

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

آیسان جمال‌کیا<sup>۱</sup>, میرمحمد اتفاق<sup>۲\*</sup>, علیرضا مجتبه‌دی

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز - دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ aysanjamalkia@yahoo.com  
<sup>۲</sup>استادیار، دانشگاه تبریز - دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ ettefagh@tabrizu.ac.ir  
<sup>۳</sup>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 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 بقاعی مومنتوم 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 شده است. همچنین با تنظیم توابع توزیع احتمالی هر یک از مشخصه‌ها در هر یک از کلاس‌های عیب تعریف شده، سیستم کلاس‌بندی فازی آموزش داده شده است. 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.

## 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

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

Aysan Jamalkia<sup>1</sup>, Mir Mohammad Ettefagh<sup>2\*</sup>, Alireza Mojtabehi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MS student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; aysanjamalkia@yahoo.com

<sup>2</sup>Assistant Prof., Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; ettefagh@tabrizu.ac.ir (Corresponding Author)

<sup>3</sup> 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

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 مدل سازی 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.

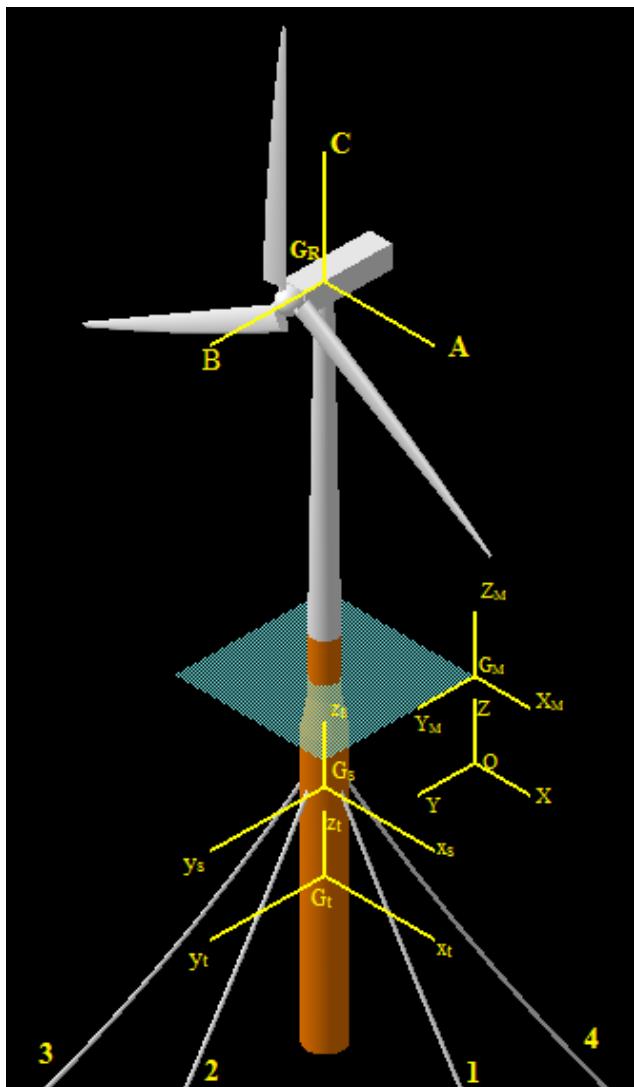
با توجه به اینکه تا به حال روش عیب‌یابی بر پایه سیگنال‌های دینامیکی یا ارتعاشی سازه‌های توربین بادی شناور به منظور پیش‌بینی وجود عیب و همچنین شدت و مکان عیب، در مجتمع علمی گزارش نشده است، انگیزه اصلی این پژوهش ارائه یک راهکار عیب‌یابی مناسب برای توربین بادی شناور از نوع Spar و امکان‌سنجی این روش ارائه 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 تنשی‌های 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 فوق العاده‌ای 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 چند جزئی (Multi-body) شامل بدنه، روتور، ناسل و سایر قسمت‌های متحرک می‌باشد که از طریق بلرینگ‌ها و هاب به هم متصل هستند. سپس از روش‌های اولر- نیوتون یا لاگرانژ برای مدل‌سازی دینامیکی چنین سازه‌هایی استفاده می‌شود. در

بادهای فراساحلی منبع مهم انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. 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 فضای 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 نتيجه پژوهشگران قرار گرفته است. در اوخر 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 [۲-۱]. 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 [۴-۳].

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 فرacoصوتی می‌باشد [۵]. روش‌های مبتنی بر پایه پاسخ دینامیکی سازه یا آنالیز مودال، به صورت گستردۀ مورد بررسی قرار گرفته شده، که یک مطالعه جامع در مراجع [۷-۶] 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

در مرکز جرم برج و RNA قرار دارند. فرض می‌شود مرکز جرم RNA در امتداد محور برج قرار دارد، در این صورت کلیهی مرکز RNAها 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 اول استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. ترتیب دوران زوایا بسیار مهم است بطوری که در حالت کلی ۱۲ حالت وجود دارد که در این پژوهش حالت ۱-۳-۲ به کار برده شده است. یعنی ابتدا حول  $X$  بعد حول  $Y$  و سپس حول  $Z$  دوران انجام می‌گیرد، که زوایای آنها بترتیب عبارتند 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 ژیروسکوپ 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 ژیروسکوپ 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 گردد [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 ستاریوهای 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 موققیت عیب‌یابی گزارش شده است.

