

عیب یابی خطوط مهاری توربین بادی شناور با استفاده از روش کلاس بندی فازی

آيسان جمال کيا^۱، ميرمحمد اتفاق^{۲*}، عليرضا مجتهدی^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز - دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ aysanjamalkia@yahoo.com^۲ استادیار، دانشگاه تبریز - دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ ettefagh@tabrizu.ac.ir^۳ استادیار، دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی عمران - گروه مهندسی آب؛ mojtahedi@tabrizu.ac.ir

چکیده

پایش وضعیت سلامت سازه برای اطمینان از عملکرد درست سازه در طول عمر سرویس آن، امری ضروری می باشد. این فرآیند برای توربین های بادی شناور که در معرض شرایط بحرانی محیطی دریا قرار می گیرند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش عیب یابی خطوط مهاری توربین بادی شناور از نوع اسپار بر پایه پاسخ دینامیکی سازه و روش کلاس بندی فازی پیشنهاد گردیده است. به این منظور ابتدا معادلات غیر خطی حرکت سازه با استفاده از تئوری بقای مومنتم زاویه ای و قانون دوم نیوتن استخراج و شبیه سازی گردیده است. سپس تغییرات فرکانسی سازه در درجات آزادی مختلف آن به دلیل تغییرات در سفتی خطوط مهاری (عیب مفروض) به عنوان مشخصه های ورودی به سیستم فازی در نظر گرفته شده است. همچنین با تنظیم توابع توزیع احتمالی هر یک از مشخصه ها در هر یک از کلاس های عیب تعریف شده، سیستم کلاس بندی فازی آموزش داده شده است. برای اعتبار سنجی روش عیب یابی، نوبت با قدرت های مختلف به مشخصه ها اضافه و درصد موفقیت عیب یابی محاسبه گردیده است. با تحلیل نتایج، مشخص می گردد که سیستم پیشنهادی قادر به تشخیص درست عیب سازه با درصد قابل قبولی می باشد.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵

تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:

توربین بادی شناور

عیب یابی

شبیه سازی دینامیکی

سیستم چند جزئی سه بعدی

کلاس بندی فازی

Damage Identification of the Floating Wind Turbine Mooring Line by Fuzzy Classification

Aysan Jamalkia¹, Mir Mohammad Ettefagh^{2*}, Alireza Mojtahedi³¹ MS student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; aysanjamalkia@yahoo.com² Assistant Prof., Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; ettefagh@tabrizu.ac.ir (Corresponding Author)³ Assistant Prof. Civil Engineering Department, University of Tabriz; mojtahedi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 Sep. 2014

Accepted: 14 Apr. 2015

Available online: 22 Sep. 2015

Keywords:

Floating Wind Turbine

Damage Identification

Dynamic Simulation

3D Multi-Body System

Fuzzy Classification

ABSTRACT

Structural health monitoring is essential for ensuring the structural safety performance during the service life. The process is of paramount importance in case of the floating wind turbine due to the structural parts subjected to the marine environmental risky conditions. In this paper a fuzzy-based damage identification method using dynamic response of the Spar floating wind turbine has been proposed. In the first step, the nonlinear equations of motion of the floating wind turbine system derived using the theorem of conservation of angular momentum and Newton's second law. Then the variation values of the frequency characteristics of the structure in each DOFs due to stiffness changes of mooring lines (simulated damage) are considered as input features to the fuzzy system. Also the fuzzy system was trained based on calibrating of the membership functions by defining the damage classes properly. For validating the proposed method, noise with different SNRs was contaminated to the measured features and the success rate of the damage detection was calculated. The results showed that the proposed method is able to identify the damage classes with acceptable success rate.

۱- مقدمه

بادهای فراساحلی منبع مهم انرژی تجدیدپذیر می‌باشند. با وجود اینکه بهره‌برداری از این منبع انرژی هزینه بردار است، اما برای دسترسی به نیروی باد با کیفیت بالاتر (قدرت زیاد باد در مناطق عمیق) و همچنین کاهش مشکلات ناشی از بهره‌برداری از بادهای ساحلی نظیر آلودگی‌های صوتی، بصری و همچنین اشغال فضا، این سرمایه‌گذاری قابل انتظار است. لازم به ذکر است که در بیشتر مواقع، مزرعه‌های توربین بادی در مناطق مسکونی یا نزدیکی آنها احداث می‌گردند (به علت راحتی دسترسی)، که آلودگی صوتی و تصویری ناشی از آنها متوجه ساکنین می‌گردد، بطوریکه آرامش و چشم‌انداز بعضی از مناطق با نصب این نوع از توربین‌ها به هم خورده و سبب ناراحتی روحی این ساکنان که سال‌ها در محیط آرام و بکر زندگی کرده‌اند می‌شود. بنابراین توربین‌های بادی شناور مورد توجه بسیاری از کشورها و در نتیجه پژوهشگران قرار گرفته است. در اواخر سال ۲۰۰۹، توربین‌های بادی فراساحلی، در آب‌های کم عمق با عمق کمتر از ۲۰ متر، با پایه ثابت از نوع پایه مونو-پایل و جکت با تکنولوژی مناسبی طراحی شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته شده‌اند [۱-۲]. امروزه توربین‌های بادی شناوری نظیر TLP، Spar و Barge در حال طراحی و ساخت در ابعاد آزمایشگاهی و حتی واقعی توسط محققین و شرکت‌های عظیم در حوزه انرژی می‌باشند که دارای قابلیت بکارگیری در مناطق عمیق دریا و اقیانوس‌ها را دارند [۳-۴].

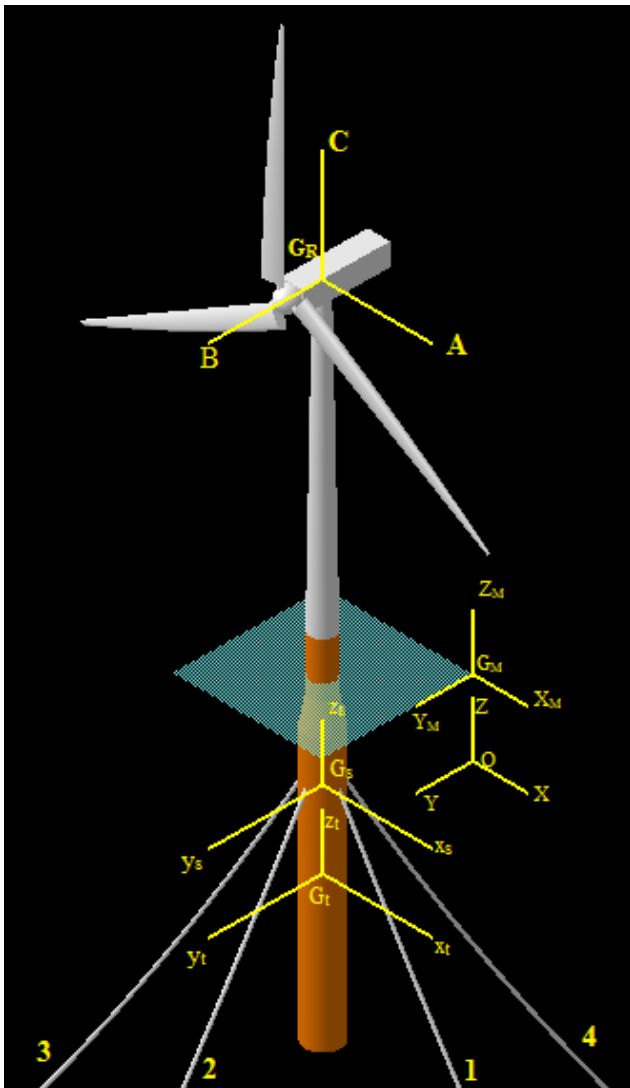
از آنجایی که هزینه‌های تعمیر و نگهداری توربین‌های بادی شناور معمولاً در حدود ۲ تا ۵ برابر هزینه توربین‌های بادی معمولی است، یکی از راه‌های کاهش این هزینه‌ها ارائه روش عیب‌یابی مناسب یا پایش وضعیت سلامت سازه (SHM) قبل از خرابی ناگهانی می‌باشد. عیب‌یابی به دلیل امنیت و منافع اقتصادی ناشی از آن، یکی از جنبه‌های کلیدی در سازه‌های مهندسی می‌باشد. تست‌های غیر مخرب زیادی برای پایش وضعیت سلامت سازه، پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته شده است. این روش‌ها شامل: آنالیز مودال، تحلیل کشش، تکنیک‌های فتوالاستیک و صدور امواج صوتی و فراصوتی می‌باشد [۵]. روش‌های مبتنی بر پایه پاسخ دینامیکی سازه یا آنالیز مودال، به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته شده، که یک مطالعه جامع در مراجع [۶-۷] ارائه شده است. ایده اصلی در ورای این روش‌ها، بر اساس این اصل استوار است که پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، شکل مود، میرایی مودال) تابع پارامترهای فیزیکی (جرم، سفتی و میرایی) می‌باشد. بنابراین فرض اینکه وجود عیب باعث ایجاد تغییرات در مشخصه‌های مودال سازه می‌گردد، فرض معقولی می‌باشد. مشخصه‌های دینامیکی به کار گرفته شده برای عیب‌یابی سازه‌ها، شامل: توابع پاسخ فرکانسی (FRF)، فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها، منحنی شکل

مودها، انعطاف‌پذیری مودال، انرژی کششی مودال و غیره می‌باشد. از بین این مشخصه‌ها، فرکانس طبیعی به دلیل محاسبه آسان و دقیق آن، کاربرد بسیاری دارد. همچنین عیب‌یابی یک مسئله معکوس نگاشت (inverse problem) از تغییرات موجود در مشخصه‌های اندازه‌گیری شده بین سازه سالم و معیوب، به محل و شدت عیب در سازه می‌باشد. محققان معمولاً در قدم اول برای عیب‌یابی یک سازه از کلاس‌بندی فازی که توسط متغیرهای زبانی بر پایه تجربه یک فرد خبره طراحی گردیده است، استفاده می‌نمایند [۸]. سیستم‌های فازی شامل یک فرآیند خبره محور می‌باشد که مقاومت بسیار بالایی به نامعینی‌های مختلفی نظیر نامعینی در مدل‌سازی یا نامعینی در اندازه‌گیری (نویز) دارد [۹]. از جمله کارهای اخیر در زمینه عیب‌یابی فازی، می‌توان به مرجع [۱۰] اشاره کرد، که کلاس‌بندی فازی برای عیب‌یابی پره کامپوزیتی هلیکوپتر به کار برده شده است.

با توجه به اینکه تا به حال روش عیب‌یابی بر پایه سیگنال‌های دینامیکی یا ارتعاشی سازه‌های توربین بادی شناور به منظور پیش‌بینی وجود عیب و همچنین شدت و مکان عیب، در مجامع علمی گزارش نشده است، انگیزه اصلی این پژوهش ارائه یک راهکار عیب‌یابی مناسب برای توربین بادی شناور از نوع Spar و امکان‌سنجی این روش ارائه شده به صورت شبیه‌سازی عددی می‌باشد. لازم به توضیح است که در این پژوهش، عیب‌های موجود در خطوط مهاری (Mooring Line) به علت اهمیت بسزای آنها، مورد توجه قرار گرفته‌اند، چراکه در این سازه‌ها، کابل‌های مهاری سازه تحت تنش‌های بالایی قرار دارند (بخصوص در شرایط بحرانی نظیر زلزله، طوفان‌های دریایی یا برخورد با شناورهای دیگر) که این منجر به ایجاد آسیب در خود مهار و یا تکیه‌گاه‌های (Anchor) آن می‌شود. اگر این نوع عیوب قبل از جدی شدن آسیب، توسط پاسخ دینامیکی سازه و با استفاده از مشخصه‌های استخراج شده و کلاس‌بندی فازی آن‌ها سریعاً تشخیص داده شود، از خرابی ناگهانی سازه و زیان‌های مادی ناشی از آن جلوگیری به عمل می‌آید.

