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

آیسان جمال‌کیا[۱]، میرمحمد اتفاق [۲*]، علیرضا 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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
توربین بادی شناور
عیب‌یابی
شبیه‌سازی دینامیکی
سیستم چند جزئی سه بعدی
کلاس‌بندی فازی

چکیده

پایش وضعیت سلامت سازه برای اطمینان از عملکرد درست سازه در طول عمر سرویس آن، امری ضروری می‌باشد. این فرآیند برای توربین‌های بادی شناور که در معرض شرایط بحرانی محیطی دریا قرار می‌گیرند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش عیب‌یابی خطوط مهاری توربین بادی شناور از نوع اسپار بر پایه پاسخ دینامیکی سازه و روش کلاس‌بندی فازی پیشنهاد گردیده است. به این منظور ابتدا معادلات غیر خطی حرکت سازه با استفاده از تئوری بقای مومنتم زاویه‌ای و قانون دوم نیوتن استخراج و شبیه‌سازی گردیده است. سپس تغییرات فرکانسی سازه در درجات آزادی مختلف آن به دلیل تغییرات در سفتی خطوط مهاری (عیب مفروض) به عنوان مشخصه‌های ورودی به سیستم فازی در نظر گرفته شده‌است. همچنین با تنظیم توابع توزیع احتمالی هر یک از مشخصه‌ها در هر یک از کلاس‌های عیب تعریف شده، سیستم کلاس‌بندی فازی آموزش داده شده‌است. برای اعتبار سنجی روش عیب‌یابی، نویز با قدرت‌های مختلف به مشخصه‌ها اضافه و درصد موفقیت عیب‌یابی محاسبه گردیده است. با تحلیل نتایج، مشخص می‌گردد که سیستم پیشنهادی قادر به تشخیص درست عیب سازه با درصد قابل قبولی می‌باشد.

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

Aysan Jamalkia[1], Mir Mohammad Ettefagh[2*], Alireza Mojtahedi[3]

[1] *MS student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz;* aysanjamalkia@yahoo.com
[2]*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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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 می‌گردنند (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 شده‌است.

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 نشده‌است، 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، مدل سازی 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 روش های 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 روش های اولر- نیوتن یا لاگرانژ برای مدل‌سازی دینامیکی چنین سازه‌هایی استفاده می‌شود. در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

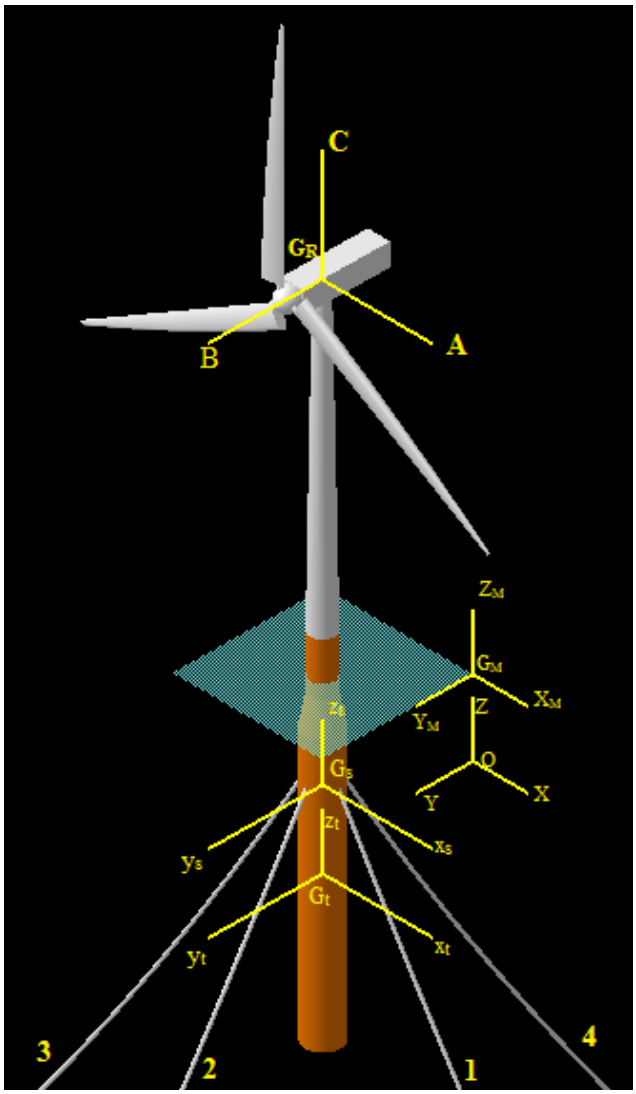
مرجع [۱۱]، با استفاده از معادلات اولر-نیوتن، یک مدل کاهش مرتبه داده شده از توربین بادی با پایه شناور Spar با در نظر گرفتن اثرات ژیروسکوپ به منظور ارائه روش جدید کنترل توربین ارائه شده‌است. اخیراً نیز با استفاده از معادلات اولر-نیوتن، معادلات دینامیکی کامل کوپل شده غیر خطی سازه Spar برای زوایای بزرگ دوران با در نظر گرفتن اثر ژیروسکوپ و تمامی شرایط محیطی (با وجود باد و موج) استخراج و شبیه‌سازی شده‌است [۱۲-۱۳]. روش اخیر تا به امروز یکی از دقیق‌ترین مدل های 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 شده‌است، 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 شده‌است. سپس حل عددی معادلات با استفاده از کدنویسی توابع لازم در محیط MATLAB مهیا شده‌است. 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 عیب یابی مبتنی بر کلاس‌بندی فازی بر روی مشخصات دینامیکی سازه سالم و معیوب انجام شده‌است. 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 شده‌است. دستگاه‌های (X,Y,Z) و (X_M,Y_M,Z_M) دستگاه‌های اینرسی اولیه یا به عبارتی دستگاه متصل به زمین می‌باشند. (X,Y,Z) 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 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.

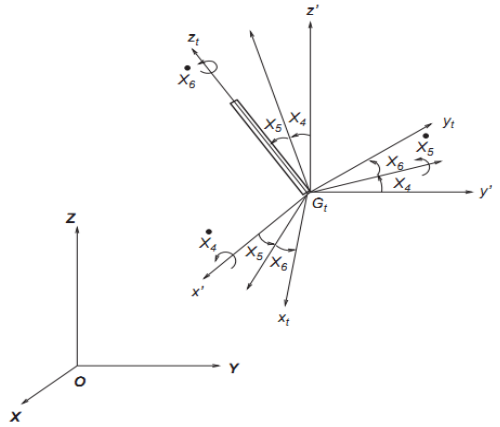


شکل ۱- دستگاه‌های مختصات توربین بادی شناور Spar همراه با خطوط مهاری نشان داده شده

برای توصیف زوایای انحراف بزرگ، از زوایای اولر استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده‌است. 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 شده‌است. 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 .