## ۲- مدل‌سازی دینامیکی

### ۲-۱- دستگاه‌های مختصات و زوایای اول

توربین‌های بادی شناور معمولاً به صورت دو قسمت صلب در نظر گرفته می‌شوند [۱۳]: ۱- بدن 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 بدن 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.  $(X, Y, Z)$  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

سمت چپ معادله (۲)، برابر است با گشتاور تمام نیروهای خارجی:  
 $\sum \vec{M} = \vec{M}_{\text{wind}} + \vec{M}_{\text{wave}} + \vec{M}_{\text{restoring}}$   
 حاصل از نیروی شناوری و خطوط مهاری،  $\vec{M}_{\text{wind}}$  و  $\vec{M}_{\text{wave}}$  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  $(X_s, y_s, Z_s)$  و سرعت 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 ( $\omega_s = \omega_t = \omega$ ). در حالت کلی  $\bar{H}_{G_s}$  به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳]:

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

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:

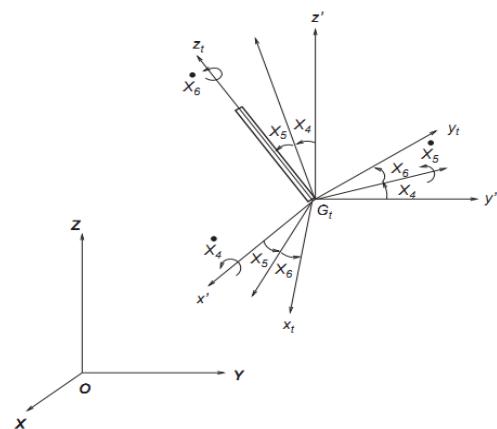
$$I_s = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

$\beta$  زاویه دوران ناسل می‌باشد که پیوسته به کمک سیستم کنترلی ناسل تنظیم می‌شود.  $\rho_{G_s/G_s}$  و  $\rho_{G_t/G_s}$  اندازه بردارهای مربوطه آنها بوده و  $I_s$ ، 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  $I_A$  و  $I_B$  بوده و  $I_C$  بوده و  $m_t$  و  $m_R$  هم به ترتیب جرم عضوهای صلب برج و RNA می‌باشد.  $\bar{H}'$  مومنتم زاویه‌ای RNA نسبت به برج می‌باشد که مستقل از دوران برج ( $\bar{\omega}_t$ ) و برابر است با:

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

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



شکل ۲- زویای اولر با ترتیب ۱-۲-۳

مسلمان دستگاه  $(X_t, y_t, Z_t)$  متصل به بدن 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 زویای اولر و با توجه به شکل ۲ به صورت زیر بدست می‌آید: (جزئیات نحوه محاسبه آن در پیوست 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 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 برد 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):

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

اندازه آن به شکل زیر است:

$$\left(\dot{\vec{H}}_{G_s}\right)_{(x_s, y_s, z_s)}^s = \dot{I}_s \vec{\omega}_t + I_s \vec{\dot{\omega}}_t + \dot{\vec{H}}' \quad (6)$$

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] (هر کدام از ماتریس‌های ضرب شده در پیوست C آورده شده است) :

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

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

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

### ۲-۳-۱- نیروی 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 ( $F_B^l = 0,0, \rho g \pi r^2 h_1$ ) که در آن  $\rho$  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 ( $X_3$ ) heave 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  $G_M$  و O است. همچنین  $\theta_1$  زاویه استوانه نسبت به راستای عمود بوده ( $\cos \theta_1 = \sin X_4 \cos X_5$ ) و  $h_0$  نیز مقدار اولیه 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  $\bar{\rho}_{B/G_s} = (X_s^B, Y_s^B, Z_s^B)$  برابر است با ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) که در آن :

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

$h_G$  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

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 ( $\beta = \omega_{yaw}$ ). برای به دست آوردن درجات آزادی انتقالی، حرکت مرکز جرم توربین در نظر گرفته می‌شود که طبق قانون دوم نیوتون:

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

در آن شتاب مرکز جرم کل سیستم،  $\vec{a}_{G_s} = (\ddot{X}_1, \ddot{X}_2, \ddot{X}_3)$  جرم کل سیستم و  $m_s$  هم مجموع تمام نیروهای خارجی در دستگاه (X,Y,Z) می‌باشد که شامل نیروهای شناوری، خطوط مهاری، باد، موج و نیروی جاذبه زمین است:  $\sum \vec{F} = \vec{F}_{restoring} + \vec{F}_{wind} + \vec{F}_{wave} + \vec{G}$  که عیبی‌بایی 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. عملأ 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.

### ۲-۳-۲- 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 ( $X_4, X_5, X_6$ ) می‌باشد، زیرا

### ۳- روش عیب یابی مبتنی بر کلاس‌بندی فازی

منطق فازی، یک روش محاسباتی نرم منحصر به‌فرمایی است که در آن داده‌های عددی و دانسته‌های زبانی به طور هم‌زمان به کار گرفته می‌شوند. اساس این منطق، بر مبنای مفهوم مجموعه‌های فازی است. عضویت در این مجموعه توسطتابع عضویت  $\mu(x)$  مشخص می‌گردد که می‌تواند مقادیر بین صفر تا یک داشته باشد. توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، و گاوی از جمله رایج‌ترین 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 عموماً، این اشکال بین صفر و یک نرمالیزه می‌شوند. سیستم‌های فازی مبتنی بر یک نگاشت از بردار مشخصه‌ها (به عنوان ورودی) به عدد اسکالار (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 ( $F: V \in R^m \rightarrow W \in R$ ) شامل چهار مرحله 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:

- معروف مقادیر عددی معادل برای متغیر زبانی، به عنوان مثال، مقدار ۳.۵٪ برای متغیری با عنوان HIGH.

