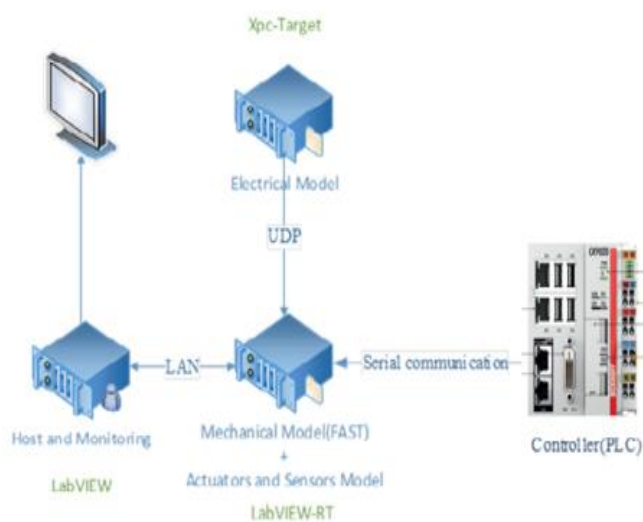




پژوهشگاه نیرو

توسعه شبیه ساز زمان-حقیقی توربین بادی

NRI-ER-669-PECPN11-00-F



مدیر پروژه: امید بزاز
مجری: ادوارد غریبیان

DOI: 10.30503/nripress.2020.301

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

توسعه شبیه‌ساز زمان – حقیقی توربین بادی

مدیر پروژه:

امید بزاز

همکاران پروژه:

مجتبی غیبی

فرید قهرمانی

مجری:

ادوارد غریبان

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش : NRI-ER-669-PECPN11-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.301

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه
توسعه شبیه‌ساز زما-حقیقی توربین بادی / امید بزاز. کارفرما: پژوهشگاه نیرو،
۱۴۰۰.

۲۷۷ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. غیبی، مجتبی، همکار پروژه. ۲. قهرمانی، فرید، همکار پروژه.
۳. غریب‌یان، ادوارد، مجری. ۴. سیستم‌های سایبرفیزیکی



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

شماره:

بسمه تعالی

تاریخ:

پیوست:



فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب امید بزاز متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. مجتبی غیبی

۲. فرید قهرمانی

پیشگفتار

با گسترش ابعاد توربین‌های بادی و افزایش پیچیدگی رفتار این سیستم‌ها و لزوم اعمال سیستم‌های پیشرفته کنترل و سوپروایزری، وجود بستری مطمئن برای آزمایش و ارزیابی طراحی‌های صورت گرفته و اطمینان از عملکرد مناسب توربین در مراحل مختلف طراحی و قبل از راه‌اندازی نهایی توربین از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی زمان-حقیقی ابزاری کم هزینه و ایمن است که برای تست کنترل‌کننده و سیستم‌های حفاظتی در سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرآیند ارزیابی و صحت‌سنجی سیستم کنترل در پروژه‌های صنعتی به طور کلی شامل مراحل شبیه‌سازی مدل در حلقه، نرم‌افزار در حلقه، پردازشگر در حلقه و در نهایت سخت‌افزار در حلقه می‌باشد که بسته به اهمیت، حساسیت و پیچیدگی سیستم، یک یا تمام این مراحل در طول پروسه طراحی انجام می‌گیرند. در شبیه‌سازی مدل در حلقه، مدل سیستم و تمامی زیر سیستم‌های موجود و ارتباطات آنان تا حد ممکن دقیق بر روی یک محیط شبیه‌سازی (مانند MATLAB، LabVIEW و ...) ساخته می‌شود. در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار در حلقه و پردازشگر در حلقه، کنترلر به فرمت کد استاندارد قابل پیاده‌سازی نهایی (C، PLC، ...) تبدیل شده و در کنار مدل سیستم در یک PC (نرم‌افزار در حلقه) و یا در یک پلت‌فرم مستقل دیگر (پردازشگر در حلقه) اجرا می‌گردد. در نهایت در شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه، شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی اجرا شده و تمامی ارتباطات میان کنترلر و مدل (و در صورت امکان سنسورها و عملگرها) به صورت واقعی برقرار می‌گردد و اثرات تاخیر، کوانتیزیشن و نویز در عمل اعمال می‌شود. نرم‌افزارهای گوناگونی نظیر Matlab/Simulink، Labview، Maplesim، Dymola و ... از قابلیت اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی برخوردارند، که هر یک دارای ویژگی‌های خاص خود بوده و در پروژه‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

کدهای مختلفی در جهان توسط شرکت‌ها و مؤسسات تحقیقاتی برای مدلسازی حرکت توربین بادی و استخراج نیروها و گشتاورهای مکانیکی و آیرودینامیکی توسعه یافته است. از آن جمله می‌توان به نرم‌افزار BLADED از شرکت Garrad Hassan، نرم‌افزار DHAT از شرکت GL، نرم‌افزار ALASKA از شرکت NORDEX، کد FLEX5 از DTU و کد HAWC از RISO و کد FAST از NREL اشاره کرد. این کدها عموماً تجاری بوده و یا اینکه فاقد تأییدیه معتبر می‌باشند. در این میان کد FAST علاوه بر برخورداری از تأییدیه شرکت GL، به علت منبع-باز بودن و در دسترس بودن مازول‌های آن براحتی قابل ارتقا و هدفمندسازی می‌باشد. به این ترتیب این کد به عنوان کد مبنا جهت مدلسازی دینامیک حرکت توربین بادی در نظر گرفته می‌شود.

هدف از انجام این پروژه، طراحی و پیاده‌سازی یک شبیه‌ساز جامع توربین بادی است. این شبیه‌ساز با بکارگیری کد FAST برای حل معادلات دینامیک و آیرودینامیک توربین بادی و با مدلسازی کلیه زیرسیستم‌های دخیل در عملکرد آن از قبیل زیرسیستم الکتریکی، زیرسیستم کنترل و سوپروایزری، زیرسیستم اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال، عملگرهای پیچ و یاو و همچنین المانهای نظیر ترمز و کلاچ مکانیکی به شبیه‌سازی رفتار توربین بادی در حضور بادهای گوناگون، تعیین میزان توان تولیدی و استخراج نیروها و گشتاورهای اعمالی به قطعات مختلف آن می‌پردازد.

سیمولاتور طراحی شده جهت اجرای تست‌های سخت‌افزار-در-حلقه و ایجاد یک بستر تست می‌بایست قادر به اجرای کد FAST بصورت زمان-حقیقی باشد. FAST شامل مجموعه وسیعی از کدهای نوشته شده به زبان فرترن است. این کدها قابلیت کامپایل و اجرا در پلتفرم‌های نرم‌افزاری دیگر نظیر Matlab و LabVIEW را دارند. استفاده از Matlab در پروژه‌های تحقیقاتی و دانشگاهی بسیار متداول است و می‌توان متعددی از استفاده

از این پلتفرم جهت اجرای کد FAST مشاهده کرد. مشکل اصلی اجرای FAST در Matlab این است که قابلیت اجرای این کد بصورت زمان-حقیقی در بستر SLRT که بستر اجرای زمان-حقیقی کدهای Matlab است وجود ندارد. در این خصوص تلاش‌های ناموفق زیادی توسط تیم پروژه و متخصصین پژوهشگاه نیرو در پروژه‌های پیشین صورت گرفت و حتی مشاوره با متخصصان شرکت NREL و Matlab هم نتیجه‌بخش نبود. به همین دلیل در این پروژه تصمیم گرفته شد در فاز اول با بررسی پلتفرم‌های مختلف نرم‌افزاری نظیر LabVIEW، MapleSim، DIMOLA و MODELICA، یک پلتفرم جدید برای اجرای زمان-حقیقی این کد انتخاب گردد. در فاز بعدی ضمن طراحی مدل بخش‌های مختلف توربین بادی در پلتفرم نرم‌افزاری منتخب، بستر تست و ارتباطات میان بخش‌های مختلف آن طراحی شده و شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی اجرا می‌گردد.

در فاز سوم پروژه، به طراحی یک رابط کاربری جامع برای شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی پرداخته شد. این کار شامل طراحی صفحاتی به منظور دریافت اطلاعات مورد نیاز برای تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی از کاربر، نمایش لحظه‌ای نتایج شبیه‌سازی بر روی پنل کاربری و فراهم کردن امکاناتی برای تحلیل و پردازش آسان نتایج می‌باشد. فاز چهارم پروژه، به عنوان فاز نهایی به ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌ساز می‌پردازد. در این فاز با اجرای آزمایشات مختلف، درستی اجرای شبیه‌سازی بررسی می‌گردد.

این پروژه با مدیریت و اجرای آقای مهندس /مید/بناز انجام شد. ایده اولیه تعریف و اجرای پروژه با همفکری همکار ارجمند جناب آقای مهندس علی پوره و طی تجربیات قبلی در همکاری مشترک با ایشان در پروژه مربوط به طراحی سیستم کنترل توربین بادی ملی، شکل گرفت و مطرح شد و در طول اجرای پروژه از نظرات ایشان بهره گرفته شد.

نظارت پروژه در فازهای اول و دوم توسط جناب آقای دکتر علیرضا فاتحی و با راهنمایی‌های ارزنده ایشان صورت گرفت. در ادامه جناب آقای مهندس مجتبی طباطبائی‌ان نظارت پروژه را برعهده گرفته و فازهای سوم و چهارم و همچنین تهیه و تنظیم گزارش نهایی تحت راهنمایی‌های ایشان به انجام رسید. همچنین سرکار خانم مهندس پگاه رخ‌فرور در فاز مطالعات اولیه شبیه‌سازها و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و آقایان مهندس مجتبی غیبی و مهندس فرید قهرمانی در پیاده‌سازی کدها و اجرای زمان-حقیقی پروسه شبیه‌سازی در پروژه همکاری داشته و کمک شایانی در پیشرفت پروژه و رفع چالش‌های اصلی پیش رو داشتند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- مطالعات مقدماتی و طراحی ساختار نرم‌افزاری و سخت‌افزاری شبیه‌ساز توربین بادی	۴
۱-۱- مقدمه	۴
۱-۲- شبیه‌سازی زمان-حقیقی و چالش‌های آن	۵
۱-۲-۱- شبیه‌ساز زمان-حقیقی	۶
۱-۲-۲- انواع روش‌های شبیه‌سازی	۱۱
شبیه‌سازی مدل در حلقه	۱۱
پردازشگر	۱۱
۱-۲-۳- ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شبیه‌سازهای زمان-حقیقی	۱۳
ساختار سخت‌افزاری	۱۴
۱-۲-۴- مقایسه انواع شبیه‌سازهای زمان-حقیقی مرسوم	۲۵
۱-۳- شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی	۲۷
۱-۳-۱- مدل‌سازی توربین بادی	۲۷
۱-۳-۲- مروری بر فعالیت‌های انجام گرفته در شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی	۳۷
۱-۳-۳- ساختار نرم‌افزاری شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی	۳۸
۱-۳-۴- ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز	۳۹
۱-۴- مدل‌سازی توربین بادی در نرم‌افزار LabVIEW	۴۱
۱-۴-۱- بخش مقداردهی اولیه	۴۱
۱-۴-۲- بخش اجرای مدل دینامیکی توربین بادی	۴۲
۱-۴-۳- بخش اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال	۴۳
۱-۴-۴- بخش سوپروایزری و مدیریت رخدادها	۴۴
۱-۴-۵- بخش زیرسیستم کنترل	۴۴
۱-۴-۶- بخش عملگرها و زیرسیستم الکتریکی	۴۵
۱-۴-۷- شبیه‌سازی غیر زمان-حقیقی و ارزیابی پاسخ	۴۶
۱-۵- نتیجه‌گیری	۵۱
۱-۶- مراجع	۵۲
۲- شبیه‌سازی زمان-حقیقی و طراحی پروسه سخت‌افزار در حلقه	۵۶
۲-۱- مقدمه	۵۶
۲-۲- کامپایل کد FAST جهت اجرا بصورت زمان-حقیقی در LabVIEW	۵۷
۲-۲-۱- الزامات سیستم مورد نیاز برای کامپایل	۵۷
۲-۲-۲- روش‌های کامپایل	۵۹
۲-۳- ساختار بندی کامپیوترهای هدف برای اجرای زمان-حقیقی	۶۶
۲-۳-۱- کامپیوتر هدف LabVIEW-RT	۶۷
۲-۳-۲- کامپیوتر هدف SLRT	۷۵
۲-۳-۳- ساختار برنامه توسعه داده شده برای اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی توربین بادی	۹۹
۲-۴- پیاده‌سازی سیستم کنترل بر روی PLC و راه‌اندازی آن در حلقه شبیه‌ساز	۱۱۹
۲-۴-۱- شرکت Beckhoff و نرم‌افزار TwinCAT	۱۱۹

۱۲۴.....	۲-۴-۲- ساختار لاجیک کنترلی در PLC
۱۲۵.....	۲-۴-۳- راه‌اندازی ارتباط سریال
۱۳۴.....	۲-۵- نتیجه‌گیری
۱۳۵.....	پیوست‌ها
۱۳۵.....	پیوست الف- سخت‌افزار مورد پشتیبانی در نسخه‌های مختلف ماژول زمان-حقیقی نرم‌افزار LabVIEW
۱۳۷.....	پیوست ب- برنامه‌های مورد نیاز برای کامپایل کد FAST
۱۴۴.....	۲-۶- مراجع
۱۴۶.....	۳- طراحی رابط گرافیکی
۱۴۶.....	۳-۱- مقدمه
۱۴۷.....	۳-۲- راه‌اندازی برنامه شبیه‌ساز
۱۴۷.....	۳-۲-۱- راه‌اندازی و اجرای شبیه‌ساز
۱۵۰.....	۳-۲-۲- تنظیمات اجرا
۱۵۲.....	۳-۲-۳- صفحه نمایش عملکرد
۱۵۲.....	۳-۲-۴- صفحه رسم گراف بصورت برخط
۱۵۳.....	۳-۲-۵- تحلیل و پردازش نتایج پس از اتمام شبیه‌سازی
۱۵۶.....	۳-۳- تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی
۱۵۶.....	۳-۳-۱- تنظیمات ساختار توربین بادی
۱۵۸.....	۳-۳-۲- تنظیمات سیستم کنترل
۱۶۶.....	۳-۳-۳- تنظیمات سیستم الکتریکی
۱۶۷.....	۳-۳-۴- تنظیمات خطاها
۱۶۹.....	۳-۴- نتیجه‌گیری
۱۷۰.....	۳-۵- مراجع
۱۷۲.....	۴- ارزیابی و صحت‌سنجی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی
۱۷۲.....	۴-۱- مقدمه
۱۷۲.....	۴-۲- ارزیابی ماژول‌های اصلی توسعه داده شده
۱۷۳.....	۴-۲-۱- ارزیابی توابع ریاضی و منطقی
۱۸۰.....	۴-۲-۲- ارزیابی ماژول‌های ارتباطی
۱۸۵.....	۴-۳- شبیه‌سازی توربین‌های بادی معیار
۱۸۵.....	۴-۳-۱- شبیه‌سازی توربین NREL 5MW
۱۹۱.....	۴-۳-۲- شبیه‌سازی توربین CART 2
۱۹۸.....	۴-۳-۳- شبیه‌سازی توربین ۲ مگاوات ملی
۲۰۱.....	۴-۴- نتیجه‌گیری
۲۰۴.....	پیوست‌ها
۲۰۴.....	پیوست الف- محتوی فایل‌های ساختار بندی کد FAST به منظور مدلسازی توربین NREL 5MW
۲۰۴.....	الف- (۱) فایل ورودی اصلی (*.fst)
۲۰۸.....	الف- (۲) فایل ورودی پره - NRELOffshrBslne5MW_Blade.dat
۲۰۹.....	الف- (۳) فایل ورودی برج - NRELOffshrBslne5MW_Tower_Onshore.dat

۲۱۰	الف-۴) فایل ورودی اصلی آیرودینامیک - NRELOffshrBslne5MW_AeroDyn.ipt
۲۱۰	الف-۵) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - Cylinder1.dat
۲۱۱	الف-۶) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - DU40_A17.dat
۲۱۳	الف-۷) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - DU35_A17.dat
۲۱۴	الف-۸) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - DU30_A17.dat
۲۱۶	الف-۹) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - DU25_A17.dat
۲۱۸	الف-۱۰) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - DU21_A17.dat
۲۲۰	الف-۱۱) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - NACA64_A17.dat
۲۲۳	پیوست ب- محتوی فایل‌های ساختار بندی کد FAST به منظور مدلسازی توربین CART2
۲۲۳	ب-۱) محتوی فایل ورودی اصلی FAST (*.fst)
۲۲۶	ب-۲) فایل ورودی پره - CART_Blades.dat
۲۲۷	ب-۳) فایل ورودی برج - CART_Towersoft.dat
۲۲۷	ب-۴) فایل ورودی اصلی آیرودینامیک - AeroDyn01sim.ipt
۲۲۸	ب-۵) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art15.air
۲۲۹	ب-۶) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art25.air
۲۳۰	ب-۷) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art35.air
۲۳۱	ب-۸) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art45.air
۲۳۲	ب-۹) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art55.air
۲۳۳	ب-۱۰) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art65.air
۲۳۳	ب-۱۱) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art75.air
۲۳۴	ب-۱۲) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art85.air
۲۳۵	ب-۱۳) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art85-5.air
۲۳۶	ب-۱۴) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art95.air
۲۳۷	پیوست پ- خروجی‌های دینامیکی کد FAST
۲۳۷	پ-۱) پارامترهای خروجی مربوط به مشخصات باد
۲۳۸	پ-۲) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره ۱
۲۳۹	پ-۳) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره
۲۴۰	پ-۴) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره ۳
۲۴۲	پ-۵) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات گسترده محلی پره ۱
۲۴۲	پ-۶) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچ پره
۲۴۳	پ-۷) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات تیت
۲۴۳	پ-۸) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات شفت
۲۴۴	پ-۹) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات یونیت اندازه‌گیری اینرسی ناسل
۲۴۴	پ-۱۰) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچش روتور
۲۴۴	پ-۱۱) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچش دم
۲۴۵	پ-۱۲) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات یو ناسل
۲۴۵	پ-۱۳) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات بالای برج، بیرینگ یو
۲۴۶	پ-۱۴) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات محلی برج
۲۴۷	پ-۱۵) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پلتفرم
۲۴۹	پ-۱۶) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۱
۲۴۹	پ-۱۷) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۲
۲۵۰	پ-۱۸) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۳

پ-۱۹) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای گستره محلی پره ۱.....	۲۵۰
پ-۲۰) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای روتور و هاب.....	۲۵۱
پ-۲۱) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای کرنش سنج شفت.....	۲۵۲
پ-۲۲) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای HSS و ژنراتور.....	۲۵۲
پ-۲۳) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بیرینگ پیچش روتور.....	۲۵۳
پ-۲۴) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بیرینگ پیچش دم.....	۲۵۳
پ-۲۵) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای آیرودینامیک فین دم.....	۲۵۳
پ-۲۶) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بالای برج، بیرینگ یاو.....	۲۵۴
پ-۲۷) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای پایه برج.....	۲۵۴
پ-۲۸) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای محلی برج.....	۲۵۵
پ-۲۹) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای پلتفرم.....	۲۵۵
۵-۴- مراجع.....	۲۵۷

