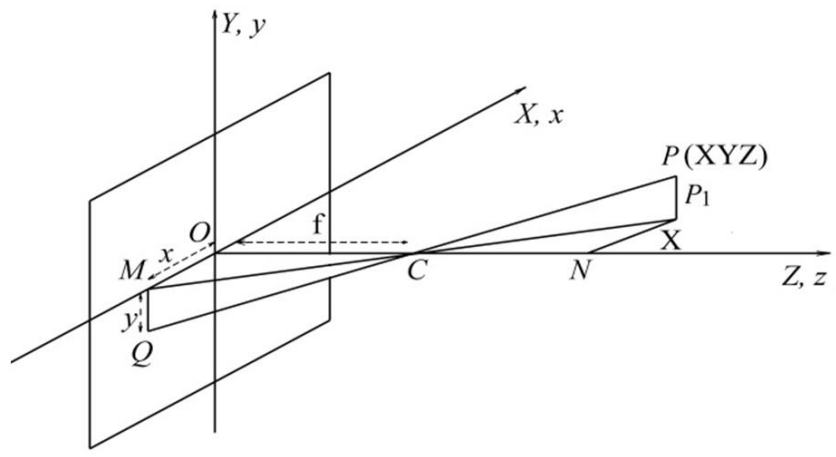

Fig. 1 The geometry of a camera model

شکل1 هندسه تصویر برداری دوربین

با توجه به معادلات (3) و (4) امکان به‌دست آوردن بعد سوم نقطه (مختصات راستای Z) وجود ندارد. بنابراین برای محاسبه مختصات کلی نیاز به استفاده از سیستم بینایی استریو می‌باشد.

2-2- مدل ریاضی تصویر برداری استریو

شکل 2 هندسه تصویربرداری استریو را نشان می‌دهد. در این سیستم فرض بر این گرفته می‌شود که دوربین‌ها کاملا مشابه یکدیگر بوده، صفحه سنسور دوربین‌ها در راستای یکدیگر قرار دارند و فاصله کانونی برابر با f می‌باشد [11]. از معادله (1) داریم:

$$X_1 = \frac{x_1}{\mathrm{f}}(\mathrm{f} - Z_1) \tag{5}$$

$$X_2 = \frac{x_2}{\mathrm{f}}(\mathrm{f} - Z_2) \tag{6}$$

اندیس‌های 1 و 2 برای (X,Y,Z) به معنی انطباق سیستم مختصات کلی بر مختصات دوربین چپ و راست می‌باشد. با توجه به این که دستگاه 2 نسبت به 1، به اندازه B شیفت داده شده است و همچنین با توجه به فرض هم‌راستا بودن دو صفحه سنسور و دوربین داریم:

$$X_2 = X_1 + \mathrm{B} \tag{7}$$

$$Z_2 = Z_1 = Z \tag{8}$$

در نتیجه رابطه زیر که مربوط به محاسبه عمق می‌باشد به دست می‌آید.

$$Z = \mathrm{f} - \frac{\mathrm{fB}}{x_2 - x_1} \tag{9}$$

بنابراین با داشتن x_1، x_2 و f می‌توان بعد سوم تصویر را محاسبه نمود.

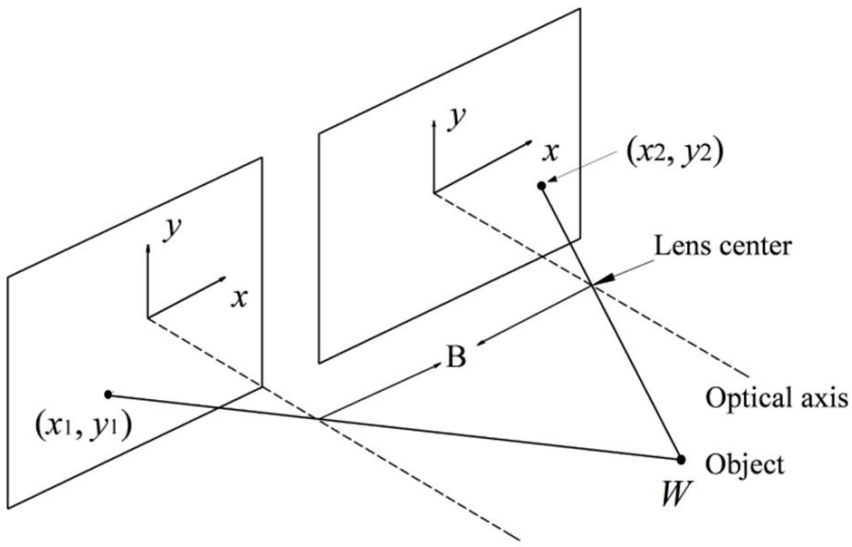

Fig. 2 The geometry of stereo imaging system

شکل2 هندسه تصویر برداری استریو

3- آنالیز مودال عملیاتی

روش‌های مختلفی جهت انجام آزمون مودال وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به شبیه‌سازی اجزاء محدود، استفاده از شتاب‌سنج و همچنین استفاده از کرنش‌سنج اشاره نمود. به‌علت در دسترس نبودن جواب تحلیلی برای سازه‌های پیچیده و همچنین وجود خطاهایی نظیر خطاهای ناشی از به کارگیری تئوری‌ها و فرضیات نامناسب، خطا در مدل کردن جزئیات سازه و عدم اطلاع صحیح از خواص مواد، در شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها مدل‌های تقریبی با مشکلاتی مواجه هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش اجزاء محدود اشاره نمود [12]. روش‌های آنالیز مودال توسط شتاب سنج، مبتنی بر اندازه‌گیری سیگنال ضربه به عنوان ورودی و سیگنال پاسخ به عنوان خروجی بوده و با به‌کارگیری روش‌های متفاوت در پردازش داده‌ها، به استخراج پارامترهای مودال سازه می‌پردازند. بنابراین اولین مشکل در سازه‌های بزرگ و پیچیده، تحریک سازه می‌باشد؛ به‌طوری‌که نیروهای بزرگ جهت تحریک سازه‌های بزرگ نیاز است. این نیروها ممکن است موجب خرابی محلی سازه شده و همچنین بروز رفتار غیرخطی را در پی خواهند داشت [12]. از جمله محدودیت‌های آزمون مودال توسط شتاب سنج، می‌توان به عدم امکان به‌کارگیری آن در شرایط عملیاتی توربین بادی اشاره نمود [13]. همچنین با استفاده از اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در نقاط مختلف سازه به عنوان سیگنال خروجی، آنالیز مودال امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین آنالیز مودال توربین بادی تحت ارتعاش با استفاده از کرنش سنج، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است [14]. در این روش هم به دلیل استفاده از سخت افزارها و ضرورت سیم‌کشی آن‌ها، محدودیت در تعداد نقاط داده‌برداری شده از روی پره توربین وجود دارد.

آنالیز مودال عملیاتی[1](آنالیز مودال فقط پاسخ)، از جمله روش‌های آزمون مودال می‌باشد که جهت شناسایی خصوصیات دینامیکی یک سازه‌ی تحت تحریک اتفاقی و محیطی به‌کار گرفته می‌شود و فقط بر اساس اندازه گیری پاسخ سازه می‌باشد [15]. در تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، مقایسه‌ای بین چندین روش آنالیز مودال عملیاتی و روش‌های سنتی، با اجرای آن روش‌ها روی سازه هلیکوپتر، صورت گرفته است [16]. سیستم‌های انتقال داده بیسیم در انجام آزمون مودال سازه پل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله محدودیت‌های آن می‌توان به عدم امکان داده‌برداری در حوزه وسیعی از سطح سازه و همچنین تغییر پارامترهای مودال سازه‌های سبکتر از پل در اثر جرم تجهیزات فرستنده، اشاره نمود [17]. آزمون مودال عملیاتی سازه پل کابلی توسط سیستم‌های بیسیم مورد بررسی قرار گرفته است که پارامترهای مودال سازه در محدوده فرکانسی 7Hz با دقت قابل قبولی استخراج گردیده‌اند [18].

بینایی استریو از جمله روش‌های غیرتماسی بوده که در مقایسه با روش‌های پیشین دارای بیشترین سرعت داده‌برداری، حجم بسیار بالای داده‌های قابل برداشت از نقاط روی سازه و امکان اندازه‌گیری سه بعدی نقاط، می‌باشد. در تحقیق انجام شده توسط مارکو و همکارانش، از آنالیز تصاویر در انجام آنالیز مودال عملیاتی روی یک سازه فضایی استفاده شده است [19]. با توجه به افزایش روز افزون نیروگاه‌های بادی، نظارت بر سلامت سازه توربین بادی با سرعت بیشتر، دقت کافی و همچنین در حین عملیات تولید انرژی، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. از طرفی در آزمون مودال عملیاتی نیاز به ایجاد شرایط آزمایشگاهی برای پره توربین بادی نمی‌باشد. لذا در این تحقیق روشی

1- Operational modal analysis (OMA)

جهت آنالیز مودال عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است.

3-1- آزمون مودال پره توربین

در آنالیز مودال عملیاتی با استفاده از توابع همبستگی متقاطع[1] بین پاسخ اندازه گیری شده از نقاط روی سازه و یک نقطه مرجع، که یکی از همان نقاط می‌باشد، پارامترهای مودال سازه به‌دست می‌آیند [20].