- کمیت‌سازی متغیرهای 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 فعلی‌سازی قوانین مذکور را در یک قالب عددی در بر می‌گیرد. 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]:

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،  $\vec{F}_B^I = T_{I \rightarrow s} \vec{F}_B^s$ ، سپس با ضرب خارجی بردار مرتبط با مرکز شناوری در نیروی شناوری، گشتاور متناظر بدست می‌آید  $(T_{I \rightarrow s} \vec{M}_B^s = \vec{\rho}_{B/G_s} \times \vec{F}_B^s)$ . معکوس ماتریس  $T_{s \rightarrow I}$  می‌باشد و چون ماتریس معتمد 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 هر کدام از کابل‌ها به سازه ( نقطه A ) با جمع حرکات دورانی و انتقالی محاسبه می‌شود. موقعیت یکی از نقاط در دستگاه اینرسی،  $\vec{\rho}_{A/G_s} = \vec{\rho}_{G_s/O} + T_{s \rightarrow I} \vec{\rho}_{A/G_s}$  می‌باشد که  $\vec{\rho}$  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 در راستای کابل‌های تحت کشش، از خاصیت الاستیسیته مواد به شکل زیر بدست می‌آید [۱۳]:

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

که در آن  $T_0$  کشش اولیه کابل، E مدول یانگ، S سطح مقطع کابل، L طول اولیه کابل و  $\rho_{E/A}$  نرم بردار  $\vec{\rho}$ ، 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 کابل‌ها 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  $(\vec{M}_{line}^s = \vec{\rho}_{A/G_s} \times \vec{F}_{line}^s)$  و  $\vec{F}_{line}^s = T_{I \rightarrow s} \vec{F}_B^s$ . در نتیجه گشتاور بازگرداننده خطوط مهاری،  $M_{mooring}$ ، از جمع گشتاور کابل‌ها حاصل می‌شود. در نهایت نیروی بازگرداننده برابر خواهد بود با:

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

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  $(x)$ ) نشان دهنده درجه عضویت مشخصه  $l$  ام مرتبط با  $i$  امین قانون فازی (کلاس) می‌باشد. حال  $(C_i)$  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، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده رفتار دینامیکی سازه توربین، آموزش داده می‌شود. به این منظور ازتابع عضویت گاویسی جهت بیان داده‌های ورودی مجموعه‌های فازی مرتبط با هریک از حالت‌های سالم و معیوب سازه، استفاده شده است. این مجموعه‌های فازی به صورت تابع زیر تعریف شده است:

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

که در آن  $m$  میانگین مجموعه‌های فازی و  $\sigma$  انحراف معیار متناظر با متغیرهای مرتبط با کلاس مورد نظر است که استخراج آن‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل آمورش 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، تابع 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 قبل 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

$$R_i : If \ x_1 \ is \ F_1 \ \& \ x_2 \ is \ F_2 \ \& \ ... \ x_m \ is \ F_m \ Then \ y = C_i \quad i = 1, 2, 3, ..., M \quad (13)$$

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  $(x)$   $\mu_{F_i}(x)$  و  $(y)$   $\mu_{C_i}(y)$  مشخص می‌گردند. بنابراین هر قانون به صورت عمل استنتاجی  $F_{1,2,...,m} = F_1 \times F_2 \times \dots \times F_m \rightarrow C_i$  در نظر گرفته شود، که در آن  $F_{1,2,...,m}$  یک مجموعه فازی  $V \times W = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m \times W$  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 عملگر ضربی به صورت جبری متدائل‌تر است. در نهایت، مرحله غیر فازی ساز، وظیفه تبدیل مجموعه فازی مربوط به خروجی را به اعداد غیر فازی انجام می‌دهد. بیشتر غیر فازی سازی‌های به کار رفته در مهندسی عبارتند از روش مرکزی و بیشینه سازگاری که به ترتیب، بیشتر برای مسائل کنترل و کلاس‌بندی به کار می‌روند. در ادامه، الگوریتم کلاس‌بندی 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 کلاس‌بندی، 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  $\mu_{C_i}(y) = 1$ .

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 تابع عضویت گاویسی در نظر گرفته شود. بنابراین مقدار میانگین و واریانس هریک از توابع عضویت گاویسی نیز برابر با مقدار میانگین و واریانس مشخصه‌های استخراج شده می‌باشند. لازم است که عملیات تنظیم پارامترهای توزیع گاویسی 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 فازی سازی بیان می‌شود که منجر به مشخص شدن کلاس مورد نظر می‌گردد. در نظر بگیرید که  $D_i$  (متناظر با  $\mu_{R_i}(x, y)$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \{\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \quad \omega_5 \quad \omega_6\} \\ \\ y = F(x) = \left\{ \begin{array}{l} undamaged \\ slight\ damage\ at\ line1 \\ moderate\ damage\ at\ line1 \\ severe\ damage\ at\ line1 \\ slight\ damage\ at\ line2 \\ moderate\ damage\ at\ line2 \\ severe\ damage\ at\ line3 \\ slight\ damage\ at\ line3 \\ moderate\ damage\ at\ line3 \\ severe\ damage\ at\ line3 \\ slight\ damage\ at\ line4 \\ moderate\ damage\ at\ line4 \\ severe\ damage\ at\ line4 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (20)$$