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]



شکل ۲- زوایای اولر با ترتیب ۱-۲-۳ [۱۳]

مسلماً دستگاه (x_t,y_t,z_t) متصل به بدنه می‌باشد و همراه آن دوران می‌کند که در حالت اولیه همراستا با (X,Y,Z) می‌باشد. دوران مذکور ابتدا حول x_t به اندازه X_4 صورت می‌گیرد، سپس حول y_t دستگاه جدید بدست آمده به اندازه X_5 دوران کرده و در نهایت حول z_t دستگاه بدست آمده از حالت قبل به اندازه X_6 دوران می‌کند. سرعت زاویه‌ای برج در دستگاه اینرسی، با استفاده از زوایای اولر و با توجه به شکل ۲ به صورت زیر بدست می‌آید: (جزئیات نحوه محاسبه آن در پیوست A آورده شده‌است):

$$\vec{\omega}_t=\begin{Bmatrix}\dot{X}_4\cos X_5\cos X_6+\dot{X}_5\sin X_6\\ -\dot{X}_4\cos X_5\sin X_6+\dot{X}_5\cos X_6\\ \dot{X}_6+\dot{X}_4\sin X_5\end{Bmatrix} \qquad (۱)$$

۲-۲- استخراج معادلات حرکت سیستم

برای استخراج معادلات حرکت، از معادلات اولر و بقای مومنتم استفاده می‌شود [۱۳]. معادلات مومنتم مستقیماً برای توربین بادی شناور که شامل دو قسمت صلب برج و RNA می‌باشد، به کار برده می‌شود. در مدل مورد نظر، ۶ درجه آزادی نامعلوم برج (۳ درجه آزادی مربوط به حرکت انتقالی و ۳ درجه آزادی مربوط به حرکت دورانی) و دو درجه آزادی معلوم RNA (دوران ناسل و روتور) در نظر گرفته شده است. مومنتم زاویه‌ای کل سیستم، حاصل جمع مومنتم زاویه‌ای هر کدام از قسمت‌های صلب توربین می‌باشد که هر کدام در دستگاه مختصات مربوطه محاسبه شده، سپس به دستگاه مختصاتِ الصاق شده به مرکز جرم کلی سیستم، انتقال داده می‌شود. با توجه به قانون بقای مومنتم زاویه‌ای، مجموع تمام گشتاورهای حاصل از نیروهای خارجی حول مرکز جرم کلی سیستم، در دستگاه مختصات واسطه (x_s,y_s,z_s)، برابر است با تغییر اندازه و جهت مومنتم زاویه‌ای سیستم در دستگاه اینرسی اولیه: (جزئیات نحوه محاسبه آن در پیوست B آورده شده است):

$$\sum\vec{M}=\frac{D}{Dt}\vec{H}_{G_s}=\frac{d}{dt}\vec{H}^s_{G_s}+\vec{\omega}_s\times\vec{H}^s_{G_s} \qquad (۲)$$

سمت چپ معادله (۲)، برابر است با گشتاور تمام نیروهای خارجی: $\sum\vec{M}=\vec{M}_{wind}+\vec{M}_{wave}+\vec{M}_{restoring}$، که در آن $\vec{M}_{restoring}$ گشتاور حاصل از نیروی شناوری و خطوط مهاری، $\vec{M}_{wind}$ و $\vec{M}_{wave}$ نیز به ترتیب گشتاورهای حاصل از نیروهای موج و باد می‌باشند که در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهند شد. همچنین در سمت راست معادله (۲)، مومنتم زاویه‌ای کل سیستم حول مرکز جرم کلی در دستگاه (x_s,y_s,z_s) وسرعت زاویه‌ای دستگاه مذکور می‌باشد و چون دستگاه‌های (x_s,y_s,z_s) و (x_t,y_t,z_t) هم‌راستا و هم‌جهت هستند، در نتیجه سرعت زاویه آن‌ها نیز با هم برابر است ($\omega_t=\omega_s$). در حالت کلی $\vec{H}^s_{G_s}$ به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$\vec{H}^s_{G_s}=I_s\vec{\omega}_t+\vec{H}' \qquad (۳)$$

معادله (۳) بیانگر آن است که مومنتم زاویه‌ای سیستمی که از دو جزء صلب تشکیل شده، به دو قسمت، حرکت کل سیستم به عنوان جسم صلب و حرکت نسبی بین دو جزء، تقسیم می‌شود که در آن تانسور اینرسی، ، به حرکت کلی سیستم مربوط می‌شود و برابر است با:

$$I_s=\begin{bmatrix}I_{11}&I_{12}&I_{13}\\ I_{21}&I_{22}&I_{23}\\ I_{31}&I_{32}&I_{33}\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

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

β زاویه دوران ناسل می‌باشد که پیوسته به کمک سیستم کنترلی ناسل تنظیم می‌شود. ρ_{G_t/G_s} و ρ_{G_R/G_s} اندازه بردارهای مربوطه آنها بوده و I_t، تانسور اینرسی برج به صورت یک ماتریس قطری با مولفه‌های قطری I_{x_t}، I_{y_t} و I_{z_t} می‌باشد. همچنین I_R تانسور اینرسی مجموعه روتور و ناسل با اعضای قطری I_A، I_B و I_C بوده و m_t و m_R هم به ترتیب جرم عضوهای صلب برج و RNA می‌باشد. $\vec{H}'$ مومنتم زاویه‌ای RNA نسبت به برج می‌باشد که مستقل از دوران برج ($\vec{\omega}_t$) و برابر است با:

$$\vec{H}'=\left(-I_B\dot{\psi}\sin\beta,I_B\dot{\psi}\cos\beta,I_c\omega_{yaw}\right) \qquad (۵)$$

$\dot{\psi}$ سرعت زاویه‌ای روتور حول جهت مثبت محور B و بردار $\vec{\omega}_{yaw}$ نیز سرعت زاویه‌ای نازل حول z_t می‌باشد. مشتق مطلق $\vec{H}^s_{G_s}$ در معادله (۲)، شامل تغییر در اندازه و جهت آن می‌باشد، که تغییرات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