داده‌های اندازه‌گیری شده از نقاط روی پره می‌توانند در قالب‌های شتاب، سرعت و یا جابجایی باشند. حتی اگر نوع داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های نقطه مرجع متفاوت باشد باز هم آنالیز مودال عملیاتی قابل اجرا خواهد بود. با به‌دست آوردن تابع پاسخ فرکانسی[2] مربوط به هرکدام از نقاط روی پره پارامترهای مودال سازه قابل استخراج است. نمایش قطبی از تابع پاسخ فرکانسی یک نقطه محرک به‌صورت رابطه 10 می‌باشد [21].

$$\ln[H_{ii}(\omega)] = G_{ii}(\omega) - j\emptyset_{ii}(\omega) \tag{10}$$

که $G_{ii}(\omega) = \ln[H_{ii}(\omega)]$ تابع بهره می‌باشد. در نتیجه بخش سمت چپ فرمول 10 می‌تواند بر مجموعه‌ای از جفت توابع انتقال هیلبرت[3] دلالت داشته باشد:

$$\emptyset_{ii}(\omega) = -\widehat{G}_{ii}(\omega) \tag{11}$$

تابع بهره وابسته به تابع چگالی طیف می‌باشد:

$$G_{yy}(\omega_k) = H(\omega_k)G_{ff}(\omega_k)H^H(\omega_k) \tag{12}$$

در نتیجه، با اعمال لگاریتم طبیعی و اجرای تابع پاسخ هیلبرت، فرمول 12 به شکل زیر خواهد بود:

$$H[\ln\left(G_{yiyi}(\omega)\right)] = 2H[\ln|H_{ii}(\omega)|] \tag{13}$$

از ترکیب روابط 11 و 13 داریم:

$$\emptyset_{ii}(\omega) = -\frac{1}{2}H[\ln\left(G_{yiyi}(\omega)\right)] \tag{14}$$

بنابراین در iامین نقطه از سازه، با ارزیابی مدول[4] و فاز توابع از پاسخ توابع چگالی طیفی G_{xixi}، توابع پاسخ فرکانسی به‌دست می‌آیند:

$$|H_{ii}(\omega)|^2 = \frac{|\widetilde{H}_{ii}(\omega)|^2}{G_{fifi}} = \frac{G_{xixi}}{G_{fifi}} \tag{15}$$

$$\emptyset_{ii}(\omega) = -\frac{1}{2}H[\ln(G_{xixi}(\omega))] \tag{16}$$

سپس تابع پاسخ فرکانسی بایاس[5] در iامین نقطه برابر است با:

$$\widetilde{H}_{ii}(\omega) = \sqrt{G_{xixi}(\omega)}e^{j\emptyset_{ii}(\omega)} \tag{17}$$

عبارت خارج از قطر تابع پاسخ فرکانسی از ترکیب بین دو تخمین زننده H_1 و H_2 قابل دست یابی است[22]:

$$H_{ij}(\omega) = \frac{G_{xixj}(\omega)}{H_{ii}(\omega)} \tag{18}$$

یا با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی بایاس داریم:

$$\widetilde{H}_{ij}(\omega) = \frac{G_{xixj}(\omega)}{\widetilde{H}_{ii}(\omega)} \tag{19}$$

بدیهی است که توابع به دست آمده وابسته به نیروی تحریک ورودی می‌باشند. با این‌حال، به‌علت استقلال سطح بایاس تابع پاسخ فرکانسی، پارامترهای مودال پره به دست خواهند آمد [23].

4- تجهیزات سخت افزاری جهت آزمایش تجربی

به طورکلی، در آنالیز مودال کلاسیک دو روش برای تحریک یک سیستم به کار گرفته می‌شود، یکی از این روش‌ها از طریق اعمال ارتعاشات آزاد و دیگری از طریق اعمال ارتعاشات اجباری یا واداشته می‌باشد. تحریک از طریق ارتعاشات اجباری معمولا با استفاده از یک لرزاننده[6] انجام می‌شود که یک موج پیوسته سینوسی به سیستم اعمال می‌کند، اما تحریکی که منجر به ارتعاشات آزاد شود باید به‌طور ناگهانی و از طریق ایجاد یک بار ضربه‌ای تامین شود که این کار می‌تواند از طریق یک چکش صورت پذیرد. در آزمون مودال عملیاتی، از پاسخ سازه به تحریک‌های محیطی استفاده می‌شود و با آنالیز سیگنال خروجی، پارامترهای مودال پره توربین به دست می‌آیند.

4-1- پره توربین و شرایط آزمون مودال

در این تحقیق، جهت انجام آزمون مودال عملیاتی از یک پره توربین بادی با قدرت تولید انرژی 2.5kW و به طول 3m استفاده شده است. پره از قسمت ریشه آن توسط 6 عدد پیچ به سازه‌ای که جهت ایجاد صلبیت کافی در ریشه آن طراحی و ساخته شده، گیره بندی شده است. جهت شناسایی نقاطی مشخص از پره توسط هرکدام از دوربین‌ها، نوارهایی مشکی در جهات طول و لبه پره روی آن قرار داده شده است. شکل 3 نوارهای مشکی ایجاد شده روی پره و شکل 4 سازه‌گیره‌بندی پره را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، جهت اعمال تحریک محیطی روی پره، مقداری جابجایی در جهت پهنا[7] اعمال شده سپس به‌طور ناگهانی رها شده است و تا زمان میرا شدن ارتعاش پره، داده‌برداری از روی آن صورت گرفته است.

4-2- تصویر برداری استریو

دوربین‌های به‌کار گرفته شده در تصویربرداری استریو به مشخصه‌ی

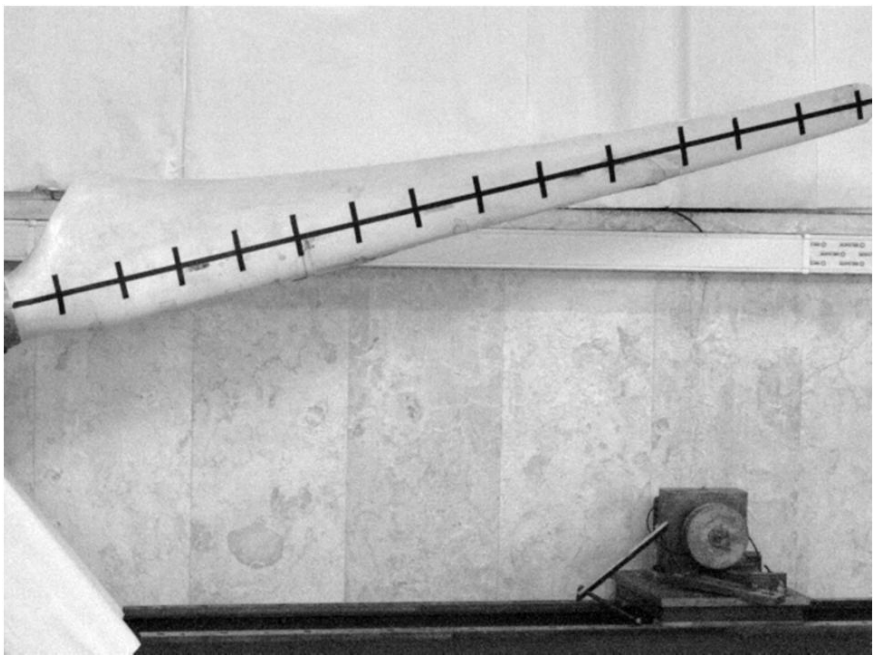

Fig. 3 Lines created on the blade to determine a set point of the blade

شکل3 تصویر خطوط ایجاد شده روی پره جهت شناسایی نقاط معلوم از سطح پره

1- Cross-correlation
2- Frequency response function (FRF)
3- Hilbert transform functions (HTF)
4- modula
5- bias

6- Shaker
7- Flapwise

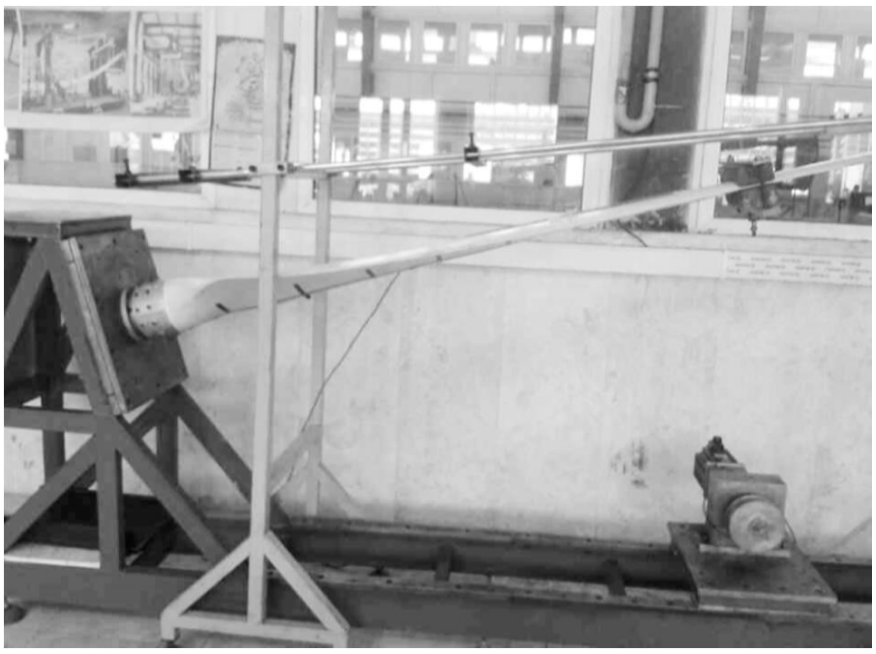

Fig. 4 Blade clamping structure

شکل 4 سازه گیره بندی پره

DFK23GM021 با نرخ داده‌برداری 60 فریم بر ثانیه و رزولوشن 960×1280 و سنسور CCD می‌باشند. همچنین در این سیستم از دو لنز با کد -M1614 MP2، قطر 30mm و فاصله کانونی 12mm استفاده شده است. نرخ داده-برداری سیستم بینایی براساس تحقیق صورت گرفته در [7] تعیین گردیده است که با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق و مقایسه صورت گرفته با نتایج روش‌های پیشین، نرخ داده‌برداری کافی بوده است.

