

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطای توربین‌های بادی

دانشجو : ناصر طالبی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی صدرنیا

استاد مشاور:

دکتر احمد دارابی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

ماه و سال انتشار: تیر ماه ۱۳۹۳

شماره: ۱۸۸۱، آ.ت.ب  
تاریخ: ۹۳، ۴، ۱۶  
ویرایش: —

با اسمه تعالی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره ۱۲

بدینوسیله گواهی می شود آقای اکانه مأمور طالب دانشجوی دکتری رشته سفل به شماره  
دانشجویی ۸۸۱۸۲۸۸ ورودی سال ۸۸ در تاریخ ۵ مرداد ۹۳ از رساله خود با عنوان:

طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطاب برای توربین های بادی

دفاع و با اخذ نمره ۷۷ به درجه: لبیه حبیب. نائل گردید.

(۱) ب) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ نمره ۱۸/۹۹

(۲) ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۵ نمره ۹۹/۵

(۳) د) رساله نیاز به اصلاحات دارد

| ردیف | هیئت داوران            | نام و نام خانوادگی                          | مرتبه علمی    | اعضاء |
|------|------------------------|---|---------------|-------|
| ۱    | دکتر محمد علی صدر زاده | استاد/ استاد راهنمای                        | استاد/ راهنما |       |
| ۲    | دکتر احمد رضایی        | مشاور/ مشاورین                              | دستیار        |       |
| ۳    | دکتر ناصر دزیر         | استاد مدعو داخلی / خارجی                    | استاد         |       |
| ۴    | دکتر محمد مهرizi فتاح  | استاد مدعو داخلی اخراجی                     | استاد         |       |
| ۵    | دکتر حسیر مدرسون شایرز | استاد مدعو داخلی احکامی                     | دستیار        |       |
| ۶    | دکتر سید مرتضی دزیر    | سرپرست (نایابنده) تحصیلات<br>تکمیلی دانشکده | (سرپرست)      |       |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرماید اقدامات لازم بعمل آید.

تاریخ و اعضا:

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

مدحت الله وزیر

**تقدیم به پدر بزرگوارم،**

که در تمام لحظات زندگی، پشتوانهای محکم برایم بوده است.

**و تقدیم به مادر مهربانم،**

که با محبت‌های بی‌درباره خوبیش، مرهمی برای دردها و رنج‌هایم بوده است.

## تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از همه کسانی که با راهنمایی و رهنمود، تشویق و ترغیب، تذکر و انتقاد، معرفی و یا تهیه منابع، بنده را در انجام این تحقیق یاری رسانیده‌اند، تشکر نمایم؛ به ویژه از استاد محترم جناب آقای دکتر محمد علی صدرنیا و استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر احمد دارابی که در طول انجام این تحقیق همواره مرا مرهون الطاف، راهنمایی‌ها و بزرگواری‌های خویش قرار داده‌اند، بسیار سپاسگزارم.

همچنین از خانواده عزیزم و به خصوص پدر و مادر گرانقدرم که همواره با دلگرمی‌های خویش مرا جانی تازه بخشدیده‌اند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

و در نهایت از تمامی استادی گروه کنترل دانشگاه شاهروod که در طول دوران تحصیل، بنده را از راهنمایی‌های خویش بی نصیب نگذاشته‌اند، سپاسگزاری می‌کنم.

## تعهد نامه

اینجانب ناصر طالبی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق-کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله با عنوان **طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطاب برای توربین‌های بادی تحت**

راهنمائی دکتر محمد علی صدرنیا متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده رساله وجود داشته باشد.

## چکیده

در این رساله، ابتدا یک مدل دینامیکی جامع برای سیستم تبدیل انرژی بادی ارائه می‌شود که قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی را با جزئیات مناسبی شامل می‌شود. توسط این مدل می‌توان انواع خطاهای از قبیل خطای سنسورها، محرک‌ها و شبکه قدرت را مورد بررسی قرار داد و اثر آن خطاهای را بر سیگنال‌های مختلف سیستم مشاهده نمود. این در حالی است که مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند دارای این ضعف هستند که در آنها نمی‌توان خطاهای را در قسمت‌های مختلف سیستم مدل‌سازی و اثر آن‌ها را در قسمت‌های مختلف سیستم مشاهده نمود. سپس یک سیستم تشخیص و جداسازی خطاهای می‌شود تا توسط آن، خطاهای به وقوع پیوسته در زمان کوتاه شناسایی شوند، به نحوی که عملکرد صحیح سیستم تضمین و از خسارات شدید اقتصادی جلوگیری شود. این سیستم تشخیص و جداسازی خطا با استفاده از شبکه‌های عصبی دینامیکی بازگشتی طراحی می‌شود که توسط آن می‌توان خطاهای به وقوع پیوسته در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، سنسورها و محرک‌های فراز را تشخیص داد. نوآوری‌های این رساله بدین شرح می‌باشند که در آنالیز خطاهای سیستم تبدیل انرژی بادی و طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا برای آن، از یک مدل دینامیکی جامع استفاده می‌شود؛ همچنین جهت جداسازی خطاهای سیستم فراز با سطح آستانه ثابت، استفاده از میانگین سیگنال مانده پیشنهاد می‌شود و سپس برای مقاومسازی طرح، سطح آستانه تطبیقی فازی ارائه می‌گردد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای سطوح آستانه ثابت، تطبیقی و تطبیقی فازی نشان‌دهنده آن است که استفاده از سطح آستانه تطبیقی فازی موجب کاهش تعداد هشدارهای اشتباه و از دست رفته می‌شود. در نهایت با استفاده از سیستم تشخیص و جداسازی خطای عصبی-فازی، پیشنهاد می‌شود که کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطای فعال جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی شود. این سیستم کنترل، شامل بلوک‌های اصلاح سیگنال خطادار و بانکی از کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. استفاده از طرح پیشنهادی منجر به دریافت توان بیشتر و افزایش سطح عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام بروز خطا در

سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور می‌شود. از طرح ارائه شده در این رساله می‌توان برای شناسایی خطاهای  
در سایر قسمت‌های سیستم نیز استفاده کرد.

واژگان کلیدی: سیستم تبدیل انرژی بادی، مدل‌سازی دینامیکی، سیستم تشخیص و جداسازی خطاهای شبکه‌های عصبی بازگشتی، سیستم کنترل تحمل پذیر خطاهای.

## لیست مقالات مستخرج از رساله

لیست مقالات منتشر شده در مجلات:

[۱] تشخیص و جداسازی خطای در سیستم تبدیل انرژی بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی بازگشتی، سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق، پذیرفته شده و در حال چاپ.

[۲] *Fault detection of wind energy conversion systems using recurrent neural networks*, International Journal of Sustainable Energy, 2014, DOI: 10.1080/14786451.2013.876025.

[۳] *Dynamic Response of Wind Energy Conversion Systems under Various Faults*, International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, Article in Press.

[۴] *Robust Fault Detection of Wind Energy Conversion Systems Based on Dynamic Neural Networks*, Computational Intelligence and Neuroscience, Volume 2014, Article ID 580972, DOI:10.1155/2014/580972.

لیست مقالات کنفرانسی:

[۱] پاسخ دینامیکی سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام بروز انواع خطاها، نخستین کنفرانس ملی انجمان انرژی ایران، تهران، پژوهشگاه نیرو، مهر ماه ۱۳۹۲.

[۲] تشخیص و جداسازی هوشمند خطاها به وقوع پیوسته در سیستم تبدیل انرژی بادی، دومین کنفرانس انرژی بادی ایران، تهران، وزارت نیرو، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.

## فهرست مطالب

|    |  |
|----|--|
| ۵  | تشکر و قدردانی                               |
| ز  | چکیده  |
| ط  | لیست مقالات مستخرج از رساله                  |
| ی  | فهرست مطالب                                  |
| ن  | فهرست اشکال                                  |
| ق  | فهرست جداول                                  |
| ۱  | فصل اول: مقدمه                               |
| ۱۹ | فصل دوم: مدل دینامیکی سیستم تبدیل انرژی بادی |
| ۲۱ | ۱-۲ مقدمه                                    |
| ۲۲ | ۲-۲ مدل باد                                  |
| ۲۶ | ۳-۲ مدل قسمت‌های ایرودینامیکی                |
| ۳۲ | ۴-۲ مدل قسمت‌های درایو                       |
| ۳۳ | ۵-۲ مدل برج                                  |
| ۳۴ | ۶-۲ مدل سیستم فراز                           |
| ۳۵ | ۷-۲ مدل ژنراتور                              |
| ۳۸ | ۸-۲ مدل کانورتر قدرت                         |
| ۳۸ | ۱-۸-۲ مبدل سمت روتور                         |

|    |  |
|----|--|
| ۳۹ | ۲-۸-۲ مبدل سمت شبکه و خازن لینک جریان مستقیم                     |
| ۴۰ | ۹-۲ سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی                              |
| ۴۳ | ۱-۹-۲ کنترل مبدل سمت روتور                                       |
| ۴۶ | ۲-۹-۲ کنترل مبدل سمت شبکه  |
| ۴۷ | ۳-۹-۲ کنترل زاویه فراز   |
| ۴۸ | ۱۰-۲ دینامیک‌های چشم‌پوشی شده در مدل‌سازی                        |
| ۴۹ | ۱۱-۲ سنسورهای موجود در سیستم تبدیل انرژی بادی                    |
| ۴۹ | ۱۲-۲ دسته‌بندی انواع خطاهای امکان‌پذیر در سیستم تبدیل انرژی بادی |
| ۵۲ | ۱۳-۲ خصوصیات و مدل‌سازی خطاهای                                   |
| ۵۲ | ۱۳-۲ خطای سنسور فراز   |
| ۵۳ | ۲-۱۳-۲ خطای محرک فراز  |
| ۵۳ | ۱-۲-۱۳-۲ مدل‌سازی پوسیدگی پمپ هیدرولیکی                          |
| ۵۴ | ۲-۲-۱۳-۲ مدل‌سازی نشت هیدرولیک                                   |
| ۵۵ | ۳-۲-۱۳-۲ مدل‌سازی حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک                 |
| ۵۵ | ۳-۱۳-۲ خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور                          |
| ۵۵ | ۱-۳-۱۳-۲ خطای تناسبی در خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور        |
| ۵۶ | ۲-۳-۱۳-۲ خروجی ثابت از سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور               |
| ۵۶ | ۱۴-۲ شبیه‌سازی عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در شرایط مختلف      |
| ۵۶ | ۱-۱۴-۲ شبیه‌سازی عملکرد نرمال سیستم تبدیل انرژی بادی             |

|     |   |
|-----|---|
| ۶۳  | ۲-۱۴-۲ شبیه‌سازی عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام وقوع خطا    |
| ۶۵  | ۱-۲-۱۴-۲ اتصال کوتاه سه فاز به زمین در شبکه قدرت                    |
| ۶۵  | ۲-۲-۱۴-۲ اتصال کوتاه خازن لینک جریان مستقیم                         |
| ۶۸  | ۳-۲-۱۴-۲ خطای تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور                 |
| ۶۸  | ۴-۲-۱۴-۲ خطای بایاس در سنسور فراز                                   |
| ۷۱  | ۵-۲-۱۴-۲ بروز خطا در محرک فراز                                      |
| ۷۱  | ۳-۱۴-۲ بحث پیرامون نتایج شبیه‌سازی                                  |
| ۷۵  | <b>فصل سوم: طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا</b>                     |
| ۷۷  | ۱-۳ مقدمه   |
| ۷۸  | ۲-۳ طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا                                 |
| ۹۳  | ۳-۳ تغییر ساختار بلوک ارزیابی مانده جهت مقاومسازی طرح               |
| ۹۵  | ۱-۳-۳ روش اول برای تولید سطح آستانه تطبیقی                          |
| ۹۶  | ۲-۳-۳ استفاده از منطق فازی برای تولید سطح آستانه تطبیقی             |
| ۱۰۱ | ۴-۳ بررسی عملکرد کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطا پیشنهادی             |
| ۱۰۳ | <b>فصل چهارم: سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا</b>                         |
| ۱۰۵ | ۱-۴ مقدمه   |
| ۱۰۷ | ۲-۴ سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا با اصلاح سیگнал خطadar                |
| ۱۱۳ | ۳-۴ سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا با استفاده از بانکی از کنترل‌کننده‌ها |
| ۱۱۷ | <b>نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>                                       |

|   |     |
|---|-----|
| پیوست: سیستم‌های تشخیص خطأ مبتنی بر شبکه‌های عصبی     | ۱۲۳ |
| پ-۱ مقدمه   | ۱۲۵ |
| پ-۲ شبکه‌های عصبی پیش‌خورد چند لایه                   | ۱۲۶ |
| پ-۳ شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی                 | ۱۲۹ |
| پ-۴ شبکه‌های عصبی دینامیکی                            | ۱۳۱ |
| پ-۴-۱ شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های خارجی              | ۱۳۲ |
| پ-۴-۲ شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های داخلی              | ۱۳۳ |
| پ-۴-۲-۱ شبکه‌های بازگشتی کامل                         | ۱۳۳ |
| پ-۴-۲-۲ شبکه‌های بازگشتی جزئی                         | ۱۳۴ |
| پ-۴-۲-۳ شبکه‌های فضای حالت                            | ۱۳۶ |
| پ-۴-۴ شبکه‌های بازگشتی محلی                           | ۱۳۸ |
| پ-۵ مدل شبکه عصبی دینامیکی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود | ۱۴۲ |
| پ-۶ معیارهای انتخاب ساختار مناسب برای شبکه‌های عصبی   | ۱۴۹ |
| پ-۷ کاربرد شبکه‌های عصبی دینامیکی در تشخیص خطأ        | ۱۵۰ |
| مراجع   | ۱۵۳ |

## فهرست اشکال

|   |    |
|---|----|
| شکل (۱-۱) انواع توربین‌های بادی.  | ۵  |
| شکل (۲-۱) اجزای اصلی توربین بادی محور-افقی.                                       | ۵  |
| شکل (۳-۱) ساختارهای مختلف اتصال ژنراتور القایی به شبکه.                           | ۷  |
| شکل (۴-۱) نمایش افزونگی تحلیلی و افزونگی سخت‌افزار.                               | ۱۲ |
| شکل (۱-۲) ارتباط بین زیرسیستم‌های مربوط به مدل‌سازی سیستم تبدیل انرژی بادی.       | ۲۱ |
| شکل (۲-۲) نمای روتور و توربین بادی.   | ۲۳ |
| شکل (۳-۲) بلوك دياگرام ساختار کلي مدل باد.  | ۲۵ |
| شکل (۴-۲) خروجی‌های مدل باد برای سرعت متوسط ۱۶ متر بر ثانیه و در سرعت ثابت روتور. | ۲۷ |
| شکل (۵-۲) صفحه روتور عمود بر مسیر حرکت باد.                                       | ۲۸ |
| شکل (۶-۲) نیروهای ایرودینامیکی عمل‌کننده بر روی پره‌ها.                           | ۲۸ |
| شکل (۷-۲) ضرایب $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ و $C_i(\lambda(t), \beta(t))$ .       | ۳۱ |
| شکل (۸-۲) نمایش قسمت‌های درایو.   | ۳۲ |
| شکل (۹-۲) نمایش حرکت برج.   | ۳۴ |
| شکل (۱۰-۲) سیستم فراز هیدرولیکی شامل سه محرک فراز.                                | ۳۵ |
| شکل (۱۱-۲) مبدل قدرت در توربین بادی همراه با ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه.        | ۳۸ |
| شکل (۱۲-۲) نحوه اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه.                                      | ۴۰ |
| شکل (۱۳-۲) منحنی نواحی عملیاتی توربین‌های بادی.                                   | ۴۱ |

|          |  |
|----------|--|
| ..... ۴۵ | شکل (۱۴-۲) بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت روتور.  |
| ..... ۴۷ | شکل (۱۵-۲) بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت شبکه.   |
| ..... ۴۷ | شکل (۱۶-۲) کنترل کننده فراز.   |
| ..... ۵۸ | شکل (۱۷-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال.  |
| ..... ۵۹ | شکل (۱۸-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال.  |
| ..... ۶۰ | شکل (۱۹-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال.  |
| ..... ۶۱ | شکل (۲۰-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نرمال.   |
| ..... ۶۲ | شکل (۲۱-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نرمال.   |
| ..... ۶۴ | شکل (۲۲-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد میانگین ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نرمال با تغییر توان راکتیو ورودی.                      |
| ..... ۶۶ | شکل (۲۳-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم قدرت.   |
| ..... ۶۷ | شکل (۲۴-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز اتصال کوتاه در خازن لینک جریان مستقیم.  |
| ..... ۶۹ | شکل (۲۵-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز خطای تناسی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور.  |
| ..... ۷۰ | شکل (۲۶-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز خطای بایاس در سنسور فراز پره ۱.   |
| ..... ۷۲ | شکل (۲۷-۲) زوایای فراز پره‌ها برای سرعت باد متوسط ۱۲ متر بر ثانیه در هنگام بروز خطای در محرك فراز پره ۱.                         |
| ..... ۸۰ | شکل (۱-۳) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و تحت شرایط نرمال.   |
| ..... ۸۲ | شکل (۲-۳) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و در هنگام وقوع خطای تناسی ناگهانی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور. |

|   |    |
|---|----|
| شکل (۳-۳) سیگنال مانده سرعت زاویه‌ای ژنراتور برای سرعت باد متوسط ۱۲ متر بر ثانیه و در هنگام<br>وقوع خطای تناسبی نرم در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور. | ۸۳ |
| شکل (۴-۳) سیگنال مانده سرعت زاویه‌ای ژنراتور برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه و در هنگام<br>وقوع خطای خروجی ثابت در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور.  | ۸۳ |
| شکل (۵-۳) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و تحت شرایط نرمال   | ۸۵ |
| شکل (۶-۳) ارزیابی مانده توسط سطح آستانه برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط<br>وقوع هر سه دسته خطأ در سیستم فراز.                          | ۸۶ |
| شکل (۷-۳) میانگین مانده در طول بازه‌های زمانی ده ثانیه در هنگام وقوع هر سه دسته خطأ در<br>سیستم فراز پره ۱.   | ۸۷ |
| شکل (۸-۳) سیگنال‌های مانده در هنگام بروز سه دسته خطأ در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و<br>سنسور و محرک فراز.   | ۸۹ |
| شکل (۹-۳) سیگنال‌های حاصل شده از ارزیابی مانده سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور تحت خطاهای<br>به وقوع پیوسته طبق جدول (۳-۳).                             | ۹۱ |
| شکل (۱۰-۳) سیگنال‌های حاصل شده از ارزیابی مانده سیستم فراز پره ۱ تحت خطاهای به وقوع<br>پیوسته طبق جدول (۳-۳).                                       | ۹۲ |
| شکل (۱۱-۳) توان راکتیو تولید شده در تست جامع ۱.   | ۹۲ |
| شکل (۱۲-۳) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطأ در هنگام تغییر توان راکتیو ورودی<br>برای تست جامع ۱.  | ۹۳ |
| شکل (۱۳-۳) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطأ به همراه سطح آستانه تطبیقی روش<br>اول در هنگام بروز سه دسته خطأ در سیستم فراز پره ۱.              | ۹۶ |

|  |     |
|--|-----|
| ..... شکل (۱۴-۳) سیستم فازی پیشنهادی.  | ۹۸  |
| ..... شکل (۱۵-۳) توابع تعلق ورودی‌ها و جدول قوانین.  | ۹۸  |
| ..... شکل (۱۶-۳) خروجی سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی-عصبی پیشنهادی در شرایط وقوع سه نوع خطا در سیستم فراز پره ۱.                   | ۹۹  |
| ..... شکل (۱۷-۳) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی به همراه سطح آستانه فازی در شرایط وقوع سه نوع خطا در سیستم فراز پره ۱. | ۱۰۰ |
| ..... شکل (۱-۴) تغییر ساختار کنترل کننده با استفاده از سوئیچینگ منطقی.   | ۱۰۸ |
| ..... شکل (۲-۴) ساختار کلی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا با اصلاح سیگنال خطدار.  | ۱۰۹ |
| ..... شکل (۳-۴) نتایج شبیه‌سازی به همراه سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا.  | ۱۱۰ |
| ..... شکل (۴-۴) مقایسه توان تولید شده توسط توربین بادی در سه حالت.   | ۱۱۱ |
| ..... شکل (۵-۴) نتایج شبیه‌سازی به همراه سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا در تست جامع ۱.  | ۱۱۲ |
| ..... شکل (۶-۴) ساختار کلی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی.   | ۱۱۴ |
| ..... شکل (۷-۴) مقایسه توان تولید شده توسط توربین بادی.  | ۱۱۵ |
| ..... شکل (پ-۱) ساختار نرون با $n$ ورودی و یک خروجی.   | ۱۲۷ |
| ..... شکل (پ-۲) عنصر خطی تطبیقی.   | ۱۲۷ |
| ..... شکل (۳-۳) شبکه عصبی پیش‌خورد سه لایه با $n$ ورودی و $m$ خروجی.   | ۱۲۹ |
| ..... شکل (پ-۴) بلوک دیاگرام ساختار یک شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی.  | ۱۳۱ |
| ..... شکل (پ-۵) تحقق راهکار دینامیک‌های خارجی.   | ۱۳۲ |
| ..... شکل (پ-۶) شبکه بازگشتی کامل ویلیامز و زیپسر.   | ۱۳۵ |

|          |  |
|----------|--|
| ۱۳۵..... | شکل (پ-۷) ساختار شبکه بازگشتی المان.   |
| ۱۳۶..... | شکل (پ-۸) ساختار شبکه بازگشتی جردن.  |
| ۱۳۷..... | شکل (پ-۹) ساختار شبکه فضای حالت با یک لایه مخفی.   |
| ۱۴۰..... | شکل (پ-۱۰) (الف) ساختار تعمیم یافته یک واحد نرون دینامیکی و (ب) شبکه عصبی شامل واحدهای دینامیکی. |
| ۱۴۰..... | شکل (پ-۱۱) ساختار مدل با فیدبک فعال‌ساز محلی.  |
| ۱۴۱..... | شکل (پ-۱۲) ساختار مدل با فیدبک سیناپسی محلی.   |
| ۱۴۲..... | شکل (پ-۱۳) ساختار مدل با فیدبک خروجی محلی.   |
| ۱۴۳..... | شکل (پ-۱۴) ساختار نرون دینامیکی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود.                                      |
| ۱۴۴..... | شکل (پ-۱۵) فرم فضای حالت نرون $i$ -ام با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود.                                |
| ۱۴۵..... | شکل (پ-۱۶) ساختار شبکه پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی.   |

## فهرست جداول

|   |     |
|---|-----|
| جدول (۱-۲) محدودیت‌های فیزیکی محرک‌های فراز.....  | ۳۵  |
| جدول (۲-۲) سنسورهای موجود در سیستم تبدیل انرژی بادی.....  | ۴۹  |
| جدول (۳-۲) خطاهایی که امکان ادامه فعالیت توربین بادی در صورت وقوع آن‌ها وجود دارد.....                  | ۵۱  |
| جدول (۴-۲) خطاهایی که در صورت وقوع آن‌ها باید توربین بادی از شبکه خارج شود.....                         | ۵۲  |
| جدول (۵-۲) خصوصیات مربوط به رنج و محدودیت تغییر نرخ خطاهای نرم.....                                     | ۵۴  |
| جدول (۶-۲) پارامترهای مربوط به انواع خطاهای محرک فراز.....  | ۵۴  |
| جدول (۷-۲) پارامترهای سیستم تبدیل انرژی بادی.....   | ۵۷  |
| جدول (۱-۳) نتایج آموزش شبکه عصبی دینامیکی برای داده‌های آموزشی و تست به منظور مدل‌سازی $\omega_g$ ..... | ۷۹  |
| جدول (۲-۳) نتایج آموزش شبکه عصبی دینامیکی برای داده‌های آموزشی و تست به منظور مدل‌سازی $\beta_1$ .....  | ۸۴  |
| جدول (۳-۳) مشخصات خطاهای بازه‌های زمانی اعمال آن‌ها به سیستم تبدیل انرژی بادی در تست جامع ۱.....        | ۹۱  |
| جدول (۴-۳) مقایسه تعداد هشدارهای اشتباه و از دست رفته برای سطوح آستانه ثابت و تطبیقی روش اول.....       | ۹۷  |
| جدول (۵-۳) زمان و محل وقوع خطاهای مختلف در تست جامع ۲.....  | ۱۰۰ |
| جدول (۶-۳) ارزیابی سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی با سطوح آستانه مختلف.....                        | ۱۰۲ |

جدول (پ-۱) الگوریتم آموزش به روش جستجوی تصادفی تطبیقی.....

**فصل اول:**

**مقدمه**



در حال حاضر، به دلیل نگرانی از وابستگی اقتصاد جهانی به انرژی‌های فسیلی و همچنین به دلیل مسائل زیست محیطی، توجه روزافزونی به منابع انرژی الکتریکی ثانویه می‌شود. در میان منابع متنوعی که در بازار انرژی وجود دارد، انرژی بادی شاید یکی از منابع انرژی امیدبخش باشد. باد یک منبع تمیز و پایان ناپذیر است؛ و در سراسر زمین موجود می‌باشد [۱]. انرژی الکتریکی که توسط باد تولید می‌شود، گاز دی اکسید کربن را منتشر نمی‌کند و در نتیجه تأثیری در افزایش گازهای گلخانه‌ای ندارد. در نقاطی که شبکه ضعیف است می‌توان از ترکیب انرژی بادی با ژنراتورهای دیزلی، در هنگام حضور باد، مصرف سوخت فسیلی را کاهش داد. در سایتهاهی تولید انرژی بادی که در مناطق بادخیز هستند، هزینه تولید انرژی الکتریکی با هزینه تولید از طریق روش‌های سنتی، قابل رقابت است [۲].

توربین‌های بادی با توجه به ظرفیت انرژی تولیدی و طرح روتور به کار گرفته شده در آن‌ها، به اندازه‌ها و انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. توربین‌های بادی کوچک با ظرفیت خروجی زیر ۱۰ کیلو وات، عمدها برای منازل، دیش‌های مخابراتی و برای کاربردهای آبیاری و پمپ آب مورد استفاده هستند. توربین‌های بادی با ظرفیت خروجی بالا، در محدوده ۱۰۰ کیلو وات الی ۵ مگا وات، به منظور فراهم کردن انرژی برای ۱۰ الی ۵۰۰ خانه کافی می‌باشند. همچنین توربین‌های با ظرفیت بالاتر وجود دارند که می‌توان از آن‌ها در کاربردهای صنعتی نیز استفاده نمود [۳].

با توجه به گزارش انجمن جهانی انرژی بادی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۰، علیرغم وجود منابع بادی خوب در ایران، بازار انرژی بادی در ایران آن چنان گستردۀ نشده است. با توجه به گزارش‌های سازمان انرژی‌های نو ایران<sup>۲</sup>، پتانسیل انرژی بادی تخمین زده شده در ایران حداقل ۶۵۰۰ مگا وات می‌باشد. در سال ۲۰۱۰، کل ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در ایران، ۹۲ مگا وات بوده است و چهار سایت این ظرفیت را تولید می‌کنند:

---

<sup>۱</sup> Global Wind Energy Council (GWEC)

<sup>۲</sup> Iran Renewable Energy Organization (SUNA)

- مزرعه بادی منجیل: ۶۲/۰۸ MW
- مزرعه بادی بینالود: ۲۸/۳۸ MW
- سایت بادی تبریز: ۰/۶۶ MW
- سایت بادی زابل: ۰/۶۶ MW [۴].

دو پیکربندی برای توربین‌های بادی پیشرفته، بر اساس اصول عملکرد روتور وجود دارد: توربین‌های بادی محور-افقی<sup>۱</sup> و توربین‌های بادی محور-عمودی<sup>۲</sup>. در شکل (۱-۱) این دو نوع توربین بادی نشان داده شده‌اند. توربین‌های بادی محور-افقی با دو یا سه پره<sup>۳</sup> معمول‌ترین نوع توربین هستند [۳]. اجزای اصلی توربین بادی و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر در شکل (۲-۱) آورده شده است [۱-۳، ۷]. نحوه عملکرد هر یک از اجزای شکل (۲-۱) به طور مختصر به صورت زیر می‌باشد:

- بادسنج<sup>۴</sup>: برای اندازه‌گیری سرعت باد به کار می‌رود. توربین بادی هنگامی آغاز به کار می‌کند که سرعت باد به حد پائینی برسد و هنگامی سرعت باد از حد بالایی بیشتر شود، توربین متوقف می‌شود.
- باد نما<sup>۵</sup>: جهت وزش باد را مشخص می‌کند.
- برج<sup>۶</sup>: نگه دارنده تمامی اجزاء توربین است. از آنجائی که با افزایش ارتفاع، سرعت باد بیشتر می‌شود، برج‌های بلندتر منجر به افزایش تولید انرژی الکتریکی توسط توربین بادی می‌شوند.
- ترمز: برای توقف توربین استفاده می‌شود. می‌توان از ترمزهای مکانیکی، الکتریکی و یا هیدرولیکی استفاده نمود.

<sup>۱</sup> Horizontal-Axis Wind Turbines (HAWT)

<sup>۲</sup> Vertical-Axis Wind Turbines (VAWT)

<sup>۳</sup> Blade

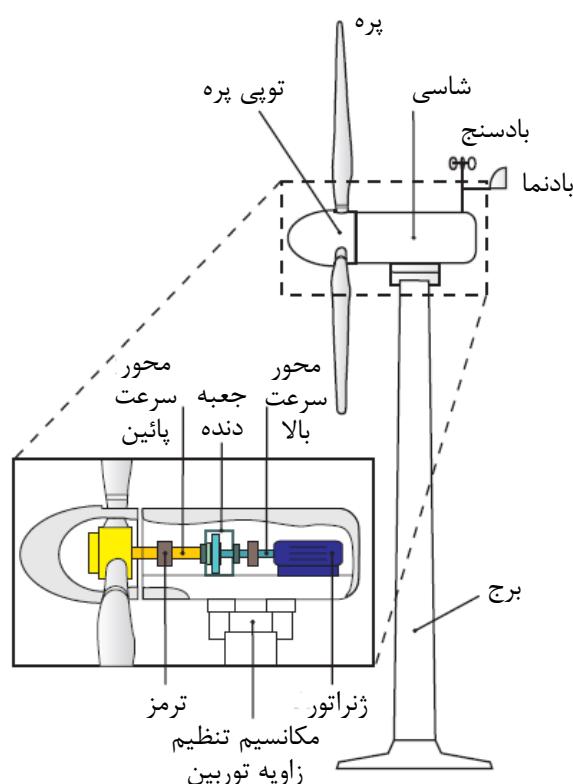
<sup>۴</sup> Anemometer

<sup>۵</sup> Wind Vane

<sup>۶</sup> Tower



شکل (۱-۱) انواع توربین‌های بادی: (الف) محور افقی [۵] و (ب) محور عمودی [۶].



شکل (۲-۱) اجزای اصلی توربین بادی محور-افقی [۷].

- توپی<sup>۱</sup> و پره<sup>۲</sup>: این دو قطعه، روتور توربین بادی را تشکیل می‌دهند. توپی پره، پره‌های روتور را به محور سرعت پائین<sup>۳</sup> متصل می‌کند. تنظیم زاویه فراز<sup>۳</sup> پره‌ها باعث افزایش راندمان

<sup>1</sup> Hub

<sup>2</sup> Low-Speed Shaft

<sup>3</sup> Pitch Angle

در سرعت‌های پائین باد و کاهش راندمان در سرعت‌های زیاد باد (برای محافظت توربین بادی

از صدمات وارد شونده به بدنه آن) می‌شود.

- جعبه دنده<sup>۱</sup>: برای اتصال محور سرعت پائین و محور سرعت بالا استفاده می‌شود و سرعت

دورانی را افزایش می‌دهد تا به سطح مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی توسط ژنراتور

برسد.

- ژنراتور: انرژی دورانی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.

- شاسی<sup>۲</sup>: در بالای برج قرار دارد و قطعات جعبه دنده، محورهای سرعت پائین و سرعت بالا،

ژنراتور و ترمزاها را نگه می‌دارد.

- محور سرعت بالا: ژنراتور را به حرکت در می‌آورد.

- محور سرعت پائین: روتور را به جعبه دنده متصل می‌کند.

- مکانیسم تنظیم زاویه توربین<sup>۳</sup>: با توجه به اطلاعات بادنما و با استفاده از موتورهای الکتریکی،

روتور توربین بادی را در جهت عمود بر مسیر وزش باد تنظیم می‌کند.

ژنراتورهای القایی پرکاربردترین ماشین‌ها در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی<sup>۴</sup> هستند. اگرچه

ژنراتورهای سنکرون را نیز می‌توان در آن‌ها به کار گرفت، ژنراتورهای القایی، بازار را برای توربین‌های

بادی تسخیر کرده‌اند. بر مبنای توبولوزی الکتریکی، ژنراتورهای القایی به کار گرفته شده در

توربین‌های بادی را می‌توان به ۳ دسته ژنراتور القایی قفس سنجابی به طور مستقیم کوپل شده<sup>۵</sup>،

ژنراتور القایی قفس سنجابی استاتور-کنترل شده<sup>۶</sup> و ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه روتور-کنترل شده<sup>۷</sup>

تقسیم کرد؛ که این ساختارها در شکل (۱-۳) نشان داده شده‌اند [۱].

<sup>1</sup> Gearbox

<sup>2</sup> Nacelle

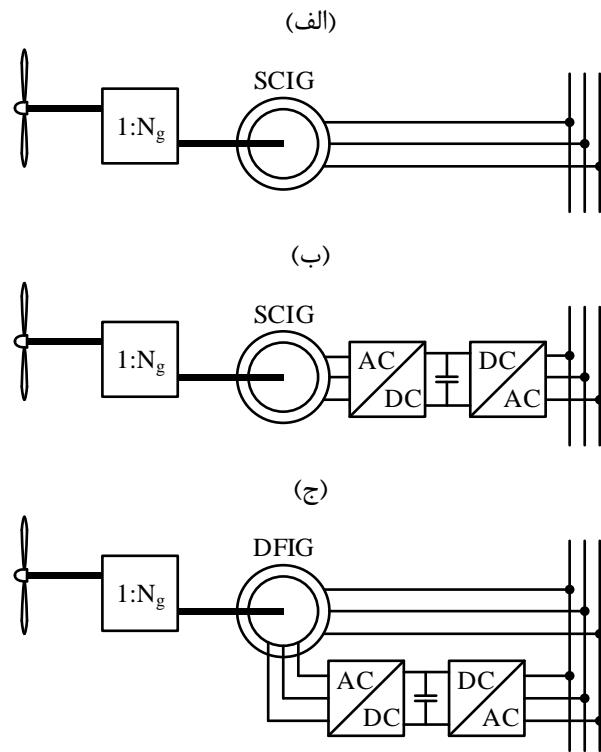
<sup>3</sup> Yaw Mechanism

<sup>4</sup> Wind Energy Conversion Systems

<sup>5</sup> Directly Coupled Squirrel-cage Induction Generator

<sup>6</sup> Stator Controlled Squirrel-cage Induction Generator

<sup>7</sup> Rotor Controlled Squirrel-cage Induction Generator



شکل (۱-۳) ساختارهای مختلف اتصال ژنراتور القایی به شبکه: (الف) ژنراتور القایی قفس سنجابی به طور مستقیم کوپل شده، (ب) ژنراتور القایی قفس سنجابی استاتور-کنترل شده و (ج) ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه روتور-کنترل شده.

شکل (۱-۳-الف) نشان‌دهنده ساده‌ترین آرایش شامل یک ماشین القایی قفس سنجابی استاندارد می‌باشد که به صورت مستقیم به شبکه جریان متناوب<sup>۱</sup> متصل شده است. در شکل (۱-۳-ب) از یک مبدل فرکانسی نرخ-کامل<sup>۲</sup> به عنوان رابط بین ماشین القایی قفس سنجابی و شبکه بهره گرفته شده است. همچنین شکل (۱-۳-ج) نشان‌دهنده ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه با اتصال مستقیم سیم‌پیچ استاتور به شبکه و اتصال روتور به آن از طریق یک مبدل کانورتر پشت-به-پشت مقیاس جزئی<sup>۳</sup> می‌باشد. اکثر توربین‌های بادی مدرن بر مبنای این آرایش به همراه مبدل فرکانس مدولاسیون پهنه‌ای پالس<sup>۴</sup> به عنوان رابط بین سیم‌پیچ‌های روتور و شبکه جریان متناوب عمل می‌کنند. این طرح کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو را امکان‌پذیر می‌سازد [۱۰-۸].

<sup>۱</sup> AC

<sup>۲</sup> Fully-Rated Frequency Converter

<sup>۳</sup> Partial Scale Back-to-Back Converter

<sup>۴</sup> Pulse Width Modulation

برای بررسی عملکرد سیستم‌های تبدیل انرژی بادی تحت شرایط عملکرد مختلف، نیاز است که از یک مدل دقیق استفاده شود. در مدل‌هایی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند، یا از مدل‌سازی بخش‌های مکانیکی صرف‌نظر شده است و یا مدل‌سازی قسمت‌های الکتریکی مد نظر قرار نگرفته است. به عنوان مثال در [۸] از مدل‌سازی سیستم فراز و برج صرف‌نظر شده است و همچنین باد به صورت دقیق مدل نشده است، در صورتی که مدل‌سازی قسمت‌های الکتریکی به طور کامل انجام شده است. در [۱۱] اثر انحراف ناگهانی مسیر باد و اثر برج بر روی گشتاور ایروودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹]، [۲۰-۲۱] مدل‌سازی بخش‌های الکتریکی مد نظر قرار گرفته شده است و مدل‌سازی قسمت‌های مکانیکی ناقص انجام پذیرفته است. در [۲۵-۲۱] مدل‌سازی قسمت‌های مکانیکی مورد توجه قرار گرفته شده است، در حالی که مدل کامل قسمت‌های الکتریکی در نظر گرفته نشده است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام گرفته شده تاکنون، نمی‌توان وقوع خطای در نقاط مختلف سیستم مورد بررسی قرار داد و به بررسی و آنالیز نحوه انتشار خطای و اثرباری آن در نقاط مختلف سیستم تبدیل انرژی بادی پرداخت. پس مدلی نیاز است که هم بخش‌های الکتریکی و هم بخش‌های مکانیکی را تا حد مناسبی پوشش دهد، که با استفاده از این مدل بتوان اثر خطاها را در نقاط مختلف سیستم مشاهده کرد و به بررسی و شناسایی آن‌ها پرداخت.

در حال حاضر اقتصاد و زندگی روزمره به شبکه توزیع قدرت و سیستم‌های حمل و نقل وابسته است به طوری که بروز خطای در هر یک از اجزاء آن‌ها باعث اختلال در عملکرد کل سیستم خواهد شد. به طور کلی خطای پدیده‌ای است که رفتار یک سیستم را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که سیستم دیگر قادر به انجام اهداف و وظایف خود نباشد [۲۶]. قابلیت اطمینان برای هر طرح، یکی از ویژگی‌های بسیار مهم آن می‌باشد که این امر را می‌توان با از بین بردن ضعف‌ها و خطای ای به وقوع پیوسته قبلی تضمین نمود. یکی از روش‌های دستیابی به قابلیت اطمینان، پیاده‌سازی سیستم‌های مونیتورینگ

شرایط<sup>۱</sup> و تشخیص و جداسازی خطأ<sup>۲</sup> می‌باشد. اخیراً مسئله تشخیص خطأ برای کاربردهای صنعتی، یعنی در کاربردهایی که جان افراد در معرض خطر نیست، از اهمیت بالایی برخوردار شده است. در این گونه سیستم‌ها مسائل اقتصادی و رضایت کاربران مهم است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به ماشین‌های الکتریکی [۲۷]، سیستم‌های قدرت [۲۸]، سیستم‌های تهویه ساختمان، سیستم‌های حمل و نقل و اتومبیل‌ها [۲۹] و سیستم تبدیل انرژی بادی [۷]، [۲۴-۲۱]، [۳۰-۳۶] اشاره نمود.

در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی، بسیاری از خطاهای می‌توانند شناسایی شوند در حالی که جزء معیوب همچنان به کار خود ادامه می‌دهد. بنابراین عملیات تعمیر می‌تواند در زمان مقرر انجام شود بی‌آن که نیاز به اقدام فوری باشد و این حقیقت برای نیروگاه‌های دور از کرانه اهمیت فوق العاده‌ای دارد زیرا شرایط بد (از قبیل طوفان) می‌تواند هر عملیات تعمیر را برای چندین هفته به تأخیر بیاندازد [۳۷، ۳۸]. با سیستم تشخیص و جداسازی خطأ می‌توان یک سیستم را اغلب اوقات پیش از زمانی که عنصر معیوب خساراتی را وارد کند، تعمیر کرد. مشخص است که این موارد در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی نیز بسیار مورد توجه هستند. پیاده‌سازی سیستم تشخیص و جداسازی خطأ اگرچه در ابتدای امر به سرمایه‌گذاری نیاز دارد، اما تولید مداوم انرژی بدون هیچ‌گونه قطعی، هزینه سرمایه‌گذاری ابتدایی را جبران خواهد نمود. مزارع بادی به دلیل محل قرارگیری دور از دسترس‌شان بیشتر از مزایای چنین سیستمی بهره می‌برند زیرا هزینه‌های بسیار زیادی برای حمل و نقل به این مکان‌ها باید پرداخته شود. کشورهایی که تجهیزات حمل و نقل ضعیفی برای دسترسی به مزارع و توربین‌های بادی دارند، باید از سیستم تشخیص و جداسازی خطأ استفاده کنند تا از قطع انرژی و هزینه‌های فراوان نگهداری و حمل و نقل جلوگیری کنند [۳۷].

آمار خطای سیستم تبدیل انرژی بادی از «برنامه ارزیابی و اندازه‌گیری علمی<sup>۳</sup>» در آلمان نشان می‌دهد می‌دهد که در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ حدود ۲۵ درصد تعداد کل ۵۵۰۰ عملیات تعمیر، بر اثر خطأ

---

<sup>۱</sup> Condition Monitoring Systems

<sup>۲</sup> Fault Detection and Isolation Systems

<sup>۳</sup> Scientific Measurement and Evaluation Program

و پوسیدگی اجزاء بوده است. از آن جایی که جایگزین کردن اجزاء اصلی یک سیستم تبدیل انرژی بادی امری سخت و پر هزینه است، راهکارهای نگهداری پیشرفته می‌توانند منجر به کاهش هزینه‌ها شوند. بنابراین یک سیستم تشخیص و جداسازی خطای توربین‌های بادی دارای مزایای زیر می‌باشد [۳۷]:

۱- جلوگیری از خرابی زودرس: یک وجه بسیار مهم تشخیص خطای جلوگیری از خطاهای فاجعه آفرین<sup>۱</sup> و نقص‌های ثانویه<sup>۲</sup> است. برای مثال، تشخیص دیرهنگام خطای یاطاقان روتور<sup>۳</sup> ممکن است در بدترین حالت منجر به خرابی کامل سیستم‌های تبدیل انرژی بادی شود.

۲- کاهش هزینه‌های نگهداری: با مونیتورینگ شرایط توربین بادی، فواصل بازرگانی و بازبینی را می‌توان افزایش داد. توسط روش نگهداری بر مبنای شرایط، از جایگزین کردن قطعات سالم جلوگیری می‌شود.

۳- نظارت بر سایت‌های دور افتاده: توربین‌های بادی بزرگ به طور معمول در نواحی دور افتاده ساخته می‌شوند. با سیستم‌های مونیتورینگ شرایط و سیستم تشخیص و جداسازی خطای آنلاین می‌توان خطاهای را در مراحل ابتدائی وقوع، تشخیص داد و توسط مودم، هشدار و جزئیات مربوط به خطای را به مرکز نگهداری ارسال نمود.

۴- بهبود فاکتور ظرفیت<sup>۴</sup>: با اعلام زودهنگام وقوع خطای عملیات تعمیر فوری نیاز نخواهد بود، بلکه عملیات تعمیر را می‌توان در زمانی که سرعت باد کم است و در نتیجه سیستم‌های تبدیل انرژی بادی در حالت آفلاین قرار دارد، انجام داد.

۵- پشتیبانی از پیشرفت بیشتر سیستم‌های تبدیل انرژی بادی: با استفاده از سیستم تشخیص و جداسازی خطای اطلاعات همراه با جزئیات از رفتارهای دینامیکی توربین بادی طی دوره‌های

<sup>1</sup> Catastrophic Failures

<sup>2</sup> Secondary Defects

<sup>3</sup> Rotor-Bearing Fault

<sup>4</sup> Improvement of the Capacity Factor

طولانی مدت به دست می‌آید. این اطلاعات می‌توانند برای بهینه‌سازی طراحی توربین‌های

بادی مورد استفاده قرار بگیرند.

خطاهایی از قبیل نامتعادلی، فرسودگی و ترک خوردن قریب‌الوقوع در پره‌های روتور، یا اطاقان‌ها، محورها، جعبه دنده، ژنراتور، مکانیسم تنظیم زاویه توربین و سیستم فراز و همچنین خطاهای مربوط به سنسورهای موجود در توربین‌های بادی، در سیستم تشخیص و جداسازی خطا مورد توجه قرار می‌گیرند. مفاهیم تشخیص خطا و مونیتورینگ آنلاین در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی، مفاهیم نسبتاً جدیدی هستند که در مقایسه وسیعی در حال گسترش می‌باشند.

به طور کلی روش‌های تشخیص خطا را می‌توان به دو دسته تشخیص خطا بر مبنای افزونگی سخت‌افزار<sup>۱</sup> و تشخیص خطا بر مبنای افزونگی تحلیلی<sup>۲</sup> تقسیم کرد [۳۹]. راهکار اصلی در افزونگی سخت‌افزار مقایسه سیگنال‌هایی است که توسط سخت‌افزارهای مختلف تولید شده است، از قبیل اندازه‌گیری یک سیگنال توسط دو و یا چند سنسور. تکنیک‌های اصلی که در روش افزونگی سخت‌افزار استفاده می‌شود، روش بازبینی سلسله مراتب تقاطعی<sup>۳</sup>، تولید مانده با استفاده از تولید برابری<sup>۴</sup> و روش‌های تجزیه و تحلیل سیگنال می‌باشند.

از طرف دیگر افزونگی تحلیلی از مدل ریاضی سیستم به همراه برخی تکنیک‌های تخمین برای تشخیص خطا استفاده می‌کند. از آنجائی که افزونگی تحلیلی نیازی به سخت‌افزار اضافه ندارد، معمولاً این روش نسبت به افزونگی سخت‌افزار هزینه کمتری را در پی خواهد داشت. در شکل (۱-۴) روش‌های افزونگی سخت‌افزار و افزونگی تحلیلی نشان داده شده است [۴۰].

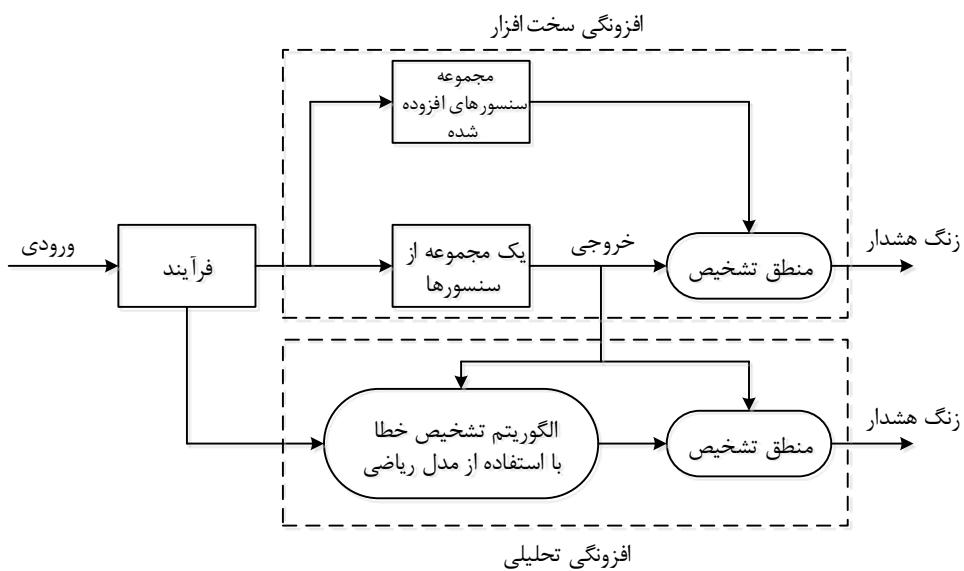
---

<sup>1</sup> Hardware Redundancy (HR)

<sup>2</sup> Analytical Redundancy(AR)

<sup>3</sup> Cross Channel Monitoring (CCM) Method

<sup>4</sup> Residual Generation Using Parity Generation



شکل (۴-۱) نمایش افزونگی تحلیلی و افزونگی سخت‌افزار.

همچنین روش افزونگی تحلیلی را می‌توان به روش‌های مبتنی بر مدل کمی<sup>۱</sup> و روش‌های مبتنی بر مدل کیفی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر مدل کمی، از قبیل روش‌های مبتنی بر رؤیت‌گر<sup>۳</sup>، از مدل‌های ریاضی صریح و تئوری کنترل برای تولید مانده‌ها در سیستم تشخیص و جداسازی خطای ریاضی می‌برند. در صورتی که روش‌های مبتنی بر مدل کمی از تکنیک‌های هوش مصنوعی<sup>۴</sup>، برای به دست آوردن اختلاف بین رفتار مشاهده شده و رفتار پیش‌بینی شده توسط مدل، استفاده می‌کنند [۴۰]. دو گام اصلی برای تشخیص خطای موفق در روش‌های مبتنی بر مدل به صورت زیر می‌باشد [۴۱]:

۱- تولید مانده<sup>۵</sup>: تولید کننده مانده از اطلاعات موجود و در دسترس ورودی و خروجی فرآیند استفاده می‌کند تا سیگنال مشخص کننده وجود خطای تولید کند (مانده). در حالت عادی یعنی زمانی که خطایی در سیستم وجود ندارد، مانده صفر و یا نزدیک صفر است. اما زمانی که خطایی بروز می‌دهد، مانده مخالف صفر می‌شود.

<sup>1</sup> Quantitative Model-Based Methods<sup>2</sup> Qualitative Model-Based Methods<sup>3</sup> Observer-Based Methods<sup>4</sup> Artificial Intelligence (AI) Techniques<sup>5</sup> Residual Generation

۲- ارزیابی مانده (تصمیم‌گیری): مانده‌هایی که توسط تولیدکننده مانده به دست آمداند، برای پی بردن به حضور خطا مورد آزمایش قرار می‌گیرند. پروسه ارزیابی ممکن است شامل یک آزمایش حد آستانه ساده باشد و یا روش‌های پیچیده‌تری به کار گرفته شود.

اکثر تحقیق‌هایی که در زمینه تشخیص خطای مبتنی بر مدل انجام می‌شود بر روی مسئله تولید مانده می‌باشد. نکته مهمی که لازم است بدان اشاره شود این است که باید مانده‌ها فقط به خطاهای حساس باشند (در واقع باید به ورودی‌های نامعلوم از قبیل اغتشاش و نویز اندازه‌گیری غیرحساس باشند) [۴۱]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه روش‌های مبتنی بر مدل کمی [۴۰-۴۴] و روش‌های مبتنی بر مدل کیفی [۴۵-۵۱] انجام شده است. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

۱- روش‌های شناسایی سیستم؛ این روش‌ها مبتنی بر مدل هستند. در این روش‌ها اندازه‌گیری‌های انجام شده از ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم وارد قسمت شناسایی پارامترهای سیستم می‌شوند و این قسمت تخمینی از پارامترهای مورد نظر سیستم در اختیار قرار می‌دهد. با مقایسه مقادیر تخمین زده شده و مقادیر نامی، سیگنال‌های مانده تولید می‌شوند.

۲- روش‌های مبتنی بر رؤیت‌گر؛ دسته وسیعی از تولیدکننده‌های مانده، رؤیت‌گرها هستند. ایده کلی در این روش‌ها استفاده از رؤیت‌گر برای تخمین خروجی فرآیند و سپس مقایسه خروجی تخمین زده با خروجی واقعی است. دو نمونه از این روش‌ها، روش مبتنی بر رؤیت‌گر تمام-حالت و روش رؤیت‌گرهای ورودی نامعلوم می‌باشد. رؤیت‌گر را می‌توان با کاهش حساسیت نسبت به عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاش‌های بیرونی طراحی کرد.