فهرست شکل‌ها

عنوان.....	صفحه
شکل ۱-۱- شبیه‌سازی بیرون خط.....	۶
شکل ۱-۲- شبیه‌سازی زمان-حقیقی.....	۶
شکل ۱-۳- شبیه‌سازی زمان-حقیقی با وجود زمان تلف شده [7].....	۷
شکل ۱-۴- عملیات انجام گرفته در طول یک گام شبیه‌سازی [14].....	۸
شکل ۱-۵- سرعت مورد نیاز شبیه‌سازی برای کاربردهای گوناگون [1].....	۹
شکل ۱-۶- سیستم یکسوساز.....	۱۰
شکل ۱-۷- ایجاد OVERRUN در شبیه‌سازی.....	۱۰
شکل ۱-۸- شماتیک شبیه‌سازی در حالت پردازشگر در حلقه.....	۱۲
شکل ۱-۹- شماتیک روش CHIL.....	۱۳
شکل ۱-۱۰- شماتیک روش PHIL.....	۱۳
شکل ۱-۱۱- نمونه‌های از ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی نوع A [7].....	۱۵
شکل ۱-۱۲- نمونه‌های از ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی نوع B.....	۱۶
شکل ۱-۱۳- شماتیک شبیه‌سازی زمان-حقیقی توسط MATLAB/SIMULINK.....	۱۸
شکل ۱-۱۴- ارتباط LABVIEW با SIMULINK.....	۱۹
شکل ۱-۱۵- ساختار نرم‌افزار DYMOLA.....	۲۲
شکل ۱-۱۶- شماتیک اجزاء توربین بادی.....	۲۸
شکل ۱-۱۷- شماتیک مدل درایوتربین و عناصر تشکیل دهنده آن.....	۲۹
شکل ۱-۱۸- مدل پره.....	۳۰
شکل ۱-۱۹- مدهای عملکردی FAST.....	۳۴
شکل ۱-۲۰- ورودی‌ها و خروجی‌های کد FAST.....	۳۵
شکل ۱-۲۱- بستر سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی.....	۴۰
شکل ۱-۲۲- بخش مقداردهی اولیه در برنامه شبیه‌ساز توربین بادی.....	۴۲
شکل ۱-۲۳- شماتیک بخش اجرای مدل دینامیکی توربین در نرم‌افزار LABVIEW.....	۴۳
شکل ۱-۲۴- شماتیک زیربرنامه اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال.....	۴۳
شکل ۱-۲۵- شماتیک بخش سوپروایزری و رخدادها در برنامه شبیه‌ساز.....	۴۴
شکل ۱-۲۶- شماتیک زیر سیستم کنترل.....	۴۵
شکل ۱-۲۷- شماتیک بخش عملگرها و زیرسیستم الکتریکی.....	۴۵
شکل ۱-۲۸- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ برابر با 0 درجه و باد با سرعت 11m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار MATLAB و LABVIEW.....	۴۷
شکل ۱-۲۹- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ=5 درجه و باد با سرعت 12m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار MATLAB و LABVIEW.....	۴۸
شکل ۱-۳۰- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ=16 درجه و باد با سرعت 18m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار MATLAB و LABVIEW.....	۴۸
شکل ۱-۳۱- نتایج شبیه‌سازی حلقه بسته در بار جزئی به ازای باد با سرعت 9m/s در دو نرم‌افزار MATLAB و SIMULINK.....	۴۹
شکل ۱-۳۲- نتایج شبیه‌سازی حلقه بسته در بار کامل به ازای باد با سرعت 14m/s در دو نرم‌افزار MATLAB و SIMULINK.....	۵۰
شکل ۲-۱- ساخت یک پروژه جدید در VISUAL STUDIO.....	۶۱
شکل ۲-۲- اضافه کردن فولدر جدید به ساختار پروژه.....	۶۲
شکل ۲-۳- افزودن فایل‌های موجود به پروژه.....	۶۲

شکل ۲-۴- ساختار پروژه FAST.....	۶۳
شکل ۲-۵- پنجره تنظیمات پروژه.....	۶۴
شکل ۲-۶- تنظیمات مرتبط کننده.....	۶۵
شکل ۲-۷- پنجره خروجی کامپایلر و مرتبط کننده.....	۶۶
شکل ۲-۸- شماتیک ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز.....	۶۷
شکل ۲-۱۰- انتخاب CREATE DESKTOP PC UTILITY USB DRIVE.....	۶۹
شکل ۲-۱۱- پیام اخطار پیش از ادامه عملیات فرمت حافظه فلش USB.....	۶۹
شکل ۲-۱۲- پنجره انتخاب نسخه مورد نظر.....	۶۹
شکل ۲-۱۳- پنجره انتخاب حافظه فلش.....	۶۹
شکل ۲-۱۴- پنجره اخطار به کاربر در مورد حذف تمامی فایل‌های حافظه فلش.....	۷۰
شکل ۲-۱۵- پیام عملیات موفق.....	۷۰
شکل ۲-۱۶- منو متنی نرم‌افزار پیکربندی سیستم عامل زمان حقیقی.....	۷۱
شکل ۲-۱۷- گزینه ساختار بندی دیسک سخت.....	۷۲
شکل ۲-۱۸- منو مربوط به انتخاب فایل سیستم.....	۷۲
شکل ۲-۱۹- پیام اخطار قبل از اجرای پارتیشن بندی و فرمت.....	۷۳
شکل ۲-۲۰- پیام نهایی ساختار بندی.....	۷۴
شکل ۲-۲۱- نمایی از نسخه R2011B نرم افزار MATLAB و دستور XPCEPLR.....	۷۶
شکل ۲-۲۲- واسط گرافیکی XPC TARGET در نسخه R2011B نرم افزار MATLAB.....	۷۶
شکل ۲-۲۳- صفحه نمایش کامپیوتر هدف پس از برپا شدن با هسته بلادرنگ XPC TARGET در نسخه R2011B نرم افزار MATLAB.....	۷۷
شکل ۲-۲۴- صفحه نمایش کامپیوتر هدف پس از اجرای یک برنامه در نسخه R2011B نرم افزار MATLAB.....	۷۷
شکل ۲-۲۵- ظاهر واسط گرافیکی XPC TARGET در نسخه R2012B.....	۷۸
شکل ۲-۲۶- صفحه نمایش کامپیوتر هدف در نسخه R2014A.....	۷۸
شکل ۲-۲۷- بخش RELEASE NOTES جعبه ابزار SLRT.....	۷۹
شکل ۲-۲۸- پنجره مرورگر SLRT.....	۸۴
شکل ۲-۲۹- قاب TARGET به همراه پنجره TARGET PROPERTIES در پنجره مرورگر SLRT.....	۸۵
شکل ۲-۳۰- منوی کرکره‌ای TARGETPC1.....	۸۶
شکل ۲-۳۱- تنظیم HOST-TO-TARGET COMMUNICATION.....	۸۷
شکل ۲-۳۲- تنظیم TARGET SETTINGS.....	۸۸
شکل ۲-۳۳- تنظیم BOOT CONFIGURATION.....	۸۹
شکل ۲-۳۴- پنجره انتخاب درایو CD/DVD برای رایت.....	۹۰
شکل ۲-۳۵- پنجره ساخت CD/DVD برپایی.....	۹۰
شکل ۲-۳۶- مدل DFIG آماده شده تنها برای اجرا در SLRT.....	۹۱
شکل ۲-۳۷- تنظیمات پنجره SOLVER مدل DFIG.....	۹۲
شکل ۲-۳۸- تنظیمات پنجره CODE GENERATION مدل DFIG.....	۹۳
شکل ۲-۳۹- تنظیمات پنجره SIMULINK REAL-TIME OPTIONS مدل DFIG.....	۹۳
شکل ۲-۴۰- مدل DFIG تغییر داده شده برای ایجاد ارتباط UDP.....	۹۴
شکل ۲-۴۱- ساختار بلوک INPUT SELECTION.....	۹۴
شکل ۲-۴۲- محتویات بلوک UDP.....	۹۵
شکل ۲-۴۳- تنظیمات بلوک UDP SEND BINARY.....	۹۵
شکل ۲-۴۴- تنظیمات بلوک UDP RECEIVE BINARY.....	۹۶
شکل ۲-۴۵- بلوک فراخوانی و اجرای یک فایل DLL در LABVIEW.....	۱۰۰

- شکل ۳-۲- نمای صفحه "RUN SETTINGS" برای تنظیمات اجرای شبیه‌سازی ۱۵۲
- شکل ۳-۳- صفحه نمایش عملکرد توربین بادی ۱۵۳
- شکل ۳-۴- صفحه رسم گراف بصورت برخط ۱۵۳
- شکل ۳-۵- شمای پنجره برنامه "POST PROCESSING" ۱۵۴
- شکل ۳-۶- رسم گراف یک سیگنال از دو اجرای مختلف ۱۵۵
- شکل ۳-۷- نمایش نمودار FFT سیگنال ۱۵۵
- شکل ۳-۸- صفحه "MAIN PARAMETERS" برای تنظیم پارامترهای اصلی ساختار مکانیکی توربین بادی ۱۵۷
- شکل ۳-۹- صفحه "COMPONENTS CONFIGURATION" برای تنظیم مشخصات اجزاء مختلف توربین بادی ۱۵۷
- شکل ۳-۱۰- ساختار کلی یک سیستم کنترل ۱۵۸
- شکل ۳-۱۱- تنظیمات سیستم کنترل؛ صفحه مربوط به تعریف مشخصات سنسورها ۱۵۹
- شکل ۳-۱۲- منوی کشویی مربوط به سیگنال‌های دینامیکی موجود ۱۵۹
- شکل ۳-۱۳- صفحه "CONDITIONING" مربوط به تنظیمات سیستم شکل‌دهی سیگنال ۱۶۰
- شکل ۳-۱۴- فهرست سیگنال‌های اندازه‌گیری شده ۱۶۰
- شکل ۳-۱۵- نمای صفحه "SUPERVISORY" ۱۶۱
- شکل ۳-۱۶- پارامترهای مورد نیاز برای تعریف یک حالت کاری ۱۶۲
- شکل ۳-۱۷- انتخاب گذر مورد نظر از لیست ۱۶۲
- شکل ۳-۱۸- صفحه "MAIN CONTROL" جهت تنظیمات سیستم کنترل اصلی ۱۶۳
- شکل ۳-۱۹- تنظیمات مربوط به سیستم کنترل در حالت زیربرنامه ۱۶۵
- شکل ۳-۲۰- نمای صفحه "ACTUATORS" برای تنظیم پارامترهای عملگرهای پیچ و یاو ۱۶۶
- شکل ۳-۲۱- صفحه تنظیمات سیستم الکتریکی ۱۶۷
- شکل ۳-۲۲- صفحه FAULTS مربوط به تنظیمات خطاها ۱۶۸
- شکل ۴-۱- محاسبه عددی انتگرال تابع چندجمله‌ای $F(T)$ ۱۷۳
- شکل ۴-۲- نتیجه اعمال تابع مشتق‌گیر بر روی انتگرال تابع $F(T)$ ۱۷۵
- شکل ۴-۳- نتیجه اعمال تابع محدود کننده نرخ ۱۷۵
- شکل ۴-۴- نتایج اعمال تابع تبدیل توسعه داده شده در شبیه‌ساز و در نرم‌افزار MATLAB به یک سیگنال پله واحد ۱۷۶
- شکل ۴-۵- پاسخ اعمال فیلتر پایین گذر ۱۷۶
- شکل ۴-۶- پاسخ اعمال فیلتر NOTCH ۱۷۷
- شکل ۴-۷- پاسخ تبدیل FFT بر روی سیگنال $V(T)$ ۱۷۷
- شکل ۴-۸- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامترهای بایاس و نرخ نمونه‌برداری به ترتیب برابر با ۰.۲ و ۰.۰۵ ۱۷۸
- شکل ۴-۹- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامتر تفکیک‌پذیری برابر با ۰.۲ ۱۷۸
- شکل ۴-۱۰- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامتر دقت اندازه‌گیری برابر با $\Delta=0.1$ ۱۷۹
- شکل ۴-۱۱- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برابر با $T_{DS}=0$ در نظر گرفته شده است ۱۸۰
- شکل ۴-۱۲- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برای گذرهای رو به بالا برابر با $T_{DS}=0.1$ و برای گذرهای رو به پایین برابر با $T_{DS}=0.2$ در نظر گرفته شده است ۱۸۰
- شکل ۴-۱۳- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برای گذر POSL به NEGL برابر با $T_{DS}=0.51$ در نظر گرفته شود ۱۸۰
- شکل ۴-۱۴- ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی ۱۸۱
- شکل ۴-۱۵- اختلاف میان شمارنده ارسالی و شمارنده بازتابی ۱۸۲
- شکل ۴-۱۶- مدت زمان انجام تبادل داده در هر سیکل از اجرا ۱۸۳
- شکل ۴-۱۷- سیگنال سینوسی ارسالی و سیگنال بازگشتی ۱۸۳
- شکل ۴-۱۸- نمای بزرگ شده از سیگنال‌های سینوسی ارسالی و بازگشتی ۱۸۳
- شکل ۴-۱۹- اختلاف شمارنده ارسالی با شمارنده بازتابی در یک ارتباط UDP ۱۸۴
- شکل ۴-۲۰- مقایسه سیگنال سینوسی ارسالی و سیگنال بازتابی ۱۸۵

- شکل ۴-۲۱- صفحه مربوط به تنظیمات سنسورهای اندازه‌گیری در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۸۷
- شکل ۴-۲۲- صفحه مربوط به تنظیمات فیلترهای مورد استفاده در شکل‌دهی سیگنال‌های اندازه‌گیری در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۸۸
- شکل ۴-۲۳- صفحه مربوط به تنظیمات سیستم سوپروایزری در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۸۹
- شکل ۴-۲۴- صفحه مربوط به تنظیمات پارامترهای کنترلرهای پیچ و گشتاور در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۸۹
- شکل ۴-۲۵- نمونه یک فایل باد غیر توربولانسی با سرعت افقی ۱۴ متر بر ثانیه..... ۱۹۰
- شکل ۴-۲۶- مقایسه نتایج حاصل از اجرای شبیه‌ساز با نتایج ارائه شده توسط شرکت NREL..... ۱۹۲
- شکل ۴-۲۷- صفحه تنظیمات سیستم اندازه‌گیری برای شبیه‌سازی توربین CART2..... ۱۹۴
- شکل ۴-۲۸- تنظیمات سیستم شکل‌دهی سیگنال برای شبیه‌سازی توربین CART2..... ۱۹۴
- شکل ۴-۲۹- تنظیمات صفحه سوپروایزری در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۹۵
- شکل ۴-۳۰- صفحه تنظیمات سیستم کنترل اصلی در رابط کاربری شبیه‌ساز..... ۱۹۶
- شکل ۴-۳۱- نتایج شبیه‌سازی توربین CART2 به ازای باد پله و ضرایب مختلف K_P کنترلر (الف) نتیجه شبیه‌سازی توسط شبیه‌ساز حاضر و (ب) نتیجه نشان داده شده در مرجع [۴]..... ۱۹۷
- شکل ۴-۳۲- نتایج شبیه‌سازی توربین CART2 به ازای دو پروفایل باد مختلف با کنترل‌کننده PI به صورت جدول‌بندی بهره. (الف) نتیجه شبیه‌سازی توسط شبیه‌ساز حاضر و (ب) نتیجه نشان داده شده در مرجع [۴]..... ۱۹۸
- شکل ۴-۳۳- انتخاب روش اعمال سیستم کنترل در صفحه تنظیم سیستم کنترل در پنل کاربری..... ۲۰۰
- شکل ۴-۳۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین بادی ۲ مگاواتی ملی در سه حالت: ۱- اجرای غیر زمان-حقیقی در نرم‌افزار MATLAB، ۲- اجرای غیر زمان-حقیقی در شبیه‌ساز توسعه داده شده و ۳- اجرای زمان-حقیقی بصورت کنترل-در-حلقه توسط شبیه‌ساز توسعه داده شده..... ۲۰۲

فهرست جدول‌ها

عنوان.....	صفحه
جدول ۱-۱- مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی	۲۴
جدول ۱-۲- مقایسه شبیه‌سازهای زمان-حقیقی	۲۵
جدول ۱-۳- شبیه‌سازی بخشهای گوناگون توربین بادی.....	۳۹
جدول ۱-۴- مقایسه پاسخ حالت نهایی شبیه‌سازی حلقه باز به ازای مقادیر مختلف باد، زاویه پیچ و گشتاور الکتریکی در دو نرم‌افزار LABVIEW و MATLAB	۴۷
جدول ۲-۱- پیغام نتیجه اجرای فایل دستهای COMPILE_FASTFORLABVIEW_OPTIMIZED.BAT	۶۰
جدول ۲-۲- حداقل سخت‌افزارهای کامپیوتر هدف.....	۸۰
جدول ۲-۳- پروتکل اطلاعات دریافتی از LABVIEW RT	۹۶
جدول ۲-۴- ترتیب DATA در پروتکل اطلاعات دریافتی از LABVIEW RT	۹۷
جدول ۲-۵- پروتکل اطلاعات ارسالی به LABVIEW RT	۹۷
جدول ۲-۶- ترتیب DATA در پروتکل اطلاعات ارسالی به LABVIEW RT	۹۸
جدول ۳-۱- فهرست کلیه فایل‌های توسعه داده شده برای شبیه‌ساز.....	۱۴۷
جدول ۴-۱- مقادیر حل عددی و محاسبه مستقیم انتگرال تابع $F(T)$	۱۷۴
جدول ۴-۲- فهرست فایل‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی توربین بادی NREL 5MW	۱۸۶
جدول ۴-۳- پارامترهای طراحی سیستم کنترل توربین NREL 5MW [۲]	۱۸۷
جدول ۴-۴- مقادیر حالت پایدار متغیرهای مختلف توربین بادی به ازای بادهای ثابت با سرعت ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه.....	۱۹۰
جدول ۴-۵- مقادیر پارامترهای اصلی توربین CART2 [۴].....	۱۹۲
جدول ۴-۶- فایل‌های ورودی کد FAST به منظور مدلسازی توربین بادی CART2	۱۹۳
جدول ۴-۷- فایل‌های ورودی کد FAST جهت مدلسازی توربین بادی ۲ مگاوات ملی	۱۹۸

مقدمه

سیستم کنترل توربین بادی به دلیل ساختار انعطاف‌پذیر پره‌ها و برج در توربین‌های بادی بزرگ و رفتار پیچیده این توربین‌ها در مواجهه با بادهای توربولانسی از پیچیدگی بالایی برخوردار است. وجود این پیچیدگی نیاز به تعریف و اجرای پروسه‌های تست عملکرد را در بستری دقیق و قابل اعتماد ایجاد می‌کند. در این گزارش با بررسی پلتفرم‌های مختلف نرم‌افزاری و ویژگی‌های مورد نیاز یک بستر تست، به طراحی یک ساختار سخت‌افزاری کاربردی و یک نرم‌افزار شبیه‌سازی توربین‌های بادی با قابلیت اجرای زمان-حقیقی کدهای نرم‌افزاری پرداخته می‌شود.

برنامه شبیه‌ساز توربین بادی در یک بستر نرم‌افزاری با قابلیت اجرای کد FAST به صورت زمان-حقیقی و با انعطاف‌پذیری بالا در برقراری ارتباطات با سخت‌افزارهای مختلف، و دارای بستر گرافیکی مناسب، نوشته می‌شود. بلوک‌های اساسی تشکیل دهنده این شبیه‌ساز بطور کلی شامل موارد زیر می‌گردد که در فصل اول از گزارش به تفصیل تشریح می‌گردد.

بلوک مکانیک حرکت توربین بادی

این بلوک با دریافت پارامترهای فیزیکی پره، برج و فونداسیون، با حل معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت توربین، مقادیر لحظه‌ای متغیرهای مختلف را در اختیار قرار می‌دهد. میزان پیچیدگی و دقت معادلات حرکت با تعیین درجات آزادی و مدهای مختلف انعطاف‌پذیری قابل تعیین است. شاکله اصلی این بلوک بر مبنای کد FAST استوار است. این کد که دارای تأییدیه "محاسبه بار توربین‌های بادی روی-خشکی برای طراحی و صدور گواهی‌نامه" از مؤسسه GL می‌باشد، توسط شرکت NREL بصورت منبع باز توسعه داده شده است و بسیاری از سازندگان توربین‌های بادی در آمریکا از آن به عنوان مرجعی برای تعیین بارهای مکانیکی، در طراحی‌های خود بهره برده‌اند. کد FAST بصورت مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده به زبان فرترن است که پس از کامپایل در یکی از دو مد شبیه‌سازی و خطی‌سازی قابل اجرا است.

ورودی‌های FAST در واقع شامل مشخصات المان‌های مختلف مکانیکی و همچنین تنظیمات اجرای کد FAST از قبیل مشخصات مد عملکردی، شرایط اولیه، پروفایل باد و تعریف درجات آزادی مورد نظر می‌باشد. پروفایل‌های مختلف باد، بصورت آفلاین توسط نرم‌افزار TurbSim که توسط شرکت NREL توسعه داده شده است، به ازای مشخصات مختلف باد از قبیل مقدار میانگین، اندازه توربولانس و پارامترهای تصادفی، ساخته شده و در کد FAST(AeroDyn) صدا زده می‌شود. خروجی‌های این بلوک نیز شامل متغیرهای مختلف مکانیکی توربین از قبیل نیروها و گشتاورهای اعمالی به نقاط گوناگون سازه و سرعت‌ها و گشتاورهای لحظه‌ای در قطعات مختلف پره، برج و ناسل می‌باشد.