یکی از پارامترهای مهم در دقت اندازه‌گیری جابجایی‌های سازه، رزولوشن دوربین‌ها می‌باشد. رزولوشن بالای دوربین باعث رقمی شدن[1] صحنه مورد نظر به تعداد المان‌های بیشتر در صفحه دوبعدی سنسور می‌گردد و در نتیجه آن، دقت سیستم بالا می‌رود. همچنین پارامتر دیگری که باعث تغییر اثر رزولوشن و افزایش خطا در بعد سوم تصویر می‌گردد لنز دوربین می‌باشد. لنز دوربین باعث محدودیت در فاصله دوربین از صحنه می‌گردد، در نتیجه باید پارامترهای لنز و دوربین را متناسب با ابعاد پره تحت آزمایش انتخاب نمود.

در تحقیق حاضر، فاصله دوربین از صحنه تقریبا 7m تنظیم گردیده است. این فاصله صرفا به علت تجهیزات آزمایشگاهی موجود انتخاب شده است تا پره به‌طور کامل در میدان دید دوربین قرار گیرد. با انجام فرآیند کالیبراسیون دوربین و قرار دادن صفحه کالیبراسیون در نزدیکی پره توربین، فضای موردنظر جهت اندازه‌گیری کالیبره می‌شود. لذا فرایند کالیبراسیون با قرار دادن صفحه کالیبراسیون در همان فاصله تقریبا 7m متری از دوربین و در زوایای مختلف صفحه انجام گرفت تا خطای اندازه‌گیری ناشی از فاصله زیاد تا حد قابل قبولی کاهش یابد. نتایج کالیبراسیون و دقت اندازه‌گیری در بخش بعد گزارش شده است.

5- آزمایش تجربی جهت آزمون مودال پره توربین

در آنالیز مودال عملیاتی، با وجود عدم آگاهی از نیروی تحریک سازه، پارامترهای مودال سازه به‌دست می‌آیند. بنابراین می‌توان جهت تحریک پره از روش‌های متفاوتی از جمله وارد کردن ضربه به‌کمک چکش، جابجا کردن نوک پره سپس رهاسازی ناگهانی آن و یا نیروهای محیطی مانند نیروی باد استفاده کرد. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در این تحقیق از روش جابجایی نوک پره استفاده شده است. به‌طورکلی، آزمایش تجربی جهت آزمون مودال به کمک ماشین بینایی شامل آماده‌سازی سیستم تصویربرداری استریو و پس از آن انجام آزمون و داده‌برداری می‌باشد که در ادامه به تفصیل ارائه شده است.

5-1- کالیبراسیون تصویر برداری استریو

در سیستم بینایی استریو عوامل متعددی وجود دارند که باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری ابعادی می‌شوند. که در این رابطه می‌توان به خطای ناشی از لنز، خطای ناشی از سخت‌افزار الکترونیکی سیستم، خطای ناشی از تبدیل به دیجیتال، خطای مونتاژ مکانیکی، خطای نورپردازی، خطای محیطی، خطای ناشی از نرم‌افزار، شکست نور در هوا و خطاهای کالیبراسیون اشاره نمود. متداولا 11 پارامتر طی فرایند کالیبراسیون دوربین مشخص می‌گردند که 5 پارامتر مربوط به عوامل درونی و 6 پارامتر دیگر مربوط به عوامل بیرونی می‌باشند [24]. بنابراین طی فرایند کالیبراسیون عوامل بیرونی و درونی نسبت به سیستم مختصات جهانی تعیین می‌شوند. عوامل بیرونی شامل بردار موقعیت و ماتریس چرخش مبدأ دوربین نسبت به مبدأ مختصات کلی بوده و در صورت ثابت بودن دوربین فقط یک بار محاسبه می‌گردند. عوامل درونی شامل فاصله کانونی f، مرکز تصویر، نسبت تصویر و پارامترهای ضریب اعوجاج لنزها می‌باشند [11]. در ادامه، تعیین پارامترهای بیرونی و درونی شرح داده شده‌اند [25]. دستگاه مختصات روی تصویر به‌عنوان دستگاه مختصات مرجع در نظر گرفته می‌شود. لذا طبق شکل 5، مختصات نقطه روی جسم که نسبت به دستگاه مختصات $X'Y'Z'$ می‌باشد، باید به مختصات دستگاه مختصات XYZ تبدیل گردد. برای این کار می‌بایست ماتریس دوران و انتقال دستگاه مختصات $X'Y'Z'$ نسبت به دستگاه مختصات XYZ را در مختصات نقطه در دستگاه مختصات $X'Y'Z'$ ضرب نمود. این ماتریس بصورت $[R \quad t]$ نمایش داده می‌شود که R مربوط به دوران و t مربوط به انتقال می‌باشد.

با ضرب ماتریس‌های دوران حول هر 3 محور، R به‌دست می‌آید. ماتریس چرخش به اندازه زاویه α حول محور X:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \tag{20}$$

ماتریس چرخش به اندازه زاویه β حول محور Y:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \tag{21}$$

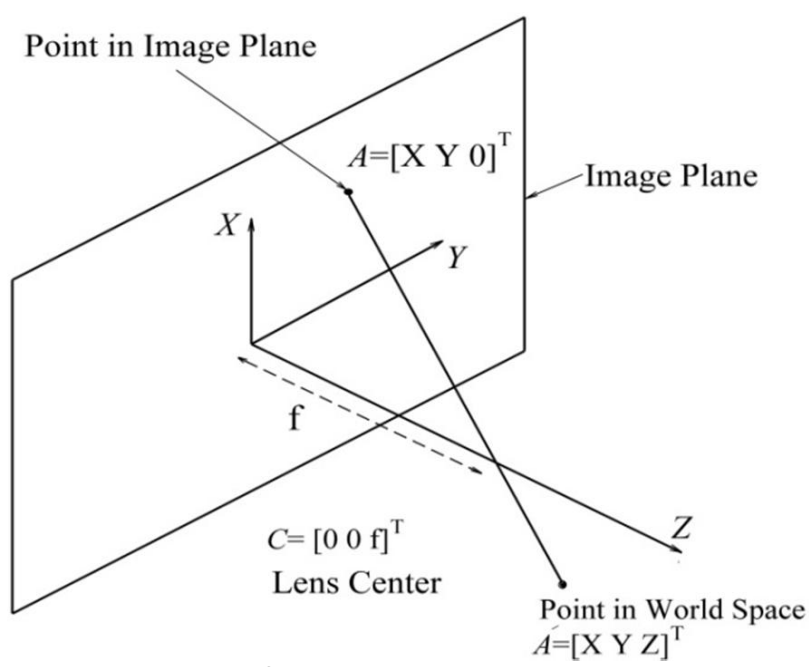

Fig. 5 Basic model of the imaging process

شکل5 مدل پایه‌ای فرایند تصویربرداری

1- Digitizing

ماتریس چرخش به اندازه زاویه δ حول محور Z :

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta & 0 \\ -\sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

ماتریس انتقال t بصورت زیر می‌باشد:

$$t = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \tag{23}$$

با ترکیب کردن ماتریس چرخش حول هر 3 محور R و ماتریس انتقال t ماتریس [R t] بدست می‌آید:

$$\begin{matrix} \cos\beta \times \cos\delta & \sin\beta \times \sin\alpha \times \cos\delta + \sin\delta \times \cos\propto & -\cos\alpha \times \sin\beta \times \cos\delta + \sin\alpha \times \sin\delta & dx \\ -\cos\beta \times \sin\delta & -\sin\alpha \times \sin\beta \times \sin\delta + \sin\alpha \times \cos\delta & \cos\alpha \times \sin\beta \times \sin\delta + \sin\alpha \times \cos\delta & dy \\ \sin\beta & -\sin\alpha \times \cos\beta & \cos\alpha \times \cos\beta & dz \end{matrix} \tag{24}$$

جهت تبدیل تصویر گرفته شده (شامل خطاهای محیطی و ذاتی)، به تصویر واقعی، نیاز به استفاده از معادلات پیچیده‌ای می‌باشد. به همین جهت ماتریسی تعریف می‌گردد و با ضرب این ماتریس در مختصات نقاط تصویر، نقاط واقعی به دست می‌آیند. این ماتریس، ماتریس خطای انحراف نامیده می‌شود :

$$\begin{bmatrix} a & b & m \\ c & d & n \\ 0 & 0 & l \end{bmatrix} \tag{25}$$

به دلیل این‌که مختصات Z نقاط تصویر صفر می‌باشد، به‌جای پارامترهای m، n و l ماتریس خطای انحراف هر عددی می‌توان قرار داد، لذا به منظور پرهیز از نمایش مولفه‌های اضافی، این پارامترها صفر در نظر گرفته می‌شوند.