۳- روش‌های تجزیه و تحلیل سیگنال: در این روش‌ها، مانده از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال‌های اندازه‌گیری شده سیستم، مانند روش تجزیه و تحلیل طیفی<sup>۱</sup>، به دست می‌آید. این روش‌ها به طور کلی کندر از روش‌های مبتنی بر مدل عمل می‌کنند، اما می‌توان آن‌ها را به سیستم‌های بسیار پیچیده اعمال کرد، در حالی که نیازی به اطلاعات از سیگنال‌های ورودی ندارند.

۴- روش‌های هوش مصنوعی و سیستم‌های خبره: هنگامی که فرآیند بسیار پیچیده است، دانش کیفی از فرآیند را می‌توان برای ارزیابی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به کار برد. همچنین می‌توان از تکنیک‌های فازی نیز در این راستا استفاده نمود. راهکار دیگر استفاده از شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی فرآیندها می‌باشد. با کمک شبکه عصبی که توسط سیگنال‌های حاصل شده از سیستم مرجع آموزش داده شده است می‌توان سیگنال‌های مانده را همانند روش‌های مبتنی بر مدل تولید نمود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی طی دو دهه گذشته به شدت مورد مطالعه محققان قرار گرفته‌اند و به صورت موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های دینامیکی استفاده شده‌اند [۴۵، ۵۲]. همچنین از آن‌ها برای سیستم‌های تشخیص خطا بهره گرفته شده است [۴۹، ۴۵]. شبکه‌های عصبی ابزار ریاضی خوبی را برای مقابله با مسئله‌های غیرخطی فراهم می‌کنند. از میان ساختارهای فراوانی که برای شبکه‌های عصبی وجود دارد، دو ساختار قابل توجه، ساختارهای پیش‌خورد و بازگشتی هستند. شبکه‌های پیش‌خورد به طور معمول برای اهداف تشخیص الگو به کار گرفته می‌شوند؛ در صورتی که از شبکه‌های بازگشتی برای ساختن مدل دینامیکی فرآیند استفاده می‌شود. از جمله شبکه‌های عصبی که مکاراً در سیستم‌های تشخیص خطا مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند، می‌توان

<sup>1</sup> Spectral Analysis

به شبکه‌های عصبی پیش‌خورد چند لایه، شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی<sup>۱</sup>، شبکه‌های بازگشتی سراسری و شبکه‌های بازگشتی محلی اشاره کرد.

یکی از مزایای شبکه‌های بازگشتی محلی، شبیه بودن ساختار آن به شبکه پیش‌خورد استاتیکی است. در شبکه عصبی دینامیکی، نرون دینامیک جایگزین نرون استاتیک می‌شود. در یک نوع نرون دینامیکی، دینامیک‌ها توسط اعمال یک فیلتر پاسخ ضربه نامحدود<sup>۲</sup> به ساختار نرون ایجاد می‌شوند. چنین شبکه‌ای فیدبک‌های سراسری نخواهد داشت. در واقع این نوع از فیدبک‌ها طرح شبکه و آموزش آن را دشوار می‌سازند. طرح این شبکه‌ها مابین طرح شبکه‌های پیش‌خورد و بازگشتی سراسری قرار دارد. این دسته از شبکه‌های عصبی، شبکه‌های پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند

. [۴۵]

از شبکه‌های عصبی بازگشتی با مدل نرون با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود به طرز موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی، تشخیص خطأ و پیشگوئی سری‌های زمانی بهره گرفته شده است. در [۴۵] و [۵۳] از این شبکه‌ها برای تشخیص خطأ در فرآیند تبخیر سطحی شکر استفاده شده است. همچنین در [۴۵] کاربردهایی برای تشخیص خطأ توسط این شبکه‌ها در سیستم شکافتن محرک سیال<sup>۴</sup> و موتور جریان مستقیم<sup>۵</sup> ارائه شده است. در [۲۷] از این شبکه‌ها برای شناسایی و جداسازی خطای موتورهای القایی بهره گرفته شده است. در [۵۴] نیز با استفاده از این شبکه‌ها، سیستم تشخیص خطایی برای سیستم‌های حفاظتی و مونیتورینگ شبکه قدرت طراحی شده است که قابلیت اطمینان را در شبکه قدرت بالاتر می‌برد. در [۵۵] نیز با ترکیب شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی و مدل نرون با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود شبکه جدیدی ارائه شده است و با استفاده از آن سری‌های زمانی پیشگوئی شده

<sup>1</sup> Radial Basis Function Neural (RBFN) Networks

<sup>2</sup> Infinite Impulse Response (IIR) Filter

<sup>3</sup> Locally Recurrent-Globally Feedforward

<sup>4</sup> Fluid Catalytic Cracking

<sup>5</sup> DC

است. در [۵۶، ۵۷] از این شبکه‌ها برای پیشگوئی سرعت باد و توان در مزارع بادی استفاده شده است.

در [۵۸] نیز از این شبکه‌ها برای تشخیص خطای توربو شارژر<sup>۱</sup> استفاده شده است.

تشخیص و جداسازی خطاهای به وقوع پیوسته در سیستم تبدیل انرژی بادی نیز در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. به عنوان مثال در [۷] و [۲۲] با استفاده از مدل خطی قسمت‌های مکانیکی توربین بادی (از قسمت‌های الکتریکی صرفنظر شده است)، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطای کنترل‌کننده مرجع با استفاده از روش کنترل پارامتر-متغیر خطی<sup>۲</sup> ارائه شده است. در این دو تحقیق، خطاهای به وقوع پیوسته تشخیص داده شده و سپس تغییر ساختار کنترل‌کننده انجام می‌پذیرد. در [۲۱] تشخیص خطای توربین بادی برای مدل خطی قسمت‌های مکانیکی انجام پذیرفته است و تنها وقوع یک خطای مورد بررسی قرار گرفته است. در [۳۰] وقوع خطای در ژنراتور القایی مورد توجه قرار گرفته شده است. در [۳۱] نیز از مدل خطی قسمت‌های مکانیکی برای تشخیص دو دسته خطای با استفاده از فیلتر کالمون، استفاده شده است. در [۳۲] با استفاده از سیستم کنترل با سرپرست و اکتساب داده<sup>۳</sup> خطاهای به وقوع پیوسته در توربین بادی شناسایی شده‌اند. در [۳۳] با استفاده از روش داده-کاوی<sup>۴</sup> خطاهای یاطاقان<sup>۵</sup> تشخیص داده شده‌اند. در [۳۴] با استفاده از اطلاعات عملی از سیستم مونیتورینگ شرایط، خطاهای مربوط به سیستم ترمز توربین بادی شناسایی شده‌اند. در [۳۵] کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطای با استفاده از مشاهده‌گرهای فازی ارائه شده است. در [۲۳] با استفاده از راهکار تعلق-مجموعه<sup>۶</sup> و مدل قسمت‌های مکانیکی خطاهای مختلفی تشخیص داده شده‌اند. در [۲۴] نیز با استفاده از مدل قسمت‌های مکانیکی و روش سطح آستانه مانده بر مبنای شمارنده<sup>۷</sup> خطاهای قسمت‌های مختلف شناسایی شده‌اند.

<sup>1</sup> Turbo-Charger

<sup>2</sup> Linear Parameter-Varying Control

<sup>3</sup> Supervisory Control and Data Acquisition

<sup>4</sup> Data-Mining Approach

<sup>5</sup> Bearing Faults

<sup>6</sup> Set-Membership Approach

<sup>7</sup> Counter-Based Residual Thresholding

همانطور که مشخص است در تحقیق‌هایی که تاکنون ارائه شده است، یا مدل‌سازی سیستم تبدیل انرژی بادی به طور کامل انجام نگرفته است، یا از مدل خطی برای طراحی سیستم تشخیص خطا استفاده شده است، یا تنها بحث تشخیص خطا مورد توجه قرار گرفته شده است و از جداسازی خطاهای صرفنظر شده است و یا کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا طراحی نشده است. واضح است که استفاده از مدل غیرخطی و دقیق‌تر منجر به دریافت نتایج نزدیک‌تر به حالت واقعی خواهد شد. در این تحقیق با استفاده از مدل کامل غیرخطی سیستم تبدیل انرژی بادی (شامل قسمت‌های الکتریکی و مکانیکی)، سیستم تشخیص و جداسازی خطای طراحی می‌شود که قابلیت تشخیص و جداسازی خطاهای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، سنسور و محرک فراز را دارد. طرح ارائه شده از شبکه‌های عصبی دینامیکی بازگشتی محلی به همراه مدل نرون با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود تشکیل یافته است. این شبکه عصبی، در مدل‌سازی دینامیکی سیستم، قابلیت بسیار بالایی دارد. برای جداسازی خطاهای نیز استفاده از سطح آستانه تطبیقی پیشنهاد می‌شود. در نهایت یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا طراحی می‌شود که جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی می‌گردد.

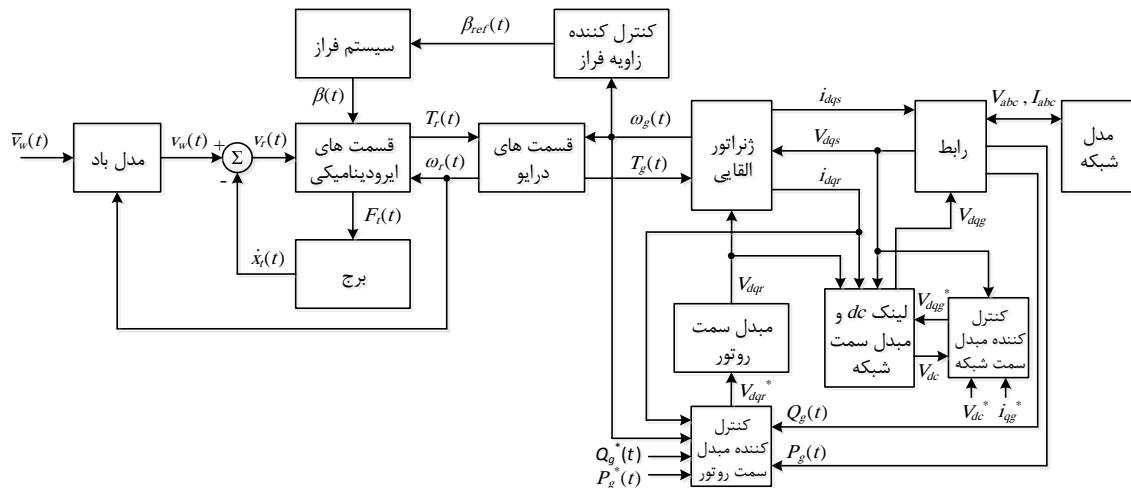


فصل دوم:  
مدل دینامیکی سیستم  
تبدیل انرژی بادی



## ۱-۲ مقدمه

بخش مشترک بین تمامی مدل‌های ارائه شده، تقسیم سیستم تبدیل انرژی بادی به زیرسیستم‌های مجزا از هم و به دست آوردن مدل ریاضی برای هر کدام از این قسمت‌های است. مدل پیشنهاد شده در این رساله در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در این شکل از مکانیسم تنظیم زاویه توربین صرفنظر شده است. به دلیل آن که برج در نوسان می‌باشد، سرعت باد دیده شده در روتور،  $(t)_r \dot{x}$ ، از اختلاف سرعت شاسی،  $(t)_x \dot{x}$  و سرعت باد به دست می‌آید. همچنین گشتاور ایرودینامیکی روتور،  $T_r(t)$ ، از طریق قسمت‌های درایو به ژنراتور منتقل می‌شود. قسمت‌های درایو شامل محورهای سرعت  $(t)_r T_r$  و سرعت پائین و جعبه دنده می‌باشد. ژنراتور القایی انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و به شبکه قدرت متصل می‌شود. از رابط برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط ژنراتور استفاده می‌شود. مدل شبکه نیز شامل بار محلی، تراسفورماتور، خط انتقال و در آخر شین بی‌نهایت می‌باشد. همچنین مبدل‌ها، لینک جریان مستقیم، کنترل کننده‌های مبدل سمت روتور<sup>۱</sup> و مبدل سمت شبکه<sup>۲</sup> نیز در این طرح مدل‌سازی می‌شوند.



شکل (۱-۲) ارتباط بین زیرسیستم‌های مریوط به مدل‌سازی سیستم تبدیل انرژی بادی.

<sup>1</sup> Rotor Side Converter

<sup>2</sup> Grid Side Converter

در بخش‌های آتی مدل‌های به کار برده شده برای زیرسیستم‌های مختلف شکل (۱-۲) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۲-۲ مدل باد

در مدل به کار برده شده، سرعت باد مؤثر بر روی هر پره، با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$v_w(t) = \bar{v}_w(t) + v_{ws}(t) + v_{ts}(t) + v_{tu}(t) \quad (1-2)$$

که در رابطه فوق  $v_w(t)$  سرعت باد شامل اثر برج<sup>۱</sup>، جریان هوای گردابی<sup>۲</sup> و انحراف ناگهانی مسیر باد<sup>۳</sup> است،  $v_{ws}(t)$  اثر انحراف ناگهانی مسیر باد،  $v_{ts}(t)$  عنصر نشان‌دهنده اثر برج و  $v_{tu}(t)$  اثر جریان هوای گردابی می‌باشد. خروجی مدل باد فوق، سرعت‌های بادی است که برخلاف سرعت‌های باد در نقطه رأس، بر روی سطح متوسط‌گیری شده‌اند و به همین دلیل سرعت‌های باد مؤثر نامیده می‌شوند. زمین و دیگر موانع موجود در مسیر باد باعث به وجود آمدن نیروهای اصطکاکی<sup>۴</sup> می‌شوند که بر باد تأثیرگذار می‌باشند. نیروهای اصطکاکی بر این موضوع دلالت دارند که سرعت متوسط باد به ارتفاع بالای سطح زمین وابسته خواهد شد. این اثر انحراف ناگهانی مسیر باد نامیده می‌شود و توسط رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود. این معادله اثر انحراف ناگهانی مسیر

باد را برای صفحه روتور نتیجه می‌دهد [۱۲-۱۱]:

$$v_{ws}(t) = \frac{2v_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{R^3\alpha}{3h} \cos(\psi_i(t)) + \frac{R^4\alpha(\alpha-1)}{8h^2} \cos^2(\psi_i(t)) + \frac{R^5\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{30h^3} \cos^3(\psi_i(t)) \right) - \left( \frac{r_0^3\alpha}{3h} \cos(\psi_i(t)) + \frac{r_0^4\alpha(\alpha-1)}{8h^2} \cos^2(\psi_i(t)) + \frac{r_0^5\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{30h^3} \cos^3(\psi_i(t)) \right) \quad (2-2)$$

$$q \triangleq 1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 \quad (2-2)$$

<sup>1</sup> Tower Shadow

<sup>2</sup> Turbulence

<sup>3</sup> Wind Shear

<sup>4</sup> Frictional Forces

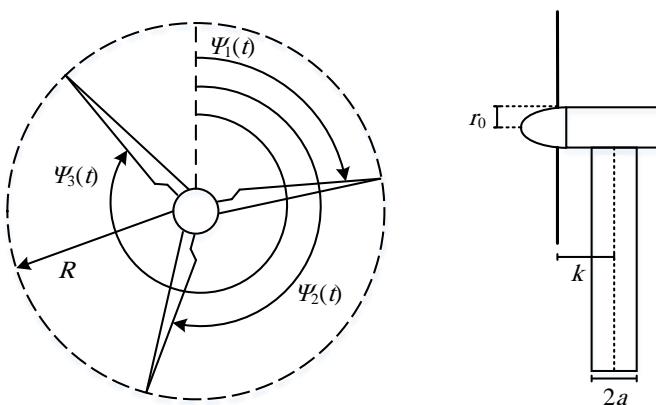
که در رابطه فوق  $h$  ارتفاع برج،  $R$  شعاع روتور،  $r_0$  شعاعی است که در آن پروفیل پره‌ها آغاز می‌شود،  $v_{hub}(t)$  سرعت باد در ارتفاع توپی پره،  $\alpha$  تعریف‌کننده انحراف ناگهانی مسیر باد و  $(\psi_i(t))$  زاویه سمت<sup>۱</sup> (زاویه قوس افقی در جهت گردش عقرمه ساعت) برای پره  $i$  می‌باشند. تعدادی از این پارامترها در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌اند.

زمانی که یک پره در مقابل برج قرار می‌گیرد نیروی بالابری<sup>۲</sup> در آن پره کاهش می‌یابد زیرا برج باعث کاهش سرعت باد مؤثر می‌شود. این پدیده اثر برج نامیده می‌شود که باعث می‌شود نیروی عمل کننده برای هر پره زمانی که آن پره در مقابل برج قرار می‌گیرد، کاهش یابد. بزرگی اثر برج به قطر برج و فاصله بین پره‌ها و برج وابسته است. برای مدل‌سازی اثر برج نیز می‌توان از رابطه (۳-۲) استفاده کرد

$$[\pi/2, 3\pi/2]. \quad [11, 7]. \quad \text{توجه شود که این معادله فقط برای } \psi_i \text{ صادق است.}$$

$$\begin{aligned} v_{ts}(t) = & \frac{2mv_{hub}(t)}{3qR^2} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{a^2 \ln(R^2 \sin^2(\psi_i(t)) + k^2)}{2 \sin^2(\psi_i(t))} - \frac{a^2 \ln(r_0^2 \sin^2(\psi_i(t)) + k^2)}{2 \sin^2(\psi_i(t))} \right. \\ & \left. + \frac{a^2 k^2}{\sin^2(\psi_i(t))(R^2 \sin^2(\psi_i(t)) + k^2)} - \frac{a^2 k^2}{\sin^2(\psi_i(t))(r_0^2 \sin^2(\psi_i(t)) + k^2)} \right) \end{aligned}$$

$$m \triangleq 1 + \frac{R^2 \alpha(\alpha-1)}{8h^2} \quad (3-2)$$



شکل (۲-۲) نمای روتور و توربین بادی به منظور نشان دادن برخی پارامترهای موجود در مدل باد.

<sup>1</sup> Azimuth Angle

<sup>2</sup> Lift

در رابطه فوق  $a$  شعاع برج و  $k$  فاصله بین خط میانی برج و پره‌ها می‌باشد. تغییرات سرعت باد که در سرعت باد متوسط لحاظ نشده‌اند، جریان هوای گردابی نامیده می‌شود. جریان هوای گردابی باد در هر نقطه از فضا تصادفی است و توسط طیف توانش توصیف می‌شود. دو مدل مورد قبول، طیف وون کارمن<sup>۱</sup> و طیف کایمال<sup>۲</sup> می‌باشند [۱۱، ۵۹، ۶۰]. طیف کایمال به صورت زیر می‌باشد:

$$\phi(\omega) = \frac{K_V}{(1 + \omega T_V)^{5/3}} \quad (4-2)$$

که در رابطه فوق ثابت  $T_V$  پهنه‌ای باند فرکانسی و ثابت  $K_V$  توان جریان هوای گردابی را مشخص می‌کنند. هر دو پارامتر به سرعت متوسط باد و توپوگرافی ناحیه<sup>۳</sup> وابسته هستند. قرار دادن توربین بادی در مسیر باد، به دلیل اثر برج و انحراف ناگهانی مسیر باد، جریان هوای گردابی بیشتری تولید می‌کند و توزیع باد به دلیل وجود برج توربین بادی، دچار تغییر می‌شود. سرعت باد در مقابل برج تا حداقل ۲۰ درصد می‌تواند کاهش یابد که این امر به دلیل آن است که برج اثر میانگین‌گیری را مانند یک فیلتر پائین‌گذر انجام می‌دهد [۶۱].

روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی جریان هوای گردابی وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از فیلترهای هارمونیک<sup>۴</sup> می‌باشد. در این روش از طیف کایمال برای مدل‌سازی جریان هوای گردابی و از فیلترهای هارمونیک برای مدل‌سازی اثرهای میانگین‌گیری و نمونه‌برداری چرخشی سرعت باد<sup>۵</sup> استفاده می‌شود [۶۲]. روش فوق در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. مسئله اصلی در ساختار فوق مربوط به تنظیم فیلترهای کایمال، هارمونیک مرتبه اول و هارمونیک مرتبه سوم می‌شود. در این تحقیق از فیلتر کایمال مرتبه دوم با تابع تبدیل آورده شده در رابطه (۵-۲) استفاده شد [۶۱-۶۳]:

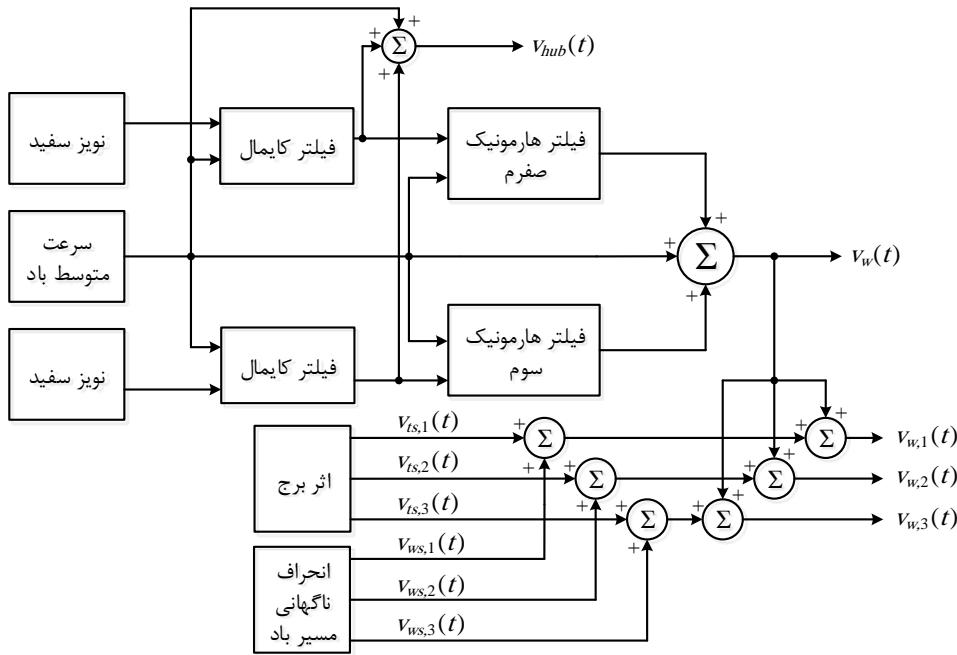
<sup>1</sup> Von Karman Spectrum

<sup>2</sup> Kaimal Spectrum

<sup>3</sup> Topography of the Terrain

<sup>4</sup> Harmonics Filter

<sup>5</sup> Wind Speed Averaging and Rotational Sampling Effects



شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام ساختار کلی مدل باد.

$$H_{Kaimal}(s) = K \frac{0.0182c^2 \cdot s^2 + 1.3653c \cdot s + 0.9846}{1.3463c^2 \cdot s^2 + 3.7593c \cdot s + 1} \quad (۵-۲)$$

که در رابطه فوق  $v_{avg}$  سرعت متوسط باد،  $c = v_{avg}/L$  اندیاف معیار جریان هوای گردابی،  $L$  مقیاس طولی جریان هوای گردابی<sup>۱</sup> است. همچنین  $L$  و  $\sigma_w$  پارامترهایی هستند که به مکان قرارگیری توربین وابسته هستند. برای فیلترهای هارمونیک نیز از روابط زیر استفاده می‌شود [۶۱-۶۳]:

$$H_{ZeroHarmonic}(s) = \frac{4.7869d^2 \cdot s^2 + 0.9904}{7.6823d^2 \cdot s^2 + 7.3518d \cdot s + 1} \quad (۶-۲)$$

$$H_{3rdHarmonic}(s) = \frac{0.2766d^2 \cdot s^2 + 0.0307}{0.3691d^2 \cdot s^2 + 1.7722d \cdot s + 1} \quad (۷-۲)$$

که در روابط فوق  $d = R/v_{avg}$  شعاع رotor توربین می‌باشد. از آنجائی که رotor سه پره کاملاً متقاض است، مدل باد فقط هارمونیک‌های صفرم و سوم را شامل خواهد بود [۶۴]. به منظور دستیابی به نتیجه مطلوب، خروجی فیلترهای کایمال رابطه (۵-۲) به فیلترهای هارمونیک اعمال می‌شود.

<sup>۱</sup> The Turbulence Length Scale

خروجی اعمال شده به فیلتر هارمونیک مرتبه صفر به گونه‌ای تنظیم می‌شود که اثر میانگین‌گیری را شبیه‌سازی کند و همچنین خروجی اعمال شده به فیلتر هارمونیک مرتبه سوم به گونه‌ای تنظیم می‌شود که تغییرات به دلیل جریان هوای گردابی چرخشی و اثر برج در میدان سرعت باد بر روی دیسک روتور را شبیه‌سازی کند [۶۱].

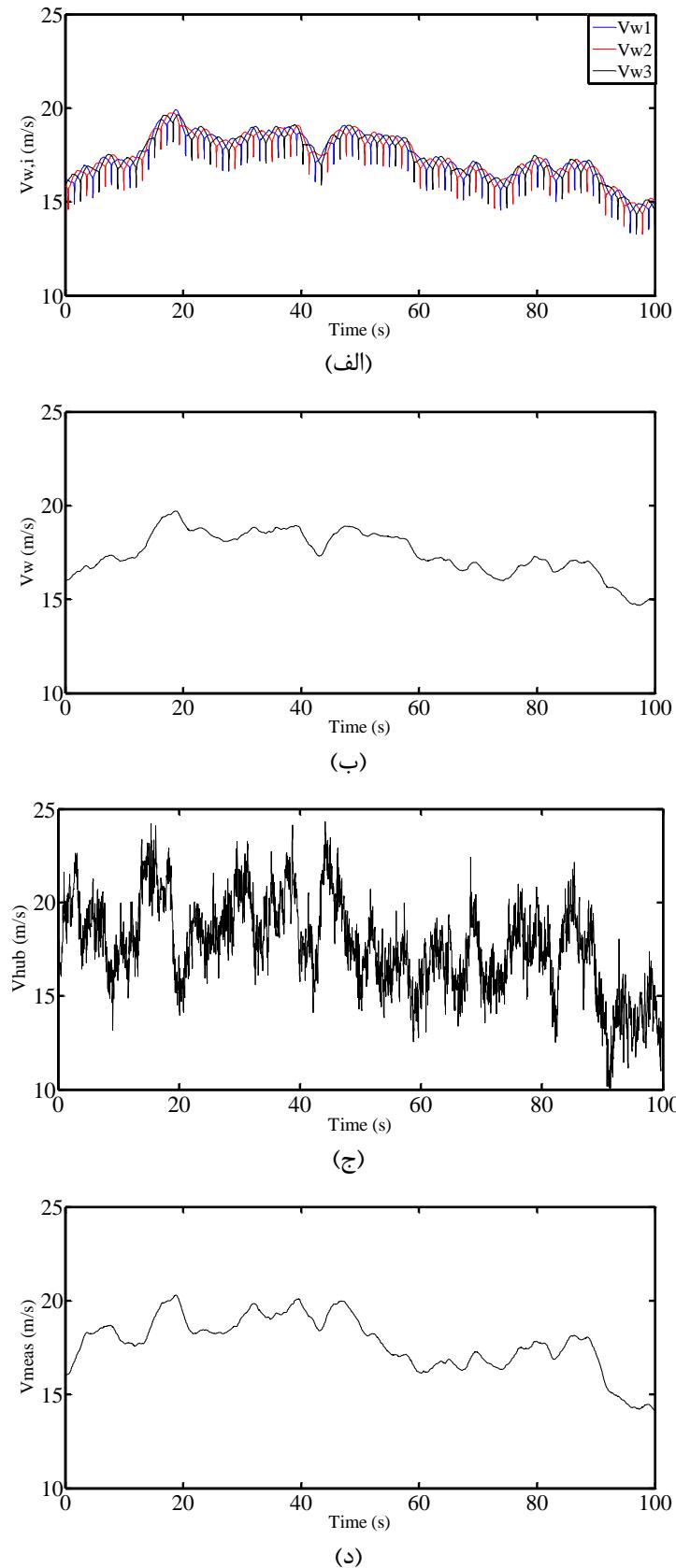
در شکل (۳-۲) ورودی مدل، سرعت باد متوسط است و خروجی آن سرعت‌های باد مؤثر بر روی ۳ پره توربین (سرعت‌های باد میانگین‌گیری شده بر روی سطح پره‌ها) می‌باشد. برای مدل‌سازی سرعت باد در مکان قرارگیری بادسنجه،  $(t)_{hub}$ <sup>۷</sup>، سرعت باد نقطه‌ای<sup>۱</sup>، پس از گذراندن از فیلتر پائین‌گذر از مدل استخراج می‌شود زیرا بادسنجه همانند یک فیلتر پائین‌گذر عمل می‌کند.

برای نمایش نحوه عملکرد مدل باد بررسی شده، این مدل در Matlab شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی با فرض آن که سرعت روتور ثابت است و سرعت متوسط باد برابر ۱۶ m/s است، انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۴-۲) آورده شده‌اند. از شکل (۴-۲) اختلاف بین سرعت باد مؤثر،  $(t)_w$ <sup>۷</sup> و سرعت باد اندازه‌گیری شده،  $(t)_{mes}$ <sup>۷</sup>، کاملاً مشخص است، زیرا  $(t)_{mes}$ <sup>۷</sup> سرعت باد نقطه‌ای است، در حالی که  $(t)_w$ <sup>۷</sup> سرعت باد میانگین‌گیری شده بر روی سطح پره‌ها می‌باشد.

### ۳-۲ مدل قسمت‌های ایرودینامیکی

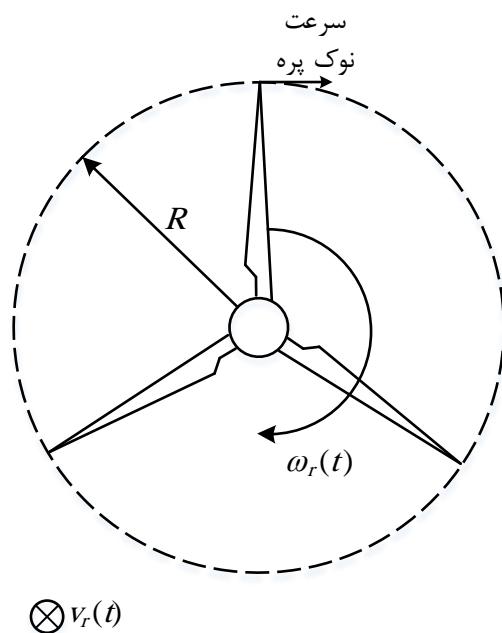
قابلیت سیستم تبدیل انرژی بادی برای استخراج توان موجود در باد و انتقال آن به سمت محور روتور توسط قسمت‌های ایرودینامیکی مدل می‌شود. در این مدل ابتدا فرض می‌شود که باد گذرنده از صفحه روتور، دارای یک سرعت در تمام نقاط آن است؛ ولی در واقع این گونه مدل‌سازی دقیق نمی‌باشد. به همین دلیل مدل ایرودینامیکی، با در نظر گرفتن سرعت‌های باد موثر برای پره‌های مختلف، اصلاح می‌شود.

<sup>۱</sup> Point Wind Speed

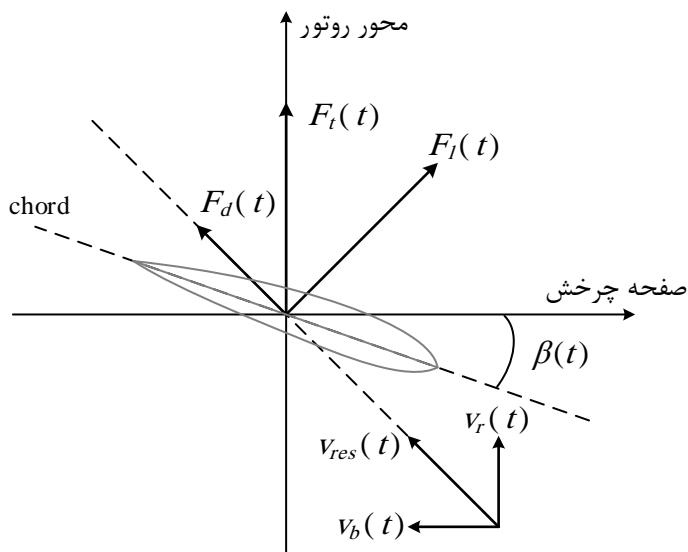


شکل (۴-۲) خروجی‌های مدل باد برای سرعت متوسط ۱۶ متر بر ثانیه و در سرعت ثابت روتور: (الف) سرعت باد بر روی هر پره، (ب) سرعت باد مؤثر، (ج) سرعت باد در مکان قرارگیری بادسنج و (د) سرعت باد اندازه‌گیری شده.

پره‌های توربین بادی که انرژی باد را جذب می‌کنند در شکل (۵-۲) و مقطع عرضی پره‌ها در شکل (۶-۲) نمایش داده شده است. در این مدل فرض می‌شود که یک سیستم تنظیم زاویه توربین<sup>۱</sup> وجود دارد به نحوی که همیشه صفحه روتور را عمود بر مسیر حرکت باد نگه می‌دارد.



شکل (۵-۲) صفحه روتور عمود بر مسیر حرکت باد.



شکل (۶-۲) نیروهای ایرودینامیکی عمل کننده بر روی پره‌ها.

<sup>۱</sup> Yaw System

وقتی که پره‌ها به دلیل سرعت باد مؤثر بر روی روتور، ( $t, v$ ، می‌چرخند، هر پره یک جزء سرعت باد را به نام  $v_b(t)$  تحمل می‌کند که این جزء خلاف جهت چرخش می‌باشد. پس هر پره یک سرعت باد نتیجه،  $v_{res}(t)$  را همانند شکل (۲-۶) تحمل می‌کند. زاویه پره‌ها، زاویه فراز،  $\beta(t)$ ، نامیده می‌شود و به عنوان زاویه بین صفحه چرخش و وتر<sup>۱</sup> پروفیل<sup>۲</sup> پره تعریف می‌شود. به دلیل وجود پروفیل پره، کاهش فشاری در سطح بالایی پره ایجاد می‌شود که باعث ایجاد نیروی بالابری،  $F_l(t)$ ، می‌شود که این نیرو عمود بر سرعت باد نتیجه می‌باشد. علاوه بر نیروی بالابری، سرعت باد نتیجه، نیروی کششی<sup>۳</sup>،  $F_d(t)$ ، را تولید می‌کند. جمع دو نیروی  $F_l(t)$  و  $F_d(t)$  در جهت صفحه چرخش باعث به وجود آمدن گشتاور ایرودینامیکی می‌شود که بر روی روتور توربین عمل می‌کند. به همین طریق، اجزای در جهت محور روتور، نیروی رانش ایرودینامیکی،  $F_t(t)$ ، را نتیجه می‌دهند که بر روی روتور توربین بادی عمل می‌کند [۷].

توان قابل استخراج از بادی که از طریق تمام سطح روتور می‌گذرد توسط رابطه زیر بیان می‌شود

[۸-۱]، [۲-۱]

$$P_w(t) = 0.5 \rho A v_r^3(t) = 0.5 \rho \pi R^2 v_r^3(t) \quad (8-2)$$

که در رابطه فوق  $P_w$  توان قابل استفاده از باد بر حسب وات،  $A$  سطح روتور بر حسب متر مربع،  $R$  شعاع روتور (طبق شکل (۲-۲)،  $v_r$  سرعت باد مؤثر بر روی روتور بر حسب متر بر ثانیه و  $\rho$  چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند. نسبت توان حاصل شده به توان قابل استفاده، توسط ضریب توان توربین،  $C_p$ ، بیان می‌شود. یک کران بالای تئوری برای میزان توانی که از باد قابل استخراج است، وجود دارد. این کران به صورت زیر است:

$$C_p = \frac{16}{27} \quad (9-2)$$

---

<sup>1</sup> Chord

<sup>2</sup> Profile

<sup>3</sup> Drag Force

ضریب توان  $C_p$  بر این موضوع دلالت دارد که مدل ایرودینامیکی استاتیک است که این امر در واقع ساده‌سازی در مدل‌سازی محسوب می‌شود. بنابراین توان حاصل شده از باد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_r(t) = P_w(t)C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (10-2)$$

و یا

$$P_r(t) = 0.5\rho A v_r^3(t)C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (11-2)$$

که در روابط فوق  $P_r(t)$  توان دریافت شده توسط روتور و  $\lambda(t)$  نرخ سرعت نوک پره<sup>۱</sup> است.

نرخ سرعت نوک پره توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda(t) = \frac{\omega_r(t)R}{v_r(t)} \quad (12-2)$$

که در رابطه فوق  $\omega_r(t)$  سرعت روتور توربین بر حسب رادیان بر ثانیه می‌باشد. همچنین گشتاور ایرودینامیکی،  $T_r(t)$ ، که به روتور توربین اعمال می‌شود را می‌توان توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$T_r(t) = \frac{P_r(t)}{\omega_r(t)} = \frac{1}{\omega_r(t)} 0.5\rho A v_r^3(t)C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (13-2)$$

که در رابطه فوق  $T_r(t)$  گشتاور ایرودینامیکی اعمال شده به روتور توربین است. مهمترین نیروهایی که توسط روتور تحمل می‌شوند، دو نیروی فشار محوری<sup>۲</sup> (رانش) و گشتاور روتور می‌باشند. نیروی رانش ایرودینامیکی از تداخل بین پره‌ها و باد حاصل می‌شود. این نیرو از طریق پره‌ها به شاسی و برج منتقل می‌شود. نیروی رانش ایرودینامیکی را می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$F_t(t) = 0.5\rho A v_r^2(t)C_t(\lambda(t), \beta(t)) \quad (14-2)$$

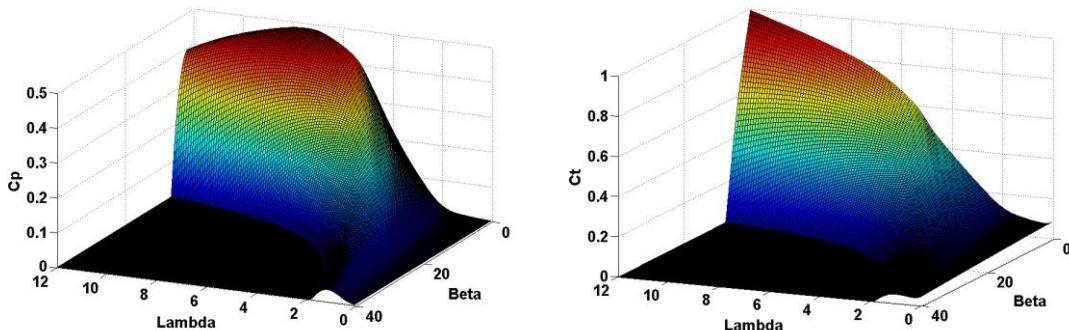
---

<sup>1</sup> Tip Speed Ratio

<sup>2</sup> Thrust

که در این رابطه  $C_r(\lambda(t), \beta(t))$  ضریب رانش می‌باشد. دو پارامتر  $\beta$  و  $\lambda$  با توجه به شرایط کار توربین بادی تعیین می‌شوند. ماکریزم مقدار  $C_p$  در  $(\lambda_0, \beta_0)$  اتفاق می‌افتد.  $\beta_0$  به طور معمول زاویه بسیار کوچکی و یا به صورت ایده‌آل برابر صفر است. این حقیقت برای کنترل توربین بادی بسیار مهم است زیرا برای هر میزان تغییر از  $\beta_0$ ، توان کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، به منظور دستیابی به راندمان تبدیل انرژی ماکریزم، نقطه کار توربین باید در  $\lambda_0$  نگه داشته شود. بنابراین توربین باید سرعت دورانی اش را در محدوده متنوعی از سرعت‌های باد تغییر دهد تا در راندمان ماکریزم عمل کند. ماشین‌های سرعت-ثابت<sup>۱</sup> قادر به اجرای این عمل نیستند و در نتیجه برای آن‌ها ماکریزم توان حاصل شده، در یک سرعت باد منحصر به فرد اتفاق می‌افتد. دو منحنی  $(C_r(\lambda(t), \beta(t))$  و  $C_p(\lambda(t), \beta(t))$  به صورت جدول جستجو در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته شدند و در شکل (۷-۲) نمایش داده شده‌اند. برای استفاده از مدل ایرودینامیکی هنگامی که فرض می‌شود سرعت باد بر روی ۳ پره ناهمسان است، معادلات باید با توجه به سرعت‌های باد مؤثر برای پره‌های مختلف نوشته شوند. در نتیجه مدل نهایی با میانگین‌گیری از نیروی رانش و گشتاور ایرودینامیکی برای ۳ پره بدست می‌آید و به صورت زیر خواهد بود:

$$T_r(t) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{r,i}(t) \quad (15-2)$$



شکل (۷-۲) ضرایب  $C_r(\lambda(t), \beta(t))$  و  $C_p(\lambda(t), \beta(t))$  بدست آمده از مرجع [۸۵]. توجه شود که مقادیر منفی در دو منحنی فوق برابر صفر قرار داده شده‌اند.

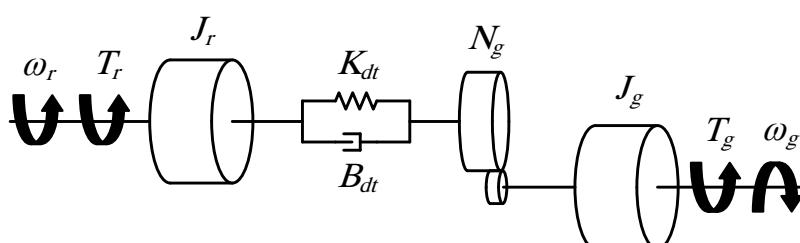
<sup>۱</sup> Fixed-Speed Machines

$$F_t(t) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 F_{t,i}(t) \quad (16-2)$$

که در روابط فوق  $(T_{r,i}(t))$  گشتاور ایرودینامیکی اعمال شده به روتور توسط پره  $i$ -ام و  $(F_{t,i}(t))$  نیروی اعمال شده توسط باد به پره  $i$ -ام می‌باشد.

#### ۴-۲ مدل قسمت‌های درایو

قسمت‌های درایو شامل محور سرعت پائین، چرخ دنده و محور سرعت بالا می‌باشد. توسط قسمت‌های درایو گشتاور ایرودینامیکی به گشتاور اعمال شده به ژنراتور تبدیل می‌شود. همانطور که اشاره شد گشتاور ایرودینامیکی توسط قسمت‌های درایو به ژنراتور منتقل می‌شود. چرخ دنده سرعت چرخشی را به سرعت مورد نیاز ژنراتور با فاکتوری به نام ضریب چرخ دنده تبدیل می‌کند. شکل (۸-۲) نشان‌دهنده قسمت‌های درایو می‌باشد. در شکل (۸-۲) اینرسی (لختی) روتور و محور سرعت پائین با  $J_r$  نشان داده شده است. گشتاور عملکرنده بر روی محور سرعت پائین و  $\omega_r$  سرعت روتور است. توجه شود که  $J_r$  در همان جهت  $\omega_r$  عمل می‌کند. همچنین فنر دورانی میرا شونده چسبنده بدون جرم<sup>۱</sup>، با ضریب سختی فنر  $K_{dt}$  و پارامتر میرائی چسبناک<sup>۲</sup>  $B_{dt}$  می‌باشد. ضریب چرخ دنده با  $N_g$  و اینرسی چرخ دنده، محور سرعت بالا و ژنراتور با  $J_g$  نشان داده شده است. در این شکل  $T_g$  گشتاور ژنراتور و  $\omega_g$  سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور است. توجه شود که  $T_g$  در خلاف جهت چرخش عمل می‌کند.



شکل (۸-۲) نمایش قسمت‌های درایو.

<sup>۱</sup> A Massless Viscously Damped Rotational Spring

<sup>۲</sup> Viscous Damping Parameter

دینامیک مدل قسمت‌های درایو را می‌توان با سه معادله دیفرانسیل زیر بیان کرد [۱۲-۹، ۲۱]:

$$J_r \dot{\omega}_r = T_r - K_{dt} \theta_\delta - B_{dt} \dot{\theta}_\delta \quad (17-2)$$

$$J_g N_g \dot{\omega}_g = -T_g N_g + K_{dt} \theta_\delta + B_{dt} \dot{\theta}_\delta \quad (18-2)$$

$$\dot{\theta}_\delta = \omega_r - (\omega_g / N_g) \quad (19-2)$$

که در روابط فوق  $\theta_\delta$  بیانگر جابجایی نسبی بین محور سرعت بالا و محور سرعت پائین (زاویه پیچش) می‌باشد.

## ۵-۲ مدل برج

نیروی رانش باعث می‌شود که برج به جلو و عقب در نوسان باشد. برج با یک سیستم جرم-فنر-دمپر با

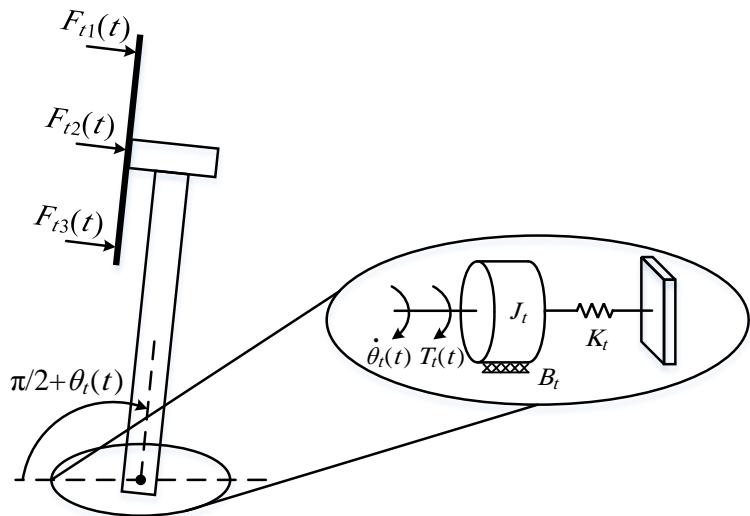
توجه به شکل (۹-۲) و توسط معادلات زیر مدل می‌شود [۷]:

$$M_t \ddot{x}_t(t) = F_{th}(t) - B_t \dot{x}_t(t) - K_t x_t(t) \quad (20-2)$$

$$F_{th}(t) = \underbrace{F_{t,1}(t) \left( 1 + \frac{r_t}{h} \cos(\psi_1(t)) \right)}_{F_{th,1}(t)} + \underbrace{F_{t,2}(t) \left( 1 + \frac{r_t}{h} \cos(\psi_2(t)) \right)}_{F_{th,2}(t)} + \underbrace{F_{t,3}(t) \left( 1 + \frac{r_t}{h} \cos(\psi_3(t)) \right)}_{F_{th,3}(t)} \quad (21-2)$$

$$r_t = 2^{-1/3} R \quad (22-2)$$

که در معادلات فوق،  $F_{t,i}(t)$  نیروی عمل‌کننده بر روی پره  $i$ ،  $F_{th}(t)$  نیروی عمل‌کننده بر روی برج و در ارتفاع قرارگیری توپی پره،  $F_{th,i}(t)$  نیروی منتقل شده به برج از پره  $i$  و در ارتفاع قرارگیری توپی پره،  $B_t$  ضریب میرائی برج،  $K_t$  ضریب پیچش برج،  $M_t$  جرم بالای برج،  $r_t$  فاصله از توپی پره تا مکانی است که نیرو بر روی پره عمل می‌کند و  $x_t(t)$  جابجایی شاسی از محل تعادلش می‌باشد.



شکل (۹-۲) نمایش حرکت برج، توجه شود که  $\theta_t(t)$  زاویه چرخش برج می‌باشد.

نوسان برج بر روی سرعت باد مؤثر دیده شده از روتور تأثیر می‌گذارد، یعنی به عنوان مثال هنگامی که برج در سمت باد حرکت می‌کند، سرعت باد مؤثر افزایش می‌یابد. در نتیجه سرعت باد مؤثر را می‌توان با استفاده از رابطه زیر توصیف کرد:

$$v_r(t) = v_w(t) - \dot{x}_t(t) \quad (23-2)$$

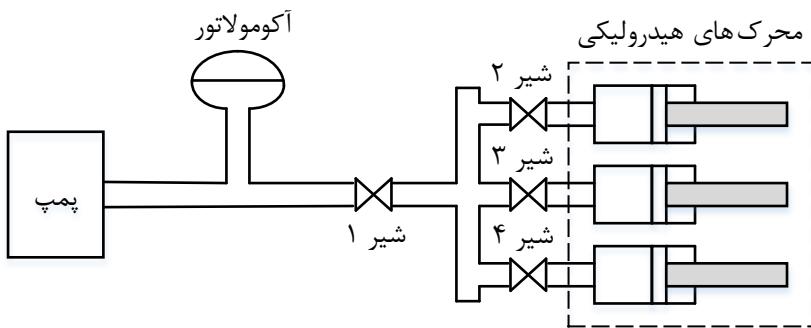
## ۶-۲ مدل سیستم فراز

سیستم فراز شامل سه محرک فراز مشابه است که هر کدام از آن‌ها دارای یک کنترل‌کننده داخلی<sup>۱</sup> هستند. در واقع این کنترل‌کننده‌ها به عنوان بخشی از هر یک از محرک‌ها در نظر گرفته می‌شوند. از آنجائی که محرک‌ها مشابه یکدیگرند، تنها یک محرک فراز بررسی می‌شود. محرک فراز، زاویه فراز هر یک از پره‌ها را با چرخش آن تنظیم می‌کند. سیستم فراز، یک سیستم هیدرولیک است که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. محرک فراز توسط معادلات زیر مدل می‌شود [۷]، [۲۱]، [۶۶]:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\zeta\omega_n\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_{ref}(t) \quad (24-2)$$

$$\frac{\beta(s)}{\beta_{ref}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (25-2)$$

<sup>۱</sup> Internal Pitch Controller (IPC)



شکل (۱۰-۲) سیستم فراز هیدروليکی شامل سه محرک فراز که هر کدام می‌توانند به صورت مستقل کنترل شوند.