اندازه آن به شکل زیر است:

$$\left(\dot{\vec{H}}_{G_s}\right)^{s}_{(x_s,y_s,z_s)}=\dot{I}_s\vec{\omega}_t+I_s\dot{\vec{\omega}}_t+\dot{\vec{H}}' \qquad (۶)$$

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 به‌دست آوردن درجات آزادی انتقالی، حرکت مرکز جرم توربین در نظر گرفته می‌شود که طبق قانون دوم نیوتن:

$$\sum\vec{F}=m_s\vec{a}_{G_s} \qquad (۷)$$

در آن شتاب مرکز جرم کل سیستم، $\vec{a}_{G_s}=\left(\ddot{X}_1,\ddot{X}_2,\ddot{X}_3\right)$، 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 شده‌است 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- 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 شده‌است که تغییرات محسوسی نسبت به حالت تعادل اولیه خود دارند. به این منظور ترم $\sum\vec{M}$ موجود در معادلات گشتاورِ مربوط به تمام نیروهای مذکور، در دستگاه واسطه (x_S,y_S,z_S) در نظر گرفته شده‌است و همچنین ترم $\sum\vec{F}$ مربوط به مجموع تمام نیروها نیز در دستگاه اینرسی (X,Y,Z) فرض شده‌است. 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 شده‌است. این ماتریس به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳] (هرکدام از ماتریس‌های ضرب شده در پیوست C آورده شده‌است) :

$$T_{s\to I}=T_x(X_4)T_y(X_5)T_z(X_6)=\begin{bmatrix}t_{11}&t_{12}&t_{13}\\t_{21}&t_{22}&t_{23}\\t_{31}&t_{32}&t_{33}\end{bmatrix} \qquad (۸)$$

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

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

۲-۳-۱- نیروی هیدرو استاتیکی

نیروی هیدرواستاتیکی مستقیماً از نیروی شناوری استوانه شناور بدست می‌آید. نیروی شناوری لحظه‌ای یک استوانه شناور در دستگاه مختصات اینرسی برابر است با $\vec{F}_B^I=(0,0,\rho g\pi r^2h_1)$ که درآن 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]:

$$h_1=\frac{\rho_{G_M/O}-X_3}{\cos\theta_1}-\rho_{G_M/O}+h_0 \qquad (۹)$$

$\rho_{G_M/O}$ فاصله مرکز جرم کلی سیستم تا سطح آب در حالت تعادل اولیه (بدون جابجایی) می‌باشد. به عبارت دیگر، در شکل ۱ همان فاصله بین G_M و O 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 $\vec{\rho}_{B/G_s}=\left(X_s^B,Y_s^B,Z_s^B\right)$ که در آن :

$$\begin{cases}X_s^B=-\dfrac{t_{31}r^2}{2t_{33}h_1},\ Y_s^B=-\dfrac{t_{32}r^2}{2t_{33}h_1}\\Z_s^B=-h_G+\dfrac{h_1}{2}+\dfrac{r^2\left(t_{31}^2+t_{32}^2\right)}{4t_{33}^2h_1}\end{cases} \qquad (۱۰)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

به معادلاتی نظیر مرجع [۱۳] با دقت بیشتری استخراج گردیده‌اند. 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 می‌شوند، $\vec{F}_B^S=T_{I\to s}\vec{F}_B^I$، سپس با ضرب خارجی بردار مرتبط با مرکز شناوری در نیروی شناوری، گشتاور متناظر بدست می‌آید ($\vec{M}_B^S=\vec{\rho}_{B/G_s}\times\vec{F}_B^S$). $T_{I\to s}$ معکوس ماتریس $T_{s\to I}$ می‌باشد و چون ماتریس متعامد می‌باشد، معکوس آن با ترانهاده‌اش برابر است.

۲-۳-۲- نیروی خطوط مهاری

در این پژوهش، فرض بر این است که سیستم خطوط مهاری شامل چهار کابل (Line) تحت کشش می‌باشد. تغییر در مقدار کشش کابل‌ها به سادگی در قالب یک تابع بدست می‌آید. مختصات محل اتصال هرکدام از کابل‌ها به سازه (نقطه A) با جمع حرکات دورانی و انتقالی محاسبه می‌شود. موقعیت یکی از نقاط A در دستگاه اینرسی، $\vec{\rho}_{A/O}=\vec{\rho}_{G_s/O}+T_{s\to I}\vec{\rho}_{A/G_s}$ می‌باشد که $\vec{\rho}_{G_s/O}$ مختصات مرکز جرم کل 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) می‌باشد. $\vec{\rho}_{E/O}$ مختصات نقطه اتصال کابل‌ها به کف دریا (نقطه E) می‌باشد که در دستگاه اینرسی ثابت است و بردار موقعیت از نقطه A به نقطه E، $\vec{\rho}_{E/A}=\vec{\rho}_{E/O}-\vec{\rho}_{A/O}$ می‌باشد. کشش درراستای کابل‌های تحت کشش، از خاصیت الاستیسیته مواد به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$\vec{F}_{line}^I=\left[T_0+\frac{ES}{L}\left(\rho_{E/A}-L\right)\right]\frac{\vec{\rho}_{E/A}}{\rho_{E/A}} \qquad (۱۱)$$

که در آن T_0 کشش اولیه کابل، E مدول یانگ، S سطح مقطع کابل، L طول اولیه کابل و $\rho_{E/A}$ نُرم بردار $\vec{\rho}_{E/A}$، به عبارتی طول کابل در هر لحظه می‌باشد. نیروی بازگرداننده خطوط مهاری، $F_{mooring}$، از جمع نیروی کابل‌ها قابل حصول است. گشتاور بازگرداننده هر کدام از کابل 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 کابل‌ها به سازه بدست می‌آید ($\vec{F}_{line}^s=T_{I\to s}\vec{F}_{line}^I$ 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 کابل‌ها حاصل می‌شود. در نهایت نیروی بازگرداننده برابر خواهد بود با:

$$\begin{cases}\vec{F}_{restoring}^I=\vec{F}_B^I+F_{mooring}^I\\ \vec{M}_{restoring}^s=\vec{M}_B^s+\vec{M}_{mooring}^s\end{cases} \qquad (۱۲)$$