در شکل 5، به دلیل این‌که 3 نقطه به ترتیب، روی جسم، مرکز لنز دوربین و تصویر متناظر نقطه روی جسم، روی یک خط راست قرار دارند، باید در معادله زیر صدق کنند:

مختصات نقطه روی شئ=(مختصات تصویر - مختصات مرکز لنز)×K

(26)

مرکز لنز -

مختصات مرکز لنز دوربین نیز عبارتست از $[0 \quad 0 \quad f]^T$. با جای‌گذاری این مختصات در فرمول 26 بدست می‌آید:

$$k\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix}\right) = [R \quad t]\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix} \tag{27}$$

[illegible] است از اندازه پارخط A'C تقسیم بر اندازه پاره خط AC یعنی [illegible] نسبت به حالت [illegible] بدست می‌آید: $k = \frac{[illegible]}{X_{AC}} = \frac{[illegible]}{Y_{AC}} = \frac{[illegible]}{Z_{AC}}$. برای حل معادله، $k = \frac{[illegible]}{Z_{AC}}$ در نظر گرفته می‌شود و با جای‌گذاری در معادله 27 بدست می‌آید:

$$(X\cos\beta\cos\delta + Y \times (\sin\alpha\sin\beta\cos\delta + \cos\alpha\sin\delta) - Z \times (\cos\alpha\sin\beta\cos\delta - \sin\alpha\sin\delta) + dx) \tag{28}$$

$$(-X\cos\beta\sin\delta - Y \times (\sin\alpha\sin\beta\sin\delta - \cos\alpha\cos\delta) \quad Z \times (\cos\alpha\sin\beta\sin\delta - \sin\alpha\cos\delta) + dy) \tag{29}$$

مشاهده می‌گردد که 10 مجهول شامل فاصله بین دستگاه مختصات فضایی روی هدف و دستگاه مختصات دوربین (dx, dy و dz) و چرخش آنها نسبت به هم (α, β و δ) و همچنین پارامترهای ماتریس خطای انحراف (a, b, c و d) وجود دارد و با توجه به رابطه 27، مجهول 11ام فاصله کانونی می‌باشد. بنابراین برای محاسبه آن‌ها احتیاج به 11 معادله می‌باشد. با توجه به این‌که از هر نقطه دو معادله بدست می‌آید، لذا برای مشخص کردن مجهولات احتیاج به داشتن حداقل مختصات 6 نقطه و تصویر آنها می‌باشد. با حل این معادلات پارامترهای کالیبراسیون بدست می‌آید. برای کم کردن خطای پارامترهای کالیبراسیون می‌توان هدف را در حالات مختلف قرار داد و از پارامترهای بدست آمده، میانگین گرفت. در جدول 1 و 2، پارامترهای به دست آمده طی فرایند کالیبراسیون ارائه گردیده است.

در روش استریو، دو دستگاه مختصات تعریف می‌گردد. یک دستگاه مختصات روی تصویر اول (x y z) و دیگری روی تصویر دوم (x'' y'' z''). دستگاه مختصات روی تصویر اول، به‌عنوان دستگاه مختصات مرجع در نظر گرفته می‌شود. برای تبدیل مختصات در دستگاه مختصات (x'' y'' z'') به مختصات، در دستگاه مختصات (x y z)، کافیست ماتریس تبدیل در مختصات (x'' y'' z'') ضرب گردد.

جدول1 پارامترهای بیرونی استخراج شده پس از فرایند کالیبراسیون

Table 1 Extrinsic parameter extracted after the calibration process

پارامتر	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)	α (deg)	β (deg)	δ (deg)
مقدار	478.22	-224.53	6974.46	2.14	1.92	-0.03

جدول2 پارامترهای درونی استخراج شده پس از فرایند کالیبراسیون

Table 2 Intrinsic parameter extracted after the calibration process

پارامتر	a	b	c	d	f (pixel)
مقدار	0	0	-0.0084	0.01177	x= 4393.98536 y= 4391.02793

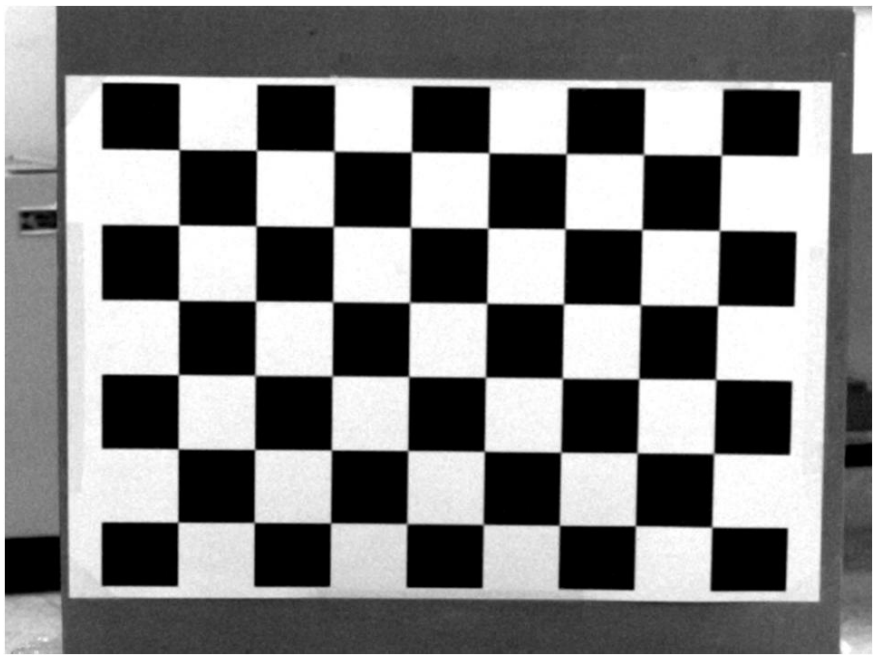

Fig. 6 Calibration target plane

شکل6 نمونه صفحه کالیبراسیون

$$[R \quad t] \times \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{30}$$

در مرحله انجام فرایند کالیبراسیون، ابتدا یک صفحه هدف که نواحی سیاه و سفید به ابعاد 30×30mm به‌صورت شطرنجی روی آن چاپ شده تهیه گردیده است. مواردی از قبیل دقت ابعادی، کیفیت نواحی سیاه و سفید و تخت بودن صفحه هدف از جمله مواردی هستند که باید در این مرحله مورد توجه قرار گیرند. شکل 6 نمونه صفحه کالیبراسیون را نشان می‌دهد.

پس از قرار دادن صفحه هدف روی پایه مناسب و یا نگه داشتن آن روی بدنه سازه، دوربین‌ها با فاصله مناسب از یکدیگر و به صورتی که هردو روی هدف تمرکز کرده باشند تنظیم می‌گردند. سپس از صفحه هدف تصویر گرفته شده و این کار برای چندین موقعیت و جهت مختلف از هدف تکرار شده و در نهایت تصاویر گرفته شده برای هر دوربین به نرم‌افزار متلب انتقال داده شده است. شکل 7 تصویر صفحه هدف قرار داده شده روی بدنه پره توربین بادی را نشان می‌دهد. در فرایند کالیبراسیون سسیتم استریو، ابتدا هرکدام از دوربین‌ها به‌طور جداگانه کالیبره شده‌اند و فایل حاوی اطلاعات کالیبراسیون هر دوربین ذخیره شده است. به‌علت عدم صحت در انتخاب نقاط گوشه در تصاویر صفحه هدف کالیبراسیون، مقداری خطای پیکسلی به وجود می‌آید. پس از یافتن پارامترهای کالیبراسیون و برقراری رابطه مجدد بین نقاط متناظر در صفحه کالیبراسیون و تصویر، مقدار خطای بین محل واقعی نقاط تصویر و نقاط استخراج شده در دوربین چپ و راست، به ترتیب در شکل 8 و 9 بر حسب پیکسل نشان داده شده است. با توجه به شکل 8، میانگین خطای پیکسلی در راستای x و y به ترتیب 0.12257 و 0.08221 می‌باشد. همچنین با توجه به شکل 9، میانگین خطای پیکسلی در راستای x و y به ترتیب 0.18223 و 0.13821 می‌باشد.