که در معادلات فوق،  $(\beta(t))$  زاویه فراز،  $(\omega_n)$  فرکانس طبیعی میرا نشده مدل محرک فراز و  $\dot{\beta}(t)$  نسبت میرائی مدل محرک فراز می‌باشد. معادله فوق هنگامی عملکرد محرک فراز را شرح می‌دهد که این محرک در محدودیت‌هایی صدق کند. در واقع باید برای  $(\beta(t))$  و  $(\dot{\beta}(t))$  کران بالا و پائین در نظر گرفته شود (محدودیت‌های فیزیکی محرک). این محدودیت‌ها به صورت جدول زیر در نظر گرفته شدند [۲۱]:

جدول (۱-۲) محدودیت‌های فیزیکی محرک‌های فراز

| پارامتر          | کران بالا           | کران پائین           |
|------------------|---------------------|----------------------|
| $\beta(t)$       | $90^\circ$          | $-5^\circ$           |
| $\dot{\beta}(t)$ | $10^\circ/\text{s}$ | $-10^\circ/\text{s}$ |

## ۷-۲ مدل ژنراتور

قسمت‌های الکتریکی ماشین القایی توسط چهار معادله دیفرانسیل و قسمت‌های مکانیکی آن توسط دو معادله قابل توصیف هستند. در این مدل سازی از دستگاه مرجع سنکرون برای انتقال متغیرها از دستگاه  $abc$  به دستگاه مرجع  $dq$  استفاده شده است. تمامی متغیرها و پارامترها در این مدل نسبت به استاتور می‌باشند. همچنین اندیس  $l$  مشخص کننده اندوکتانس نشتی و اندیس  $m$  مشخص کننده اندوکتانس متقابل می‌باشد. معادلات ولتاژ استاتور و روتور ماشین القایی در دستگاه مرجع سنکرون به صورت زیر می‌باشند [۶۷-۶۸]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (26-2)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \quad (27-2)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \quad (28-2)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \quad (29-2)$$

که در معادلات فوق  $R_s$  و  $R_r$  به ترتیب مقاومت‌های مربوط به سیم‌پیچ استاتور و روتور،  $\omega_s$  سرعت زاویه‌ای سنکرون،  $\omega_r$  سرعت زاویه‌ای الکتریکی چرخش روتور،  $\varphi_{ds}$  و  $\varphi_{qs}$  شار استاتور به ترتیب در راستای محور  $d$  و  $q$  و همچنین  $\varphi_{dr}$  و  $\varphi_{qr}$  شار روتور به ترتیب در راستای محور  $d$  و  $q$  می‌باشد. شار استاتور و روتور در روابط فوق نیز به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (30-2)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (31-2)$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (32-2)$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (33-2)$$

که در معادلات فوق  $L_r = L_{lr} + L_m$  و  $L_s = L_{ls} + L_m$  به ترتیب اندوکتانس سیم‌پیچ استاتور و روتور می‌باشند. گشتاور الکترومغناطیسی نیز با استفاده از معادله زیر بیان می‌شود:

$$T_e = 1.5p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (34-2)$$

در رابطه فوق  $p$  تعداد قطب‌های ماشین است. دو معادله مربوط به قسمت‌های مکانیکی ماشین نیز به

صورت زیر هستند:

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_g - T_g) \quad (35-2)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_g = \omega_g \quad (36-2)$$

در روابط فوق  $H$  ثابت اینرسی بار و روتور،  $F$  ضریب اصطکاک ویسکوزیته بار و روتور،  $T_g$  گشتاور مکانیکی،  $\omega_g$  سرعت زاویه‌ای روتور و  $\theta_g$  موقعیت زاویه‌ای روتور می‌باشد. توجه شود که سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور  $\omega_r = \theta_r \times p$  موقعیت زاویه‌ای الکتریکی روتور  $\theta_g \times p$  می‌باشد. برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_s + jQ_s = -\frac{3}{2} V_s I_s^* \quad (37-2)$$

به طوری که در رابطه فوق داریم:

$$V_s = V_{ds} + jV_{qs} \quad (38-2)$$

$$I_s = I_{ds} + jI_{qs} \quad (39-2)$$

$$I_s^* = I_{ds} - jI_{qs} \quad (40-2)$$

در نتیجه با توجه به روابط (37-2) الی (40-2)، توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور توسط روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_s = -\frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (41-2)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} (V_{ds} I_{qs} + V_{qs} I_{ds}) \quad (42-2)$$

همچنین توان ورودی از شفت روتور را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$P_e = \frac{3L_m \omega_r}{2L_s} (-\varphi_{qs} i_{dr} + \varphi_{ds} i_{qr}) \quad (43-2)$$

حال با توجه به توان اکتیو استاتور و توان ورودی از شفت روتور، توان اکتیو رد و بدل شده بین روتور و مبدل سمت روتور طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_r = P_e - P_s \quad (44-2)$$

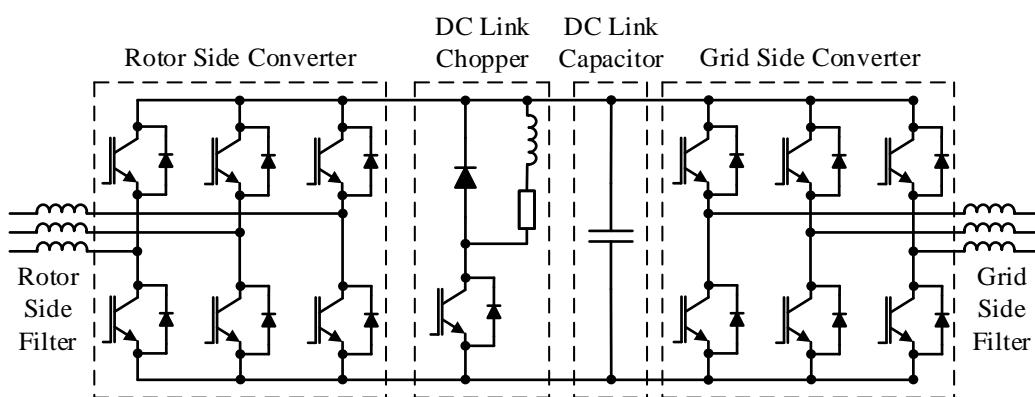
## ۸-۲ مدل کانورتر قدرت

همانطور که در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است، مبدل قدرت از یک مبدل پشت‌به‌پشت<sup>۱</sup> که به مدار روتور و شبکه متصل شده است، تشکیل یافته است. در این مبدل از IGBT، دیودهای هرزگرد<sup>۲</sup> و همچنین فیلتر  $LC$  در خروجی هر مبدل به منظور مینیمم کردن هارمونیک‌های سوئیچینگ استفاده شده است. در این تحقیق عملیات سوئیچینگ در مبدل‌ها مدل‌سازی نمی‌شود و فرض بر این است که مبدل‌ها با سوئیچینگ مناسب، ولتاژ‌های جریان متناوب مطلوب را که با توجه به روش‌های کنترلی به کار گرفته شده در ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه به دست آمده‌اند، در خروجی خود تولید می‌کنند

[۶۹]، [۱۲]

## ۱-۱-۲ مبدل سمت روتور

مبدل سمت روتور را می‌توان به عنوان یک مبدل منبع ولتاژ کنترل شده با جریان در نظر گرفت. جریان روتور با روش‌های زیادی قابل کنترل است. معمول‌ترین روش به کارگیری مدولاسیون پهنه‌ای پالس می‌باشد که در [۶۷] و [۶۹-۷۰] این روش به کار گرفته شده است. راهکار دیگر استفاده از روش مدولاسیون هیسترزیس برای مبدل سمت روتور است [۷۱].



شکل (۱۱-۲) مبدل قدرت در توربین بادی همراه با ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه.

<sup>۱</sup> Back-to-Back Converter

<sup>۲</sup> Freewheeling Diodes

### ۲-۱-۲ مبدل سمت شبکه و خازن لینک جریان مستقیم<sup>۱</sup>

مبدل سمت شبکه معمولاً برای کنترل ولتاژ لینک جریان مستقیم به کار برد می‌شود. اما می‌توان برای پشتیبانی از توان راکتیو شبکه هنگام بروز خطا نیز آن‌ها را به کار برد [۷۲]. همچنین می‌توان از مبدل سمت شبکه برای دستیابی به کیفیت توان شبکه استفاده کرد [۷۳]. در شکل (۱۲-۲) نحوه اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه نشان داده شده است. با توجه به این شکل معادلات ولتاژ خروجی از مبدل در دستگاه مرجع سنکرون  $dq$  به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{dg} = R_g i_{dg} + L_g \frac{d}{dt} i_{dg} - \omega_s L_g i_{qg} + V_{ds} \quad (45-2)$$

$$V_{qg} = R_g i_{qg} + L_g \frac{d}{dt} i_{qg} + \omega_s L_g i_{dg} + V_{qs} \quad (46-2)$$

که در روابط فوق  $R_g$  و  $L_g$  مقاومت و اندوکتانس مدار بین مبدل سمت شبکه و شبکه می‌باشند. همچنین توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه با صرفنظر کردن از مقاومت  $R_g$  طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

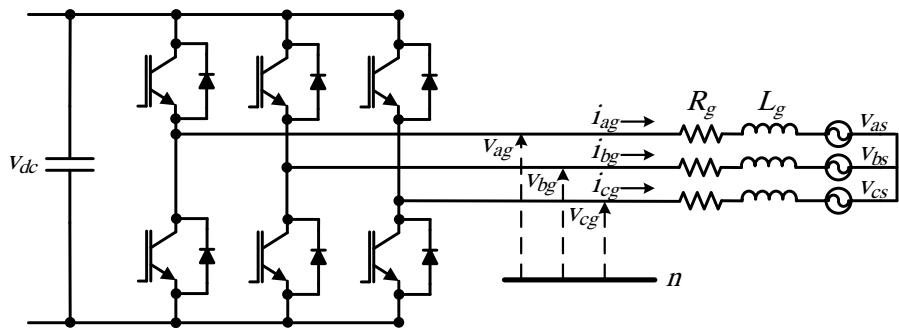
$$P_g = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{dg} + V_{qs} I_{qg}) \quad (47-2)$$

همچنین مقدار انرژی ذخیره شده در خازن لینک جریان مستقیم را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_c = \int P dt = \frac{1}{2} C V_{dc}^2 \quad (48-2)$$

که در رابطه فوق  $P$  گردش توان شبکه به خازن،  $C$  ظرفیت خازن لینک جریان مستقیم و  $V_{dc}$  ولتاژ خازن می‌باشد. همچنین  $P$  برابر با  $P_r - P_g$  خواهد بود که  $P_r$  توان اکتیو رد و بدل شده بین روتور و مبدل سمت روتور و  $P_g$  توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه می‌باشد.

<sup>1</sup> DC-Link Capacitor



شکل (۱۲-۲) نحوه اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه.

مشتق رابطه (۴۸-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P}{V_{dc}C} = \frac{P_r - P_g}{V_{dc}C} = \frac{P_e - P_s - P_g}{V_{dc}C} \quad (۴۹-۲)$$

از رابطه فوق برای مدل‌سازی لینک جریان مستقیم استفاده می‌شود.

## ۹-۲ سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی

تعدادی ناحیه عملیاتی<sup>۱</sup> برای یک توربین بادی همراه با ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه بنا بر سرعت باد اعمال شده به آن، سرعت زاویه‌ای ژنراتور و توان ژنراتور می‌توان تعریف نمود. این نواحی عملیاتی در شکل (۱۳-۲) نشان داده شده‌اند [۱۲]. بنا بر شکل (۱۳-۲) چهار ناحیه عملیاتی برای کنترل توربین وجود دارد: ناحیه عملیاتی سرعت مینیمم<sup>۲</sup>، ناحیه عملیاتی سرعت بهینه<sup>۳</sup>، ناحیه عملیاتی سرعت ماکزیمم<sup>۴</sup> و ناحیه عملیاتی محدودیت توان<sup>۵</sup>.

ناحیه عملیاتی سرعت مینیمم زمانی انتخاب می‌شود که توربین در سرعت‌های پائین باد کار می‌کند. در این ناحیه، سرعت زاویه‌ای ژنراتور بر روی سرعت زاویه‌ای مینیمم ثابت نگه داشته می‌شود. این سرعت معمولاً در حدود ۳۰ درصد پائین‌تر از سرعت سنکرون می‌باشد.

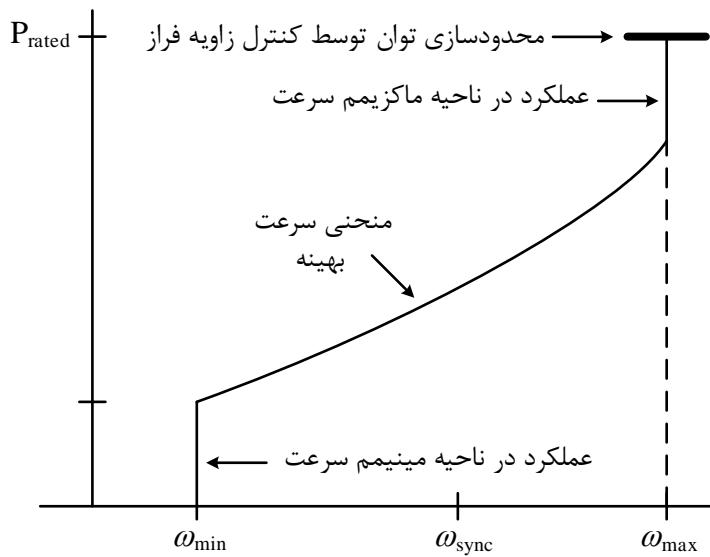
<sup>1</sup> Operating Regions

<sup>2</sup> Minimum Speed Operating Region

<sup>3</sup> Optimum Speed Operating Region

<sup>4</sup> Maximum Speed Operating Region

<sup>5</sup> Power Limitation Operating Region



شکل (۱۳-۲) منحنی نواحی عملیاتی توربین‌های بادی.

در ناحیه عملیاتی سرعت بهینه، سرعت زاویه‌ای ژنراتور به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بتوان در سرعت‌های باد مشخص، ماکزیمم توان ممکن را بدست آورد. اما این نوع عملکرد ممکن است منجر به نوسانات توان خروجی ژنراتور به دلیل تغییرات موجود در سرعت باد شود. پس در شرایطی می‌توان از این اصل استفاده کرد که هنوز توان مجاز توربین بادی حاصل نشده است. سرعت زاویه‌ای ژنراتور در این حالت توسط مبدل سمت رotor کنترل می‌شود. در سرعت‌های بالای باد، سرعت زاویه‌ای ژنراتور توانایی ردگیری عملکرد بهینه را به صورت مداوم نخواهد داشت؛ زیرا سرعت زاویه‌ای ژنراتور نباید از یک حد مجاز فراتر رود. در این حالت تلاش کننده بر آن خواهد بود که سرعت زاویه‌ای ژنراتور را بر روی سرعت ماکزیمم که در حدود ۱۵ الی ۲۰ درصد بالاتر از سرعت سنکرون است، ثابت نگه دارد. در نتیجه، تبدیل توان باد در وضعیت بهینه نخواهد بود. تنظیم سرعت ماکزیمم نیز توسط مبدل سمت رotor امکان‌پذیر می‌باشد. اگر سرعت باد از مقدار معینی فراتر رود، مبدل سمت رotor دیگر قادر نیست که سرعت زاویه‌ای ژنراتور را پائین‌تر از مقدار ماکزیمم نگه دارد. در این حالت سرعت زاویه‌ای ژنراتور با کاهش گشتاور ایروдинامیکی محدود می‌شود. گشتاور ایروдинامیکی را نیز می‌توان با استفاده از کنترل کننده فراز کنترل نمود. با تغییر زاویه فراز پره‌ها، راندمان تبدیل ایروдинامیکی کاهش می‌یابد و در نتیجه گشتاور مکانیکی کمتری به ژنراتور اعمال می‌شود و سرعت ژنراتور را می‌توان در یک سطح

ثابت نگه داشت. در نتیجه با کنترل مبدل سمت روتور سیم‌پیچ‌های روتور به نحوی تغذیه می‌شوند که

بتوان به موارد زیر دست یافت [۹-۸، ۱۲، ۷۴]:

۱- سرعت زاویه‌ای ژنراتور به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بتوان در سرعت‌های باد مشخص،

ماکزیمم توان ممکن را بدست آورد.

۲- با تنظیم سرعت زاویه‌ای ژنراتور، توان اکتیو را نیز می‌توان کنترل نمود.

۳- توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور را می‌توان به صورت مستقل از یکدیگر کنترل نمود.

همچنین با استفاده از کنترل مبدل سمت شبکه می‌توان به موارد زیر دست یافت [۶۷، ۷۲-۷۳]:

۱- کنترل سطح ولتاژ لینک جریان مستقیم ممکن می‌شود.

۲- پشتیبانی از توان راکتیو شبکه هنگام بروز خطای نیز امکان‌پذیر خواهد شد.

۳- می‌توان از کنترل مبدل سمت شبکه برای دستیابی به کیفیت توان شبکه استفاده کرد.

برای کنترل مبدل سمت شبکه و مبدل سمت روتور روش کنترل برداری به کار برده می‌شود. در این

روش با توجه به این که مدل‌سازی در دستگاه  $dq$  انجام گرفته شده است، می‌توان با در نظر گرفتن

محور  $d$  دستگاه  $dq$  در راستای بردار ولتاژ و یا شار استاتور، مقدار جریان‌های مرجع  $dq$  برای دستیابی

به شرایط مطلوب نامبرده شده را بدست آورد. پس از محاسبه مقدار جریان‌های مرجع و نیز

اندازه‌گیری مقدار واقعی جریان‌های مربوطه می‌توان با استفاده از کنترل کننده‌های جریان، ولتاژ‌های

$dq$  مرجع را برای تغذیه روتور و یا خروجی مبدل سمت شبکه بدست آورد. در نهایت با انتقال

ولتاژ‌های  $dq$  مرجع به دست آمده به دستگاه  $abc$ ، ولتاژ‌های مرجع  $V_a^*$ ،  $V_b^*$  و  $V_c^*$  پیدا می‌شوند که

می‌توان از طریق کنترل سوئیچینگ مبدل‌ها با روش مدولاسیون پهنه‌ای پالس و یا مدولاسیون پهنه‌ای

پالس فضای برداری<sup>۱</sup> ولتاژ‌های نامبرده را تولید نمود. در این تحقیق کنترل مبدل سمت روتور در

دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور مورد بررسی قرار گرفته و در شبیه‌سازی به کار گرفته شد.

<sup>1</sup> Space Vector Pulse Width Modulation

### ۱-۹-۲ کنترل مبدل سمت روتور

در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی، توان اکتیو استاتور و توان راکتیو استاتور با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۷۵، ۱۲]:

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \quad (۵۰-۲)$$

$$P_s = \frac{3\omega_s L_m}{2L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \quad (۵۱-۲)$$

$$Q_s = \frac{3\omega_s}{2L_s} (-\varphi_{ds} (\varphi_{ds} - L_m i_{dr})) \quad (۵۲-۲)$$

همانطور که در روابط فوق مشاهده می‌شود با تنظیم جریان  $i_{qr}$  برای کنترل گشتاور و توان اکتیو استاتور و نیز با تنظیم جریان  $i_{dr}$  برای کنترل توان راکتیو استاتور، می‌توان گشتاور و توان اکتیو استاتور را به صورت کاملاً مستقل از توان راکتیو استاتور کنترل کرد. این کنترل مستقل نتایج مطلوبی را به دنبال دارد به طوریکه می‌توان با کنترل جریان  $i_{qr}$  سرعت و گشتاور را به گونه‌ای تنظیم نمود تا ماکزیمم توان از انرژی باد دریافت گردد و از طرفی با تنظیم جریان  $i_{dr}$  توان راکتیو استاتور را بدون اینکه تغییری در توان دریافتی از باد صورت گیرد کنترل نمود. بنابراین با مشخص شدن مقادیر مطلوب گشتاور، توان اکتیو و توان راکتیو استاتور، مقادیر جریان مرجع  $i_{qr}^*$  و  $i_{dr}^*$  در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور به صورت زیر بدست می‌آیند [۷۶]:

$$i_{qr}^* = \frac{4L_s}{3PL_m} \times \frac{T_e}{\varphi_{ds}} \quad (۵۳-۲)$$

$$i_{dr}^* = \frac{2L_s}{3\omega_s L_m} \times \frac{P_s}{\varphi_{ds}} \quad (۵۴-۲)$$

$$i_{dr}^* = \frac{2L_s}{3\omega_s L_m} \times \frac{Q_s}{\varphi_{ds}} + \frac{\varphi_{ds}}{L_m} \quad (۵۵-۲)$$

که رابطه (۵۴-۲) نشان‌دهنده جریان مرجع  $i_{qr}^*$  با توجه به گشتاور مورد نیاز، رابطه (۵۵-۲) نشان‌دهنده جریان مرجع  $i_{qr}^*$  با توجه به توان اکتیو مطلوب خروجی از استاتور و رابطه (۵۶-۲) نشان‌دهنده جریان مرجع  $i_{dr}^*$  با توجه به توان راکتیو مطلوب خروجی از استاتور می‌باشد.

با مشخص شدن جریان‌های مرجع به دو کنترل‌کننده جریان، جهت تطبیق جریان‌های  $i_{qr}$  و  $i_{dr}$  با مقادیر مرجع متناظر خود نیاز است. با جایگذاری روابط (۳۲-۲) و (۳۳-۲) در روابط (۲۸-۲) و (۲۹-۲) داریم:

$$V_{dr} = \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} + R_r i_{dr} - s \omega_s \sigma L_r i_{qr} - s \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \varphi_{qs} \quad (56-2)$$

$$V_{qr} = \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + R_r i_{qr} + s \omega_s \sigma L_r i_{dr} + s \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \varphi_{ds} \quad (57-2)$$

که در روابط فوق  $s$  لغزش روتور و  $\sigma$  فاکتور نشتی است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (58-2)$$

با توجه به روابط فوق، روابط زیر برای طراحی کنترل‌کننده‌های جریان در نظر گرفته می‌شوند [۸۷]:

$$V_{dr}^* = \sigma L_r V_{dr}' + R_r i_{dr} - s \omega_s \sigma L_r i_{qr} - s \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \varphi_{qs} \quad (59-2)$$

$$V_{qr}^* = \sigma L_r V_{qr}' + R_r i_{qr} + s \omega_s \sigma L_r i_{dr} + s \omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \varphi_{ds} \quad (60-2)$$

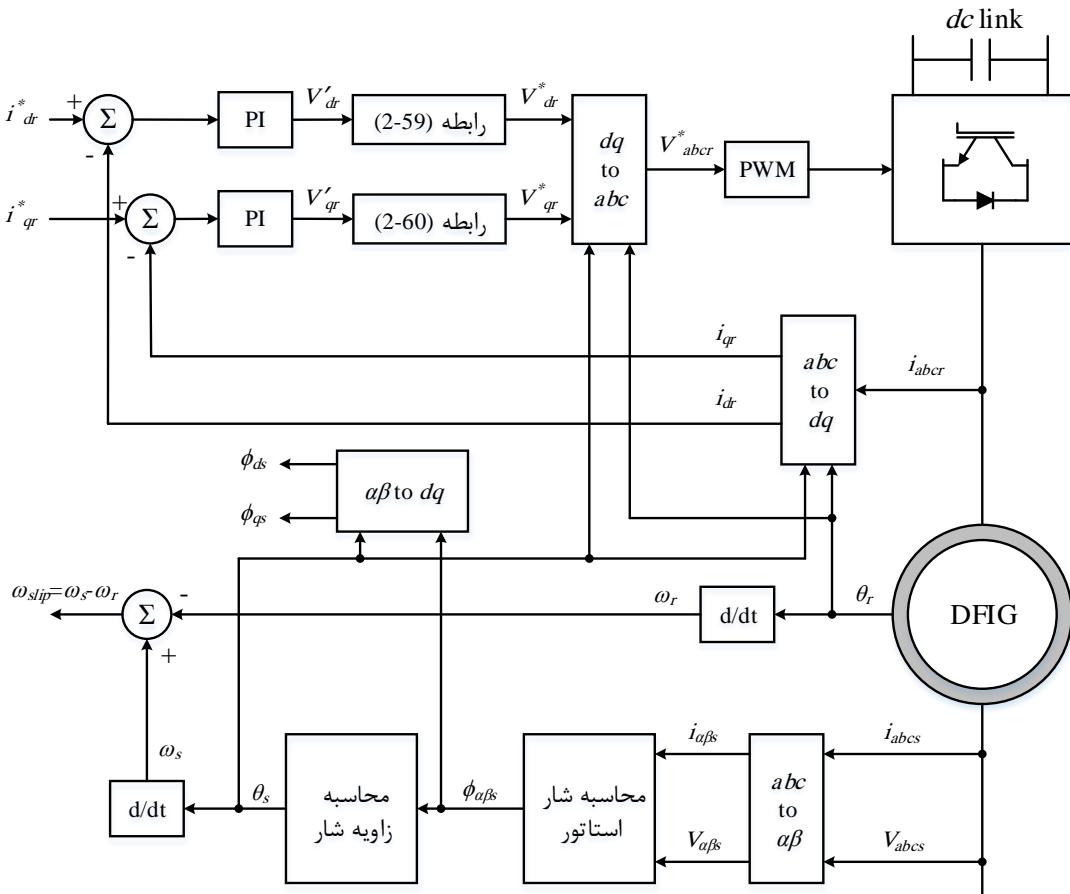
در روابط فوق ولتاژهای کنترلی  $V_{dr}'$  و  $V_{qr}'$  با استفاده از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی<sup>۱</sup> و با مقایسه جریان‌های  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  به دست آمده، با مقادیر مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  مطابق روابط زیر به دست می‌آیند:

<sup>1</sup> Proportional-Integral (PI)

$$V'_{dr} = \frac{di_{dr}}{dt} = K_{P1} (i_{dr}^* - i_{dr}) + K_{I1} \int (i_{dr}^* - i_{dr}) dt \quad (61-2)$$

$$V'_{qr} = \frac{di_{qr}}{dt} = K_{P1} (i_{qr}^* - i_{qr}) + K_{I1} \int (i_{qr}^* - i_{qr}) dt \quad (62-2)$$

که در روابط فوق  $K_{P1}$  ضریب تناسبی و  $K_{I1}$  ضریب انتگرالی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشند. با توجه به معادلات فوق، مقادیر ولتاژ مرجع  $V_{qr}^*$  و  $V_{dr}^*$  به دست می‌آیند که با توجه به زاویه  $\theta_s$  که همان زاویه محور  $d$  دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور می‌باشد و همچنین زاویه مربوط به موقعیت روتور،  $\theta_r$ ، ولتاژهای مرجع بدست آمده، به دستگاه  $abc$  منتقل می‌شوند. حال می‌توان به کمک روش‌های سوئیچینگ ولتاژهای مورد نظر را در خروجی مبدل سمت روتور برای تغذیه سیم‌پیچ‌های روتور ایجاد کرد. بلوک دیاگرام مربوط به کنترل مبدل سمت روتور در شکل (۱۴-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۴-۲) بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت روتور.

## ۲-۹-۲ کنترل مبدل سمت شبکه

کنترل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع هم راستا با بردار ولتاژ استاتور پیاده‌سازی می‌شود. با توجه به معادلات توان اکتیو و راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، می‌توان دریافت که توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه با کنترل  $i_{dg}$  و توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه با کنترل  $i_{qg}$  قابل کنترل هستند. برای کنترل ولتاژ لینک جریان مستقیم نیز با توجه به رابطه (۴۹-۲) می‌توان از جریان  $i_{qg}$  استفاده کرد. بدین ترتیب با تعیین توان راکتیو مرجع،  $V_{dc}^*$  مرجع به دست می‌آید و همچنین با توجه به ولتاژ لینک جریان مستقیم،  $V_{dq}^*$  و مقایسه آن با مقدار واقعی بدست آمده، می‌توان با استفاده از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی جریان  $i_{dg}^*$  مرجع را به دست آورد. طراحی کنترل کننده جریان برای مبدل سمت شبکه نیز مشابه با مبدل سمت روتور می‌باشد. با توجه به معادلات ولتاژ استاتور در روابط (۴۵-۲) و (۴۶-۲)، روابط زیر برای طراحی کنترل کننده جریان در نظر گرفته می‌شوند [۶۷، ۶۸]:

$$V_{dg}^* = R_g i_{dg} + L_g V_{dg}' - \omega_s L_g i_{qg} + V_{ds} \quad (۶۳-۲)$$

$$V_{qg}^* = R_g i_{qg} + L_g V_{qg}' + \omega_s L_g i_{dg} + V_{qs} \quad (۶۴-۲)$$

مقدار ولتاژهای کنترلی  $V_{dg}'$  و  $V_{qg}'$  با استفاده از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی و طبق روابط زیر به دست می‌آیند:

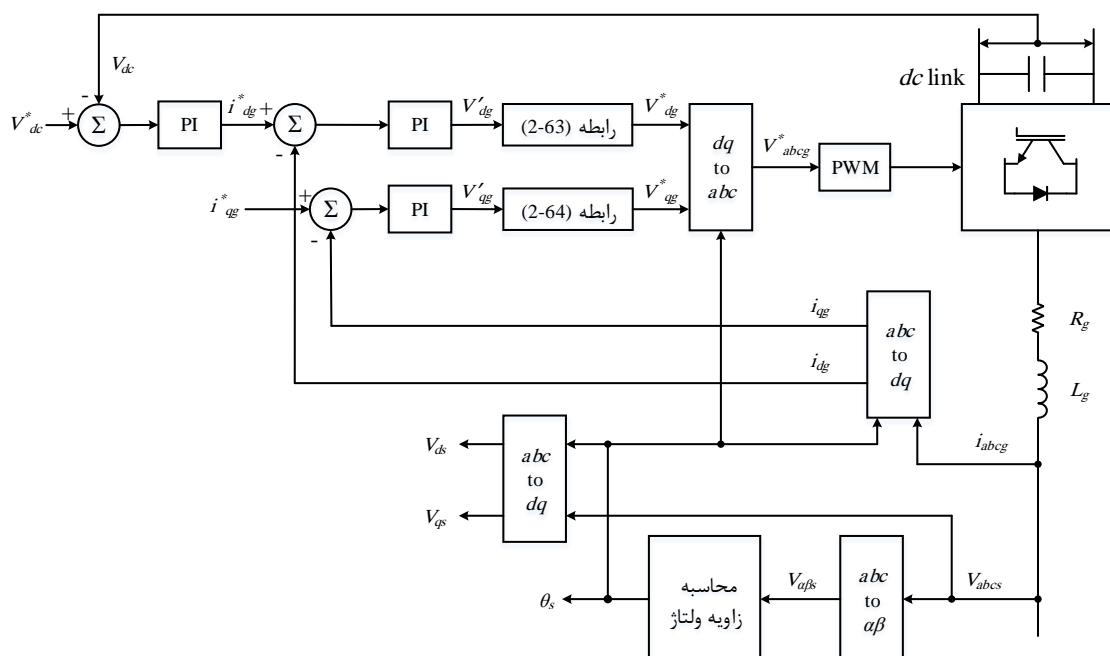
$$V_{dg}' = \frac{di_{dg}}{dt} = K_{P2} (i_{dg}^* - i_{dg}) + K_{I2} \int (i_{dg}^* - i_{dg}) dt \quad (۶۵-۲)$$

$$V_{qg}' = \frac{di_{qg}}{dt} = K_{P2} (i_{qg}^* - i_{qg}) + K_{I2} \int (i_{qg}^* - i_{qg}) dt \quad (۶۶-۲)$$

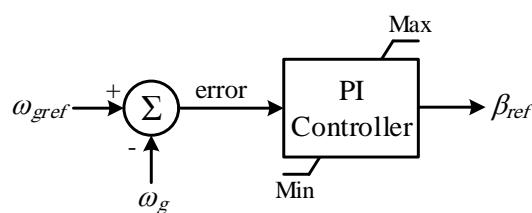
در شکل (۱۵-۲)، عملیات لازم جهت کنترل مبدل سمت شبکه به صورت بلوك دیاگرام نشان داده شده است.

### ۳-۹-۳ کنترل زاویه فراز

کنترل کننده زاویه فراز وظیفه افزایش یا کاهش زاویه فراز را بر عهده دارد. با تغییر زاویه فراز توان اکتیو تولید شده را می‌توان در حد توان مجاز نگه داشت. شکل (۱۶-۲) کنترل کننده زاویه فراز را نشان می‌دهد [۷۷]. همانطور که دیده می‌شود کنترل کننده دارای یک فیدبک از سرعت زاویه‌ای زنراتور است. سرعت مرجع نیز بر روی سرعت زاویه‌ای ماکریم که معمولاً ۲۰ درصد بیشتر از سرعت نامی است، تنظیم می‌شود. خطای حاصل شده پس از عبور از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی، زاویه فراز مرجع را نتیجه می‌دهد که این زاویه وارد سیستم فراز می‌شود.



شکل (۱۵-۲) بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت شبکه.



شکل (۱۶-۲) کنترل کننده فراز.

## ۱۰-۲ دینامیک‌های چشم‌پوشی شده در مدل‌سازی

یکی از دینامیک‌های صرفنظر شده در مدل‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی این است که فرض بر آن گرفته شده است که پارامترهای توربین بادی ثابت هستند، در صورتی که این پارامترها به شرایط عملکرد توربین وابسته هستند. علاوه بر مورد فوق، از موارد زیر نیز در مدل‌سازی چشم‌پوشی شده است:

- مکانیسم تنظیم زاویه توربین: در این مدل‌سازی فرض بر آن گرفته شده است که باد همواره عمود بر صفحه روتور می‌وزد.
- مدل ایرودینامیکی استاتیکی: فرض شده است که ایرودینامیک توربین به صورت استاتیکی عمل می‌کند که در نتیجه از خواص دینامیکی که به دلیل تغییرات در باد، سرعت روتور و زاویه فراز به وجود می‌آیند، صرفنظر شده است.
- پره‌های سفت<sup>1</sup>: فرض شده است که پره‌ها سفت هستند ولی در عمل آن‌ها، به خصوص در توربین‌های بادی بزرگ، انعطاف‌پذیر می‌باشند. این ساده‌سازی تمامی مدهای مربوط به خم شدن پره‌ها را از بین می‌برد.
- عملیات سوئیچینگ در مبدل‌ها: همانند اکثر مدل‌سازی‌هایی که برای توربین بادی ارائه شده است، در این مدل‌سازی نیز از عملیات سوئیچینگ در مبدل‌ها صرفنظر شده است. دلیل اصلی برای صرفنظر کردن از عملیات سوئیچینگ، بالا رفتن بیش از حد زمان شبیه‌سازی است. پس فرض بر آن گرفته شده است که مبدل‌ها با سوئیچینگ مناسب، ولتاژ‌های جریان متناوب مطلوب را که با توجه به روش‌های کنترلی به کار گرفته شده در ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه به دست آمده‌اند، در خروجی خود تولید می‌کنند.

<sup>1</sup> Stiff Blades

## ۱۱-۲ سنسورهای موجود در سیستم تبدیل انرژی بادی

در مدل‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی به طور معمول از دینامیک سنسورهای به کار رفته شده در سیستم صرف‌نظر می‌شود زیرا آن‌ها به طرز قابل ملاحظه‌ای سریع‌تر از دینامیک‌های توربین بادی هستند. تنها استثنای در مورد بادسنج است که به صورت یک فیلتر پائین‌گذر مرتبه اول با ثابت زمانی برابر با نیم ثانیه مدل می‌شود [۷۸]. سپس سیگنال‌های اندازه‌گیری شده با نویز توزیع شده گوسی میانگین-صفر<sup>۱</sup> و انحراف معیاری طبق جدول (۲-۲) جمع می‌شوند.

## ۱۲-۲ دسته‌بندی انواع خطاهای امکان‌پذیر در سیستم تبدیل انرژی بادی

خطا پدیده‌ای است که می‌تواند در قسمت‌های مختلف یک سیستم، اتفاق بیافتد. به همین دلیل خطاهای آن که در کدام قسمت از سیستم به وقوع پیوسته‌اند، دسته‌بندی می‌کنند [۷۹]:

۱- خطای محرک: این نوع خطا باعث از بین رفتن کامل و یا جزئی کنترل سیستم می‌شود. به عنوان مثال یک محرک کاملاً از دست رفته، محرکی است که بدون توجه به ورودی اعمال شده به آن، هیچ عمل تحریکی انجام نمی‌دهد.

جدول (۲-۲) سنسورهای موجود در سیستم تبدیل انرژی بادی.

| متغیر مورد اندازه‌گیری     | نوع سنسور  | انحراف معیار           |
|----------------------------|------------|------------------------|
| سرعت زاویه‌ای ژنراتور      | انکدر سرعت | ۰/۰ ۱۵۸ rad/s          |
| زاویه فراز                 | انکدر      | ۰/۲°                   |
| سرعت روتور توربین          | انکدر سرعت | ۰/۰ ۲۵ rad/s           |
| شتاب برج                   | شتاب‌سنج   | ۰/۰ ۱ m/s <sup>2</sup> |
| سرعت باد (سرعت در یک نقطه) | بادسنج     | ۰/۵ m/s                |
| ولتاژهای ژنراتور           | -          | ۰/۰ ۱ v                |
| جریان‌های ژنراتور          | -          | ۰/۰ ۱ A                |

<sup>۱</sup> Zero-Mean Gaussian Distributed Noise

۲- خطای سنسور: این نوع خطا نشان‌دهنده اطلاعات نادرستی است که سنسور در اختیار

سیستم قرار می‌دهد.

۳- خطای عنصر<sup>۱</sup>: خطاهایی که در اجزای سیستم اتفاق می‌افتد و تمامی خطاهایی که نتوان

آنها را به عنوان خطای محرک یا خطای سنسور در نظر گرفت، خطای عنصر هستند. در

واقع این نوع خطا بیانگر تغییر در پارامترهای فیزیکی سیستم می‌باشد که معمولاً باعث تغییر

در رفتار دینامیکی سیستم تحت کنترل می‌شوند.

همچنین دسته‌بندی دیگری نیز برای خطاهای بر اساس مشخصه زمانی آنها وجود دارد. در این

دسته‌بندی خطاهای به سه دسته ناگهانی<sup>۲</sup>، نرم<sup>۳</sup> و موقتی<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. خطاهای ناگهانی اغلب بر اثر

نقص فنی سخت‌افزار به وقوع می‌پیوندند و بسیار شدید هستند. این نوع خطاهای بر عملکرد و پایداری

سیستم تأثیر بسزایی می‌گذارند. خطاهای نرم نشان‌دهنده تغییرات پارامتری کندی است که بر اثر

کهنه شدن سیستم رخ می‌دهد. خطاهای موقتی نیز شامل خطاهایی است که به صورت متناوب ظاهر

می‌شوند و سپس ناپدید می‌گردند [۳۹].

تمامی خطاهای امکان‌پذیر در سیستم تبدیل انرژی بادی که در مراجع [۷]، [۲۱]، [۲۵-۳۰]، [۳۶-۳۰]

[۸۰] ذکر شده‌اند، در جدول‌های (۳-۲) و (۴-۲) گردآوری شده‌اند. در واقع خطاهای آورده شده در

جدول (۳-۲) خطاهایی هستند که در صورت وقوع، باید تشخیص داده شوند ولی توربین بادی

می‌تواند به فعالیت خود در سطح پائین‌تری از عملکرد ادامه دهد. اما دسته‌ای دیگر از خطاهای نیز در

جدول (۴-۲) آورده شده‌اند که در صورت وقوع این گونه خطاهای سیستم تبدیل انرژی بادی باید از

شبکه خارج شود، زیرا ادامه عملکرد توربین در این حالت موجب خرابی کامل توربین بادی خواهد شد.

هر یک از مراجع به بررسی تعداد و یا گروهی از این خطاهای پرداخته است، زیرا در نظر گرفتن تمامی

خطاهای به گستره شدن بیش از حد تحقیقات و پیچیدگی آن می‌انجامد. درباره شدت و درجه اهمیت

<sup>1</sup> Component

<sup>2</sup> Abrupt

<sup>3</sup> Incipient

<sup>4</sup> Intermittent

این خطاهای در مراجع فوق به صورت مشروح توضیح داده شده است. در این تحقیق نیز خطاهای به وقوع پیوسته در سنسورهای فراز، سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و محرک‌های فراز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول (۳-۲) خطاهایی که امکان ادامه فعالیت توربین بادی در صورت وقوع آن‌ها وجود دارد.

| تأثیر خطا                                | نوع خطا   | اجزاء                       |
|--|---|-----------------------------|
| چرخش نامتعادل روتور                      | خروجی بایاس شده   | سنسور فراز (۱، ۲، ۳)        |
| تغییر دینامیک                            | پوسیدگی پمپ هیدرولیکی   |                             |
| تغییر دینامیک                            | نشت هیدرولیک  | محرك فراز (۱، ۲، ۳)         |
| تغییر دینامیک                            | حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک  |                             |
| پائین آمدن راندمان                       | کشیفی بر روی پره‌ها   |                             |
| تغییر دینامیک                            | آسیب‌دیدگی نوک پره  | (۳، ۲، ۱)                   |
| چرخش غیر یکنواخت                         | جایگذاری غلط  |                             |
| پائین آمدن راندمان                       | پوسیدگی یاطاقان   | محور سرعت پائین             |
| چرخش غیر یکنواخت                         | فرسودگی دندانه‌ها   | جعبه دنده                   |
| چرخش غیر یکنواخت                         | جایگذاری غلط  |                             |
| پائین آمدن راندمان                       | پوسیدگی یاطاقان   | محور سرعت بالا              |
| ایجاد ولتاژ های مرجع اشتباه برای مبدل‌ها | خطاهای داخلی مبدل‌ها از قبیل اتصال کوتاه عناصر سوئیچینگ               | مبدل‌ها                     |
| ایجاد هارمونیک در جریان‌های ژنراتور      | خطاهای داخلی ژنراتور از قبیل اتصال کوتاه سیم‌پیچ‌های استاتور یا روتور | ژنراتور                     |
| آفست سرعت                                | خطای تناسبی   |                             |
| سرعت کم یا زیاد                          | خروجی ثابت  | سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور |
| سرعت کم یا زیاد                          | بدون خروجی  |                             |

جدول (۴-۲) خطاهایی که در صورت وقوع آن‌ها باید توربین بادی از شبکه خارج شود.

| تأثیر خطای                | نوع خطای        | اجزاء                        |
|---------------------------|-----------------|------------------------------|
| حالت کنترل ناپذیر         | انسداد شیر      | محرك فراز (۱، ۲، ۳)          |
| حالت کنترل ناپذیر         | انسداد پمپ      | محرك فراز (۱، ۲، ۳)          |
| صدمه به لینک جریان مستقیم | عبور از حد مجاز | ولتاژ خازن لینک جریان مستقیم |
| صدمه به ژنراتور           | عبور از حد مجاز | ولتاژ ترمینال ژنراتور        |
| صدمه به ژنراتور           | عبور از حد مجاز | جریان ترمینال ژنراتور        |

## ۱۳-۲ خصوصیات و مدل‌سازی خطاهای

هدف این بخش بررسی نحوه مدل‌سازی خطای سنسور فراز، سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و محرك فراز می‌باشد. برای مدل‌سازی این خطاهای به پارامترهایی نیاز است که دینامیک خطاهای نرم را توصیف کند. این پارامترها در جدول (۵-۲) نشان داده شده‌اند [۷].

### ۱۳-۱ خطای سنسور فراز

خطای داخلی در سنسور فراز ممکن است موجب بروز خروجی بایاس شده، شود. سیگنال اندازه‌گیری شده از سنسوری که تحت تأثیر خطای بایاس قرار گرفته است، بر روی سیستم فراز حلقه بسته و زاویه فراز اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد. با در نظر گرفتن اثر بایاس، رابطه (۲۴-۲) را می‌توان به صورت زیر اصلاح نمود [۷]:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\zeta\omega_n \dot{\beta}(t) - \omega_n^2 (\beta(t) + \beta_{bias}(t)) + \omega_n^2 \beta_{ref}(t) \quad (۶۷-۲)$$

همچنین رابطه زاویه فراز اندازه‌گیری شده را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\beta_{meas}(k) = \beta(k) + \beta_{bias}(k) + v_\beta(k) \quad (۶۸-۲)$$

که در رابطه فوق  $\nu_{\beta}^k$  نویز توزیع شده گوسی میانگین-صفر می‌باشد. برای مدل‌سازی خطای نرم، از نرخ  $\beta_{bias}^{(t)}$  به همراه رنج آن که در جدول (۲-۵) آورده شده است، استفاده می‌شود. سیستم تشخیص خطا باید توانایی تشخیص خطاهای بزرگتر از  $\pm 5\%$  مقدار صحیح را داشته باشد. برای از بین بردن اثر این خطا نیز باید اندازه صحیح زاویه فراز به کنترل‌کننده اعمال شود، یعنی باید مقدار بایاس تشخیص داده شده و در نهایت زاویه فراز صحیح بدون بایاس، محاسبه شده و سپس به کنترل‌کننده اعمال شود.

### ۲-۱۳-۲ خطای محرک فراز

پارامترهای مربوط به خطاهای مختلفی که در محرک فراز به وقوع می‌پیوندند، در جدول (۶-۲) نشان داده شده است. با توجه به این پارامترها، می‌توان خطای محرک فراز را مدل‌سازی نمود. این پارامترها با توجه به پارامترهای آورده شده در مرجع [۷] معادل‌سازی شده‌اند.

### ۲-۱۳-۱ مدل‌سازی پوسیدگی پمپ هیدرولیکی

پوسیدگی پمپ هیدرولیکی خطای نرم است و به فشار پائین پمپ منجر می‌شود. این خطا پارامترهای سیستم فراز حلقه بسته را در رابطه (۲۴-۲) به صورت زیر تغییر می‌دهد [۷]:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\tilde{\zeta}(t)\tilde{\omega}_n(t)\dot{\beta}(t) - \tilde{\omega}_n^2(t)\beta(t) + \tilde{\omega}_n^2(t)\beta_{ref}(t) \quad (69-2)$$

که در رابطه فوق داریم:

$$\tilde{\zeta}(t) = (1 - \alpha_{pw}(t))\zeta + \alpha_{pw}(t)\zeta_{pw} \quad (70-2)$$

$$\tilde{\omega}_n(t) = (1 - \alpha_{pw}(t))\omega_n + \alpha_{pw}(t)\omega_{n,pw} \quad (71-2)$$

زمانی که  $\alpha_{pw}(t) = 0$  است، پمپ فشار نامی را دریافت می‌کند، اما زمانی که  $\alpha_{pw}(t) = 1$  می‌شود، فشار افت می‌کند. تخمین زده شده است که  $\alpha_{pw}(t) = 1$  معادل سطح فشار ۷۵ درصد مقدار نامی می‌باشد که پس از حدود ۲۰ سال کارکرد قابل پدیدار شدن است.

جدول (۵-۲) خصوصیات مربوط به رنج و محدودیت تغییر نرخ خطاهای نرم.

| مشخصه  | نوع خطای                       | اجزاء                          |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| $\dot{\beta}_{bias}(t) \in [-1^\circ / \text{month}, 1^\circ / \text{month}]$<br>$\beta_{bias}(t) \in [-7^\circ, 7^\circ]$ | باپاس                          | سنسور فراز                     |
| $\dot{\alpha}_{pw}(t) \in [0, 1 / (20 \text{ years})]$<br>$\alpha_{pw}(t) \in [0, 1]$                                      | پوسیدگی پمپ هیدرولیکی          |                                |
| $\dot{\alpha}_{hl}(t) \in [0, 1 / (100 \text{ s})]$<br>$\alpha_{hl}(t) \in [0, 1]$   | نشت هیدرولیک                   | محرك فراز (۱، ۲، ۳)            |
| $\dot{\alpha}_{ha}(t) \in [-1 / \text{month}, 1 / \text{month}]$<br>$\alpha_{ha}(t) \in [0, 1]$                            | حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک |                                |
| $\dot{\alpha}_{pe}(t) \in [-1 / \text{month}, 1 / \text{month}]$<br>$\alpha_{pe}(t) \in [-0.1, 0.1]$                       | خطای تناسبی                    | سنسور سرعت<br>زاویه‌ای ژنراتور |

جدول (۶-۲) پارامترهای مربوط به انواع خطاهای محرك فراز.

| پارامترها  | نوع خطای                       |
|--|--------------------------------|
| $\omega_n = 8.88 \text{ rad/s}$ , $\zeta = 0.9$            | بدون خطای                      |
| $\omega_{n,pw} = 12.11 \text{ rad/s}$ , $\zeta_{pw} = 0.6$ | پوسیدگی پمپ هیدرولیکی          |
| $\omega_{n,hl} = 6 \text{ rad/s}$ , $\zeta_{hl} = 0.3$     | نشت هیدرولیک                   |
| $\omega_{n,ha} = 9.5 \text{ rad/s}$ , $\zeta_{ha} = 0.4$   | حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک |

## ۲-۱۳-۲ مدل سازی نشت هیدرولیک

نشت هیدرولیک در دسته خطاهای نرم قرار می‌گیرد که بسیار سریعتر از پوسیدگی پمپ پدیدار می‌شود. نشت هیدرولیک موجب تغییر پارامترهای سیستم فراز حلقه بسته به صورت زیر می‌شود [۷]:

$$\tilde{\zeta}(t) = (1 - \alpha_{hl}(t))\zeta + \alpha_{hl}(t)\zeta_{hl} \quad (72-2)$$

$$\tilde{\omega}_n(t) = (1 - \alpha_{hl}(t))\omega_n + \alpha_{hl}(t)\omega_{n,hl} \quad (73-2)$$

که  $\alpha_{hl}(t) = 1$  معادل ۵۰ درصد فشار نامی خواهد بود.

### ۳-۲-۱۳-۳ مدل سازی حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک

حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک نیز یک خطای نرم است که پارامترهای سیستم فراز حلقه بسته

را به صورت زیر تغییر می‌دهد [۷]:

$$\tilde{\zeta}(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\zeta + \alpha_{ha}(t)\zeta_{ha} \quad (74-2)$$

$$\tilde{\omega}_n(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\omega_n + \alpha_{ha}(t)\omega_{n,ha} \quad (75-2)$$

بر خلاف دو خطای قبل، این خطای می‌تواند از بین برود، زیرا  $\dot{\alpha}_{ha}(t)$  طبق جدول (۵-۲) می‌تواند هم مثبت و هم منفی باشد. حداقل مقادیر که به دلیل  $\alpha_{ha}(t) = 0$  و  $\alpha_{ha}(t) = 1$  اتفاق می‌افتد مربوط به حجم هوای به ترتیب ۷ درصد و ۱۵ درصد در روغن هیدرولیک می‌باشد.

همانطور که اشاره شد ۳ دسته خطای محرک فوق موجب تغییر دینامیک سیستم فراز حلقه بسته می‌شوند. مطلوب است که این خطاهای در طی حداقل زمان ۱۰۰ ثانیه توسط سیستم تشخیص خطای تشخیص داده شوند.

### ۳-۱۳-۳ خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور

دو نوع خطای برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور در نظر گرفته شد که این خطاهای خروجی ثابت و خطای تناسبی در خروجی سنسور می‌باشند. این خطاهای به صورت زیر مدل می‌شوند.

#### ۳-۱۳-۳-۱ خطای تناسبی در خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور

این خطای بهره سنسور را طبق رابطه زیر تغییر می‌دهد [۷]:

$$\omega_{g,meas}(k) = (1 + \alpha_{pe}(k))\omega_g(k) + v_{og}(k) \quad (76-2)$$

که در رابطه فوق  $1 + \alpha_{pe}(k) > 1$  بهره سنسور می‌باشد. همچنین می‌توان این خطای نرم طبق اطلاعات آورده شده در جدول (۵-۲) در نظر گرفت.

### ۲-۳-۲ خروجی ثابت از سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور

این خطا از نوع خطاهای ناگهانی است که می‌تواند در هر زمانی طبق رابطه اندازه‌گیری زیر به وقوع پیوندد [۷]:

$$\omega_{g,meas}(k) = \omega_{g,meas}(k_f) \quad \forall k > k_f \quad (77-2)$$

همچنین خطای نداشتن خروجی از سنسور را می‌توان حالت خاصی از خروجی ثابت از سنسور در نظر گرفت و طبق رابطه فوق مدل‌سازی نمود. هر دو خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور باید تا حد امکان سریع شناسایی شوند. به منظور اطمینان از عملکرد صحیح توربین بادی، نیاز است که سیستم تشخیص خطای خطاها توانی بیشتر از  $\pm 5\%$  مقدار صحیح را تشخیص دهد.

### ۱۴-۲ شبیه‌سازی عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در شرایط مختلف

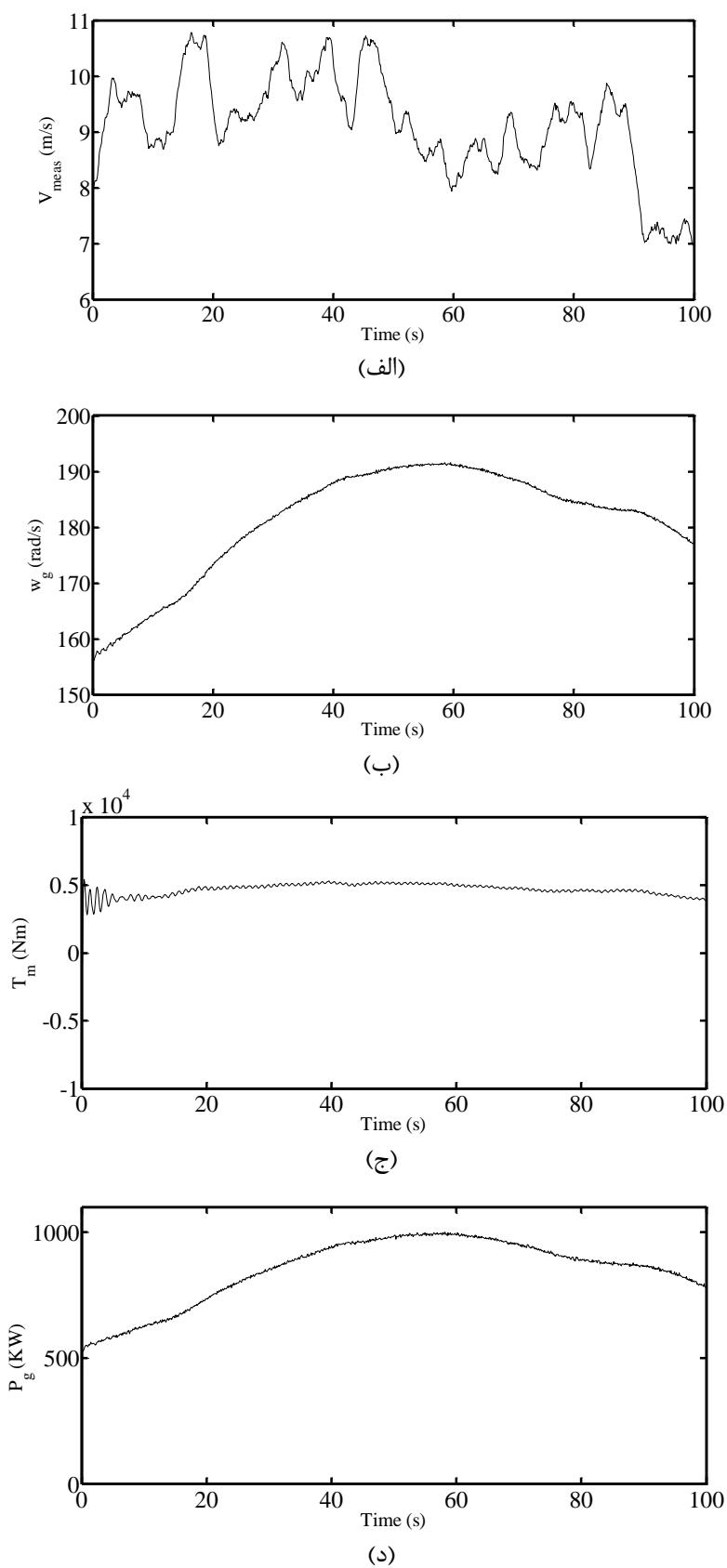
در این بخش مدل ارائه شده برای سیستم تبدیل انرژی بادی در شرایط عملکرد نرمال و در هنگام بروز انواع خطاهای شبیه‌سازی می‌شود. توربین بادی مدل شده در این تحقیق دارای پارامترهایی مطابق با جدول (۷-۲) می‌باشد. این پارامترها واقعی بوده و از مرجع [۲۱] استخراج شده‌اند. شبیه‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK نسخه R2008a انجام گرفت و حل‌کننده با گام‌های متغیر مورد استفاده قرار گرفت که در آن اندازه گام ماکزیمم برابر  $10^{-3}$  و اندازه گام مینیمم  $10^{-4}$  انتخاب شدند.