با توجه به مجموعه بالا می‌توان مشاهده نمود که در مجموع ۱۳ کلاس مرتبط با هر کدام از وضعیت‌های سازه تعريف شده است. خروجی الگوریتم کلاس‌بندی، یک عدد می‌باشد که نشان دهنده شماره یکی از کلاس‌های تعريف 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 (مثالاً 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 (مسلسلاً تعداد داده‌های ورودی برابر با  $10 \div 0.1 = 100$  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  $12.1 rpm$  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]:

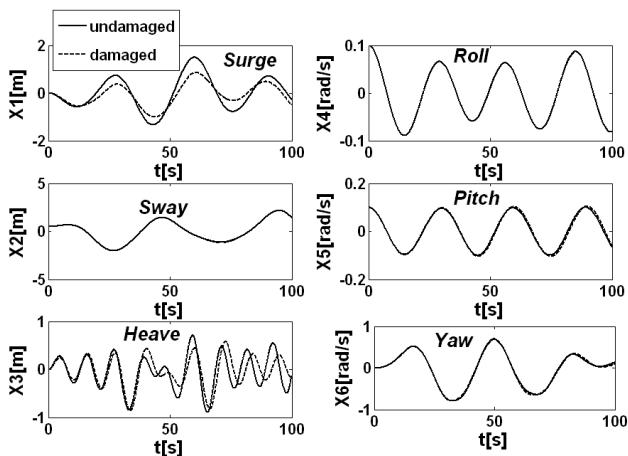
$$I_{x_t} = I_{y_t} = 3.57 \times 10^9 \text{ kg.m}^2, I_{z_t} = 9.28 \times 10^7 \text{ kg.m}^2$$

چهار کابل کشیده در سیستم خطوط مهاری موجود می‌باشد، که هر کدام از کابل‌ها به صورت فنری با سختی  $3.37 \times 10^5 \text{ N/m}$  در نظر گرفته شده‌اند که طول اولیه هر کدام  $295m$  و عمق آب نیز  $320m$  است. بعلاوه وضعیت دریا آرام فرض می‌شود، بنابراین برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی توربین از جابجایی اولیه به صورت  $X_2 = X_5 = 0.1$  و  $X_4 = 0.5$  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:

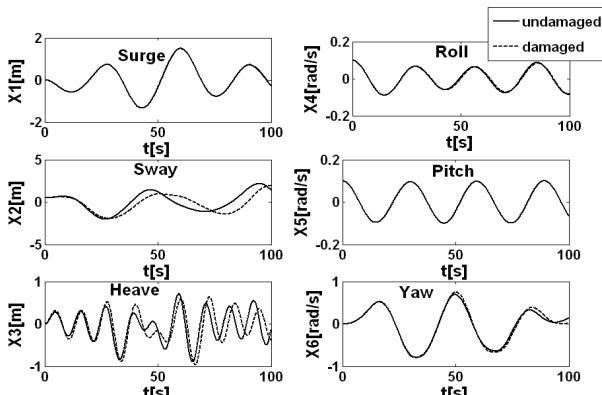
$$D = \frac{K_u - K_d}{K_u} \times 100 \quad (19)$$

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 هر کدام از کابل‌ها با مقادیر کاهش سختی  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  و  $40^\circ$  درصد، شبیه‌سازی شده است. این عیوبها به این شکل کلاس‌بندی شده‌اند که درصد کاهش سختی بین  $10^\circ$  و  $20^\circ$  درصد حالت عیب با شدت کم (Slight)، بین  $20^\circ$  و  $30^\circ$  درصد حالت عیب با شدت متوسط (Moderate) و بین  $30^\circ$  و  $40^\circ$  درصد حالت عیب با شدت زیاد (Sever) را نشان می‌دهد. شرایطی که مقدار عیب در آن کمتر از  $10^\circ$  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 تعريف شده اند:

به عنوان یک نمونه از شبیه‌سازی سازه معیوب، در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب اثر وجود عیوب با شدت ۴۰ درصد بر پاسخ دینامیکی سازه در کابل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ نیز طیف فرکانسی نظیر هر کدام از این شکل‌ها نمایش داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌گردد، وجود عیوب 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 نیروهای بازگرداننده در حین وقوع عیوب در یکی از کابل‌ها ارتباط داد. از آنجایی که کابل‌های ۱ و ۳ و همچنین ۲ و ۴ در مقابل هم هستند، اثرگذاری عیوب در آن‌ها یکسان خواهد بود. بنابراین در اینجا تنها اشکال مربوط به کابل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

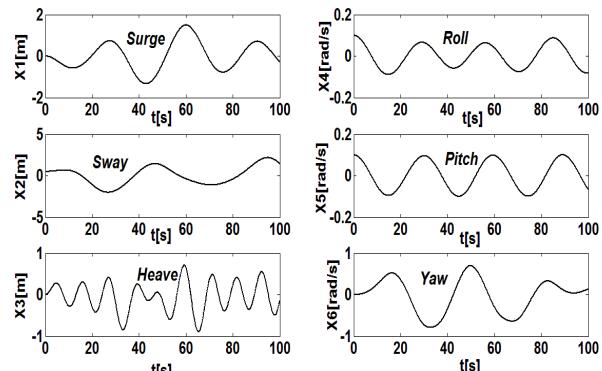


شکل ۵- تأثیر وجود عیوب در کابل ۱ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم

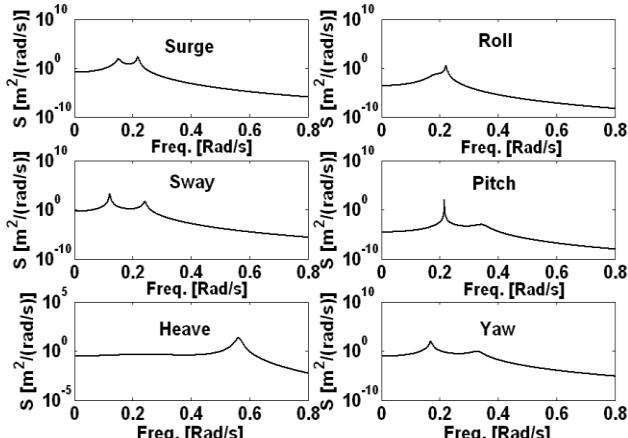


شکل ۶- تأثیر وجود عیوب در کابل ۲ بر پاسخ دینامیکی سازه و مقایسه با حالت سالم

به عنوان ورودی سیستم کلاس‌بندی فازی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پاسخ دینامیکی سازه در حالت سالم و طیف مرتبط با آن نشان داده شده است. 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 (مقایس 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 شده اند.

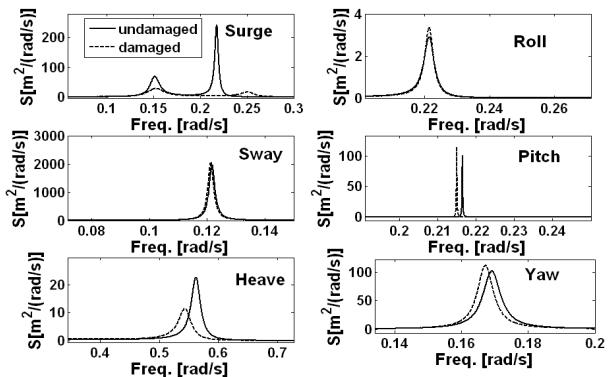
جدول ۱- فرکانس‌های طبیعی استخراج شده

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

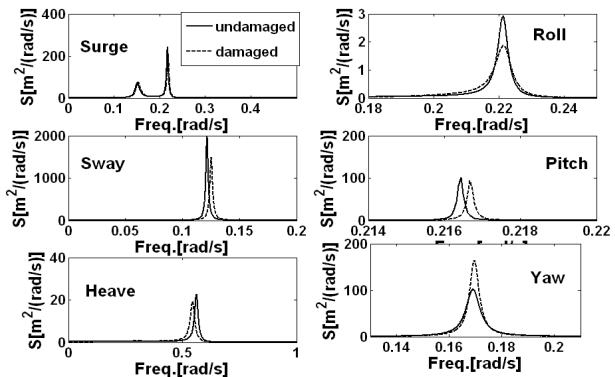
پیش‌بینی‌های فنی مطابقت می‌نماید، بنابراین شبیه‌سازی توربین همراه با عیب خطوط مهاری به درستی انجام گرفته شده است. همانطوریکه ملاحظه می‌شود با توجه به پیچیدگی دینامیکی سیستم توربین بادی شناور به علت معادلات کوپل غیر خطی دینامیکی، تفسیر تاثیر نوع و شدت عیب بر روی رفتار پاسخ دینامیکی سیستم پیچیده و به تبع 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، عیب یابی را به نحو احسن انجام دهد. با توجه به مشکلات بیان شده در عیب یابی 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 شده، می‌توان با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی سازه، توابع عضویت لازم در کلاس‌بندی فازی را تنظیم نمود و در عیب یابی سازه به کار برد. در بخش بعدی در مورد این قسمت از آموزش سیستم فازی و نتایج حاصل از عیب یابی توضیح داده خواهد شد.

## ۵- نتایج و بحث

برای استخراج میانگین و انحراف معیار هر یک از توابع گاووسی (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، پارامترهای مذکور را که در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد، می‌توان 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 پهنه‌ای 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.