لازم به ذکر است که کدهای متعددی برای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد توربین و تعیین بارهای سازه‌ای توسط شرکت‌های مختلف نوشته شده‌اند که از شاخص‌ترین آنها می‌توان به نرم‌افزار BLADED از شرکت Garrad Hassan، نرم‌افزار DHAT از شرکت GL، نرم‌افزار ALASKA از شرکت NORDEX، کد FLEX5 از DTU و کد HAWC از RISO اشاره کرد. این کدها عموماً تجاری بوده و یا اینکه فاقد تأییدیه معتبر می‌باشند. به این ترتیب، کد FAST علاوه بر اعتبار، به علت منبع-باز بودن و در دسترس بودن ماژول‌های آن براحتی قابل ارتقا و هدفمندسازی می‌باشد.

بلوک زیرسیستم الکتریکی

در این بلوک رفتار سیستم الکتریکی توربین بادی با ژنراتور DFIG و مبدل پشت-به-پشت در حالت کارکرد عادی و در حضور خطاهای مختلف شبکه نظیر افت ولتاژ، اتصال کوتاه و مدار باز مدل می‌شود. برای مدل جزئی ژنراتور در صورت وجود از بلوک موجود در بستر نرم‌افزاری مورد استفاده (نرم‌افزار LabVIEW و یا

(MATLAB) و یا بصورت مستقیم از معادلات دینامیک ولتاژ و جریان استفاده خواهد شد. هر یک از مدل‌های سمت شبکه و سمت روتور نیز به صورت یک سوئیچ IGBT در نظر گرفته و کنترل مربوط به آنها برای ساخت سیگنال PWM از روش کنترل برداری FOC استفاده می‌کند.

بلوک سیستم کنترل

- سیستم کنترل شامل سه زیر سیستم کنترل پیچ، کنترل یاو و کنترل گشتاور الکتریکی می‌باشد.
- سیستم کنترل پیچ از ساختار PID و بصورت جدول‌بندی بهره‌بردار است. این سیستم خطای سرعت ژنراتور را به عنوان ورودی دریافت کرده و اندازه زوایای پیچ پره‌ها را در خروجی تعیین می‌کند.
- سیستم کنترل یاو از یک کنترل on-off بهره‌می‌برد و نرخ تغییرات زاویه یاو را برای جبران خطای یاو در خروجی تعیین می‌کند.
- کنترل گشتاور می‌تواند بصورت یک جدول جستجو شامل داده‌های منحنی گشتاور-سرعت تعریف شود و یا توسط روابط ریاضی و بصورت بهینه مدل گردد. این کنترلر بصورت حلقه-باز بر اساس اندازه سرعت ژنراتور، گشتاور مورد نیاز را در خروجی تعیین می‌کند.

بلوک عملگر پیچ و یاو

زیرسیستم پیچ شامل موتور و درایو مربوط به آن برای هر یک از پره‌ها می‌باشد. این بلوک با دریافت مقدار مطلوب زاویه پیچ از کنترلر پیچ و یا سیستم سوپروایزری، با در نظر گرفتن پارامترهای اصطکاک و ممان پره، محدودیت‌های سرعت و شتاب زاویه‌ای و محدودیت ماکزیمم گشتاور قابل اعمال، مقدار لحظه‌ای زاویه پیچ پره را مشخص می‌کند. همچنین خطاهای پره شامل خطای چرخش آزاد و یا خطای گیرکردن پره بر روی یک زاویه خاص، نیز در این بلوک مدل می‌شوند. مقدار زاویه پیچ حاصل شده در این بلوک، برای محاسبه نیروها و گشتاورهای اعمالی به توربین در کد FAST به کار می‌رود.

زیر سیستم یاو نیز شامل موتور و درایو آن می‌باشد. این زیرسیستم فرامین یاو را بصورت نرخ زاویه یاو از کنترلر یاو دریافت کرده و با چرخاندن ناسل توربین با نرخ مرجع در نهایت موجب همراهی روتور با باد می‌گردد. دینامیک یاو به علت کندی این سیستم، با یک تابع تبدیل مرتبه اول قابل مدل‌سازی است.

بلوک سوپروایزری

سیستم توربین بادی بسته به شرایط مختلف کاری، در مدهای عملکردی متفاوتی قرار می‌گیرد. این مدها شامل مد آماده به کار، مد انتظار، مد تولید توان و مد خاموشی نرمال و اضطراری می‌باشد. سیستم سوپروایزری با رصد شرایط توربین از قبیل سرعت و شتاب روتور، گشتاور و توان ژنراتور، شتاب‌های برج، سرعت باد و سایر مقادیر مورد نیاز، مد کاری توربین را مشخص می‌کند. این بلوک این امکان را به کاربر می‌دهد تا با انتخاب شرایط ورود و خروج به هر یک از مدهای کاری، عملیات مورد نظر شامل مقداردهی سیگنال‌های مرجع و یا اعمال ترمز و خاموشی را برنامه‌ریزی کند.

بلوک مانیتورینگ و شکل دهی سیگنال

در این بلوک خروجی‌های مورد نظر با نرخ دلخواه نمونه‌گیری شده و نمایش داده می‌شود. همچنین فیلترهای مختلف پایین‌گذر، میان‌گذر و فیلتر ناچ نیز با اطلاعات فرکانسی مطلوب قابل اعمال بر روی هر یک از خروجی‌ها می‌باشد.

بلوک وقایع و خطاها

در این بلوک رخداد خطاهای مختلف مکانیکی و الکتریکی مورد نیاز برای آنالیز رفتار و محاسبات بار توربین‌های بادی است، طرح ریزی و اعمال می‌گردد.

همانطور که گفته شد، اجرای زمان-حقیقی کدهای شبیه‌سازی، یکی از ملزومات اصلی بستر تست با قابلیت اجرای تست‌های سخت‌افزار-در-حلقه است. پس از طراحی مدل بخش‌های مختلف توربین بادی در پلتفرم نرم‌افزاری پایه شبیه‌ساز در فصل اول، در فصل دوم به طراحی بستر تست و ایجاد ارتباطات داده‌ای میان بخش‌های مختلف آن و در نهایت اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

با توجه به مازول‌های متعدد مورد نیاز در ساختار شبیه‌ساز توربین بادی و گستره وسیع از پارامترهای قابل تنظیم و همچنین وجود سیگنال‌های مکانیکی و الکتریکی مختلف حاصل از حل معادلات دینامیکی و آیرودینامیکی بخش‌های مختلف، وجود یک رابط کاربری گرافیکی جامع با قابلیت دریافت اطلاعات از کاربر و نمایش و ذخیره داده‌های شبیه‌سازی به همراه ایجاد امکانات پردازش و تحلیل این داده‌ها ضروری است. طراحی این رابط گرافیکی و توصیف نحوه مدلسازی، تنظیم پارامترها و اجرا و ذخیره‌سازی نتایج در فصل سوم تشریح می‌گردد.

در نهایت در فصل چهارم گزارش، روند ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد شبیه‌ساز از طریق پیاده‌سازی مدل توربین‌های مختلف معیار نظیر CART و NREL5MW و شبیه‌سازی و مقایسه نتایج با مراجع معتبر بیان می‌گردد.

۱- مطالعات مقدماتی و طراحی ساختار نرم‌افزاری و سخت‌افزاری شبیه‌ساز توربین بادی

۱-۱- مقدمه

از قرن بیستم، ابزارهای شبیه‌سازی برای طراحی و کنترل سیستم‌های الکتریکی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفتند. با پیشرفت تکنولوژی در محاسبات، ابزارهای شبیه‌سازی نیز توسعه یافتند و اکنون توانایی حل مسائل پیچیده را در زمانی کوتاه دارند. ارزیابی یک فرآیند شامل مراحل شبیه‌سازی مدل در حلقه^۱، نرم‌افزار در حلقه^۲، پردازشگر در حلقه^۳ و سخت‌افزار در حلقه^۴ است. در شبیه‌سازی مدل در حلقه، مدل سیستم و تمامی زیر سیستم‌های موجود و ارتباطات آن‌ها تا حد ممکن بر روی یک محیط شبیه‌سازی ایجاد می‌شود. در شبیه‌سازهای نرم‌افزار در حلقه و پردازشگر در حلقه، کنترل‌کننده به فرمت استاندارد قابل پیاده‌سازی نهایی (کد C و ...) تبدیل شده و در کنار مدل سیستم در یک PC (نرم‌افزار در حلقه) و یا در یک پلتفرم مستقل (پردازشگر در حلقه) اجرا می‌گردد. در نهایت در شبیه‌ساز سخت‌افزار در حلقه، شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی اجرا شده و تمامی ارتباطات میان کنترل‌کننده و مدل (در صورت امکان سنسورها و عملگرها) به صورت واقعی برقرار می‌گردد [2].

شبیه‌سازی زمان-حقیقی ابزاری کم هزینه و ایمن است که برای تست کنترل‌کننده و سیستم‌های حفاظتی در سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه، به صورت زمان-حقیقی اجرا می‌شود و تمامی ارتباطات میان کنترل‌کننده و مدل به صورت واقعی برقرار می‌گردد. نرم‌افزارهای گوناگونی نظیر Labview، Matlab/Simulink، Maplesim، Dymola و ... از قابلیت اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی برخوردارند، که هر یک دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشند.

با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از توربین بادی به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر، به سرعت روبه گسترش است. ابعاد توربین‌های بادی و پیچیدگی این سیستم‌ها نیز افزایش یافته‌اند. در نتیجه نیاز روزافزونی به استفاده از سیستم‌های سوپروایزری و کنترلی با ساختاری پیچیده و کارایی بالا ایجاد شده است که باید در بستری مطمئن و ایمن مورد ارزیابی قرار گیرند. برای این منظور استفاده از شبیه‌سازهای زمان-حقیقی مناسب اجتناب ناپذیر است.

یک توربین بادی از بخش‌های مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده است. بخش مکانیکی شامل پره، برج، درایوترین و فونداسیون^۵ است و بخش الکتریکی از ژنراتور و مبدل آن تشکیل شده است. برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی، ابتدا باید مدل‌سازی توربین بادی با دقت صورت گیرد. کدهای گوناگونی نظیر کد Fast توسط شرکت NREL، کد ADAMS از شرکت MSC، نرم‌افزار BLADED از شرکت Garrad Hassan، نرم‌افزار DHAT از شرکت GL، نرم‌افزار ALASKA از شرکت NORDEX، کد HAWC از RISO و کد FLEX5 از شرکت DTU برای مدل‌سازی بخش مکانیکی توربین بادی به وجود آمده‌اند. در این میان، کد FAST به علت منبع باز بودن و همچنین داشتن تأییدیه معتبر برای استفاده در طراحی‌های سیستم کنترل و محاسبات

¹ Model in the loop (MIL)

² Software in the loop (SIL)

³ Processor in the loop (PIL)

⁴ Hardware in the loop (HIL)

⁵ foundation

بارهای سازه‌ای، با مدل کردن تمام جنبه‌های آیرودینامیک و مکانیکی سیستم، از اعتبار بالایی برخوردار است [4]. بخش الکتریکی به صورت جداگانه مدل می‌گردد و برای شبیه‌سازی آن از نرم‌افزارهای قدرت مانند Digsilent، Simpower و ... می‌توان استفاده نمود. در میان این نرم‌افزارها، Simpower که یک ابزار در محیط سیمولینک نرم‌افزار Matlab است، شامل بسیاری از اجزایی که در سیستم‌های قدرت به کار می‌روند نظیر ماشین‌های الکتریکی سه فاز، درایوهای الکتریکی، مبدل‌های الکتریکی و ... می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار دارای ابزارهایی برای آنالیز سیستم‌های قدرت، آنالیز هارمونیک، محاسبه جریان بار و ... می‌باشد [5]. در این پروژه برای مدل‌سازی بخش الکتریکی از Simpower که دارای اجزای کتابخانه‌ای بیشتر و ابزار آنالیز کامل‌تر نسبت به دیگر نرم‌افزارهای قدرت است، استفاده می‌شود.

پس از مدل‌سازی باید نرم‌افزار شبیه‌سازی مناسب انتخاب گردد تا کد FAST و بخش الکتریکی را به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی کند، همچنین بتواند پروتکل‌های تبادل داده موردنظر را پشتیبانی کرده و ارتباط گرافیکی مناسبی با کاربر ایجاد نماید.

در این فصل در بخش اول، ابتدا مفاهیم شبیه‌سازی زمان-حقیقی، اجزای مورد نیاز و عملیاتی که باید صورت گیرد، بیان می‌شود. سپس به چالش‌های این شبیه‌سازی پرداخته و مشکلات آن در شبیه‌سازی سیستم-های الکتریکی شرح داده می‌شود. در ادامه به ویژگی‌ها و کاربردهای چند نرم‌افزار شناخته شده در زمینه شبیه‌سازی زمان-حقیقی نظیر، Labview، Matlab/Simuink، Maplesim و Dymola پرداخته می‌شود. همچنین توضیحی درباره ابزارهای شبیه‌سازی زمان-حقیقی نظیر RTLAB، ARTEMIS و RT-Event که می‌توانند مدل‌های Simpower در نرم‌افزار Matlab/Simulink را به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی کنند، داده می‌شود. سپس مقایسه‌ای بین این نرم‌افزارهای شبیه‌سازی از لحاظ زبان برنامه‌نویسی، ارتباط گرافیکی با کاربر، ارتباط با نرم‌افزارهای دیگر و ... انجام می‌گیرد. در بخش بعد، مرور کوتاهی بر مدل‌سازی توربین‌های بادی صورت می‌گیرد، سپس نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مناسب برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی قسمت‌های گوناگون توربین بادی که شامل کد FAST و بخش الکتریکی می‌باشد، انتخاب می‌گردند. در بخش آخر به نحوه پیاده‌سازی مدل‌های بخش‌های مختلف توربین در نرم‌افزار LabVIEW پرداخته می‌شود و در نهایت با اجرای شبیه‌سازی بر روی یک توربین نمونه پاسخ‌های آن در حالات مختلف ارزیابی می‌گردد.

۲-۱- شبیه‌سازی زمان-حقیقی و چالش‌های آن

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، سیستم‌های مورد استفاده بشر از ساختار پیچیده‌تر با پارامترهای فراوان و بعضاً نامعین و غیر قابل شناسایی دقیق برخوردارند. پیش‌بینی رفتار این سیستم‌ها که عموماً از ورودی‌های متعددی تأثیر می‌پذیرند تحت عوامل محیطی و شرایط کاری مختلف براحتی ممکن نیست. از این رو اطمینان از صحت عملکرد یک سیستم قبل از راه‌اندازی آن خصوصاً برای مهندسین کنترل اهمیت بالایی دارد. استفاده از شبیه‌ساز، یک ابزار مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم‌ها در شرایط مختلف است. شبیه‌ساز با مدل کردن بخش‌های مختلف یک سیستم و روابط میان این بخش‌ها بصورت نرم‌افزاری، محیطی را فراهم می‌آورد تا به دور از خطرات فیزیکی و هزینه‌های مالی بتوان به آزمایش سیستم و بررسی رفتار آن در شرایط مختلف پرداخت.

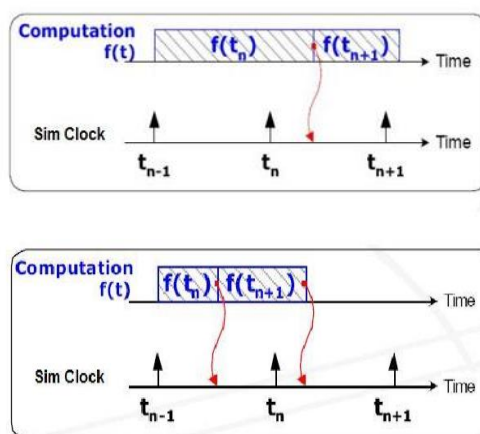
با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها، انجام شبیه‌سازی نه تنها یکی از مراحل اجتناب‌ناپذیر پروسه طراحی محسوب می‌شود بلکه پروسه شبیه‌سازی خود به بخش‌های مختلفی نظیر شبیه‌سازی مدل-در-حلقه، شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه، شبیه‌سازی پرسور در حلقه و شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه تقسیم می‌گردد که هر بخش در بازه‌ای از پروسه طراحی انجام می‌گیرد. همچنین بسته به نحوه گردش اطلاعات و مدت زمان بکار رفته برای محاسبات و تغییر حالات سیستم در یک گام زمانی از اجرای شبیه‌سازی، شبیه‌سازی به دو نوع زمان-حقیقی و غیر زمان-حقیقی تقسیم می‌شود. در شبیه‌سازی زمان-حقیقی که در ادامه مفصل‌تر بحث خواهد شد، حل معادلات و

به روزرسانی حالات سیستم از نظر زمانی دقیقاً مشابه با زمان واقعی سپری شده خواهد بود. بنابراین تقدم و تأخر ارسال و دریافت اطلاعات میان قسمت‌های مختلف یک سیستم نظیر عملگرها، سنسورها، سیستم کنترل و مدل پلنت اصلی بطور دقیق در نظر گرفته می‌شود.

در این فصل ابتدا به مفاهیم شبیه‌سازی زمان-حقیقی پرداخته شده و کاربردها و دلایل استفاده از آن بیان می‌گردد و مراحل انجام یک شبیه‌سازی زمان-حقیقی شرح داده می‌شود. در ادامه به چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی اشاره می‌گردد. سپس نرم‌افزارهای مرسوم در زمینه شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نرم‌افزار مناسب با توجه به خصوصیات شبیه‌سازی مورد نظر انتخاب می‌گردد.

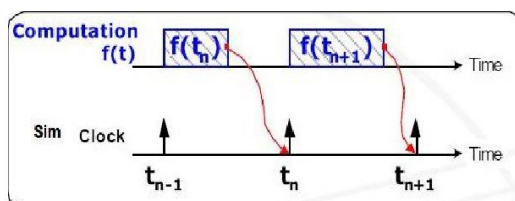
۱-۲-۱- شبیه‌ساز زمان-حقیقی

شبیه‌سازی زمان-حقیقی بطور کلی عبارت است از اجرای مدل کامپیوتری یک سیستم فیزیکی در زمانی برابر با زمان واقعی. در شبیه‌سازی زمان-حقیقی، شبیه‌ساز باید در مدت زمانی که از قبل تعیین می‌شود و به عنوان گام زمانی معرفی می‌گردد، ورودی‌ها را بخواند و محاسبات لازم را انجام دهد. در صورتی که بازه زمان شبیه‌سازی کمتر یا بیشتر از مقدار زمان-حقیقی مورد نیاز برای محاسبه توابع باشد (شکل ۱-۱)، شبیه‌ساز را بیرون خط^۶ می‌گویند [6].



شکل ۱-۱- شبیه‌سازی بیرون خط

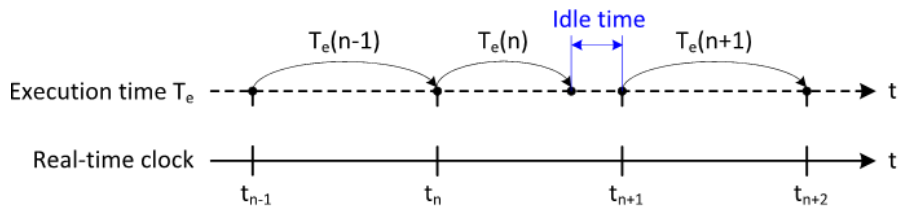
شکل ۱-۲ حالتی را نشان می‌دهد که شبیه‌ساز در طول گام زمانی محاسبات را انجام می‌دهد، در این حالت شبیه‌ساز، زمان-حقیقی است.



شکل ۱-۲- شبیه‌سازی زمان-حقیقی

⁶ offline

اگر بازه زمانی مورد نیاز برای انجام محاسبات کمتر از طول گام زمانی در نظر گرفته شده باشد، در صورتی شبیه‌ساز زمان-حقیقی است که تا شروع گام بعدی صبر کند و محاسبات را انجام ندهد. به این مدت زمانی که شبیه‌ساز برای شروع گام بعدی منتظر می‌ماند، زمان بی‌کاری^۷ گفته می‌شود (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- شبیه‌سازی زمان-حقیقی با وجود زمان تلف شده [7]

کاربردهای شبیه‌ساز زمان-حقیقی

شبیه‌سازهای زمان-حقیقی به علت توانایی در مدل کردن دقیق رفتار سیستم‌ها در بستری نرم‌افزاری و آزمایشگاهی، از کاربرد وسیعی در صنایع مختلف نظیر هوا فضا، رباتیک، سیستم‌های تولید نیرو، رایوهای الکتریکی، و برخوردارند. این کاربردها را می‌توان در دو دسته ۱- طراحی، تست و ارزیابی و ۲- آموزش جای داد.