### ۱۴-۲-۱ شبیه‌سازی عملکرد نرمال سیستم تبدیل انرژی بادی

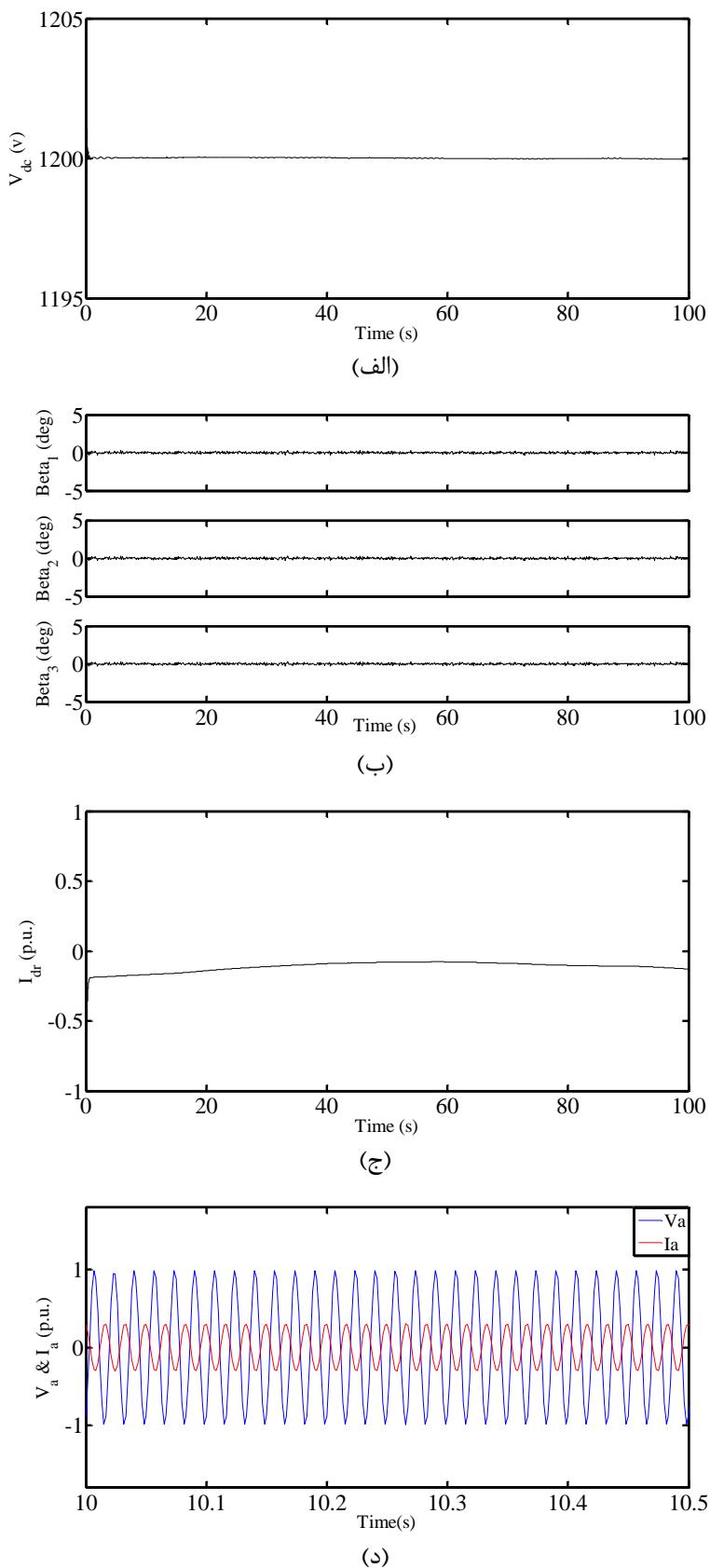
در این بخش سیستم تبدیل انرژی بادی در شرایط نرمال یعنی بدون حضور انواع خطاهای در سیستم شبیه‌سازی می‌شود. در ابتدا شبیه‌سازی برای سرعت بادی بین سرعت باد حداقل و سرعت باد نامی انجام می‌پذیرد. به این منظور سرعت باد میانگین ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی برای مدت ۱۰۰ ثانیه تحت شرایط نرمال انجام پذیرفت. هدف از کنترل سیستم تبدیل انرژی بادی در این شبیه‌سازی، دریافت حداکثر انرژی ممکن از باد می‌باشد که این امر طبق منحنی آورده شده در شکل (۱۴-۲) انجام‌پذیر است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۷-۲) الی (۱۹-۲) نشان داده شده‌اند.

جدول (۷-۲) پارامترهای سیستم تبدیل انرژی بادی.

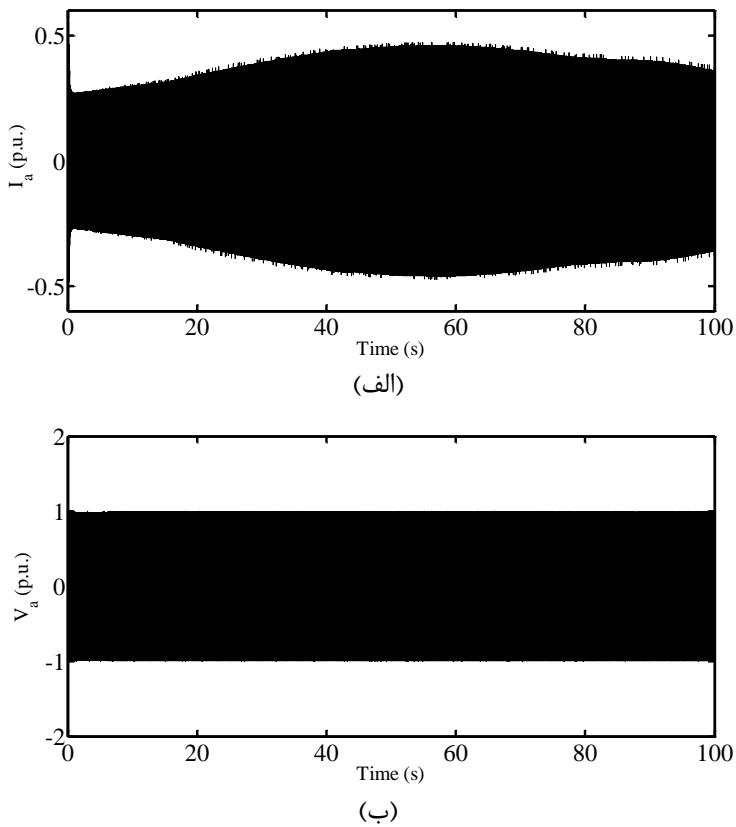
| پارامتر   | مقدار                            | متغیر            |
|---|----------------------------------|------------------|
| توان خروجی نامی                                 | ۲ MW                             | $P_{e,nom}$      |
| سرعت ژنراتور نامی                               | ۱۹۵/۸ rad/s                      | $\omega_{g,nom}$ |
| نرخ سرعت نوک پره نامی                           | ۸/۲۸۳                            | $\lambda_{nom}$  |
| نسبت چرخ دنده                                   | ۸۵                               | $N_g$            |
| ضریب سختی قسمتهای درایو                         | $1/0.383 \times 10^8$            | $K_{dt}$         |
| ضریب میرائی قسمتهای درایو                       | $1/0.383 \times 10^6$            | $B_{dt}$         |
| ارتفاع برج                                      | ۶۰ m                             | $h$              |
| طول پره   | ۳۰/۵۶ m                          | $R$              |
| ممان اینرسی روتور                               | $8/7 \times 10^6 \text{ kgm}^2$  | $J_r$            |
| ممان اینرسی ژنراتور                             | ۱۵۰ $\text{kgm}^2$               | $J_g$            |
| شعاع بالای برج                                  | ۲/۱۲۵ m                          | $a_{t,t}$        |
| شعاع پائین برج                                  | ۲/۳۷۵ m                          | $a_{t,b}$        |
| طول شفت   | ۷ m                              | $l_s$            |
| جرم برج   | $250 \times 10^7 \text{ kg}$     | $M_t$            |
| ضریب سختی برج                                   | $5/55 \times 10^9 \text{ Nm}$    | $K_t$            |
| ضریب میرائی برج                                 | $2/98 \times 10^3 \text{ N/m/s}$ | $B_t$            |
| جرم پره‌ها                                      | ۵۱۵۴ kg                          | $m_b$            |
| سطح انحراف ناگهانی مسیر باد                     | ۰/۲                              | $v$              |
| سرعت باد حداقل (شروع به کار)                    | ۴ m/s                            | $v_{w,cut-in}$   |
| سرعت باد نامی                                   | ۱۲ m/s                           | $v_{w,n}$        |
| سرعت باد حداکثر (قطع)                           | ۲۵ m/s                           | $v_{w,cut-off}$  |
| ولتاژ نامی استاتور                              | ۶۹۰ v                            | $V_n$            |
| فرکانس نامی                                     | ۶۰ Hz                            | $f_n$            |
| مقاومت سیم‌پیچ هر فاز استاتور                   | ۰/۰۰۶۹۳۱۴ p.u.                   | $R_s$            |
| مقاومت سیم‌پیچ هر فاز روتور                     | ۰/۰۰۹۰۶ p.u.                     | $R_r$            |
| اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ هر فاز استاتور           | ۰/۰۸۰۸۳ p.u.                     | $L_{ls}$         |
| اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ هر فاز روتور             | ۰/۰۹۹۳۴ p.u.                     | $L_{lr}$         |
| اندوکتانس متقابل                                | ۳/۲۹ p.u.                        | $L_m$            |
| تعداد قطب‌ها                                    | ۴                                | $p$              |
| ولتاژ نامی لینک جریان مستقیم                    | ۱۲۰۰ v                           | $V_{dc}$         |
| ظرفیت خازن لینک جریان مستقیم                    | $10000 \times 10^{-9} \text{ F}$ | $C$              |
| مقاومت مدار کوپلینگ بین شبکه و مبدل سمت شبکه    | ۰/۰۰۱۵ p.u.                      | $R_g$            |
| اندوکتانس مدار کوپلینگ بین شبکه و مبدل سمت شبکه | ۰/۱۵ p.u.                        | $L_g$            |



شکل (۱۷-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال: (الف) سرعت باد اندازه‌گیری شده، (ب) سرعت زاویه‌ای ژنراتور، (ج) گشتاور مکانیکی و (د) توان اکتیو تولید شده.



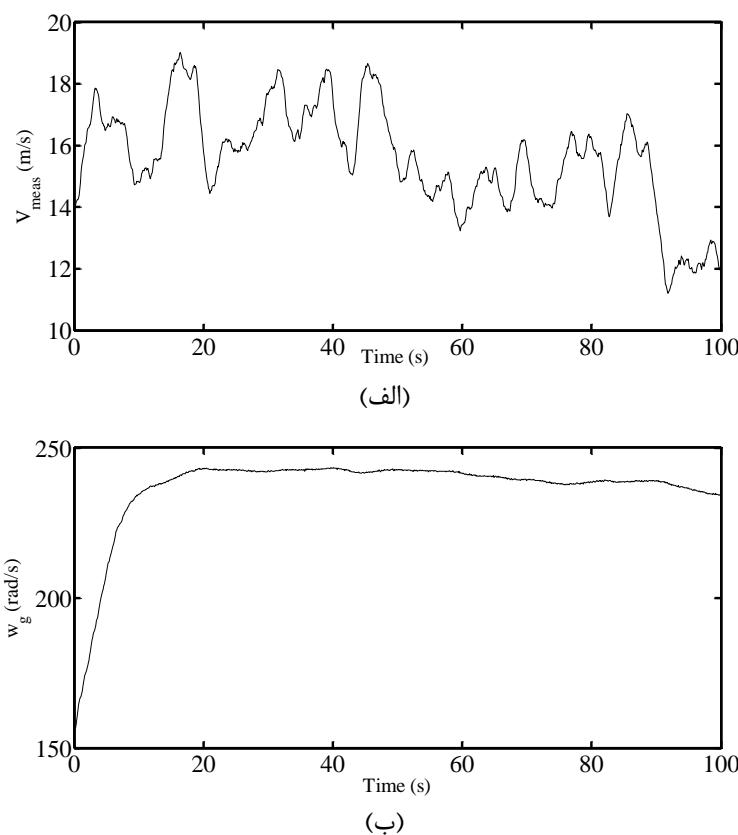
شکل (۱۸-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال: (الف) ولتاژ لینک جریان مستقیم، (ب) زاویه فراز پره‌ها، (ج) جریان روتور در راستای محور  $d$  و (د) ولتاژ و جریان فاز  $a$  در مدت نیم ثانیه.



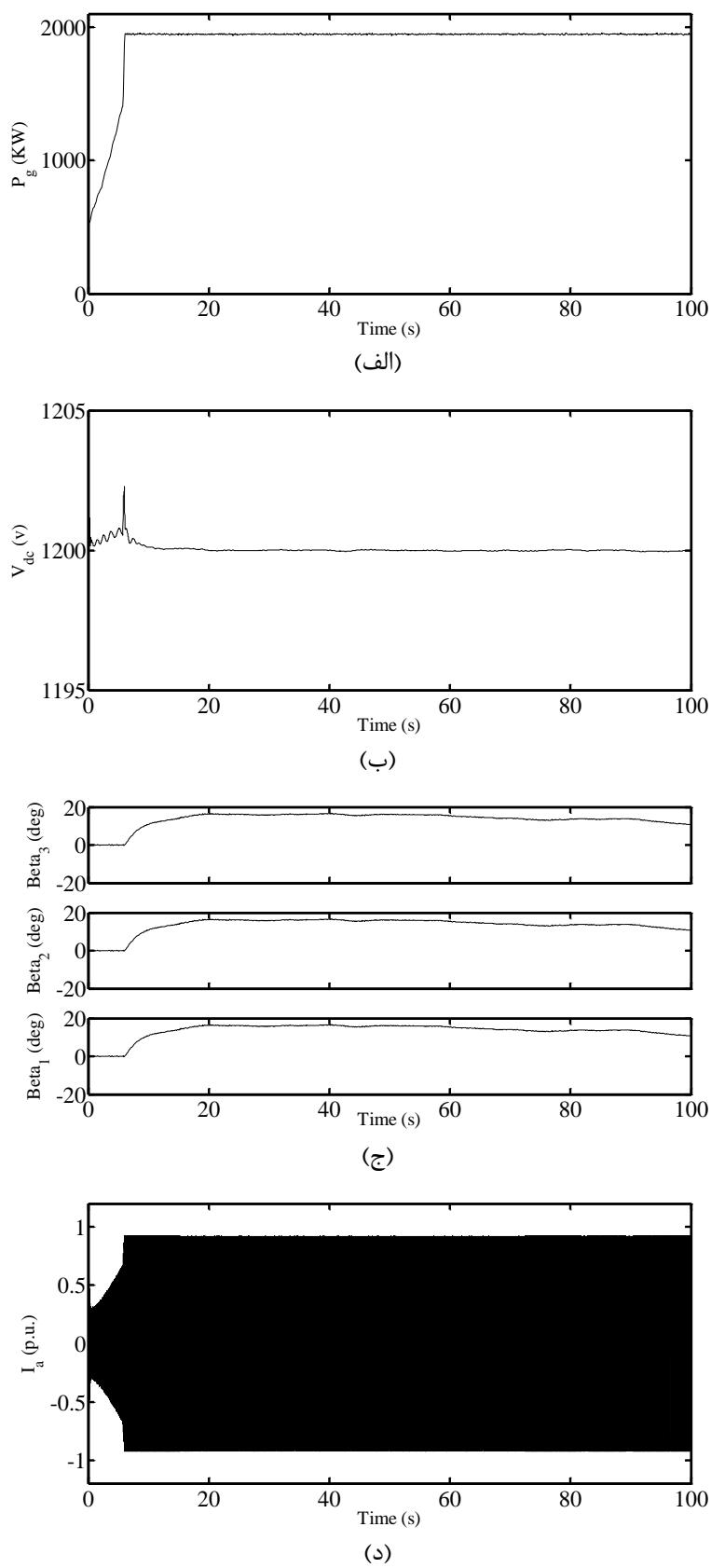
شکل (۱۹-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه در شرایط نرمال: (الف) جریان فاز  $a$  و (ب) ولتاژ فاز  $a$ .

با توجه به نتایج شبیه‌سازی با شروع به کار توربین بادی در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه و با افزایش سرعت باد، سرعت زاویه‌ای ژنراتور و همچنین سرعت روتور افزایش می‌یابند. در شبیه‌سازی، حالت اولیه‌ای برای سیستم تبدیل انرژی بادی به منظور عبور سریع از حالت گذرا در نظر گرفته شد. این حالت اولیه معادل با سرعت زاویه‌ای ژنراتور برابر با  $7915/0$  می‌باشد. این شرایط اولیه از اولین اجرای شبیه‌سازی با شرایط اولیه صفر برای چندین بار و قرار دادن حالت‌های نهایی مرحله قبل به عنوان شرایط اولیه مرحله بعد به دست آمدند. با افزایش سرعت زاویه‌ای ژنراتور، توان اکتیو تولید شده توسط ژنراتور نیز افزایش می‌یابد. در طول زمان شبیه‌سازی با توجه به شرایط عملکرد، ولتاژ لینک جریان مستقیم دچار نوسان نشده و تقریباً بر روی ۱۲۰۰ ولت ثابت نگه داشته شده است، که این امر در شکل (۱۸-۲-الف) قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۱۸-۲-ب) همانطور که ملاحظه می‌شود، زاویه فراز پره‌های ۱، ۲ و ۳ بر روی صفر درجه ثابت باقی مانده‌اند. این بدان علت است که در

این سرعت باد نیازی به نگه داشتن سرعت زاویه‌ای ژنراتور پائین‌تر از مقدار ماکزیمم آن نیست و در نتیجه نیازی به کاهش راندمان تبدیل ایرودینامیکی توسط تغییر زوایای فراز نخواهد بود. همچنین با توجه به شکل (۲۰-۲) می‌توان دریافت که با افزایش توان اکتیو تولید شده، دامنه جریان خروجی فاز  $a$  سیستم تبدیل انرژی بادی نیز افزایش می‌یابد در حالی که دامنه ولتاژ خروجی فاز  $a$  تقریباً بر روی مقدار ۱ p.u. ثابت مانده است. شبیه‌سازی بعدی به ازای سرعت باد میانگین ۱۴ متر بر ثانیه برای مدت ۱۰۰ ثانیه تحت شرایط نرمال انجام پذیرفت. نتایج این شبیه‌سازی نیز در شکل‌های (۲۰-۲) و (۲۱-۲) آورده شده است.



شکل (۲۰-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نرمال: (الف) سرعت باد اندازه‌گیری شده و (ب) سرعت زاویه‌ای ژنراتور.



شکل (۲۱-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نرمال: (الف) توان اکتیو تولید شده، (ب) ولتاژ لینک جریان مستقیم، (ج) زاویه فراز پره‌ها و (د) جریان فاز  $a$ .

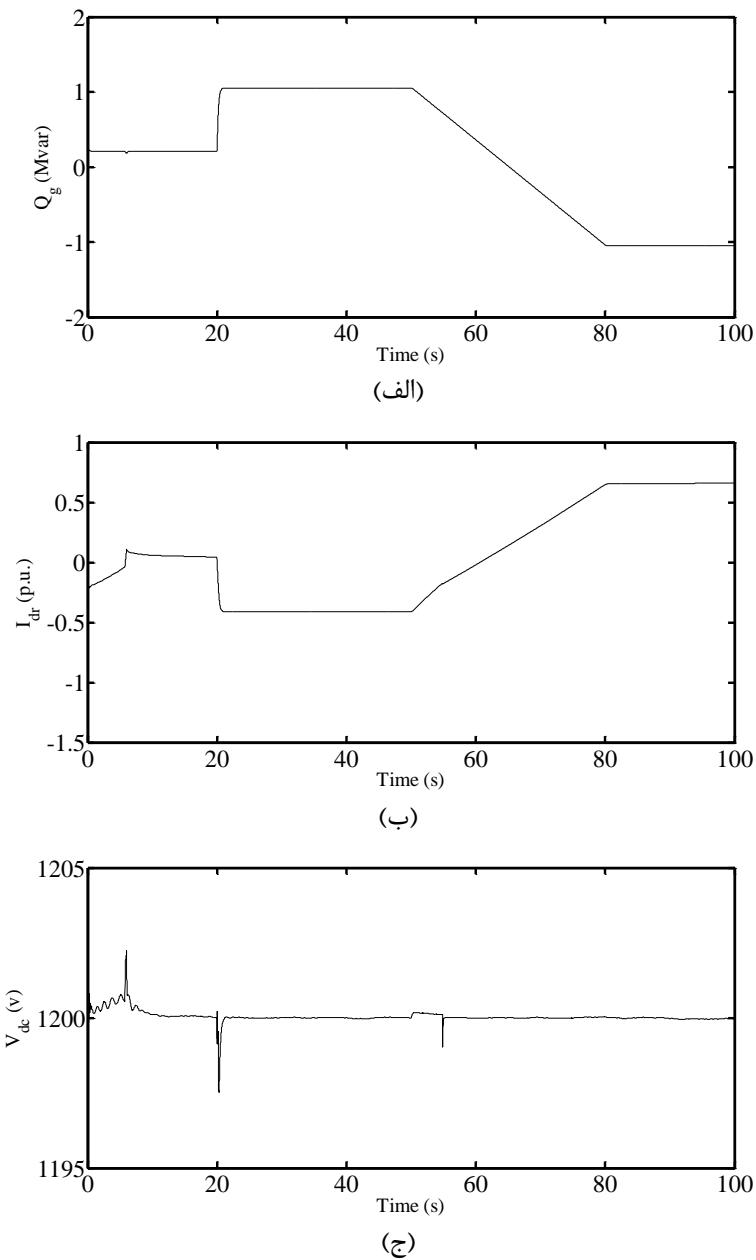
با توجه به نتایج فوق در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت نامی، توان حداکثر از باد استخراج می‌شود و برای جلوگیری از صدمه به توربین، در این سرعت‌های باد زوایای فراز توسط کنترل‌کننده فراز از مقدار صفر درجه تغییر می‌کنند. این تغییر زاویه به گونه‌ای است که از افزایش سرعت ژنراتور از مقدار مجاز جلوگیری می‌کند. نتایج فوق نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سیستم‌های کنترل پیاده‌سازی شده بر روی توربین بادی می‌باشد. به منظور بررسی بیشتر سیستم‌های کنترل به کار گرفته شده، در ادامه تغییر توان راکتیو ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای بررسی تغییرات توان راکتیو ورودی در زمان  $s = 20$  به  $t = 0/1$  p.u. مقدار  $0/5$  افزایش می‌یابد و در زمان  $s = 50$  به  $t = 0/5$  افزایش می‌یابد و از زمان  $s = 80$  به  $t = 0/0$  به بعد نیز بر روی مقدار  $0/5$  ثابت باقی می‌ماند. در طول تغییرات توان راکتیو ورودی، توان اکتیو طبق منحنی آورده شده در شکل (۱۳-۲) تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این شرایط کاری در شکل (۲۲-۲) آورده شده است. همانطور که مشخص است سیستم کنترل به خوبی توانسته است توان راکتیو تولید شده را با توجه به مقدار توان راکتیو ورودی مطلوب تنظیم کند. تنظیم توان راکتیو توسط تغییر جریان در راستای محور  $d$  روتور امکان‌پذیر است، که تغییرات این جریان نیز در شکل (۲۲-۲-ب) نشان داده شده است. همچنین همانطور که از شکل (۲۲-۲-ج) مشخص است ولتاژ لینک جریان مستقیم در محدوده مجاز باقی مانده است و تغییرات توان راکتیو در زمان‌های  $20$  و  $50$  ثانیه موجب شده است که تغییرات ناگهانی اندکی در ولتاژ لینک جریان مستقیم ایجاد گردد.

#### ۲-۱۴-۲ شبیه‌سازی عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام وقوع خطا

در این قسمت عملکرد سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام بروز انواع خطاهای در سیستم بررسی می‌شود. خطاهای اعمال شده به سیستم عبارتند از: اتصال کوتاه سه فاز به زمین در شبکه قدرت متصل شده به سیستم تبدیل انرژی بادی (بدترین حالت)، اتصال کوتاه خازن لینک جریان مستقیم،

خطای تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، خطای بایاس در سنسور فراز و خطای در محرک فراز که موجب تغییر در دینامیک آن می‌شود. نحوه مدل‌سازی خطاها شبهه‌سازی شده در این قسمت، در بخش ۱۳-۲ به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در زیربخش‌های آتی پاسخ سیستم تبدیل انرژی بادی تحت خطاها ذکر شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۲۲-۲) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد میانگین ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط عملکرد نرمال با تغییر توان راکتیو ورودی: (الف) توان راکتیو تولید شده، (ب) جریان روتور در راستای محور  $d$  و (ج) ولتاژ لینک جریان مستقیم.

### ۱۴-۲-۱ اتصال کوتاه سه فاز به زمین در شبکه قدرت

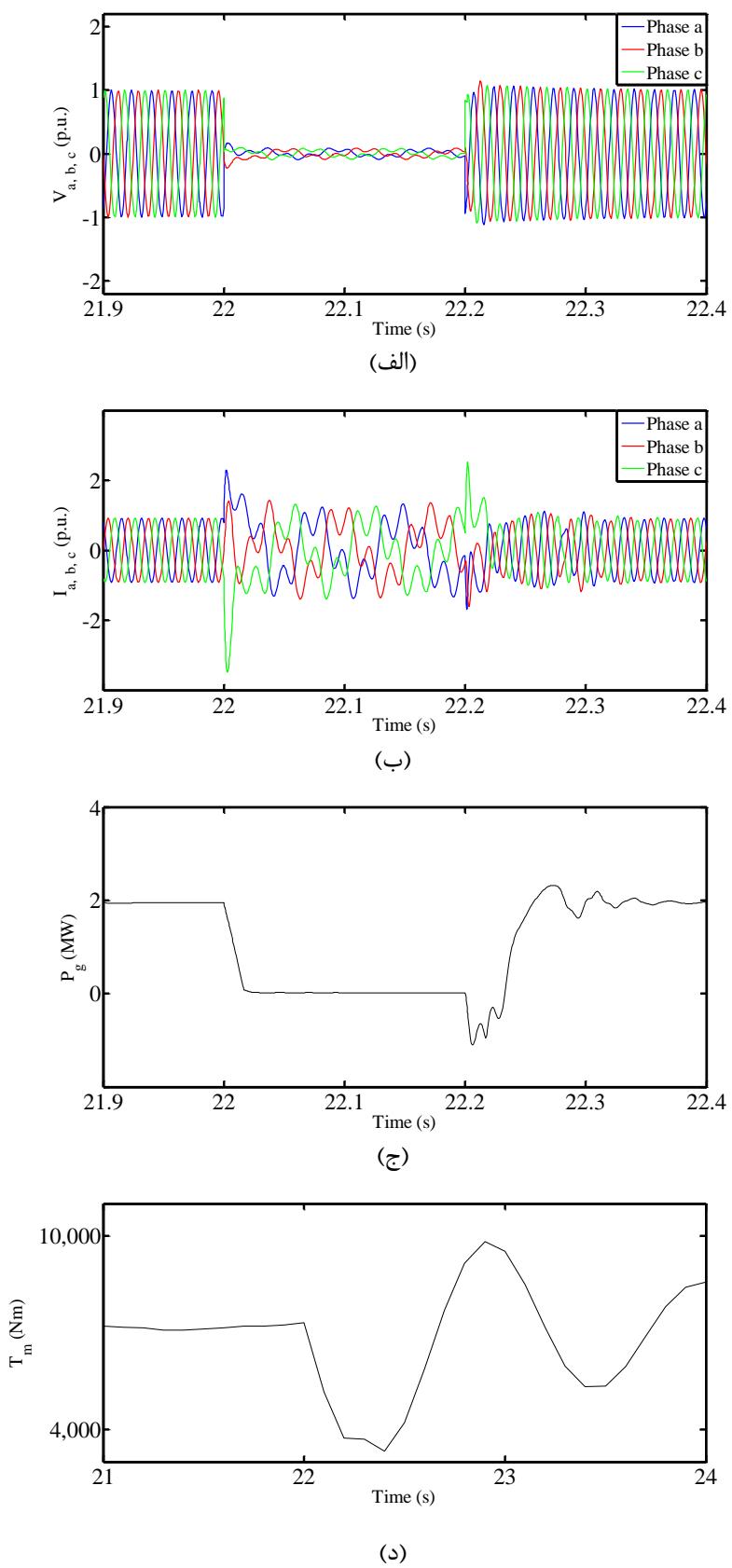
در این حالت اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم قدرت متصل شده به توربین بادی و در فاصله  $t=22\text{ s}$  به مدت  $0/2$  ثانیه در سرعت باد متوسط  $14\text{ m/s}$  بر ثانیه اتفاق می‌افتد. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲۳-۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است توان تولیدی پس از رفع خطا در سیستم با عبور از یک حالت گذرا به مقدار دائمی پیش از وقوع خطا می‌رسد. این حالت گذرا با نوسانات شدید در گشتاور مکانیکی همراه می‌باشد. مسلم است که در هنگام بروز چنین خطاهايی در سیستم قدرت، سیستم‌های حفاظتی به کار گرفته شده وارد عمل می‌شوند و توربین را از شبکه جدا می‌کنند. برای طراحی سیستم‌های حفاظتی می‌توان از نتایج شبیه‌سازی فوق استفاده کرد و تأثیر خطا را بر سیگنال‌های مختلف مشاهده نمود. همچنین برای آن که در هنگام بروز خطا، اتصال توربین از شبکه قطع نشود<sup>۱</sup>، از چاپر لینک جریان مستقیم طبق شکل (۱۱-۲) می‌توان استفاده کرد [۱۲، ۸۱-۸۲].

### ۱۴-۲-۲ اتصال کوتاه خازن لینک جریان مستقیم

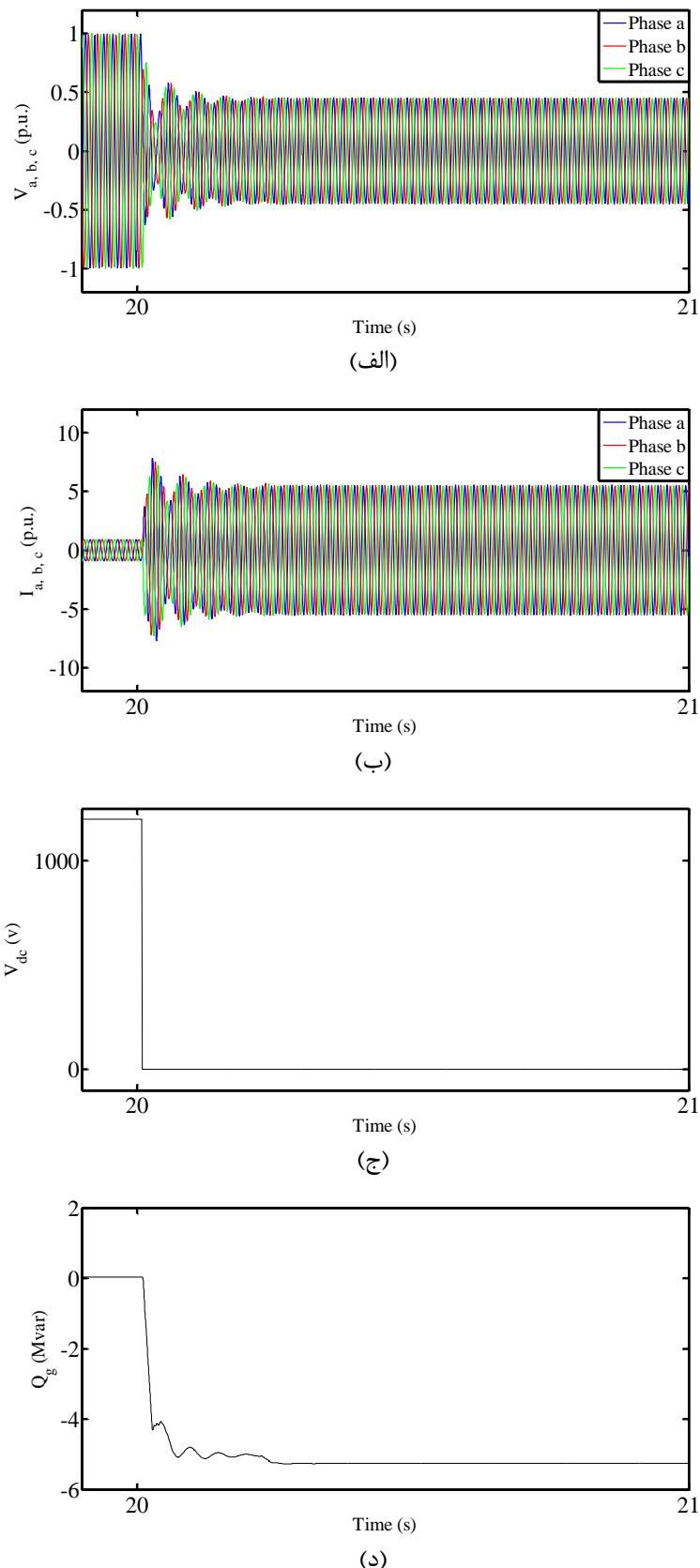
به منظور بررسی اثر اتصال کوتاه خازن لینک جریان مستقیم بر روی سیستم تبدیل انرژی بادی، فرض می‌شود در زمان  $s=20$  اتصال کوتاهی در لینک جریان مستقیم اتفاق می‌افتد. نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل (۲۴-۲) نشان داده شده است. زمانی که اتصال کوتاه در خازن لینک جریان مستقیم رخ می‌دهد، ولتاژ لینک جریان مستقیم به صفر ولت افت پیدا می‌کند. نتیجه این امر افزایش بیش از اندازه جریان‌های هر سه فاز خروجی سیستم تبدیل انرژی بادی می‌باشد. در زمان وقوع خطا، ژنراتور القایی تغذیه-دو سویه همانند یک موتور القایی رفتار می‌کند و طبق شکل (۲۴-۲) توان راکتیوی برابر با  $Mvar = 5/2$  از شبکه دریافت می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان از جبرانساز استاتیکی<sup>۲</sup> استفاده کرد [۸۳].

<sup>1</sup> Fault Ride Through Capability

<sup>2</sup> STATCOM



شکل (۲۳-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم قدرت: (الف) ولتاژ سه فاز  $abc$  خروجی، (ب) جریان سه فاز  $abc$  خروجی، (ج) توان اکتیو تولیدی و (د) گشتاور مکانیکی توربین.



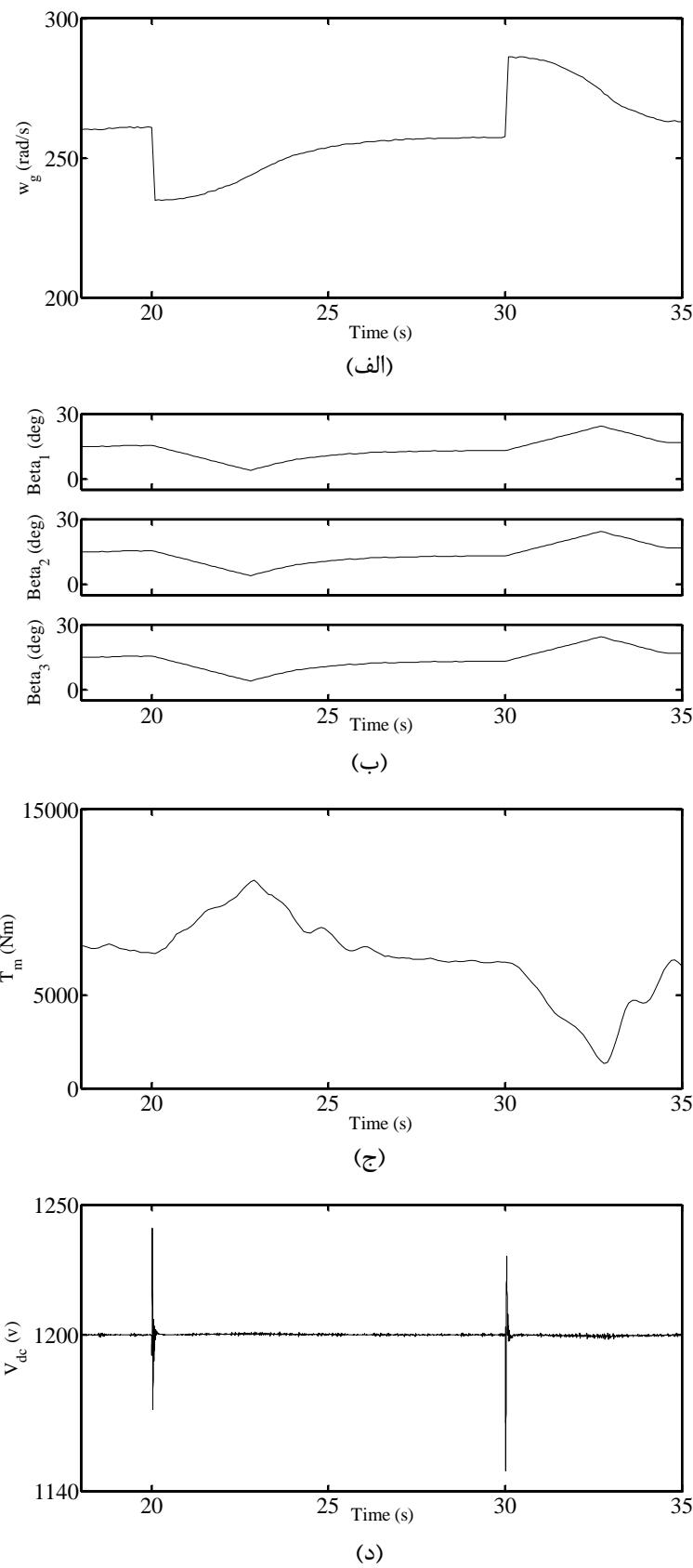
شکل (۲۴-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز اتصال کوتاه در خازن لینک جریان مستقیم: (الف) ولتاژ سه فاز  $abc$  خروجی، (ب) جریان سه فاز  $abc$  خروجی، (ج) ولتاژ لینک جریان مستقیم و (د) توان راکتیو تولید شده.

### ۱۴-۳-۲ خطای تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور

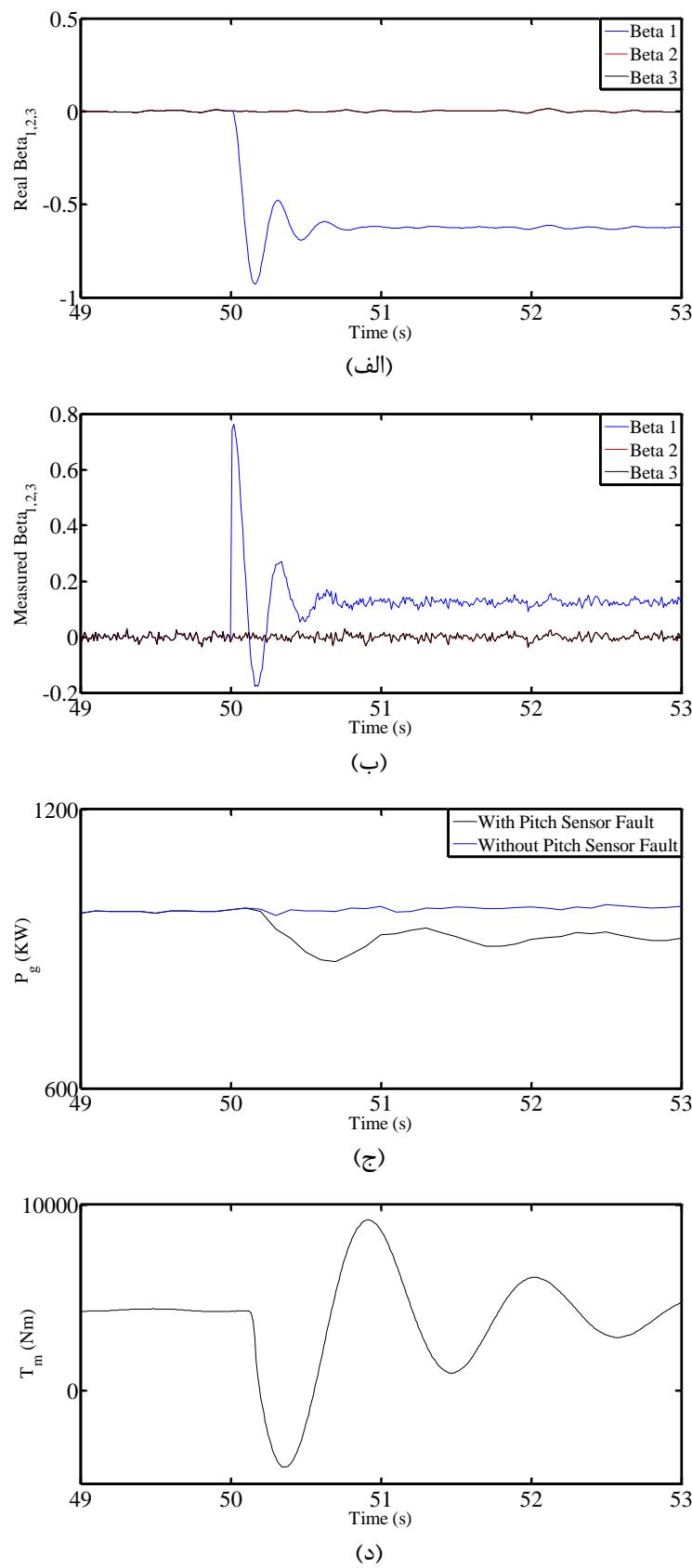
در این حالت برای ایجاد خطای طبق رابطه (۷۶-۲)،  $\alpha_p(k) = 0.9 + 1$  در نظر گرفته شد که معادل ایجاد ۱۰ درصد خطای خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور است. این خطای در زمان  $t = 20$  s مدت ۱۰ ثانیه و با سرعت باد میانگین ۱۴ متر بر ثانیه در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ایجاد گردید. شکل (۲۵-۲) نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی در این حالت می‌باشد. در این حالت با توجه به سیگنالی که دارای خطای ۱۰ درصد است و وارد سیستم کنترل می‌شود، کنترل کننده فراز، زوایایی فراز پره‌ها را کاهش می‌دهد تا بتوان بیشتری را از باد استخراج نمود. همانطور که از شکل (۲۵-۲) دیده می‌شود، با کاهش زوایایی فراز پره‌ها، گشتاور مکانیکی افزایش یافته و در نهایت بتوان تولیدی ثابت باقی می‌ماند. توجه به این نکته ضروری است که در این محدوده سرعت زاویه‌ای ژنراتور و سرعت باد موجود، دستیابی به توان حداکثر مورد نظر است که این امر با کاهش زوایایی فراز و افزایش گشتاور مکانیکی محقق شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، تشخیص خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور از اهمیت بالایی برخوردار است، سیگنال خطادار سرعت زاویه‌ای ژنراتور وارد سیستم کنترل مشخص است که با توجه به خطادار بودن این سیگنال، فرمان‌های صادر شده از سیستم کنترل اشتباه خواهد بود.

### ۱۴-۲-۴ خطای بایاس در سنسور فراز

در این حالت شبیه‌سازی برای بایاس  $+75/0$  درجه و سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۲۶-۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با ایجاد خطای بایاس در سنسور فراز در زمان  $s = 50$ ، زاویه فراز واقعی پره ۱ کاهش می‌یابد. کاهش زاویه فراز به ترتیب کاهش ضریب توان، کاهش گشتاور روتور توربین و کاهش توان تولید شده را در پی دارد. با توجه به شکل (۲۶-۲) همانطور که مشخص است توان خروجی در هنگام وقوع خطای کاهش یافته است و ایجاد بایاسی به میزان  $+75/0$  درجه، نوسانات شدید گشتاور و توان در پی دارد. در نتیجه سیستم تشخیص خطایی مورد نیاز است تا توسط آن بتوان این نوع خطای کاهش را تشخیص داد.



شکل (۲۵-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز خطای تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور: (الف) سرعت زاویه‌ای ژنراتور، (ب) زوایای فراز پره‌ها، (ج) گشتاور مکانیکی توربین و (د) ولتاژ لینک جریان مستقیم.



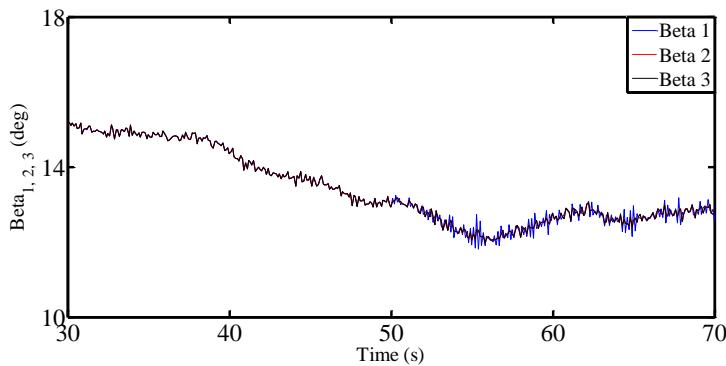
شکل (۲۶-۲) نتایج شبیه‌سازی در هنگام بروز خطا در سنسور فراز پره: (الف) زوایای فراز واقعی پرها، (ب) زوایای فراز اندازه‌گیری شده پرها، (ج) توان اکتیو تولید شده و (د) گشتاور مکانیکی توربین.

### ۱۴-۲-۵ بروز خطای در محرک فراز

در این حالت همانند [۲۳-۲۵] خطای ناگهانی در محرک فراز مورد بررسی قرار گرفت. برای ایجاد این خطای  $\omega$  و  $\zeta$  از حالت نرمال به مقادیر دیگر تغییر می‌یابند. این تغییر موجب تغییر دینامیک سیستم حلقه بسته فراز خواهد شد. شکل (۲۷-۲) نشان‌دهنده نتیجه شبیه‌سازی برای اعمال خطای محرک فراز پره ۱ در زمان  $s = 50t$  و در سرعت باد متوسط ۱۲ متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که مشخص است اختلاف بین زوایای فراز خروجی محرک‌های ۲ و ۳ که در حالت نرمال کار می‌کنند و محرک فراز ۱ که دچار خطای شده است، بسیار ناچیز است. نکته قابل توجه آن است که اثر این خطای فقط در سیگنال‌های فراز اندازه‌گیری شده توسط سنسورها به خوبی قابل مشاهده است. در نتیجه نیاز به یک سیستم تشخیص خطای دقیق برای شناسایی این خطای می‌باشد. یعنی باید سیستم تشخیص خطای به نحوی طراحی شود که تفاوت ناچیز میان شرایط عملکرد سالم و عملکرد همراه با خطای محرک فراز را به نحو مناسبی تشخیص دهد.

### ۱۴-۳ بحث پیرامون نتایج شبیه‌سازی

در این بخش صحت نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شرایط عملکرد نرمال اگر سرعت زاویه‌ای ژنراتور کمتر از مقدار مجاز باشد، زوایای فراز پره‌ها باید بر روی مقدار صفر درجه قرار داشته باشند تا بتوان ماکرزمیم توان موجود در باد را استخراج نمود. همچنین در صورت افزایش سرعت باد، سرعت زاویه‌ای ژنراتور و متعاقباً توان اکتیو تولید شده باید افزایش یابند. همانطور که از شکل‌های (۱۷-۲) الی (۱۹-۲) مشخص است، پاسخ‌های مدل ارائه شده به همان‌گونه هستند که انتظار می‌رود. علاوه بر این در شرایط عملکرد نرمال، اگر سرعت زاویه‌ای ژنراتور فراتر از مقدار مجاز آن قرار گیرد، زوایای فراز پره‌ها توسط سیستم فراز باید تغییر یابند تا هم سرعت زاویه‌ای ژنراتور و هم توان تولید شده محدود شوند. شکل‌های (۲۰-۲) و (۲۱-۲) نمایانگر پاسخ‌های سیستم تبدیل انرژی بادی در این وضعیت هستند و همانطور که مشخص است، صحیح و مطابق انتظار می‌باشند.



شکل (۲۷-۲) زوایای فراز پره‌ها برای سرعت باد متوسط ۱۲ متر بر ثانیه در هنگام بروز خطای فراز پره ۱.

در حالت وقوع اتصال کوتاه سه فاز در شبکه قدرت، انتظار می‌رود که ولتاژ هر فاز به مقدار صفر کاهش یابد و از طرف دیگر جریان هر فاز به صورت ناگهانی افزایش یابد. همچنین از آنجائی که ولتاژ هر فاز به مقدار صفر کاهش می‌یابد، توان اکتیو تولید شده باید صفر باشد. پاسخ‌های مدل در این وضعیت در شکل (۲۳-۲) قابل مشاهده هستند. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان گفت که پاسخ‌های مدل ارائه شده در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز در شبکه قدرت همانطور است که انتظار می‌رود. همچنین زمانی که خطای اتصال کوتاه لینک جریان مستقیم به وقوع می‌پیوندد، انتظار می‌رود که ولتاژ خازن لینک جریان مستقیم به مقدار صفر ولت کاهش یابد و تمامی جریان‌ها به صورت ناگهانی افزایش یابند. تمامی انتظارات تئوری را می‌توان در شکل (۲۴-۲) مشاهده نمود.

در حالت وقوع خطای تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور نیز اگر فرض شود خطای فراز در آن به صورت تناسبی افزایشی به وقوع پیوسته است، سرعت اندازه‌گیری شده توسط سنسور، وارد کنترل‌کننده فراز می‌شود. کنترل‌کننده فراز نیز سعی بر آن دارد که سرعت زاویه‌ای ژنراتور و در نتیجه توان تولیدی توربین را در محدوده مجاز نگه دارد. به همین علت افزایش سرعت زاویه‌ای ژنراتور با افزایش زوایای فراز پره‌ها همراه می‌شود تا سرعت زاویه‌ای ژنراتور در محدوده مورد نظر نگه داشته شود. اما افزایش زوایای فراز، کاهش سرعت زاویه‌ای ژنراتور واقعی (نه مقدار اندازه‌گیری شده توسط سنسور خطای فراز) را در بی دارد. کاهش سرعت زاویه‌ای ژنراتور نسبت مستقیم با کاهش سرعت روتور توربین دارد. پس سرعت روتور توربین اندازه‌گیری شده نیز کاهش می‌یابد. همانطور که از شکل

(۲۵-۲) قابل مشاهده است، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل ارائه شده، انتظارات تئوری را برآورده می‌سازد.

در هنگام وقوع خطای بایاس در سنسور فراز، اگر فرض شود خطا در سنسور زاویه فراز پره ۱ به صورت بایاس مثبت به وقوع پیوسته است، این افزایش زاویه فراز، چون در سیستم حلقه بسته با کنترل کننده داخلی اتفاق افتاده است، کاهش زاویه فراز واقعی را در پی دارد. کاهش زاویه فراز واقعی موجب افزایش سرعت زاویه‌ای ژنراتور و در نتیجه افزایش سرعت روتور می‌شود. همچنین اگر خطایی در محرک فراز به وقوع پیوندد، چون دینامیک سیستم فراز تغییر پیدا می‌کند، پس انتظار می‌رود پاسخ‌های سیستم فراز نسبت به شرایط عملکرد نرمال و بدون خطا تغییر داشته باشند. شکل‌های (۲۶-۲) و (۲۷-۲) صحت انتظارات تئوری فوق را تصدیق می‌کنند.