در این مرحله از فرایند مدلسازی بینایی استریو، جهت ارزیابی سیستم از قطعات بلوک‌های اندازه‌گیری با ابعاد متفاوت و دقت معلوم استفاده شده است و نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

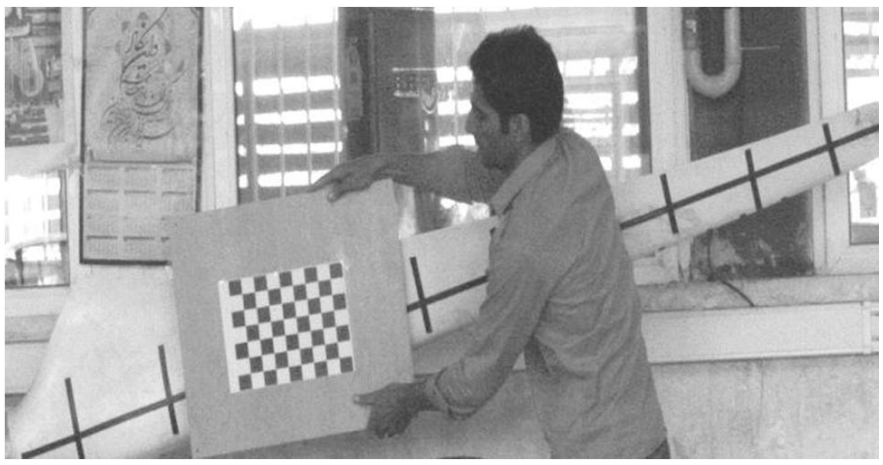

Fig. 7 Targeted plane placed on the wind turbine blade body

شکل7 صفحه هدف قرار داده شده روی بدنه پره توربین بادی

جدول3 نتایج اندازه گیری‌های صورت گرفته توسط سیستم استریو

Table 3 The results of stereo system measurements

اندازه مشخص	دقت (mm)	اندازه نامی (mm)	نتیجه سیستم استریو	خطای نسبی (%)
بلوک گیج	0.001	50	49.8079	0.38
بلوک گیج	0.001	20	23.6806	1.33
فاصله روی صفحه هدف	0.01	67.08	67.3784	0.44

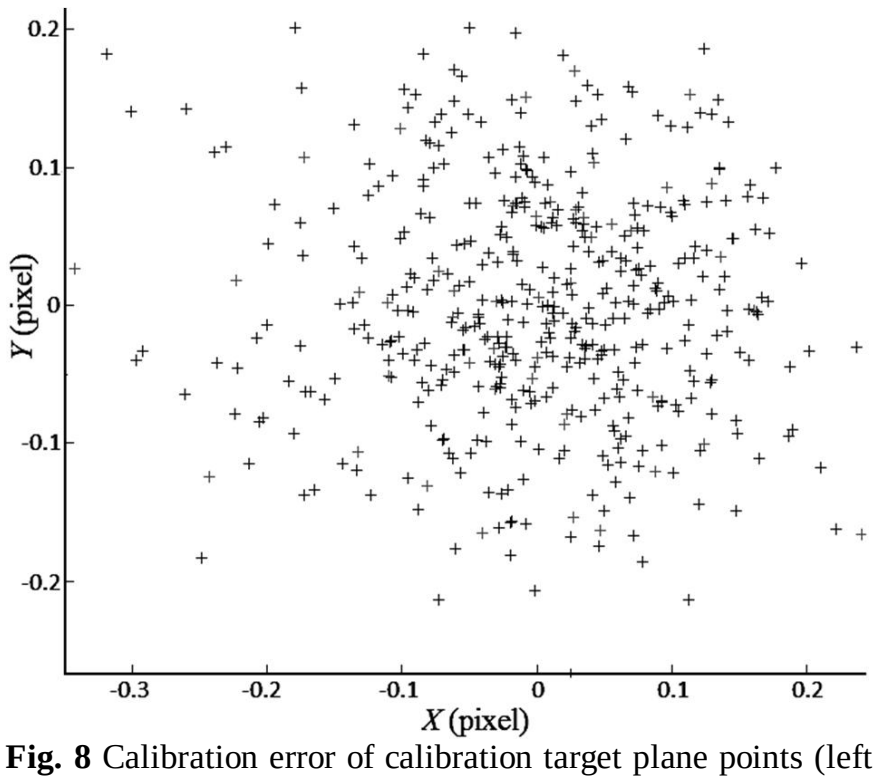

Fig. 8 Calibration error of calibration target plane points (left camera)

شکل8 خطای کالیبراسیون برای نقاط مختلف صفحه کالیبراسیون(دوربین چپ)

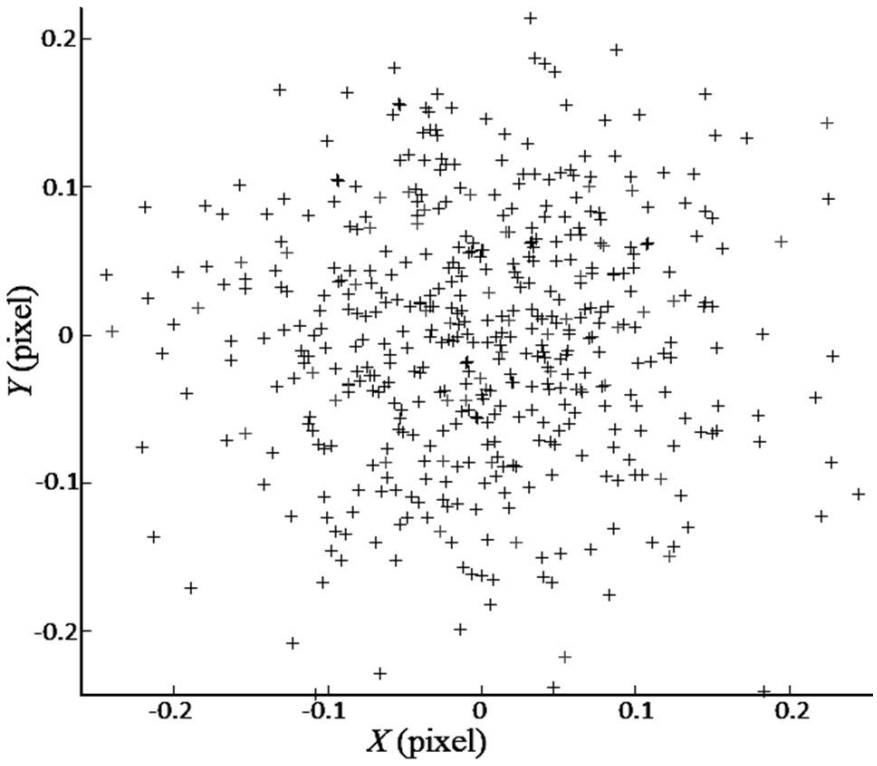

Fig. 9 Calibration error of calibration target plane points (right camera)

شکل 9 خطای کالیبراسیون برای نقاط مختلف صفحه کالیبراسیون(دوربین راست)

2-5 - تحریک پره توربین و داده‌برداری

نکته بسیار مهم در داده‌برداری توسط سیستم استریو، هم‌زمانی دو تصویر گرفته شده از یک موقعیت از نقاط روی پره می‌باشد. که در صورت عدم رعایت این نکته، دو تصویر گرفته شده از یک موقعیت نقاط پره نخواهد بود و داده‌برداری شامل خطای زیادی خواهد بود. بنابراین سیستم راه‌انداز[1] دوربین‌ها طراحی و ساخته شده است که با تنظیم نرخ داده‌برداری توسط نرم‌افزار سیستم، در هر ثانیه تعداد پالس مشخصی(متناسب با نرخ داده برداری) به طور هم‌زمان به پین‌های راه‌انداز تصویربرداری دوربین‌ها ارسال می‌گردد و بلافاصله تصاویر ذخیره می‌گردند. شکل 10 تصویر سیستم استریو را نشان می‌دهد.

با اعمال جابجایی در نوک پره، داده‌برداری توسط سیستم استریو شروع شده و تا زمان میرا شدن ارتعاش پره ادامه پیدا می‌کند. شروع سیگنال ارتعاش وارده به پره در اولین تصویر به هنگام رها سازی نوک پره می‌باشد.

1- trigger

6- پردازش تصویر

جهت بازیابی مختصات سه‌بعدی یک نقطه از تصویر، نیاز به شناسایی مختصات پیکسلی مربوط به آن نقطه در تصویر راست و نقطه متناظر آن در تصویر چپ، می‌باشد. بنابراین یکی از مهم‌ترین مراحل هر الگوریتم استریو انتخاب و استخراج اجزاء یا عناصر دو تصویر برای انطباق و تعیین اجزاء متناظر می‌باشد. برای این منظور از یک سری ویژگی‌های[1] با معنی در دو تصویر استفاده می‌شود و یا توسط عاملی روی شئ ایجاد می‌گردند. هر ویژگی ایجاد شده روی تصویر دارای بردار ویژگی خاص خود می‌باشد که پس از استخراج آن از هردو تصویر، تناظر یابی انجام می‌گردد و در نتیجه مختصات پیکسلی مورد نظر در هردو تصویر چپ و راست با دقت و صحت مناسب قابل استخراج خواهند بود. در این تحقیق، مطابق شکل 3 از یک نوار مشکی در طول پره و چند عدد نوار مشکی عمود بر نوار قبلی استفاده شده است.