• طراحی و تست دستگاه‌های جدید

به دلیل افزایش پیچیدگی سیستم‌های جدید، نیاز برای شبیه‌سازی آن‌ها به صورت زمان-حقیقی رو به افزایش است تا بدین وسیله عوامل مختلف ایجاد عیب در سیستم، در شرایط گوناگون، تعیین گردند. همچنین کنترل‌کننده‌ها می‌توانند در شبیه‌ساز زمان-حقیقی پیاده‌سازی گردند و یا از شبیه‌ساز برای تست کنترل‌کننده سخت‌افزاری استفاده شود. در این حالت‌ها نیازی به استفاده از سیستم واقعی برای تست عملکرد کنترل‌کننده نمی‌باشد که در نتیجه باعث کاهش هزینه و کاهش آسیب به سیستم‌ها می‌شود.

• آموزش

از شبیه‌ساز زمان-حقیقی در صنایع مختلف برای آموزش اپراتورها استفاده می‌شود، تا توسط شبیه‌سازی با عملکرد دستگاه و شرایط ایجاد اغتشاش آگاهی یابند [1]، [11-12].

انواع حل‌کننده‌های^۸ مورد استفاده در شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در یک فضای گسسته-زمان صورت می‌گیرد. بطور کلی برای حل عددی معادلات از دو تکنیک می‌توان استفاده نمود: ۱- حل با گام ثابت و ۲- حل با گام متغیر. حل‌کننده‌های با گام ثابت در کل زمان شبیه‌سازی از یک گام زمانی ثابت برای انجام محاسبات مانند حل معادلات استفاده می‌کنند. در طول این گام یک سیکل از کلیه فرآیندهای موجود در شبیه‌سازی اجرا شده و مقادیر متغیرها به روزرسانی می‌گردد. تعیین طول گام بهینه از مسائلی است که در این نوع حل‌کننده‌ها اهمیت دارد چرا که به منظور اطمینان از همگرایی حل معادلات باید طول گام به اندازه کافی کوچک انتخاب شود اما از طرفی طول گام باید به اندازه کافی بزرگ باشد که بتوان کلیه محاسبات و عملیات یک سیکل از اجرای شبیه‌سازی را در این بازه زمانی انجام داد. عموماً در نظر گرفتن ۵ تا ۱۰ برابر بیشترین فرکانس تغییرات کلیه سیگنال‌های درون یک سیستم به عنوان فرکانس حل معادلات مناسب می‌باشد. در شبیه‌سازی زمان-حقیقی معمولاً روش گام ثابت به علت پیچیدگی‌های کمتر و قابلیت مدیریت آسانتر عملیات برای انجام محاسبات به کار گرفته می‌شود.

⁷ Idle time

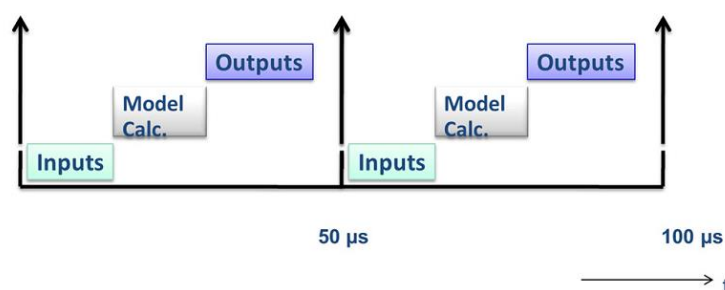
⁸ Solver

در حل کننده‌های با گام متغیر، گام زمانی حل معادلات بسته به میزان همگرایی الگوریتم حل عددی معادلات متغیر است. به عبارت دیگر در هر گام حل کننده آنقدر منتظر می‌ماند و تکرار را ادامه می‌دهد تا شاخص همگرایی از یک حد معین کمتر شود. این تکنیک موجب افزایش دقت حل معادلات می‌شود و چالش انتخاب ثابت زمانی در حل کننده‌های با گام ثابت را مرتفع می‌کند. اما هرچند در حل معادلات با پیچیدگی پایین می‌تواند سرعت حل را بطور محسوسی بالا ببرد اما در حل معادلات پیچیده در شرایط خاص می‌تواند برای رسیدن به دقت تعیین شده سرعت را کاهش دهد. به این ترتیب این روش حل برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی کمتر استفاده می‌شود اما در مواردی با بکارگیری الگوریتم‌های پیچیده می‌توان از این روش نیز در شبیه‌سازی زمان-حقیقی بهره برد.

عملیات انجام شده در طول یک گام شبیه‌سازی

یک گام زمانی اجرای شبیه‌سازی، شامل انجام عملیات مختلفی از جمله خواندن ورودی‌ها، حل معادلات مدل، تبادل نتایج با نودهای دیگر شبیه‌سازی، تولید خروجی و انتظار برای شروع گام بعدی می‌باشد. ترتیب و صحت انجام این عملیات بسیار اهمیت دارد و چنانچه انجام هر یک از این عملیات با اختلال صورت گیرد، نتیجه کل گام نادرست می‌باشد. این عملیات در ادامه شرح داده شده‌اند.

۱. **خواندن ورودی‌ها:** در مرحله اول از اجرای یک گام، مقادیر متغیرهایی نظیر اندازه‌گیری‌ها و اغتشاشات که از خارج از شبیه‌سازی تأثیر می‌پذیرد مقداردهی می‌گردد.
 ۲. **حل معادلات مدل:** پس از مقداردهی متغیرهای ورودی و تخصیص مقادیر اولیه از گام زمانی قبل، معادلات مدل توسط یک الگوریتم عددی مناسب حل می‌شود. حل معادلات مقادیر متغیرهای مدل را برای زمان $t_0 + dt$ مشخص می‌کند که در آن dt طول گام زمانی می‌باشد.
 ۳. **تبادل نتایج با نودهای دیگر شبیه‌سازی:** یک شبیه‌سازی می‌تواند شامل چندین مدل با معادلات مختلف باشد که از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند. پس از حل معادلات یک مدل و بدست آمدن مقادیر جدید متغیرهای آن، این مقادیر برای استفاده در حل معادلات مدل‌های دیگر به این مدل‌ها انتقال می‌یابند.
 ۴. **تولید خروجی:** در نهایت با حل معادلات تمامی مدل‌ها و مقدار دهی کلیه متغیرها، مقادیر خروجی بر روی بافر خروجی نوشته می‌شود. این مقادیر می‌توانند برای نمایش و یا فرماندهی به یک عملگر استفاده شوند.
 ۵. **انتظار برای شروع گام بعدی:** عموماً گام زمانی به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که کلیه عملیات بالا بتواند در تمامی شرایط در طول یک گام انجام گیرد. در زمان باقی‌مانده از گام، مقادیر متغیرها حفظ شده و در شروع گام بعد این مقادیر به عنوان مقادیر لحظه شروع گام مورد استفاده قرار می‌گیرد [14].
- در شکل ۴-۱ این عملیات برای یک گام زمانی ۵۰ میکرو ثانیه نشان داده شده است.



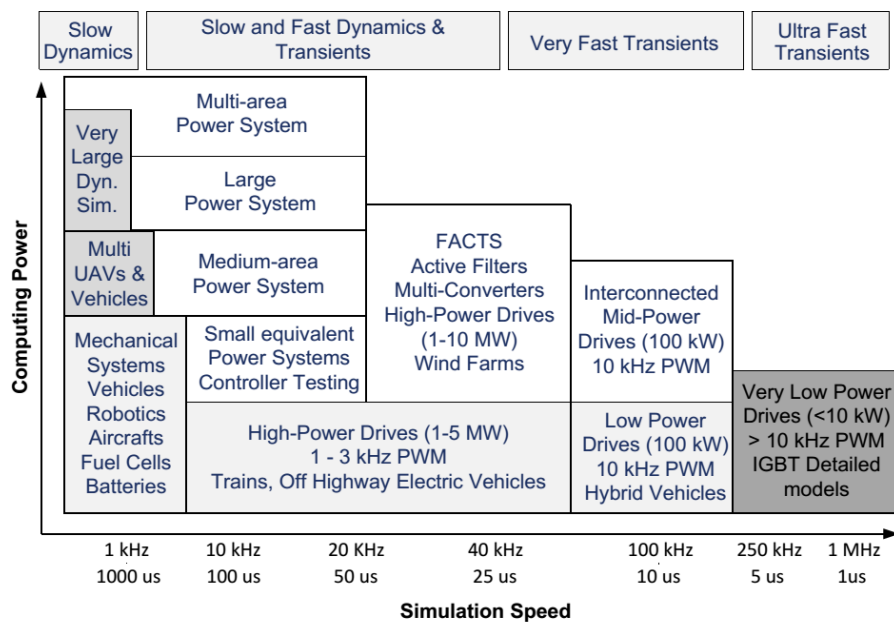
شکل ۴-۱- عملیات انجام گرفته در طول یک گام شبیه‌سازی [14]

چالش‌های شبیه‌ساز زمان-حقیقی

دقت محاسبات در شبیه‌سازی زمان-حقیقی تنها به دقت معادلات دینامیکی توصیف کننده مدل بستگی ندارد، بلکه به طول گام زمانی مورد استفاده برای حل معادلات نیز وابسته است که باعث می‌شود شبیه‌ساز زمان-حقیقی با چالش‌های گوناگونی نظیر تعیین طول گام مناسب در شبیه‌سازی، قدرت محاسبات مورد نیاز در شبیه‌سازی، حل کننده مورد استفاده در شبیه‌سازی و... مواجه گردد. در ادامه چالش‌های مهم شرح داده شده‌اند.

۱. تعیین طول گام مناسب که باید بیانگر فرکانس سیستم واقعی باشد و معمولاً تا حدود ۵ برابر بیشترین فرکانس گذرای سیستم در نظر گرفته می‌شود. در دیاگرام شکل ۵-۱ فرکانس و سرعت شبیه‌سازی مورد نیاز برای کاربردهای مختلف نشان داده شده‌است. همانطور که در این دیاگرام دیده می‌شود فرکانس مناسب برای اجرای شبیه‌سازی دینامیک‌های کند نظیر سیستم‌های مکانیکی و رباتیکی 1 kHz و برای دینامیک‌های سریع نظیر سوئیچ زنی‌های سیستم‌های قدرت تا مرتبه MHz بالا می‌رود.

۲. پیچیدگی یا سایز سیستم که میزان قدرت محاسبات مورد نیاز توسط شبیه‌ساز را بیان می‌کند، هر چه تعداد اجزا و ارتباط این اجزای سیستم بیشتر باشد شبیه‌ساز باید قدرت محاسباتی بالاتری داشته باشد. طول گام زمانی با افزایش پیچیدگی سیستم بیشتر می‌شود تا شبیه‌ساز بتواند محاسبات را انجام دهد، اما همان‌گونه که گفته شده فرکانس اجرا باید از بیشترین فرکانس گذرای سیستم بیشتر باشد که یک چالش برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی ایجاد می‌کند [7].



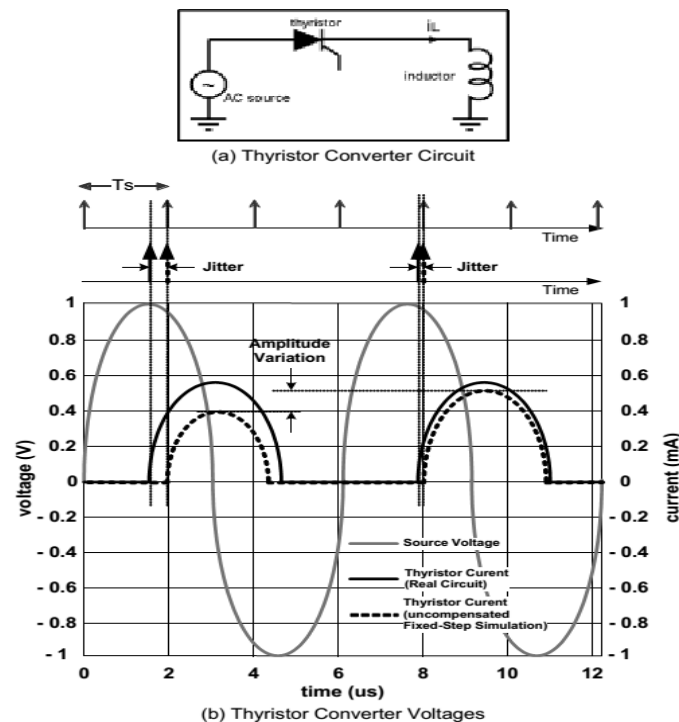
شکل ۵-۱- سرعت مورد نیاز شبیه‌سازی برای کاربردهای گوناگون [1]

۳. تعداد کانال‌های ورودی و خروجی مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیستم که بر روی میزان پیچیدگی و هزینه شبیه‌سازی اثر می‌گذارد.

۴. زمانی که سیستم از دینامیک‌های سریع و کند تشکیل می‌شود، می‌توان از شبیه‌سازهای با نرخ چندانگانه استفاده نمود که بخشی از مدل را با نرخ (طول گام) متفاوت شبیه‌سازی می‌کند، اما استفاده از این روش دارای مشکلاتی مانند همزمان‌سازی و پایداری می‌باشد.

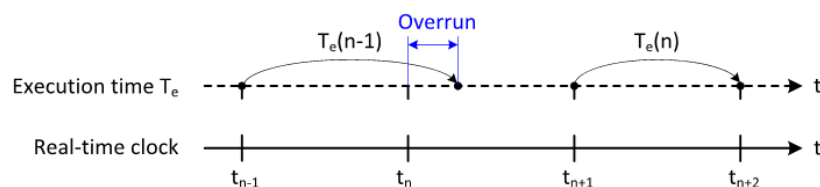
۵. نیاز به حل کننده گسسته زمان، یک محدودیت ذاتی را به ویژه در شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های غیرخطی ایجاد می‌کند. رویدادهای غیرخطی مانند سوئیچ زنی ترانزیستور، باعث ایجاد ناپایداری عددی می‌شوند. به عنوان مثال برای مدارهای یکسوساز که در شکل ۶-۱ نشان داده شده‌است، به علت فرکانس بالای

سوئیچ‌زنی تضمینی وجود ندارد که سوئیچ‌زنی در زمان‌های گسسته مورد نظر اتفاق بیفتد. برای حل این مشکل از تکنیک‌های جبران ساز زمان-گسسته نظیر الگوریتم درون‌یابی^۹ که در آن با استفاده از داده‌های گسسته موجود یک سری داده‌های جدید تولید می‌کند، استفاده می‌شود [1].



شکل ۶-۱- سیستم یکسوساز

۶. وجود مشکل overrun: زمانی که شبیه‌ساز نتواند تمام محاسبات مورد نیاز را در طول گام زمانی از پیش تعیین شده انجام دهد به اصطلاح overrun اتفاق می‌افتد [7]. در شکل ۷-۱ این حالت نشان داده شده است



شکل ۷-۱- ایجاد overrun در شبیه‌سازی

برای حل این مشکل می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد:

- افزایش ساینز گام
- ایجاد روشی برای تخمین سریع توابع
- استفاده از ابزار محاسباتی سریع

برای ایجاد پایداری و افزایش دقت، محدودیتی روی ساینز گام قرار داده می‌شود، پس نمی‌توان ساینز گام را تا اندازه دلخواه افزایش داد. در روش دوم باید از الگوریتم‌های سریع برای تخمین توابع استفاده نمود. به عنوان مثال، می‌توان با استفاده از شبکه عصبی توابع را تخمین زد، اگرچه زمان آموزش این شبکه‌ها زیاد است ولی می‌توان آموزش را به صورت آفلاین انجام داد. برای افزایش سرعت الگوریتم می‌توان از الگوریتم گام‌های

^۹ interpolation

چندگانه^{۱۰} استفاده کرد، به این صورت که از اطلاعات گام قبل برای محاسبه تخمین با درجه بالا استفاده می‌شود [13].

چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های الکتریکی

شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های الکتریکی دارای چالش‌های گوناگونی است، که مهم‌ترین دلیل آن، پهنای باند بیشتر سیستم‌های الکتریکی نسبت به سیستم‌های مکانیکی است، در نتیجه نیاز به طول گام زمانی کمتر در شبیه‌سازی دارند. شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت با طول گام بسیار کوچک نیازمند استفاده از حل-کننده‌های خاص و همچنین استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی برای افزایش دقت می‌باشد.

در شبیه‌سازی مبدل‌های قدرت مانند اینورتر و نیز مبدل‌های DC-DC به دلیل فرکانس بالای سوئیچ زنی آن‌ها نسبت به فرکانس نمونه‌برداری، مشکلات شبیه‌سازی زمان-حقیقی بسیار بیشتر می‌شود. در حالت شبیه‌سازی اینورتر موتور با طول گام ثابت، اگر سیگنال‌های IGBT با زمان نمونه‌برداری در شبیه‌سازی نمونه-گیری شوند، در این صورت دارای دقت پایینی می‌باشند در نتیجه ولتاژ اعمالی به ماشین با خطا همراه می‌شود [10].

۲-۱- انواع روش‌های شبیه‌سازی

همانطور که قبلاً گفته شد، شبیه‌سازی بسته به هدف و کاربرد آن و میزان پیچیدگی سیستم تحت شبیه‌سازی می‌تواند به یکی از روش‌های مدل در حلقه، نرم‌افزار در حلقه، پردازشگر در حلقه و سخت‌افزار در حلقه انجام گیرد. در ادامه به شرح هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

شبیه‌سازی مدل در حلقه (MIL)

در این روش مدلی از سیستم واقعی و زیر سیستم‌های آن و ارتباطات بین آن‌ها همگی در یک محیط شبیه‌سازی واحد ایجاد می‌شود. این شبیه‌سازی معمولاً برای ارزیابی طراحی‌های مقدماتی یک پروژه و بررسی و مقایسه روشهای مختلف کنترلی به کار می‌رود.

نرم‌افزار در حلقه (SIL)

در شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه، کنترل‌کننده به کدهایی که قابلیت پیاده‌سازی واقعی دارند، تبدیل شده و در کنار مدل سیستم در یک کامپیوتر اجرا می‌گردد. در این شرایط، زمان و فضای بیرونی اهمیتی بر روی ارزش نتایج ندارد و زمان شبیه‌سازی می‌تواند کمتر یا بیشتر از زمان واقعی باشد. این روش برای کلاسی از شبیه‌سازی‌ها ایده‌آل است که در آن زمان شبیه‌سازی از زمان-حقیقی کمتر است، که به شبیه‌سازی‌های سریع معروفاند و باعث می‌شوند تست‌های زیادی در طول زمان کوتاهی انجام گیرند. این ساختار به عنوان مثال برای شبیه‌سازی‌های آماری، مانند مونت کارلو^{۱۱} مناسب می‌باشد [2].

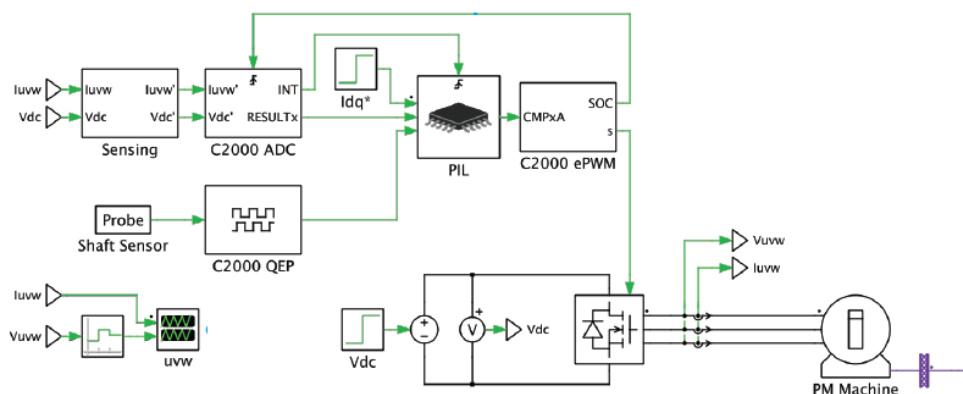
پردازشگر در حلقه (PIL)

در این روش کنترل‌کننده در یک پلت فرم مستقل اجرا می‌شود. تست در این سطح مانند حالت نرم‌افزار در حلقه است با این تفاوت که نرم‌افزار تعبیه شده بر روی پردازنده اجرا می‌شود و تمامی ارتباطات بین این دو بطور فیزیکی برقرار می‌گردد. در شکل ۸-۱ این حالت برای شبیه‌سازی کنترل یک موتور PM نشان داده شده است [8]. همانطور که در شکل مشخص است، موتور PM و مبدل آن مدل شده و سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از مدل جهت محاسبه فرمان PWM از طریق کارت ورودی به یک پردازشگر خارجی فرستاده می‌شود. پردازشگر که حاوی الگوریتم کنترلی اصلی است پس از انجام محاسبات لازم، فرمان کنترلی را از طریق یک کارت

¹⁰ Multi step method

¹¹ Monte-Carlo

خروجی به مدل اعمال می‌کند. در نهایت پاسخ موتور الکتریکی به کنترل اعمالی در حالتیکه محدودیت‌های مختلفی نظیر تاخیر ارسال و دریافت، رزلوشن داده‌ها و فرکانس نمونه‌برداری در نظر گرفته شده است، قابل مشاهده است. در اینجا از آنجاکه فرامین کنترلی از یک بستر فیزیکی (کارت‌های ورودی-خروجی) به مدل منتقل شده و اطلاعات وضعیت سیستم را از مدل دریافت می‌کند، برای مشاهده رفتار نزدیک به واقعیت سیستم باید شبیه‌سازی را بصورت زمان-حقیقی اجرا نمود.