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



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

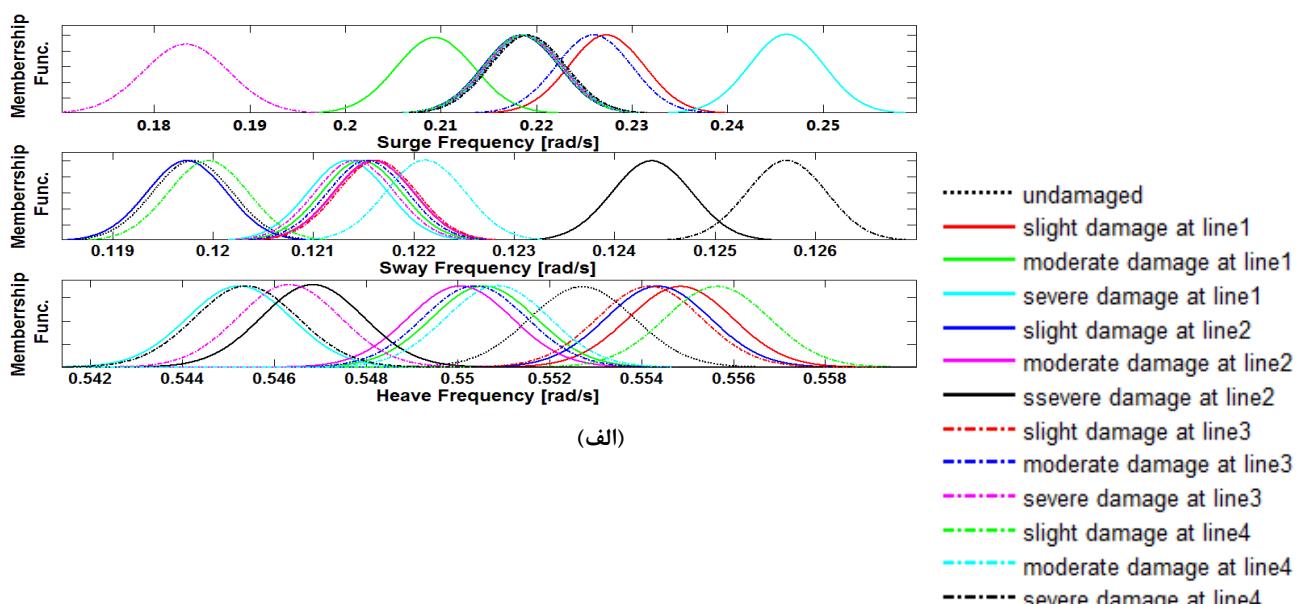
همان‌گونه که از شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده می‌باشد، در تمام حالت‌های وجود عیوب در خطوط مهاری سیستم، حرکت انتقالی heave (حرکت در راستای Z) و حرکت دورانی yaw (دوران حول Z) تغییر پیدا کرده است. این مشاهده، مسئله قابل انتظاری است، چون در صورتی که هر کدام از کابل‌ها آسیب ببیند، نیروی بازگرداننده در راستای Z و گشتاور بازگرداننده حول Z تغییر بارزی می‌یابد. همچنین وجود عیوب 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 (roll و sway) می‌شود. زیرا نیروی بازگرداننده در راستای X و گشتاور بازگرداننده حول Y دچار اختلال می‌گردد. به همین ترتیب وجود عیوب 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 (roll) می‌شود. با توجه به اینکه تمامی نتایج اخیر با

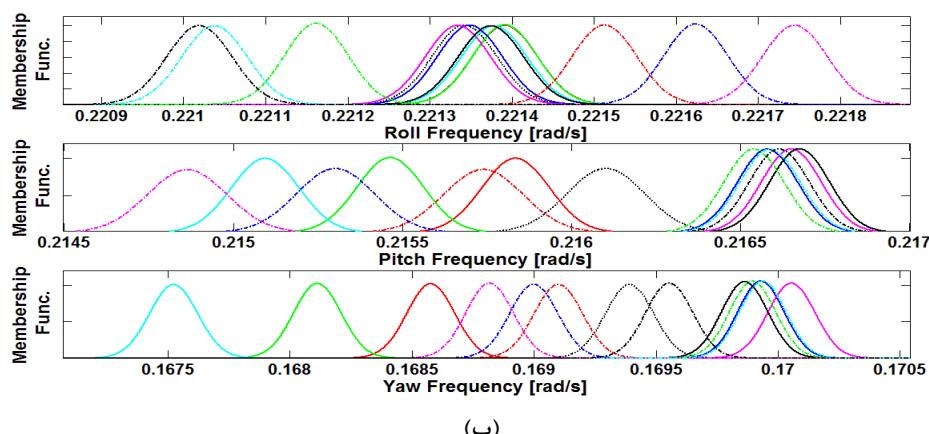
جدول ۲- میانگین و انحراف معیار هر یک از توابع گاووسی تعریف شده مرتبط با هر کدام از شش فرکانس غالب سازه (به عنوان ورودی) و شرایط مختلف توربین بادی (انحراف معیارها در داخل پرانتز نوشته شده‌اند)