۳- روش عیب‌یابی مبتنی بر کلاس‌بندی فازی

منطق فازی، یک روش محاسباتی نَرم منحصر به‌فردی است که در آن داده‌های عددی و دانسته های زبانی به طور هم زمان به کار گرفته می‌شوند. اساس این منطق، بر مبنای مفهوم مجموعه‌های فازی است. عضویت در این مجموعه توسط تابع عضویت $\mu(x)$ مشخص می‌گردد که می تواند مقادیر بین صفر تا یک داشته باشد. توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، و گاوسی از جمله رایج ترین توابع عضویت می‌باشند. انتخاب شکل تابع به تجربه کاربر و ماهیت مسئله برمیگردد. لازم به توضیح است که توابع مذکور می‌توانند نسبت به هم همپوشانی داشته باشند و معمولاً، این اشکال بین صفر و یک نرمالیزه می‌شوند. سیستم‌های فازی مبتنی بر یک نگاشت از بردار مشخصه‌ها (به عنوان ورودی) به عدد اسکالر (به عنوان خروجی) می‌باشند [۱۶]. یک سیستم فازی، بطور معمول شامل ورودی چندگانه ($V\in R^m$) در قالب یک بردار به ابعاد m (تعداد متغیرهای ورودی) و یک خروجی ($W\in R$) است. بعلاوه نگاشت مذکور از ورودی به خروجی ($F:V\in R^m\to W\in R$) شامل چهار مرحله‌ی تعیین قوانین (Rules)، فازی‌سازی، موتور استنتاج و غیرفازی‌سازی است. قوانین می‌توانند توسط کاربر متخصص و یا مقادیر عددی مشخصی به دست آیند. در هر دو حالت قوانین مذکور توسط مجموعه‌ای از جملات شامل IF-THEN به صورت زیر ساخته می‌شوند:

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

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

- معرفی مقادیر عددی معادل برای متغیر زبانی، به عنوان مثال، مقدار 3.5% برای متغیری با عنوان HIGH.
- کمیت‌سازی متغیر های زبانی با استفاده از توابع عضویت.
- برقراری ارتباط منطقی بین متغیرهای زبانی (AND یا OR و غیره) در هر یک از قوانین.
- دانستن چگونگی برقراری ارتباط بین قوانین مختلف.

مرحله فازی سازی، ورودی‌های غیر فازی را به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌نماید. این فرآیند، انجام فعال‌سازی قوانین مذکور را در یک قالب عددی در برمی‌گیرد. موتور استنتاج نیز عمل نگاشت بین مجموعه فازی مرتبط با ورودی و خروجی را با مشخص نمودن نحوه ترکیب مجموعه‌های فازی، انجام می‌دهد. در این مقاله عمل این موتور بدین ترتیب است که ابتدا قوانین به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند[۱۶]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

$$R_i : If \;\; x_1 \; is \; F_1 \;\; \& \;\; x_2 \; is \; F_2 \;\; \& \;\; \ldots \; x_m \; is \; F_m \;\; Then \;\; y = C_i \quad i = 1,2,3,\ldots,\mathrm{M} \qquad (۱۳)$$

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، $F_i \in V_i$ و $C_i \in W$ 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 $F_{1,2,\ldots,m} = F_1 \times F_2 \times \ldots F_m \rightarrow C_i$ در نظر گرفته شود، که در آن $F_{1,2,\ldots,m}$ یک مجموعه فازی $V \times W = V_1 \times V_2 \times \ldots \times V_m \times W$ با توابع عضویت زیر است[۱۶]:

$$\mu_{R_i}(x,y) = \mu_{F_i}(x_1) * \mu_{F_2}(x_2) * \ldots * \mu_{F_m}(x_m) * \mu_{C_i}(y) \qquad (۱۴)$$

که در رابطه اخیر، "*" می‌تواند یک عملگری نظیر ضرب یا کمینه‌ساز باشد. عملگر ضربی به صورت جبری متداول‌تر است. در نهایت، مرحله غیرفازی ساز، 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 به‌کار می‌روند. در ادامه، الگوریتم کلاس بندی فازی مورد استفاده در این مقاله بر مبنای مفاهیم منطق فازی فوق الذکر، شرح داده می شود. 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 کلاس ها (C_j) به کار رود ($j = 1,2,\ldots,\mathrm{M}$) و بدین صورت که در عبارت (۱۴)، x_i و M به‌ترتیب 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 هریک از توابع عضویت گاوسی نیز برابر با مقدار میانگین و واریانس مشخصه‌های استخراج شده می‌باشند. لازم است که عملیات تنظیم پارامتر های توزیع گاوسی در هر یک از کلاس های 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 $\mu_{R_i}(x,y)$) 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]:

$$D_i = \prod_{l=1}^{m} \mu_{l,i} \qquad (۱۵)$$

در عبارت اخیر m تعداد مشخصه‌های مورد استفاده و $\mu_{l,i}$ (متناظر با $\mu_{F_i}(x)$) نشان دهنده درجه عضویت مشخصه l ام مرتبط با i امین قانون فازی (کلاس) می‌باشد. حال $D_{\max}(\mathrm{C}_{i^*})$ (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]:

$$D_{\max}(\mathrm{C}_{i^*}) = \max_i D_i \qquad (۱۶)$$

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، با 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 هریک از حالت‌های سالم و معیوب سازه، استفاده شده‌است. این مجموعه‌های فازی به صورت تابع زیر تعریف شده‌است:

$$\mu(x) = e^{-0.5((x-m)/\sigma)^2} \qquad (۱۷)$$

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 حالت های 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]:

$$P(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-0.5((x-m)/\sigma)^2} \qquad (۱۸)$$

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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]:

$$I_A=2.35\times10^7\ kg.m^2,\ I_B=4.37\times10^7\ kg.m^2,\ I_C=2.54\times10^7\ kg.m^2$$

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]:

$$I_{x_t}=I_{y_t}=3.57\times10^9\ kg.m^2, I_{z_t}=9.28\times10^7\ kg.m^2$$

چهار کابل کشیده در سیستم خطوط مهاری موجود می‌باشد، که هرکدام از کابل‌ها به صورت فنری با سختی 3.37×10^5 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 $X_4=X_5=0.1$ و $X_2=0.5$ 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:

$$D=\frac{K_u-K_d}{K_u}\times100 \qquad (۱۹)$$

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:

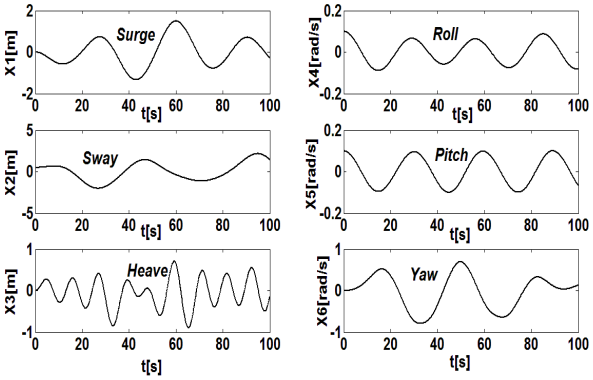
$$\begin{cases} x=\{\omega_1\ \ \omega_2\ \ \omega_3\ \ \omega_4\ \ \omega_5\ \ \omega_6\} \\ y=F(x)=\begin{Bmatrix} undamaged \\ slight\ damage\ at\ line1 \\ moderate\ damage\ at\ line1 \\ severe\ damage\ at\ line\ 1 \\ slight\ damage\ at\ line\ 2 \\ moderate\ damage\ at\ line\ 2 \\ severe\ damage\ at\ line\ 3 \\ slight\ damage\ at\ line\ 3 \\ moderate\ damage\ at\ line\ 3 \\ severe\ damage\ at\ line\ 3 \\ slight\ damage\ at\ line\ 4 \\ moderate\ damage\ at\ line\ 4 \\ severe\ damage\ at\ line\ 4 \end{Bmatrix} \end{cases} \qquad (۲۰)$$

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 آلگوریتم 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 $100=0.1\div10$ 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 پاسخ های دینامیکی توربین به صورت یک عدد می باشد. بنابراین با توجه به اینکه توربین دارای شش درجه آزادی می‌باشد، پس شش فرکانس

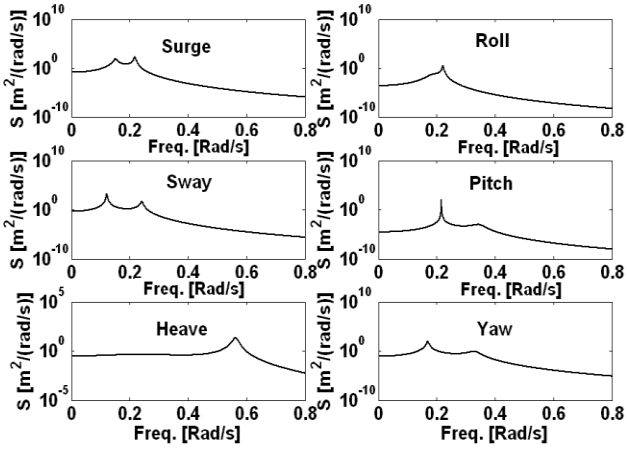
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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 Surge، Sway، Heave، Roll، Pitch و Yaw می‌باشند.



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



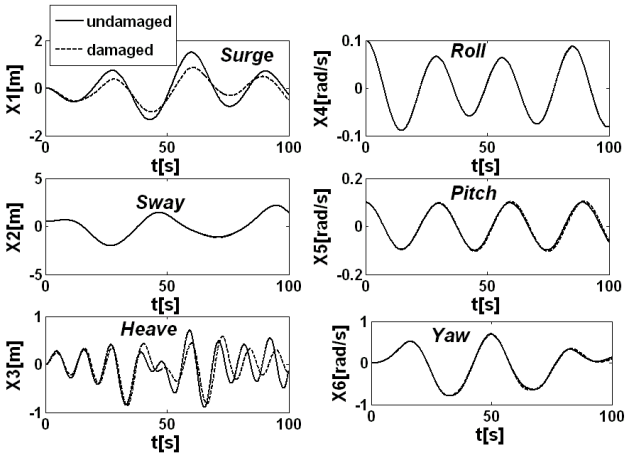
شکل ۴- طیف فرکانسی پاسخ دینامیکی سازه سالم در هر یک از درجات آزادی (مقیاس لگاریتمی)

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 پیک های 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 شده اند.

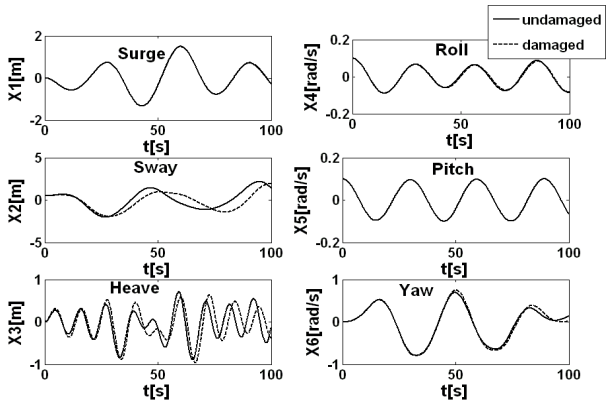
جدول ۱- فرکانس‌های طبیعی استخراج شده

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

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. همانطوری‌که مشاهده می‌گردد، وجود عیب در هرکدام از کابل‌ها، بر روی پاسخ دینامیکی سازه و به دنبال آن طیف فرکانسی اثر خواهد گذاشت. علت این مسئله را می توان 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.



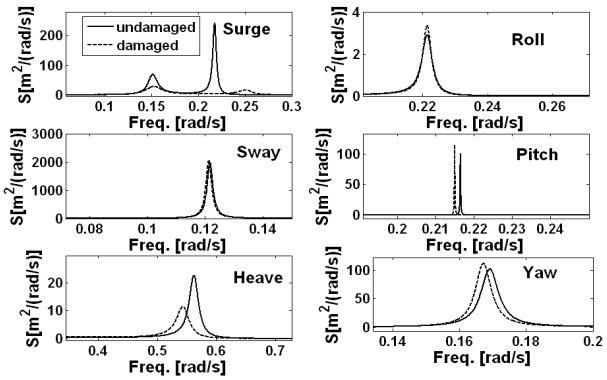
شکل ۵- تاثیر وجود عیب در کابل ۱ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم



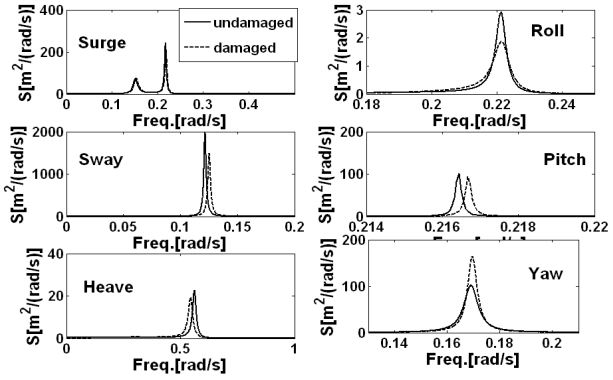
شکل ۶- تاثیر وجود عیب در کابل ۲ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]