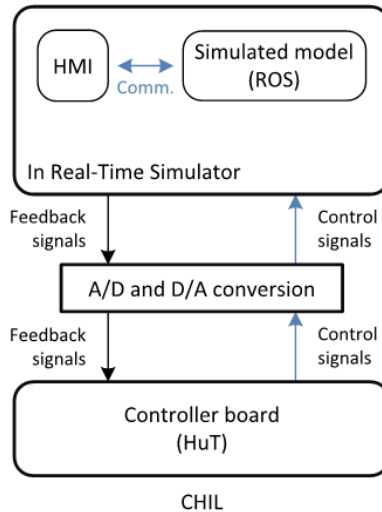


شکل ۸-۱- شماتیک شبیه‌سازی در حالت پردازشگر در حلقه

سخت‌افزار در حلقه (HIL)

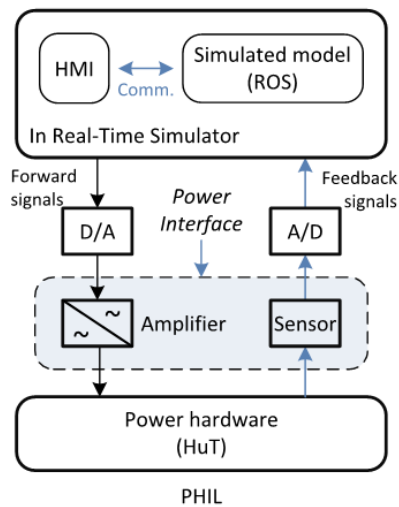
در این روش، شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی اجرا شده و با ایجاد یک مدل مجازی برای محیط پیرامون و دینامیک سیستم و برقراری ارتباط بین آن و سایر سخت‌افزارها (کنترلر، سنسورها و عملگرها) امکان تست و اعتبار سنجی سیستم‌های کنترلی در یک محیط شبه واقعی فراهم می‌گردد. به عبارتی دیگر، تمامی ارتباطات میان کنترل‌کننده و مدل (در صورت امکان سنسورها و عملگرها) به صورت واقعی برقرار می‌گردد. این ساختار برای تست نهایی کنترل‌کننده، قبل از تست فیزیکی بر روی سیستم واقعی زمانی که انجام تست‌های واقعی هزینه‌بر است، صورت می‌گیرد [9]. در شرایطی که کنترل‌کننده به صورت سخت‌افزاری با سیستم شبیه‌سازی شده در ارتباط باشد، به آن ساختار، سخت‌افزار در حلقه کنترلر^{۱۲} نیز گفته می‌شود. شماتیک این حالت در شکل ۹-۱ نشان داده شده‌است. همانطور که در این شکل مشخص است، کنترلر بر روی برد اصلی خود و از طریق کارت‌های ورودی و خروجی با مدل سیستم در ارتباط است.

¹² Controller hardware-in-the-loop (CHIL)



شکل ۹-۱- شماتیک روش CHIL

چنانچه، سخت‌افزار قدرت از طریق سنسورها و تقویت‌کننده‌های قدرت به مدل متصل باشد، به این ساختار، سخت‌افزار در حلقه قدرت^{۱۳} می‌گویند. این ساختار کاربردهای بسیار گوناگونی دارد که به عنوان مثال برای تست عملکرد کنترل‌کننده موتور، تست عملکرد وسایل محافظ مانند رله به کار گرفته می‌شود. شماتیک این حالت در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده‌است [9].



شکل ۱۰-۱- شماتیک روش PHIL

۳-۲-۱- ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شبیه‌سازهای زمان-حقیقی

شبیه‌سازهای زمان-حقیقی با پیشرفت تکنولوژی تغییرات بسیاری داشته‌اند. در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ شبیه‌سازهای کاملاً آنالوگ مورد استفاده قرار می‌گرفتند. سپس شبیه‌سازهای هایبرید دیجیتال-آنالوگ به وجود آمدند. امروزه با پیشرفت و توسعه تکنولوژی پردازنده‌های دیجیتال موازی و پیشرفت تکنیک‌های حل عددی، شبیه‌سازهای زمان-حقیقی دیجیتال^{۱۴} توسعه یافته‌اند. اولین شبیه‌ساز زمان-حقیقی تجاری RTDS است که در

¹³ Power hardware-in-the-loop (PHIL)

¹⁴ Digital real time simulator (DRTS)

آن از تکنولوژی پردازش سیگنال دیجیتال^{۱۵} استفاده شده است. این شبیه‌ساز در ابعاد کوچک بر اساس سیستم-های کامپیوتر موازی عمل می‌کند و به عنوان تحلیل‌کننده شبکه گذرای دیجیتال^{۱۶} شناخته می‌شود و می‌تواند پدیده‌های گذرای الکترومغناطیس را تا فرکانس ۳ کیلوهرتز شبیه‌سازی کند. پس از آن شبیه‌سازهای دیجیتال ساخت زیمنس برای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت به وجود آمدند. در همان زمان شبیه‌سازهای دیجیتال از تکنولوژی OPAL-RT نیز ساخته شدند که از نرم‌افزار Matlab\Simulink به عنوان ابزار اصلی در شبیه‌سازی استفاده می‌کنند. علاوه بر این شبیه‌سازها انواع دیگری نیز وجود دارند که از ترکیب سخت‌افزار و نرم‌افزار برای شبیه‌سازی بهره می‌برند. آرایه‌های گیت‌های قابل برنامه‌ریزی^{۱۷} نمونه‌ای از این نوع شبیه‌سازها می‌باشند [7].

در بخش‌های گذشته به معرفی شبیه‌سازی زمان-حقیقی و بیان الزامات و شرایط انجام این نوع شبیه‌سازی پرداخته شد. یک شبیه‌ساز برای اجرای زمان-حقیقی و برقراری الزامات آن در کلیه شرایط کاری ممکن، می‌باید از یک ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مناسب با سیستم تحت شبیه‌سازی برخوردار باشد. به عبارت دیگر ساختار نرم‌افزاری شبیه‌ساز باید بگونه‌ای باشد که ظرفیت و قابلیت‌های اجرای مدل‌های نرم‌افزاری و حل الگوریتم‌های عددی و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم‌های تست، ارزیابی، مشاهده و تحلیل رفتار سیستم را دارا باشد. علاوه بر آن، ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز نیز بستری را برای اجرای سریع و صحیح الگوریتم‌ها و همچنین تبادل مناسب اطلاعات میان اجزاء مختلف سیستم فراهم می‌کند.

ساختار سخت‌افزاری

در تمام محیط‌های شبیه‌سازی، سخت‌افزار به طور مستقیم بر روی توانایی محاسباتی شبیه‌ساز اثر می‌گذارد. ساختار سخت‌افزاری شبیه‌سازهای زمان-حقیقی غالباً به دو دسته A و B تقسیم می‌شوند. در ساختار نوع A، از یک واحد میزبان^{۱۸} به همراه چندین واحد هدف^{۱۹} به همراه تجهیزات جانبی برای ارتباطات میان این واحدها استفاده می‌شود. هر یک از واحدها می‌توانند از یک پردازنده و یا مجموعه‌ای از چند پردازنده مجزا تشکیل شوند. هر یک از واحدهای هدف شامل بخشی از مدل کلی سیستم تحت شبیه‌سازی می‌باشد که بصورت مستقل حل شده و داده‌های آن از طریق باس ارتباطی به واحدهای دیگر منتقل می‌شود. واحد میزبان وظیفه بارگزاری الگوریتم‌های واحدهای هدف، مقداردهی اولیه و تبادل اطلاعات را برعهده دارد. به عنوان مثال در شکل ۱۱-۱ نمونه‌ای از ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز RTDS که از نوع A می‌باشد نشان داده شده‌است.

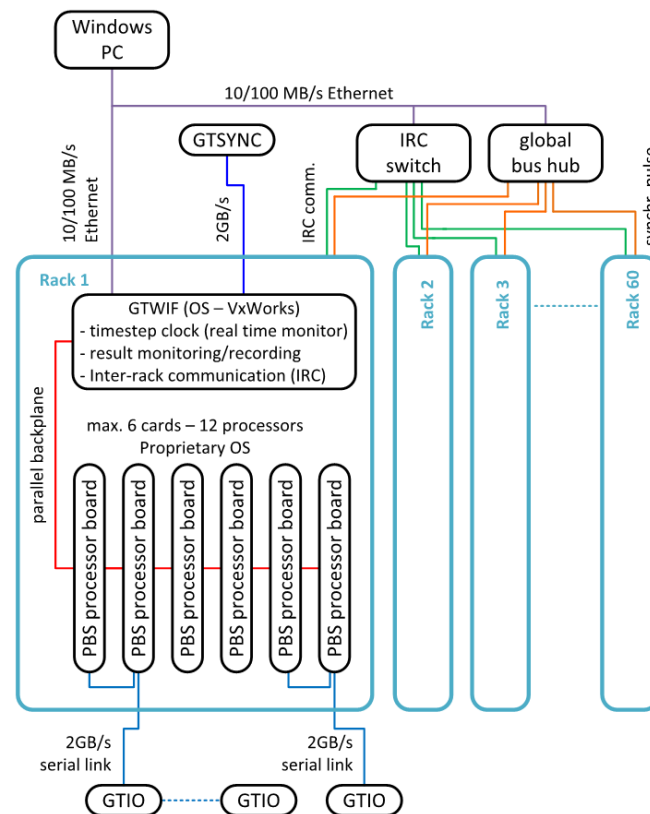
¹⁵ Digital signal processor (DSP)

¹⁶ Digital transient network analyzer (DTNA)

¹⁷ Field programmable gate array (FPGA)

¹⁸ Host unit

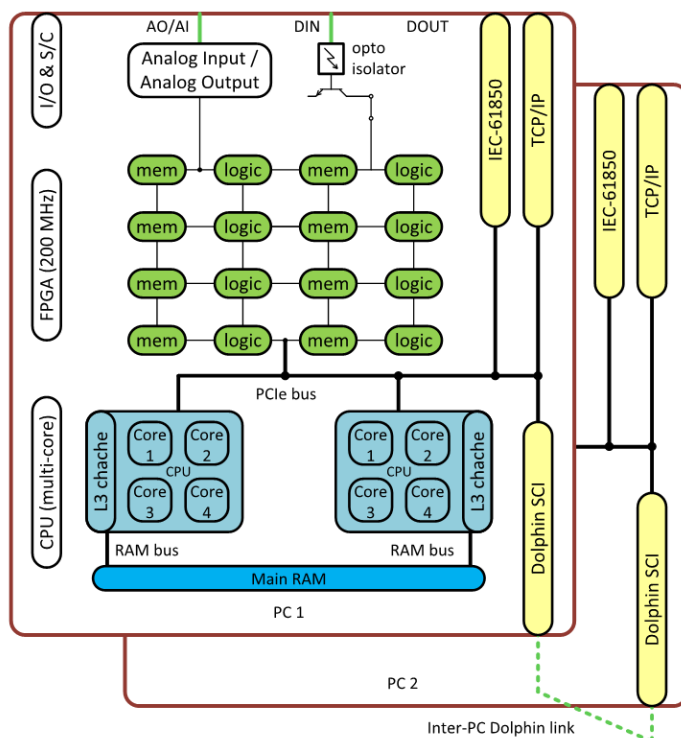
¹⁹ Target unit



شکل ۱۱-۱ نمونه‌ای از ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی نوع A [7]

در این ساختار، واحدهای هدف بر روی واحدی به نام Rack مونتاژ می‌شود. این واحد شامل تعدادی کارت-های پردازش‌گر می‌باشد، که به نام کارت‌های PBS شناخته شده هستند. هر کارت شامل دو پردازش‌گر است که به صورت موازی با یکدیگر عمل می‌کنند و موتور اصلی محاسبات را شکل می‌دهند. علاوه بر کارت‌های پردازش‌گر اصلی، هر Rack شامل کارتی به نام GTWIF می‌باشد که به عنوان ارتباط دهنده بین کامپیوتر میزبان و واحد هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌ساز اجزای جانبی دیگری نیز دارد، مانند کارت GTSYN که برای همزمان‌سازی گام‌های زمانی شبیه‌ساز با مرجع زمانی خارجی به کار می‌رود. کارت‌های GTIO امکان ارتباط فیزیکی با سخت‌افزارهای خارجی مانند کارت‌های ورودی و خروجی را فراهم می‌کنند. قسمت global bus hub نیز مسئول همزمان‌سازی بین سه یا تعداد بیشتر Rack می‌باشد.

در ساختار نوع B از پردازشگرهای چند رشته‌ای و چند هسته‌ای استفاده می‌شود. که هر هسته برای مدل کردن بخشی از سیستم به کار می‌رود. در این ساختار برخلاف ساختار A که مدل‌ها بر روی واحدهای جداگانه پیاده‌سازی می‌شوند، ارتباطات بین مدل‌ها بصورت واقعی‌تر و درون پردازنده صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر از آنجا که مدل کلی سیستم برخلاف ساختار A بین واحدهای مختلف شکسته نشده است و در یک محل قرار دارد، چنانچه متغیرهای حالت یک مدل به یک یا چند متغیر حالت از مدل دیگر وابسته باشند، از آنجا که تمامی این متغیرها در درون یک پردازنده مقداردهی می‌شوند، مقادیر آنها مستقیماً در محاسبات وارد شده و حالات جدید بدست می‌آیند. همچنین در این مدل، انواع FPGA و یا ترکیبی از اجزای سخت‌افزاری دیگر می‌توانند برای انجام کاربردهای صنعتی خاص کنار یکدیگر قرار گیرند [7]. در شکل ۱۲-۱ نمونه‌ای از سخت‌افزار نوع B نشان داده شده است [7].



شکل ۱۲-۱ نمونه‌ای از ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی نوع B

ساختار نرم‌افزاری شبیه‌سازهای زمان-حقیقی

همانطور که گفته شد، مدیریت کلیه عملیاتی که در یک گام شبیه‌سازی زمان-حقیقی صورت می‌گیرد از قبیل خواندن ورودی‌ها، حل معادلات، انتقال داده‌ها میان نودها و مقداردهی خروجی‌ها بر عهده نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌باشد. علاوه بر آن تحلیل و نمایش نتایج و ایجاد یک رابط کاربری مناسب نیز از وظایف نرم‌افزار می‌باشد. بطور کلی بستر نرم‌افزاری شبیه‌سازی از دو بخش تشکیل می‌شوند: ۱. نرم‌افزار سیستم عامل، ۲. نرم‌افزار کاربردی. بر اساس نوع شبیه‌ساز ممکن است سیستم عامل خاصی نیاز باشد اما معمولاً در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا هستند. نرم‌افزارهای کاربردی، محیطی را برای مدل‌سازی سیستم تحت شبیه‌سازی فراهم می‌کنند [7]. به عنوان مثال محیط Matlab\Simulink، نرم‌افزار Labview و نرم‌افزارهای دیگر مانند Maple و Dymola نمونه‌هایی از نرم‌افزارهای کاربردی هستند که برای ایجاد مدل‌های مختلف مکانیکی، قدرت و سیستم‌های کنترلی به منظور شبیه‌سازی استفاده می‌شود. ابزارهای مدل‌سازی دیگر مانند RT-Events، RT-Drive، PT-XSG نیز نمونه‌هایی از توسعه محیط Matlab\Simulink می‌باشند، که به منظور اجرای زمان-حقیقی مدل‌های توسعه داده شده مورد استفاده قرار گیرند [7].

در ادامه ویژگی‌ها و کاربردهای نرم‌افزارهای کاربردی مرسوم برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی مانند Labview، Matlab/Simulink، Maplesim و Dymola شرح داده می‌شود.

نرم‌افزار شبیه‌سازی Labview

Labview یک پلتفرم برای ایجاد زبان برنامه نویسی گرافیکی می‌باشد و به آن ابزار دقیق مجازی^{۲۰} گفته می‌شود. از این نرم‌افزار معمولاً برای دریافت داده، پردازش سیگنال، کنترل، سوپروایزری و شبیه‌سازی استفاده

²⁰ Virtual instrument

می‌شود. این نرم‌افزار با مازول‌ها و کتابخانه‌های متعددی که در آن توسعه داده شده است قابلیت‌های وسیعی را در اختیار قرار می‌دهد. از ویژگی‌های بارز Labview می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [15-17].

۱. *استفاده آسان*: زبان برنامه‌نویسی گرافیکی Labview این قابلیت را ایجاد می‌کند که هر سیستم کنترلی و یا اندازه‌گیری را به راحتی و در زمانی کوتاه ایجاد نمود.

۲. *ارتباط گرافیکی با کاربر*: Labview با داشتن توابع تخصصی متعدد امکان ارتباط گرافیکی با کاربر برای مشاهده داده و وارد کردن پارامترهای ورودی را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار شامل مجموعه وسیعی از نمایشگرها می‌باشد که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده نماید.

۳. *کتابخانه بزرگ*: Labview دارای کتابخانه‌های بسیاری شامل تعداد زیادی توابع برای جمع‌آوری داده، تولید سیگنال، محاسبات ریاضی، آنالیز داده و ... می‌باشد. همچنین قابلیت برنامه‌نویسی به زبان‌های C و Math Script دارد که می‌تواند با زبان برنامه‌نویسی گرافیکی از طریق Script nodes ادغام شود.

۴. *برنامه‌نویسی موازی*: توسط Labview می‌توان چندین برنامه را به صورت موازی اجرا نمود. این ویژگی در اجرای زمان-حقیقی مدل‌های پیچیده بسیار کارآمد است.

۵. *اتصال به ابزارهای فیزیکی*: Labview می‌تواند به انواع ابزارهای اندازه‌گیری، درایوها، دوربین‌ها و ... با پروتکل‌های ارتباطی مختلف متصل شود. با اتصال Labview به سخت‌افزارها از آن می‌توان برای کنترل سیستم‌ها استفاده کرد.

۶. *ارتباط با ابزارها و نرم‌افزارها*: Labview از طریق ابزارهایی مانند API یا مکانیزم‌های دیگر مانند Activex، OPC و ... می‌تواند تبادل داده و ارتباط با نرم‌افزارها و ابزارهای دیگر را انجام دهد. همچنین می‌تواند با ابزارهایی مانند Matlab، Maple، Mathcad، Scilab، GNU Octav و ... ارتباط برقرار کند.

۷. *توانایی کار کردن در پلت‌فرم‌های مختلف*: Labview می‌تواند در پلت‌فرم‌هایی مانند ویندوز، لینوکس، Mac OS، RTOS عمل کند.

۸. *اجرای الگوریتم‌ها به صورت زمان-حقیقی*: Labview می‌تواند الگوریتم‌هایی مانند پردازش سیگنال، ODE، PDE، بهینه‌سازی و ... را به صورت زمان-حقیقی اجرا کند.

۹. *پشتیبانی سخت‌افزاری-نرم‌افزاری*: Labview محدوده وسیعی از کارت‌های داده و دستگاه‌های کنترلی را پشتیبانی می‌کند.

۱۰. *طراحی مازولار*: می‌توان برنامه‌های Labview را به صورت sub VIs اجرا کرد.

دارا بودن ویژگی‌های فوق، حوزه‌های کاربردی وسیعی را برای Labview ایجاد می‌کند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- *جمع‌آوری داده و پردازش سیگنال*: Labview ابزاری قدرتمند برای ارتباط با سیستم‌های سخت‌افزاری و دریافت داده از آنها است. این نرم‌افزار شامل توابع تحلیل پیچیده‌ای می‌باشد که امکان پردازش سیگنال، آنالیز فرکانسی، فیت کردن منحنی و ... را فراهم می‌سازد. همچنین با ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر، مشاهده و آنالیز داده به راحتی صورت می‌گیرد.