$\omega_6$	$\omega_5$	$\omega_4$	$\omega_3$	$\omega_2$	$\omega_1$	وضعیت عیب
.۰/۱۶۹۴(.۰/۰۹۹)	.۰/۲۱۶۱(.۰/۰۱۶)	.۰/۲۲۱۳(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۵۷۸(.۱/۱۴۸)	.۰/۱۱۹۸(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۱۸۸(.۰/۰۳۹۸۸)	بدون عیب
.۰/۱۶۸۶(.۰/۰۹۸)	.۰/۲۱۵۸(.۰/۰۱۰)	.۰/۲۲۱۴(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۵۷۸(.۱/۱۴۵)	.۰/۱۲۱۶(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۲۷۳(.۰/۰۳۹۷۲)	عیب با شدت کم در کابل ۱
.۰/۱۶۸۱(.۰/۰۹۸)	.۰/۲۱۵۵(.۰/۰۹۹)	.۰/۲۲۱۴(.۰/۰۳۹)	.۰/۵۵۰۶(.۱/۱۴۰)	.۰/۱۲۱۵(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۰۹۴(.۰/۴۱۱۲)	عیب با شدت متوسط در کابل ۱
.۰/۱۶۷۵(.۰/۰۹۹)	.۰/۲۱۵۱(.۰/۰۱۰)	.۰/۲۲۱۴(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۴۵۲(.۱/۱۱۳۸)	.۰/۱۲۱۳(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۴۶۲(.۰/۰۳۹۴۴)	عیب با شدت زیاد در کابل ۱
.۰/۱۶۹۹(.۰/۰۹۵)	.۰/۲۱۶۶(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۳(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۵۴۴(.۱/۱۱۴۱)	.۰/۱۱۹۷(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۱۸۴(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۲
.۰/۱۷۰۱(.۰/۰۹۷)	.۰/۲۱۶۶(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۳(۲۲/۱۳۳)	.۰/۵۵۰۱(.۰/۱۱۳۸)	.۰/۱۲۱۶(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۱۸۷(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت متوسط در کابل ۲
.۰/۱۶۹۹(.۰/۰۹۵)	.۰/۲۱۶۷(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۴(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۴۶۸(.۱/۱۱۱۹)	.۰/۱۲۴۴(.۰/۰۳۹۹)	.۰/۲۱۸۹(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت زیاد در کابل ۲
.۰/۱۶۹۱(.۰/۰۹۹)	.۰/۲۱۵۷(.۰/۰۱۸)	.۰/۲۲۱۵(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۵۴۲(.۱/۱۱۴۲)	.۰/۱۲۱۶(.۰/۰۳۹۹)	.۰/۲۱۸۹(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۳
.۰/۱۶۹۰(.۰/۰۹۹)	.۰/۲۱۵۳(.۰/۰۱۶)	.۰/۲۲۱۶(۲۲/۱۶۲)	.۰/۵۵۰۴(.۰/۱۱۳۷)	.۰/۱۲۱۵(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۲۶۰(.۰/۰۳۹۷۰)	عیب با شدت متوسط در کابل ۳
.۰/۱۶۸۸(.۰/۰۹۷)	.۰/۲۱۴۹(.۰/۰۱۸)	.۰/۲۲۱۷(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۴۶۳(.۱/۱۱۲۰)	.۰/۱۲۱۴(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۱۸۳۳(.۰/۰۴۵۰۹)	عیب با شدت زیاد در کابل ۳۱
.۰/۱۶۹۹(.۰/۰۹۵)	.۰/۲۱۶۵(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۲(.۰/۰۳۹)	.۰/۵۵۵۷(.۱/۱۱۴۴)	.۰/۱۲۰۰(.۰/۰۳۹۹)	.۰/۲۱۸۵(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت کم در کابل ۴
.۰/۱۶۹۹(.۰/۰۹۵)	.۰/۲۱۶۶(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۰(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۵۰۹(.۰/۱۱۳۵)	.۰/۱۲۲۱(.۰/۰۳۹۶)	.۰/۲۱۸۸(.۰/۰۳۹۸۸)	عیب با شدت متوسط در کابل ۴
.۰/۱۶۹۶(.۰/۰۹۷)	.۰/۲۱۶۶(.۰/۰۸۹)	.۰/۲۲۱۰(.۰/۰۴۰)	.۰/۵۴۵۴(.۱/۱۱۳۸)	.۰/۱۲۵۷(.۰/۰۳۹۸)	.۰/۲۱۹۱(.۰/۰۳۹۸۸)	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  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$  و  $\omega_6$  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  $\omega_i$  های مربوطه ترسیم گردیده است. بعضی از کلاس‌ها همپوشانی خیلی کمی با یکدیگر دارند. به عنوان مثال در شکل‌های مربوط به  $\omega_1$ ، 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





(ب)

شکل ۹- توابع توزیع احتمالی فرکانس‌های غالب (وروودی‌های 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

Snr = 70	Snr = 80	بدون نویز	وضعیت عیب
۵۹/۷	۸۸/۰۶	۹۲/۵۴	بدون عیب
۶۸/۱۵	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	۸۶/۱۹	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
۶۲/۹۳	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	۸۶/۱۹	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 مغایوب 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 نظری 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  $845 \times 65$ ) شیوه‌سازی) انجام می‌گیرد. بعد از استخراج شش فرکانس مرتبط با هر شبیه‌سازی و در نظر گرفتن این فرکانس‌ها به عنوان وروودی 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.

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

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 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 SNR های 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 اساستابع توزیع احتمالی گاویسی تولید شده است. (با استفاده از دستور *awgn* در محیط MATLAB)

## ۶-مراجع

- 1- Musial, W., Butterfield, 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 شده است، 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 شده است، 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 ستاریوهای 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 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 نویسنده‌گان 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

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

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

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

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

در نتیجه سرعت زاویه‌ای به این ترتیب حاصل می‌گردد:

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

**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:**

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

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

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

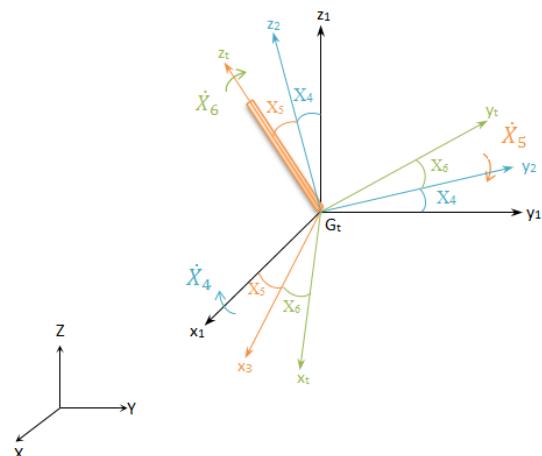
16- Kosko B., (1997), Fuzzy Engineering, Prentice-Hall, NJ.

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.