در نتیجه می‌توان گفت مدل جامع ارائه شده در این تحقیق، تمامی انتظارات تئوری را برآورده می‌کند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیانگر صحت مدل ارائه می‌باشند. از این مدل می‌توان برای بررسی میزان جریان‌های اتصال کوتاه جهت طراحی سیستم‌های حفاظتی، بررسی نحوه انتشار خطا در سیستم تبدیل انرژی بادی، بررسی نحوه اثرگذاری خطا بر نقاط مختلف سیستم و طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا بهره گرفت. علاوه بر خطاها بررسی شده در این فصل، توسط مدل ارائه شده می‌توان به بررسی خطاها در سایر نقاط سیستم نیز پرداخت.



فصل سوم:

طراحی سیستم تشخیص و جداسازی

خطا



### ۱-۳ مقدمه

به طور کلی می‌توان خطاها را امکان‌پذیر در سیستم تبدیل انرژی بادی را به دو دسته مکانیکی و الکتریکی تقسیم کرد. در این تحقیق خطاها مربوط به سنسور فراز، محرک فراز و سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور مورد بررسی قرار گرفتند، زیرا با توجه به اطلاعات مربوط به آنالیز خطا که در [۷] آورده شده است، این سه دسته خطا شدت و درجه اهمیت بیشتری نسبت به سایر خطاها مکانیکی دارند؛ خطاها داخلی مربوط به ژنراتور و مبدل‌ها نیز به دلیل پیچیده و گستردگی داشتن بیش از حد تحقیق در نظر گرفته نشدند. از آنجایی که در صورت وقوع خطاها الکتریکی دیگر مانند خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در باس ژنراتور، سیستم‌های حفاظتی وارد عمل می‌شوند و توربین بادی را از شبکه جدا می‌کنند، این دسته از خطاها نیز ممکن است قرار نگرفتند. همچنین فرض بر آن گرفته می‌شود که سیستم‌های کنترل به کار گرفته شده در سیستم تبدیل انرژی بادی، دچار خطا نمی‌شوند و به عملکرد صحیح خود ادامه می‌دهند. در نتیجه می‌توان گفت شرایط عملکرد در هنگام بروز خطا به صورت زیر می‌باشد:

- سیستم کنترل فاقد هرگونه خطا می‌باشد و در هنگام بروز خطا به عملکرد عادی خود ادامه می‌دهد.
  - یکی از خطاها مربوط به سنسور فراز، محرک فراز و سنسور ژنراتور به صورت غیر همزمان اتفاق می‌افتد.
  - خطا دیگری به غیر از موارد ذکر شده، در سیستم تبدیل انرژی بادی به وقوع نمی‌پیوندد.
- در ادامه این فصل ابتدا نحوه طراحی سیستم تشخیص خطا مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس برای جداسازی خطاها به وقوع پیوسته، در بلوک ارزیابی مانده راهکارهایی پیشنهاد می‌شود و در نهایت عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه الگوریتم‌های ارائه شده در تست جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۳ طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطای توربین

در طراحی سیستم تشخیص خطای توربین، بررسی دو سیگنال خروجی از سنسورهای سرعت زاویه‌ای ژنراتور و زوایای فراز، موجب شناسایی خطای توربین ژنراتور، سنسورها و حرکت‌های فراز خواهد شد. با توجه به مدل‌سازی انجام شده برای توربین بادی، هر دو سیگنال نام برده شده را می‌توان به عنوان یک تابع غیرخطی از سرعت زاویه‌ای روتور توربین،  $\omega_r$  و سرعت باد اندازه‌گیری شده در نظر گرفت. به دلیل آن که عملکرد سیستم کنترل حلقه بسته تحت سرعت‌های متفاوت باد تغییر می‌کند، سرعت باد نیز به عنوان ورودی توابع غیرخطی در نظر گرفته شد. پس می‌توان روابط زیر را در نظر گرفت:

$$\omega_g = h_1(V_w, \omega_r) \quad (1-3)$$

$$\beta_{1,2,3} = h_2(V_w, \omega_r) \quad (2-3)$$

که در روابط فوق  $(1-3)$  و  $(2-3)$  توابع غیرخطی هستند. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در ورودی این توابع، می‌توان خروجی آنها را توسط شبکه‌های عصبی دینامیکی نامبرده شده در پیوست، تخمین زد. اولین پروسه‌ای که مورد نظر مدل‌سازی است، توسط رابطه  $(1-3)$  بیان می‌شود. برای آموزش شبکه‌های عصبی دینامیکی به منظور مدل‌سازی خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، داده‌های آموزشی با تعداد ۱۰۰۰ نمونه در هر دسته با توجه به مدل سیستم تبدیل انرژی بادی ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا این نمونه‌ها با توجه به مقدار مبنا  $p.u.$  شده و مقادیر  $p.d.u.$  داده‌ها برای آموزش استفاده شدند. برای آموزش شبکه نیز از روش جستجوی تصادفی تطبیقی<sup>۱</sup> استفاده شد. همچنین برای آزمایش شبکه طراحی شده از دسته داده‌های تست بهره گرفته شد که دارای ۲۰۰۰ نمونه در هریک از بردارهای ورودی و خروجی برای سرعت متوسط ۱۶ متر بر ثانیه می‌باشد. بهترین ساختارها با توجه به معیارهای اطلاعات آکایک<sup>۲</sup> و خطای پیش‌بینی نهایی<sup>۳</sup> انتخاب شدند. نتایج مربوط به انتخاب ساختار شبکه مناسب برای مدل‌سازی  $\omega_g$  در جدول  $(1-3)$  نشان داده شده است. در

<sup>1</sup> Adaptive Random Search (ARS)

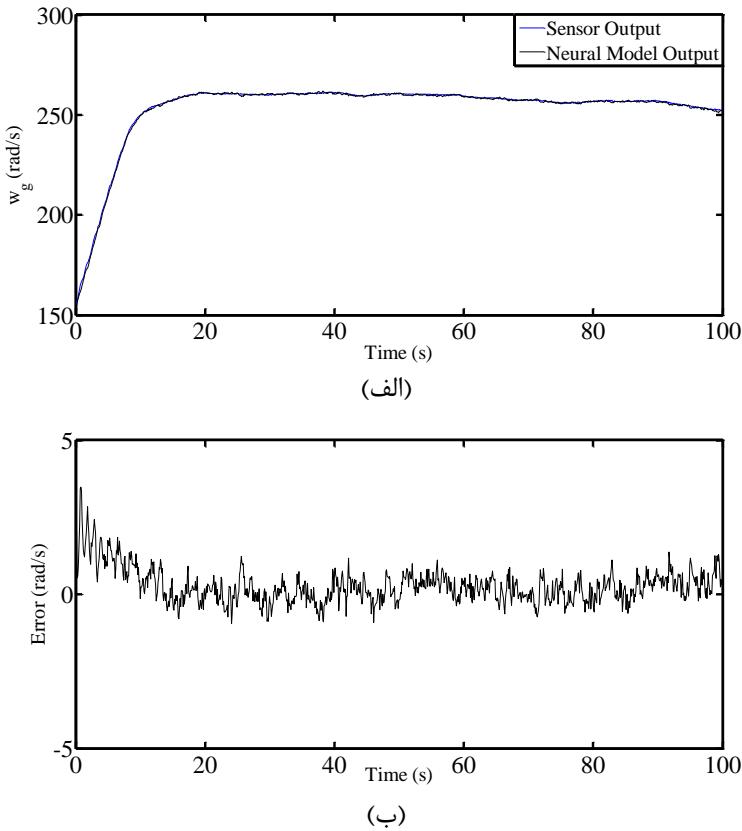
<sup>2</sup> Akaike Information Criterion (AIC)

<sup>3</sup> Final Prediction Error (FPE)

این جدول (r)  $N^m_{n,v,s}$  نمایشگر شبکه عصبی دینامیکی  $m$  لایه با  $n$  ورودی،  $v$  نرون مخفی و  $s$  خروجی می‌باشد و نیز  $r$  مشخص کننده مرتبه فیلتر به کار برده شده در هر لایه می‌باشد. با توجه به جدول (۳-۱)، ساختار (2) برای داده‌های آموزشی و ساختار (1) برای داده‌های تست بهترین نتایج را در اختیار قرار می‌دهند. در نهایت با توجه به نتایج آموزش و تست، ساختار (1)  $N^2_{2,3,1}$  با فیلتر مرتبه اول به عنوان مدل بهینه برای مدل‌سازی رفتار  $\omega$  در شرایط عملکرد نرمال در نظر گرفته شد؛ زیرا این ساختار توانایی تعمیم بهتری نسبت به ساختار به دست آمده برای داده‌های آموزشی را دارد. هر نرون در شبکه دینامیکی طراحی شده دارای فیلتر پاسخ ضربه نامحدود مرتبه اول و تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک در خروجی می‌باشد.

جدول (۳-۱) نتایج آموزش شبکه عصبی دینامیکی برای داده‌های آموزشی و تست به منظور مدل‌سازی  $\omega$ .

| ساختار شبکه          | $K$ | داده‌های آموزشی |           |           | داده‌های تست |           |           |
|----------------------|-----|-----------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
|                      |     | $J$             | $f_{FPE}$ | $f_{AIC}$ | $J$          | $f_{FPE}$ | $f_{AIC}$ |
| $N^2_{2,3,1}(1)$     | ۲۵  | ۰/۰۲۸۲          | ۰/۰۲۹۶    | -۳/۵۱۴۸   | ۰/۰۱۲۶       | ۰/۰۱۲۹    | -۴/۳۴۹۱   |
| $N^2_{2,4,1}(1)$     | ۳۳  | ۰/۰۳۷۹          | ۰/۰۴۰۵    | -۳/۲۰۶۸   | ۰/۰۲۰۰       | ۰/۰۲۰۷    | -۳/۸۷۹۰   |
| $N^2_{2,5,1}(1)$     | ۴۱  | ۰/۰۲۵۸          | ۰/۰۲۸۶    | -۳/۵۵۵۴   | ۰/۰۱۵۱       | ۰/۰۱۵۷    | -۴/۱۵۲۱   |
| $N^2_{2,6,1}(1)$     | ۴۹  | ۰/۰۵۲۱          | ۰/۰۵۷۵    | -۲/۸۵۶۶   | ۰/۰۵۷۳       | ۰/۰۶۰۲    | -۲/۸۱۰۵   |
| $N^2_{2,7,1}(1)$     | ۵۷  | ۰/۰۴۰۶          | ۰/۰۴۵۵    | -۳/۰۹۰۰   | ۰/۰۶۶۴       | ۰/۰۷۰۳    | -۲/۶۵۵۱   |
| $N^2_{2,3,1}(2)$     | ۳۱  | ۰/۰۲۶۸          | ۰/۰۲۸۵    | -۳/۵۵۷۴   | ۰/۰۱۳۴       | ۰/۰۱۳۸    | -۴/۲۸۱۵   |
| $N^2_{2,4,1}(2)$     | ۴۱  | ۰/۰۴۱۷          | ۰/۰۴۵۳    | -۳/۰۹۵۳   | ۰/۰۴۲۴       | ۰/۰۴۴۲    | -۳/۱۱۹۶   |
| $N^2_{2,5,1}(2)$     | ۵۱  | ۰/۰۳۷۸          | ۰/۰۴۱۹    | -۳/۱۷۳۴   | ۰/۰۴۰۹       | ۰/۰۴۳۰    | -۳/۱۴۵۶   |
| $N^2_{2,6,1}(2)$     | ۶۱  | ۰/۰۳۴۹          | ۰/۰۳۹۴    | -۳/۲۳۳۳   | ۰/۰۳۲۷       | ۰/۰۳۴۸    | -۳/۳۵۹۴   |
| $N^2_{2,7,1}(2)$     | ۷۱  | ۰/۰۷۹۵          | ۰/۰۹۱۷    | -۲/۳۹۰۰   | ۰/۰۸۵۰       | ۰/۰۹۱۳    | -۲/۳۹۴۱   |
| $N^3_{2,3,2,1}(2-2)$ | ۵۰  | ۰/۱۲۸۶          | ۰/۱۴۲۱    | -۱/۹۵۱۰   | ۰/۰۳۶۵       | ۰/۰۳۸۴    | -۳/۲۶۰۴   |
| $N^3_{2,4,2,1}(2-2)$ | ۶۱  | ۰/۰۹۰۲          | ۰/۱۰۱۹    | -۲/۲۸۳۷   | ۰/۰۷۶۷       | ۰/۰۸۱۵    | -۲/۵۰۶۹   |
| $N^3_{2,4,3,1}(2-2)$ | ۷۲  | ۰/۱۱۳۵          | ۰/۱۳۱۴    | -۲/۰۳۰۰   | ۰/۰۱۴۱       | ۰/۰۱۵۲    | -۴/۱۸۸۶   |



شکل (۳-۱) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و تحت شرایط نرمال: (الف) مقایسه  $\omega_g$  واقعی (خروجی سنسور) و  $\omega_g$  تخمین زده شده و (ب) خطای تخمین (سیگنال مانده).

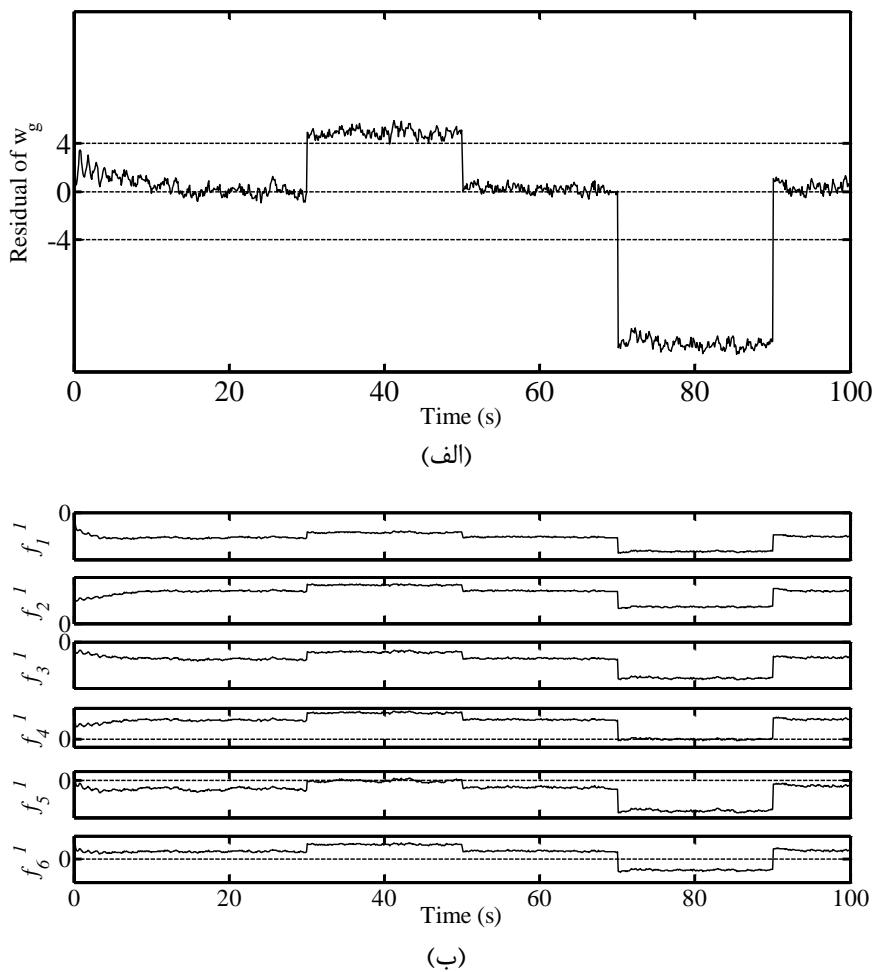
شکل (۳-۱) نشان‌دهنده مقایسه  $\omega_g$  حاصل شده از مدل و  $\omega_g$  تخمین زده شده توسط شبکه عصبی دینامیکی طراحی شده در شرایط عملکرد نرمال می‌باشد. همانطور که مشخص است شبکه عصبی طراحی شده به نحو مطلوبی  $\omega_g$  را تخمین می‌زند و خطای تخمین بسیار ناچیز است. به منظور تشکیل سیستم تشخیص و جداسازی خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، چندین نوع خطای مختلف در نظر گرفته شد و برای هر کدام از این خطاهای، یک مدل خطای توشیع شبکه‌های عصبی طراحی شد تا بانکی از مدل‌های مختلف برای حالت‌های عملکرد مختلف در اختیار داشته باشیم.

خطاهایی که برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور در نظر گرفته شد، به صورت زیر می‌باشند:

$$f_1^1 = +10\%, f_2^1 = -10\%, f_3^1 = +5\%, f_4^1 = -5\%, f_5^1 = +2\%, f_6^1 = -2\% \quad (3-3)$$

پس لازم است برای هر نوع خطای یک شبکه عصبی طراحی شده و در بانک مدل‌های خطای قرار گیرد. روند طراحی همانند طراحی شبکه برای تخمین خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور می‌باشد. پس

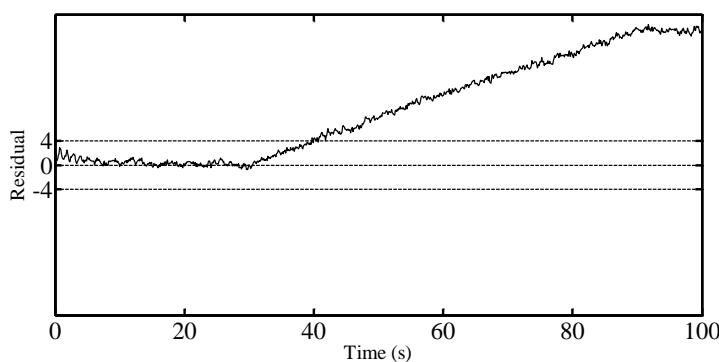
از بررسی ساختارهای مختلف و با توجه به معیارهای اشاره شده، برای خطاهای  $f_1^1$ ,  $f_2^1$ ,  $f_3^1$ ,  $f_4^1$ ,  $f_5^1$  و  $f_6^1$  به ترتیب ساختارهای  $N_{2,4,2,1}^2(2-2)$ ,  $N_{2,4,1}^2(2)$ ,  $N_{2,3,1}^2(1)$ ,  $N_{2,4,1}^2(1)$  و  $N_{2,3,1}^2(2)$  انتخاب شدند. در نتیجه ۶ حالت خطادار برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور در نظر گرفته شد. از این حالات خطادار می‌توان برای یافتن میزان خطای به وقوع پیوسته در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور مطلع شد به نحوی که آیا خطا به میزان کم ( $\pm 2\%$ ), متوسط ( $\pm 5\%$ ) و یا زیاد ( $\pm 10\%$ ) اتفاق افتاده است. همچنین به منظور ارزیابی مانده‌ها، در ابتدا، از حد آستانه ثابت استفاده شد که این حد آستانه است. نظر حاصل شود و هم از وقوع هشدارهای اشتباه زیاد جلوگیری به عمل آید. در اولین شبیه‌سازی، در سی‌امین ثانیه خطای تناسبی ناگهانی به اندازه  $20\%$  به مدت ۲۰ ثانیه و در هفتادمین ثانیه خطای تناسبی به اندازه  $5\%$ - به مدت ۲۰ ثانیه به سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور اعمال گردید. شکل (۳-۳) نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی در این حالت می‌باشد. با توجه به شکل (۳-۲-الف)، در صورت انحراف سرعت زاویه‌ای ژنراتور از مقدار واقعی، مانده‌ای توسط سیستم تشخیص خطا حاصل می‌شود که با مقایسه این مانده با سطح آستانه می‌توان به وجود خطا در سیستم پی برد. در این شکل بین لحظات ۳۰ الی ۵۰ ثانیه و ۷۰ الی ۹۰ ثانیه، مانده بدست آمده از حد آستانه  $\pm 4 \text{ rad/s}$  خارج شده و این نشان‌دهنده بروز خطا در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور است. نوع خطا نیز با استفاده از بررسی مانده‌های حاصل شده از مدل‌های عصبی خطادار پیدا می‌شود. بدین صورت که اگر مانده‌ای نزدیک به صفر بود، بیانگر وقوع آن نوع خطا خواهد بود. در شکل (۳-۲-ب) فقط مانده  $f_5^1$  در بازه زمانی ۳۰ الی ۵۰ ثانیه نزدیک به صفر است، پس خطای  $f_5^1$  در بازه زمانی ۵۰ الی ۷۰ ثانیه نزدیک به صفر است، که این نشانگر آن است که خطای  $5\%$ - در این در بازه زمانی ۷۰ الی ۹۰ ثانیه نزدیک به صفر است، که این نشانگر آن است که خطای  $5\%$ - در این بازه اتفاق افتاده است. در شکل (۳-۲-ب) مانده حاصل از سایر مدل‌های خطادار نیز نشان داده است که همانطور که مشخص است هیچ‌گاه این مانده‌ها در محدوده‌ای نزدیک به صفر قرار نگرفته‌اند.



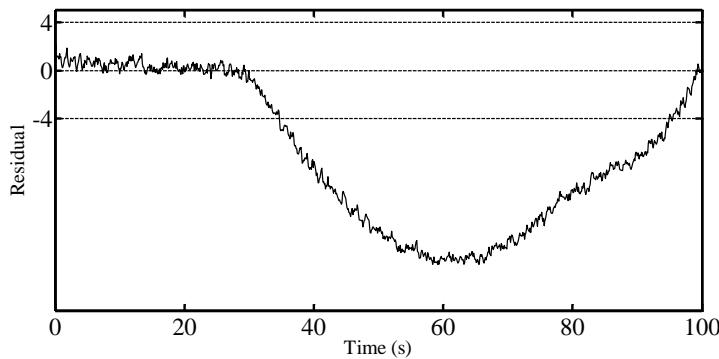
شکل (۳-۳) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و در هنگام وقوع خطای تناسبی ناگهانی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور؛ (الف) سیگنال مانده سرعت زاویه‌ای ژنراتور و (ب) سیگنال‌های مانده حاصل شده از مدل‌های خطای.

شبیه‌سازی دوم مربوط به وقوع خطای تناسبی نرم در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور است. در این حالت خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور در سی‌امین ثانیه از مقدار اصلی خود منحرف شده تا در نودمین ثانیه به مقدار  $1/1$  برابر مقدار واقعی خود برسد. یعنی در طی زمان  $60$  ثانیه خطایی به اندازه  $+10\%$  مقدار واقعی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ایجاد می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی در این حالت در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-۳) سیستم تشخیص خطای قابلیت تشخیص خطای نرم به وجود آمده را در ثانیه  $40/7$  دارد. یعنی زمانی در حدود  $10/7$  ثانیه مورد نیاز است تا بتوان این نوع خطای نرم را تشخیص داد که این امری مطلوب برای شناسایی خطای نرم در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور است. در نهایت شبیه‌سازی سوم مربوط به بررسی بروز خطای خروجی ثابت

برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور می‌باشد. در این حالت نیز در سی‌امین ثانیه خروجی سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ثابت نگه داشته شد. سیگنال مانده در این حالت در شکل (۳-۴) آورده شده است. با بررسی مانده مشخص می‌شود که سیستم تشخیص خطای از ثانیه ۳۴/۷ به بعد، یعنی تنها ۴/۷ ثانیه پس از وقوع خطای قابلیت تشخیص آن را دارد. با توجه به نتایج به دست آمده برای وقوع خطای ناگهانی تناسبی، نرم تناسبی و خروجی ثابت برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم تشخیص خطای طراحی شده در سرعت‌های باد متفاوت (که بر روی دینامیک سیستم تأثیرگذار است) نتایج مطلوب را نتیجه می‌دهد. این سیستم تشخیص و جداسازی خطای قابلیت تشخیص زودهنگام خطاهای را دارد. نکته قابل توجه در طرح ارائه شده تعداد بسیار کم هشدارهای اشتباه می‌باشد که این امر مطلوب و مورد نظر هر سیستم تشخیص خطایی می‌باشد.



شکل (۳-۳) سیگنال مانده سرعت زاویه‌ای ژنراتور برای سرعت باد متوسط ۱۲ متر بر ثانیه و در هنگام وقوع خطای تناسبی نرم در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور.

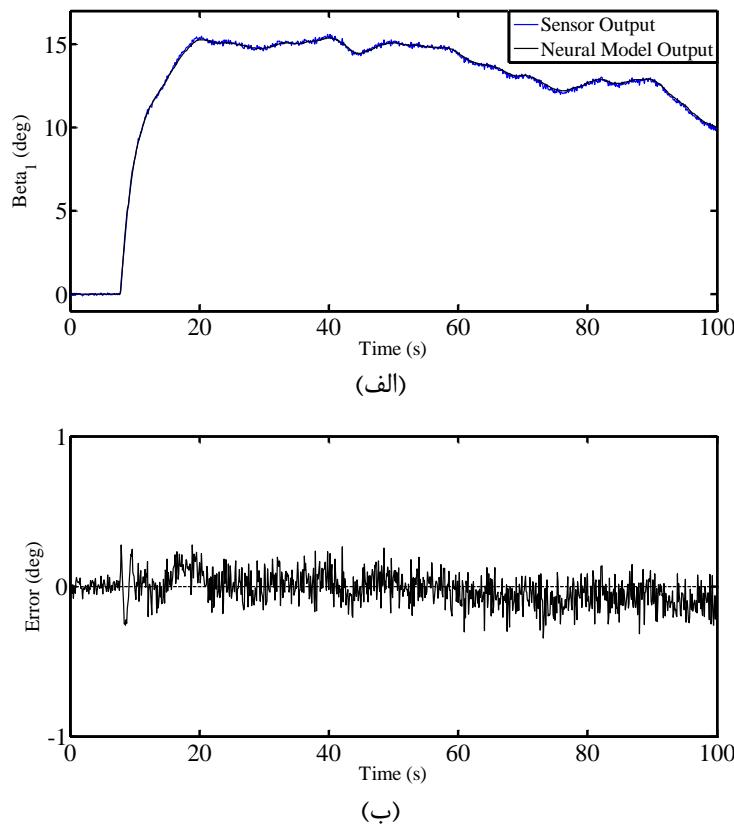


شکل (۳-۴) سیگنال مانده سرعت زاویه‌ای ژنراتور برای سرعت باد متوسط ۸ متر بر ثانیه و در هنگام وقوع خطای خروجی ثابت در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور.

گام بعدی در طراحی سیستم تشخیص خطای مربوط به سیستم فراز می‌باشد. در سیستم فراز هم سنسور فراز پره‌ها و هم محرک‌های فراز در معرض خطای قرار دارند. پروسه‌ای که مورد نظر مدل‌سازی است، توسط رابطه (۲-۳) بیان می‌شود. برای آموزش شبکه‌های عصبی دینامیکی به منظور مدل‌سازی خروجی سنسور فراز پره ۱، داده‌های آموزشی با تعداد ۱۰۰۰ نمونه در هر دسته مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا این نمونه‌ها با توجه به مقدار مبنا  $p.u.$  شده و مقادیر  $p.u.$  داده‌ها برای آموزش استفاده شدند. برای آموزش شبکه نیز از روش جستجوی تصادفی تطبیقی استفاده شد. بهترین ساختارها با توجه به معیارهای اطلاعات آکایک و خطای پیش‌بینی نهایی انتخاب شدند. نتایج مربوط به انتخاب ساختار شبکه مناسب برای مدل‌سازی زاویه فراز پره ۱ در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. برای هر دو دسته آموزشی و تست، بهترین نتایج در جدول با حروف پررنگ مشخص شده‌اند.

جدول (۲-۳) نتایج آموزش شبکه عصبی دینامیکی برای داده‌های آموزشی و تست به منظور مدل‌سازی  $\beta_1$ 

| ساختار شبکه          | $K$ | داده‌های آموزشی |           |           | داده‌های تست |           |           |
|----------------------|-----|-----------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
|                      |     | $J$             | $f_{FPE}$ | $f_{AIC}$ | $J$          | $f_{FPE}$ | $f_{AIC}$ |
| $N^2_{2,3,1}(1)$     | ۲۵  | ۰/۲۴۴۷          | ۰/۲۵۸۳    | -۱/۳۵۳۶   | ۰/۲۵۱۰       | ۰/۲۵۷۴    | -۱/۳۵۷۳   |
| $N^2_{2,4,1}(1)$     | ۳۳  | ۰/۱۰۲۳          | ۰/۱۰۹۹    | -۲/۲۰۸۳   | ۰/۱۴۷۱       | ۰/۱۵۲۰    | -۱/۸۸۳۶   |
| $N^2_{2,5,1}(1)$     | ۴۱  | ۰/۰۳۹۴          | ۰/۰۴۳۱    | -۳/۱۴۵۱   | ۰/۰۸۲۱       | ۰/۰۸۵۵    | -۲/۴۵۸۸   |
| $N^2_{2,6,1}(1)$     | ۴۹  | ۰/۰۴۲۲          | ۰/۰۴۶۵    | -۳/۰۶۷۳   | ۰/۰۹۶۴       | ۰/۱۰۱۲    | -۲/۲۹۰۲   |
| $N^2_{2,7,1}(1)$     | ۵۷  | ۰/۰۵۰۹          | ۰/۰۵۶۱    | -۲/۸۷۹۹   | ۰/۱۱۵۰       | ۰/۱۲۰۸    | -۲/۱۱۳۸   |
| $N^2_{2,3,1}(2)$     | ۳۱  | ۰/۰۳۰۴          | ۰/۰۳۲۵    | -۳/۴۲۶۱   | ۰/۰۷۹۳       | ۰/۰۸۱۸    | -۲/۵۰۳۵   |
| $N^2_{2,4,1}(2)$     | ۴۱  | ۰/۰۷۸۱          | ۰/۰۸۵۴    | -۲/۴۶۰۹   | ۰/۱۰۷۸       | ۰/۱۱۲۳    | -۲/۱۸۶۵   |
| $N^2_{2,5,1}(2)$     | ۵۱  | ۰/۰۴۷۱          | ۰/۰۵۲۶    | -۲/۹۴۵۰   | ۰/۱۰۳۷       | ۰/۱۰۹۱    | -۲/۲۱۵۳   |
| $N^2_{2,6,1}(2)$     | ۶۱  | ۰/۰۳۴۸          | ۰/۰۳۸۴    | -۳/۲۶۰۱   | ۰/۰۸۷۳       | ۰/۰۹۱۷    | -۲/۳۸۹۴   |
| $N^2_{2,7,1}(2)$     | ۷۱  | ۰/۰۴۵۷          | ۰/۰۵۲۷    | -۲/۹۴۳۷   | ۰/۰۷۸۲       | ۰/۰۹۳۶    | -۲/۳۶۸۶   |
| $N^3_{2,3,2,1}(2-2)$ | ۵۰  | ۰/۰۶۴۱          | ۰/۰۷۱۴    | -۲/۸۳۹۰   | ۰/۰۹۵۲       | ۰/۱۰۰۱    | -۲/۳۰۱۸   |
| $N^3_{2,4,2,1}(2-2)$ | ۶۱  | ۰/۰۳۷۳          | ۰/۰۴۲۶    | -۳/۱۵۶۶   | ۰/۰۸۴۹       | ۰/۰۹۰۲    | -۲/۴۰۵۳   |
| $N^3_{2,4,3,1}(2-2)$ | ۷۳  | ۰/۰۲۸۲          | ۰/۰۳۲۵    | -۳/۴۱۰۳   | ۰/۱۰۱۲       | ۰/۱۰۸۹    | -۲/۲۱۷۷   |



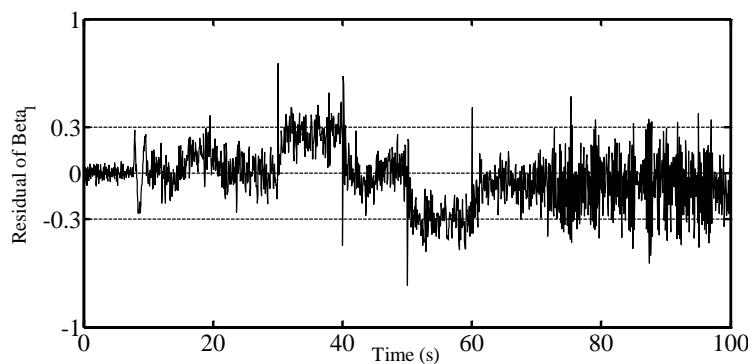
شکل (۵-۳) نتایج شبیه‌سازی برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه و تحت شرایط نرمال: (الف) مقایسه  $\beta_1$  واقعی (خروجی سنسور) و  $\beta_1$  تخمین زده شده و (ب) سیگنال مانده.

با توجه به نتایج جدول، ساختار (2) با فیلتر مرتبه دوم برای مدل‌سازی رفتار  $\beta_1$  در شرایط عملکرد نرمال در نظر گرفته شد. هر نرون در شبکه دینامیکی طراحی شده دارای فیلتر پاسخ ضربه نامحدود مرتبه دوم و تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک در خروجی می‌باشد. شکل (۵-۳) نشان‌دهنده مقایسه  $\beta_1$  حاصل شده از مدل و  $\beta_1$  تخمین زده شده توسط شبکه عصبی دینامیکی طراحی شده و همچنین خطای تخمین  $\beta_1$  در شرایط عملکرد نرمال می‌باشد. همانطور که مشخص است شبکه عصبی طراحی شده به نحو مطلوبی  $\beta_1$  را تخمین می‌زند و خطای تخمین کم است.

به منظور بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای برای سیستم فراز، چندین نوع خطای مختلف در نظر گرفته شد. خطاهای سیستم فراز بدین صورت دسته‌بندی شدند که افزایش در خروجی سنسور فراز پره ۱ (بایاس مثبت) به عنوان دسته ۱،  $f_1^2$ ، کاهش در خروجی سنسور فراز پره ۱ (بایاس منفی) به عنوان دسته ۲،  $f_2^2$  و همچنین خطای مربوط به محرک فراز که با تغییر  $\omega_n$  و

مدل می‌شود، به عنوان دسته سوم،  $f_3^2$  در نظر گرفته شدند. برای بررسی سیگنال مانده در سی‌امین ثانیه خطای بایاس به اندازه  $75/0 +$  درجه به مدت ۱۰ ثانیه، در پنجاه‌مین ثانیه خطای بایاس به اندازه ۱- درجه به مدت ۱۰ ثانیه و در هفتادمین ثانیه خطای محرک از نوع ناگهانی با تغییر  $\dot{\omega}$  و  $\omega_n$  به مدت ۳۰ ثانیه به سیستم فراز اعمال گردید. شکل (۶-۳) نشان‌دهنده سیگنال مانده در این شرایط می‌باشد.

همانطور که از شکل (۶-۳) مشخص است تفکیک این سه دسته خطای از یکدیگر دشوار است زیرا می‌توان رفتارهای مشابهی بین دسته ۳ و دسته ۱ و ۲ مشاهده کرد. در واقع با سطح آستانه ثابت می‌توان تنها دو دسته خطای ۱ و ۲ را از یکدیگر تفکیک کرد، در حالی که جداسازی دسته خطای ۳ با سطح آستانه ثابت اشتباه خواهد بود زیرا این دسته در مقاطعی با دسته ۱ و در مقاطع دیگر با دسته ۲ رفتار مشابهی دارد، که این امر موجب تصمیم‌گیری غلط خواهد شد. اما تشخیص خطای رخ داده شده در سیستم فراز، توسط ارزیابی مانده به دست آمده، با استفاده از سطح آستانه ثابت امکان‌پذیر است. برای این امر سطح آستانه‌ای با مقدار  $3/0 \pm$  درجه برای ارزیابی مانده در نظر گرفته شده است که نتایج نشان‌دهنده آن است که تشخیص خطاهای در هر حالت به خوبی انجام می‌پذیرد. با توجه به شکل (۶-۳)، خطای بایاس مثبت  $1/3$  ثانیه، خطای بایاس منفی  $2/1$  ثانیه و خطای محرک فراز  $2/5$  ثانیه پس از وقوع قابل تشخیص هستند.

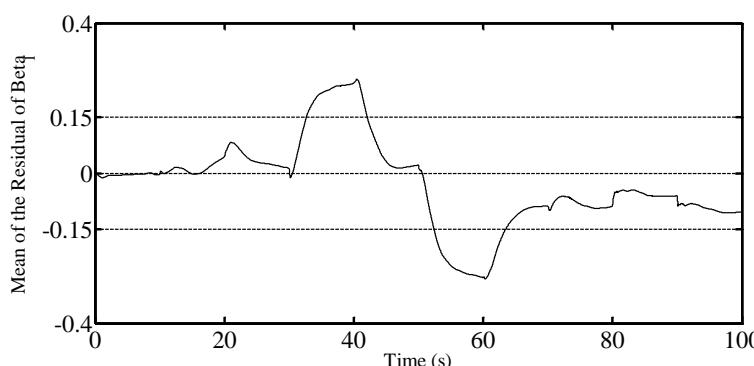


شکل (۶-۳) ارزیابی مانده توسط سطح آستانه برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه در شرایط وقوع هر سه دسته خطای در سیستم فراز.

با استفاده از این طرح می‌توان خطاهای بایاس مثبت و منفی سنسور را تا حداقل  $\pm 5\%$  درجه شناسایی کرد. برای تسريع زمان تشخیص می‌توان مقدار سطح آستانه را کاهش داد، اما کاهش زمان تشخیص با به وقوع پیوستن تشخیص‌های اشتباه مصادف خواهد شد.

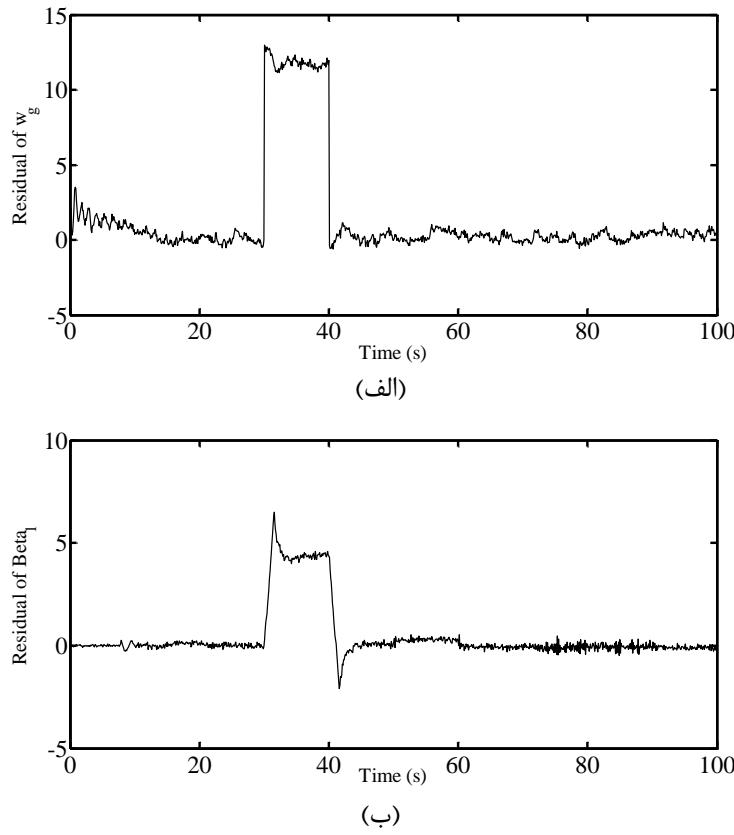
اولین پیشنهادی که برای جداسازی خطای می‌شود بهره‌گیری از میانگین مانده در بازه‌های زمانی کوتاه مدت است. با توجه به شکل (۶-۳) می‌توان به این نکته توجه کرد که میانگین سیگنال مانده در بازه زمانی وقوع خطای بایاس منفی کاهش می‌یابد. همچنین در بازه زمانی وقوع خطای محرک فراز تغییر چندانی در میانگین مانده اتفاق نمی‌افتد. برای بررسی صحت پیشنهاد ارائه شده، شبیه‌سازی در هنگام وقوع سه دسته خطای مجدداً انجام گرفت و میانگین سیگنال مانده در بازه‌های زمانی ۱۰ ثانیه محاسبه شد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل (۷-۳) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میانگین مانده در بازه زمانی وقوع خطای بایاس مثبت (بین ۳۰ الی ۴۰ ثانیه) افزایش و در بازه زمانی وقوع خطای بایاس منفی (بین ۵۰ الی ۶۰ ثانیه) کاهش یافته است و در زمان وقوع خطای محرک فراز (بین ۷۰ الی ۱۰۰ ثانیه) در محدوده‌ای نزدیک به صفر باقی مانده است. پس می‌توان عملیات مربوط به تشخیص و جداسازی خطای برای سیستم فراز را به صورت زیر خلاصه کرد:

- اگر مانده حاصل شده از سیستم فراز از سطح آستانه خارج شد، این بدان معناست که خطای در سیستم فراز به وقوع پیوسته است. نوع خطای نیز طبق روند زیر پیدا می‌شود:



شکل (۷-۳) میانگین مانده در طول بازه‌های زمانی ده ثانیه در هنگام وقوع هر سه دسته خطای برای سیستم فراز پره ۱.

- ۱- اگر میانگین مانده از حد آستانه بالا بیشتر بود، خطای دسته ۱، یعنی بایاس مثبت به وقوع پیوسته است.
- ۲- اگر میانگین مانده از حد آستانه پائین کمتر بود، خطای دسته ۲، یعنی بایاس منفی به وقوع پیوسته است.
- ۳- اگر میانگین مانده از سطح آستانه خارج نشد، یعنی خطا در محرک فراز به وقوع پیوسته است.
- اگر مانده حاصل شده از سطح آستانه خارج نشد، این بدان معناست که خطایی در سیستم فراز در بخش‌های پیشین عملکرد سیستم تشخیص خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و سیستم فراز به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت عملکرد کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطای طراحی شده در شرایط وقوع غیرهمزان خطاهای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، سنسور فراز و محرک فراز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا لازم است به این نکته اشاره شود که بروز خطا در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور بر روی مانده حاصل شده از سیستم تشخیص خطای ژنراتور نیز تأثیرگذار است. برای بررسی این موضوع در سی‌امین ثانیه خطای سنسور ژنراتور به میزان  $+5\%$  به مدت ۱۰ ثانیه، خطای سنسور فراز در پنجاهمین ثانیه به میزان  $+1\%$  درجه به مدت ۱۰ ثانیه و خطای محرک فراز در هفتادمین ثانیه از نوع پوسیدگی پمپ هیدرولیکی به مدت ۲۰ ثانیه به سیستم فراز اعمال گردید. شکل (۸-۳) نشان‌دهنده سیگنال‌های مانده حاصل شده از مقایسه خروجی اندازه‌گیری شده و خروجی مدل‌های عصبی در این شرایط می‌باشد. همانطور که از نتایج مشخص است، با بروز خطا در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، مانده مربوط به سیستم فراز پره ۱ نیز تحت تأثیر قرار گرفته و تغییر کرده است. بر عکس، با بروز خطا در سنسور و یا محرک فراز، تغییری در مانده مربوط به سرعت زاویه‌ای ژنراتور ایجاد نشده است.



شکل (۳-۸) سیگنال‌های مانده در هنگام بروز سه دسته خطای در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و سنسور و محرک فراز: (الف) مانده حاصل از سیستم تشخیص خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و (ب) مانده حاصل از سیستم تشخیص خطای سیستم فراز.

پس برای تشکیل سیستم تشخیص و جداسازی خطایکپارچه، باید این نکته مد نظر قرار گیرد که اگر هر دو مانده حاصل شده دچار تغییر شدند و از سطح آستانه گذر کردند، یعنی خطایی در سنسور ژنراتور به وقوع پیوسته است. اما اگر فقط مانده مربوط به زاویه فراز پره ۱ از سطح آستانه گذر نمود، این بدان معناست که خطایی در سیستم فراز به وقوع پیوسته است. برای تشخیص نوع خطای به وقوع پیوسته در سیستم فراز نیز می‌توان همان الگوریتم ارائه شده را به کار گرفت. مراحل الگوریتم کلی برای تشخیص و جداسازی خطاهای بررسی شده در سیستم تبدیل انرژی بادی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- اگر مانده‌های سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و سیستم فراز پره ۱، هر دو در داخل سطح آستانه قرار داشتند، هیچ خطایی در سیستم رخ نداده است.

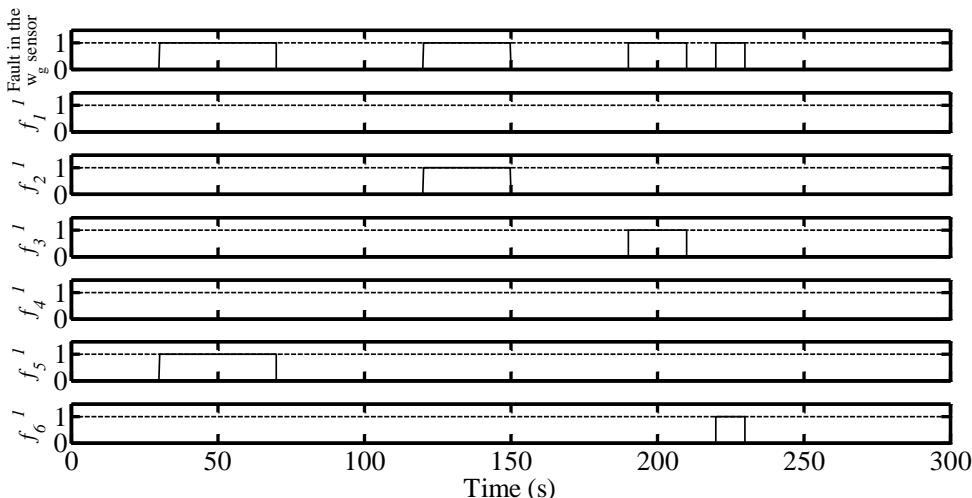
-۲- اگر مانده‌های حاصل از سنسور سرعت ژنراتور و سیستم فراز هر دو از سطح آستانه خارج شدند، خطایی در سنسور ژنراتور به وقوع پیوسته است. نوع خطا نیز با توجه به مدل‌های عصبی خطادار و مقایسه مانده حاصل از آن‌ها با سطح آستانه به دست می‌آید.

-۳- اگر مانده سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور داخل سطح آستانه قرار داشت، اما مانده سیستم فراز از سطح آستانه خارج شد، خطایی در سیستم فراز اتفاق افتاده است. نوع خطا نیز با توجه به پیشنهاد ارائه شده، یعنی با بررسی میانگین مانده حاصل خواهد شد. اگر میانگین مانده بیشتر از حد آستانه بالا بود، خطای بایاس مثبت، اگر کمتر از حد آستانه پائین بود، خطای بایاس منفی و اگر داخل سطح آستانه قرار داشت، خطای محرک فراز به وقوع پیوسته است.

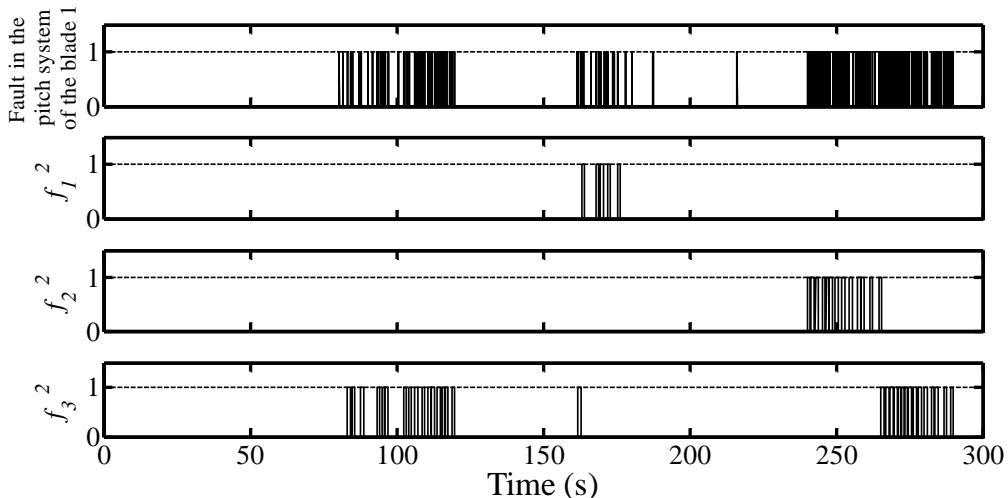
به منظور بررسی صحت عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه الگوریتم ارائه شده، طبق جدول (۳-۳) خطاها م مختلف در بازه‌های زمانی نشان داده شده و در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه برای سرعت باد متوسط ۱۴ متر بر ثانیه به سیستم اعمال شدند. در این وضعیت نیز نتایج مربوط به سیگنال‌های مانده در شکل‌های (۹-۳) و (۱۰-۳) نشان داده شده‌اند. در این شکل، مقدار ۱ به معنای وقوع خطا در عنصر مربوطه و مقدار صفر به معنای عملکرد صحیح عنصر مربوطه می‌باشد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، سیستم تشخیص و جداسازی خطا با کمترین اشتباه در تشخیص خطاها، عملکرد بسیار مطلوبی دارد. برای کاهش تعداد تشخیص‌های اشتباه می‌توان حد آستانه را بیشتر نمود تا از هشدار اشتباه بر اثر نویز، اغتشاش و عدم قطعیت‌ها جلوگیری شود؛ اما افزایش حد آستانه کاهش حساسیت سیستم تشخیص خطا را در پی خواهد داشت. همواره باید مصالحه‌ای بین نرخ هشدارهای اشتباه و حساسیت سیستم تشخیص و جداسازی خطا به انواع خطاها در طراحی مد نظر قرار داد تا هم تعداد هشدارهای اشتباه کم باشد و هم حساسیت تا حد امکان حاصل شود.

جدول (۳-۳) مشخصات خطاهای زمانی اعمال آن‌ها به سیستم تبدیل انرژی بادی در تست جامع ۱.

| محل وقوع خطا                           | نوع خطا                        | اندازه خطا     | زمان آغاز | زمان پایان |
|--|--------------------------------|----------------|-----------|------------|
| سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ( $fa_1$ ) | تناسبی افزایشی                 | +۲٪            | ۷۰        | ۳۰         |
| محرك فراز ( $fa_2$ )                   | پوسیدگی پمپ هیدرولیکی          | طبق جدول (۶-۲) | ۱۲۰       | ۸۰         |
| سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ( $fa_3$ ) | تناسبی کاهشی                   | -۱۰٪           | ۱۵۰       | ۱۲۰        |
| سنسور سرعت فراز ( $fa_4$ )             | بایاس مثبت                     | +۱°            | ۱۸۰       | ۱۶۰        |
| سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ( $fa_5$ ) | تناسبی افزایشی                 | +۵٪            | ۲۱۰       | ۱۹۰        |
| سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور ( $fa_6$ ) | تناسبی کاهشی                   | -۲٪            | ۲۳۰       | ۲۲۰        |
| سنسور سرعت فراز ( $fa_7$ )             | بایاس منفی                     | -۰/۸°          | ۲۶۰       | ۲۴۰        |
| محرك فراز ( $fa_8$ )                   | حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک | طبق جدول (۶-۲) | ۲۹۰       | ۲۶۵        |

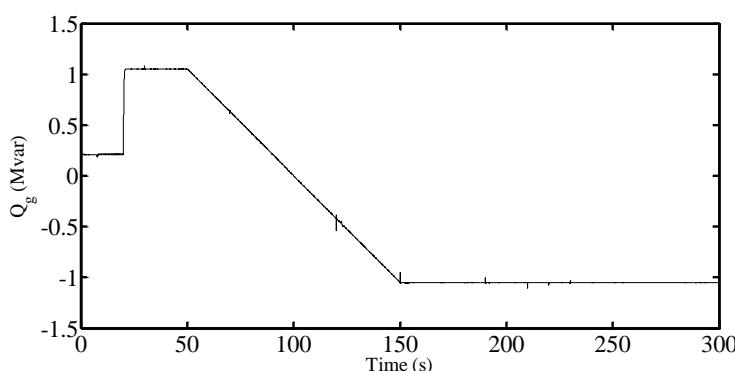


شکل (۹-۳) سیگنال‌های حاصل شده از ارزیابی مانده سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور تحت خطاهای به وقوع پیوسته طبق جدول (۳-۳).