یکی از مهمترین قسمت‌های طراحی الگوریتم اصلی روش‌های پایش وضعیت هر سازه و بخصوص سازه توربین بادی شناور، مدل‌سازی دینامیکی آن می‌باشد که به منظور استخراج پاسخ دینامیکی سازه توربین و در نهایت طراحی درست روش عیب‌یابی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه مدل‌سازی دینامیکی توربین‌های بادی شناور صورت گرفته است. یکی از روش‌های مدل‌سازی، در نظر گرفتن توربین بادی شناور به صورت سیستم چندجزئی (Multi-body) شامل بدنه، روتور، ناسل و سایر قسمت‌های متحرک می‌باشد که از طریق بلبرینگ‌ها و هاب به هم متصل هستند. سپس از روش‌های اولر- نیوتن یا لاگرانژ برای مدل‌سازی دینامیکی چنین سازه‌هایی استفاده می‌شود. در

در مرکز جرم برج و RNA قرار دارند. فرض می‌شود مرکز جرم RNA در امتداد محور برج قرار دارد، در این صورت کلیه‌ی مرکز جرم‌ها در یک امتداد بوده، در نتیجه انتقال بین سیستم‌های مختصات به سهولت انجام خواهد شد. همچنین (X_s, Y_s, Z_s) به موازات محورهای (X_t, Y_t, Z_t) و در مرکز جرم کلی سیستم در نظر گرفته می‌شود که در حالت تعادل بر روی (X, Y, Z) منطبق می‌شود. برای ساده سازی محاسبات فرض می‌شود که دستگاه‌های (A, B, C) و (X_t, Y_t, Z_t) به ترتیب در راستای محورهای اصلی اینرسی RNA و برج قرار دارند.



شکل ۱- دستگاه‌های مختصات توربین بادی شناور Spar همراه با خطوط مهاری نشان داده شده

برای توصیف زوایای انحراف بزرگ، از زوایای اولر استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. ترتیب دوران زوایا بسیار مهم است بطوری‌که در حالت کلی ۱۲ حالت وجود دارد که در این پژوهش حالت ۱-۲-۳ به کار برده شده است. یعنی ابتدا حول X ، بعد حول Y و سپس حول Z دوران انجام می‌گیرد، که زوایای آن‌ها بترتیب عبارتند است از X_4 ، X_5 و X_6 .

مرجع [۱۱]، با استفاده از معادلات اولر-نیوتن، یک مدل کاهش مرتبه داده شده از توربین بادی با پایه شناور Spar با در نظر گرفتن اثرات ژيروسکوپ به منظور ارائه روش جدید کنترل توربین ارائه شده است. اخیراً نیز با استفاده از معادلات اولر-نیوتن، معادلات دینامیکی کامل کوپل شده غیر خطی سازه Spar برای زوایای بزرگ دوران با در نظر گرفتن اثر ژيروسکوپ و تمامی شرایط محیطی (با وجود باد و موج) استخراج و شبیه‌سازی شده است [۱۲-۱۳]. روش اخیر تا به امروز یکی از دقیق‌ترین مدل‌های چند جزئی توربین بادی شناور Spar می‌باشد. البته دیدگاه‌های مبتنی بر روش المان محدود نیز برای مدل‌سازی توربین بادی شناور، بسیار مورد استفاده قرار گرفته شده است، بطوریکه نرم‌افزارهای تخصصی متنوعی در این زمینه موجود می‌باشد که بیشتر جنبه صنعتی دارند و نمی‌توانند در کارهای آکادمیک برای بررسی روش‌های جدید مدل‌سازی، عیب‌یابی یا کنترل مورد استفاده واقع گردند [۱۴-۱۵]. با توجه به توضیحات اخیر، مراحل اصلی این پژوهش به این صورت است که ابتدا مدل‌سازی دینامیکی سازه‌ی توربین بادی شناور با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۱۳] با استخراج دقیق معادلات دینامیکی حاکم انجام شده است. سپس حل عددی معادلات با استفاده از کدنویسی توابع لازم در محیط MATLAB مهیا شده است. بعلاوه سناریوهای عیوب فرضی برای سازه‌ی مورد مطالعه تعریف گردیده و سپس سیستم کلاس‌بندی فازی بر اساس این عیوب مورد آموزش قرار گرفته است. نهایتاً، شبیه‌سازی روش عیب‌یابی مبتنی بر کلاس‌بندی فازی بر روی مشخصات دینامیکی سازه سالم و معیوب انجام شده است. جهت ارزیابی روش پیشنهادی، از آن در شناسایی عیوب مختلف سازه به همراه نویز با نسبت‌های مختلف استفاده گردیده و نتایج به صورت درصد موفقیت عیب‌یابی گزارش شده است.

۲- مدل‌سازی دینامیکی

۲-۱- دستگاه‌های مختصات و زوایای اولر

توربین‌های بادی شناور معمولاً به صورت دو قسمت صلب در نظر گرفته می‌شوند [۱۳]: ۱- بدنه توربین، که شامل پایه (قسمتی که داخل آب قرار می‌گیرد) و برج بیرونی توربین (Tower) می‌باشد. ۲- مجموع روتور و ناسل (RNA)، که آزادانه نسبت به بدنه حرکت دارند. برای استخراج معادلات حرکت، باید از دستگاه‌های مختصات مختلفی استفاده کرد که در شکل ۱ نشان داده شده است. دستگاه‌های (X, Y, Z) و (X_M, Y_M, Z_M) دستگاه‌های اینرسی اولیه یا به عبارتی دستگاه متصل به زمین می‌باشند. در حالت تعادل اولیه سیستم که جابجایی صفر است، در مرکز جرم کلی سیستم و (X_M, Y_M, Z_M) در سطح آب قرار دارد. (X_t, Y_t, Z_t) و (A, B, C) دستگاه‌های واسطه متصل به جسم هستند که به ترتیب

سمت چپ معادله (۲)، برابر است با گشتاور تمام نيروهاي خارجي: حاصل از نيروي شناوري و خطوط مهاري، \vec{M}_{wind} و \vec{M}_{wave} نيز به ترتيب گشتاورهاي حاصل از نيروهاي موج و باد مي باشند كه در بخش هاي بعدي توضيح داده خواهند شد. همچنين در سمت راست معادله (۲)، مومنتم زاويه اي كل سيستم حول مركز جرم كلي در دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) و سرعت زاويه اي دستگاه مذكور مي باشد و چون در نتيجه سرعت زاويه آن ها نيز با هم برابر است ($\omega_t = \omega_s$). در حالت كلي $\vec{H}_{G_s}^s$ به شكل زير بدست مي آيد [۱۳]:

$$\vec{H}_{G_s}^s = I_s \vec{\omega}_t + \vec{H}' \quad (3)$$

معادله (۳) بيانگر آن است كه مومنتم زاويه اي سيستمي كه از دو جزء صلب تشكيل شده، به دو قسمت، حركت كل سيستم به عنوان جسم صلب و حركت نسبي بين دو جزء، تقسيم مي شود كه در آن تانسور اينرسی، به حركت كلي سيستم مربوط مي شود و برابر است با:

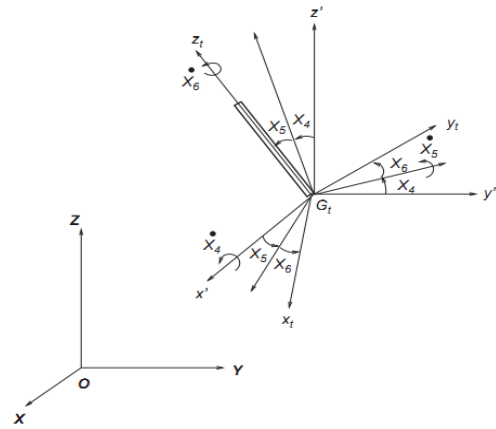
$$I_s = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{11} = (I_A \cos^2 \beta + I_B \sin^2 \beta + m_R \rho_{G_R/G_s}^2) + (I_{x_t} + m_t \rho_{G_t/G_s}^2) \\ I_{12} = I_{21} = (I_A - I_B) \sin \beta \cos \beta \\ I_{22} = (I_A \sin^2 \beta + I_B \cos^2 \beta + m_R \rho_{G_R/G_s}^2) + (I_{y_t} + m_t \rho_{G_t/G_s}^2) \\ I_{33} = I_c + I_{z_t}, I_{13} = I_{31} = I_{23} = I_{32} = 0 \end{cases}$$

β زاويه دوران ناسل مي باشد كه پيوسته به كمك سيستم كنترلي ناسل تنظيم مي شود. ρ_{G_t/G_s} و ρ_{G_R/G_s} اندازه بردارهاي مربوطه آنها بوده و I_t ، تانسور اينرسی برج به صورت يك ماتريس قطري با مولفه هاي قطري I_{x_t} ، I_{y_t} و I_{z_t} مي باشد. همچنين I_R تانسور اينرسی مجموعه روتور و ناسل با اعضاي قطري I_A ، I_B و I_C بوده و m_t و m_R هم به ترتيب جرم عضوي صلب برج و RNA مي باشد. \vec{H}' مومنتم زاويه اي RNA نسبت به برج مي باشد كه مستقل از دوران برج ($\vec{\omega}_t$) و برابر است با:

$$\vec{H}' = (-I_B \dot{\psi} \sin \beta, I_B \dot{\psi} \cos \beta, I_c \omega_{yaw}) \quad (5)$$

$\dot{\psi}$ سرعت زاويه اي روتور حول جهت مثبت محور B و بردار $\vec{\omega}_{yaw}$ نيز سرعت زاويه اي نازل حول Z_t مي باشد. مشتق مطلق $\vec{H}_{G_s}^s$ در معادله (۲)، شامل تغيير در اندازه و جهت آن مي باشد، كه تغييرات



شكل ۲- زواياي اولر با ترتيب ۱-۲-۳ [۱۳]

مسلماً دستگاه (X_t, Y_t, Z_t) متصل به بدنه مي باشد و همراه آن دوران مي كند كه در حالت اوليه همراستا با (X, Y, Z) مي باشد. دوران مذكور ابتدا حول X_t به اندازه X_4 صورت مي گيرد، سپس حول Y_t دستگاه جديد بدست آمده به اندازه X_5 دوران كرده و در نهايت حول Z_t دستگاه بدست آمده از حالت قبل به اندازه X_6 دوران مي كند. سرعت زاويه اي برج در دستگاه اينرسی، با استفاده از زواياي اولر و با توجه به شكل ۲ به صورت زير بدست مي آيد: (جزئيات نحوه محاسبه آن در پيوست A آورده شده است):

$$\omega_t = \begin{cases} \dot{X}_4 \cos X_5 \cos X_6 + \dot{X}_5 \sin X_6 \\ -\dot{X}_4 \cos X_5 \sin X_6 + \dot{X}_5 \cos X_6 \\ \dot{X}_6 + \dot{X}_4 \sin X_5 \end{cases} \quad (1)$$

۲-۲- استخراج معادلات حركت سيستم

براي استخراج معادلات حركت، از معادلات اولر و بقاي مومنتم استفاده مي شود [۱۳]. معادلات مومنتم مستقيماً براي توربين بادي شناور كه شامل دو قسمت صلب برج و RNA مي باشد، به كار برده مي شود. در مدل مورد نظر، ۶ درجه آزادي نامعلوم برج (۳ درجه آزادي مربوط به حركت انتقالی و ۳ درجه آزادي مربوط به حركت دوراني) و دو درجه آزادي معلوم RNA (دوران ناسل و روتور) در نظر گرفته شده است. مومنتم زاويه اي كل سيستم، حاصل جمع مومنتم زاويه اي هر کدام از قسمت هاي صلب توربين مي باشد كه هر کدام در دستگاه مختصات مربوطه محاسبه شده، سپس به دستگاه مختصات الصاق شده به مركز جرم كلي سيستم، انتقال داده مي شود. با توجه به قانون بقاي مومنتم زاويه اي، مجموع تمام گشتاورهاي حاصل از نيروهاي خارجي حول مركز جرم كلي سيستم، در دستگاه مختصات واسطه (X_s, Y_s, Z_s) ، برابر است با تغيير اندازه و جهت مومنتم زاويه اي سيستم در دستگاه اينرسی اوليه: (جزئيات نحوه محاسبه آن در پيوست B آورده شده است):

$$\sum \vec{M} = \frac{D}{Dt} \vec{H}_{G_s} = \frac{d}{dt} \vec{H}_{G_s}^s + \vec{\omega}_s \times \vec{H}_{G_s}^s \quad (2)$$

اندازه آن به شکل زیر است:

$$\left(\dot{\vec{H}}_{G_s}\right)_{(X_s, Y_s, Z_s)}^s = \dot{I}_s \vec{\omega}_1 + I_s \dot{\vec{\omega}}_1 + \dot{\vec{H}}' \quad (6)$$