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



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

همان‌گونه که از شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده می‌باشد، در تمام حالت‌های وجود عیب 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 کابل‌ها آسیب ببینند، نیروی بازگرداننده در راستای z و گشتاور بازگرداننده حول z تغییر بارزی می‌یابد. همچنین وجود عیب در کابل‌های 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 (sway و roll) می‌شود. زیرا نیروی بازگرداننده در راستای x و گشتاور بازگرداننده حول y دچار اختلال می‌گردد. به همین ترتیب وجود عیب در کابل‌های 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) می‌شود. با توجه به اینکه تمامی نتایج اخیر با پیش‌بینی‌های فنی مطابقت می‌نماید، بنابراین شبیه‌سازی توربین همراه با عیب خطوط مهاری به درستی انجام گرفته شده‌است. همانطوریکه ملاحظه می‌شود با توجه به پیچیدگی دینامیکی سیستم توربین بادی شناور به علت معادلات کوپل غیر خطی دینامیکی، تفسیر تاثیر نوع و شدت عیب بر روی رفتار پاسخ دینامیکی سیستم پیچیده و به تبع آن شناسایی عیب بسیار مشکل می‌باشد. به عبارت دیگر هر آسیبی که به خطوط مهاری وارد می‌شود، با توجه به شماره موقعیت کابل و شدت آسیب، تاثیر خاصی بر دینامیک سیستم می‌گذارد. بنابراین برای پیش‌بینی درست محل و شدت عیب، احتیاج به یک فرد خبره و با تجربه است تا با مشاهدات خود از نمودارهایی نظیر شکل‌های اخیر، عیب‌یابی را به نحو احسن انجام دهد. با توجه به مشکلات بیان شده در عیب‌یابی بر اساس نظر اپراتور، باید به دنبال یک سیستم هوشمند و خبره‌ای (Expert System) مانند روش کلاس‌بندی فازی بود که بعد از آموزش‌های لازم به صورت خودکار نوع و شدت عیب را شناسایی نماید. همانطوریکه در بخش قبلی بیان شد، می‌توان با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی سازه، توابع عضویت لازم در کلاس‌بندی فازی را تنظیم نمود و در عیب‌یابی سازه به کار برد. در بخش بعدی در مورد این قسمت از آموزش سیستم فازی و نتایج حاصل از عیب‌یابی 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 عیب، ۶۵ شبیه‌سازی برای هر کدام از کلاس‌های تعریف شده در رابطه (۲۰) انجام داده و بعد از استخراج طیف فرکانسی پاسخ‌ها، پارامتر های مذکور را که در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد، می توان به دست آورد. لازم به ذکر است که انتخاب انحراف معیار برای مجموعه فازی نکته‌ای کلیدی می‌باشد، زیرا که بر عملکرد سیستم منطق فازی تاثیر بسیار زیادی می‌گذارد. این نکته بر اساس این حقیقت است هر کدام از مجموعه‌های فازی باید پهنای مناسبی داشته باشند تا اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری 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 کلاس‌ها، بهبود داده شده و در جدول ۱ درج گردیده است.

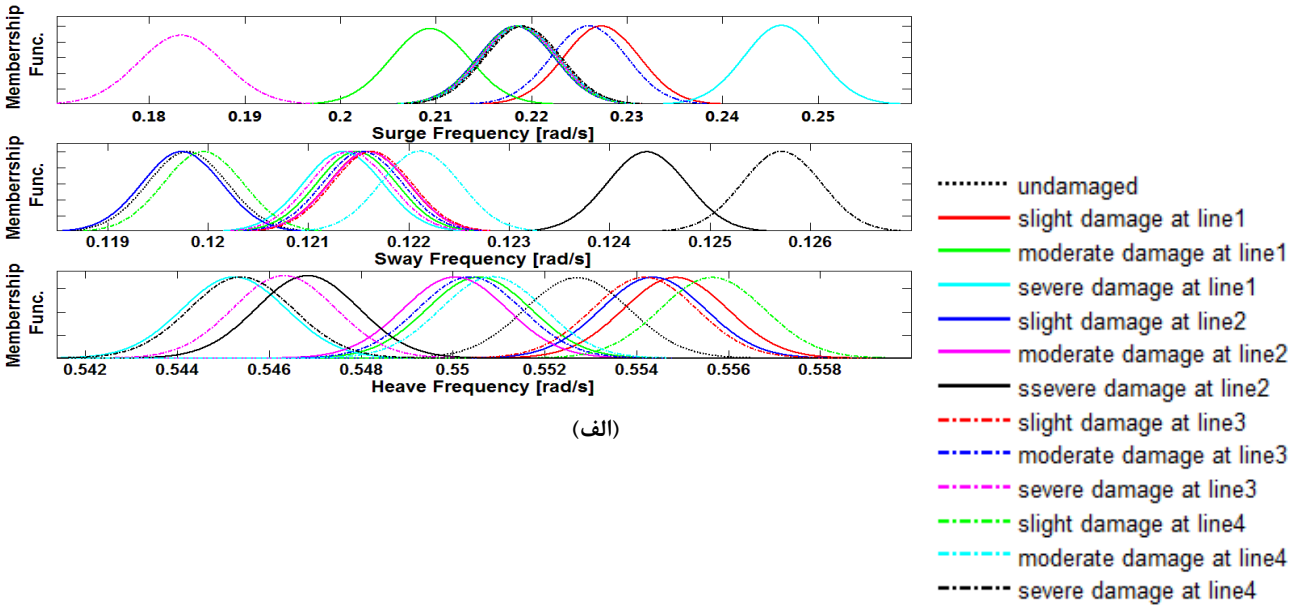
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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