اولین گام در فرایند پردازش تصویر نویزگیری و تقویت تصاویر می‌باشد. سپس عملیات لبه یابی روی تصاویر صورت می‌گیرد که دارای اهمیت ویژه‌ای در الگوریتم پردازش تصویر می‌باشد. مسئله مهم در این مرحله، انتخاب نقاط لبه شئ به طور صحیح می‌باشد. استراتژی‌های متفاوتی جهت انتخاب نقاط لبه وجود دارد که از جمله آن‌ها اعمال عملگرهای لبه‌یاب بر روی تصاویر گرفته شده توسط دوربین چپ و راست می‌باشد. در نتیجه لبه‌های جسم نمایان خواهند شد و در محاسبه مختصات پیکسلی نقاط لبه خطای کمتری اتفاق خواهد افتاد. با اعمال عملگر لبه یاب روی تصاویر لبه مربوط به نوار مشکی طولی و همچنین لبه‌های عمود بر آن به دست خواهد آمد. بنابراین با برازش پاره خط‌هایی بر آن لبه‌ها و اعمال عملیات اندازه گیری[2]، نقطه تقاطع مربوط به خط طولی و هرکدام از خطوط متقاطع آن به دست می‌آید که این نقطه تقاطع به‌عنوان یک بردار ویژگی شناخته شده و از دو تصویر استخراج می‌گردد. شکل 11 تصویر مربوط به خط برازش شده در جهت طول و دو نقطه روی هرکدام از لبه‌های عرضی را نشان می‌دهد.

6-1- استخراج سیگنال ارتعاش سه بعدی پره

جهت محاسبه مختصات سه بعدی نقاط مورد نظر روی پره توربین بادی، آرایه‌ای از مختصات پیکسلی مربوط به نقاط در تصاویر دوربین چپ و راست را طبق مرجع [26] به نرم‌افزار انتقال داده و آرایه‌ای از مختصات سه بعدی نقاط را به‌عنوان خروجی دریافت می‌کنیم. خروجی این مرحله، شامل موقعیت ارتعاش نقاط پره در طول زمان و در سه جهت می‌باشد که سیگنال ارتعاش نقاط پره را در طول زمان ارائه می‌دهد. نکته قابل توجه در این مرحله این است که با اندازه‌گیری بعد عمود بر صفحه سنسور (بعد سوم تصویر)، فاصله بین دوربین مبنا و نقطه اندازه‌گیری به دست می‌آید. با اندازه‌گیری آن فاصله برای هر موقعیت نقاط پره در طول مدت زمان انجام آزمون (به دست آوردن بعد سوم در تمام تصاویر ضبط شده حین آزمون و برای تمام نقاط نشانه-گذاری شده روی پره) سیگنال ارتعاش مربوطه به‌دست می‌آید. در نهایت با حذف فاصله بین دوربین مبنا و نقاط پره قبل از اعمال ارتعاش از تمام موقعیت‌های مربوط به نقاط، سیگنال ارتعاش نقاط پره در جهت پهنای آن به دست خواهد آمد که این مراحل جهت کسب سیگنال ارتعاش در دو جهت دیگر هم اجرا می‌گردند. اشکال 12 تا 14 نمونه‌هایی از سیگنال به دست آمده را به ترتیب در جهات لبه، طول و پهنای پره نشان می‌دهد.