در رابطه فوق مشتق تانسور اینرسی است، که طبق تعریف مشتق ماتریس، برابر است با مشتق تک تک عضوهای آن نسبت به زمان. بنابراین فقط مقادیری که وابسته به زمان باشد مد نظر است از جمله زاویه دوران ناسل (β) که مشتق آن نسبت به زمان برابر سرعت زاویه‌ای آن است ($\dot{\beta} = \omega_{yaw}$). برای به دست آوردن درجات آزادی انتقالی، حرکت مرکز جرم توربین در نظر گرفته می‌شود که طبق قانون دوم نیوتن:

$$\sum \vec{F} = m_s \vec{a}_{G_s} \quad (7)$$

در آن شتاب مرکز جرم کل سیستم، $\vec{a}_{G_s} = (\ddot{X}_1, \ddot{X}_2, \ddot{X}_3)$ ، m_s جرم کل سیستم و $\sum \vec{F}$ هم مجموع تمام نیروهای خارجی در دستگاه (X, Y, Z) می‌باشد که شامل نیروهای شناوری، خطوط مهاری، باد، موج و نیروی جاذبه زمین است: $\sum \vec{F} = \vec{F}_{restoring} + \vec{F}_{wind} + \vec{F}_{wave} + \vec{G}$. در این پژوهش فرض شده است که عیب‌یابی در یک دریای آرام انجام می‌گیرد، لذا نیروی موج و باد در نظر گرفته نشده‌اند. بعلاوه برای تحریک اولیه سازه در مرحله شبیه‌سازی از مقادیر فرضی مرتبط با هر یک از درجات آزادی استفاده خواهد شد. عملاً برای تحریک توربین بادی شناور، می‌توان از ترمز ناگهانی روتور و قفل گیربکس توربین استفاده نمود که این امر موجب تحریک اولیه مورد نظر در توربین می‌گردد [۴]. مسلماً ترمز مذکور در هنگامی که دریا آرام باشد یا به عبارت دیگر باد و به تبع آن موج نباشد برای توقف روتور توربین به کار می‌رود، بنابراین در چنین شرایطی می‌توان یک پایش وضعیت از سازه توربین با استفاده از روش پیشنهادی انجام داد و گزارش آن را به مرکز کنترل توربین ارسال نمود.

۲-۳-۳- نیروهای بازگرداننده (restoring forces)

در این تحقیق، نیروهای بازگرداننده از ترکیب نیروهای هیدرواستاتیکی و نیروهای خطوط مهاری حاصل می‌شوند که هر دو برای زوایای انحراف بزرگ محاسبه شده‌اند. بنابراین محاسبه نیروهای بازگرداننده حول مرکز جرم کلی سیستم انجام شده است که تغییرات محسوسی نسبت به حالت تعادل اولیه خود دارند. به این منظور ترم $\sum \vec{M}$ موجود در معادلات گشتاور مربوط به تمام نیروهای مذکور، در دستگاه واسطه (X_s, Y_s, Z_s) در نظر گرفته شده است و همچنین ترم $\sum \vec{F}$ مربوط به مجموع تمام نیروها نیز در دستگاه اینرسی (X, Y, Z) فرض شده است. ماتریس انتقال بین این دو دستگاه، تابعی از زوایای اولر (X_6, X_5, X_4) می‌باشد، زیرا

دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) به موازات (X_t, Y_t, Z_t) انتخاب شده است. این ماتریس به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳] (هرکدام از ماتریس‌های ضرب شده در پیوست C آورده شده است):

$$T_{s \rightarrow t} = T_x(X_4) T_y(X_5) T_z(X_6) = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} t_{11} = \cos X_5 \cos X_6, t_{12} = -\cos X_5 \sin X_6, t_{13} = \sin X_5 \\ t_{21} = \cos X_4 \sin X_6 + \sin X_4 \sin X_5 \cos X_6 \\ t_{22} = \cos X_4 \cos X_6 - \sin X_4 \sin X_5 \sin X_6 \\ t_{23} = -\cos X_5 \sin X_4, t_{31} = \sin X_4 \sin X_6 - \cos X_4 \sin X_5 \cos X_6 \\ t_{32} = \sin X_4 \cos X_6 + \cos X_4 \sin X_5 \cos X_6, t_{33} = \cos X_4 \cos X_5 \end{cases}$$

در ادامه به چگونگی استخراج هر کدام از نیروهای مذکور پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۱- نیروی هیدرواستاتیکی

نیروی هیدرواستاتیکی مستقیماً از نیروی شناوری استوانه شناور بدست می‌آید. نیروی شناوری لحظه‌ای یک استوانه شناور در دستگاه مختصات اینرسی برابر است با $\vec{F}_B^I = (0, 0, \rho g \pi r^2 h_1)$ که در آن ρ چگالی آب دریا، g شتاب جاذبه، r شعاع استوانه و h_1 طول قسمتی از استوانه است که در داخل آب قرار می‌گیرد. فاصله بین سطح آب و قسمت تحتانی استوانه، h_1 ، در هر لحظه به صورت تابعی از حرکت heave (X_3) و زاویه استوانه بدست می‌آید [۱۳]:

$$h_1 = \frac{\rho_{G_M/O} X_3}{\cos \theta_1} - \rho_{G_M/O} + h_0 \quad (9)$$

$\rho_{G_M/O}$ فاصله مرکز جرم کلی سیستم تا سطح آب در حالت تعادل اولیه (بدون جابجایی) می‌باشد. به عبارت دیگر، در شکل ۱ همان فاصله بین O و G_M است. همچنین θ_1 زاویه استوانه نسبت به راستای عمود بوده $(\cos \theta_1 = \sin X_4 \cos X_5)$ و h_0 نیز مقدار اولیه h_1 می‌باشد. در نتیجه $h_1 = h_0 - X_3$ است. مرکز شناوری استوانه‌ای که سطح آب را با زاویه‌ای نسبت به آن قطع کرده، در دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) برابر است با $\vec{\rho}_{B/G_s} = (X_s^B, Y_s^B, Z_s^B)$ که در آن:

$$\begin{cases} X_s^B = -\frac{t_{31} r^2}{2 t_{33} h_1}, Y_s^B = -\frac{t_{32} r^2}{2 t_{33} h_1} \\ Z_s^B = -h_G + \frac{h_1}{2} + \frac{r^2 (t_{31}^2 + t_{32}^2)}{4 t_{33}^2 h_1} \end{cases} \quad (10)$$

h_G فاصله قسمت تحتانی استوانه تا مرکز جرم سیستم در امتداد محور استوانه می‌باشد. لازم به یادآوری است که این معادلات با استفاده از نرم‌افزار CATIA و محاسبه دقیق مرکز شناوری نسبت

۳- روش عيب يابي مبتنی بر كلاس بندي فازی

منطق فازی، يك روش محاسباتی نرم منحصر به فردي است كه در آن داده های عددی و دانسته های زبانی به طور هم زمان به كار گرفته می شوند. اساس این منطق، بر مبنای مفهوم مجموعه های فازی است. عضویت در این مجموعه توسط تابع عضویت $\mu(x)$ مشخص می گردد كه می تواند مقادیر بین صفر تا يك داشته باشد. توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه ای، و گاوسی از جمله رایج ترین توابع عضویت می باشند. انتخاب شكل تابع به تجربه كاربر و ماهیت مسئله برمیگردد. لازم به توضیح است كه توابع مذکور می توانند نسبت به هم همپوشانی داشته باشند و معمولاً، این اشكال بین صفر و يك نرمالیزه می شوند. سیستم های فازی مبتنی بر يك نگاشت از بردار مشخصه ها (به عنوان ورودی) به عدد اسكالر (به عنوان خروجی) می باشند [۱۶]. يك سیستم فازی، بطور معمول شامل ورودی چندگانه $(V \in R^m)$ در قالب يك بردار به ابعاد m (تعداد متغیرهای ورودی) و يك خروجی $(W \in R)$ است. بعلاوه نگاشت مذکور از ورودی به خروجی $(F: V \in R^m \rightarrow W \in R)$ شامل چهار مرحله تعیین قوانین (Rules)، فازی سازی، موتور استنتاج و غیر فازی سازی است. قوانین می توانند توسط كاربر متخصص و یا مقادیر عددی مشخصی به دست آیند. در هر دو حالت قوانین مذکور توسط مجموعه ای از جملات شامل IF-THEN به صورت زیر ساخته می شوند:

IF u_1 is HIGH and u_2 is LOW THEN v is LOW

برای فرمولاسیون این قوانین لازم است كه موارد زیر در نظر گرفته شوند:

- معرفی مقادیر عددی معادل برای متغیر زبانی، به عنوان مثال، مقدار 3.5% برای متغیری با عنوان HIGH.

- كمیت سازی متغیرهای زبانی با استفاده از توابع عضویت.

- برقراری ارتباط منطقی بین متغیرهای زبانی (AND یا OR و غیره) در هر يك از قوانین.

- دانستن چگونگی برقراری ارتباط بین قوانین مختلف.

مرحله فازی سازی، ورودی های غیر فازی را به مجموعه های فازی تبدیل می نماید. این فرآیند، انجام فعال سازی قوانین مذکور را در يك قالب عددی در برمی گیرد. موتور استنتاج نیز عمل نگاشت بین مجموعه فازی مرتبط با ورودی و خروجی را با مشخص نمودن نحوه ترکیب مجموعه های فازی، انجام می دهد. در این مقاله عمل این موتور بدین ترتیب است كه ابتدا قوانین به صورت زیر در نظر گرفته می شوند [۱۶]:

به معادلاتی نظیر مرجع [۱۳] با دقت بیشتری استخراج گردیده اند. برای بدست آوردن گشتاور شناوری در دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) ابتدا با استفاده از تبدیل بیان شده در رابطه (۸)، نیروها از دستگاه اینرسی به دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) منتقل می شوند، $\vec{F}_B^s = T_{I \rightarrow s} \vec{F}_B^I$ ، سپس با ضرب خارجی بردار مرتبط با مركز شناوری در نیروی شناوری، گشتاور متناظر بدست می آید $(\vec{M}_B^s = \vec{\rho}_{B/G_s} \times \vec{F}_B^s)$. $T_{I \rightarrow s}$ معكوس ماتریس $T_{s \rightarrow I}$ می باشد و چون ماتریس متعامد می باشد، معكوس آن با ترانپوز آن برابر است.

۲-۳-۲- نیروی خطوط مهاری

در این پژوهش، فرض بر این است كه سیستم خطوط مهاری شامل چهار كابل (Line) تحت كشش می باشد. تغییر در مقدار كشش كابل ها به سادگی در قالب يك تابع بدست می آید. مختصات محل اتصال هر كدام از كابل ها به سازه (نقطه A) با جمع حرکات دورانی و انتقالی محاسبه می شود. موقعیت یکی از نقاط A در دستگاه اینرسی، $\vec{\rho}_{A/O} = \vec{\rho}_{G_s/O} + T_{s \rightarrow I} \vec{\rho}_{A/G_s}$ می باشد كه $\vec{\rho}_{G_s/O}$ مختصات مركز جرم كل سیستم در دستگاه اینرسی، (X_1, X_2, X_3) ، بوده و همچنین $\vec{\rho}_{A/G_s}$ مختصات نقطه A در دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) می باشد. مختصات نقطه اتصال كابل ها به كف دریا (نقطه E) می باشد كه در دستگاه اینرسی ثابت است و بردار موقعیت از نقطه A به نقطه E، $\vec{\rho}_{E/A} = \vec{\rho}_{E/O} - \vec{\rho}_{A/O}$ می باشد. كشش در راستای كابل های تحت كشش، از خاصیت الاستیسیته مواد به شكل زیر بدست می آید [۱۳]:

$$\vec{F}_{line}^I = \left[T_0 + \frac{ES}{L} (\rho_{E/A} - L) \right] \frac{\vec{\rho}_{E/A}}{\rho_{E/A}} \quad (11)$$