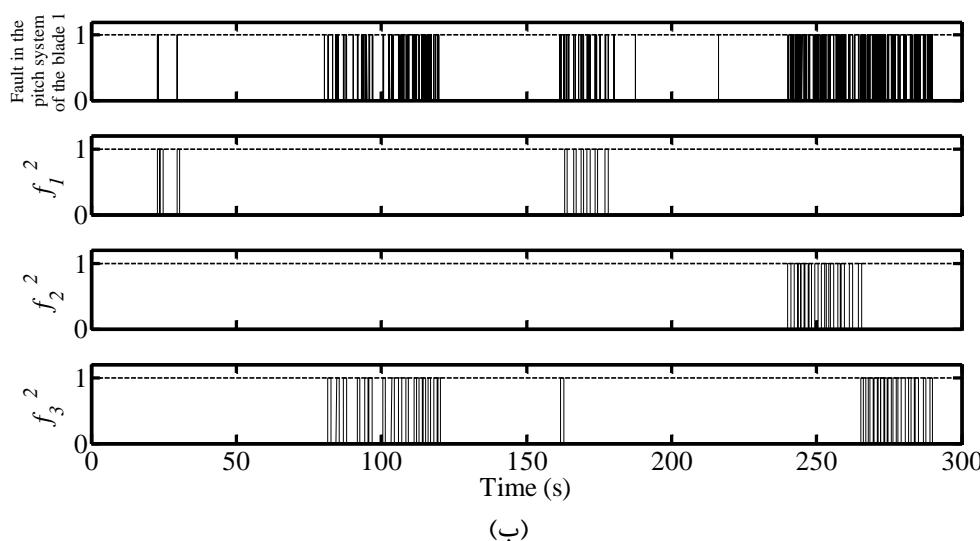
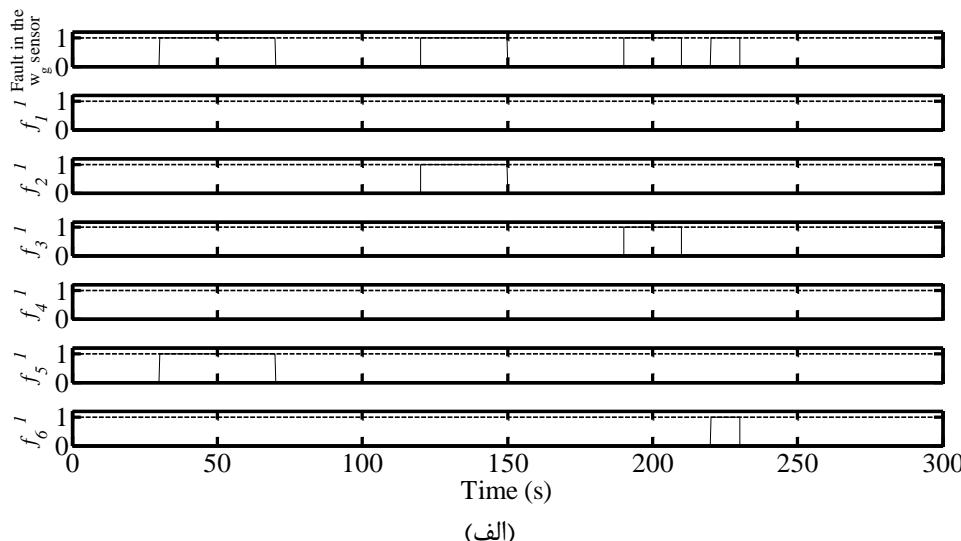


شکل (۱۰-۳) سیگنال‌های حاصل شده از ارزیابی مانده سیستم فراز پره ۱ تحت خطاهاي به وقوع پيوسته طبق جدول (۳-۳).

همچنین جهت بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا در نقاط کار مختلف، تست جامع ۱ برای تغییر توان راکتیو ورودی مجدداً انجام پذیرفت. برای بررسی تغییرات توان راکتیو ورودی، در بیستمین ثانیه توان راکتیو ورودی از مقدار  $1\text{ p.u.}$  به مقدار  $0.5\text{ p.u.}$  افزایش می‌یابد و در پنجمین ثانیه توان راکتیو ورودی با شیب  $\frac{1}{100}$ - طی مدت زمان  $100$  ثانیه از مقدار  $0.5\text{ p.u.}$  به مقدار  $0.5\text{ p.u.}$ - تغییر می‌یابد و از صد و پنجمین ثانیه به بعد نیز بر روی مقدار  $0.5\text{ p.u.}$ - ثابت باقی می‌ماند. نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل‌های (۱۱-۳) و (۱۲-۳) آورده شده است. همانطور که مشخص است، با تغییرات نقطه کار، همچنان عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا مطلوب می‌باشد.



شکل (۱۱-۳) توان راکتیو تولید شده در تست جامع ۱.



شکل (۱۲-۳) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا در هنگام تغییر توان راکتیو ورودی برای تست جامع ۱: (الف) ارزیابی مانده برای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و (ب) ارزیابی مانده برای سیستم فراز پره ۱.

### ۳-۳ تغییر ساختار بلوک ارزیابی مانده جهت مقاومسازی طرح

به دلیل حضور اغتشاش، عدم قطعیت و نویز اندازه‌گیری در سیستم‌های عملی، بلوک تصمیم‌گیری<sup>۱</sup> می‌تواند نسبت به آن‌ها حساس باشد. عوامل نامبرده شده باعث می‌شوند که مسئله مقاوم بودن در سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا بسیار مهم باشد. مسئله مقاوم بودن در سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا آن است که به طور همزمان هم تعداد هشدارهای اشتباه مینیمم شود و هم حساسیت

<sup>۱</sup> Decision Making

نسبت به مانده تولید شده افزایش یابد. همانطور که در مرجع [۴۵] شرح داده شده است، مقاوم بودن

سیستم‌های تشخیص و جداسازی خطا توسط دو روش کلی قابل دستیابی است:

۱- روش‌های فعال<sup>۱</sup>: در این روش‌ها، مسئله مقاوم بودن از ابتدای رویه طراحی سیستم تشخیص و جداسازی خطا مدنظر قرار می‌گیرد، به نحوی که نسبت به نویز، اغتشاش و عدم قطعیت غیرحساس باشد. به طور کلی این راهکارها از مشاهده‌گرهای ورودی نامعلوم، معادلات برابری مقاوم<sup>۲</sup> و مشاهده‌گرهای پارامتر تغییرپذیر خطی<sup>۳</sup> بهره می‌برند.

۲- روش‌های غیرفعال<sup>۴</sup>: در این روش‌ها مسئله مقاوم بودن در بلوک تصمیم‌گیری سیستم تشخیص و جداسازی خطا به دست می‌آید. در این راهکارها مقاوم بودن طرح توسط یک سطح آستانه تطبیقی<sup>۵</sup> حاصل می‌شود. همانطور که در [۴۵] بدان اشاره شده است، مزیت روش‌های غیرفعال نسبت به روش‌های فعال در این است که مقاومسازی مطلوب علی‌رغم وجود پارامترهای دارای عدم قطعیت مدل، قابل دستیابی می‌باشد.

جهت جلوگیری از وقوع هشدارهای اشتباه در سیستم تشخیص و جداسازی خطا، باید مقدار سطح آستانه ثابت به دلیل وجود دینامیک‌های مدل نشده، اغتشاش، نویز اندازه‌گیری و عدم قطعیت، به حد کافی بزرگ انتخاب شود. از طرف دیگر انتخاب سطح آستانه ثابت بزرگ منجر به کاهش حساسیت سیستم تشخیص و جداسازی خطا خواهد شد. بنابراین در روش‌های غیرفعال، استفاده از سطح آستانه تطبیقی پیشنهاد می‌شود. در سطح آستانه تطبیقی، مقدار سطح آستانه با توجه به اطلاعات به دست آمده از سیگنال مانده، در طول زمان تغییر می‌کند. در این تحقیق برای مقاومسازی طرح ارائه شده، از دو روش استفاده می‌شود. روش اول، روشی است که در آن از سطح آستانه تطبیقی طبق آنچه در [۴۵] آورده شده است، استفاده می‌شود. روش دوم، روشی پیشنهادی است که در آن سطح آستانه

<sup>1</sup> Active Methods

<sup>2</sup> Robust Parity Equations

<sup>3</sup> Linear Parameter Varying Observers

<sup>4</sup> Passive Methods

<sup>5</sup> Adaptive Threshold

تطبیقی از طریق منطق فازی تولید می‌شود. روش ارائه شده قابلیت تعمیم برای سیگنال‌های مانده با خواصی را دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

### ۱-۳-۱ روش اول برای تولید سطح آستانه تطبیقی

در این روش، سطح آستانه تطبیقی طبق روابط زیر تولید می‌شود [۴۵]:

$$T(k) = t_\gamma \bar{v}(k) \pm \bar{m}(k) \quad (4-3)$$

$$\bar{v}(k) = \eta v(k) + (1-\eta)v(k-1) \quad (5-3)$$

$$\bar{m}(k) = \eta m(k) + (1-\eta)m(k-1) \quad (6-3)$$

که در روابط فوق  $v(k)$  و  $m(k)$  به ترتیب واریانس و مقدار میانگین سیگنال مانده برای  $n$  نمونه قبلی هستند. همچنین  $\eta$  پارامتر مقدار حرکت است که نزدیک به عدد یک در نظر گرفته می‌شود، γ سطح اهمیت<sup>۱</sup> است که به احتمال تجاوز کردن سیگنال مانده از یک مقدار تصادفی،  $t_\gamma$ ، با توزیع  $N(0,1)$  می‌باشد. رابطه زیر نشان‌دهنده سطح اهمیت می‌باشد:

$$\gamma = P\left(\left|\frac{r-m}{v}\right| > t_\gamma\right) \quad (7-3)$$

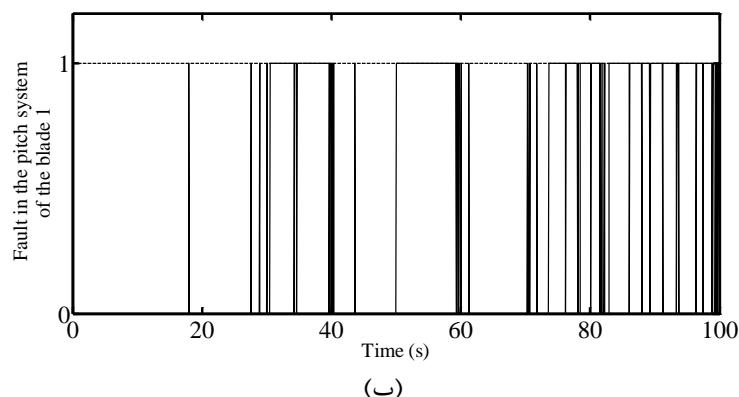
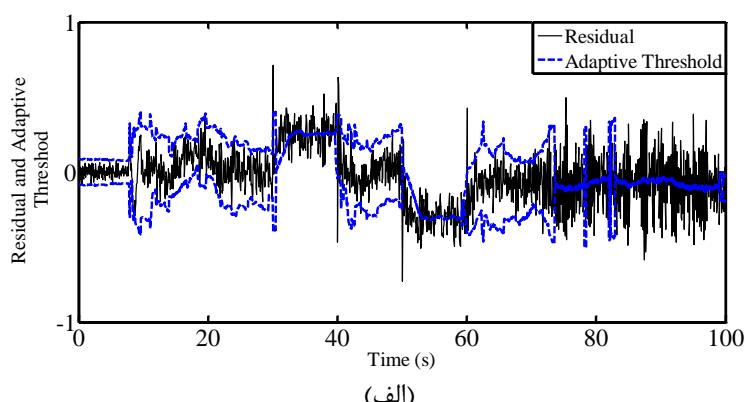
به منظور بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه سطح آستانه تطبیقی روش اول، سیگنال مانده آورده شده در شکل (۶-۳) مجدداً در نظر گرفته شد و سطح آستانه تطبیقی تولید شد. در این حالت نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۳-۳) نشان داده شده‌اند. همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است، سطح آستانه تطبیقی رفتارهای مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، تعداد هشدارهای اشتباه و هشدارهای از دست رفته برای سطوح آستانه ثابت و تطبیقی در جدول (۳-۴) گردآوری شده است. آنالیز آماری تأیید می‌کند که عملکرد سطح آستانه تطبیقی به مراتب بهتر از

<sup>۱</sup> Significance Level

سطح آستانه ثابت می‌باشد. با بهره‌گیری از سطح آستانه تطبیقی، تعداد هشدارهای اشتباه و هشدارهای از دست رفته به مراتب کاهش یافته است.

### ۳-۲-۳ استفاده از منطق فازی برای تولید سطح آستانه تطبیقی

در سیستم فازی پیشنهادی، سیگنال مانده، میانگین مانده در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و سیگنال حاصل از عبور مانده از یک فیلتر پائین‌گذر به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند. با آنالیز این سه سیگنال هم می‌توان وقوع خطا را تشخیص داد و هم آن‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. بدین صورت که با توجه به شکل (۳-۶) مشخص است که میانگین سیگنال مانده در بازه زمانی وقوع خطا با ایاس مثبت افزایش و در بازه زمانی وقوع خطا منفی کاهش می‌یابد. همچنین در بازه زمانی وقوع خطا محرک فراز تغییر چندانی در میانگین مانده اتفاق نمی‌افتد.

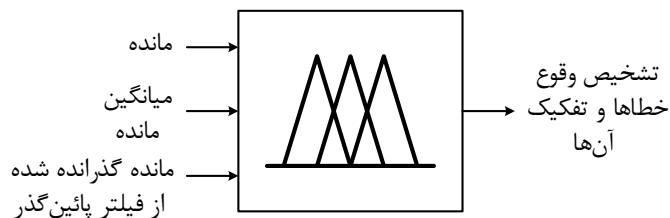


شکل (۱۳-۳) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطا به همراه سطح آستانه تطبیقی روش اول در هنگام بروز سه دسته خطا در سیستم فراز پره ۱: (الف) سیگنال مانده و سطح آستانه تطبیقی و (ب) تصمیم‌گیری با استفاده از سطح آستانه تطبیقی.

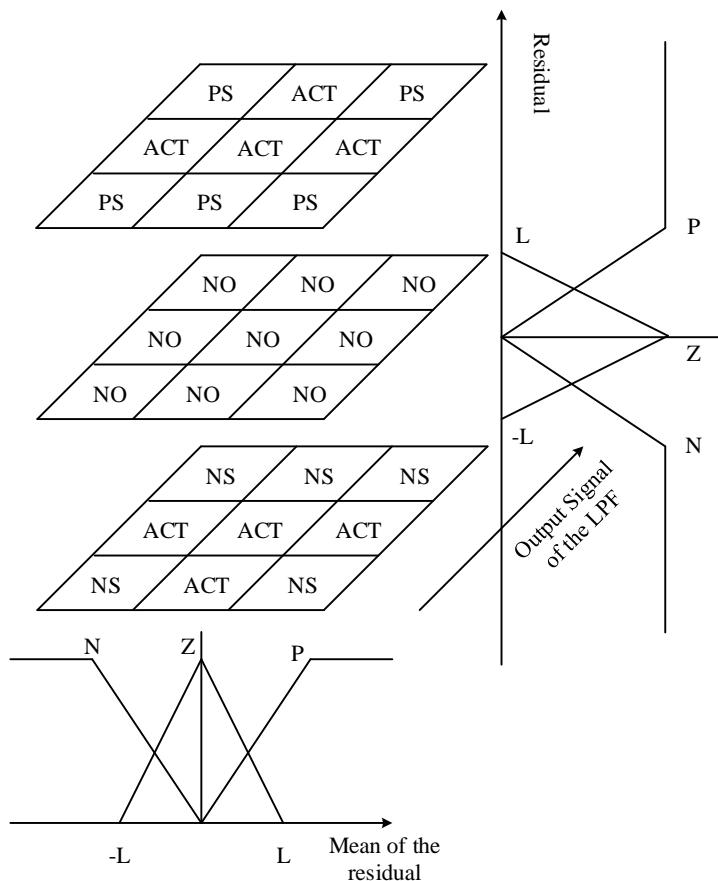
جدول (۴-۳) مقایسه تعداد هشدارهای اشتباه و از دست رفته برای سطوح آستانه ثابت و تطبیقی روش اول.

| نوع سطح آستانه | تعداد هشدارهای اشتباه | تعداد هشدارهای از دست رفته |
|----------------|-----------------------|----------------------------|
| ثابت           | ۸                     | ۳۸۲                        |
| تطبیقی روش اول | ۵                     | ۵۷                         |

اگر مانده از یک فیلتر پائین‌گذر عبور داده شود، نویزهای موجود در آن تا حد مطلوبی حذف شده و تنها فرکانس‌های پائین (نزدیک به صفر) عبور داده می‌شوند. شکل (۱۴-۳) نشان‌دهنده سیستم فازی پیشنهادی است. خروجی سیستم فازی نیز مشخص کننده وقوع و یا عدم وقوع خطای خطا و همچنین نوع خطای به وقوع پیوسته می‌باشد. برای خروجی از اعداد ثابت بدین صورت استفاده شد که عدد صفر نشان‌دهنده عدم وقوع خطای عدد یک بیانگر وقوع خطای بایاس مثبت در سنسور فراز، عدد دو نشان‌دهنده وقوع خطای بایاس منفی در سنسور فراز و عدد سه بیانگر وقوع خطای در محرک فراز باشد. از آنجایی که خروجی عددی ثابت می‌باشد از سیستم استنتاج سوگنو بهره گرفته شد. همچنین توابع تعلق برای ورودی‌های سیستم فازی و جدول پایگاه قوانین در شکل (۱۵-۳) نشان داده شده است. در شکل (۱۵-۳)، P، Z و N به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر عددی مثبت، نزدیک به صفر و منفی می‌باشند. توابع تعلق مقادیر نزدیک به صفر از نوع مثلثی و مابقی توابع تعلق از نوع ذوزنقه‌ای در نظر گرفته شدند. همچنین در این شکل PS به معنای وقوع خطای بایاس مثبت در سنسور فراز، NS به معنای وقوع خطای بایاس منفی در سنسور فراز، ACT به معنای وقوع خطای در محرک فراز و NO به معنای عدم وقوع خطای و عملکرد صحیح سیستم می‌باشد. توابع تعلق و جدول پایگاه قوانین، برای سیستم فازی تولید‌کننده سطح آستانه تطبیقی، جهت تفکیک خطاهای به وقوع پیوسته در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور نیز مشابه با شکل (۱۵-۳) می‌باشد.



شکل (۱۴-۳) سیستم فازی پیشنهادی.



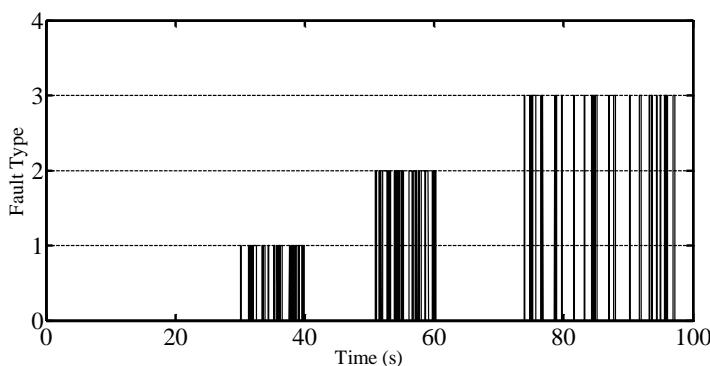
شکل (۱۵-۳) توابع تعلق ورودی‌ها و جدول قوانین.

به منظور بررسی صحت سیستم جداسازی فازی پیشنهاد شده، مانده شکل (۱۶-۳)، میانگین آن و عبور داده شده آن از فیلتر پائین‌گذر، وارد سیستم فازی پیشنهادی شدند. خروجی در این وضعیت به صورت شکل (۱۶-۳) می‌باشد. با توجه به این شکل مشخص است که تشخیص و جداسازی خطای خطاها به نحو بسیار مطلوبی انجام شده است. در شکل (۱۶-۳) خروجی سیستم فازی بین لحظات ۳۰ الی ۴۰ ثانیه برابر با یک (خطای بایاس مثبت)، بین لحظات ۵۰ الی ۶۰ ثانیه برابر با دو (خطای بایاس منفی)

و بین لحظات ۷۰ الی ۱۰۰ برابر سه (خطای محرک) شده است و این در حالی است که در مابقی لحظات خروجی برابر صفر (بدون خطای محرک) است. نتیجه حاصل شده عملکرد صحیح و عاری از هشدارهای اشتباه را برای سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی-عصبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

برای بررسی بیشتر عملکرد سیستم ارائه شده، یک تست جامع طبق جدول (۳-۵) انجام پذیرفت. در این تست جامع خطاهای مختلف ایجاد شدند و توانایی سیستم تشخیص و جداسازی خطای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۳-۱۷) آورده شده است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، سیستم پیشنهادی، با کمترین اشتباه در تشخیص و جداسازی خطاهای عملکرد بسیار مطلوبی دارد. برای کاهش تعداد تشخیص‌های اشتباه می‌توان محدوده‌های توابع تعلق را تغییر داد؛ اما این تغییر کاهش حساسیت سیستم تشخیص خطای را در پی خواهد داشت.

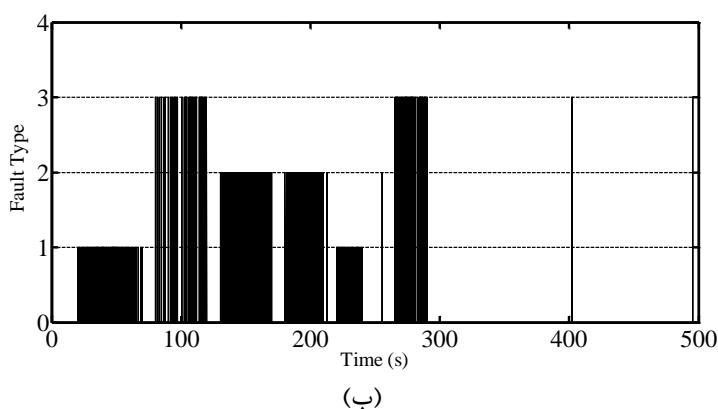
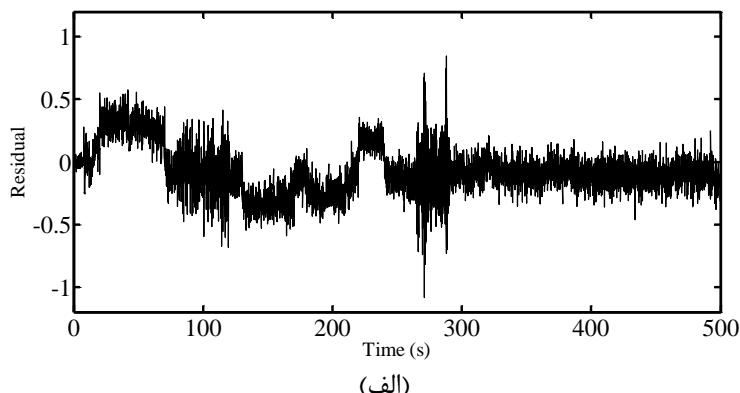
از سطح آستانه تطبیقی فازی ارائه شده می‌توان در هر کاربرد دیگری نیز استفاده کرد، به شرط آن که سیگنال مانده رفتارهای مشابهی با سیگنال‌های مانده سیستم تبدیل انرژی بادی داشته باشد. اگر خصوصیات رفتاری مانده به صورت زیر باشد، در هر سیستم تشخیص و جداسازی خطای دیگری می‌توان از سطح آستانه پیشنهادی استفاده کرد:



شکل (۳-۱۶) خروجی سیستم تشخیص و جداسازی خطای فازی-عصبی پیشنهادی در شرایط وقوع سه نوع خطا در سیستم فراز پره ۱.

جدول (۳-۵) زمان و محل وقوع خطاهای مختلف در تست جامع ۲.

| پایان | آغاز | نوع خطای                       | محل وقوع خطای |
|-------|------|--------------------------------|---------------|
| ۷۰    | ۲۰   | بایاس مثبت                     | سنسور فراز    |
| ۱۲۰   | ۸۰   | پوسیدگی پمپ هیدرولیکی          | محرك فراز     |
| ۱۷۰   | ۱۳۰  | بایاس منفی                     | سنسور فراز    |
| ۲۱۰   | ۱۸۰  | بایاس منفی                     | سنسور فراز    |
| ۲۴۰   | ۲۲۰  | بایاس مثبت                     | سنسور فراز    |
| ۲۹۰   | ۲۶۵  | حجم هوای زیاد در روغن هیدرولیک | محرك فراز     |
| ۵۰۰   | ۳۰۰  | -                              | بدون خطای     |



شکل (۳-۱۷) بررسی عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای به همراه سطح آستانه فازی در شرایط وقوع سه نوع خطای در سیستم فراز پره ۱: (الف) سیگنال مانده و (ب) تصمیم‌گیری با استفاده از سطح آستانه فازی.

۱- خطاهای بایاس، تناسبی و خروجی ثابت می‌توانند هم به صورت نرم و هم به صورت ناگهانی اتفاق افتد. این گونه خطاهای میانگین مانده را در طول بازه‌های زمانی کوتاه مدت افزایش و یا

کاهش می‌دهند. این خطاهای دسته ۱ در صورت افزایشی بودن و به عنوان

خطاهای دسته ۲ در صورت کاهشی بودن در نظر گرفته می‌شوند.

۲- هرگونه خطای دیگری که منجر به نوسانات شدید با مقدار میانگین نزدیک به صفر در سیگنال مانده شود، به عنوان خطاهای دسته ۳ در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۳ پرسی عملکرد کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی

در این بخش عملکرد کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی مورد بررسی آماری قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای همراه سطوح آستانه ثابت، تطبیقی روش اول و تطبیقی فازی، تست جامع ۱ که در جدول (۳-۳) آورده شده است، مجدداً انجام پذیرفت. به منظور مقایسه عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای سه مشخصه مورد استفاده قرار گرفت. این مشخصه‌ها، تعداد هشدارهای اشتباه، تعداد هشدارهای از دست رفته و زمان تشخیص،  $t_{detect}$  می‌باشند. جدول (۳-۶) نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی در این حالت می‌باشد. شایان ذکر است که در جدول (۳-۶) تعداد هشدارهای اشتباه برای کل سیگنال مانده محاسبه شده است؛ اما تعداد هشدارهای از دست رفته برای هر نوع خطای صورت مجزا محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی صحت عملکرد سیستم تشخیص و جداسازی خطای عصبی-فازی را تصدیق می‌کند. همانطور که مشخص است، سیستم تشخیص و جداسازی خطای همراه سطح آستانه فازی از حساسیت خوبی برخوردار است و تعداد هشدارهای اشتباه آن مطلوب و مناسب است. همچنین زمان تشخیص نیز در طرح ارائه شده مطلوب می‌باشد.

جدول (۶-۳) ارزیابی سیستم تشخیص و جداسازی خطای پیشنهادی با سطوح آستانه مختلف.

| نوع خطای | تعداد هشدارهای اشتباہ  |  |  | تعداد هشدارهای از دست رفته |               |            | $t_{detect}$ |               |            |
|----------|--|--|--|----------------------------|---------------|------------|--------------|---------------|------------|
|          | ثابت   | طبیقی روش اول  | طبیقی فازی   | ثابت                       | طبیقی روش اول | طبیقی فازی | ثابت         | طبیقی روش اول | طبیقی فازی |
| $fa_1$   | :<br>۲۹<br>برای<br>تمامی<br>نمونه‌ها<br>در طول<br>زمان<br>۳۰۰<br>ثانیه | :<br>۱۳<br>برای<br>تمامی<br>نمونه‌ها<br>در طول<br>زمان<br>۳۰۰<br>ثانیه | :<br>۱۱<br>برای<br>تمامی<br>نمونه‌ها<br>در طول<br>زمان<br>۳۰۰<br>ثانیه | ۳                          | ۲             | ۲          | ۰/۲          | ۰/۰۵          | ۰/۰۶       |
| $fa_2$   |  |  |  | ۳۴۸                        | ۷۴            | ۶۱         | ۰/۳          | ۰/۴           | ۰/۲۸       |
| $fa_3$   |  |  |  | ۳                          | ۳             | ۲          | ۰/۲۵         | ۰/۱           | ۰/۱        |
| $fa_4$   |  |  |  | ۲۳۵                        | ۴۱            | ۴۰         | ۱/۵          | ۰/۶           | ۰/۵        |
| $fa_5$   |  |  |  | ۳                          | ۱             | ۲          | ۰/۲          | ۰/۲           | ۰/۲        |
| $fa_6$   |  |  |  | ۳                          | ۲             | ۳          | ۰/۱          | ۰/۱           | ۰/۱۱       |
| $fa_7$   |  |  |  | ۷۹                         | ۱۱            | ۱۰         | ۰/۱          | ۰/۳           | ۰/۱        |
| $fa_8$   |  |  |  | ۲۴۵                        | ۳۹            | ۴۱         | ۰/۵          | ۰/۳۵          | ۰/۳        |

فصل چهارم:

سیستم کنترل تحمل پذیر خطا



## ۱-۴ مقدمه

در حالت کلی سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا را می‌توان به دو نوع تقسیم‌بندی کرد: سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای غیر فعال<sup>۱</sup> و سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال<sup>۲</sup>. در سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای غیر فعال کنترل‌کننده‌ها ثابت هستند و به نحوی طراحی می‌شوند تا در برابر دسته‌ای از خطاهای مورد انتظار و گمان مقاوم باشند. در این روش نیازی به سیستم تشخیص خطا و تجدید ساختار کنترل‌کننده نیست، اما این روش دارای قابلیت‌های محدودی از تحمل‌پذیری خطاست. بر خلاف سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای غیر فعال، سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال نسبت به خطاهای به وجود آمده در اجزاء سیستم به صورت فعال، واکنش نشان می‌دهد؛ سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال این عمل را توسط تجدید ساختار کنترل‌کننده انجام می‌دهد به طوری که پایداری و سطح قابل قبولی از عملکرد در سراسر سیستم حفظ شود. در شرایط مشخص، سطح عملکرد کاهش یافته نیز ممکن است مورد قبول واقع شود. این نوع سیستم کنترل همچنین خود-مرمت<sup>۳</sup>، تجدید ساختار دهنده و یا خود-تدبیر<sup>۴</sup> نیز نامیده می‌شود. در سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال جبرانسازی در هنگام بروز خطا یا با انتخاب یک قانون کنترل از پیش محاسبه شده و یا با سنتز یک قانون کنترل جدید بر-خط<sup>۵</sup> انجام می‌پذیرد. برای دستیابی به تجدید ساختار موفقیت‌آمیز در سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال، هر دو راه کار اشاره شده، به شدت به طرح بلادرنگ تشخیص خطا وابسته هستند، تا اطلاعات به روزی را از وضعیت سیستم دریافت کنند. بنابراین هدف اصلی یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا، دستیابی به عملکرد مناسب می‌باشد؛ هم در زمانی که خطا در سیستم وجود ندارد و هم در زمانی که نقص فنی و خطا در سنسورها، محرک‌ها و اجزاء دیگر سیستم به وقوع می‌بیوندد [۸۴].

<sup>1</sup> Passive Fault Tolerant Control Systems (PFTCS)<sup>2</sup> Active Fault Tolerant Control Systems (AFTCS)<sup>3</sup> Self-Repairing<sup>4</sup> Self-Designing<sup>5</sup> On-line

اهداف طراحی برای سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال شامل عملکرد گذرا و حالت دائم برای سیستم تحت شرایط عادی و تحت شرایط حضور خطای می‌باشد. نکته قابل توجه این است که تاکید بر روی رفتار سیستم تحت شرایط ذکر شده، می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. در شرایط عادی، باید به کیفیت رفتار سیستم اهمیت بیشتری داد. اما در شرایط حضور خطای فعال، باید سیستم به فعالیت خود با سطح عملکرد قابل قبولی (و شاید سطح عملکرد کاهش یافته‌ای) ادامه دهد [۸۴]. به طور نمونه، سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال را می‌توان به چهار زیرسیستم تقسیم کرد: ۱- کنترل کننده تجدید ساختار دهنده، ۲- سیستم تشخیص و جداسازی خطای فعال، ۳- مکانیسم تجدید ساختار کنترل کننده و ۴- فرمان مرجع.

نکات اصلی در سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال چگونگی طراحی موارد زیر می‌باشد [۸۴]:

- کنترل کننده‌ای که بتواند به راحتی تجدید ساختار دهد.
- سیستم تشخیص و جداسازی خطای فعال که حساسیت بالایی به خطای فعال داشته باشد و نسبت به عدم قطعیت‌های مدل، تغییرات شرایط کار و اغتشاش‌ها مقاوم باشد.
- مکانیسم تجدید ساختاری که بتواند عملکرد مناسبی را برای سیستم پیش از بروز خط و در هنگام بروز خط اجرا کند.

مسئله بحرانی در هر سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال زمان محدودی است که برای سیستم تشخیص خطای فعال و کنترل کننده تجدید ساختار دهنده وجود دارد. با توجه به اطلاعات کاملی که در آورده شده است، تعدادی از راهکارهای طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال به صورت [۸۴] زیر می‌باشند: خطی درجه دوم، شبیه معکوس/آمیزندۀ کنترل<sup>۱</sup>، زمان‌بندی بهره/تغییرات پارامتر خطی<sup>۲</sup>، کنترل تطبیقی مدل مرجع، تشخیص ساختار ویژه، مدل‌های چندگانه، خطی‌سازی فیدبکی،

<sup>1</sup> Pseudo-Inverse/Control Mixer

<sup>2</sup> Gain Scheduling/Linear Parameter Varying (LPV)

وارونه‌سازی دینامیکی<sup>۱</sup>، روش‌های کنترل مقاوم از قبیل  $H_\infty$ ، کنترل ساختار متغیر و مود لغزشی، کنترل مدل داخلی تعمیم یافته<sup>۲</sup>، کنترل هوشمند با استفاده از سیستم‌های کارشناس، شبکه‌های عصبی و منطق فازی. یکی دیگر از راه‌کارهایی که مورد توجه بسیاری از محققان قرار دارد استفاده از بانکی از کنترل‌کننده‌ها می‌باشد که هر کدام از آن‌ها مربوط به یکی از شرایط عادی و یا شرایط تحت خطا می‌باشند [۲۶]. تئوری استفاده از بانکی از کنترل‌کننده‌ها با استفاده از سوئیچینگ منطقی در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. در این تحقیق از دو روش اصلاح سیگنال خطدار و بانکی از کنترل‌کننده‌ها، کنترل تحمل‌پذیر خطا برای تنظیم زاویه فراز انجام می‌پذیرد. در دو بخش آتی این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند و بر روی سیستم تبدیل انرژی بادی پیاده‌سازی می‌شوند.

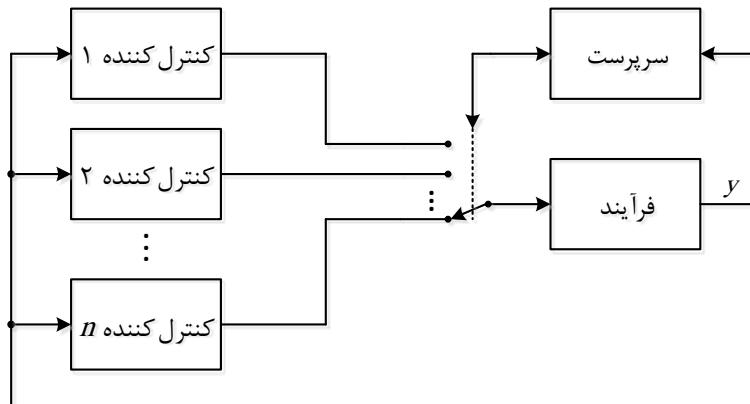
#### ۴-۲ سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا با اصلاح سیگنال خطدار

در این بخش کنترل تحمل‌پذیر خطا برای سیستم تبدیل انرژی بادی با استفاده از اصلاح سیگنال خطدار ارائه می‌شود. منظور از اصلاح سیگنال آن است که سیستم کنترل تغییر نیافته و بنا به شرایط خطدار اصلاح نمی‌شود [۷]. در طرح مورد نظر، تنها سیگنال‌های خطدار با توجه به مقدار تخمین زده شده آن‌ها، اصلاح می‌شوند و سپس وارد سیستم کنترل می‌شوند. در این بخش برای کنترل‌کننده فراز آورده شده در شکل (۱۶-۲)، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا طراحی می‌شود. مهمترین ویژگی کنترل تحمل‌پذیر خطا بر مبنای اصلاح سیگنال خطدار آن است که پیاده‌سازی این نوع کنترل‌کننده مستقل از ساختار کنترل‌کننده نامی خواهد بود و بر روی عملکرد نامی کنترل‌کننده تأثیری نخواهد گذاشت. ساختار سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. در شکل (۴-۲) ابتدا خطا توسط سیستم تشخیص و جداسازی خطا که در فصل سوم طراحی شد، شناسایی می‌شود.

---

<sup>1</sup> Dynamic Inversion

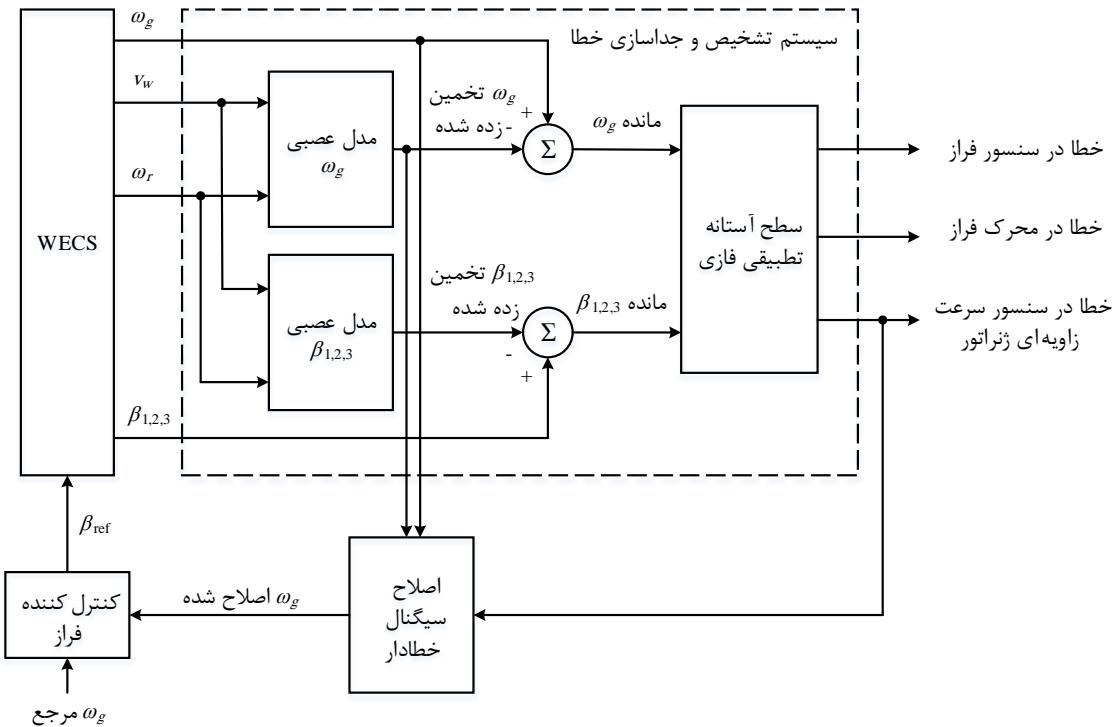
<sup>2</sup> Generalized Internal Model Control



شکل (۴-۱) تغییر ساختار کنترل کننده با استفاده از سوئیچینگ منطقی.

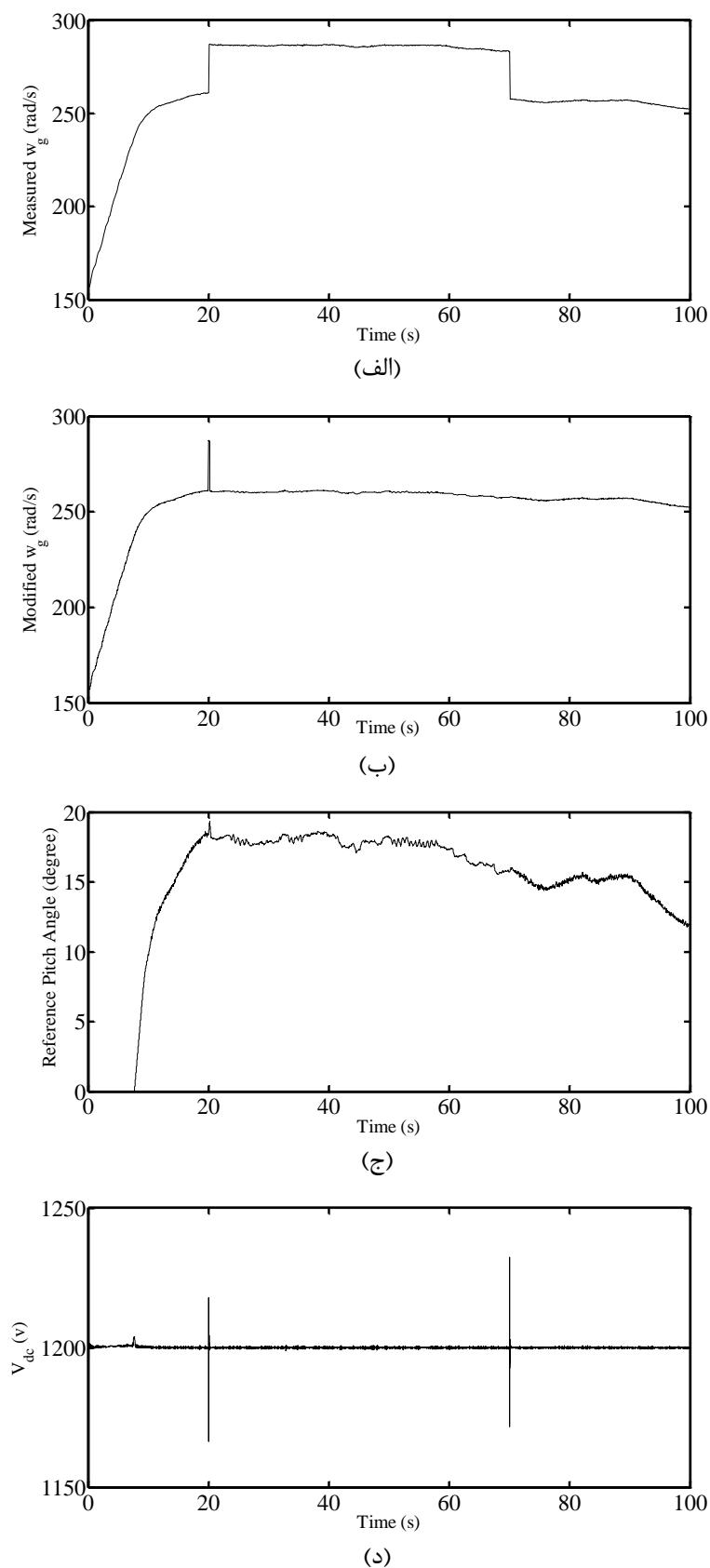
سپس بنا به اینکه سیستم تبدیل انرژی بادی در حالت سالم یا خطدار به سر می‌برد، سیگنال اعمال شده به کنترل کننده فراز متفاوت خواهد بود. اگر سیستم در حالت سالم به سر می‌برد، پس خطای در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور اتفاق نیفتاده است و اندازه‌گیری انجام شده توسط سنسور صحیح می‌باشد؛ پس همان سیگنال اندازه‌گیری شده وارد کنترل کننده فراز می‌شود. اما اگر خطای در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور رخ داده باشد، در این صورت سیگنال تخمین زده شده توسط مدل عصبی وارد کنترل کننده فراز می‌شود.

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای شکل (۴-۲)، در ثانیه بیستم، خطای تناسبی به میزان  $+10\%$  به سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور اعمال گردید و در ثانیه هفتادم مجدداً سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور به حالت بدون خطا بازگردانده شد. نتایج شبیه‌سازی در این وضعیت در شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) آورده شده‌اند. شکل (۴-۳-الف) نشان‌دهنده سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده توسط سنسور است که همانطور که مشخص است در ثانیه بیستم خطای تناسبی در آن به وقوع پیوسته است. شکل (۴-۳-ب)، خروجی بلوك اصلاح سیگنال خطدار در شکل (۴-۲) را نشان می‌دهد. به وضوح قابل مشاهده است که پس از وقوع خطای با توجه به تشخیص خطای توسط سیستم تشخیص و جداسازی خطای سرعت زاویه‌ای تخمین زده شده جایگزین سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده توسط سنسور می‌شود و پس از رفع خطای سرعت زاویه‌ای تخمین زده شده وارد کنترل کننده فراز می‌شود.

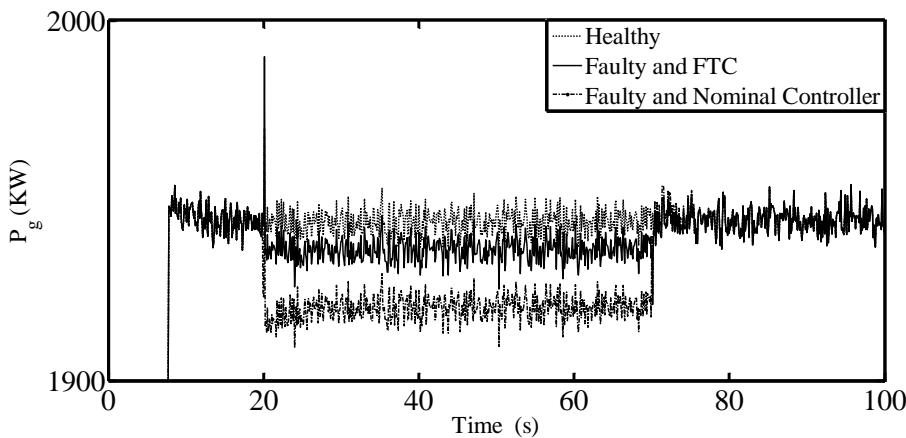


شکل (۲-۴) ساختار کلی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا با اصلاح سیگنال خطادار.

شکل (۳-۴-ج) نیز خروجی کنترل کننده فراز را نشان می‌دهد که این سیگنال وارد سیستم فراز می‌شود. همچنین شکل (۳-۴-د) ولتاژ لینک جریان مستقیم را در هنگام بروز خطا نشان می‌دهد که شبیه‌سازی بیانگر آن است که نوسانات ولتاژی بر روی لینک جریان مستقیم از محدوده مجاز خارج نشده است. شکل (۴-۴) نیز نشان‌دهنده مقایسه توان اکتیو تولید شده توسط توربین بادی در سه حالت مختلف است. همانطور که از این شکل مشخص است با به کارگیری سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا، در بازه زمانی وقوع خطا در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، توان بیشتری را نسبت به زمانی که کنترل کننده نامی در سیستم قرار دارد، می‌توان دریافت کرد. در واقع با بروز خطای٪ + ۱۰ در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، زمانی که کنترل کننده نامی در سیستم قرار دارد، با توجه به این‌که همان سیگنال خطادار وارد کنترل کننده فراز می‌شود، کنترل کننده سعی می‌کند سرعت زاویه‌ای ژنراتور را در محدوده مجاز نگه دارد. این امر با افزایش زوایای فراز پره‌ها امکان‌پذیر خواهد بود؛ و هنگامی که زوایای فراز پره‌ها افزایش می‌یابند، توان اکتیو تولیدی کاهش خواهد یافت.



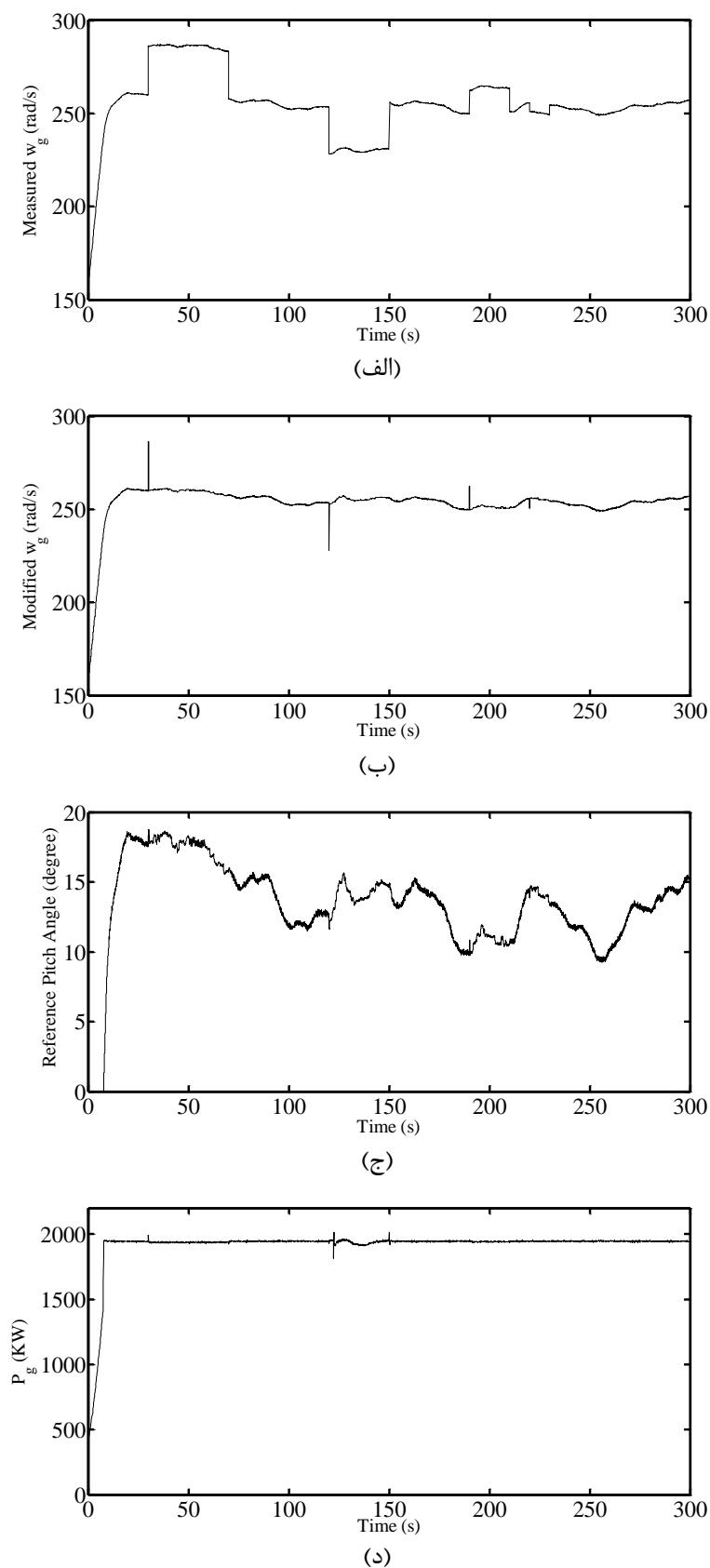
شکل (۳-۴) نتایج شبیه‌سازی به همراه سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای: (الف) سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده توسط سنسور، (ب) سرعت زاویه‌ای اصلاح شده، (ج) زاویه فراز مرجع و (د) ولتاژ لینک جریان مستقیم.



شکل (۴-۴) مقایسه توان تولید شده توسط توربین بادی در سه حالت بدون خطا (خط‌چین)، خطا دار به همراه سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا (خط) و خطا دار به همراه سیستم کنترل نامی ( نقطه خط).

پس از وقوع خطا، تناسبی افزایشی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور موجب کاهش تولید توان اکتیو می‌شود که این امری نامطلوب است. اما زمانی که سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا به کار گرفته می‌شود، سیگنال سرعت زاویه‌ای ژنراتور اصلاح شده و سپس وارد کنترل‌کننده فراز می‌شود، سطح توان اکتیو بیشتری قابل دستیابی خواهد بود. مشخص است که حضور سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا در توربین بادی موجب می‌شود که همچنان بتوان در سطح پائین‌تری از عملکرد، از توربین بادی توان دریافت نمود و عملیات تعمیر می‌تواند در زمان مقرر انجام شود.

به منظور بررسی بیشتر عملکرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی، تست جامع ۱ آورده شده در جدول (۳-۳)، انجام پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی در این وضعیت در شکل (۵-۴) آورده شده است. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی در هنگام وقوع انواع خطاها، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد به نحوی که توان اکتیو تولید شده در محدوده‌ای نزدیک به توان نامی (۲ MW) باقی مانده است و در هنگام وقوع خطا، تناسبی در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، این سیگنال اصلاح شده و سپس به کنترل‌کننده فراز اعمال شده است.