وضعیت عیب	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
بدون عیب	۰/۲۱۸۸(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۱۹۸(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۲۷(۰/۱۱۴۸)	۰/۲۲۱۳(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۶۱(۰/۰۱۱۶)	۰/۱۶۹۴(۰/۰۰۹۹)
عیب با شدت کم در کابل ۱	۰/۲۲۷۳(۰/۳۹۷۲)	۰/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۴۸(۰/۱۱۴۵)	۰/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۵۸(۰/۰۱۰۰)	۰/۱۶۸۶(۰/۰۰۹۸)
عیب با شدت متوسط در کابل ۱	۰/۲۰۹۴(۰/۴۱۱۲)	۰/۱۲۱۵(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۰۶(۰/۱۱۴۰)	۰/۲۲۱۴(۰/۰۰۳۹)	۰/۲۱۵۵(۰/۰۰۹۹)	۰/۱۶۸۱(۰/۰۰۹۸)
عیب با شدت زیاد در کابل ۱	۰/۲۴۶۲(۰/۳۹۴۴)	۰/۱۲۱۳(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۴۵۲(۰/۱۱۳۸)	۰/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۵۱(۰/۰۱۰۰)	۰/۱۶۷۵(۰/۰۰۹۹)
عیب با شدت کم در کابل ۲	۰/۲۱۸۴(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۱۹۷(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۴۴(۰/۱۱۴۱)	۰/۲۲۱۳ (۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)
عیب با شدت متوسط در کابل ۲	۰/۲۱۸۷(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۰۱(۰/۱۱۳۸)	۰/۲۲۱۳ (۲۲/۱۳۳)	۰/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۷۰۱(۰/۰۰۹۷)
عیب با شدت زیاد در کابل ۲	۰/۲۱۸۹(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۴۴(۰/۰۳۹۹)	۰/۵۴۶۸(۰/۱۱۱۹)	۰/۲۲۱۴(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۶۷(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)
عیب با شدت کم در کابل ۳	۰/۲۱۸۹(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۱۶(۰/۰۳۹۹)	۰/۵۵۴۲(۰/۱۱۴۲)	۰/۲۲۱۵(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۵۷(۰/۰۱۱۸)	۰/۱۶۹۱(۰/۰۰۹۹)
عیب با شدت متوسط در کابل ۳	۰/۲۲۶۰(۰/۳۹۷۰)	۰/۱۲۱۵(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۵۰۴(۰/۱۱۳۷)	۰/۲۲۱۶(۲۲/۱۶۲)	۰/۲۱۵۳(۰/۰۱۱۶)	۰/۱۶۹۰(۰/۰۰۹۹)
عیب با شدت زیاد در کابل۳۱	۰/۱۸۳۳(۰/۴۵۰۹)	۰/۱۲۱۴(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۴۶۳(۰/۱۱۲۰)	۰/۲۲۱۷(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۴۹(۰/۰۱۱۸)	۰/۱۶۸۸(۰/۰۰۹۷)
عیب با شدت کم در کابل ۴	۰/۲۱۸۵(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۰۰(۰/۰۳۹۹)	۰/۵۵۵۷(۰/۱۱۴۴)	۰/۲۲۱۲(۰/۰۰۳۹)	۰/۲۱۶۵(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)
عیب با شدت متوسط در کابل ۴	۰/۲۱۸۸(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۲۱(۰/۰۳۹۶)	۰/۵۵۰۹(۰/۱۱۳۵)	۰/۲۲۱۰(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۶۹۹(۰/۰۰۹۵)
عیب با شدت زیاد در کابل ۴	۰/۲۱۹۱(۰/۳۹۸۸)	۰/۱۲۵۷(۰/۰۳۹۸)	۰/۵۴۵۴(۰/۱۱۳۸)	۰/۲۲۱۰(۰/۰۰۴۰)	۰/۲۱۶۶(۰/۰۰۸۹)	۰/۱۶۹۶(۰/۰۰۹۷)

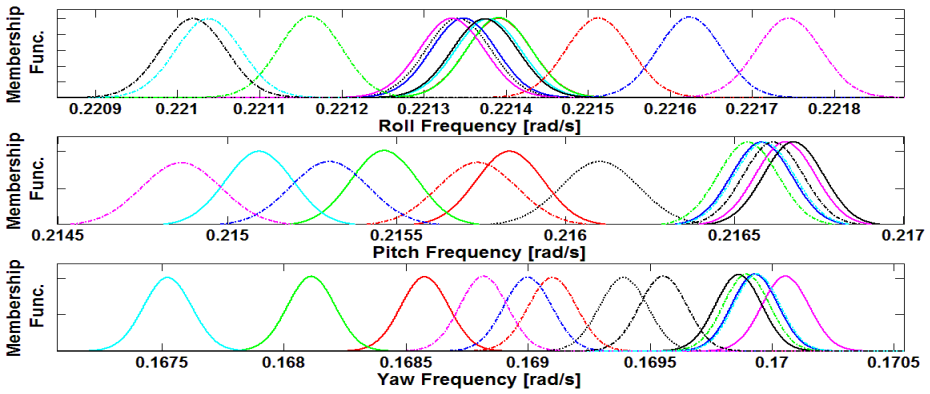
در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب ، تابع توزیع احتمالی برای ω_1، ω_2، ω_3، ω_4، ω_5 و ω_6 نشان داده شده‌است. لازم به توضیح است که در هرکدام از شکل‌های مذکور ۱۳ تابع توزیع مرتبط با کلاس‌های عیب با رنگ‌های مختلف برای ω های مربوطه ترسیم گردیده است. بعضی از کلاس‌ها همپوشانی خیلی کمی با یکدیگر دارند. به عنوان مثال در 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 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 همانطوری‌که 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.



(الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]



(ب)

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

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 (۱۳×۶۵) شبیه‌سازی) انجام می‌گیرد. بعد از استخراج شش فرکانس مرتبط با هر شبیه‌سازی و در نظر گرفتن این فرکانس‌ها به عنوان ورودیِ 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.

$$S_R = \frac{N_c}{N_T} 100 \qquad (۲۱)$$

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 شده اند. 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 در صد 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)

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

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

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 بدین‌صورت قابل توجیه است که وقتی شدت عیب تغییر می‌یابد، تغییر فرکانسی، اتفاق می‌افتد[۱۸]. به عبارت دیگر، با تغییر شدت عیب،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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 عیب‌ها 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 تزریق 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

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*

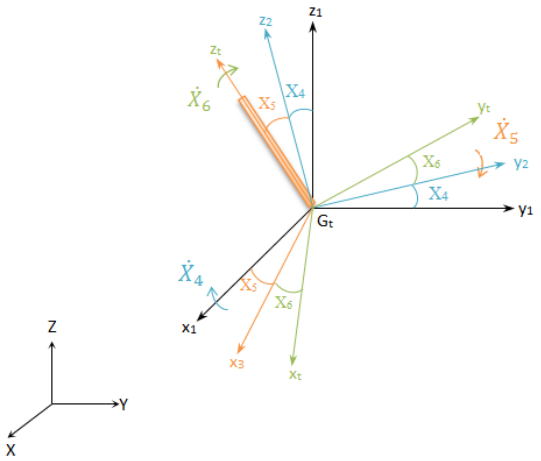
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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.

پیوست A- زوایای اولر

در شکل زیر زوایای اولر با ترتیب ۱-۲-۳ با متمایز نمودن رنگ‌ها، به صورت واضح نشان داده می‌شود.