كه در آن T_0 كشش اولیه كابل، E مدول یانگ، S سطح مقطع كابل، L طول اولیه كابل و $\rho_{E/A}$ نرم بردار $\vec{\rho}_{E/A}$ ، به عبارتی طول كابل در هر لحظه می باشد. نیروی بازگرداننده خطوط مهاری، $F_{mooring}$ ، از جمع نیروی كابل ها قابل حصول است. گشتاور بازگرداننده هر كدام از كابل ها نیز در دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) با انتقال نیروی مربوطه به دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) با استفاده از رابطه (۸) و سپس ضرب خارجی آن در بردار شعاعی محل اتصال كابل ها به سازه بدست می آید $(\vec{F}_{line}^s = T_{I \rightarrow s} \vec{F}_{line}^I)$ و $(\vec{M}_{line}^s = \vec{\rho}_{A/G_s} \times \vec{F}_{line}^s)$. در نتیجه گشتاور بازگرداننده خطوط مهاری، $M_{mooring}$ ، از جمع گشتاور كابل ها حاصل می شود. در نهایت نیروی بازگرداننده برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases} \vec{F}_{restoring}^I = \vec{F}_B^I + F_{mooring}^I \\ \vec{M}_{restoring}^s = \vec{M}_B^s + \vec{M}_{mooring}^s \end{cases} \quad (12)$$

مقدار سازگاری یک حالت ناشناخته از سیستم با i امین قانون را نشان دهد که به صورت زیر تعریف می‌شود (متناظر با تعریف عملگر "*" در قسمت استنتاج) [۱۷]:

$$D_i = \prod_{l=1}^m \mu_{l,i} \quad (15)$$

در عبارت اخیر m تعداد مشخصه‌های مورد استفاده و $\mu_{l,i}$ (متناظر با $\mu_{F_i}(x)$) نشان دهنده درجه عضویت مشخصه l مرتبط با i امین قانون فازی (کلاس) می‌باشد. حال $D_{\max}(C_i^*)$ (بیشینه درجه عضویت که توسط کلاس C_i^* تولید می‌شود) به صورت زیر بیان می‌شود (متناظر با روش بیشینه سازگاری در مرحله غیر فازی‌سازی) [۱۷]:

$$D_{\max}(C_i^*) = \max_i D_i \quad (16)$$

که در عبارت اخیر i^* خروجی غیر فازی شده‌ای است که برابر با شماره کلاس مربوط به C_i^* در عبارت بالا می‌باشد.

در این تحقیق، کلاس‌بندی فازی مورد استفاده در عیب‌یابی، استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده رفتار دینامیکی سازه توربین، آموزش داده می‌شود. به این منظور از تابع عضویت گاوسی جهت بیان داده‌های ورودی مجموعه‌های فازی مرتبط با هر یک از حالت‌های سالم و معیوب سازه، استفاده شده‌است. این مجموعه‌های فازی به صورت تابع زیر تعریف شده‌است:

$$\mu(x) = e^{-0.5((x-m)/\sigma)^2} \quad (17)$$

که در آن m میانگین مجموعه‌های فازی و σ انحراف معیار متناظر با متغیرهای مرتبط با کلاس مورد نظر است که استخراج آن‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل آموزش سیستم کلاس‌بندی فازی می‌باشد [۱۸]. به عبارت دیگر با استفاده از شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سازه توربین در حالت‌های سالم و معیوب، پاسخ سازه را استخراج و مشخصه‌های مناسبی از این پاسخ به عنوان ورودی سیستم فازی انتخاب می‌گردد. سپس با پیدا نمودن میانگین و انحراف معیار این مشخصه‌ها، توابع توزیع احتمالی مرتبط با هر کدام از این مشخصه‌ها در هر یک از کلاس‌های تعریف شده سازه قابل حصول هستند. از آنجایی که توزیع تصادفی مشخصه‌های ورودی نرمال می‌باشد، تابع توزیع احتمالی به شکل زیر قابل حصول است [۱۸]:

$$P(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-0.5((x-m)/\sigma)^2} \quad (18)$$

در بخش بعد، مراحل شبیه‌سازی مذکور توضیح داده خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی روش عیب‌یابی

بعد از استخراج معادلات دینامیکی توربین، لازم است که در محیط

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } F_1 \ \& \ x_2 \text{ is } F_2 \ \& \dots \ x_m \text{ is } F_m \ \text{Then } y = C_i \quad (13)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, M$$

که در عبارت بالا، R_i قانون i ام، m تعداد متغیر ورودی، M تعداد قوانین، x_i متغیر ورودی، y متغیر خروجی است. همچنین، $C_i \in W$ و $F_i \in V_i$ به ترتیب مجموعه فازی مرتبط با متغیرهای ورودی و خروجی است که توسط توابع عضویت $\mu_{F_i}(x)$ و $\mu_{C_i}(y)$ مشخص می‌گردند. بنابراین هر قانون به صورت عمل استنتاجی $F_{1,2,\dots,m} = F_1 \times F_2 \times \dots \times F_m \rightarrow C_i$ در نظر گرفته شود، که در آن $F_{1,2,\dots,m}$ یک مجموعه فازی $V \times W = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m \times W$ با توابع عضویت زیر است [۱۶]:

$$\mu_{R_i}(x, y) = \mu_{F_1}(x_1) * \mu_{F_2}(x_2) * \dots * \mu_{F_m}(x_m) * \mu_{C_i}(y) \quad (14)$$

که در رابطه اخیر، "*" می‌تواند یک عملگری نظیر ضرب یا کمینه‌ساز باشد. عملگر ضربی به صورت جبری متداول‌تر است. در نهایت، مرحله غیرفازی‌ساز، وظیفه تبدیل مجموعه فازی مربوط به خروجی را به اعداد غیر فازی انجام می‌دهد. بیشتر غیرفازی‌سازی‌های به کار رفته در مهندسی عبارتند از روش مرکزی و بیشینه سازگاری که به ترتیب، بیشتر برای مسائل کنترل و کلاس بندی به کار می‌روند. در ادامه، الگوریتم کلاس بندی فازی مورد استفاده در این مقاله بر مبنای مفاهیم منطق فازی فوق الذکر، شرح داده می‌شود. ابتدا باید به این نکته اشاره نمود که معمولاً در مسئله کلاس-بندی، مجموعه خروجی به صورت یک مجموعه غیر فازی در نظر گرفته می‌شود و فقط شماره کلاس مربوط به وضعیت صحیح از سیستم را نشان می‌دهد. پس در عبارت (۱۴) باید داشته باشیم [۱۷]: $\mu_{C_i}(y) = 1$.

حال می‌توان فرض کرد که تعداد M قانون فازی در یک سیستم فازی برای تولید کلاس‌ها (C_j) به کار رود ($j = 1, 2, \dots, M$) و بدین صورت که در عبارت (۱۴)، x_i و M به ترتیب برابر با مشخصه‌های استخراج شده و تعداد کلاس‌ها باشند. همچنین، مجموعه فازی مرتبط با F_i به شکل توابع عضویت گاوسی در نظر گرفته شود. بنابراین مقدار میانگین و واریانس هر یک از توابع عضویت گاوسی نیز برابر با مقدار میانگین و واریانس مشخصه‌های استخراج شده می‌باشند. لازم است که عملیات تنظیم پارامترهای توزیع گاوسی در هر یک از کلاس‌های تعریف شده برای سیستم، قبل از کلاس‌بندی انجام شود. این مرحله با نام آموزش در روش کلاس‌بندی فازی مشهور است. در ادامه، مرحله استنتاج و غیر فازی‌سازی بیان می‌شود که منجر به مشخص شدن کلاس مورد نظر می‌گردد. در نظر بگیرید که D_i (متناظر با $\mu_{R_i}(x, y)$)

$$x = \{\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \omega_5 \ \omega_6\}$$

$$y = F(x) = \begin{cases} \text{undamaged} \\ \text{slight damage at line1} \\ \text{moderate damage at line1} \\ \text{severe damage at line 1} \\ \text{slight damage at line 2} \\ \text{moderate damage at line 2} \\ \text{severe damage at line 3} \\ \text{slight damage at line 3} \\ \text{moderate damage at line 3} \\ \text{severe damage at line 3} \\ \text{slight damage at line 4} \\ \text{moderate damage at line 4} \\ \text{severe damage at line 4} \end{cases} \quad (20)$$

با توجه به مجموعه بالا می‌توان مشاهده نمود که در مجموع ۱۳ کلاس مرتبط با هر کدام از وضعیت‌های سازه تعریف شده‌است. خروجی الگوریتم کلاس‌بندی، یک عدد می‌باشد که نشان دهنده شماره یکی از کلاس‌های تعریف شده در بالا خواهد بود. فرایند شبیه‌سازی عیب بیان شده می‌تواند عدم قطعیت در مدل سازی را نیز منظور نماید. بدین صورت که در حین آموزش یا ارزیابی روش کلاس‌بندی فازی از همه مقادیر کاهش سختی که بین کمترین و بیشترین مقدار در بازه مرتبط با کلاس مورد نظر قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. فرضاً، در تخمین مقدار میانگین و واریانس تابع عضویت مربوط به یکی از کلاس‌ها، جهت آموزش الگوریتم کلاس‌بندی مذکور (مثلاً عیب شدید در کابل شماره ۲)، کافی است که سختی کابل مورد نظر به اندازه ۳۰ تا ۴۰ درصد با یک فاصله ۰/۱ درصد کاهش داده و در هر کاهش، ورودی سیستم فازی را به دست آورده و نهایتاً میانگین و انحراف معیار داده‌های مربوط به ورودی را محاسبه نمود (مسلماً تعداد داده‌های ورودی برابر با $100 \div 0.1 = 10$ می‌باشد). بدین منظور، ورودی سیستم منطق فازی به این ترتیب استخراج می‌گردد که بعد از شبیه‌سازی رفتار دینامیکی توربین بادی شناور Spar در شرایط سناریوهای عیب مختلف، پاسخ دینامیکی حاصل در مرکز جرم سازه در یک دریای آرام مشخص نموده، سپس طیف فرکانسی پاسخ مذکور استخراج شده و محل پیک غالب طیف‌ها مشخص می‌گردد. آنگاه فرکانس‌های مربوط به آن‌ها به عنوان مشخصه‌های ورودی سیستم منطق فازی در نظر گرفته می‌شود. لازم به یادآوری است که تعداد فرکانس‌های غالب در هر طیف مرتبط با هر کدام از پاسخ‌های دینامیکی توربین به صورت یک عدد می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه توربین دارای شش درجه آزادی می‌باشد، پس شش فرکانس

کدنویسی MATLAB و با نوشتن توابع مناسب و دستور ode45 اقدام به حل آن‌ها نمود. بدین‌منظور در این مقاله، از مشخصات فیزیکی و مکانیکی توربین OC3-hywind [۱۴] استفاده می‌شود. ممان اینرسی RNA در دستگاه (A,B,C) به صورت مقادیر زیر است [۱۲]:

$$I_A = 2.35 \times 10^7 \text{ kg.m}^2, I_B = 4.37 \times 10^7 \text{ kg.m}^2, I_C = 2.54 \times 10^7 \text{ kg.m}^2$$

سرعت روتور 12.1rpm در نظر گرفته می‌شود. همچنین اندازه پایه که در داخل آب قرار می‌گیرد 72m می‌باشد. ممان اینرسی برج نیز به صورت زیر فرض می‌شود [۱۲]:

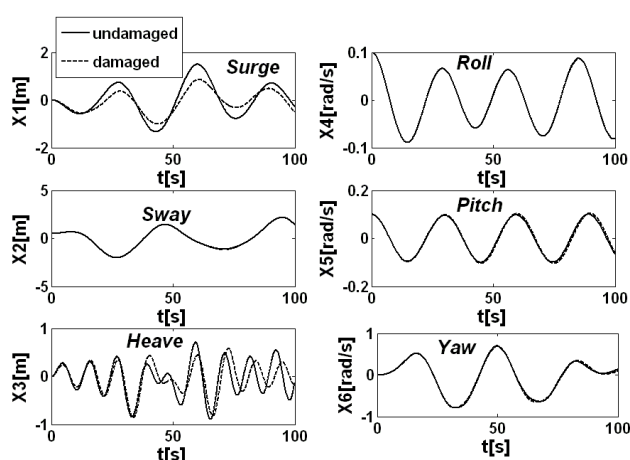
$$I_{x_i} = I_{y_i} = 3.57 \times 10^9 \text{ kg.m}^2, I_{z_i} = 9.28 \times 10^7 \text{ kg.m}^2$$