- *تست و اعتبار سنجی سیستم*: Labview به راحتی می‌تواند به هر سخت‌افزاری متصل گردد. همچنین با استفاده از Labview می‌توان از تکنولوژی‌های جدید مانند FPGA و پردازشگرهای چند هسته‌ای استفاده کرد و تست و اعتبار سنجی سیستم با دقت و عملکرد بهتر صورت گیرد [18].

Labview دارای مازول‌های گوناگونی مانند مازول زمان-حقیقی، مازول شبیه‌سازی و طراحی کنترل، مازول FPGA، مازول رباتیک، مازول پردازش سیگنال، مازول جدول حالت و ... می‌باشد. از مازول شبیه‌سازی می‌توان برای آنالیز رفتار سیستم در حالت حلقه باز، طراحی کنترل کننده و شبیه‌سازی سیستم به صورت آنالین و آفلاین استفاده نمود. همچنین می‌توان این مازول را با مازول‌های دیگر ترکیب کرده و از آن استفاده‌های بیشتری کرد. به عنوان مثال می‌توان با مازول شناسایی سیستم برای یافتن مدل تجربی یک سیستم آن را ترکیب نمود. همچنین می‌توان با مازول جدول حالت برای طراحی کنترل بر مبنای رویداد از آن استفاده کرد.

زمانی که الگوریتم طراحی شد، می‌توان با استفاده از مازول زمان-حقیقی، برای کاربردهای زمان-حقیقی سخت افزار در حلقه از آن بهره برد.

نرم‌افزار Matlab و ابزار شبیه‌سازی سیمولینک

نرم افزار Matlab یک زبان با عملکرد بالا برای انجام محاسبات می‌باشد. این نرم‌افزار توانایی اجرای الگوریتم، رسم توابع و داده‌ها، محاسبات ریاضی و ارتباط با برنامه‌هایی که به زبان‌های دیگر مانند C، Java، fortran و python هستند، را دارا می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار شامل بخش سیمولینک است که شبیه‌سازی حوزه‌های چندگانه و طراحی بر مبنای مدل برای سیستم‌های دینامیکی را به صورت گرافیکی ایجاد می‌کند. سیمولینک می‌تواند از طریق Real time workshop شبیه‌سازی‌ها را به صورت زمان-حقیقی انجام دهد.

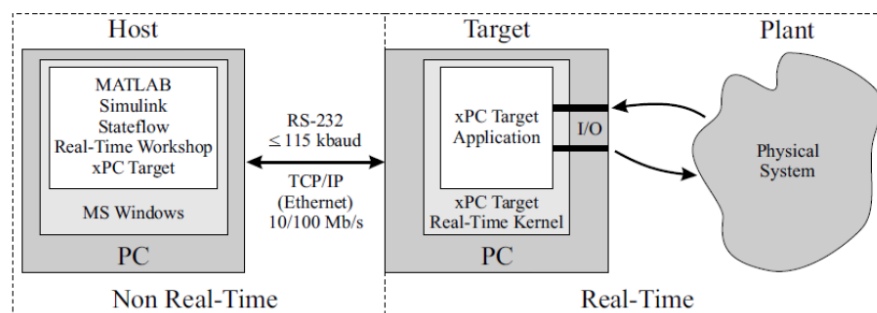
سیمولینک یک ابزار شبیه‌سازی متعلق به نرم‌افزار Matlab است. این ابزار یک محیط گرافیکی برای مدل-سازی، شبیه‌سازی و آنالیز سیستم‌های دینامیکی چند حوزه‌ای ایجاد می‌کند. سیمولینک زمان-حقیقی که به xPC target شناخته شده است محیطی برای شبیه‌سازی و تست سیستم‌ها به صورت زمان-حقیقی فراهم می‌کند [19].

ویژگی‌های سیمولینک

- دارای کتابخانه‌های وسیع که برای مدل‌سازی سیستم‌ها به کار می‌روند.
- دارای حل‌کننده‌های عددی با طول گام ثابت و متغیر می‌باشد.
- دارای ابزارهای مدیریت داده برای مدیریت فایل‌های مدل و داده می‌باشد.
- دارای ابزارهای آنالیز مدل برای بهبود دادن ساختار مدل و افزایش سرعت شبیه‌سازی می‌باشد.
- دارای ابزارهای گرافیکی برای ایجاد بلوک‌ها به صورت سلسه مراتبی می‌باشد.

شبیه‌سازی زمان-حقیقی در سیمولینک

سیمولینک در نرم‌افزار Matlab توسط xPC target که بر مبنای ساختار کامپیوتر میزبان و هدف است، شبیه‌سازی زمان-حقیقی سخت‌افزار در حلقه را انجام می‌دهد. در کامپیوتر میزبان که نرم‌افزار Matlab، Simulink، Real time workshop و xPC Target اجرا می‌شوند، xPC Target با کدهای تولید شده از Simulink و کامپایلر C، کد زمان-حقیقی را ایجاد می‌کند. این کد به صورت زمان-حقیقی در کامپیوتر هدف اجرا می‌شود. کارت‌های ورودی و خروجی به کامپیوتر هدف متصل هستند و این کامپیوتر می‌تواند با سیستم در ارتباط باشد [20]. در شکل ۱۳-۱ شماتیک نشان داده شده است



شکل ۱۳-۱ شماتیک شبیه‌سازی زمان-حقیقی توسط Matlab/Simulink

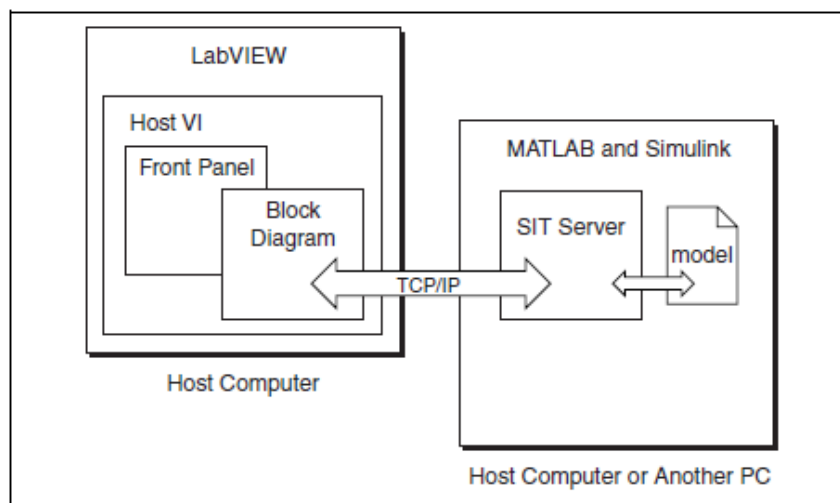
مقایسه Matlab/Simulink و Labview

Labview قابلیت ارتباط با سخت‌افزارهای گوناگون و تبادل اطلاعات به طور گسترده را دارا می‌باشد. همچنین توانایی ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر در حین اجرای برنامه را دارد. اما Labview دارای جعبه ابزارهای کمتری نسبت به Matlab\Simulink است و برای کاربردهای پیچیده مانند پردازش سیگنال و الگوریتم‌های

کنترلی پیچیده مناسب نیست [21]. Matlab\Simulink، دارای توابع محاسباتی قوی و جعبه ابزارهای با عملکرد و دقت بالا، در تمام حوزه‌های مهندسی می‌باشد. اما در گرفتن داده ورودی، ارتباط شبکه و کنترل سخت‌افزاری دارای کارایی بالایی نیست [21].

ترکیب Matlab و Labview

از آن جایی که سیمولینک دارای ابزارهای گرافیکی Labview نمی‌باشد، یک ایده مناسب ترکیب Labview و Matlab در شبیه‌سازی سیستم‌های کنترلی است. ابزار واسط سیمولینک^{۲۱}، Labview را با نرم‌افزار Matlab ادغام می‌کند و باعث می‌شود مدل‌های توسعه داده شده در محیط سیمولینک در آن محیط اجرا شده و داده‌های آن برای آنالیز و نمایش و یا حتی به عنوان ورودی بخش دیگری از مدل که در LabVIEW وجود دارد، به محیط LabVIEW انتقال یابد. در این حالت از طریق Labview می‌توان پارامترهای مدل را در حین اجرا، تغییر داد [22]. در شکل ۱۴-۱ این ارتباط نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۱- ارتباط Labview با Simulink

نرم‌افزار شبیه‌سازی Maplesim

نرم‌افزار Maple یک محیط مدل‌سازی بر مبنای محاسبات سیمبولیک ایجاد می‌کند. شبیه‌ساز Maplesim، یک ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی فیزیکی از Maplesoft می‌باشد که توسط ابزار محاسباتی Maple مورد پشتیبانی است. Maplesim از زبان برنامه نویسی Modelica استفاده می‌کند که مبتنی بر روش مدل‌سازی شی‌گرا است. این زبان برنامه‌نویسی برای مدل‌سازی حوزه‌های چندگانه بسیار مناسب است. این نرم‌افزار در شبیه‌سازی سیستم‌های رباتیک، مکاترونیک، وسایل نقلیه، هوافضا، طراحی ماشین، سیستم‌های قدرت و... کاربرد دارد.

از ویژگی‌های Maplesim می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

- صرفه جویی در زمان مدل‌سازی به علت قابلیت نوشتن معادلات بصورت سمبولیک.
- توانایی ارتباط با ابزارهای شبیه‌سازی زمان-حقیقی مانند سیمولینک
- دارای ماژول جعبه ابزار CAD
- توسعه مدل‌سازی با استفاده از ابزارهای قدرتمند در تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی. این شبیه‌ساز دارای کتابخانه‌ای وسیع از ابزارهایی برای آنالیز حساسیت می‌باشد.
- اجرای کدهای شبیه‌سازی در حالت زمان-حقیقی با سرعت بالا

²¹ Simulink interface toolkit

Maplesim می‌تواند با نرم‌افزارهایی مانند Matlab، Labview، Vissim و Motion solve ارتباط برقرار کند. با استفاده از ارتباط دهنده با سیمولینک، مدل‌های شبیه‌سازی شده در Maplesim به صورت اتوماتیک به بلوک‌های S-Function تبدیل می‌شوند. این بلوک‌ها برای اجرای سریع و زمان-حقیقی توسط سیمولینک مناسب هستند. با ارتباط این شبیه‌ساز با Labview مدل‌های آن به صورت اتوماتیک به بلوک‌هایی برای استفاده آسان در Labview تبدیل می‌گردند و کدهای مدل برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی با سرعت بالا، بهینه می‌شوند [23]، [24].

نرم‌افزار شبیه‌سازی Dymola

نرم‌افزار شبیه‌سازی Dymola که مخفف Dynamic model laboratory است، یک ابزار کامل برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد و در حوزه‌های مختلف نظیر هوافضا، رباتیک، اتوماسیون و ... کاربرد دارد. این شبیه‌ساز می‌تواند سیستم‌های پیچیده و دینامیکی نظیر سیستم‌های کنترلی، حرارتی، هیدرولیکی، ترمودینامیک، الکتریکی، مکانیکی و ... را شبیه‌سازی کند. این شبیه‌ساز از زبان برنامه نویسی Modelica استفاده می‌کند. قابلیت انعطاف آن باعث شده است که ابزاری کامل برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تکنولوژی‌های جدید گردد.

از ویژگی‌های شبیه‌ساز Dymola می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

• مدل‌سازی چند حوزه‌ای

Dymola دارای مدل‌های کتابخانه‌ای برای تمام حوزه‌های مهندسی است که توانایی مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و چند حوزه‌ای را ایجاد می‌کند، اجزای مدل می‌توانند از حوزه‌های گوناگون مهندسی باشند. در نتیجه می‌توان مدل کاملی از سیستم را ایجاد نمود که مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. همچنین می‌توان اجزای فیزیکی را که به وسیله معادلات دیفرانسیل و معادلات جبری توصیف می‌گردند را مدل‌سازی و شبیه‌سازی نمود.

• مدل‌سازی گرافیکی

این شبیه‌ساز امکان مدل‌سازی گرافیکی را ایجاد می‌کند. کتابخانه‌های آن شامل المان‌های فیزیکی گوناگونی هستند که می‌توان به راحتی این اجزا را در داخل محیط شبیه‌سازی قرار داد و ارتباطات بین اجزا به وسیله ارتباطات گرافیکی قابل نشان دادن است.

• کتابخانه‌های باز:

Dymola دارای کتابخانه‌های باز است که کاربر به آسانی می‌تواند مدل‌های مورد نیاز خود را ایجاد نماید و یا مدل‌های موجود را با مدل‌های مورد نیاز خود تطبیق دهد [25].

• ارتباط با نرم‌افزارهای CAD و Simulink

نرم افزار Dymola می‌تواند مدل‌های توسعه داده شده در نرم‌افزارهای CAD را خوانده و در محیط خود اجرا نماید. همچنین می‌توان مدل‌های Dymola را در سیمولینک وارد کرد و یا مدل‌های سیمولینک را به Dymola وارد نمود. این توانایی باعث می‌گردد تا مدل‌های فیزیکی در Dymola بتوانند به سیستم‌های کنترلی پیاده‌سازی شده در Simulink کوپل شوند [28].

• شبیه‌سازی زمان-حقیقی

این شبیه‌ساز دارای توانایی‌هایی مانند کنترل کردن مد، شناسایی پیش‌آمد^{۲۲} و مد میکس می‌باشد، که می‌توانند عملکرد شبیه‌سازی زمان-حقیقی را افزایش دهند. همچنین، شبیه‌ساز Dymola دارای حل‌کننده‌های عددی خاصی می‌باشد که توانایی شبیه‌سازی زمان-حقیقی سخت‌افزار در حلقه را ایجاد می‌کنند.

• کنترل مد:

مدل‌های ریاضی برخی از سیستم‌ها، به عنوان مثال گیربکس، سیستمی ترکیبی از معادلات بولین و معادلات دیفرانسیل جبری با متغیرهای ناشناخته است. حل‌کننده‌های با اهداف عمومی برای این چنین مسائل وجود ندارند، همچنین حل‌کننده‌های DAE، که برای حل قسمت‌های پیوسته به کار می‌روند، بسیار کند هستند. روش‌های سنتی معادلات مدل را برای هر مد عملکردی به صورت دستی تغییر می‌دهند. Dymola می‌تواند این کار را به صورت اتوماتیک انجام دهد و مجموعه‌ای از کدهای مختلف برای هر مد عملکردی تولید کند.

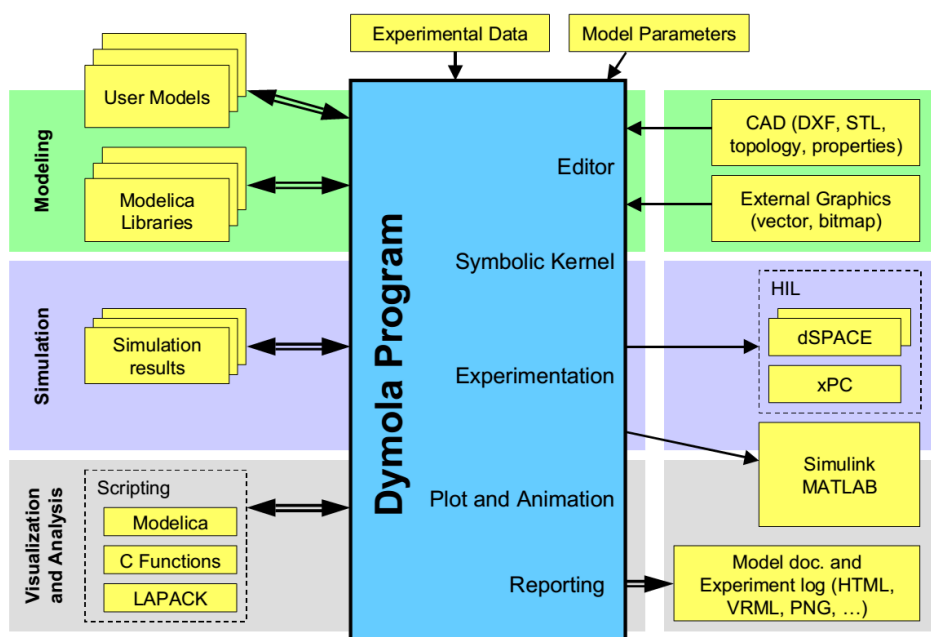
• مد میکس و درون خطی:

مدل‌های ریاضی شامل دینامیک‌های سریع و کند هستند. روش‌های ساده برای حل این معادلات به گام-های زمانی بسیار کمتر از طول گام زمانی داده شده در حالت زمان-حقیقی، نیاز دارند. Dymola از روشی جدید که مد میکس^{۲۳} گفته می‌شود برای حل این مدل‌ها استفاده می‌کند. مد میکس یک حد وسط بین انتگرالگیری صریح و ضمنی ارائه می‌دهد به این صورت که ابتدا سیستم به بخش‌های سریع و کند تقسیم می‌شود و گسسته سازی ضمنی (که نیاز به گام زمانی بزرگتری برای حل دارد) تنها بر روی بخش سریع اعمال می‌گردد و دینامیک‌های کند از طریق انتگرال‌گیری صریح حل می‌شوند. به این ترتیب شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های پیچیده راحت‌تر شده و گام زمانی مورد نیاز افزایش می‌یابد. همچنین، برای افزایش سرعت شبیه‌سازی، Dymola از روش‌های درون خطی^{۲۴} نیز استفاده می‌کند [26]. در این روش فرمول‌های گسسته سازی بطور مستقیم و به صورت سیمبولیک بر روی معادلات اعمال شده و معادلات حاصل توسط موتور سیمبولیک Dymola حل می‌گردد.

نرم‌افزار Dymola، محیطی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی می‌باشد. مدل‌ها با استفاده از مدل‌های کتابخانه-ای Modelica و کتابخانه‌های دیگر، مانند مدل‌های توسعه داده شده توسط کاربر، ایجاد می‌شوند. Dymola معادلات و مدل را به کدهای مؤثر برای شبیه‌سازی تبدیل می‌کند. همچنین می‌تواند این کدها را به سیمولینک بفروشد و نیز می‌تواند کدهایی را برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی سخت‌افزار در حلقه ایجاد کند. در شکل ۱۵-۱ ساختار بلوکی این نرم‌افزار نشان داده شده است.

²³Mixed-Mode

²⁴ inline integration



شکل ۱۵-۱ ساختار نرم‌افزار Dymola

مقایسه Dymola و Matlab/Simulink

Dymola ابزاری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌باشد. Matlab یک محیط محاسباتی است و ابزارهای گرافیکی برای آنالیز داده را فراهم می‌کند. Dymola و Simulink از جنبه‌های زیر می‌توانند با یکدیگر مقایسه شوند:

۱. پلتفرم: هر دو می‌توانند در پلت فرم‌های ویندوز و لینوکس کار کنند.
۲. نیاز به نرم‌افزار پشتیبان: Dymola محیطی را به تنهایی برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی ایجاد می‌کند اما Simulink بر روی محیط Matlab ایجاد می‌شود.
۳. روش مدل‌سازی: Dymola از روش‌های مدل‌سازی شی‌گرا استفاده می‌کند. در این روش نیازی به تبدیل معادلات به بلوک دیاگرام، توسط کاربر نیست. مدل‌سازی در Simulink بر مبنای بلوک‌های پایه‌ای می‌باشد و کاربر باید معادلات را به صورت دستی به بلوک دیاگرام تبدیل کند.
۴. مشاهده نتایج شبیه‌سازی: دو روش در Dymola برای مشاهده نتایج وجود دارد. ۱. رسم نمودار. ۲. انیمیشن. تنها نتایج محاسبات تمام شده قابل نمایش هستند. در Simulink می‌توان نتایج را در حین انجام محاسبات و نیز بعد از انجام محاسبات مشاهده نمود.
۵. آنالیز نتایج: Matlab یک ابزار قدرتمند برای محاسبه، رسم و آنالیز داده می‌باشد. نتایج Simulink به راحتی می‌توانند توسط دستورات Matlab آنالیز شوند. Dymola ابزار قدرتمندی برای محاسبه و آنالیز داده نیست. نتیجه‌ای که از مقایسه Dymola و Simulink بدست می‌آید این است که Dymola برای مدل‌سازی مدل‌های پیچیده با چندین معادله از حوزه‌های گوناگون مناسب است و استفاده از آن نسبت به Simulink، به دلیل شی‌گرا بودن، آسان‌تر است. اما Dymola در محاسبات و آنالیز داده نسبت به Matlab ضعیف‌تر است [27].