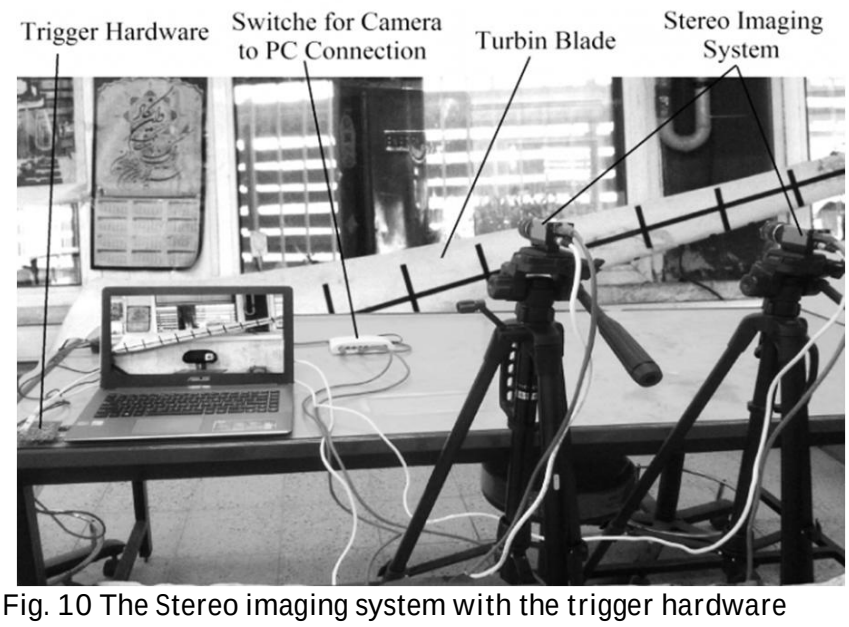

Fig. 10 The Stereo imaging system with the trigger hardware

شکل10 سیستم تصویر برداری استریو به همراه برد راه‌انداز

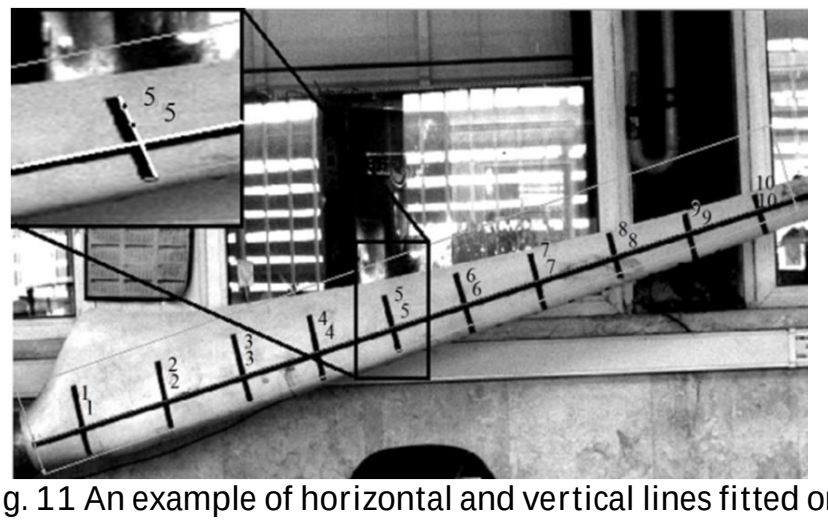

Fig. 11 An example of horizontal and vertical lines fitted on the blade

شکل11 نمونه ای از خطوط برازش شده روی پره در جهت افقی و عمودی

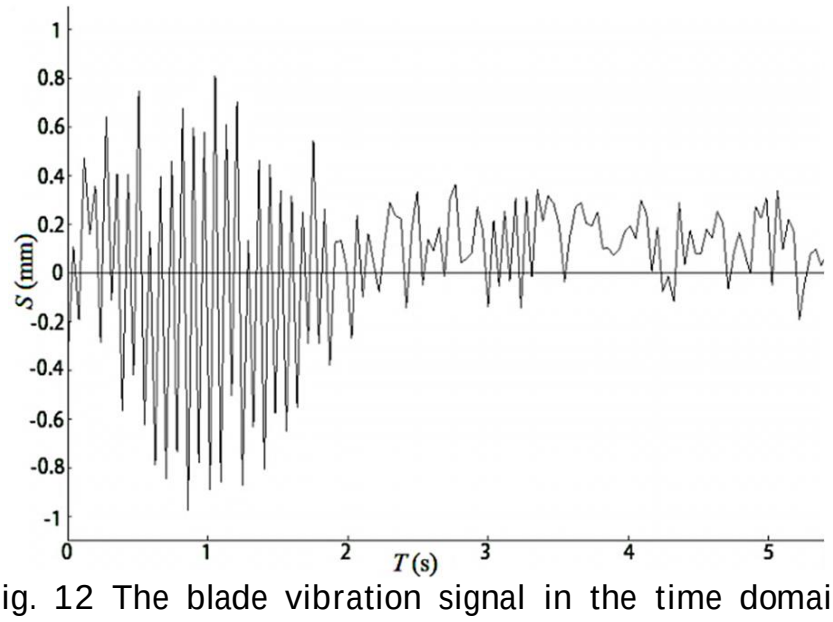

Fig. 12 The blade vibration signal in the time domain and edge direction

شکل12 سیگنال ارتعاش پره در حوزه زمان و در جهت لبه پره

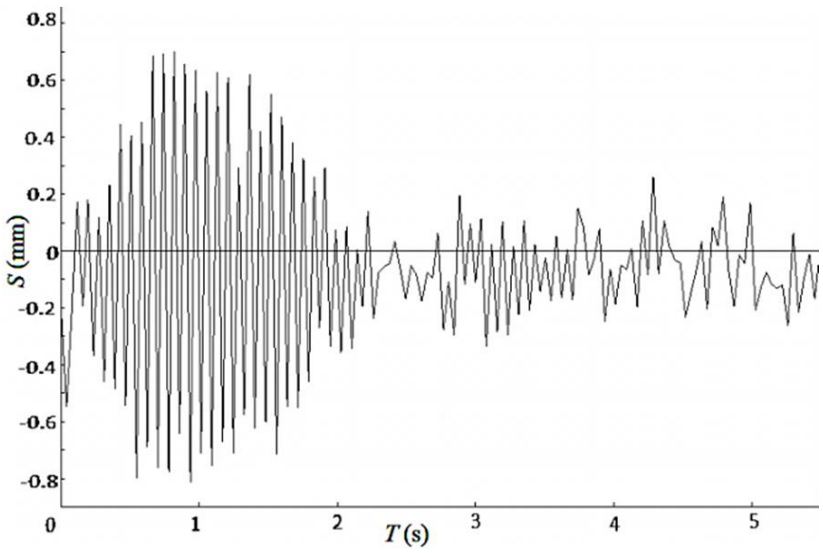

Fig. 13 The blade vibration signal in the time domain and lenght direction

شکل13 سیگنال ارتعاش پره در حوزه زمان و در جهت طول پره

1- Features
2- caliper

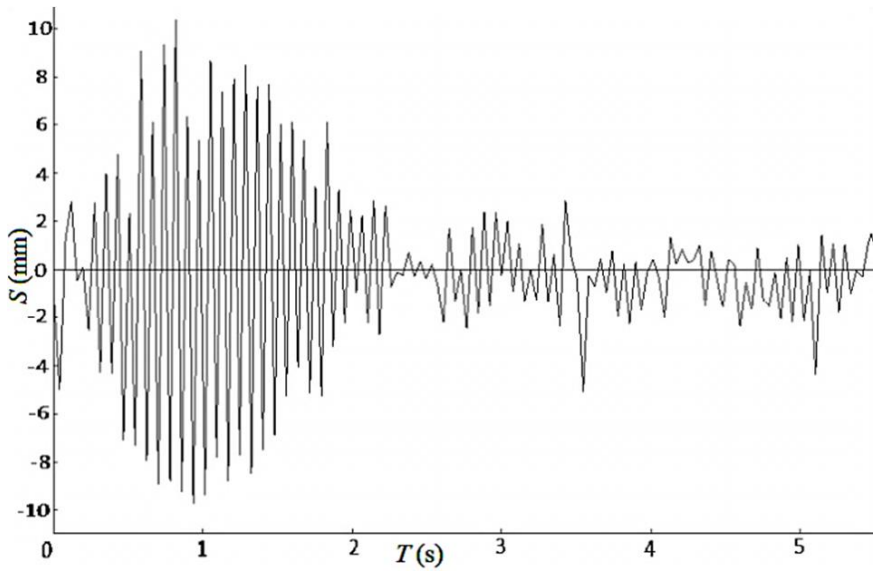

Fig. 14 The blade vibration signal in the time domain and flapwise direction

شکل 14 سیگنال ارتعاش پره در حوزه زمان و در جهت پهنای پره

7- نتایج آزمون مودال پره توربین

آنالیز مودال عملیاتی روی سازه پره توربین بادی 2.5kW، به طول 3m صورت گرفته است. پس از آماده سازی و کالیبراسیون سیستم تصویربرداری استریو و همچنین آماده‌سازی پره توربین و نصب آن روی سازه و گیره مخصوص، آنالیز مودال تجربی انجام گرفته است. همان‌طور که گفته شد، برای تحریک سازه از روش جابجایی نوک پره به اندازه‌ی کمتر از مقدار بحرانی، و سپس رهاسازی آنی پره استفاده شده است و به‌طور همزمان توسط سیستم استریو، میزان جابجایی3 بعدی نقاط مشخص شده روی پره در بازه زمانی مشخص ثبت گردیده است. نمونه‌ای از حداکثر جابجایی صورت گرفته در اشکال 12 تا 14 ارائه شده است که تغییرات میزان جابجایی پره نسبت به زمان، و در نهایت میرا شدن ارتعاش را نشان می‌دهد. به‌دلیل این‌که فرکانس‌های طبیعی در جهات لبه و طول پره بیشتر از 20Hz بوده و با توجه به تجهیزات موجود و همچنین محدودیت در سرعت سخت‌افزارهای آزمایشگاهی به‌کار گرفته شده جهت ذخیره‌سازی تصاویر، از جمله سوئیچ اتصال دوربین‌ها به کامپیوتر، نرخ ذخیره‌سازی تصاویر کاهش یافته و امکان افزایش آن بیش از 40 تصویر بر ثانیه نبوده است، لذا نرخ داده‌برداری سیستم جهت شناسایی آن‌ها ناکافی بوده و از بررسی پارامترهای مودال آن دو جهت صرف‌نظر شده است. داده‌های مربوط به تمام نقاط روی پره در جهت پهنا، توسط نرم‌افزار ام‌ای‌اسکوپ مورد پردازش قرار گرفته‌اند. در تصاویر 15 و 16 دو نمونه از توابع پاسخ فرکانسی به‌دست آمده از نقط روی سازه پره، ارائه گردیده است. همچنین شکل مود اول پره در شکل 17 ارائه شده است. پارامترهای مودال به دست آمده از سیستم بینایی، با پارامترهای به دست آمده از دو روش المان محدود و شتاب‌سنج مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش آنالیز المان محدود، سازه پره به صورت سه بعدی طراحی شده و با اعمال شرایط مرزی، تحت آزمون مودال قرار می‌گیرد. نتایج آنالیز المان محدود صورت گرفته روی پره هدف تحقیق، مقدار فرکانس طبیعی اولین مود پره را 10.42Hz معرفی نموده است. نتایج هرکدام از روش‌ها در جداول 4 و 5 ارائه شده است.

در تحقیق حاضر جهت مقیاس دهی به محور عمودی شکل 17، نوک پره واحد در نظر گرفته شده و سایر نقاط نسبت به آن عددگذاری شده است.

اختلاف میان فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از روش ماشین بینایی و دو روش دیگر در اولین مود، در جدول 5 ارائه شده است. بیشترین اختلاف در نتایج به دست آمده بین دو روش ماشین بینایی و المان محدود بوده و به