چهار کابل کشیده در سیستم خطوط مهاری موجود می‌باشد، که هرکدام از کابل‌ها به صورت فنری با سختی $3.37 \times 10^5 \text{ N/m}$ در نظر گرفته شده‌اند که طول اولیه هرکدام 295m و عمق آب نیز 320m است. بعلاوه وضعیت دریا آرام فرض می‌شود، بنابراین برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی توربین از جابجایی اولیه به صورت $X_2 = 0.5$ و $X_4 = X_5 = 0.1$ استفاده می‌شود و سایر شرایط اولیه صفر در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی سناریوی وقوع عیب در سازه توربین بادی مفروض، از عبارت نرمال شده شدت کاهش سختی کابل‌ها و به صورت درصد، استفاده می‌شود:

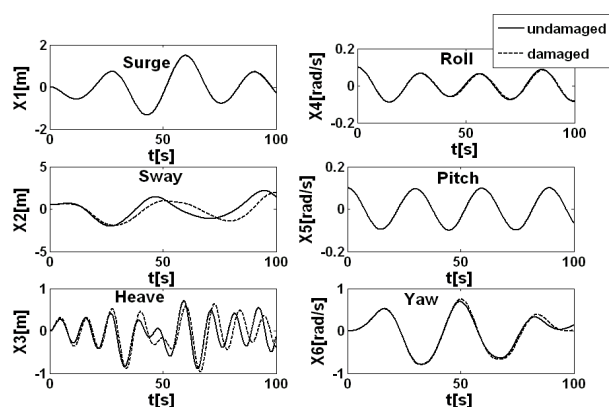
$$D = \frac{K_u - K_d}{K_u} \times 100 \quad (19)$$

که در آن K سختی کابل مورد نظر و زیر نویس‌های u و d به ترتیب حالت سالم و معیوب را نشان می‌دهد. سناریوهای عیب موجود در هرکدام از کابل‌ها با مقادیر کاهش سختی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، شبیه‌سازی شده‌است. این عیب‌ها به این شکل کلاس‌بندی شده‌اند که درصد کاهش سختی بین ۱۰ و ۲۰ درصد حالت عیب با شدت کم (Slight)، بین ۲۰ و ۳۰ درصد حالت عیب با شدت متوسط (Moderate) و بین ۳۰ و ۴۰ درصد حالت عیب با شدت زیاد (Sever) را نشان می‌دهد. شرایطی که مقدار عیب در آن کمتر از ۱۰ درصد باشد به عنوان حالت سالم کلاس‌بندی می‌شود. مجموعه ورودی و خروجی سیستم منطق فازی به ترتیب عبارتند از مشخصه‌های اندازه‌گیری شده سازه (x) و وضعیت عیب سازه ($y = F(x)$). که به صورت زیر تعریف شده اند:

به عنوان یک نمونه از شبیه‌سازی سازه معیوب، در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب اثر وجود عیب با شدت ۴۰ درصد بر پاسخ دینامیکی سازه در کابل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌است. در شکل‌های ۷ و ۸ نیز طیف فرکانسی نظیر هر کدام از این شکل‌ها نمایش داده شده‌است. همانطوری که مشاهده می‌گردد، وجود عیب در هر کدام از کابل‌ها، بر روی پاسخ دینامیکی سازه و به دنبال آن طیف فرکانسی اثر خواهد گذاشت. علت این مسئله را می‌توان به تغییر یافتن نیرو-های بازگرداننده در حین وقوع عیب در یکی از کابل‌ها ارتباط داد. از آنجایی که کابل‌های ۱ و ۳ و همچنین ۲ و ۴ در مقابل هم هستند، اثرگذاری عیب در آن‌ها یکسان خواهد بود. بنابراین در اینجا تنها اشکال مربوط به کابل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌است.

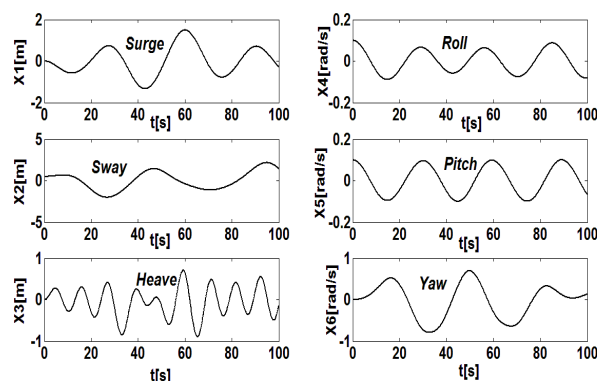


شکل ۵- تاثیر وجود عیب در کابل ۱ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم

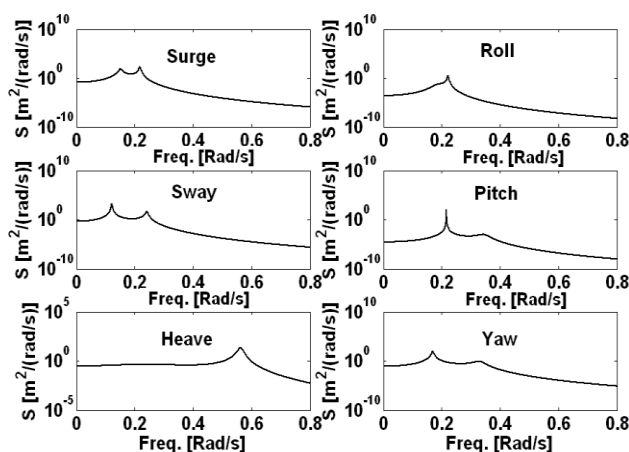


شکل ۶- تاثیر وجود عیب در کابل ۲ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم

به عنوان ورودی سیستم کلاس‌بندی فازی در نظر گرفته شده‌است. به عنوان نمونه در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پاسخ دینامیکی سازه در حالت سالم و طیف مرتبط با آن نشان داده شده‌است. در این شکل‌ها X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 و X_6 بترتیب نشان دهنده پاسخ دینامیکی توربین در درجات آزادی Heave, Sway, Surge, Roll, Pitch و Yaw می‌باشند.



شکل ۳- پاسخ دینامیکی سازه سالم در هر یک از درجات آزادی



شکل ۴- طیف فرکانسی پاسخ دینامیکی سازه سالم در هر یک از درجات آزادی (مقیاس لگاریتمی)

لازم به توضیح است که با مقایسه شکل‌های اخیر با شکل‌های نظیر در مرجع [۱۲]، می‌توان به صحت شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش پی برد. همچنین با توجه به شکل ۴ می‌توان به وجود پیک‌های فرکانسی که معرف هر کدام از فرکانس‌های غالب یا همان فرکانس طبیعی سازه توربین به عنوان ورودی سیستم فازی هستند پی برد. این فرکانس‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند.

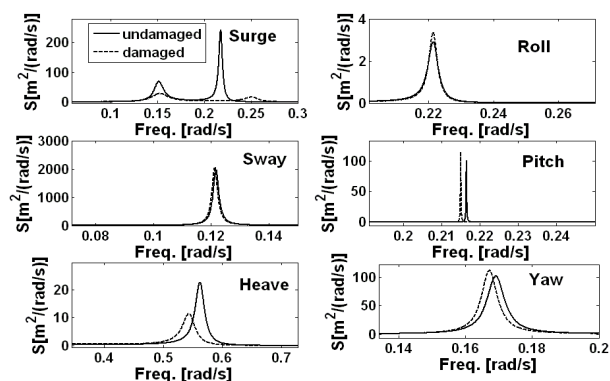
جدول ۱- فرکانس‌های طبیعی استخراج شده

mode	Natural Frequency [rad/s]
Surge	0.1423
Sway	0.1384
Heave	0.5607
Roll	0.222
Pitch	0.2128
yaw	0.1754

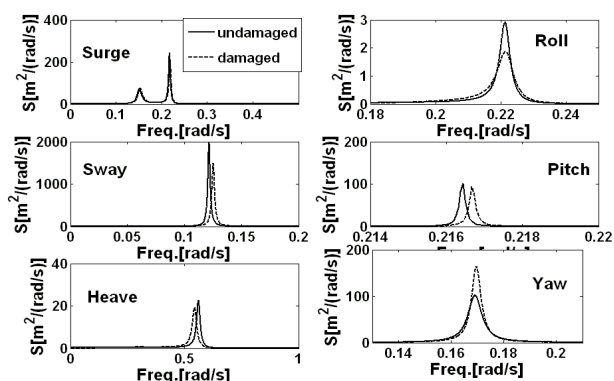
پيش بينی های فنی مطابقت می نماید، بنابراین شبیه سازی توربین همراه با عيب خطوط مهاری به درستی انجام گرفته شده است. همانطوریکه ملاحظه می شود با توجه به پیچیدگی دینامیکی سیستم توربین بادی شناور به علت معادلات کوپل غیر خطی دینامیکی، تفسیر تاثیر نوع و شدت عيب بر روی رفتار پاسخ دینامیکی سیستم پیچیده و به تبع آن شناسایی عيب بسیار مشکل می باشد. به عبارت دیگر هر آسیبی که به خطوط مهاری وارد می شود، با توجه به شماره موقعیت کابل و شدت آسیب، تاثیر خاصی بر دینامیک سیستم می گذارد. بنابراین برای پیش بینی درست محل و شدت عيب، احتیاج به یک فرد خیره و با تجربه است تا با مشاهدات خود از نمودارهایی نظیر شکل های اخیر، عيب یابی را به نحو احسن انجام دهد. با توجه به مشکلات بیان شده در عيب یابی بر اساس نظر اپراتور، باید به دنبال یک سیستم هوشمند و خبره ای (Expert System) مانند روش کلاس بندی فازی بود که بعد از آموزش های لازم به صورت خودکار نوع و شدت عيب را شناسایی نماید. همانطوریکه در بخش قبلی بیان شد، می توان با استفاده از داده های حاصل از شبیه سازی سازه، توابع عضویت لازم در کلاس بندی فازی را تنظیم نمود و در عيب یابی سازه به کار برد. در بخش بعدی در مورد این قسمت از آموزش سیستم فازی و نتایج حاصل از عيب یابی توضیح داده خواهد شد.

۵- نتایج و بحث

برای استخراج میانگین و انحراف معیار هر یک از توابع گاوسی (رابطه (۱۸)) مربوط به هر کلاس عيب، ۶۵ شبیه سازی برای هر کدام از کلاس های تعریف شده در رابطه (۲۰) انجام داده و بعد از استخراج طیف فرکانسی پاسخ ها، پارامتر های مذکور را که در جدول ۱ قابل مشاهده می باشد، می توان به دست آورد. لازم به ذکر است که انتخاب انحراف معیار برای مجموعه فازی نکته ای کلیدی می باشد، زیرا که بر عملکرد سیستم منطق فازی تاثیر بسیار زیادی می گذارد. این نکته بر اساس این حقیقت است هر کدام از مجموعه های فازی باید پهنای مناسبی داشته باشند تا اختلاف بین داده های اندازه گیری شده مشخص باشد. برای این منظور با استفاده از روش پیشنهادی در مرجع [۹]، مقادیر انحراف معیار به نحو مناسبی با توجه به توزیع احتمالی هر کدام از کلاس ها، بهبود داده شده و در جدول ۱ درج گردیده است.