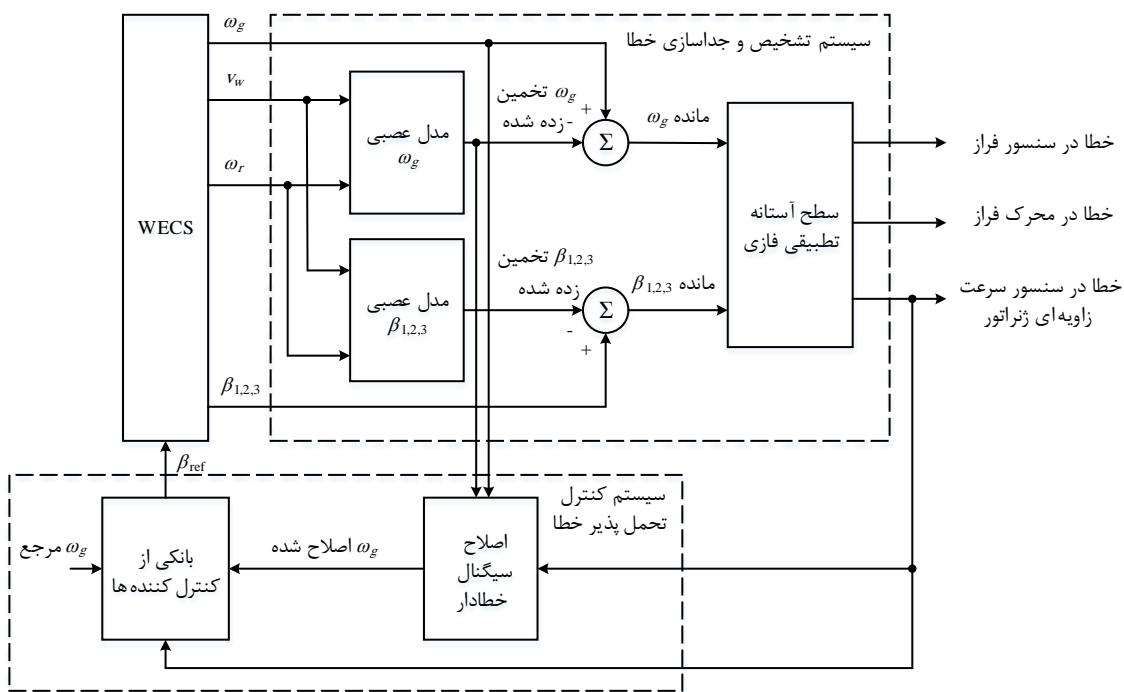


شکل (۴-۵) نتایج شبیه‌سازی به همراه سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای در تست جامع ۱: (الف) سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده، (ب) سرعت زاویه‌ای اصلاح شده، (ج) زاویه فراز مرجع و (د) توان اکتیو تولید شده.

### ۴-۳ سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای با استفاده از بانکی از کنترل‌کننده‌ها

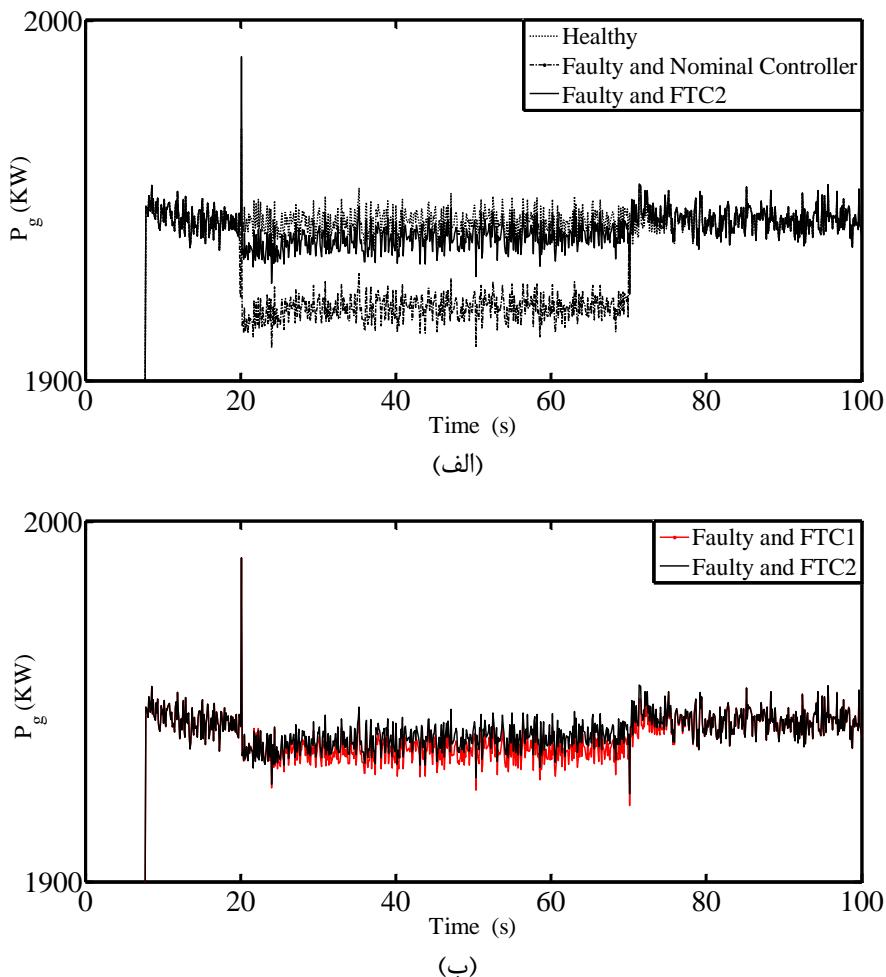
ایده کلی این روش، بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های متفاوت در شرایط خطادار متفاوت است؛ به نحوی که از کنترل‌کننده ۱ در هنگام عملکرد بدون خطای، از کنترل‌کننده ۲ در هنگام بروز خطای ۱ و... استفاده می‌شود. پس در این نوع سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای باید برای هر نوع خطای، یک کنترل‌کننده طراحی شده و در بانک کنترل‌کننده‌ها قرار گیرد. اما اگر این طرح به تنها یک جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی شود، کارایی لازم را نخواهد داشت. این بدان علت است که سیگنالی که وارد کنترل‌کننده فراز نامی می‌شود، کارایی لازم را نخواهد داشت. در این طرح به تنها یک جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی می‌شود، از اختلاف سرعت زاویه‌ای مرجع و سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده بدست می‌آید.

از آنجایی که سرعت زاویه‌ای ژنراتور، توسط سنسور خطادار اندازه‌گیری شده است، پس سیگنالی که وارد کنترل‌کننده فراز نامی می‌شود نیز خطادار خواهد بود. بنابراین اگر بانکی از کنترل‌کننده‌ها نیز جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی شود، همچنان مشکل پابرجا خواهد بود و کارایی مطلوب حاصل نخواهد شد. پیشنهاد می‌شود که به طور همزمان از بلوك اصلاح سیگنال خطادار و بانکی از کنترل‌کننده‌ها استفاده شود. طرح پیشنهادی در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. در این طرح همانند طرح قبل، ابتدا سیگنال خطادار اصلاح شده و سپس وارد بانکی از کنترل‌کننده‌ها می‌شود. این کنترل‌کننده‌ها با توجه به شرایط بدون خطای، تناسبی افزایشی و تناسبی کاهشی طراحی و جایگزین کنترل‌کننده نامی شده‌اند. در واقع در بانک کنترل‌کننده‌ها، سه کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی قرار داده شده است که هر کدام بر مبنای شرایط نامبرده شده عمل می‌کنند. به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای شکل (۴-۶)، در ثانیه بیستم، خطای تناسبی به میزان  $+10\%$  به سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور اعمال گردید و در ثانیه هفتادم مجدداً سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور به حالت بدون خطای بازگردانده شد. نتایج شبیه‌سازی در این وضعیت در شکل (۷-۴) آورده شده است.



شکل (۶-۴) ساختار کلی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی.

همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است، سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی که از ترکیب بلوک‌های اصلاح سیگنال خطدار و بانک کنترل کننده‌ها حاصل گردید، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا شکل (۲-۴) و همچنین سیستم کنترل نامی دارد. با توجه به شکل (۶-۷-الف) توان تولید شده توسط توربین بادی در هنگام بروز خطا و به کارگیری سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا پیشنهادی، به توان تولید شده در حالت بدون خطا نزدیک‌تر است. پس می‌توان علیرغم بروز خطا در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور، در سطح مطلوبی از توربین بادی توان دریافت نمود. همچنین شکل (۶-۷-ب) مقایسه پاسخ‌های دو سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا بررسی شده در این بخش را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که عملکرد سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا شکل (۶-۴) نسبت به سیستم شکل (۲-۴) بهتر شده است.



شکل (۷-۴) مقایسه توان تولید شده توسط توربین بادی: (الف) در سه حالت بدون خطا (خط‌چین)، خطدار به همراه سیستم کنترل تحميل‌پذير خطا شکل (۶-۴) (خط) و خطدار به همراه سیستم کنترل نامی ( نقطه خط) و (ب) مقایسه توان تولید شده با استفاده از سیستم‌های کنترل تحميل‌پذير خطا در شکل (۳-۴) (خط قرمز) و شکل (۶-۴) (خط مشکی).



## نتیجه‌گیری و پیشنهادات



در این تحقیق، ابتدا یک مدل دینامیکی جامع برای سیستم تبدیل انرژی بادی ارائه گردید که این مدل قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی را در بر می‌گیرد. نحوه مدل‌سازی به گونه‌ای انجام پذیرفته است که توسط آن تأثیر انواع خطاها بر سیستم تبدیل انرژی بادی قابل مشاهده است. پنج دسته خطا در محرک فراز، سنسورها، مبدل و سیستم قدرت به مدل ارائه شده اعمال و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل شده، می‌توان گفت مدل ارائه شده، قابلیت بررسی نحوه اثرگذاری انواع خطاها را بر روی سیگنال‌های مختلف سیستم تبدیل انرژی بادی در اختیار قرار می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در هنگام وقوع اتصال کوتاه سه فاز به زمین در شبکه قدرت و اتصال کوتاه خازن لینک جریان مستقیم نیاز به مدارهای محافظتی می‌باشد که برای طراحی این گونه مدارها می‌توان از مقدار حداقل جریان به وجود آمده به هنگام بروز خطا در شبیه‌سازی استفاده کرد. سپس با استفاده از این مدل دینامیکی، یک سیستم تشخیص و جداسازی خطا طراحی شد که توسط آن می‌توان خطاها به وقوع پیوسته در سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور و سنسورها و محرک‌های فراز را شناسایی کرد. سیستم تشخیص و جداسازی خطا از شبکه‌های عصبی دینامیکی بازگشتی برای تشکیل بانکی از مدل‌های عصبی بهره می‌برد. شبکه‌های عصبی بازگشتی به کار برده شده، دارای نرون‌های دینامیکی هستند که در ساختار آن‌ها از فیلترهای پاسخ ضربه نامحدود استفاده شده است. تشخیص و جداسازی خطاها به وقوع پیوسته در سیستم تبدیل انرژی بادی بدین صورت انجام پذیرفت که یک مدل عصبی دینامیکی رفتار نرمال سیستم را تقلید نمود و مدل‌های عصبی دیگر نیز شرایط خطا‌دار سیستم را تقلید نمودند. سپس این مدل‌های عصبی به صورت موازی با سیستم واقعی قرار داده شدند و خروجی‌های آن‌ها با خروجی‌های واقعی سیستم مقایسه شد و بدین ترتیب زمان و محل وقوع خطا در سیستم واقعی شناسایی شد. برای آموزش شبکه‌های عصبی از روش جستجوی تصادفی تطبیقی استفاده شد که این روش آموزش نیازی به محاسبه عبارات گرادیان ندارد. ساختارهای مناسب برای شبکه‌های عصبی بازگشتی به منظور مدل‌سازی رفتارهای سیستم نیز با استفاده از معیارهای اطلاعات آکایک و خطای پیش‌بینی نهایی انتخاب شدند. برای جداسازی

خطاهای به وقوع پیوسته در سیستم فراز نیز ابتدا با استفاده از سطح آستانه ثابت پیشنهادی مبنی بر استفاده از میانگین مانده ارائه شد و سپس برای مقاوم‌سازی طرح ارائه شده، استفاده از سطح آستانه تطبیقی فازی پیشنهاد گردید. با استفاده از سطح آستانه تطبیقی فازی ارائه شده، خطاهای به وقوع پیوسته به صورت هوشمند تشخیص داده شده و سپس جداسازی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم تشخیص و جداسازی خطای همراه الگوریتم ارائه شده، سریع، دقیق و صحیح عمل می‌کند، نرخ هشدارهای اشتباه آن بسیار کم است و خطاهای تشخیص داده شده را به خوبی جداسازی می‌کند. از روش ارائه شده می‌توان برای تشخیص و جداسازی خطای سایر قسمت‌های سیستم تبدیل انرژی بادی نیز بهره گرفت. در نهایت با بهره‌گیری از سیستم تشخیص و جداسازی خطای طراحی شده، یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای فعال طراحی شد که جایگزین کنترل‌کننده فراز نامی می‌شود. سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای ارائه شده، دارای دو بخش اصلاح سیگنال خطادار و بانک کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی گویای آن است که بهره‌گیری از سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی می‌تواند منجر به دریافت توان بیشتر از سیستم تبدیل انرژی بادی در هنگام بروز خطای سنسور سرعت زاویه‌ای ژنراتور شود.

به منظور ادامه تحقیق در آینده، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- آنالیز خطاهای به وقوع پیوسته در سیستم تبدیل انرژی بادی، می‌تواند مورد بررسی بیشتری قرار گیرد و درجه اهمیت و شدت اثرگذاری خطاهای مختلف سیستم تبدیل انرژی بادی مطالعه شود.
- می‌توان سیستم تشخیص خطای را به نحوی تعمیم داد تا خطاهای بیشتری را بتوان توسط آن تشخیص داد.
- جداسازی خطاهای به وقوع پیوسته در سیستم تبدیل انرژی بادی زمینه پژوهش بسیار وسیعی را در اختیار محققان قرار می‌دهد.

- طراحی سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطا برای سیستم تبدیل انرژی بادی، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی بسیار جدید می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب نموده است. با گسترش طرح ارائه شده در این تحقیق، می‌توان به یک سیستم کنترل تحمل‌پذیر خطای جامع دست یافت، که علاوه بر کنترل‌کننده فراز، سیستم‌های کنترل دیگر سیستم تبدیل انرژی بادی را نیز شامل شود.



پیوست:

# سیستم‌های تشخیص خطا مبتنی بر شبکه‌های عصبی



## پ-۱ مقدمه

شبکه‌های عصبی مصنوعی طی دو دهه گذشته به شدت مورد مطالعه محققان قرار گرفته‌اند و به صورت موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های دینامیکی استفاده شده‌اند [۴۵، ۵۲]، همچنین از آن‌ها برای سیستم‌های تشخیص خطا بهره گرفته شده است [۴۵، ۵۰-۵۷]. شبکه‌های عصبی راهکار ارزشمند و قابل توجهی را در مقایسه با روش‌های کلاسیک در اختیار قرار می‌دهند زیرا می‌توان از آن‌ها در شرایط بسیار پیچیده بهره گرفت. به خصوص استفاده از شبکه‌های عصبی در شرایطی که مدل فرآیند به درستی مشخص نیست، بسیار مفید است، زیرا در این شرایط روش‌هایی مانند استفاده از رؤیت‌گرها و یا استفاده از تخمین پارامترها قابل استفاده نیستند. همچنین شبکه‌های عصبی ابزار ریاضی خوبی را برای مقابله با مسئله‌های غیر خطی فراهم می‌کنند. خاصیت مهم این شبکه‌ها در این است که می‌توان هر تابع غیرخطی را با استفاده از ساختار و پارامترهای وزنی مناسب، با دقت دلخواه تقریب زد.

خاصیت جالب دیگر شبکه‌های عصبی، قابلیت خود آموزشی<sup>۱</sup> آنها می‌باشد. یک شبکه عصبی قادر است که با استفاده از الگوریتم آموزش، ویژگی‌های سیستم را از داده‌های آموزشی<sup>۲</sup> استخراج کند؛ که این خاصیت باعث انعطاف‌پذیری زیاد در مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی می‌شود. تمامی خصوصیات نام برده شده موجب طراحی سیستم‌های کنترل تطبیقی با ویژگی‌های مطلوب برای فرآیندهای غیرخطی، نامعلوم و پیچیده می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به قابلیت آموزش و قابلیت تعمیم غیرخطی روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، مکانیسم انعطاف‌پذیری را برای آموزش و تشخیص خطاهای سیستم فراهم می‌کنند.

<sup>1</sup> Self-Learning Ability

<sup>2</sup> Training Data

از میان ساختارهای فراوانی که برای شبکه‌های عصبی وجود دارد، دو ساختار قابل توجه، ساختارهای پیش خورد<sup>۱</sup> و بازگشتی<sup>۲</sup> هستند. شبکه‌های پیش خورد به طور معمول برای اهداف تشخیص الگو به کار گرفته می‌شوند؛ در صورتی که از شبکه‌های بازگشتی برای ساختن مدل دینامیکی فرآیند استفاده می‌شود. در ادامه شبکه‌های عصبی که مکراراً در سیستم‌های تشخیص خطا مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند، به طور مختصر بررسی می‌شوند.

## پ-۲ شبکه‌های عصبی پیش خورد چند لایه<sup>۳</sup>

شبکه‌های عصبی مصنوعی از تعداد مشخصی از واحدهای پردازش به نام نرون<sup>۴</sup> تشکیل یافته‌اند. مدل اصلی و کلاسیک نرون، در شکل (پ-۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (پ-۱) خروجی نرون را می‌توان با استفاده از معادله زیر به دست آورد:

$$y = \sigma \left( \sum_{i=1}^n w_i u_i + b \right) \quad (\text{پ-۱})$$

که در معادله فوق  $y$  بیانگر ورودی‌های نرون،  $u_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) نشان‌دهنده بایاس،  $w_i$  نشان‌دهنده ضرایب وزنی و  $b$  نشان‌دهنده یکتابع فعال‌ساز غیرخطی می‌باشد. شکل‌های مختلفی برای نرون آورده شده در شکل (پ-۱) وجود دارد و تغییرات فراوانی به منظور اصلاح عملکرد بر روی آن اعمال شده است. این تغییرات نتیجه اعمال توابع فعال‌ساز متفاوت می‌باشد. در مدل کلاسیک مربوط به مک‌کلاتز و پیترز<sup>۵</sup> از تابع فعال‌ساز پله واحد استفاده می‌شود [۴۵]. مدل دیگر، مدل ویدرو و هاف<sup>۶</sup> است که در آن از خروجی خطی (خروجی پس از جمع‌کننده) برای ایجاد الگوریتم تطبیقی به منظور به روز کردن ضرایب وزنی استفاده می‌شود. این مدل، عنصر خطی تطبیقی<sup>۷</sup> نامیده می‌شود و در شکل (پ-

<sup>1</sup> Feedforward

<sup>2</sup> Recurrent

<sup>3</sup> Multi-layer Feedforward Neural Networks (MFNNs)

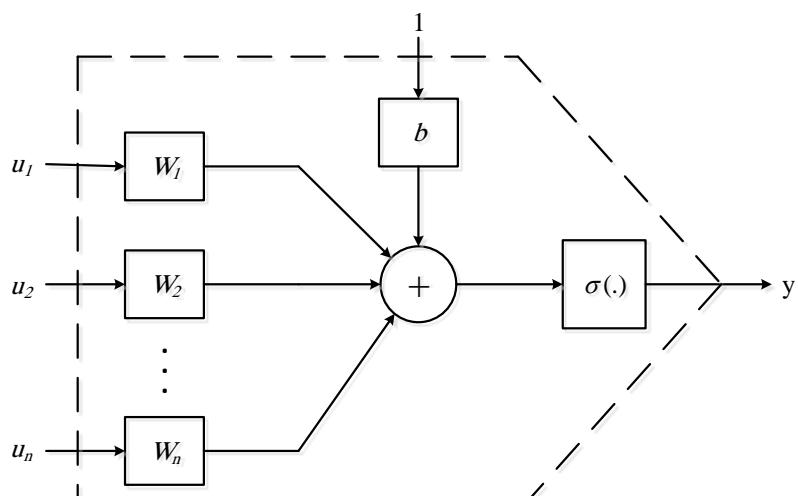
<sup>4</sup> Neuron

<sup>5</sup> McCulloch and Pitts

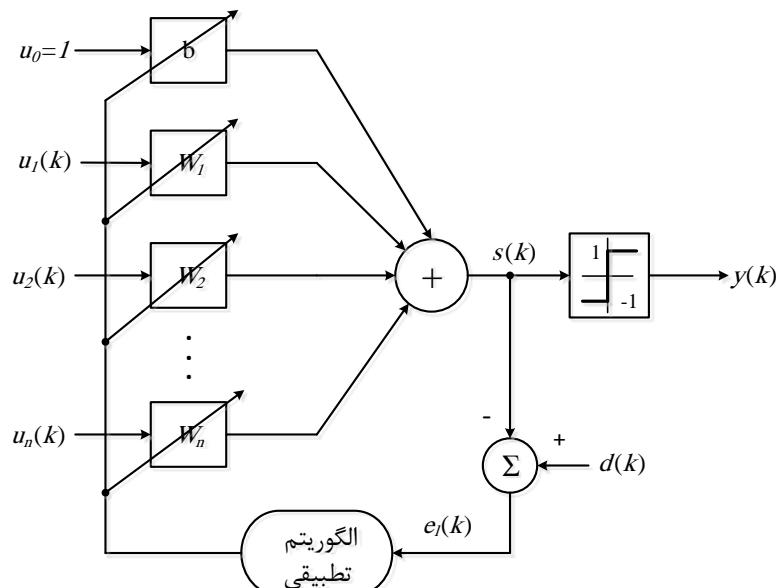
<sup>6</sup> Widrow and Hoff

<sup>7</sup> Adaptive Linear Element (Adaline)

۲) نشان داده شده است [۸۵]. از انواع توابع فعال‌ساز دیگری که در ساختار شبکه‌های عصبی کاربرد فراوانی دارند، می‌توان به توابع تانژانت هایپربولیک<sup>۱</sup> و سیگموئید<sup>۲</sup> اشاره نمود [۴۵، ۸۵]. انتخاب یک تابع فعال‌ساز مناسب، با توجه به کاربرد شبکه‌های عصبی انجام می‌گیرد.



شکل (پ-۱) ساختار نرون با  $n$  ورودی و یک خروجی.



شکل (پ-۲) عنصر خطی تطبیقی.

<sup>۱</sup> Hyperbolic Tangent

<sup>۲</sup> Sigmoid

شبکه پرسپترون چند لایه، شبکه‌ای است که در آن نرون‌ها به لایه‌هایی گروه‌بندی می‌شوند. چنین شبکه‌ای دارای یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی است. شکل (پ-۳) نشان‌دهنده یک شبکه عصبی پیش‌خورد سه لایه است. همانطور که از شکل (پ-۳) مشخص است هر لایه دارای چندین نرون است، یعنی لایه اول دارای  $p$  نرون، لایه دوم دارای  $q$  نرون و لایه سوم دارای  $m$  نرون است. بردار خروجی  $y$  با توجه به شکل (پ-۳) توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$y = \sigma_3 \left\{ W_3 \sigma_2 \left[ W_2 \sigma_1 (W\mu) \right] \right\} \quad (\text{پ-۲})$$

یکی از ویژگی‌های اساسی شبکه‌های عصبی این است که قادر به یادگیری و تطبیق می‌باشند. از نقطه نظر عملی آموزش شبکه عصبی به معنای یافتن بردارهای ضرایب وزنی در هر لایه می‌باشد. یکی از روش‌های اساسی برای آموزش شبکه‌های عصبی چند لایه، الگوریتم پس‌انتشار می‌باشد. این الگوریتم یک روش تکراری برای یافتن ضرایب وزنی ارائه می‌دهد و اساس عملکرد آن بر مبنای مینیمم ساختن جمع توان دوم خطای و به کارگیری روش گرادیان نزولی می‌باشد. اصلاح ضرایب وزنی با توجه به فرمول زیر انجام می‌گیرد:

$$w(k+1) = w(k) - \eta \nabla E(w(k)) \quad (\text{پ-۳})$$

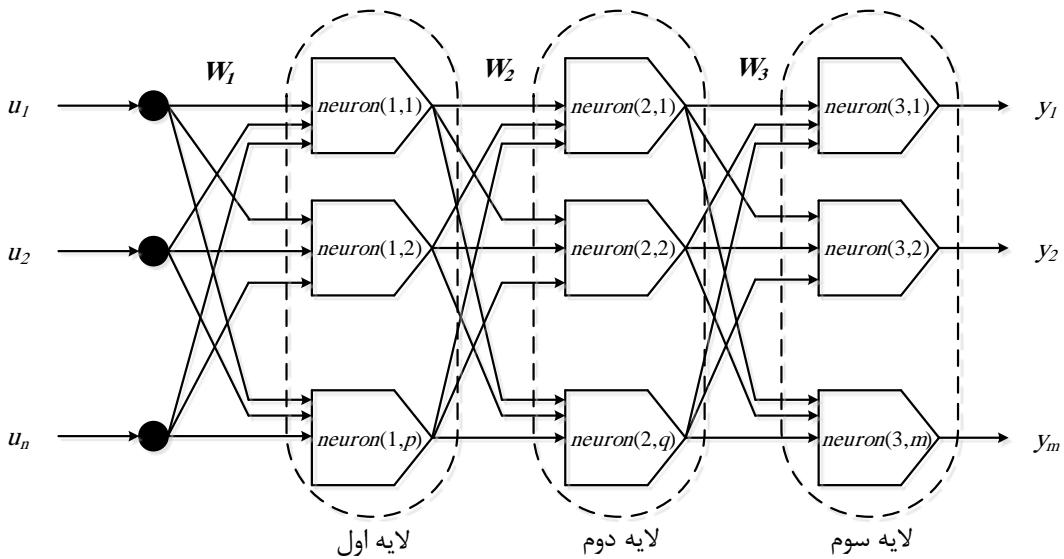
که در رابطه فوق  $w(k)$  نشان‌دهنده بردار وزن‌ها در زمان  $k$ ،  $\eta$  نرخ آموزش و  $\nabla E(w(k))$  بیان‌گر گرادیان نزولی خطای در راستای بردار  $w(k)$  است. از روش پس‌انتشار خطای به صورت گسترده استفاده می‌شود و برخی روش‌های اصلاح شده نیز در سال‌های اخیر ارائه شده است. یکی از معاوی روش پس‌انتشار همگرایی کند آن است. برای غلبه بر این مشکل می‌توان از روش مقدار حرکت<sup>۱</sup> استفاده نمود. علاوه بر تکنیک‌های یاد شده، می‌توان به روش‌های کوئیک‌پرپ<sup>۲</sup>، پس‌انتشار انعطاف‌پذیر<sup>۳</sup> و گرادیان مزدوج<sup>۴</sup> اشاره کرد [۴۵، ۸۵].

<sup>1</sup> Momentum

<sup>2</sup> quickprop

<sup>3</sup> Resilient Backpropagation

<sup>4</sup> Conjugate Gradient



شکل (۳-۳) شبکه عصبی پیش‌خورد سه لایه با  $n$  ورودی و  $m$  خروجی.

### پ-۳ شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی

مشابه شبکه‌های پرسپترون چند لایه، شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی قابلیت مدل کردن هر تابع غیرخطی را دارند. اما این نوع از شبکه‌های عصبی به تعداد بیشتری گره نیاز دارند تا خواص مورد نظر حاصل شود؛ این پدیده همانند انتخاب تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌ها در شبکه‌های پرسپترون چند لایه است [۴۵]. از این نوع شبکه می‌توان برای استفاده در مسائل درون‌یابی استفاده کرد. یک شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی، نگاشتی غیرخطی و چند بعدی است که به فاصله بین بردار ورودی و بردار مرکز وابسته است. در شکل (پ-۴) یک شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی با ورودی  $n$  بعدی،  $x \in \mathbb{R}^n$ ، و یک خروجی،  $y \in \mathfrak{R}$ ، نمایش داده شده است. در این شکل خروجی، جمع وزن دار تعداد متناهی از توابع پایه شعاعی است؛ یعنی داریم:

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \phi_i(\|x - c_i\|) \quad (\text{پ-۴})$$

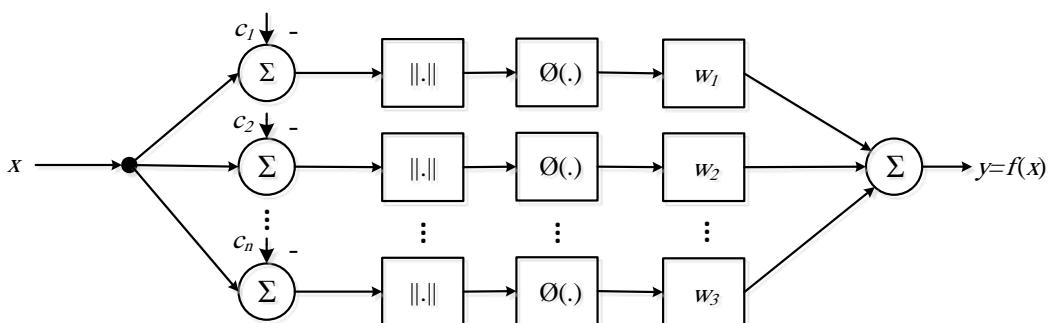
که در رابطه فوق  $\phi_i$  تابع پایه شعاعی از  $x$  است. معمولاً برای راحتی تمامی توابع پایه شعاعی را از یک نوع در نظر می‌گیرند. همانطور که در [۸۵] نشان داده شده است، توابع مختلفی را می‌توان به عنوان تابع پایه شعاعی در نظر گرفت که معروف‌ترین آنها تابع پایه شعاعی گوسی می‌باشد:

$$\phi(r) = e^{-(r/c)^2} \quad (\text{پ-۵})$$

با در نظر گرفتن تابع گوسی در شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی، خروجی شبکه برای  $n$  ورودی،  $l$  تابع گوسی در لایه مخفی و  $m$  خروجی، به صورت زیر خواهد بود:

$$y_j = \sum_{i=1}^l w_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{x_k - c_{ik}}{\sigma_{ik}} \right]^2\right), \quad 1 \leq j \leq m \quad (\text{پ-۶})$$

برای آموزش شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی راههای فراوانی وجود دارد که اغلب آن‌ها مسئله را به دو گام تقسیم می‌کنند: آموزش در مرحله میانی، یعنی تنظیم مراکز و واریانس پارامترها و آموزش وزن‌ها، که در این مرحله تنظیم پارامترهای وزنی انجام می‌پذیرد. گام اول به طور معمول با استفاده از الگوریتم‌های خوشبندی<sup>۱</sup> از قبیل الگوریتم خوشبندی میانگین  $k$ <sup>۲</sup> انجام می‌شود؛ در صورتی که گام دوم توسط آموزش با سرپرست<sup>۳</sup>، از قبیل گرادیان نزولی صورت می‌گیرد. در مسائلی که شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعداد کم مراکز می‌تواند منجر به تقریب ضعیف شود؛ از طرف دیگر با افزایش اندازه فضای ورودی، تعداد مراکز به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از این نوع از شبکه‌ها در کاربردهایی که اندازه بزرگی دارند، مناسب نیست [۴۵].



شکل (پ-۴) بلوك دیاگرام ساختار يك شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی.

<sup>1</sup> Clustering Algorithms

<sup>2</sup> K-means

<sup>3</sup> Supervised Learning

#### پ-۴ شبکه‌های عصبی دینامیکی

همان‌طور که در بخش‌های قبل بدان اشاره شد، شبکه‌های عصبی ابزار ریاضی قدرتمندی را برای مقابله با مسائل غیرخطی در اختیار می‌گذارند. اما نکته‌ای که باید برای به کارگیری شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی یا تشخیص خطای سیستم‌ها در نظر گرفت، این است که دینامیک فرآیندها و سیستم‌های مورد مطالعه را باید لحاظ نمود. برای آن که یک شبکه عصبی دینامیک باشد، باید دارای حافظه باشد. حافظه را می‌توان به دو دسته کوتاه مدت<sup>۱</sup> و بلند مدت<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرد. حافظه کوتاه مدت به جمع‌آوری و انتخاب اطلاعات موجود در حالت فعلی محیط گفته می‌شود و حافظه بلند مدت به اطلاعاتی که برای مدت زمان طولانی و یا به صورت دائمی ذخیره شده‌اند، گفته می‌شود. یک راه ساده برای قرار دادن حافظه در ساختار شبکه عصبی، استفاده از تأخیرهای زمانی است که توسط سطح سیناپسی<sup>۳</sup> و یا لایه ورودی شبکه قابل اجرا می‌باشد. راه حل مهم دیگری که برای مد نظر قرار دادن دینامیک در عملکرد شبکه عصبی به کار می‌رود، استفاده از فیدبک‌ها می‌باشد. دو روش اصلی برای در نظر گرفتن فیدبک در شبکه عصبی وجود دارد: فیدبک محلی در سطح تک نرون داخل شبکه و فیدبک سراسری که تمامی شبکه را شامل می‌شود. شبکه‌های عصبی با یک یا چند فیدبک، شبکه‌های عصبی بازگشتی نامیده می‌شوند. به طور کلی دو روش برای مدل کردن سیستم‌های دینامیکی توسط شبکه‌های عصبی وجود دارد: استفاده از شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های خارجی<sup>۴</sup> و استفاده از شبکه‌های عصبی با دینامیک داخلی<sup>۵</sup>. در زیربخش‌های بعدی به بررسی مختصر این دو نوع شبکه دینامیکی پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Short-Term Memory

<sup>2</sup> Long-Term Memory

<sup>3</sup> Synaptic Level

<sup>4</sup> External Dynamics

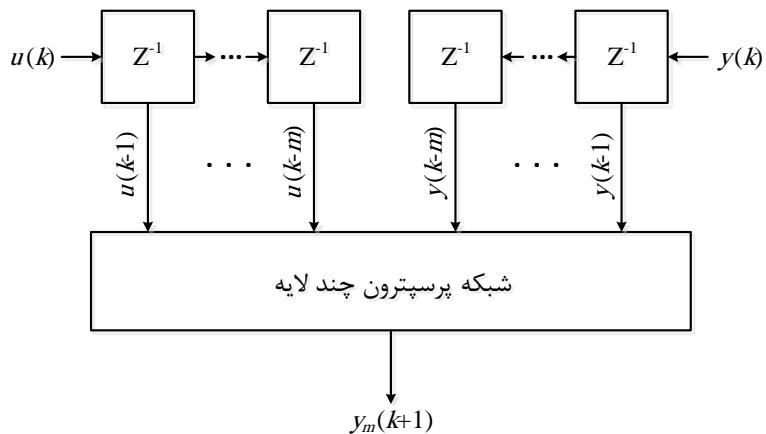
<sup>5</sup> Internal Dynamics

### پ-۴-۱ شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های خارجی

از شبکه‌های پرسپترون چند لایه می‌توان برای تخمین استاتیکی هرتابع غیرخطی پیوسته استفاده نمود. پس برای مدل‌سازی یک سیستم دینامیکی با استفاده از شبکه‌های عصبی، نیاز است به نحوی در شبکه‌های عصبی، دینامیک سیستم‌ها را مد نظر قرار داد. همان‌طور که بدان اشاره شد برای تبدیل یک شبکه عصبی استاتیکی به یک شبکه دینامیکی دو راه وجود دارد: وارد کردن یک حافظه خارجی و یا استفاده از فیدبک. روشی که اغلب برای مد نظر قرار دادن دینامیک سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از راه‌کار دینامیک‌های خارجی است. این راه‌کار بر مبنای مدل ورودی-خروجی آورده شده در رابطه زیر است:

$$y_m(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-m), u(k), \dots, u(k-m)) \quad (\text{پ-۷})$$

که در رابطه فوق  $f(\cdot)$  یکتابع غیرخطی،  $u(k)$  ورودی،  $y(k)$  خروجی فرآیند،  $y_m(k)$  خروجی مدل و  $m$  درجه فرآیند است. پس مدل غیرخطی به دو بخش تقسیم می‌شود: تخمین‌گر استاتیک غیرخطی (پرسپترون چند لایه) و بانک فیلتر دینامیکی خارجی (خطوط تأخیر پیوسته<sup>۱</sup>). در شکل (پ-۵) این دو بخش نشان داده شده است. شبکه‌های عصبی با تأخیر زمانی قادر به توصیف دسته وسیعی از سیستم‌ها هستند [۴۵].



شکل (پ-۵) تحقق راه‌کار دینامیک‌های خارجی.

<sup>۱</sup> Tapped Delay Lines (TDL)

#### پ-۴-۲ شبکه‌های عصبی با دینامیک‌های داخلی

همانطور که پیش از این اشاره شد، شبکه‌های بازگشتی، شبکه‌هایی هستند که دارای یک و یا چند فیدبک هستند. همچنین حلقه‌های فیدبک، هم می‌توانند به صورت محلی و هم به صورت سراسری باشند. با توجه به محل قرار گرفتن حلقه‌های فیدبک، شبکه‌های بازگشتی را می‌توان به ۲ دسته تقسیم کرد:

- شبکه‌های بازگشتی سراسری<sup>۱</sup>: در این شبکه‌ها، فیدبک بین نرون‌های لایه‌های مختلف و

نرون‌های موجود در یک لایه مجاز می‌باشد. چنین شبکه‌ای از یک شبکه پرسپترون چند لایه

و یا بخشی از آن بهره می‌گیرد. سه نوع شبکه بازگشتی سراسری وجود دارد: ۱- شبکه‌های

بازگشتی کامل<sup>۲</sup>، ۲- شبکه‌های بازگشتی جزئی<sup>۳</sup> و ۳- شبکه‌های فضای حالت.

- شبکه‌های بازگشتی محلی: در این شبکه‌ها فیدبک‌هایی درون مدل نرون‌ها وجود دارد؛ و این

بدان معنی است که حلقه‌های فیدبک بین نرون‌های یک لایه و یا نرون‌های لایه‌های دیگر

وجود ندارد. این شبکه‌ها ساختاری مشابه با شبکه‌های پیش‌خورد استاتیک دارند، اما شامل

مدل نرون دینامیکی می‌باشند.

در ادامه این شبکه‌های عصبی بازگشتی، به صورت مختصر بررسی می‌شوند.

#### پ-۴-۲-۱ شبکه‌های بازگشتی کامل

معمول ترین طرح در این‌گونه شبکه‌ها، شبکه عصبی بازگشتی ویلیامز و زیپسر<sup>۴</sup> است. ساختار این

شبکه غالباً شبکه بازگشتی زمان واقعی<sup>۵</sup> نامیده می‌شود زیرا این شبکه برای تجزیه و تحلیل زمان

واقعی سیگنال‌ها طراحی شده است. شبکه شامل  $M$  نرون می‌باشد که هر کدام از آن‌ها فیدبک تولید

<sup>1</sup> Globally Recurrent Networks

<sup>2</sup> Fully Recurrent Networks

<sup>3</sup> Partially Recurrent Networks

<sup>4</sup> Williams and Zipser

<sup>5</sup> Real Time Recurrent Network (RTRN)

می‌کند. هر اتصال بین دو نرون نمایشگر یک حالت داخلی<sup>۱</sup> از مدل می‌باشد و هر اتصال بین نرون‌ها جایز می‌باشد. در این طرح تنها  $m$  نرون از تعداد کل  $M$  نرون شبکه به عنوان واحدهای خروجی در نظر گرفته می‌شوند. مابقی  $H = M - m$  نرون، نرون‌های مخفی هستند. ساختار این شبکه در شکل (پ-۶) نشان داده شده است که دارای  $n$  ورودی و  $m$  خروجی می‌باشد. مزیت این شبکه در توانایی آن برای تقریب دسته وسیعی از روابط دینامیکی می‌باشد. اما معایب این شبکه عبارتند از:

- پیچیدگی ساختاری دارد.
- روند آموزش شبکه دشوار و پیچیده و همگرایی در روند آموزش کند است.
- حفظ پایداری شبکه مشکل است.

در نتیجه با توجه به معایب فوق شبکه‌های بازگشتی کامل به ندرت در کاربردهای عملی مربوط به شناسایی سیستم‌های غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۵].

#### پ-۲-۴ شبکه‌های بازگشتی جزئی

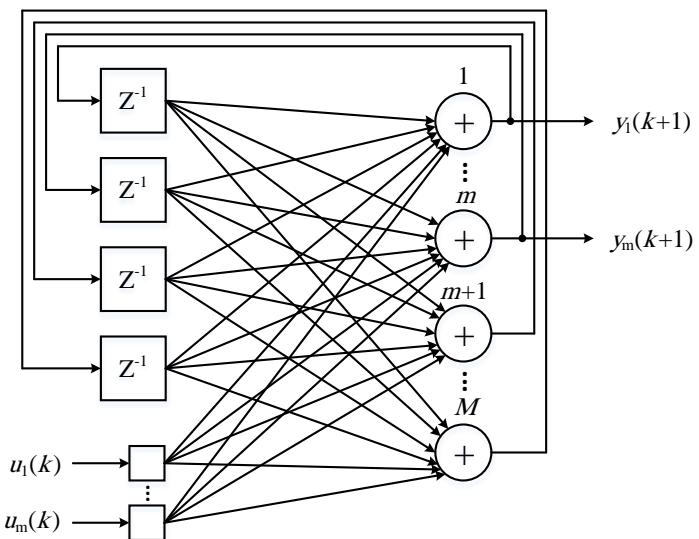
ساختاری مشابه شبکه پرسپترون چند لایه دارند، با این تفاوت که یک لایه به نام لایه زمینه<sup>۲</sup> به ساختار شبکه اضافه می‌شود. نرون‌های این لایه به عنوان حالت‌های داخلی مدل به کار گرفته می‌شوند. از بین طرح‌های فراوان ارائه شده، دو شبکه بازگشتی جزئی توجه بسیاری را به خود جلب کردند، که این دو شبکه، شبکه‌های با ساختار Elman<sup>۳</sup> و Jordan<sup>۴</sup> می‌باشند. تحقق چنین شبکه‌هایی به طرز قابل توجهی ارزان‌تر از شبکه‌های پرسپترون چند لایه با خطوط تأخیر زمانی است. طرح ساختار Elman در شکل (پ-۷) و ساختار Jordan در شکل (پ-۸) نشان داده شده است. ساختار Elman شامل چهار لایه می‌باشد: لایه ورودی با  $n$  واحد، لایه زمینه با ۷ واحد، لایه مخفی با ۷ واحد و لایه خروجی با  $m$  واحد.

<sup>1</sup> Internal State

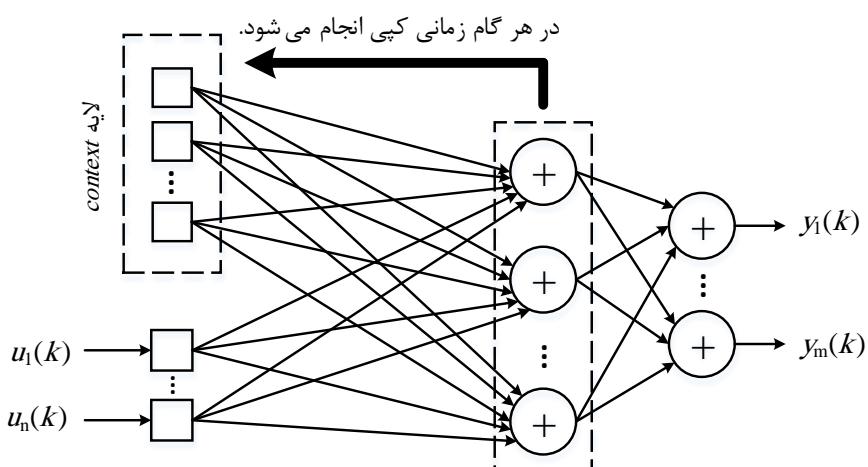
<sup>2</sup> Context

<sup>3</sup> Elman

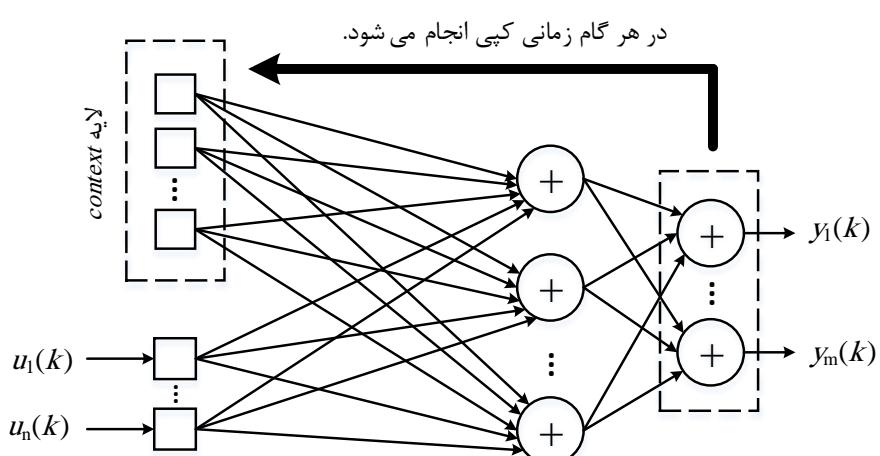
<sup>4</sup> Jordan



شکل (پ-۶) شبکه بازگشتی کامل ویلیامز و زیپسر.



شکل (پ-۷) ساختار شبکه بازگشتی المان.



شکل (پ-۸) ساختار شبکه بازگشتی جردن.

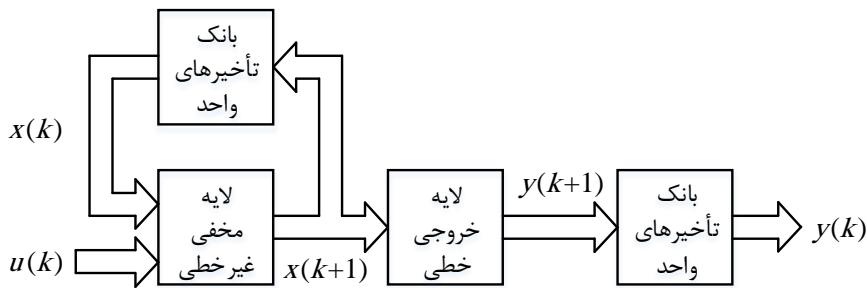
واحدهای لایه زمینه فقط برای حفظ کردن فعال‌سازی‌های پیشین<sup>۱</sup> نرون‌های لایه مخفی به کار می‌روند. یک فرض بسیار مهم در ساختار ایمان این است که تعداد واحدهای لایه زمینه با تعداد واحدهای مخفی برابر است. از لحاظ تئوری چنین شبکه‌ای قادر به مدل‌سازی سیستم دینامیکی مرتبه  $s$  می‌باشد. در زمان مشخص  $k$ ، فعال‌سازی‌های پیشین واحدهای مخفی (در زمان  $k-1$ ) و ورودی‌های فعلی (در زمان  $k$ ) به عنوان ورودی‌های شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت رفتار شبکه ایمان مشابه رفتار یک شبکه پیش‌خورد می‌باشد و بنابراین الگوریتم پساننتشار استاندارد را می‌توان برای آموزش پارامترهای شبکه مورد استفاده قرار داد. اما این نکته را باید در نظر داشت که ساده‌سازی مسئله بدین صورت، کاربرد ساختار ایمان را برای مدل‌سازی فرآیندهای دینامیکی محدود می‌سازد.

با توجه به شکل (پ-۸)، در ساختار جردن نیز ارتباطات فیدبک از نرون‌های خروجی به لایه زمینه وارد می‌شوند. این شبکه به طور موفقیت‌آمیزی برای دسته‌بندی کردن هجاهای انگلیسی مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های بازگشتی جزئی نسبت به شبکه‌های بازگشتی کامل دارای این مزیت هستند که ارتباطات بازگشتی آن‌ها دارای ساختار بهتری است؛ و این امر موجب می‌شود که روند آموزش سریع‌تر و مسائل مربوط به پایداری کمتر شوند. با این حال تعداد حالت‌ها در این شبکه‌ها به شدت به تعداد نرون‌های مخفی (برای ایمان) و یا به تعداد نرون‌های خروجی (برای جردن) وابسته است که این امر انعطاف‌پذیری این شبکه‌ها را محدود می‌سازد [۴۵].

#### پ-۴-۳ شبکه‌های فضای حالت

شکل (پ-۹) نوع دیگری از شبکه‌های بازگشتی را نشان می‌دهد که شبکه‌های فضای حالت نامیده می‌شوند. خروجی لایه مخفی از طریق بانکی از تأخیرهای واحد، به لایه ورودی وارد می‌شود. در این جا تعداد تأخیرهای واحد به منظور تعیین مرتبه سیستم به کار می‌رود. کاربر می‌تواند انتخاب کند که چه تعدادی از نرون‌ها برای تولید فیدبک مورد استفاده قرار گیرند.

<sup>۱</sup> Previous Activations



شکل (پ-۹) ساختار شبکه فضای حالت با یک لایه مخفی.

اگر  $u(k) \in \mathbb{R}^n$  بردار ورودی،  $x(k) \in \mathbb{R}^q$  خروجی لایه مخفی در زمان  $k$  و  $y(k) \in \mathbb{R}^m$  بردار خروجی باشد، در این صورت نمایش فضای حالت مدل عصبی ارائه شده در شکل (پ-۹) به صورت زیر خواهد بود:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (\text{پ-۸})$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (\text{پ-۹})$$

که در رابطه فوق  $f(\cdot)$  تابعی غیرخطی است که لایه مخفی را توصیف می‌کند و  $C$  ماتریس سیناپسی وزن‌های بین نرون‌های لایه خروجی و مخفی می‌باشد. مدل‌های فضای حالت فقط با مینیمم کردن خطای شبیه‌سازی قابل آموزش هستند. شبکه‌های فضای حالت مزایای زیر را نسبت به شبکه‌های بازگشتی کامل و جزئی دارند [۴۵]:

- تعداد حالات (مرتبه مدل) را می‌توان به طور مستقل از تعداد نرون‌های لایه مخفی انتخاب کرد. در این حالت نرون‌هایی که خروجی آن‌ها به لایه ورودی وارد می‌شود، حالتهای شبکه را تعریف می‌کنند.

- از آنجائی که حالات مدل ورودی شبکه را تغذیه می‌کنند، از محیط بیرونی نیز به آسانی قابل دسترسی هستند.

اما این نوع شبکه‌ها معایبی نیز دارند که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود:

- شرایط اولیه اشتباه می‌تواند سطح کارایی را پائین آورد.

- روند آموزش می‌تواند ناپایدار شود.
- مدل آموزش دیده نیز می‌تواند ناپایدار باشد.

در نتیجه کاربرد شبکه‌های فضای حالت با توجه به معایب فوق محدود می‌باشد.

#### پ-۴-۲-۴ شبکه‌های بازگشتی محلی

یک سلول عصبی بیولوژیکی علاوه بر نگاشت غیرخطی که بر روی جمع وزن دار ورودی‌هایش اعمال می‌کند، دارای برخی خواص دینامیکی از قبیل فیدبک‌های حالت، هیسترزیس تأخیر زمانی و یا چرخه‌های حدی می‌باشد. به منظور آن که این قبیل رفتارهای دینامیکی مدنظر قرار گیرند، مدل‌های نرون ویژه‌ای تعریف شده‌اند. این مدل‌های نرون مبنای طراحی شبکه‌های عصبی دینامیکی پیچیده هستند. شکل (پ-۱۰-الف) نشان‌دهنده یک نرون دینامیکی است. نرون نه تنها ورودی‌های خارجی را دریافت می‌کند، بلکه سیگنال‌های فیدبک حالت را از خود و دیگر نرون‌های شبکه دریافت می‌کند. واحد نرون دینامیکی، طبق شکل (پ-۱۰-ب)، به  $n-1$  نرون دینامیکی دیگر متصل شده و تشکیل یک شبکه عصبی می‌دهند. واحد نرون دینامیکی را می‌توان توسط معادلات زیر توصیف کرد:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\alpha_i x_i(t) + f_i(w_i, x) \quad (\text{پ-۱۰})$$

$$y_i(t) = g_i(x_i(t)) \quad (\text{پ-۱۱})$$

در معادلات (پ-۱۰) و (پ-۱۱)،  $x \in \mathbb{R}^{n+1}$  بردار الحاقی حالت‌های  $n$ -عصب از نرون‌های دیگر شبکه به همراه بایاس،  $w_i$  بردار وزن مربوط به  $i$ -امین واحد نرون دینامیکی،  $\alpha_i$  پارامتر فیدبک  $i$ -امین واحد دینامیکی،  $y_i(t)$  خروجی  $i$ -امین نرون،  $f_i(\cdot)$  تابع غیرخطی  $i$ -امین نرون و  $g_i(\cdot)$  تابع خروجی  $i$ -امین نرون است. با انتخاب انواع مختلف  $f_i(\cdot)$  و  $g_i(\cdot)$ ، می‌توان مدل‌های نرون دینامیکی مختلفی را به دست آورد. روش دیگر برای به دست آوردن شبکه‌های عصبی دینامیکی استفاده از

شبکه‌های پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی<sup>۱</sup> است. در حقیقت طرح این شبکه‌ها مابین طرح شبکه‌های پیش‌خورد و بازگشتی سراسری قرار دارد. تopolوژی این نوع از شبکه‌های عصبی مشابه شبکه‌های چند لایه پیش‌خورد می‌باشد و دینامیک آن‌ها توسط مدل‌های نرون دینامیکی به دست می‌آید. مدل‌های نرون دینامیکی مختلفی را می‌توان طراحی کرد. در حالت کلی تفاوت موجود بین این طرح‌ها به نوع محلی کردن فیدبک داخلی آن‌ها بستگی دارد. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل با فیدبک فعال‌ساز محلی<sup>۲</sup>، مدل با فیدبک سیناپسی محلی<sup>۳</sup> و مدل با فیدبک خروجی محلی<sup>۴</sup> اشاره نمود که در ادامه این بخش، سه مدل نامبرده شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- مدل با فیدبک فعال‌ساز محلی: این مدل توسط فرسکنی<sup>۵</sup> مورد مطالعه قرار گرفت و با معادلات

زیر توصیف می‌شود [۸۶]:

$$\varphi(k) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(k) + \sum_{i=1}^r d_i \varphi(k-i) \quad (پ-۱۲)$$

$$y(k) = \sigma(\varphi(k)) \quad (پ-۱۳)$$

که در روابط فوق  $u_i, i = 1, \dots, n$  ورودی‌های نرون،  $w_i$  وزن‌های ورودی،  $\varphi(k)$  پتانسیل فعال‌سازی،  $d_i, i = 1, \dots, r$  ضرایبی که شدت فیدبک  $\varphi(k-i)$  را مشخص می‌کنند و  $\sigma(\cdot)$  تابع فعال‌ساز غیرخطی هستند. با توجه به شکل (پ-۱۱) ورودی به نرون می‌تواند ترکیبی از متغیرهای ورودی و نسخه‌های تأخیر یافته فعال‌ساز  $\varphi(k)$  باشد. توجه شود که عبارت  $\sum_{i=1}^r d_i \varphi(k-i)$  از رابطه (پ-۱۲) را می‌توان به عنوان فیلتر پاسخ ضربه محدود<sup>۶</sup> تفسیر کرد. این مدل دارای سیگنال‌های فیدبکی است که از قبل از بلوک فعال‌ساز غیرخطی گرفته شده‌اند.