### پیوست A- زوایای اولر

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



شکل ۱- A. زوایای اولر

با توجه به شکل ۱- A، سرعت زاویه‌ای برج به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\omega_t = \dot{X}_4 \vec{u}_{x_t} + \dot{X}_5 \vec{u}_{y_t} + \dot{X}_6 \vec{u}_{z_t} \quad (A-1)$$

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 ۱- A به صورت زیر به دست آورده می‌شود:

زیر می باشد:

مومنتم زاویه ای Tower ( $\vec{H}_{G_t}^t$ ) در دستگاه ( $x_t, y_t, z_t$ ) حول مرکز جرم ( $G_t$ ) محاسبه شده و چون ( $x_t, y_t, z_t$ ) در راستای محورهای اصلی Tower می باشد،  $\vec{H}_{G_t}^t$  از حاصل ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه ای بدست می آید و سپس به دستگاه واسطه اینرسی ( $x_s, y_s, z_s$ ) انتقال داده می شود:

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

از آنجایی که دستگاه های ( $x_s, y_s, z_s$ ) و ( $x_t, y_t, z_t$ ) هم راستا و هم جهت هستند،  $T_{t \rightarrow s}$  برابر ماتریس واحد می باشد. مومنتم زاویه ای RNA ( $\vec{H}_{G_R}^R$ ) حاصل مومنتم زاویه ای روتور و نازل می باشد و همانند  $\vec{H}_{G_t}^t$  از حاصل ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه ای بدست می آید و سپس به دستگاه واسطه ( $x_s, y_s, z_s$ ) انتقال داده می شود:

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

که  $T_{n \rightarrow s}$  ماتریس انتقال از ( $A, B, C$ ) به ( $x_s, y_s, z_s$ ) می باشد که دستگاه ( $A, B, C$ ) به اندازه  $\beta$  حول محور  $Z$  دستگاه ( $x_s, y_s, z_s$ ) می کند و به صورت زیر محاسبه می گردد که در آن  $\beta$  زاویه دوران نازل می باشد که پیوسته با سیستم کنترلی نازل تنظیم می شود (در این مقاله ثابت فرض شده است):

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

سرعت نازل در دستگاه مختصات ( $A, B, C$ ),  $\vec{\omega}_n$ ، ابتدا در دستگاه ( $x_t, y_t, z_t$ ) محاسبه می گردد. سپس به ( $A, B, C$ ) منتقل می شود که در آن  $T_{t \rightarrow n}$  ماتریس انتقال از ( $x_t, y_t, z_t$ ) به ( $x_s, y_s, z_s$ ) می باشد که برابر است با معکوس ماتریس  $T_{n \rightarrow s}$  و چون  $T_{n \rightarrow s}$  ماتریس ارتونگول می باشد، معکوس آن با ترانهاده اش برابر است. بنابراین:

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

$\vec{\omega}_{n,t}$  سرعت زاویه ای مطلق نازل در دستگاه ( $x_t, y_t, z_t$ )، بردار نیز سرعت زاویه ای نازل حول  $Z_t$  یعنی  $(0, 0, \omega_{yaw})$  است.

از آنجایی که ( $A, B, C$ ) در راستای محورهای اصلی روتور هم می باشد، مومنتم زاویه ای آن نیز وابسته به سرعت زاویه ای و اینرسی آن خواهد بود که از رابطه زیر بدست می آید:

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

که  $\vec{H}_{G_s}^s$  با استفاده از روابط زیر به دست می آیند:

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

که در آن،  $\vec{H}_{G_t}^t$  مومنتم زاویه ای Tower حول مرکز جرم خودش،  $\vec{H}_{G_R}^R$  مومنتم زاویه ای RNA حول مرکز جرم خودش،  $\vec{\rho}_{G_t/G_s}$  فاصله 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 جرم ها،  $m_t$  و  $m_R$  هم جرم عضوهای صلب می باشد. در تمامی روابط، اندیس بالای بیانگر مومنتم عضو مربوطه و اندیس پایین نقطه ای است که مومنتم حول آن محاسبه شده است. سرعت خطی مرکز جرم ها به شکل زیر حاصل می شوند:

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

با جاگذاری سرعت ها 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 می آید:

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

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

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

با محاسبه اعضای معادله (B-8) :

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

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

با جاگذاری معادلات (B-20) تا (B-22) در معادله (B-8) به شکل زیر ساده سازی می شود:

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

### پیوست C - ماتریس های انتقال

ماتریس های انتقال برای هر یک از دوران های  $X_4$ ,  $X_5$  و  $X_6$  به ترتیب به صورت زیر می باشند:

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

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

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

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

که در آن  $\vec{\omega}_{r,n}$  سرعت زاویه ای مطلق روتور نسبت به دستگاه (A,B,C) می باشد.  $\dot{\psi}$  سرعت زاویه ای روتور حول جهت مثبت محور B می باشد، یعنی:  $\dot{\psi} = (0, \dot{\psi}, 0)$ . مونتم زاویه ای RNA از مجموع مونتم زاویه ای روتور و نازل بدست می آید:

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

مجموع ممان اینرسی روتور و نازل برابر ممان اینرسی RNA می باشد. ( $I_n + I_r = I_R$ ) و به جای  $I_R$  از استفاده می شود؛ این کار تأثیری در محاسبات نخواهد داشت، چون فقط آن عضوی که مربوط به دوران روتور می باشد در محاسبات وارد می شود. یعنی ممان حول B، که ممان نازل حول B در مقایسه با روتور ناچیز می باشد، بنابراین:

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

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

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

با محاسبه تک تک اعضای معادله (B-15) :

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

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

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

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