شکل A-1 . زوایای اولر

با توجه به شکل A-1، سرعت زاویه‌ای برج به شکل زیر بدست می‌آید:

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

در این معادله برای بدست آوردن بردارهای واحد در دستگاه (x_t,y_t,z_t)، ابتدا ماتریس‌های انتقال را استخراج نموده، سپس ارتباط بین دستگاه‌های مشخص شده در شکل A-1 به صورت زیر به دست آورده می‌شود:

$$\begin{cases} C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos X_4 & \sin X_4 \\ 0 & -\sin X_4 & \cos X_4 \end{bmatrix} \\ C_2 = \begin{bmatrix} \cos X_5 & 0 & \sin X_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin X_5 & 0 & \cos X_5 \end{bmatrix} \\ C_3 = \begin{bmatrix} \cos X_6 & \sin X_6 & 0 \\ -\sin X_6 & \cos X_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \qquad \text{(A-2)}$$

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

در نتیجه با توجه به روابط بالا، بردارهای واحد به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} \vec{u}_{x_1} = \cos X_5 \cos X_6 \vec{u}_{x_t} - \cos X_5 \sin X_6 \vec{u}_{y_t} + \sin X_5 \vec{u}_{z_t} \\ \vec{u}_{y_2} = \sin X_6 \vec{u}_{x_t} + \cos X_6 \vec{u}_{y_t} \\ \vec{u}_{z_3} = u_{z_t} \end{cases} \qquad \text{(A-4)}$$

در نتیجه سرعت زاویه‌ای به این ترتیب حاصل می‌گردد:

$$\omega_t = \dot{X}_4 \left(\cos X_5 \cos X_6 \vec{u}_{x_t} - \cos X_5 \sin X_6 \vec{u}_{y_t} + \sin X_5 \vec{u}_{z_t}\right) + \dot{X}_5 \left(\sin X_6 \vec{u}_{x_t} + \cos X_6 \vec{u}_{y_t}\right) + \dot{X}_6 u_{z_t} \qquad \text{(A-5)}$$

پیوست B- جزئیات استخراج معادلات دینامیکی حرکت

همان‌طوریکه در بخش ۲-۲ بیان شد، ، بنابراین رابطه (۲) در بخش مذکور به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

همچنین مومنتم زاویه‌ای کلی سیستم برابر مومنتم تک تک اجزا (Tower و RNA)، حول مرکز جرم کلی سیستم (G_s) به صورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

زیر می‌باشد:

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

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

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

که در آن، $\vec{H}^{t}_{G_t}$ مومنتم زاویه‌ای Tower حول مرکز جرم خودش، $\vec{H}^{R}_{G_R}$ 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 عضوهای صلب می‌باشد. در تمامی روابط، اندیس بالایی بیانگر مومنتم عضو مربوطه و اندیس پایین نقطه‌ای است که مومنتم حول آن محاسبه شده‌است. سرعت خطی مرکز جرم‌ها به شکل زیر حاصل می‌شوند:

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

با جاگذاری سرعت‌ها در معادله (B-3):

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

با جمع طرفین معادله (B-5) :

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

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، $\vec{H}^{s}_{G_s}$ به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \vec{H}^{s}_{G_s} &= \vec{H}^{t}_{G_t} + \vec{H}^{R}_{G_R} + m_t \vec{\rho}_{G_t/G_s} \times \left(\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_t/G_s} \right) \\ &+ m_R \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times \left(\vec{\omega}_t \times \vec{\rho}_{G_R/G_s} \right) \end{aligned} \qquad \text{(B-7)}$$

مومنتم زاویه‌ای Tower ($\vec{H}^{t}_{G_t}$) 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، $\vec{H}^{t}_{G_t}$ از حاصلضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای بدست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (x_s,y_s,z_s) انتقال داده می‌شود:

$$\vec{H}^{t}_{G_t} = T_{t\to s} \left(I_t \vec{\omega}_t \right) \qquad \text{(B-8)}$$

از آنجایی که دستگاه‌های (x_s,y_s,z_s) و (x_t,y_t,z_t) همراستا و هم‌جهت هستند، $T_{t\to s}$ برابر ماتریس واحد می‌باشد. مومنتم زاویه‌ای RNA ($\vec{H}^{R}_{G_R}$) حاصل مومنتم زاویه‌ای روتور و نازل می‌باشد و همانند $\vec{H}^{t}_{G_t}$ از حاصلضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای بدست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (x_s,y_s,z_s) انتقال داده می‌شود:

$$\vec{H}^{n}_{G_R} = T_{n\to s} \left(I_n \vec{\omega}_n \right) \quad , \quad \vec{H}^{r}_{G_R} = T_{n\to s} \left(I_r \vec{\omega}_r \right) \qquad \text{(B-9)}$$

که $T_{n\to s}$ 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):

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

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 $T_{t\to n}$ ماتریس انتقال از (x_t,y_t,z_t) به (A,B,C) می‌باشد که برابر است با معکوس ماتریس $T_{n\to s}$ و چون $T_{n\to s}$ ماتریس ارتوگونال می‌باشد، معکوس آن با ترانهاده‌اش برابر است. بنابراین:

$$\vec{\omega}_n = T_{t\to n} \left(\vec{\omega}_t + \vec{\omega}_{yaw} \right) = T_{t\to n} \vec{\omega}_{n,t} \qquad \text{(B-11)}$$

$\vec{\omega}_{n,t}$ سرعت زاویه‌ای مطلق نازل در دستگاه (x_t,y_t,z_t)، بردار $\vec{\omega}_{yaw}$ نیز سرعت زاویه‌ای نازل حول z_t یعنی $\vec{\omega}_{yaw} = \left(0,0,\omega_{yaw}\right)$ 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:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]

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

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

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

مجموع ممان اینرسی روتور و نازل برابر ممان اینرسی RNA می‌باشد. ($I_n + I_r = I_R$) و به جای I_r از I_R استفاده می‌شود؛ این 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 ناچیز می‌باشد، بنابراین:

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

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

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

با محاسبه تک تک اعضای معادله (B-15):

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

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

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

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

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

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

با محاسبه اعضای معادله (B-8):

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

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

با جاگذاری معادلات (B-20) تا (B-22) در معادله (B-8)، $\vec{H}^{s}_{G_s}$ به شکل زیر ساده‌سازی می‌شود:

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

پیوست C- ماتریس‌های انتقال

ماتریس‌های انتقال برای هر یک از دوران‌های X_4، X_5 و X_6 به ترتیب به صورت زیر می‌باشند:

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

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

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.21.4.8]