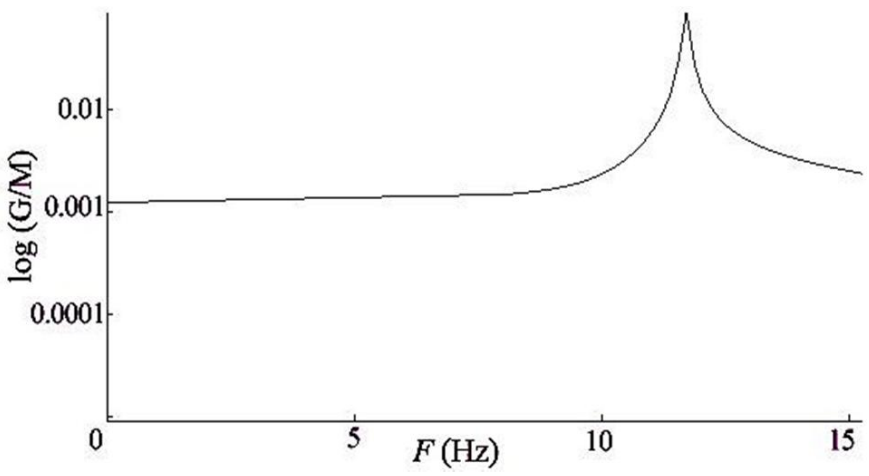

Fig. 15 FRF for the tenth point marked on the blade

شکل 15 تابع پاسخ فرکانسی مربوط به نقطه دهم نشانه گذاری شده روی پره

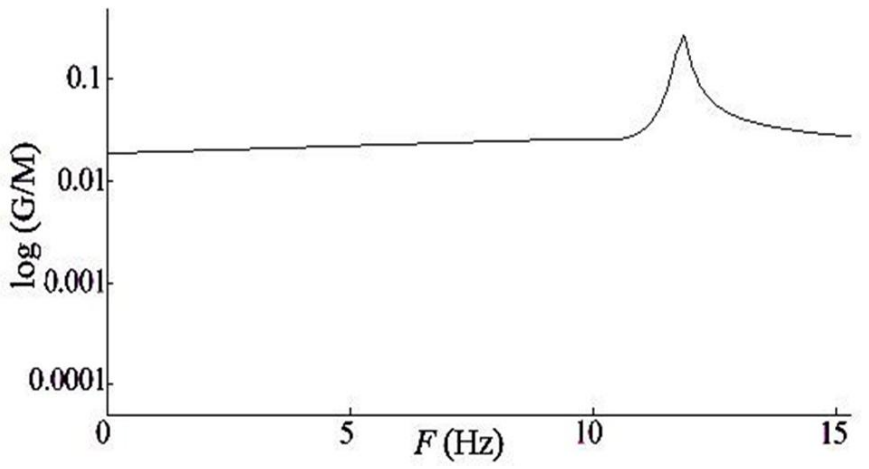

Fig. 16 FRF for the ninth point marked on the blade

شکل 16 تابع پاسخ فرکانسی مربوط به نقطه نهم نشانه گذاری شده روی پره

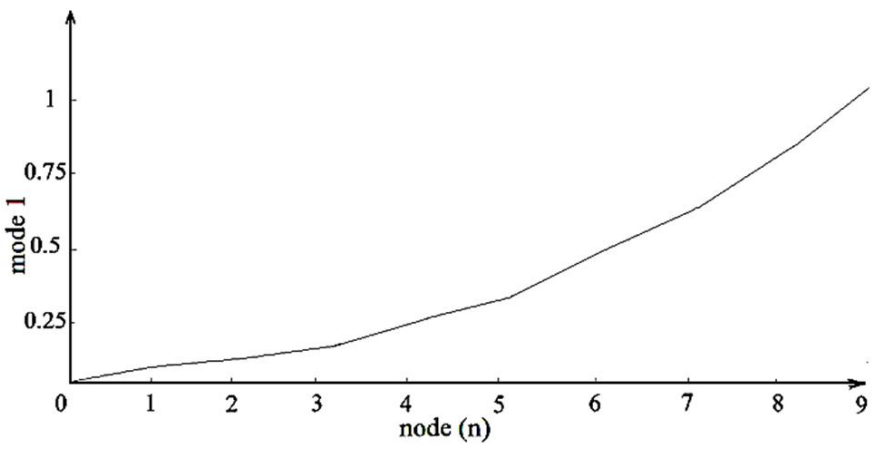

Fig. 17 The first mode extracted by machine vision technique

شکل 17 مود اول به دست آمده از روش ماشین بینایی

جدول 4 نتایج آنالیز مودال توسط روش‌های شتاب‌سنج و ماشین بینایی

Table **4** The results of modal analysis by vision system and accelerometers

روش	فرکانس مود اول(Hz)	باقیمانده (deg)	میرایی (%)
شتاب‌سنج	11.2	177	1.68
ماشین بینایی	11.5	120	1.06

جدول 5 مقایسه نتایج آنالیز مودال به کمک ماشین بینایی، شتاب‌سنج و المان محدود

Table **5** Modal analysis comparison of vision system,accelerometers and FEM

نام روش	فرکانس مود اول (Hz)	درصد اختلاف
ماشن بینایی	11.5	
شتاب‌سنج	11.2	2.67
المان محدود	10.42	10.36

مقدار 10.36% می‌باشد. همان طور که از جداول مشاهده می‌شود، مقدار 6.96% اختلاف بین دو روش پیشین وجود دارد. بنابراین با توجه به نتایج جداول 4 و 5، میزان اختلاف ایجاد شده در روش ماشین بینایی قابل قبول می‌باشد.

8- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق آنالیز مودال عملیاتی روی پره توربین بادی و به روش ماشین بینایی و با پیاده سازی تکنیک بینایی استریو صورت گرفته است. به‌گونه‌ای که، با روش جابجایی نوک پره و رهاسازی ناگهانی آن، پره تحریک شده و به طور همزمان از خطوط تیره ایجاد شده روی پره تصویر گرفته شده است. پس از پردازش تصاویر و به‌دست آوردن سیگنال ارتعاش نقاط روی پره در حوزه زمان، توسط نرم‌افزار ام‌ای‌اسکوپ آنالیز مودال عملیاتی صورت گرفته است. به دلیل نرخ پایین داده‌بردای سیستم، سیگنال به‌دست آمده در دو جهت لبه و طول پره، بلااستفاده بوده. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج روش‌های شتاب‌سنج و المان محدود، اختلاف کمی را نشان می‌دهد.

از آن‌جا که در این تحقیق آزمون مودال عملیاتی روی سازه پره توربین بادی صورت گرفته و نتایج حاصله دارای درصد خطای قابل قبولی بوده است، لذا ماشین بینایی روشی مناسب در تعیین مودهای ارتعاشی پره توربین بادی و پایش سلامت آن، می‌باشد. از طرفی به دلیل عدم نیاز به نصب و راه اندازی سیستم جهت داده برداری نسبت به روش‌های پیشین، فرایند پایش سلامت سازه توربین بادی، بدون متوقف و یا جدا سازی اجزاء آن از یکدیگر و با سرعت کافی، امکان‌پذیر می‌باشد.

9- تقدیر و تشکر

این پژوهش با همایت مالی و تجهیزاتی پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد در قالب پروژه توربین‌های بادی کوچک صورت پذیرفته است که بدینوسیله قدردانی می‌شود.

10- مراجع

[1] A. Asadllahi ghohie, M. H. Sayadnegad, Modal analysis of industrial gas turbine blade using analytical and experimental methode, *Quarterly Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 29-53, 2010. (In Persianفارسی)

[2] J. Aguilar, F. torres, M. A. lope, Stereo vision for 3d measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications, *Measurement*, Vol. 18, No. 4, pp. 193_200, 1996.

[3] K. Khalili, H. Abdulahian, S. M. Emem, 3D model reconstruction based on stereo vision, 9th *Iranian Conference on Manufacturing Engineering*, Birjand University, Iran, 2008. (in Persianفارسی)

[4] J. Carr, J. Baqersad, Ch. Niezrecki, P. Avitabile, M. Slattery, Dynamic stress–strain on turbine blades using digital image correlation techniques part 2, *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics*, University of Massachusetts, USA. 2012.

[5] O. Erne, M. Klein, Modal analysis on a 500 kW wind turbine with stereo camera technique, *3th International Operational Modal Analysis Conference*, Germany, 2008.

[6] Y. Jinshui, P. Chaoyi, X. Jiayu, Z. Jingcheng, Y. Yun, Application of videometric technique to deformation measurement for large-scale composite wind turbine blade, *Applied Energy*, Vol. 98, pp. 292–300, 2012.

[7] L. Hyoseong, R. Huinam, 3D measurement of structural vibration using digital close-range Photogrammetry, *Sensors and Actuators*, Vol. 196, pp. 63– 69, 2013.

[8] Sh. Nathan, L. prather, K. Kevin, A. lynn, Modal-based camera correction for large baseline stereo imaging, *Asprs Annual Conference*, California, 2010.

[9] W. Christopher, N. Christopher, A. Peter, P. Pawan, Comparison of FRF measurements and mode shapes determined using optically image based, laser, and accelerometer measurements, *Mechanical Systems and Signal Processin*, Vol. 25, pp. 2191–2202, 2011.

[10] Z. M. Bi, W. Lihui, Advances in 3d data acquisition and processing for industrial applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, pp. 403–413, 2010.

[11] X .Zexiao, Z. Weitong, Z . Zhiwei, J. Min, A novel approach for the field calibration of line structured-light sensors, *Measurement*, Vol. 43, pp. 190–196, 2010.

[12] M. M. Khatibi, M. R. Ashory, A. R. Albooyeh, Numerical and experimental consideration of frequency domain decomposition method for modal parameters identification of structure, *Journal of Modeling in Engineering*. Vol. 8, No. 21, pp. 83_95, 2010. (in Persianفارسی)

[13] S. F. Hosseini, *Modal parameter detection on 2.5kW wind turbine blade*, Sun-air Research Institute, Mashhad, FR-015-00, 2012.

[14] G. Thomas, H. George, The inception of OMA in the development of modal testing technology for wind turbines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1213-1226, 2010.

[15] D. Christof, D. Gert, G. Patrick, An operational modal analysis approach based on parametrically identified multivariable transmissibilities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1250-1259, 2010.

[16] N. Ameri, C. Grappasonni, G. Coppotelli, D. J. Ewins, Ground vibration tests of a helicopter structure using OMA techniques, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 35, pp. 35-51, 2013.

[17] J. Kim, J. P. Lynch, Modal analysis of the yeondae bridge using a reconfigurable wireless monitoring system, *Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability* (ICOSSAR), Osaka, Japan, 2009.

[18] W. Jian-Huang, L. Chin-Hsiung , P. Jerome, L. Kung-Chun, L. Pei-Yang, W. Yang, Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems, *Engineering Structures*, Vol. 30, PP. 1820–1830, 2008.

[19] S. Marco, G. Paolo, P. Giovanni, M. Riccardo, Operational modal analysis via image based technique of very flexibl espace structures, *Acta Astronautica*, Vol. 89, pp. 139–148, 2013.

[20] G. James, T. Carne ,J. Lauffer, A. Nord, Modal testing using natural excitation , *Proceedings of the 10th IMAC*, SanDiego, USA, 1992.

[21] A. Agneni, L. Balis Crema, G. Coppotelli, Time and frequency domain model parameter estimation by output only functions, *in Proceedings of International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics*, Amsterdam, 2003.

[22] A. Agneni, L. Balis Crema, G. Coppotelli, Output-only analysis of structures with closely spaced modes, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1240–1249. 2010.

[23] A. Agneni, G. Coppotelli, C. Grappasonni, Operational modal analysis of a rotating helicopter blade, *Proceedings of ISMA*, Rome, Italy, 16– 00184, 2010.

[24] S. M. Emam, K. Khalili, Improving the accuracy of laser scanning using a soft technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol.13, No. 9, pp. 77-91. 2013. (in Persianفارسی)

[25] K .Khalili, S. M. Emam, 3D model reconstruction of web production with image processing techniques, Research Note, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 29, No. (3), pp. 113-124, 2013. (in persianفارسی)

[26] *Camera Calibration Toolbox*, Accessed on 28 October 2014; http://www.mathworks.com.