شکل ۷- تاثیر وجود عيب در کابل ۱ بر طیف فرکانسی پاسخ سازه و مقایسه با حالت سالم



شکل ۸- تاثیر وجود عيب در کابل ۲ بر طیف فرکانسی پاسخ سازه و مقایسه با حالت سالم

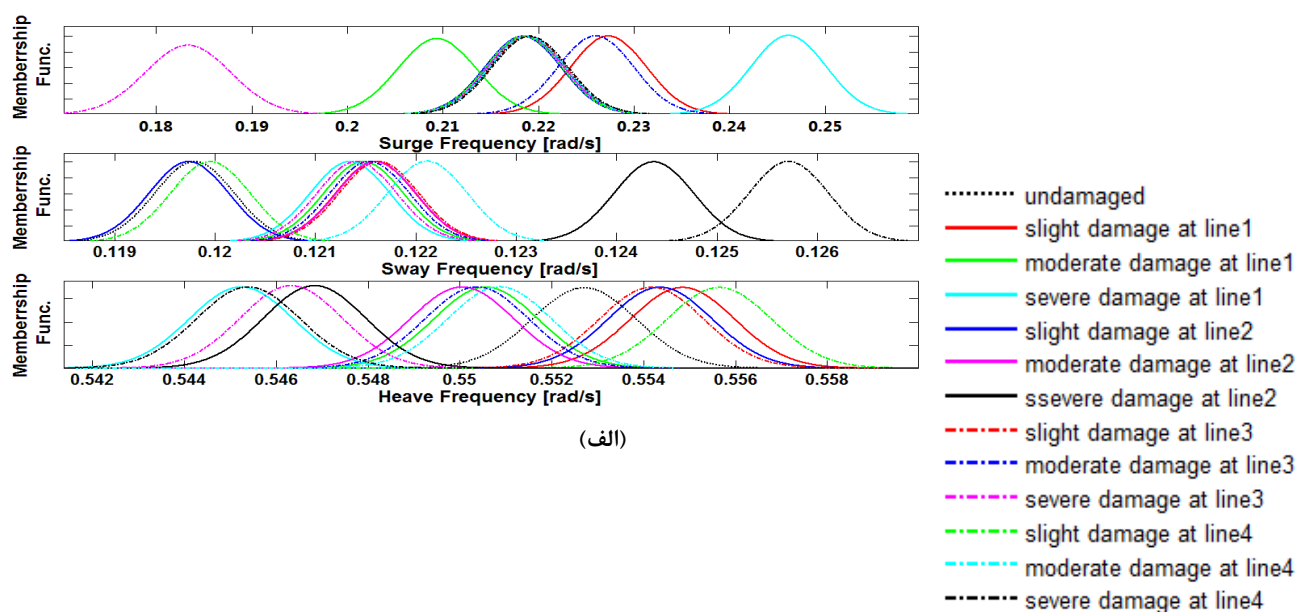
همان گونه که از شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده می باشد، در تمام حالت های وجود عيب در خطوط مهاری سیستم، حرکت انتقالی heave (حرکت در راستای Z) و حرکت دورانی yaw (دوران حول Z) تغییر پیدا کرده است. این مشاهده، مسئله قابل انتظاری است، چون در صورتی که هر کدام از کابل ها آسیب ببینند، نیروی بازگرداننده در راستای Z و گشتاور بازگرداننده حول Z تغییر بارزی می یابد. همچنین وجود عيب در کابل های ۱ یا ۳ باعث ایجاد تغییرات بیشتری در حرکت انتقالی surge (حرکت در راستای X) و حرکت دورانی pitch (دوران حول Y) نسبت به سایر درجات آزادی توربین (roll و sway) می شود. زیرا نیروی بازگرداننده در راستای X و گشتاور بازگرداننده حول Y دچار اختلال می گردد. به همین ترتیب وجود عيب در کابل های ۲ یا ۴ نیز باعث ایجاد تغییرات بیشتری در حرکت انتقالی sway (حرکت در راستای Y) و حرکت دورانی roll (دوران حول X) نسبت به سایر درجات آزادی (surge و pitch) می شود. با توجه به اینکه تمامی نتایج اخیر با

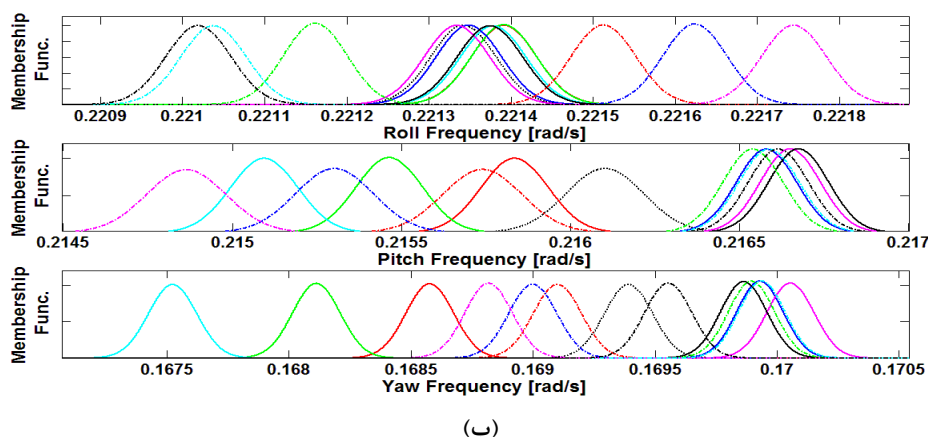
جدول ۲- میانگین و انحراف معیار هر یک از توابع گاوسی تعریف شده مرتبط با هر کدام از شش فرکانس غالب سازه (به عنوان ورودی) و شرایط مختلف توربین بادی (انحراف معیارها در داخل پرانتز نوشته شده‌اند)

ω_6	ω_5	ω_4	ω_3	ω_2	ω_1	وضعیت عیب
-/۱۶۹۴(۰/۰۰۹۹)	-/۲۱۶۱(۰/۰۱۱۶)	-/۲۲۱۳(۰/۰۰۴۰)	-/۵۵۲۷(۰/۱۱۴۸)	-/۱۱۹۸(۰/۰۳۹۸)	-/۲۱۸۸(۰/۳۹۸۸)	بدون عیب
-/۱۶۸۶(۰/۰۰۹۸)	-/۲۱۵۸(۰/۰۱۰۰)	-/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	-/۵۵۴۸(۰/۱۱۴۵)	-/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۸)	-/۲۲۷۳(۰/۳۹۷۲)	عیب با شدت کم در کابل ۱
-/۱۶۸۱(۰/۰۰۹۸)	-/۲۱۵۵(۰/۰۰۹۹)	-/۲۲۱۴(۰/۰۰۳۹)	-/۵۵۰۶(۰/۱۱۴۰)	-/۱۲۱۵(۰/۰۳۹۸)	-/۲۰۹۴(۰/۴۱۱۲)	عیب با شدت متوسط در کابل ۱
-/۱۶۷۵(۰/۰۰۹۹)	-/۲۱۵۱(۰/۰۱۰۰)	-/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	-/۵۴۵۲(۰/۱۱۳۸)	-/۱۲۱۳(۰/۰۳۹۸)	-/۲۴۶۲(۰/۳۹۴۴)	عیب با شدت زیاد در کابل ۱
-/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)	-/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۳(۰/۰۰۴۰)	-/۵۵۴۴(۰/۱۱۴۱)	-/۱۱۹۷(۰/۰۳۹۸)	-/۲۱۸۴(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۲
-/۱۷۰۱(۰/۰۰۹۷)	-/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۳(۲۲/۱۳۳)	-/۵۵۰۱(۰/۱۱۳۸)	-/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۸)	-/۲۱۸۷(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت متوسط در کابل ۲
-/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)	-/۲۱۶۷(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	-/۵۴۶۸(۰/۱۱۱۹)	-/۱۲۴۴(۰/۰۳۹۹)	-/۲۱۸۹(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت زیاد در کابل ۲
-/۱۶۹۱(۰/۰۰۹۹)	-/۲۱۵۷(۰/۰۱۱۸)	-/۲۲۱۵(۰/۰۰۴۰)	-/۵۵۴۲(۰/۱۱۴۲)	-/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۹)	-/۲۱۸۹(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۳
-/۱۶۹۰(۰/۰۰۹۹)	-/۲۱۵۳(۰/۰۱۱۶)	-/۲۲۱۶(۲۲/۱۶۲)	-/۵۵۰۴(۰/۱۱۳۷)	-/۱۲۱۵(۰/۰۳۹۸)	-/۲۲۶۰(۰/۳۹۷۰)	عیب با شدت متوسط در کابل ۳
-/۱۶۸۸(۰/۰۰۹۷)	-/۲۱۴۹(۰/۰۱۱۸)	-/۲۲۱۷(۰/۰۰۴۰)	-/۵۴۶۳(۰/۱۱۲۰)	-/۱۲۱۴(۰/۰۳۹۸)	-/۱۸۳۳(۰/۴۵۰۹)	عیب با شدت زیاد در کابل ۳
-/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)	-/۲۱۶۵(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۲(۰/۰۰۳۹)	-/۵۵۵۷(۰/۱۱۴۴)	-/۱۲۰۰(۰/۰۳۹۹)	-/۲۱۸۵(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۴
-/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)	-/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۰(۰/۰۰۴۰)	-/۵۵۰۹(۰/۱۱۳۵)	-/۱۲۲۱(۰/۰۳۹۶)	-/۲۱۸۸(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت متوسط در کابل ۴
-/۱۶۹۶(۰/۰۰۹۷)	-/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	-/۲۲۱۰(۰/۰۰۴۰)	-/۵۴۵۴(۰/۱۱۳۸)	-/۱۲۵۷(۰/۰۳۹۸)	-/۲۱۹۱(۰/۳۹۸۸)	عیب با شدت زیاد در کابل ۴

فرکانس استخراج شده از سازه توربین بادی شناور با وضعیت نامشخص از نظر سلامتی سازه معلوم باشد. هدف این است که با اطلاعات موجود در این شکل‌ها، وضعیت سازه از نظر اینکه در کدام یک از کلاس‌ها قرار دارد، مشخص شود. یک اپراتور انسانی قادر نیست توسط این شکل‌ها و مقایسه مقادیر فرکانس‌های استخراجی با میانگین توابع رسم شده، کلاس مورد نظر را تشخیص دهد. بنابراین در این مرحله نیاز به استفاده از یک سیستم کلاس‌بندی فازی، به گونه‌ای که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، کاملاً احساس می‌شود. این سیستم همانطوری که قبلاً توضیح داده شد، به صورت خودکار شش فرکانس را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و بعد از قرار دادن در معادله (۱۵) و همچنین اعمال معادله (۱۶) شماره کلاسی که سازه در شرایط آن کلاس قرار دارد را مشخص می‌نماید.

در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، تابع توزیع احتمالی برای $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ و ω_4, ω_5 و ω_6 نشان داده شده‌است. لازم به توضیح است که در هر کدام از شکل‌های مذکور ۱۳ تابع توزیع مرتبط با کلاس‌های عیب با رنگ‌های مختلف برای ω های مربوطه ترسیم گردیده است. بعضی از کلاس‌ها همپوشانی خیلی کمی با یکدیگر دارند. به عنوان مثال در شکل‌های مربوط به ω_1 ، عیب شدید در کابل ۱ با عیب شدید در کابل ۳ همپوشانی ندارد. به عبارت دیگر مقدار میانگین این دو کلاس از هم چنان متفاوت هستند که حتی با کم و زیاد کردن انحراف معیار، تابع احتمالی مربوط به این دو کلاس همپوشانی نخواهند داشت. از طرفی بعضی از کلاس‌ها نظیر کلاس مربوط به عیب کم در کابل ۱ و عیب متوسط در کابل ۳، همپوشانی بسیار زیادی دارند که این همپوشانی به دلیل نزدیک بودن میانگین آن‌ها به یکدیگر می‌باشد. حال فرض می‌شود شش





شكل ۹- توابع توزيع احتمالي فرکانس‌های غالب (ورودی‌های سیستم فازی) مرتبط با پاسخ دینامیکی متناظر با: الف- حرکت انتقالی سازه توربین‌بادی شناور ب- حرکت دورانی سازه توربین‌بادی شناور

جدول ۳- درصد موفقیت عیب‌یابی مربوط به هر کدام از کلاس‌های عیب

درصد موفقیت		بدون نویز	وضعیت عیب
Snr = 70	Snr = 80		
۵۹/۷	۸۸/۰۶	۹۲/۵۴	بدون عیب
۶۸/۸۵	۹۶/۷۲	۱۰۰	عیب با شدت کم در کابل ۱
۳۲/۷۸	۴۹/۱۸	۶۲/۳	عیب با شدت متوسط در کابل ۱
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	عیب با شدت زیاد در کابل ۱
۵۲/۴۶	۸۶/۸۹	۱۰۰	عیب با شدت کم در کابل ۲
۵۵/۷۴	۹۳/۴۴	۹۶/۷۲	عیب با شدت متوسط در کابل ۲
۷۷/۰۵	۹۱/۸	۱۰۰	عیب با شدت زیاد در کابل ۲
۴۷/۵۴	۹۰/۱۶	۱۰۰	عیب با شدت کم در کابل ۳
۷۳/۷۷	۹۵/۰۸	۹۶/۷۲	عیب با شدت متوسط در کابل ۳
۶۳/۹۳	۶۰/۶۶	۶۰/۶۵	عیب با شدت زیاد در کابل ۳
۳۱/۱۴	۷۷/۰۴	۱۰۰	عیب با شدت کم در کابل ۴
۶۷/۲۱	۸۶/۸۹	۹۵/۰۸	عیب با شدت متوسط در کابل ۴
۸۳/۶۱	۹۳/۴۴	۱۰۰	عیب با شدت زیاد در کابل ۴
۶۲/۵۸	۸۵/۳۶	۹۲/۶۲	کل