<sup>۱</sup> Locally Recurrent Globally Feedforward (LRGF)

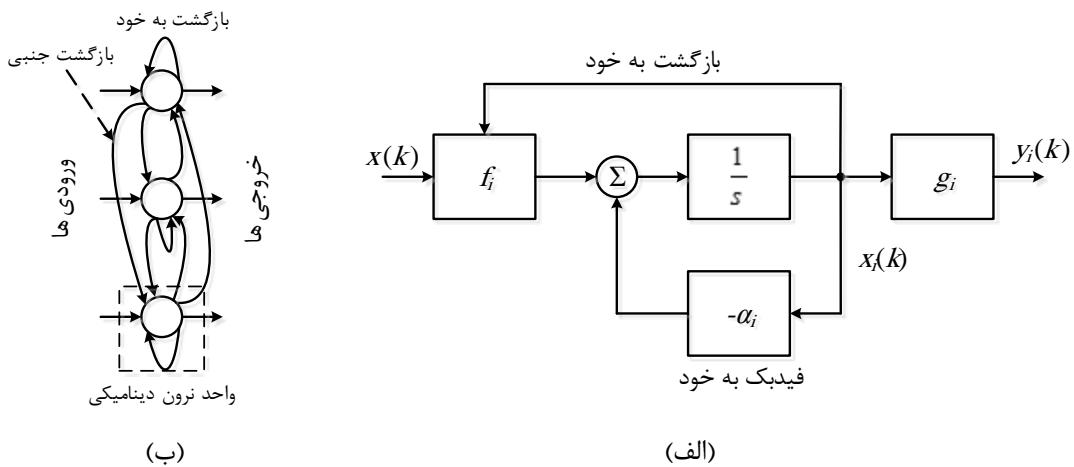
<sup>۲</sup> Model with Local Activation Feedback

<sup>۳</sup> Model with Local Synapse Feedback

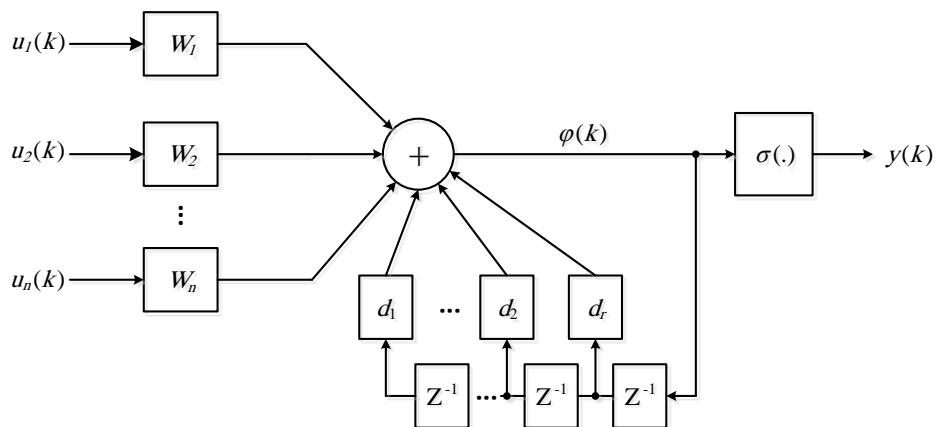
<sup>۴</sup> Model with Local Output Feedback

<sup>۵</sup> Frasconi

<sup>۶</sup> Finite Impulse Response (FIR) Filter



شکل (پ-۱۰) (الف) ساختار تعمیم یافته یک واحد نرون دینامیکی و (ب) شبکه عصبی شامل واحدهای دینامیکی.



شکل (پ-۱۱) ساختار مدل با فیدبک محلی.

۲- مدل با فیدبک سیناپسی محلی: این مدل توسط بک و تسوی<sup>۱</sup> ارائه شده است [۸۷]. در این ساختار از یک سیناپس باتابع تبدیل خطی، یعنی فیلتر پاسخ ضربه نامحدود، استفاده می‌شود.

معادلات زیر توصیف کننده این مدل می‌باشند:

$$y(k) = \sigma \left( \sum_{i=1}^n G_i(z^{-1}) u_i(k) \right) \quad (پ-۱۴)$$

$$G_i(z^{-1}) = \frac{\sum_{j=0}^r b_j z^{-j}}{\sum_{j=0}^p a_j z^{-j}} \quad (پ-۱۵)$$

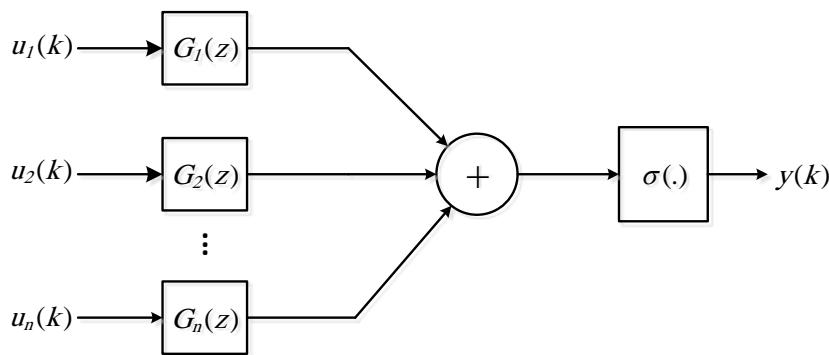
<sup>۱</sup> Back and Tsoi

که در روابط فوق  $y(k) = \sigma\left(\sum_{i=1}^n w_i u_i(k) + \sum_{i=1}^r d_i y(k-i)\right)$  تابع  $G_i(z)$  مجموعه ورودی‌ها به نرون،  $G_i(z)^{-1}$  تابع تبدیل خطی و  $a_j, j = 0, 1, \dots, p$  و  $b_j, j = 0, 1, \dots, r$  به ترتیب صفرها و قطب‌های تابع تبدیل خطی می‌باشند. همانطور که از رابطه (پ-۱۵) دیده می‌شود، تابع تبدیل خطی دارای  $r$  صفر و  $p$  قطب می‌باشد. با توجه به شکل (پ-۱۲) باید به این نکته دقت کرد که  $u_i(k), i = 1, \dots, n$  ممکن است یا خروجی‌های لایه قبلی باشند و یا از نرون خروجی گرفته شده باشند. اگر آن‌ها از لایه پیشین گرفته شده باشند، در این صورت فیدبک از نوع سیناپسی محلی است و در غیر این صورت، اگر آن‌ها از خروجی  $y(k)$  گرفته شده باشند، فیدبک از نوع خروجی محلی است. همچنین فیدبک فعال‌ساز محلی یک حالت خاص از فیدبک سیناپسی محلی است که در آن تمامی توابع انتقال دارای مخرج یکسان و فقط یک صفر می‌باشند.

۳- مدل با فیدبک خروجی محلی: این ساختار توسط گری<sup>۱</sup> ارائه شده است. در این ساختار، با توجه به شکل (پ-۱۳)، فیدبک پس از بلوک فعال‌ساز غیرخطی گرفته می‌شود. در حالت کلی این مدل را می‌توان توسط رابطه زیر توصیف کرد [۴۵]:

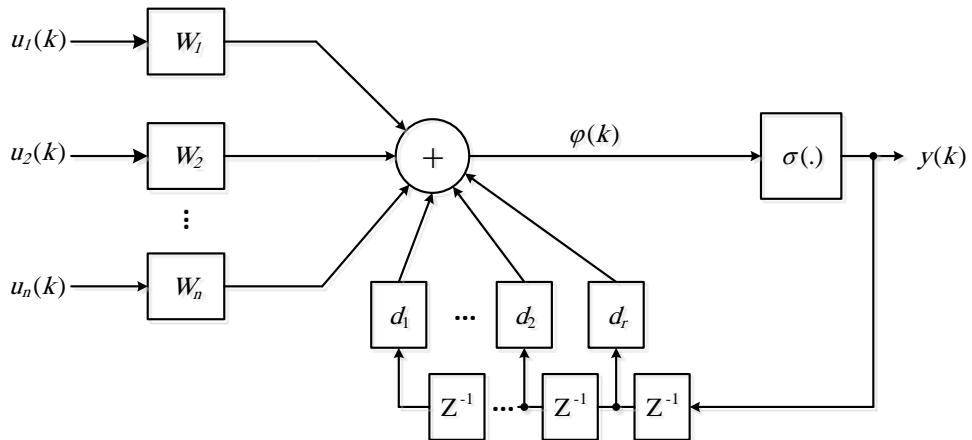
$$y(k) = \sigma\left(\sum_{i=1}^n w_i u_i(k) + \sum_{i=1}^r d_i y(k-i)\right) \quad (16-3)$$

که در رابطه فوق  $d_i, i = 1, \dots, r$  ضرایب تعیین کننده شدت نرون خروجی  $y(k-i)$  می‌باشند.



شکل (پ-۱۲) ساختار مدل با فیدبک سیناپسی محلی.

<sup>1</sup> Gori



شکل (پ-۱۳) ساختار مدل با فیدبک خروجی محلی.

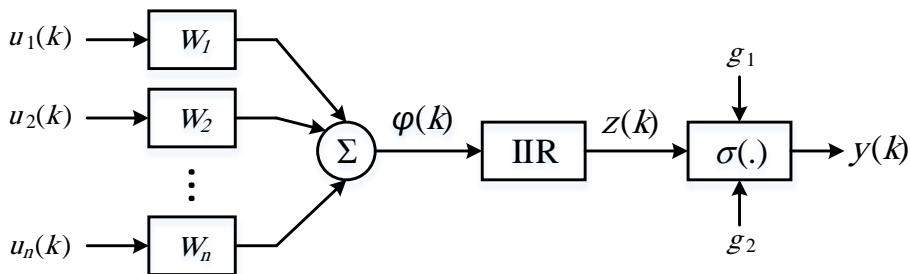
در این تحقیق از مدل با فیدبک سیناپسی محلی برای مدل‌سازی سیستم تبدیل انرژی بادی استفاده شد که در بخش بعدی این مدل به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### پ-۵ مدل شبکه عصبی دینامیکی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود

در این مدل دینامیک‌ها توسط اعمال یک فیلتر پاسخ ضربه نامحدود به ساختار نرون ایجاد می‌شوند. در این حالت نرون ورودی‌ها و برانگیختگی‌های قبلی خودش را توسط دو سیگنال بازتولید می‌کند: ورودی  $u_i(k)$ ,  $i = 1, \dots, n$  و خروجی  $y(k)$ . شکل (پ-۱۴) ساختار مدل نرون مورد نظر را نشان می‌دهد. سه عمل مهم در این ساختار دینامیکی انجام می‌پذیرد. اولین عمل این است که جمع وزن‌دار ورودی‌ها با توجه به فرمول زیر محاسبه می‌شود [۴۵، ۵۸]:

$$\varphi(k) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(k) \quad (\text{پ-۱۷})$$

وزن‌ها عملکردی مشابه با آنچه در شبکه‌های پیش‌خورد استاتیکی انجام می‌دادند، خواهند داشت. وزن‌ها به همراه تابع فعال‌ساز مسئولیت دارند تا خواص مدل را تقریب بزنند. فیلترهای مورد نظر نیز سیستم‌های دینامیکی خطی از مرتبه‌های مختلف هستند که شامل مسیرهای فیدبک و پیش‌خورد وزن‌دار با وزن‌های به ترتیب  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, r$  و  $b_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, r$  هستند. رفتار این سیستم را می‌توان توسط رابطه زیر توصیف کرد:



شکل (پ-۱۴) ساختار نرون دینامیکی با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود.

$$z(k) = \sum_{i=0}^r b_i \varphi(k-i) - \sum_{i=1}^r a_i z(k-i) \quad (\text{پ-۱۸})$$

که در رابطه فوق  $\varphi(k)$  ورودی فیلتر و  $z(k)$  خروجی آن است. همچنین می‌توان رابطه (۱۸-۳) را

به صورت تابع انتقال زیر نوشت:

$$G(z) = \frac{\sum_{i=0}^n b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}} \quad (\text{پ-۱۹})$$

در نهایت خروجی نرون توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

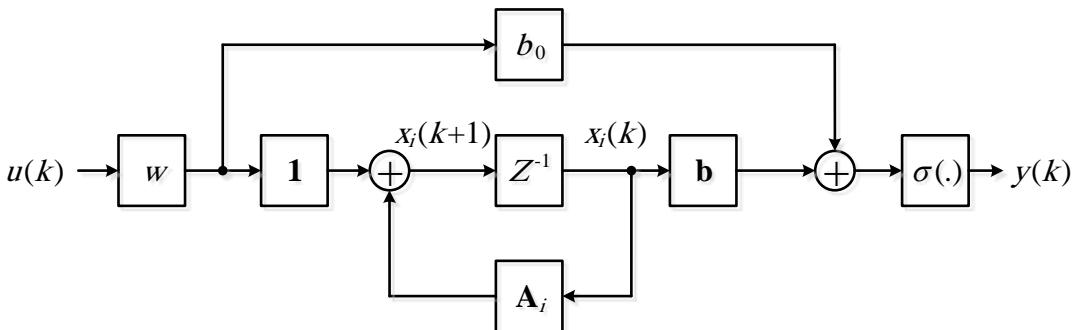
$$y(k) = \sigma(g_2(z(k) - g_1)) \quad (\text{پ-۲۰})$$

که در رابطه فوق  $\sigma(\cdot)$  تابع فعال‌ساز غیرخطی است که خروجی  $y(k)$  نرون را تولید می‌کند و نیز  $g_1$  و  $g_2$  پارامترهای بایاس و شیب تابع فعال‌ساز هستند. به منظور آنالیز خواص مدل نرون فوق، مفید است که مدل در فضای حالت نمایش داده شود. حالت‌های نرون با توجه به شکل (پ-۱۵)

توضیح معمولی زیر بیان می‌گردد:

$$x(k+1) = Ax(k) + \mathbf{W}u(k) \quad (\text{پ-۲۱})$$

که در این رابطه  $x(k) \in \mathbb{R}^r$  بردار حالت،  $\mathbf{W} = \mathbf{1}w^T \in \mathbb{R}^{n \times r}$  ماتریس وزنی و  $w \in \mathbb{R}^n$  است و برداری است با یک در اولین مکان و صفر در مکان‌های دیگر،  $u(k) \in \mathbb{R}^n$  بردار ورودی،  $n$  تعداد ورودی‌ها است و همچنین ماتریس حالت  $A$  به صورت زیر می‌باشد:

شکل (پ-۱۵) فرم فضای حالت نرون  $i$ -ام با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{r-1} & -a_r \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۲۲})$$

و رابطه خروجی نرون نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$y(k) = \sigma(g_2(\mathbf{b}x(k) + \mathbf{d}u(k) - g_1)) \quad (\text{پ-۲۳})$$

در رابطه فوق  $\sigma(\cdot)$  تابع فعال‌ساز غیرخطی،  $\mathbf{b} = [b_1 - b_0 a_1, \dots, b_r - b_0 a_r]$  بردار پیش‌خورد

پارامترهای فیلتر و  $\mathbf{d} = [b_0 w_1, \dots, b_0 w_n]$  می‌باشد.

یکی از مزایای شبکه‌های بازگشتی محلی، شبیه بودن ساختار آن به شبکه پیش‌خورد استاتیکی است.

در شبکه عصبی دینامیکی، نرون دینامیک جایگزین نرون استاتیک می‌شود. چنین شبکه‌ای

فیدبک‌های سراسری نخواهد داشت که در واقع این نوع فیدبک‌ها طرح شبکه و آموزش آن را دشوار

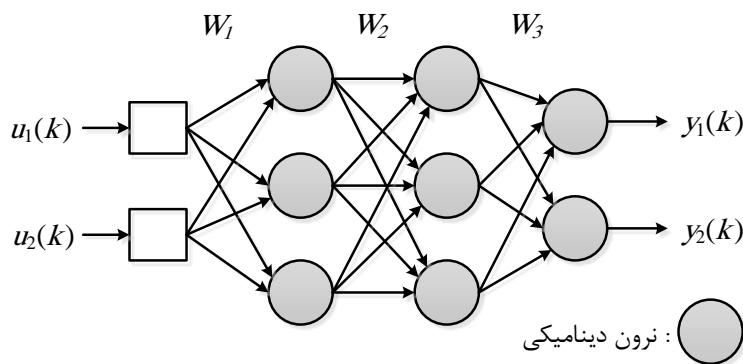
می‌سازند. در حقیقت طرح این شبکه‌ها مابین طرح شبکه‌های پیش‌خورد و بازگشتی سراسری قرار

دارد. همانطور که پیش از این نیز بدان اشاره شد، این دسته از شبکه‌های عصبی، شبکه‌های

پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی نامیده می‌شوند. شکل (پ-۱۶) ساختار این شبکه را نشان

می‌دهد. ویژگی‌های مهم شبکه پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی را می‌توان در موارد زیر خلاصه

نمود:



شکل (پ-۱۶) ساختار شبکه پیش‌خورد سراسری-بازگشتی محلی.

- ۱- ساختار ارتباطی نرون‌ها کاملاً شناخته شده است (ساختاری همانند شبکه‌های عصبی پیش‌خورد چند لایه دارند).
- ۲- برای یک مسئله، تعداد نرون‌های مورد نیاز بسیار کم است.
- ۳- برای این نوع از شبکه‌ها می‌توان پایداری را مورد بررسی قرار داد. به طوری که با بررسی قطب‌های فیلترهای داخلی نرون‌ها می‌توان پایداری آن‌ها را به سادگی بررسی کرد.
- ۴- با قرار دادن اطلاعات گذشته در طرح این شبکه‌ها، شناسایی، کنترل و یا پیشگوئی سری‌های زمانی امکان‌پذیر می‌شود.
- ۵- آموزش این‌گونه از شبکه‌ها نسبت به شبکه‌های بازگشتی سراسری آسان‌تر است. محاسبه گرادیان که همراه روند آموزش بازگشتی زمان-واقعی انجام می‌پذیرد و یا پس‌انتشار در طول زمان برای شبکه‌های بازگشتی سراسری خسته‌کننده و زمانبر هستند. در حالی که شبکه‌های بازگشتی محلی دارای نرون‌هایی هستند که به صورت پیش‌خورد به یکدیگر متصل شده‌اند که در نتیجه آموزش این شبکه‌ها را نسبت به شبکه‌های بازگشتی سراسری راحت‌تر می‌کند.
- ۶- سرعت همگرایی در آموزش این شبکه‌ها سریع‌تر است زیرا پیچیدگی ساختاری آن‌ها کم‌تر می‌باشد.

برای یک شبکه  $M$ -لایه به همراه نرون‌های دینامیکی آورده شده در روابط (پ-۱۷) الی (پ-۲۰)، با فرض این که  $n_\mu$  نشان‌دهنده تعداد نرون‌ها در لایه  $\mu$  است،  $(k) u_i^\mu$  خروجی نرون  $i$  از لایه  $\mu$  در زمان گسسته  $k$  باشد، رابطه نرون  $j$  از لایه  $\mu$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_j^\mu(k) = \sigma \left[ g_{2j}^\mu \left( \sum_{i=0}^r b_{ij}^\mu \sum_{p=1}^{s_{\mu-1}} w_{jp}^\mu u_p^\mu(k-i) - \sum_{i=1}^r a_{ij}^\mu z_j^\mu(k-i) - g_{1j}^\mu \right) \right] \quad (\text{پ-۲۴})$$

برای آموزش این نوع شبکه‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد؛ که سه روش مهم، روش‌های پس‌انتشار دینامیکی توسعه یافته<sup>۱</sup>، جستجوی تصادفی طبیعی و تخمین اتفاقی آشفتگی همزمان<sup>۲</sup> می‌باشند که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند [۴۵]. در این تحقیق از روش جستجوی تصادفی طبیعی برای آموزش شبکه استفاده شد. مزیت این روش در آن است که به آسانی قابل پیاده‌سازی است و دارای پهنگ کاربرد بسیار وسیعی است. اطلاعات مورد نیاز برای پیاده‌سازی این روش تنها اطلاعات ورودی-خروجی هستند که در آن بردار پارامترهای  $\theta$  ورودی و تابع هزینه  $J(\theta)$  خروجی هستند. تمامی پارامترهای شبکه را می‌توان با بردار پارامترهای  $\theta$  نمایش داد. هدف اصلی آموزش، تنظیم عناصر بردار  $\theta$  به نحوی است که تابع هزینه به صورت زیر مینیمم شود:

$$\theta^* = \min_{\theta \in \mathbb{C}} J(\theta) \quad (\text{پ-۲۵})$$

که در رابطه فوق  $\theta^*$  بردار پارامترهای بهینه شبکه،  $J: \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^1$ :  $J$  نشان‌دهنده تابع هزینه‌ای است که باید مینیمم شود،  $p$  بعد بردار  $\theta$  و  $\mathbb{C} \subseteq \mathbb{R}^p$  مجموعه محدودیت‌هایی است که مقادیر مجاز برای پارامترهای  $\theta$  را تعريف می‌کند. تابع هزینه را می‌توان به صورت زیر تعريف کرد:

$$J(l; \theta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_d(k) - y(k; \theta))^2 \quad (\text{پ-۲۶})$$

<sup>1</sup> Extended Dynamic Back Propagation (EDBP)

<sup>2</sup> Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA)

که در رابطه فوق  $y_d(k)$  و  $y(\theta; k)$  به ترتیب نشان‌دهنده خروجی مطلوب شبکه و پاسخ عملی شبکه به الگوی ورودی  $u(k)$ ،  $N$  بعد مجموعه آموزشی و  $l$  شاخص تکرار<sup>۱</sup> می‌باشد.تابع هزینه فوق باید بر مبنای الگوهای ورودی-خروچی داده شده، مینیمم شود. در روش جستجوی تصادفی تطبیقی نیازی به محاسبه گرادیان  $J$  نیست. جدول (پ-۱) نشان‌دهنده مراحل الگوریتم آموزش جستجوی تصادفی تطبیقی است. با فرض آن که دنباله  $\hat{\theta}_0, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_k$  جواب‌های بدست آمده در حال حاضر هستند، برای دستیابی به نقطه بعدی  $\hat{\theta}_{k+1}$  از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + r_k \quad (\text{پ-۲۷})$$

که در رابطه فوق  $\hat{\theta}_k$  تخمین  $\theta^*$  در تکرار  $k$ -ام و  $r_k$  بردار آشتفتگی است که به صورت تصادفی با توجه به توزیع نرمال  $(0, v)$  تولید می‌شود. جواب جدید  $\hat{\theta}_{k+1}$  زمانی پذیرفته می‌شود که تابع هزینه  $J(\hat{\theta}_{k+1})$  کوچکتر از  $J(\hat{\theta}_k)$  باشد. در غیر این صورت  $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k$  می‌شود. به منظور آغاز روند بهینه‌سازی، نیاز است که مقدار اولیه  $\hat{\theta}_0$  و واریانس  $v$  مشخص شوند. با فرض آن که  $\theta^*$  مینیمم سراسری است که می‌باید پیدا شود، زمانی که  $\hat{\theta}_k$  دور از  $\theta^*$  است،  $r_k$  باید دارای واریانس زیاد باشد تا جابجایی‌های بزرگ اجازه داده شود. این امر موجب می‌شود که از افتادن در مینیمم‌های محلی اجتناب شود. از طرفی زمانی که  $\hat{\theta}_k$  به  $\theta^*$  نزدیک است،  $r_k$  باید دارای واریانس کم باشد تا اجازه داده شود که فضای پارامترها با دقت پویش شود. ایده روش جستجوی تصادفی تطبیقی انجام دو مرحله است: انتخاب واریانس و بهره‌برداری از واریانس. در طول مرحله انتخاب واریانس، تعداد بسیاری از مقادیر  $v$  به تعداد مراحل تکرار تعریف شده در الگوریتم، مورد آزمایش قرار می‌گیرند. واریانس‌های مسابقه‌دهنده  $v_i$  با توجه به عملکردشان در کاهش هزینه ارزیابی می‌شوند. هر  $v_i$  با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i = 10^{-i} v_0, \quad \text{for } i = 1, \dots, 4 \quad (\text{پ-۲۸})$$

<sup>۱</sup> Iteration Index

جدول (پ-۱) الگوریتم آموزش به روش جستجوی تصادفی تطبیقی.

**گام ۱:** نقاط اولیه برای  $\hat{\theta}_0$ ,  $J_{min}$ ,  $n_{max}$ ,  $v_0$  و  $n = 1$  قرار داده می‌شود.

**گام ۲:** مرحله انتخاب واریانس می‌باشد. ابتدا  $i = 1$  و  $k = 1$  قرار داده می‌شود و سپس الگوریتم زیر پیاده‌سازی می‌شود:

while ( $i < 5$ ) {

while ( $k \leq 100/i$ ) {

اجرای الگوریتم یافتن نقطه آزمایشی

$k = k+1$ ;

$i = i+1$ ;

$k = 1$ ;

$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_0$  ; }

**گام ۳:** مرحله بهره‌برداری از واریانس انتخاب شده می‌باشد. در این مرحله ابتدا  $i = 1$

قرار داده می‌شود و سپس:

while ( $k \leq 100$ ) {

اجرای الگوریتم یافتن نقطه آزمایشی

$k = k+1$ ;

if ( $n = n_{max}$ ) or ( $J(\hat{\theta}_{best}) < J_{min}$ ) then BREAK;

else  $\hat{\theta}_0 = \hat{\theta}_{best}$ ,  $n = n+1$ , and go to step 1;

الگوریتم یافتن نقطه آزمایشی: ابتدا برای بدست آوردن  $\hat{\theta}_k'$ ,  $\hat{\theta}_k$  به کمک روابط زیر آشفته می‌شود:

$v_i = 10^{-i} v_0$ ,  $\hat{\theta}_k' = \hat{\theta}_k + r_k$ ;

سپس شرط‌های زیر بررسی می‌شوند:

if ( $J(\hat{\theta}_k') \leq J(\hat{\theta}_k)$ ) then  $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k'$  else  $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k$  ;

if ( $J(\hat{\theta}_k') \leq J(\hat{\theta}_{best})$ ) then  $\hat{\theta}_{best} = \hat{\theta}_k'$  and  $i_{best} = i$ .

در رابطه فوق  $\eta$  واریانس اولیه است و برای تعداد تکراری برابر با  $i/100$  دنبال کردن واریانس‌های بزرگ مجاز می‌باشد. بهترین  $\eta$  با توجه به کمترین مقداری که درتابع هزینه به وجود آورده است برای مرحله بهره‌برداری از واریانس انتخاب می‌شود. بهترین مجموعه پارامترهای  $\hat{\theta}_k$  و واریانس  $\eta$  در مرحله بهره‌برداری از واریانس به عنوان نمونه در ۱۰۰ مرحله تکرار مورد استفاده قرار می‌گیرند. الگوریتم زمانی می‌تواند متوقف شود که تعداد تکرار به ماکزیمم مقدار خود،  $n_{\max}$ ، رسیده باشد و یا دقیق مطلوب،  $J_{\min}$ ، حاصل شود. فارغ از راحتی روند آموزش جستجوی تصادفی تطبیقی، الگوریتم دارای خاصیت همگرایی سراسری است و همچنین پارامترهای تطبیقی الگوریتم، احتمال گیر افتادن در مینیمم محلی را کاهش می‌دهند.

#### پ-۶ معیارهای انتخاب ساختار مناسب برای شبکه‌های عصبی

معضل اصلی در شبکه‌های عصبی عدم وجود یک راهکار مشخص به منظور انتخاب تعداد لایه‌ها و تعداد نرون در هر لایه برای دستیابی به دقیق مطلوب در مدل‌سازی می‌باشد. به همین دلیل برای انتخاب ساختار مناسب باید طرح‌های مختلف را مورد آزمایش قرار داد و با توجه به معیارهای موجود، یک طرح را انتخاب نمود. هدف انتخاب ساختار مناسب، پیدا کردن مدلی است که بتواند به بهترین نحو ممکن مجموعه داده‌های موجود را ردگیری کند. معیارهای زیادی برای این منظور وجود دارند که در این تحقیق از دو معیار بهره گرفته شد. اولین معیار، معیار اطلاعات آکایک می‌باشد. این معیار پیچیدگی مدل را توسط مینیمم کردن تابع تئوری اطلاعات  $f_{AIC}$ ، در نظر می‌گیرد. این تابع به صورت زیر است:

$$f_{AIC} = \log(J) + \frac{2K}{N} \quad (\text{پ-۲۹})$$

که در رابطه فوق  $N$  تعداد نمونه‌های استفاده شده برای آموزش و  $K$  تعداد پارامترهای شبکه عصبی مورد نظر می‌باشد. همچنین  $J$  مجموع مربعات خطای مابین خروجی مطلوب  $y_i^d$  و خروجی شبکه  $y_i$  می‌باشد، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \sum_{i=1}^N \left( y_i^d - y_i \right)^2 \quad (پ-۳۰)$$

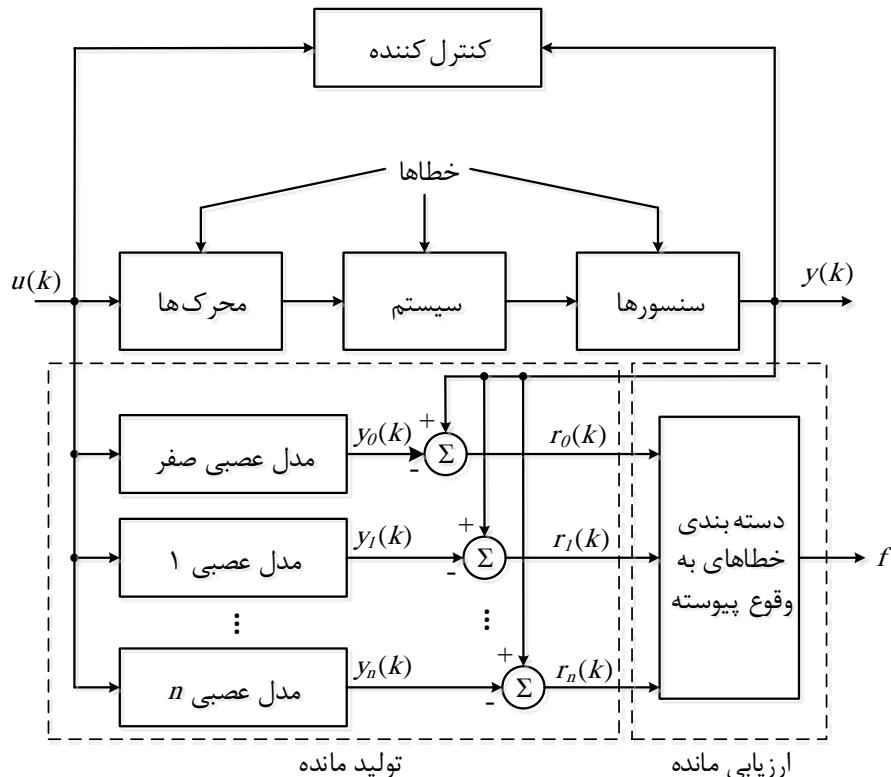
معیار شناخته شده دیگری نیز که در این زمینه به کار برده می‌شود، معیار خطای پیش‌بینی نهایی می‌باشد، که مرتبه مدل را با مینیمم کردن تابع زیر انتخاب می‌کند:

$$f_{FPE} = J \frac{1 + \frac{K}{N}}{1 - \frac{K}{N}} \quad (پ-۳۱)$$

در انتخاب ساختار مناسب، هر چه مقادیر توابع فوق کمتر باشند، ساختار بهتر خواهد بود و از لحاظ تعداد پارامتر، پیچیدگی کمتری خواهد داشت.

#### پ-۷ کاربرد شبکه‌های عصبی دینامیکی در تشخیص خطای

یکی از معایب روش‌های تحلیلی برای سیستم‌های تشخیص خطای این است که به مدل دقیق ریاضی برای تشخیص خطای نیازمند هستند. از آنجایی که هیچ سیستمی را نمی‌توان به صورت دقیق مدل نمود، در روش‌های تحلیلی مسئله مقاوم بودن سیستم تشخیص خطای باید مورد بررسی جدی قرار گیرد. راه حل ثانویه استفاده از روش‌های هوشمند از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی، سیستم‌های خبره و الگوریتم‌های تکاملی و یا ترکیب این روش‌ها مانند شبکه‌های فازی-عصبی می‌باشد. بسیاری از ساختارهای شبکه‌های عصبی وجود دارند که از آن‌ها می‌توان برای تولید و ارزیابی مانده استفاده کرد. برای تولید مانده، شبکه‌های عصبی جایگزین مدل تحلیلی می‌شوند. برای حل چنین مسائلهایی از شبکه‌های عصبی دینامیکی استفاده می‌شود. شکل (پ-۱۷) ساختار کلی سیستم تشخیص و جداسازی خطای با استفاده از شبکه‌های عصبی را نشان می‌دهد.



شکل (پ-۱۷) ساختار سیستم تشخیص خطای بر مبنای بانکی از مدل‌های فرآیند.

در این شکل هر مدل عصبی نشان‌دهنده یک گروه از رفتارهای سیستم می‌باشد. در واقع یک مدل نشان‌دهنده سیستم در شرایط نامی و مابقی مدل‌ها مربوط به شرایط سیستم در حالت‌های مختلف بروز خطا در سیستم می‌باشند. برای مدل کردن شرایط مختلف سیستم می‌توان از شبکه‌های عصبی با دینامیک خارجی و یا با دینامیک داخلی بهره گرفت که در این تحقیق از شبکه‌های عصبی با دینامیک داخلی (شبکه‌های عصبی بازگشتی محلی با مدل نرون با فیلتر پاسخ ضربه نامحدود) برای مدل‌سازی سیستم در شرایط مختلف بهره گرفته شد [۸۸].



# مراجع



- [1] Bianchi F.D., Battista D.H., Mantz J.R. (2007), "Wind Turbine Control Systems", Springer.
- [2] Hansen M.O.L. (2008), "Aerodynamics of Wind Turbines", Earthscan.
- [3] Jha A.R. (2011). "Wind Turbine Technology", CRC Press-Taylor & Francis Group.
- [4] Global Wind Energy Council (2010), Global Wind Report.
- [5] <http://www.free-energy-now.us/images/free energy wind1.jpg>
- [6] <http://showroom411.com/Media/DirectoryEntries/UGE-4K 2nd Generation VAWT.jpg>
- [7] Sloth C., Esbensen T. (2009), Master's Thesis, "Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Wind Turbines", Aalborg University.
- [8] Junyent-Ferre A., Gomis-Bellmunt O., Sumper A., Sala M., Mata M. (2010), "Modeling and Control of the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine", Simulation Modelling Practice and Theory, pp.1365-1381.
- [9] El-Sattar A.A., Saad N.H., Shams El-Din M.Z. (2008), "Dynamic Response of Doubly Fed Induction Generator Variable Speed Wind Turbine Under Fault", Electric Power Systems Research, pp.1240-1246.
- [10] Joselin Herbert G.M., Iniyian S., Sreevalsan E., Rajapandian S. (2007), "A Review of Wind Energy Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.1117-1145.
- [11] Dolan D.S.L., Lehn P.W. (2006), "Simulation Model of Wind Turbine 3p Torque Oscillations due to Wind Shear and Tower Shadow", IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 717-724.
- [12] Perdana A. (2008), PhD's Thesis, "Dynamic Models of Wind Turbines", Chalmers University of Technology.
- [13] Byeon G., Park I.K., Jang G. (2010), "Modeling and Control of a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Wind Power Generation System for Real-time Simulations", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 61-69.

- [14] Babaie Lajimi A., Gholamian S.A., Shahabi M. (2011), "Modeling and Control of a DFIG-Based Wind Turbine During a Grid Voltage Drop", *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 1, No. 5, pp. 121-125.
- [15] Miller N.W., Sanchez-Gasca J.J., Price W.W., Delmerico R.W. (2003), "Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 MW Wind Turbine-Generators for Stability Simulations", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol.3, pp.1977-1983.
- [16] Zellagui M. (2008), "Variable Speed of the Wind Turbine Generator with DFIG Connected to Electric Grid", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, No. 3, pp. 453-464.
- [17] Amuthan N. and Singh S.N. (2009), "Direct Model Reference Adaptive Internal Model Controller for DFIG Wind Farms", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-11.
- [18] Petru T. (2003), PhD's Thesis, "Modeling of Wind Turbines for Power System Studies", Chalmers University of Technology.
- [19] Lei Y., Mullane A., Lightbody G., and Yacamini R. (2006), "Modeling of the Wind Turbine with a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 257-264.
- [20] Abbas F.A.R. and Abdulsada M.A. (2010), "Simulation of Wind-Turbine Speed Control by MATLAB", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 5, pp. 912-915.
- [21] Dolan B. (2010), PhD's Thesis, "Wind Turbine Modelling, Control and Fault Detection", Technical University of Denmark.
- [22] Sloth C., Esbensen T., Stoustrup J. (2011), "Robust and Fault-Tolerant Linear Parameter-Varying Control of Wind Turbines", *Mechatronics*, Vol. 21, No. 4, pp. 645-659.
- [23] Tabatabaeipour S.M., Odgaard P.F., Bak T. and Stoustrup J. (2012), "Fault Detection of Wind Turbines with Uncertain Parameters: A Set-Membership Approach", *Energies*, Vol. 5, pp. 2424-2448.

- [24] Ozdemir A.A., Seiler P., Balas G.J. (2011), "Wind Turbine Fault Detection Using Counter-Based Residual Thresholding", Proceedings of the 18th IFAC World Congress, pp. 8289-8294.
- [25] Fogh Odgaard P., Stoustrup J. and Kinnaert M. (2009), "Fault Tolerant Control of Wind Turbines – a Benchmark Model", 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, pp. 155-160.
- [26] Mogens B., Kinnaert M., Lunze J., and Staroswiecki M. (2006), "*Diagnosis and Fault-Tolerant Control*", Springer.
- [27] Cho Knowles H.C., Fadali J., Kwon Soon Lee M.S. (2010), "Fault Detection and Isolation of Induction Motors Using Recurrent Neural Networks and Dynamic Bayesian Modeling", IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp. 430-437.
- [28] Lin X., Ke S., Li Z., Weng H., Han X. (2010), "A Fault Diagnosis Method of Power Systems Based on Improved Objective Function and Genetic Algorithm-Tabu Search", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1268-1274.
- [29] Lygeros J., Godbole D.N., Broucke M. (2000), "A Fault Tolerant Control Architecture for Automated Highway Systems", IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp. 205-219.
- [30] Ainan Kahyeh M., Héraud N., Souleiman Guelle I., and Bennouna O. (2010), "Fault Diagnosis of Variable Speed Wind Turbine", IEEE 18th Mediterranean Conference on Control & Automation, pp. 471-476.
- [31] Donders S. (2002), Master's Thesis, "Fault Detection and Identification for Wind Turbine Systems: a Closed-Loop Analysis", University of Twente.
- [32] Kusiak A. and Anoop V. (2012), "Analyzing Bearing Faults in Wind Turbines: A Data-Mining Approach", Renewable Energy, Vol. 48, pp. 110-116.
- [33] Kusiak A. and Wenyan L. (2011), "The Prediction and Diagnosis of Wind Turbine Faults", Renewable Energy, Vol. 36, pp. 16-23.
- [34] Entezami M., Hillmansen S., Weston P. and Papaelias M.P. (2012), "Fault Detection and Diagnosis within a Wind Turbine Mechanical Braking System Using Condition Monitoring", Renewable Energy, Vol. 47, pp. 175-182.

- [35] Wenyi L., Wang Z., Han J. and Wang G. (2013), "Wind Turbine Fault Diagnosis Method Based on Diagonal Spectrum and Clustering Binary Tree SVM", Renewable Energy, Vol. 50, pp. 1-6.
- [36] Elkhatib K. and Aitouche A. (2012), "Robust Fault Tolerant Control of DFIG Wind Energy Systems with Unknown Inputs", Renewable Energy, pp. 1-14.
- [37] Hameed Z., Hong Y.S., Cho Y.M., Ahn S.H. and Song C.K. (2009), "Condition Monitoring and Fault Detection of Wind Turbines and Related Algorithms: A Review", Renewable and Sustainable energy reviews, Vol. 13, No. 1, pp. 1-39.
- [38] Caselitz P. and Giebhardt J. (2002), "Advanced Maintenance and Repair for Offshore Wind Farms Using Fault Prediction Techniques", World Wind Energy Conference.
- [39] Patton R., Frank P., Clark R. (1989), "*Fault Diagnosis in Dynamic Systems*", Prentice Hall.
- [40] Hwang I., Kim S., Kim Y., Seah C.E. (2010), "A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods", IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp. 636-653.
- [41] Izadi Najaf Abadi I. (2006), PhD's Thesis, "Fault Diagnosis in Sampled Data Systems", University of Alberta.
- [42] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. (2003), "A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part I: Quantitative Model-Based Methods", Computers and Chemical Engineering, pp. 293-311.
- [43] Zhu F. and Cen F. (2010), "Full-Order Observer-Based Actuator Fault Detection and Reduced-Order Observer-Based Fault Reconstruction for a Class of Uncertain Nonlinear Systems", Journal of Process Control, pp. 1141-1149.
- [44] Zhong Ding M., Qing Long S.X., Qiang Ding H. (2010), "Parity Space-Based Fault Estimation for Linear Discrete Time-Varying Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 1726-1731.
- [45] Patan K. (2008), "*Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes*", Vol. 377, Springer.

- [46] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. (2003), "A Review of Process Fault Detection and Diagnosis, Part II: Qualitative Models and Search Strategies", *Computers and Chemical Engineering*, pp. 313-326.
- [47] Liu C.S., Zhang S.J., Hu S.S. (2008), "Adaptive Neural Networks-Based Fault Detection and Diagnosis Using Unmeasured States", *IET Control Theory and Applications*, pp. 1066-1076.
- [48] Mok H.T. and Chan C.W. (2008), "Online Fault Detection and Isolation of Nonlinear Systems Based on Neuro-Fuzzy Networks", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 171-181.
- [49] Jiang B., Gao Z., Shi P., Xu Y. (2010), "Adaptive Fault-Tolerant Tracking Control of Near-Space Vehicle Using Takagi–Sugeno Fuzzy Models", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, pp. 1000-1007.
- [50] Meng K., Yang Dong Z., Hui Wang D., Po Wong K. (2010), "A Self-Adaptive RBF Neural Network Classifier for Transformer Fault Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1350-1360.
- [51] Magdy G.M. (2007), PhD's Thesis, "Robust Fuzzy Observer-Based Fault Detection for Nonlinear Systems", University of Duisburg, 2007.
- [52] Hasanien H.M., Muyeen S.M. and Tamura J. (2010), "Speed Control of Permanent Magnet Excitation Transverse Flux Linear Motor by using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 12, pp. 2762-2768.
- [53] Patan K. and Parisini T. (2005), "Identification of Neural Dynamic Models for Fault Detection and Isolation: The Case of a Real Sugar Evaporation Process", *Journal of Process Control*, Vol. 15, No. 1, pp. 67-79.
- [54] Cannas B., Celli G., Marchesi M. and Pilo F. (1998), "Neural Networks for Power System Condition Monitoring and Protection", *Neurocomputing*, Vol. 23, No. 1, pp. 111-123.
- [55] Ciocoiu I.B. (1998), "Time Series Analysis using RBF Networks with FIR/IIR Synapses", *Neurocomputing*, Vol. 20, No. 1, pp. 57-66.

- [56] Barbounis T.G. and Theocharis J.B. (2006), "Locally Recurrent Neural Networks for Long-Term Wind Speed and Power Prediction", *Neurocomputing*, Vol. 69, No. 4, pp. 466-496.
- [57] Barbounis T.G. and Theocharis J.B. (2007), "Locally Recurrent Neural Networks for Wind Speed Prediction using Spatial Correlation", *Information Sciences*, Vol. 177, No. 24, pp. 5775-5797.
- [58] Ayoubi M. (1994), "Fault Diagnosis with Dynamic Neural Structure and Application to a Turbo-Charger", *Proceedings of the International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pp. 618-623.
- [59] Kaimal J., Wyngaard J., Izumi Y., and Coté O. (1972), "Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence", *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, pp. 563-598.
- [60] Leithead W., de la Salle S., and Reardon D. (1991), "Role and Objectives of Control for Wind Turbines", *IEE Proceedings-C*, Vol. 138, No. 2, pp. 135-148.
- [61] Gavriluta C., Spataru S., Mosincat I., Citro C., Candela I., Rodriguez P. (2012), "Complete Methodology on Generating Realistic Wind Speed Profiles Based on Measurements", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, pp.1-6.
- [62] Sorensen P., Blaabjerg F., Iov F., Hansen A.D. (2004), Technical Report, "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink", Aalborg University.
- [63] Lagrander W. (1996), Master's Thesis, "Models for Variable Speed Wind Turbine", CREST Loughborough University.
- [64] Blaabjerg F., Hansen A.D., Sorensen P. and Becho J. (2002), "Dynamic Modelling of Wind Farm Grid Interaction", *Wind Engineering*, pp.191-208.
- [65] Jonkman, J. (2009), "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- [66] Henriksen L.C. (2007), Master's Thesis, "Model Predictive Control of a Wind Turbine", Technical University of Denmark.
- [67] Pena R., Clare J.C., Asher G.M. (1996), "Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable Speed Wind

- Energy Generation", IEEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 143, pp. 231-241.
- [68] Krause P.C., Wasynczuk O. and Sudhoff S.D. (2002), "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press.
- [69] Abad G., Lopez J., Rodriguez M.A., Marroyo L., Iwanski G. (2011), "Doubly Fed Induction Machine", IEEE Press.
- [70] Tapia A., Tapia G., Ostolaza J. and Saenz J. (2003), "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, pp. 194-204.
- [71] Chowdhury B. and Chellapilla S. (2006), "Double-Fed Induction Generator Control for Variable Speed Wind Power Generation", Electric Power Systems Research, Vol. 76, No. 9, pp. 786-800.
- [72] Hansen A.D. and Michalke G. (2007), "Voltage Grid Support of DFIG Wind Turbines during Grid Faults", Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition, pp. 93-97.
- [73] Tremblay E., Chandra A. and Lagace P. (2006), "Grid-Side Converter Control of DFIG Wind Turbines to Enhance Power Quality of Distribution Network", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6.
- [74] Xu L. (2006), "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 750-758.
- [75] Hopfensperger B., Atkinson D. and Lakin R.A. (1999), "Stator Flux Oriented Control of a Cascaded Doubly-Fed Induction Machine", IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, No. 6, pp. 597-605.
- [76] Javan E. (2011), Master's Thesis, "Control and Simulation of Doubly-Fed Induction Generator under Unbalanced Grid Voltage Conditions", Shahrood University of Technology.
- [77] Technical Documentation (2003), "Dynamic Modelling of Doubly-Fed Induction Machine Wind-Generators", DIgSILENT GmbH, Germany.

- [78] Hristov T.S., Miller S.D. and Friehe C.A. (2000), "Linear Time-Invariant Compensation of Cup Anemometer and Vane Inertia", *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 293-307.
- [79] Kanev S. (2004), PhD's Thesis, "Robust Fault Tolerant Control", University of Twente.
- [80] Zafar J. (2011), PhD's Thesis, "Winding Short-Circuit Fault Modelling and Detection in Doubly-Fed Induction Generator based Wind Turbine Systems", Universite Libre De Bruxelles.
- [81] Erlich I., Wrede H. and Feltes C. (2007), "Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults", Power Conversion Conference, pp. 1195-1200.
- [82] Sulla F., Svensson J. and Samuelsson O. (2013), "Short-Circuit Analysis of a Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine with Direct Current Chopper Protection", *Wind Energy*, Vol. 16, No. 1, pp.37-49.
- [83] Bdou A.F., Abu-Siada A. and Pota H.R. (2012), "Application of STATCOM to Improve the LVRT of DFIG during DC-link Capacitor Failure", Fifteenth International Middle East Power Systems Conference, pp. 1-6.
- [84] Zhang Y., Jiang J. (2008), "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems", Annual Reviews in Control, pp. 229-252.
- [85] Gupta M.M., Jin L., Homma N. (2003), "*Static and Dynamic Neural Networks*", John Wiley & Sons.
- [86] Frasconi P., Gori M. (1992), "Local Feedback Multilayered Networks", *Neural Computation*, pp. 120-130.
- [87] Back A.D., Tsoi A.C. (1991), "FIR and IIR Synapses, a New Neural Network Architecture for Time Series Modelling", *Neural Computation*, pp. 375-385.
- [88] Ruano A.E. (2008), "*Intelligent Control Systems Using Computational Intelligence Techniques*", The Institution of Engineering and Technology.



## **Abstract**

In this research, first a comprehensive dynamic model for the Wind Energy Conversion Systems (WECSs) is presented by which a variety of faults such as sensors, actuators and power grid faults can be studied and effects of these faults on voltage, current and other signals of the WECS can be investigated. Many modelling techniques which have been already introduced for the modelling of the faults or observing the influences of the faults cannot be considered wide-ranging to include any fault at any point of the WECS. Then, a Fault Detection and Isolation system (FDIS) is presented to diagnose the occurred faults at the appropriate time in order to ensure a safe system operation, avoid heavy economic losses, prevent damage to adjacent relevant systems and facilitate timely repair of failed components. The proposed FDIS, which exploits dynamic recurrent neural networks, detects and isolates the occurred faults in the generator's angular velocity sensor, pitch angle sensors and pitch actuators. The novelties of the thesis can be explained as follows: the comprehensive dynamic model has been applied to analyze faults of the WECS and to design the corresponding FDIS. Also utilizing the mean of the residual signal has been proposed to isolate the faults of the pitch system. Then the adaptive fuzzy threshold has been presented to achieve to the robust design. Comparison of the simulation results for the constant, adaptive, and adaptive fuzzy thresholds shows that the numbers of missed and false alarms have reduced by using the adaptive fuzzy threshold. Finally by employing the designed FDIS, a Fault Tolerant Control System (FTCS) is suggested which contains both the signal modification and the bank of controllers blocks. Also when a fault has occurred in the angular velocity sensor of generator, if the suggested FTCS is utilized, the performance of the WECS will be raised and more active power can be attained. The suggested FDIS and algorithm can be used to detect occurred faults in other parts of the WECS.

*Keywords:* wind energy conversion system, dynamic modelling, fault detection and isolation system, recurrent neural networks, fault tolerant control system.





**Shahrood University of Technology**

School of Electrical and Robotic Engineering

Control Department

## **Design of Fault Detection and Isolation Systems for Wind Turbines**

### **Author:**

Nasser Talebi

### **Supervisors:**

Dr. M.A. Sadrnia

Dr. A. Darabi

**Summer 2014**