ابزار شبیه‌سازی زمان-حقیقی RT-LAB

به دلایل گوناگون، شبیه‌سازی سیستم‌های الکتریکی به روش زمان-حقیقی سخت‌افزار در حلقه (HIL) دشوار است و مشکلاتی را ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، معمولاً سیستم‌های الکتریکی به دلیل وجود سوئیچ در آن‌ها دارای مدهای کاری گوناگونی هستند و نیازمند شبیه‌سازی با گام‌های زمانی بسیار کم یا شبیه‌سازی با

گام‌های زمانی متغیر هستند تا دقت و همگرایی ایجاد گردد. در نتیجه، شبیه‌سازی سیستم‌های الکتریکی با زمان نمونه‌برداری بسیار کوچک نیازمند حل‌کننده‌های خاص و استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی می‌باشد. RT-LAB یکی از ابزارهای شبیه‌سازی است که می‌تواند این مشکلات را حل نماید.

RT-LAB یک ابزار شبیه‌سازی زمان-حقیقی است، که توانایی اجرای مدل‌های دینامیکی سیمولینک را در حالت سخت افزار در حلقه با هزینه کم و دقت بالا، در زمان کوتاه دارا می‌باشد [29,30]. همچنین به کاربر اجازه می‌دهد که نتایج توابع مختلف، در اجرای پروسه را مشاهده کند.

ابزار شبیه‌سازی RT-LAB می‌تواند مدارهای الکتریکی را به صورت‌های موازی بر روی دسته‌ای از کامپیوترها با زمان نمونه برداری کمتر از 10us شبیه‌سازی کند. RT-LAB محاسبات لازم برای ایجاد شبیه‌سازی موازی سیستم‌های الکتریکی را با استفاده از مدل‌های استاندارد سیمولینک شامل مدل‌های Simpower، فراهم می‌کند. برای سیستم‌های الکتریکی با پهنای باند بالا، RT-LAB با ابزارهای شبیه‌سازی ARTEMIS و RT-Events ارتباط برقرار می‌کند و می‌تواند شبیه‌سازی را در طول گام‌های زمانی کمتر از 10us انجام دهد و از طرفی این ابزارها از الگوریتم‌های درونیابی استفاده می‌کنند، در نتیجه دقت شبیه‌سازی نیز بالا می‌رود. RT-LAB در شبیه‌سازی زمان-حقیقی وسایل نقلیه هابیرید، درایوهای موتورهای القایی، سیستم-های توربین بادی و ... کاربرد دارد [11].

برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی به دو کامپیوتر میزبان و هدف نیاز است. کامپیوتر میزبان وظیفه ایجاد کردن مدل سیمولینک، کامل کردن و اجرای مدل توسط RT-LAB و ارتباط با کاربر را دارا می‌باشد. کامپیوتر هدف که دارای سیستم عامل لینوکس است، وظیفه ایجاد ارتباط با کارت‌های ورودی و خروجی، اجرای زمان-حقیقی کدهای تولیدی و ارتباط با کامپیوتر میزبان را دارد.

ابزار شبیه‌ساز RT-Event

RT-Event یک ابزار شبیه‌سازی است که با Matlab\Simulink کار می‌کند. برای افزایش دقت و کارایی سیستم‌های گسسته و پیوسته زمان که دینامیک آن‌ها در اثر اتفاق‌های گسسته تغییر می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبیه‌ساز یک ابزار محاسباتی برای شبیه‌سازی با طول گام ثابت برای سیستم‌های هابیرید که شامل دینامیک و رویدادهای گسسته هستند، می‌باشد. از آنجایی که مجموعه بلوک‌های RT-Events با طول گام ثابت کار می‌کنند، پس می‌توانند به عنوان شبیه‌ساز زمان-حقیقی مورد استفاده قرار گیرند. دقت آن‌ها بستگی به طول گام زمانی انتخابی، نسبت به فرکانس سیگنال‌های پیوسته دارد. RT-Events با اعمال الگوریتم جبران-ساز به رویدادهای گسسته، مشکل شبیه‌سازی با طول گام ثابت را حل می‌کند و سرعت شبیه‌سازی سیستم‌های هابیرید پیچیده را افزایش می‌دهد.

ابزار شبیه‌ساز ARTEMIS

ARTEMIS مجموعه‌ای از حل‌کننده‌های زمان-حقیقی با گام ثابت است. این ابزار الگوریتم‌های ایجاد شده توسط Simpower در شبیه‌سازی سیستم‌های الکتریکی را بهینه می‌کند. ARTEMIS الگوریتمی سریع را فراهم می‌کند که می‌تواند محاسبات را با قابلیت اطمینان بالا، دقیق و با طول گام ثابت انجام دهد. در نتیجه امکان استفاده از ابزار شبیه‌سازی Simpower در نرم‌افزار Matlab را به صورت زمان-حقیقی فراهم می‌کند. همچنین دقت شبیه‌سازی را برای سیستم‌هایی که دارای المان‌ها غیرخطی می‌باشند افزایش می‌دهد. اگرچه از روش‌های حل با طول گام ثابت استفاده می‌کند، ولی دارای دقت بالایی همچون استفاده از روش‌های حل با طول گام متغیر می‌باشد [32].

ارتباط RT-LAB با Labview

در RT-LAB رابط محیط کنترلی آن با Labview ایجاد شده است. Labview محیطی گرافیکی برای دریافت سیگنال، آنالیز اندازه‌گیری و توصیف داده‌ها را فراهم می‌کند. ارتباط RT-LAB با Labview باعث

می‌گردد که کاربر بتواند در حین شبیه‌سازی سیگنال‌ها را مشاهده کرده، اندازه‌گیری نماید و همچنین به وسیله تغییر پارامترها و سیگنال‌های ورودی از طریق ابزارهای گرافیکی در Labview، با شبیه‌سازی در ارتباط باشد.

مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی

در این قسمت مقایسه‌ای از جنبه‌های گوناگون نظیر زبان و نحوه برنامه‌نویسی، ارتباط گرافیکی با کاربر، ارتباط با کارت‌های ورودی و خروجی و... بین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی Labview، Matlab\Simulink، Maplesim و Dymola انجام می‌گیرد.

زبان و نحوه برنامه‌نویسی

زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار Labview، زبان گرافیکی می‌باشد، که به وسیله آیکون‌های گرافیکی و بلوک دیاگرام نوشته می‌شود و به صورت مستقیم به کد ماشین تبدیل می‌گردد. این زبان برنامه‌نویسی شامل تمامی مفاهیم موجود در زبان‌های برنامه‌نویسی سنتی مانند حلقه، متغیر، نوع داده و... می‌باشد. این زبان برخلاف زبان‌های دیگر که به صورت ترتیبی اجرا می‌شوند، بر اساس گردش داده اجرا می‌گردد. فهمیدن این زبان برنامه‌نویسی نسبت به زبان‌های دیگر بسیار آسان‌تر است و زمان کمتری برای درک آن نیاز است، همچنین به راحتی نشان می‌دهد که کدام یک از کدها باید به صورت موازی اجرا شوند. علاوه بر این مزایای این زبان برنامه‌نویسی را می‌توان با زبان‌های برنامه‌نویسی دیگر نیز ترکیب نمود [33]. زبان برنامه‌نویسی در Matlab\Simulink زبان گرافیکی می‌باشد که دارای کتابخانه‌های بسیاری است و نحوه برنامه‌نویسی به صورت بلوک دیاگرام است [34]. مدل‌سازی و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Maple و Dymola با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Modelica است و برنامه‌نویسی به صورت شی‌گرا است، در نتیجه برنامه‌نویسی برای کاربر آسان می‌باشد. معادلات مدل در آن به صورت معادلات دیفرانسیلی، تابع تبدیل یا در فرم ماتریس دیده می‌شوند و می‌توانند کاملاً به فرم پارامتری باشند [35].

ارتباط گرافیکی با کاربر در حین انجام برنامه

در بین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، Labview امکان ارتباط آسان‌تر با کاربر را ایجاد می‌کند. این نرم‌افزار با ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر امکان مشاهده داده و وارد کردن ورودی را در حین انجام برنامه، فراهم می‌کند و شامل مجموعه وسیعی از نمایشگرها می‌باشد که کاربر می‌تواند از آن‌ها استفاده کند.

ارتباط با کارت‌های ورودی و خروجی و سخت‌افزارهای جانبی

نرم‌افزار Matlab دارای درایوهای آماده و قابل اطمینان برای پشتیبانی از پروتکل‌های متنوع ارتباط داده با سخت‌افزارهای جانبی نمی‌باشد. نرم‌افزار Labview دارای واحد اخذ داده^{۲۵} می‌باشد [36]. Labview می‌تواند به راحتی با پروتکل‌های USB، GPIB، Ethernet و.. ارتباط برقرار کند. داده‌ها را درون فایل ذخیره کند و کتابخانه‌های وسیعی برای ایجاد ارتباط سریع و آسان با سخت‌افزارهای جانبی دارا می‌باشد [37]، [38]. Maplesim و Dymola نیز می‌توانند با پروتکل‌هایی نظیر Ethernet و.. ارتباط برقرار نمایند [39].

ارتباط با نرم‌افزارهای دیگر

نرم‌افزار Labview می‌تواند از طریق simulation interface toolkit با محیط سیمولینک از نرم‌افزار Matlab ارتباط برقرار کند. شبیه‌ساز Maplesim می‌تواند با نرم‌افزارهای Matlab، Labview، Vissim و Motion solve ارتباط برقرار نماید. Dymola نیز می‌تواند با Matlab/Simulink ارتباط برقرار کند.

در جدول ۱-۱ ویژگی‌های نرم‌افزارهای شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند

جدول ۱-۱- مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی

²⁵ Data acquisition

ارتباط با نرم‌افزارها و ابزارهای شبیه‌سازی دیگر	ارتباط با پروتکل‌های مختلف	ارتباط گرافیکی با کاربر در حین انجام برنامه	زبان برنامه نویسی	نرم‌افزارهای شبیه‌سازی
Labview-RTLAB	ارتباط دارد	ایجاد می‌کند	گرافیکی	Matlab/Simulink
RTLAB-Simulink	ارتباط دارد	ایجاد می‌کند	گرافیکی	Labview
Labview-Simulink	ارتباط دارد	ایجاد نمی‌کند	Modelica	Maplesim
Simulink	ارتباط دارد	ایجاد نمی‌کند	Modelica	Dymola

۴-۲-۱- مقایسه انواع شبیه‌سازهای زمان-حقیقی مرسوم

در جدول ۱-۲ مقایسه‌ای از جهات گوناگون نظیر سخت‌افزار، سیستم عامل، نرم‌افزارها و ابزارهای شبیه‌سازی، روش‌های حل و کاربردها، بین شبیه‌سازهای زمان-حقیقی مرسوم صورت گرفته‌است [7].

جدول ۱-۲- مقایسه شبیه‌سازهای زمان-حقیقی

شبیه‌ساز زمان حقیقی	سخت افزار	سیستم عامل	نرم‌افزار و ابزارهای شبیه‌سازی	کاربردها
RTDS	PowerPc Risk	Windows Host: Target: VxWorks	RSCAD	سیستم‌های قدرت، الکترونیک قدرت و..
Emegasim	Multi core CPU	Host: Windows Target: Linux	Matlab\ Simulink, RTLAB	سیستم‌های قدرت، سیستم‌های چندحوزه‌ای و ...
Hypersim	CPU	Host: Windows Target: Linux	Hypersim software	سیستم‌های قدرت
Dspace	CPU	Host: Windows Target: QNX ROS	Simulink, State flow	سیستم‌های فضایی-کنترل صنعتی
VTB	DSP	Host: Windows Target: Linux	Simulink	سیستم‌های قدرت- سیستم‌های چند حوزه‌ای
xPC-target	CPU-FPGA	Host: Windows Target: Optimized real time kernel	Simulink	شبیه‌سازی زمان-حقیقی سخت‌افزار در حلقه
RTX	CPU	Host: Windows Target: QNX	Simulink	سیستم‌های قدرت- صنعت هوا فضا
Typhoon RTDS	FPGA	Host: Windows Target: FPGA	Matlab	کنترل سیستم‌های الکترونیک قدرت

در این بخش ابتدا مروری بر مفاهیم شبیه‌سازی زمان-حقیقی و مراحل مورد نیاز در این شبیه‌سازی صورت گرفت. سپس چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی و به طور خاص مشکلات شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم-های الکتریکی شرح داده شد. پس از آن ویژگی‌ها و کاربردهای انواع شبیه‌سازهای زمان-حقیقی مانند Labview، Matlab/Simulink، Maplesim و Dymola بیان گردید. نحوه ارتباط این شبیه‌سازها با یکدیگر و همچنین نحوه اجرای شبیه‌سازی زمان-حقیقی توسط این شبیه‌سازها توضیح داده شد. سپس این شبیه‌سازها از لحاظ زبان برنامه‌نویسی، ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر در حین انجام برنامه، ارتباط با پروتکل‌های مختلف و ارتباط با نرم‌افزارهای دیگر مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که نرم‌افزار شبیه‌سازی Labview از لحاظ ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر و همچنین ارتباط با پروتکل‌های مختلف و داشتن

درایوهای آماده و قابل اطمینان برای پشتیبانی از پروتکل‌های متنوع داده، نسبت به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دیگر کاراتر است و این می‌تواند توسعه شبیه‌ساز را در آینده آسان‌تر کند. نرم‌افزار Matlab/Simulink نیز دارای زبان گرافیکی است ولی ارتباط گرافیکی آن با کاربر در حین اجرای شبیه‌سازی چندان پیشرفته نیست. همچنین با کمک ابزار شبیه‌سازی RTLAB شبیه‌سازی زمان-حقیقی مدل‌های سیستم‌های الکتریکی پیچیده در محیط Simpower براحتی قابل اجراست. این ابزار با مدل‌های Simulink ارتباط برقرار می‌کند و از طریق ابزارهای ARTEMIS و RT-Event به صورت زمان-حقیقی مدل‌های Simpower را شبیه‌سازی می‌کند. نرم‌افزارهای Maplesim و Dymola نیز هر چند در بعضی حوزه‌ها از قابلیت‌های بالایی برخوردارند اما از جامعیت کافی برای استفاده به عنوان بستر نرم‌افزاری اصلی یک شبیه‌ساز برخوردار نیستند.

۳-۱- شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی

در این بخش ابتدا به توصیف مدل توربین بادی و زیرسیستم‌های مختلف آن پرداخته می‌شود. سپس مروری کوتاه بر فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی و کدهای مختلف توسعه داده شده برای مدل کردن بخش‌های مختلف آن صورت خواهد گرفت. در انتها برای شبیه‌سازی قسمت‌های مختلف توربین بادی که شامل بخش مکانیکی، الکتریکی و کنترلی می‌باشد، مناسب‌ترین ساختار بر اساس ویژگی‌های آن انتخاب می‌گردد.

۳-۱-۱- مدل‌سازی توربین بادی

با پیشرفت و توسعه صنایع انرژی بادی، نیاز برای طراحی توربین‌های بادی ایمن با هزینه مناسب رو به افزایش است. در نتیجه شبیه‌سازی عملکرد و ارزیابی طراحی‌های صورت گرفته از اهمیت بالایی برخوردار است. یک توربین بادی بطور کلی از بخش‌های مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده‌است، که البته از آنجا که توربین نیروی محرکه خود را از باد می‌گیرد، بخش آیرودینامیک نیز به بخش‌های فوق اضافه می‌گردد. مدل در نظر گرفته شده برای توربین در این پروژه از نوع سرعت متغیر و پیچ متغیر است به این معنی که توربین می‌تواند برای ماکزیمم کردن توان تولیدی در سرعت‌های بهینه متفاوت چرخش کند و همچنین برای محدود کردن سرعت می‌تواند زاویه پیچ پره‌ها را تغییر دهد.

بخش مکانیکی توربین شامل پره، برج و فنداسیون است که از طریق درایوترین (مجموعه شفت و گیربکس) به بخش الکتریکی که شامل ژنراتور و مبدل می‌باشد، متصل است. ژنراتور توربین برای توربین‌های سرعت متغیر عموماً از نوع DFIG²⁶ و یا PM²⁷ می‌باشد که در این پروژه از نوع DFIG در نظر گرفته می‌شود. مبدل ژنراتور DFIG نیز از نوع پشت-به-پشت²⁸ است که یک مبدل، سمت شبکه و مبدل دیگر سمت روتور قرار می‌گیرد و از طریق یک لینک DC به هم مرتبط می‌گردند. بخش آیرودینامیک شامل مدل باد است که اندازه و جهت باد اعمالی را در صفحه روتور معین می‌کند. همچنین نیروها و گشتاورهای آیرودینامیک ناشی از باد نیز تحت تاثیر عواملی چون سایه برج، ویک²⁹ پره و ضرایب پسا³⁰ و درا³¹ پره‌ها تعیین می‌شوند.

یکی دیگر از بخش‌های مهم و تأثیرگذار در رفتار توربین بادی، سیستم کنترل است. این سیستم متشکل از مجموعه سنسورها، عملگرها و کنترل‌کننده می‌باشد و کنترل توربین بادی را در ۳ بخش کنترل پیچ، کنترل یاو و کنترل گشتاور انجام می‌دهد. در کنترل پیچ، کنترل‌کننده، زاویه پره را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که بیشترین توان از باد استحصال گردد. در کنترل یاو، زیر سیستم یاو که شامل موتور و درایو آن می‌باشد، نرخ زاویه یاو را از کنترل‌کننده دریافت کرده و با چرخاندن ناسل توربین، باعث همراهی روتور با باد می‌گردد. در کنترل گشتاور نیز گشتاور مرجع الکتریکی به گونه‌ای تعیین می‌گردد که علاوه بر تولید بیشینه توان محدودیت‌های سرعت و بارهای دینامیکی نیز برآورده گردد.

²⁶ Doubly Fed Induction Generator

²⁷ Permanent Magnet

²⁸ Back-To-Back

²⁹ wake

³⁰ Drag

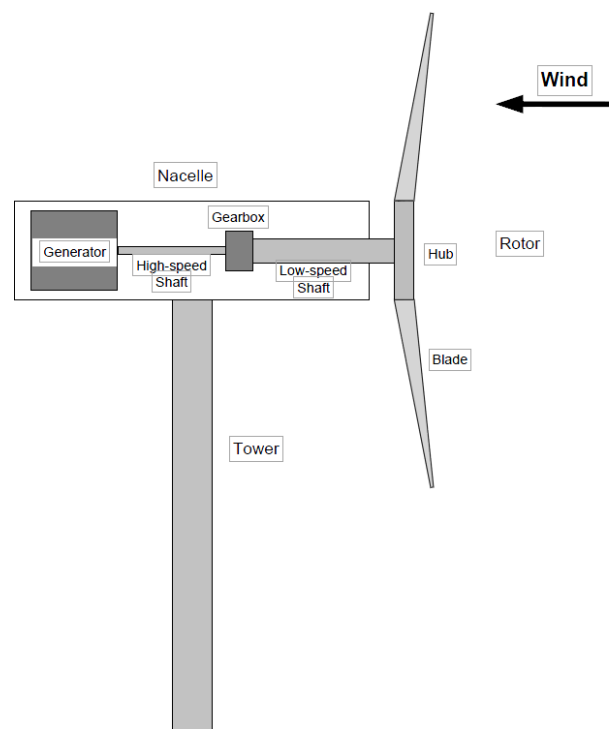
³¹ Lift

در ادامه بخش‌های مختلف مدل توربین بادی معرفی می‌گردد.

مدل دینامیک حرکت توربین بادی

دینامیک حرکت توربین بادی متأثر از نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی ناشی از وزش باد و ساختار آیرودینامیکی پره‌ها و برج و همچنین ساختار مکانیکی بخش‌های مختلف و خاصیت کشسانی این بخش‌ها می‌باشد. به این ترتیب برای مدل کردن دینامیک حرکت توربین بادی باید علاوه بر توسعه مدل مکانیکی بخش‌های مختلف، نیروهای آیرودینامیک و نحوه تاثیر این نیروها نیز بر ساختار مکانیکی توربین مدل شود.