با توجه به این جدول مشاهده می‌گردد که اولاً در حالت بدون نویز عیب‌یابی به نحو احسن در تمامی کلاس‌های عیب، انجام گرفته شده و با درصد بسیار بالایی موفق بوده است. ثانیاً با زیاد شده نویز، همانطوریکه قابل انتظار است، قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص موفق کلاس‌های عیب کاسته می‌شود ولی با این وجود در حضور نویز ضعیف، درصد قابل توجهی از کلاس‌های عیب تشخیص داده شده که این نشانگر مقاوم بودن نسبی روش به نویز با شدت ضعیف است که اغلب در عمل، در هنگام معیوب شدن سنسورها یا استفاده از سنسورهای نه چندان دقیق محتمل است. ثالثاً، با شدید شدن شدت عیب در بعضی از خطوط، انتظار بهتر شدن عیب‌یابی نمی‌توان داشت. به عبارت دیگر نمی‌توان ادعا نمود که مقدار درصد موفقیت رابطه‌ای مشخص با شدت عیب دارد. این رفتار بدین صورت قابل توجیه است که وقتی شدت عیب تغییر می‌یابد، تغییر فرکانسی، اتفاق می‌افتد [۱۸]. به عبارت دیگر، با تغییر شدت عیب،

پس از تخمین توابع عضویت نظیر آنچه که در شکل‌های اخیر ترسیم گردیده‌اند (مرحله آموزش کلاس‌بندی فازی)، روش پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ۶۵ شبیه‌سازی دیگر برای هر وضعیت عیب با کاهش درصدهای سختی غیر متناظر با حالت آموزش (مجموعاً ۸۴۵ (۶۵×۱۳) شبیه‌سازی) انجام می‌گیرد. بعد از استخراج شش فرکانس مرتبط با هر شبیه‌سازی و در نظر گرفتن این فرکانس‌ها به عنوان ورودی سیستم فازی و عملیات کلاس‌بندی بر روی این شش داده، شماره کلاس به عنوان خروجی دریافت می‌گردد و با مقایسه این شماره کلاس با شماره کلاس صحیح در هر شبیه‌سازی، درصد موفقیت (SR)، طبق زیر محاسبه می‌شود.

$$S_R = \frac{N_c}{N_T} \times 100 \quad (21)$$

که در آن N_T تعداد کل نمونه‌های شبیه‌سازی شده و N_c تعداد نمونه‌های درست تشخیص داده شده در کلاس متناظر می‌باشد. مقادیر درصد موفقیت‌های متناظر در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در این جدول، درصد موفقیت هر نوع عیب درج شده و در نهایت درصد موفقیت متوسط نیز اعلام گردیده است. همچنین به منظور مطالعه تأثیر نویز اندازه‌گیری شده، دو نوع نویز با SNRهای مختلف بر روی مشخصه‌های استخراجی اعمال گردید (نویز ضعیف و قوی)، سپس درصد موفقیت مورد اشاره برای هر دو حالت در جدول اخیر به همراه میانگین درصد موفقیت برای هر کلاس نشان داده شد. لازم به توضیح است که نویز تولیدی توسط روش مونت-کارلو و بر اساس تابع توزیع احتمالی گاوسی تولید شده‌است. (با استفاده از دستور *awgn* در محیط MATLAB)

۶-مراجع

- 1- Musial, W., Butterfeld, S., and Ram, B., (2006), *Energy from offshore wind*, Tech. Rep. NREL/CP-500-39450, National Renewable Energy Laboratory.
- 2- Matha, D., (2009), *Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform, with a comparison to other floating turbine concepts*, Master's thesis, University of Colorado-Boulder, April.
- 3- Roddier D., Cermelli C., Aubault A., Weinstein A., (2010), *WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines*, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2. pp. 1-34.
- 4- Cordle A., Jonkman J., (2011), *State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools*, Conference Paper, NREL/CP-5000-50543.
- 5- McCann D.M, Forde M.C, (2001), *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*, NDT & E International, Vol 34, pp. 71-84.
- 6- Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B. R., (2003), *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.
- 7- Montalvao D., Maia N.M.M., Ribeiro A.M.R., (2006), *A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials*, The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, pp. 295-324.
- 8- Ganguli R., (2001), *A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data*, J. Intell. Mater. Syst. Struct. Vol. 12, pp. 397-408.
- 9- Pawar P.M., Ganguli R., (2003), *Genetic Fuzzy System for damage detection in beams and helicopter rotor blades*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 192, pp. 2031-2057.
- 10- Pawar P.M., Ganguli R., (2007), *Genetic Fuzzy System for Online Structural Health Monitoring of Composite Helicopter Rotor Blades*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 2212-2236.
- 11- Sandner F., (2012), *Reduced Model Design of a Floating Wind Turbine*, Diploma Thesis DIPL-187, University of Stuttgart, ITM - Institute of Engineering and Computational Mechanics
- 12- Sweetman B, Wang L, (2012), *Simulation of large amplitude motion of floating wind turbines using conservation of momentum*, Ocean Engineering Vol. 42, pp. 155-164.
- 13- Sweetman B, Wang L. (2014), *Momentum Cloud Method for Dynamic Simulation of Rigid Body Systems*, J. Eng. Mech., Vol. 140, pp. 257-267.
- 14- Jonkman J., (2010), *Definition of the Floating System for Phase IV of OC3*, Technical Report, NREL/TP-500-47535.
- 15- Karimirad M., Moan T., (2012), *A simplified*

بعضی از فرکانس‌ها به سمت فرکانس دیگر حرکت می‌کند. به عنوان مثال با زیاد شدن عیب، فرکانس دوم آنقدر کم می‌شود که به منطقه فرکانس اول می‌رسد و فرکانس اول آنقدر کاهش می‌یابد که از محدوده فرکانسی خارج می‌شود. در نتیجه روش کلاس‌بندی که بر اساس تغییرات فرکانسی محدود و مشخصی تنظیم شده‌است، از حالت تنظیم خارج می‌گردد و نتایج عیب‌یابی خوبی حاصل نمی‌شود.

۶- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله ابتدا با استفاده از یکی از دقیق‌ترین مدل‌های ارائه شده برای ارزیابی رفتار دینامیکی توربین بادی شناور که در یک سال اخیر در ادبیات فن گزارش شده‌است، کدنویسی مربوطه جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی توربین در محیط نرم افزار MATLAB انجام گرفت. سپس با توجه به اینکه عیوب خطوط مهاری توربین بادی شناور نسبت به سایر عیوب در این گونه سازه‌ها محتمل‌تر است، پاسخ دینامیکی سازه را تحت سناریوهای مختلف عیب در خطوط مهاری استخراج نموده و پس از اعتبار سنجی مدل پیشنهادی (مدل سازه سالم) با ادبیات فن، پاسخ دینامیکی عیوب مختلف و تأثیر هر کدام از این عیوب مورد بررسی قرار گرفته شد. به منظور عیب‌یابی به صورت خودکار، کلاس‌بندی فازی که یکی از روش‌های پرکاربرد در عیب‌یابی سازه‌ها است، انتخاب گردیده و بعد از آموزش آن، این روش برای عیب‌یابی سازه توربین به کار برده شد. بدین صورت که شرایط مختلف بر پایه ۱۳ نوع عیب از نظر مکان و شدت، شبیه‌سازی گردیده و پاسخ دینامیکی و به تبع آن مشخصه‌های مناسب پاسخ در حوزه‌ی فرکانسی استخراج شد و به روش کلاس‌بندی فازی تزیق گردید که در نهایت منجر به موفقیت عیب‌یابی ۹۲/۶٪ گردید. همچنین نشان داده شد که روش مذکور قادر به شناسایی عیوب با شدت کم می‌باشد که این یکی از مهمترین ویژگیهای یک روش عیب‌یابی موفق می‌باشد. روش پیشنهادی هم اکنون توسط نویسندگان این مقاله بر روی توربین‌های بادی شناور از نوع دیگر به خصوص از نوع TLP که عیب‌یابی خطوط مهاری آن با توجه به تنش بالایی که در این خطوط وجود دارد، در حال پیاده‌سازی است و در صورت امکان این روش بر روی توربین بادی شناور با مقیاس کوچکتر در محیط آزمایشگاهی آزمایش خواهد شد.

کلید واژگان

DOF: Degree of Freedom
 FRF: Frequency Response Function
 RNA: Rotor Nacelle Assembly
 SHM: Structural Health Monitoring
 SNR: Signal to Noise Ratio
 TLP: Tension Length Platform

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos X_4 & \sin X_4 \\ 0 & -\sin X_4 & \cos X_4 \end{bmatrix} \\ C_2 &= \begin{bmatrix} \cos X_5 & 0 & \sin X_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin X_5 & 0 & \cos X_5 \end{bmatrix} \\ C_3 &= \begin{bmatrix} \cos X_6 & \sin X_6 & 0 \\ -\sin X_6 & \cos X_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (A-2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{x_3} \\ u_{y_3} \\ u_{z_3} \end{bmatrix} &= C_3^T \begin{bmatrix} u_{x_t} \\ u_{y_t} \\ u_{z_t} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{x_2} \\ u_{y_2} \\ u_{z_2} \end{bmatrix} &= [C_3 C_2]^T \begin{bmatrix} u_{x_t} \\ u_{y_t} \\ u_{z_t} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{x_1} \\ u_{y_1} \\ u_{z_1} \end{bmatrix} &= [C_3 C_2 C_1]^T \begin{bmatrix} u_{x_t} \\ u_{y_t} \\ u_{z_t} \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (A-3)$$

در نتيجه با توجه به روابط بالا، بردارهاي واحد به شكل زير محاسبه مي گردد:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{u}_{x_1} &= \cos X_5 \cos X_6 \vec{u}_{x_t} - \cos X_5 \sin X_6 \vec{u}_{y_t} + \sin X_5 \vec{u}_{z_t} \\ \vec{u}_{y_1} &= \sin X_6 \vec{u}_{x_t} + \cos X_6 \vec{u}_{y_t} \\ \vec{u}_{z_1} &= \vec{u}_{z_t} \end{aligned} \right. \quad (A-4)$$

در نتيجه سرعت زاويه اي به اين ترتيب حاصل مي گردد:

$$\begin{aligned} \omega_t &= \dot{X}_4 (\cos X_5 \cos X_6 \vec{u}_{x_t} - \cos X_5 \sin X_6 \vec{u}_{y_t} + \sin X_5 \vec{u}_{z_t}) \\ &+ \dot{X}_5 (\sin X_6 \vec{u}_{x_t} + \cos X_6 \vec{u}_{y_t}) + \dot{X}_6 \vec{u}_{z_t} \end{aligned} \quad (A-5)$$

پيوست B- جزئيات استخراج معادلات ديناميكي حركت

همان طوريكه در بخش ۲-۲ بيان شد، ، بنا بر اين رابطه (۲) در بخش مذكور به صورت زير نوشته مي شود:

$$\sum \vec{M} = (\dot{H}_{G_s})_{(x_s, y_s, z_s)}^s + \vec{\omega}_t \times \vec{H}_{G_s}^s \quad (B-1)$$

همچنين مومنتم زاويه اي كلي سيستم برابر مومنتم تك تك اجزا (Tower و RNA)، حول مركز جرم كلي سيستم (G_s) به صورت

method for coupled analysis of floating offshore wind turbines, Marine Structures Vol. 27, pp. 45–63.

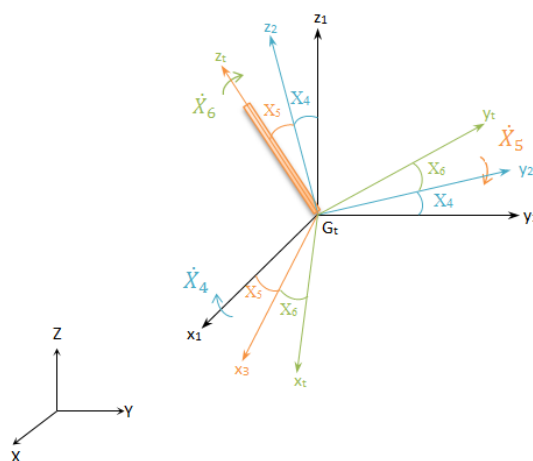
16- Kosko B., (1997), *Fuzzy Engineering*, Prentice-Hall, NJ.

17- Chandrashekhar M, Ganguli R., (2009) *Uncertainty handling in structural damage detection using fuzzy logic and probabilistic simulation*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, pp. 384–404.

18-Ettefagh M. M., Sadeghi M. H., (2008) , *Health monitoring of time-varying stochastic structures by latent components and fuzzy expert system*, Earthq Eng & Eng Vib, Vol.7, pp. 91-106.

پيوست A- زواياي اولر

در شكل زير زواياي اولر با ترتيب ۱-۲-۳ با متمايز نمودن رنگ ها، به صورت واضح نشان داده مي شود.



شكل A-1. زواياي اولر

با توجه به شكل A-1، سرعت زاويه اي برج به شكل زير بدست مي آيد:

$$\omega_t = \dot{X}_4 \vec{u}_{x_1} + \dot{X}_5 \vec{u}_{y_2} + \dot{X}_6 \vec{u}_{z_3} \quad (A-1)$$

در اين معادله براي بدست آوردن بردارهاي واحد در دستگاه ابتدا ماتريس هاي انتقال را استخراج نموده، سپس ارتباط بين دستگاه هاي مشخص شده در شكل A-1 به صورت زير به دست آورده مي شود:

زیر می‌باشد:

$$\vec{H}_{G_s}^s = \vec{H}_{G_s}^t + \vec{H}_{G_s}^R \quad (B-2)$$

که $\vec{H}_{G_s}^t$ و $\vec{H}_{G_s}^R$ با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \vec{H}_{G_s}^t = \vec{H}_{G_t}^t + \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times m_t \vec{v}_{G_t} \\ \vec{H}_{G_s}^R = \vec{H}_{G_R}^R + \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times m_R \vec{v}_{G_R} \end{cases} \quad (B-3)$$

که در آن، $\vec{H}_{G_t}^t$ مومنتم زاویه‌ای Tower حول مرکز جرم خودش، $\vec{H}_{G_R}^R$ مومنتم زاویه‌ای RNA حول مرکز جرم خودش، $\vec{\rho}_{G_t/G_s}$ فاصله مرکز جرم Tower تا مرکز جرم کل سیستم، $\vec{\rho}_{G_R/G_s}$ فاصله مرکز جرم RNA تا مرکز جرم کل سیستم، \vec{v}_{G_t} و \vec{v}_{G_R} سرعت خطی مرکز جرم‌ها، m_t و m_R هم جرم عضوای صلب می‌باشد. در تمامی روابط، اندیس بالایی بیانگر مومنتم عضو مربوطه و اندیس پایینی نقطه‌ای است که مومنتم حول آن محاسبه شده‌است. سرعت خطی مرکز جرم‌ها به شکل زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{cases} \vec{v}_{G_t} = \vec{v}_{G_s} + \vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s} \\ \vec{v}_{G_R} = \vec{v}_{G_s} + \vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s} \end{cases} \quad (B-4)$$

با جاگذاری سرعت‌ها در معادله (B-3):

$$\begin{cases} \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times m_t \vec{v}_{G_t} = \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times m_t (\vec{v}_{G_s} + \vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s}) \\ \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times m_R \vec{v}_{G_R} = \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times m_R (\vec{v}_{G_s} + \vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s}) \end{cases} \quad (B-5)$$

با جمع طرفین معادله (B-5):

$$\begin{aligned} & \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times m_t \vec{v}_{G_t} + \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times m_R \vec{v}_{G_R} \\ &= (m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} + m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s}) \times \vec{v}_{G_s} \\ &+ m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s}) + m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s}) \end{aligned} \quad (B-6)$$

با توجه به تعریف مرکز جرم ($m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} + m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s} = 0$) و ساده سازی معادلات، $\vec{H}_{G_s}^s$ به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\vec{H}_{G_s}^s = \vec{H}_{G_t}^t + \vec{H}_{G_R}^R + m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s}) + m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s}) \quad (B-7)$$

مومنتم زاویه‌ای Tower ($\vec{H}_{G_t}^t$) در دستگاه (X_t, Y_t, Z_t) حول مرکز جرم Tower (G_t) محاسبه شده و چون (X_t, Y_t, Z_t) در راستای محورهای اصلی Tower می‌باشد، $\vec{H}_{G_t}^t$ از حاصلضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای بدست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (X_s, Y_s, Z_s) انتقال داده می‌شود:

$$\vec{H}_{G_t}^t = T_{t \rightarrow s} (I_t \vec{\omega}_t) \quad (B-8)$$

از آنجایی که دستگاه‌های (X_s, Y_s, Z_s) و (X_t, Y_t, Z_t) هم‌راستا و هم‌جهت هستند، $T_{t \rightarrow s}$ برابر ماتریس واحد می‌باشد. مومنتم زاویه‌ای RNA ($\vec{H}_{G_R}^R$) حاصل مومنتم زاویه‌ای روتور و نازل می‌باشد و همانند $\vec{H}_{G_t}^t$ از حاصلضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای بدست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (X_s, Y_s, Z_s) انتقال داده می‌شود:

$$\vec{H}_{G_R}^R = T_{n \rightarrow s} (I_n \vec{\omega}_n) \quad , \quad \vec{H}_{G_R}^t = T_{n \rightarrow s} (I_t \vec{\omega}_t) \quad (B-9)$$

که $T_{n \rightarrow s}$ ماتریس انتقال از (A, B, C) به (X_s, Y_s, Z_s) می‌باشد که دستگاه (A, B, C) به اندازه β حول محور Z دستگاه (X_s, Y_s, Z_s) دوران می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌گردد که در آن β زاویه دوران نازل می‌باشد که پیوسته با سیستم کنترلی نازل تنظیم می‌شود (در این مقاله ثابت فرض شده‌است):

$$T_{n \rightarrow s} = T_{R \rightarrow s} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B-10)$$

سرعت نازل در دستگاه مختصات (A, B, C) ، $\vec{\omega}_n$ ، ابتدا در دستگاه (X_t, Y_t, Z_t) محاسبه می‌گردد. سپس به (A, B, C) منتقل می‌شود که در آن $T_{t \rightarrow n}$ ماتریس انتقال از (X_t, Y_t, Z_t) به (A, B, C) می‌باشد که برابر است با معکوس ماتریس $T_{n \rightarrow s}$ و چون $T_{n \rightarrow s}$ ماتریس ارتگونال می‌باشد، معکوس آن با ترانپوز آن برابر است. بنابراین:

$$\vec{\omega}_n = T_{t \rightarrow n} (\vec{\omega}_t + \vec{\omega}_{y_{nav}}) = T_{t \rightarrow n} \vec{\omega}_{n,t} \quad (B-11)$$

$\vec{\omega}_{n,t}$ سرعت زاویه‌ای مطلق نازل در دستگاه (X_t, Y_t, Z_t) بردار $\vec{\omega}_{y_{nav}}$ نیز سرعت زاویه‌ای نازل حول Z_t یعنی $(0, 0, \omega_{y_{nav}})$ است.

از آنجایی که (A, B, C) در راستای محورهای اصلی روتور هم می‌باشد، مومنتم زاویه‌ای آن نیز وابسته به سرعت زاویه‌ای و اینرسی آن خواهد بود که از رابطه زیر بدست می‌آید:

با جاگذاري معادلات (B-16) تا (B-19) در معادله (B-15):

$$\vec{H}_{G_R}^R = \begin{bmatrix} I_A \cos^2 \beta + I_B \sin^2 \beta & (I_A - I_B) \sin \beta \cos \beta & 0 \\ (I_A - I_B) \sin \beta \cos \beta & I_A \sin^2 \beta + I_B \cos^2 \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{\omega}_t + \vec{H}' \quad (\text{B-20})$$

با محاسبه اعضای معادله (B-8):

$$m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s}) = \begin{bmatrix} m_t \rho_{G_t/G_s}^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_t \rho_{G_t/G_s}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{\omega}_t \quad (\text{B-21})$$

$$m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times (\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s}) = \begin{bmatrix} m_R \rho_{G_R/G_s}^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_R \rho_{G_R/G_s}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{\omega}_t \quad (\text{B-22})$$

با جاگذاري معادلات (B-20) تا (B-22) در معادله (B-8)، $\vec{H}_{G_s}^s$ به شكل زير ساده‌سازي مي‌شود:

$$\vec{H}_{G_s}^s = I_s \vec{\omega}_t + \vec{H}' \quad (\text{B-23})$$

پيوست C- ماتريس‌هاي انتقال

ماتريس‌هاي انتقال براي هر يك از دوران‌هاي X_4 ، X_5 و X_6 به ترتيب به صورت زير مي‌باشند:

$$T_x(X_4) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos X_4 & -\sin X_4 \\ 0 & \sin X_4 & \cos X_4 \end{bmatrix} \quad (\text{C-1})$$

$$T_y(X_5) = \begin{bmatrix} \cos X_5 & 0 & -\sin X_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin X_5 & 0 & \cos X_5 \end{bmatrix} \quad (\text{C-2})$$

$$T_z(X_6) = \begin{bmatrix} \cos X_6 & -\sin X_6 & 0 \\ \sin X_6 & \cos X_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C-3})$$

$$\vec{H}_{G_R}^r = T_{n \rightarrow s} I_r \vec{\omega}_{r,n} = T_{n \rightarrow s} I_r (\vec{\omega}_n + \dot{\psi}) \quad (\text{B-12})$$

که در آن $\vec{\omega}_{r,n}$ سرعت زاويه‌ای مطلق روتور نسبت به دستگاه (A,B,C) و I_r ممان اينرسی روتور حول محورهای دستگاه (A,B,C) می‌باشد. $\dot{\psi}$ سرعت زاويه‌ای روتور حول جهت مثبت محور B می‌باشد، یعنی: $\dot{\psi} = (0, \dot{\psi}, 0)$. مومنتم زاويه‌ای RNA از مجموع مومنتم زاويه‌ای روتور و نازل بدست می‌آید:

$$\vec{H}_{G_R}^R = \vec{H}_{G_R}^n + \vec{H}_{G_R}^r = T_{n \rightarrow s} (I_n + I_r) \vec{\omega}_n + T_{n \rightarrow s} I_r \dot{\psi} \quad (\text{B-13})$$

مجموع ممان اينرسی روتور و نازل برابر ممان اينرسی RNA می‌باشد. $(I_n + I_r = I_R)$ و به جای I_r از I_R استفاده می‌شود؛ اين کار تأثیری در محاسبات نخواهد داشت، چون فقط آن عضوی که مربوط به دوران روتور می‌باشد در محاسبات وارد می‌شود. یعنی ممان حول B، که ممان نازل حول B در مقایسه با روتور ناچيز می‌باشد، بنابراین:

$$\vec{H}_{G_R}^R = T_{R \rightarrow s} I_R \vec{\omega}_n + T_{R \rightarrow s} I_R \dot{\psi} \quad (\text{B-14})$$

با جاگذاري معادله (B-11) در معادله (B-14):

$$\vec{H}_{G_R}^R = T_{R \rightarrow s} I_R (\vec{\omega}_t + \vec{\omega}_{yaw}) + T_{R \rightarrow s} I_R \dot{\psi} \quad (\text{B-15})$$

با محاسبه تک تک اعضای معادله (B-15):

$$T_{R \rightarrow s} I_R T_{t \rightarrow n} = \begin{bmatrix} I_A \cos^2 \beta + I_B \sin^2 \beta & (I_A - I_B) \sin \beta \cos \beta & 0 \\ (I_A - I_B) \sin \beta \cos \beta & I_A \sin^2 \beta + I_B \cos^2 \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B-16})$$

$$T_{R \rightarrow s} I_R \dot{\psi} = \begin{bmatrix} -I_B \dot{\psi} \sin \beta \\ I_B \dot{\psi} \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B-17})$$

$$T_{R \rightarrow s} I_R T_{t \rightarrow n} \vec{\omega}_{yaw} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_C \omega_{yaw} \end{bmatrix} \quad (\text{B-18})$$

$$\vec{H}' = T_{R \rightarrow s} I_R T_{t \rightarrow n} \vec{\omega}_{yaw} + T_{R \rightarrow s} I_R \dot{\psi} = \begin{Bmatrix} -I_B \dot{\psi} \sin \beta \\ I_B \dot{\psi} \cos \beta \\ I_C \omega_{yaw} \end{Bmatrix} \quad (\text{B-19})$$