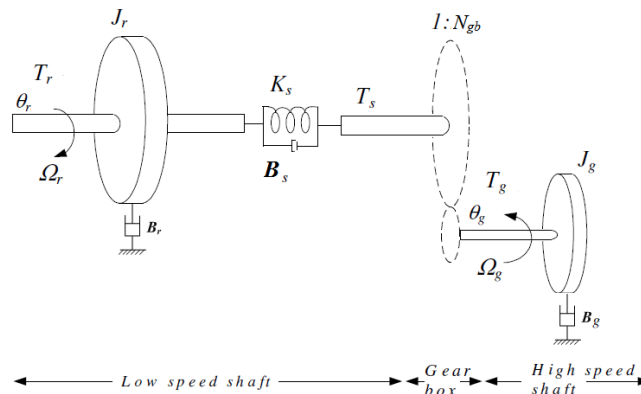
مدل مکانیکی توربین بادی شامل مدل‌های دینامیکی فونداسیون، برج، ناسل، درایوترین و پره و ارتباط این دینامیک‌ها با یکدیگر می‌باشد. این مدل با دریافت پارامترهای فیزیکی بخش‌های مختلف و با حل معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت توربین، مقادیر لحظه‌ای متغیرهای مختلف را در اختیار قرار می‌دهد. میزان پیچیدگی و دقت معادلات حرکت بستگی به درجات آزادی و مدهای مختلف انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شده دارد. به عنوان مثال برج می‌تواند شامل مدهای حرکت به سمت جلو-عقب، حرکت به سمت‌های طرفین و پیچش حول محور عمودی و در هر جهت خود شامل چندین مد باشد. و یا برای پره می‌توان مدهای فلپ، لبه و پیچش را در نظر گرفت. هرچه ابعاد توربین افزایش یابد بر میزان انعطاف‌پذیری آن افزوده شده و در نتیجه مدهای بیشتری در رفتار توربین نمایان می‌گردد که تداخل این مدها با یکدیگر، تحریک و وقوع نوسانات رزونانسی را در صورت عدم کنترل مناسب منجر می‌گردد.



شکل ۱۶-۱- شماتیک اجزاء توربین بادی

درایوتورین

درایوتورین یکی از اجزاء اصلی توربین می‌باشد که انرژی مکانیکی را از پره‌ها به ژنراتور انتقال می‌دهد. این عنصر را می‌توان همانند شکل ۱۷-۱ متشکل از یک شفت سرعت بالا برای اتصال گیربکس به ژنراتور، یک شفت سرعت پایین در سمت روتور و یک گیربکس (در حالت کلی می‌تواند بدون گیربکس نیز باشد) در نظر گرفت. به علت بزرگ بودن ضریب گیربکس، نوسانات سمت روتور با ضریب بزرگی به سمت ژنراتور منتقل می‌شود که این می‌تواند در کیفیت توان تولیدی تأثیر زیادی داشته باشد. از این رو مدل‌سازی دقیق درایوتورین و شناسایی دقیق پارامترهای آن از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۱۷-۱- شماتیک مدل درایوتورین و عناصر تشکیل دهنده آن

در مدل نشان داده شده در شکل ۱۷-۱، T_r گشتاور شفت روتور ناشی از باد، T_g گشتاور الکتریکی ژنراتور، θ_r و θ_g به ترتیب زاویه چرخش روتور و ژنراتور، J_r و J_g اینرسی روتور و ژنراتور، K_s و B_s به ترتیب ضرایب فنری و دمپینگ شفت درایوتورین و B_r و B_g ضرایب دمپینگ روتور و ژنراتور می‌باشد. در مدل نشان داده شده در شکل ۱۷-۱ گیربکس به عنوان یک جسم صلب که سرعت و گشتاور را با یک ضریب بازدهی مشخص انتقال می‌دهد در نظر گرفته شده است. در مدل‌های پیشرفته تر، می‌توان گیربکس را نیز به عنوان یک جسم غیر صلب و یا متشکل از چند جسم صلب در نظر گرفت و معادلات پیچیده‌تری را استخراج کرد.

برج

برج که از پایین به فونداسیون متصل است، از بالا مجموعه ناسل و روتور را نگه می‌دارد. به علت طول زیاد برج در توربین‌های بزرگ و خاصیت انعطاف پذیری آن، می‌توان برج را بصورت مجموعه ای از چند میله^{۳۲} صلب که هر یک از سمت پایین به میله زیرین متصل شده است مدل کرد. معادلات هر بخش مطابق با روابط یک جسم صلب اما نسبت به یک مرجع متحرک نوشته می‌شود. به این ترتیب هر چه تعداد این میله‌های صلب بیشتر باشد، مدل دقیق تر است اما از طرفی به علت افزایش معادلات بر پیچیدگی حل آن افزوده می‌شود.

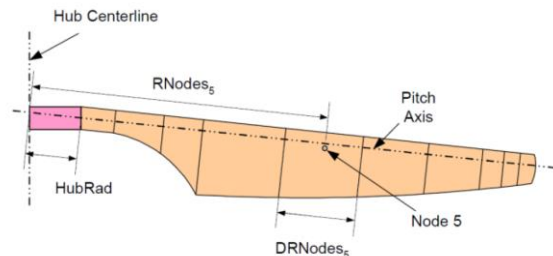
پره و هاب

پره‌ها می‌توانند به تعداد ۲ یا ۳ عدد تعریف شوند که از سمت ابتدا توسط هاب^{۳۳} به شفت درایوتورین اتصال می‌یابند. همچنین هر یک از پره‌ها می‌توانند بطور مستقل حول محور طولی گردش کنند و با تغییر

³² beam

³³ Hub

شکل سطح آیرودینامیکی که در مقابل باد قرار گرفته گشتاور آیرودینامیکی دریافتی را تغییر دهند. پره‌ها بصورت میله‌های منعطف مدل‌سازی می‌گردند. ساختار پره بگونه‌ای است که هم شکل سطح مقطع و هم جهت محور آن به علت پیچش سازه در طول پره، متغیر است. به این ترتیب برای مدل کردن پره و محاسبه نیروهای آیرودینامیک اعمالی که به شکل سطح مقطع بستگی دارد، پره نیز همانند برج به صورت مجموعه‌ای از نوارهای مشخص و صلب در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۸-۱- مدل پره

هاب سازه‌ایست که پره‌ها را نگه می‌دارد و مجموعه موتورهای پیچ و گیربکس مربوطه را در خود جای می‌دهد.

چرخش ناسل

ناسل که دربردارنده مجموعه درایوتترین و ژنراتور است می‌تواند حول محور برج بچرخد. این ساختار در زمانی که جهت باد تغییر کند در جهت همراستایی جهت روتور با باد عمل می‌کند. دینامیک چرخش ناسل عموماً کند بوده و می‌تواند به صورت جرم و فنر و دمپر مدل شود.

مدل آیرودینامیک

نیروی محرکه چرخش توربین بادی از باد تامین می‌شود. بنابراین رفتار توربین بادی بیش از هر چیزی متأثر از مشخصات باد اعمالی و نحوه انتقال نیروی باد به شفت روتور می‌باشد.

مدل باد

باد اعمالی به توربین از دو بخش معین و تصادفی تشکیل می‌شود. بخش معین یا باد میانگین از یک ساختار هموار و یکنواخت برخوردار است که این بخش بعداً در سطح صفحه روتور نسبت به ارتفاع و تحت تاثیر سایه برج در راستای عرضی نسبت به سایر نقاط تغییر می‌کند. بخش تصادفی نیز با ضرایب پراکندگی مختلف با فرکانس تغییرات بالا به باد میانگین افزوده می‌شود. به این ترتیب میزان بادی که بر هر بخش یک پره اعمال می‌شود علاوه بر اینکه با دیگر بخش‌ها متفاوت است، در طول یک دور چرخش پره نیز در صفحه روتور تغییر می‌کند.

در این پروژه از مدل‌های استاندارد تعریف شده در استاندارد IEC6100 برای مدلسازی بادهای گوناگون استفاده شده است. این مدل‌ها که در شکل باد میانگین و توربولانس با یکدیگر متفاوتند شامل موارد زیر می‌گردند.

۱. پروفایل بادهای نرمال^{۳۴} (NWP)

۲. مدل توربولانسی نرمال^{۳۵} (NTM)

³⁴ Normal Wind Profile

³⁵ Normal Turbulance Model

۳. مدل بادهای با سرعت شدید^{۳۶} (EWM)

۴. تندبادهای با عملکرد شدید^{۳۷} (EOG)

۵. مدل توربولانس شدید^{۳۸} (ETM)

۶. تغییرات جهت شدید^{۳۹} (EDC)

۷. تندبادهای با انسجام شدید و با تغییر جهت^{۴۰} (ECD)

۸. برش باد شدید^{۴۱} (EWS)

برای یافتن مشخصات کامل هر یک از بادهای فوق می‌توان به مراجع [54] و [55] مراجعه کرد. در این پروژه برای تولید بادهای فوق از نرم افزار TurbSim استفاده می‌شود. TurbSim یک شبیه‌ساز برای بادهای توربولانسی با میدان کامل است که توسط مؤسسه NREL توسعه داده شده‌است. این کد از مدل‌های آماری برای شبیه‌سازی عددی سری‌های زمانی بردارهای سرعت باد سه مؤلفه‌ای در نقاط مختلف یک صفحه دو بعدی در فضا استفاده می‌کند [56]. خروجی TurbSim بصورت جداولی است که توسط نرم‌افزار AeroDyn تحلیل می‌شود. AeroDyn با درونیابی میدان‌های تولید شده توسط TurbSim در هر دو حوزه زمان و مکان، سرعت‌های باد محلی را تولید می‌کند.

مدل نیروهای آیرودینامیکی

در حالت کلی نیروها و گشتاورهای اعمالی به یک جسم در درون یک سیال به عوامل مختلفی نظیر چگالی و سرعت نسبی سیال و شکل هندسی جسم که خود دربردارنده اطلاعاتی نظیر ضرایب پسا و درآ می‌باشد بستگی دارد. در توربین بادی بعلاوه تغییر سرعت باد در طول صفحه روتور به علت عواملی نظیر برش باد^{۴۲} و سایه برج^{۴۳}، تغییر شکل هندسی پره در طول پره، چرخش پره حول محور پیچ و گردش روتور با سرعت‌ها و شتاب‌های مختلف و همچنین اعطاف‌پذیری پره‌ها و برج، پدیده‌های پیچیده مختلفی در رفتار آیرودینامیکی توربین تأثیرگذار هستند. در این پروژه برای مدل کردن این پدیده‌ها و در نهایت استخراج نیرو و گشتاور آیرودینامیکی در نقاط مختلف سازه از کد AeroDyn استفاده می‌شود. این کد که توسط دانشگاه یوتا و برای مرکز ملی فناوری بادی آمریکا نوشته شده است دارای ساختاری ماژولار است که امکان ارتباط آسان با کدهای دینامیک سازه‌ای را فراهم می‌کند.

روش‌های گوناگونی برای مدل کردن دینامیک یک ساختار چندبخشی و استخراج معادلات حاکم بر آن وجود دارد که از لحاظ پیچیدگی محاسبات، دقت و زمان حل معادلات متفاوتند. از آنجا که استخراج معادلات دینامیکی و آیرودینامیکی و پدیده‌های مختلف تأثیرگذار نظیر استال دینامیک^{۴۴}، ویک پره و جبران‌سازی محدودیت‌های مدلسازی نیاز به یک دانش گسترده و پیشرفته در زمینه مکانیک و آیرودینامیک و صرف زمان برای ارزیابی صحت مدل‌ها با ابزار مختلف دارد که در بودجه و زمان پروژه

³⁶ Extreme Wind speed Model

³⁷ Extreme Operating Gusts

³⁸ Extreme Turbulance Model

³⁹ Extreme Direction Change

⁴⁰ Extreme Coherent gusts with Direction change

⁴¹ Exeterme Wind Shear

⁴² Wind shear

⁴³ Tower shadow

⁴⁴ Dynamic stall

نمی‌گنجد، در این پروژه از یک کد آماده و تأیید شده برای مدل مکانیکی توربین استفاده می‌شود و تمرکز بر افزودن سایر زیرسیستم‌ها و فراهم ساختن بستری برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی کل مجموعه و تست و ارزیابی الگوریتم‌های کنترلی و سوپروایزری قرار می‌گیرد.

کدهای زیادی توسط شرکت‌ها و موسسات مختلف برای مدلسازی دینامیک توربین بادی توسعه داده شده‌اند که از تأییدیه معتبر بین‌المللی برخوردارند. در ادامه به بررسی تعدادی از این کدها پرداخته می‌شود.

بررسی کدهای توسعه داده شده توسط مؤسسات مختلف برای شبیه‌سازی دینامیکی توربین بادی

برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توربین بادی، کدهای مختلفی توسط شرکت‌های گوناگون نوشته شده است که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزار Bladed از شرکت GH، کد Fast از شرکت NREL، کد ADAMS از شرکت MSC، نرم‌افزار DHAT از شرکت GL، کد FLEX5 و کد HAWC2 از شرکت DTU اشاره کرد. در ادامه به بررسی تعدادی از این کدها پرداخته می‌شود.

نرم‌افزار Bladed

Bladed یکی از معتبرترین نرم‌افزارهای تجاری موجود برای شبیه‌سازی رفتار و محاسبه بار توربین‌های بادی است. این نرم‌افزار از یک ساختار گرافیکی برخوردار است و طیف وسیعی از زیرسیستم‌های توربین بادی نظیر آیرودینامیک و سازه، زیرسیستم الکتریکی، زیرسیستم کنترل و سنسورها و عملگرهای مختلف را دربر می‌گیرد. Bladed در عمل توسط توربین‌های بادی زیادی در سراسر دنیا ارزیابی شده و اعتبار یافته است.

مدل آیرودینامیک در این نرم‌افزار از ترکیبی از تئوری‌های المان پره و ممنتم پره استفاده می‌کند و پدیده‌های مختلفی نظیر استال دینامیک، ویک پره را مدل می‌کند. همچنین برای مدل مکانیکی سازه از روش مدلسازی چند جرمی به همراه مدلسازی مودال استفاده می‌شود که در آن انعطاف پذیری پره و برج توسط مودهای مختلف نوسانی مدل می‌گردد. Bladed می‌تواند بیش از ۳۰ مود نوسانی را برای بخش‌های مختلف سازه در نظر بگیرد. همچنین مدل درایوتترین این نرم‌افزار می‌تواند مودهای پیچشی برای شفت‌های سرعت بالا و سرعت پایین را بطور مجزا در نظر بگیرد و مدلی دقیق‌تر از مدل دو جرمه مرسوم فراهم کند.

نرم‌افزار ADAMS

نرم‌افزار ADAMS که مخفف Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System است، یکی از نرم‌افزارهای معتبر برای مدلسازی و شبیه‌سازی و تحلیل سازه‌های مختلف مکانیکی در زمینه‌های رباتیک، خودرو و هوافضا می‌باشد. این نرم‌افزار که یک کد تجاری است می‌تواند هر سازه مکانیکی صلب را با هر تعداد درجه آزادی (بیش از ۱۰۰ DOF) و با دقت بسیار بالا مدل کند و از آن برای مدل کردن سازه توربین نیز استفاده می‌شود. ADAMS با استفاده از تکنیک جرم‌های فشرده که توسط میدان‌های منعطف به هم متصل شده‌اند، مشابه با فنر و دمپرهای چندبندی برای مدل کردن برج و پره به کار می‌رود. از آنجا که این کد شامل الگوریتم‌های آیرودینامیک نیست، برای مدل کردن توربین بادی می‌باید با کدهای آیرودینامیکی ارتباط برقرار کند.

نرم‌افزار DHAT

این نرم‌افزار یکی از قدیمی‌ترین کدها در زمینه توربین بادی است که توسط شرکت ⁴⁵ GL (یکی از شرکت‌های معتبر در زمینه صدور گواهینامه برای توربین‌های بادی) از اوایل دهه ۸۰ میلادی برای آنالیز سازه‌ای توسعه داده شد و به مرور زمان تکمیل گردید. بخش آیرودینامیک این کد از تئوری BEM برای محاسبات نیروهای پسا و درآ استفاده می‌کند و قابلیت در نظر گرفتن پدیده‌های مختلفی نظیر استال و یک دینامیکی را دارا می‌باشد. این کد مسئله انعطاف‌پذیری در پره، درایو ترین و برج را به روش آنالیز مودال مدل می‌کند و می‌تواند هر پره را بطور مستقل با ۶ مود مدل کرده و کوپلینگ فلپ-لبه را در نظر بگیرد. برای برج نیز مودهای جلو-عقب، سمت-به-سمت و مود پیچش برج در نظر گرفته می‌شود. همچنین الگوریتم‌های کنترل پیچ بصورت PID و کنترل گشتاور بصورت PI نیز با پارامترهای قابل تنظیم در دسترس قرار دارند. پروفایل باد توربولانسی در این کد با استفاده از طیف ESDU تولید می‌شود که یک میدان باد سه مؤلفه‌ای و ۳ بعدی در اختیار قرار می‌دهد. در نهایت توابع مختلفی برای پردازش نهایی نتایج به منظور محاسبات بار در این کد فراهم شده است. این کد به صورت تجاری در دسترس قرار ندارد.

کد FLEX5

کد FLEX5 توسط موسسه DTU ایجاد شده است. این کد توانایی شبیه‌سازی توربین شامل یک تا سه پره، ژنراتور با سرعت ثابت و متغیر را دارا می‌باشد. همچنین توربین را با درجات آزادی کم و به صورت کاملاً غیر خطی، با قابلیت انجام محاسبات بار مدل می‌کند [40].

کد FAST

کد FAST یکی از شبیه‌سازهای آیروالاستیک توربین بادی است که برای مدل‌سازی توربین‌های بادی با محور افقی ⁴⁶ ایجاد شده است. این کد که دارای تأییدیه "محاسبه بار توربین‌های بادی روی-خشکی برای طراحی و صدور گواهینامه" از مؤسسه GL می‌باشد، توسط شرکت ⁴⁷ NREL بصورت منبع باز توسعه داده شده است و بسیاری از سازندگان توربین بادی در آمریکا از آن به عنوان مرجعی برای تعیین بارهای مکانیکی، در طراحی‌های خود بهره برده‌اند. توسط کد FAST، توربین‌های بادی با دو یا سه پره قابل مدل‌سازی می‌باشند.

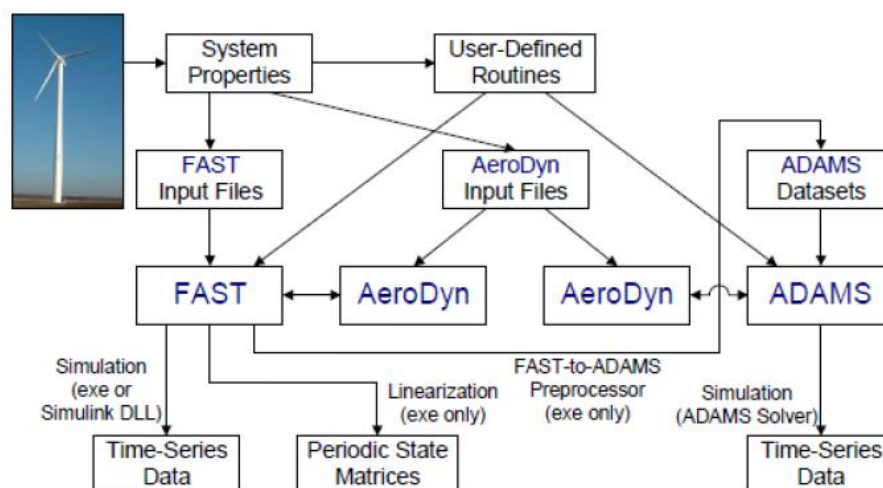
این کد همانند نرم‌افزار Bladed برای مدل‌سازی مکانیکی سازه از مدل چندجرمی استفاده می‌کند و از آنالیز مودال به منظور در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری پره و برج و به تعداد حداکثر ۲۴ درجه آزادی بهره می‌برد. این درجات آزادی شامل: ۲ مود برای خمش فلپ و ۱ مود برای خمش لبه هر پره، مودهای جلو-عقب و سمت-به-سمت برج هر یک شامل ۲ مود، ۶ درجه آزادی برای حرکت‌های انتقالی و وضعی پلتفرم، ۱ درجه برای حرکت یاو ناسل، ۲ درجه آزادی برای چرخش شفت سرعت بالا و سرعت پایین درایو ترین و در نهایت ۲ درجه آزادی برای حرکت‌های تیل ⁴⁸ و فرل ⁴⁹ روتور می‌باشند. کد FAST برای بخش آیرودینامیک از کد AeroDyn استفاده می‌برد. همچنین پروفایل‌های استاندارد باد که توسط کد TurbSim تولید می‌شوند به عنوان ورودی برای این کد قابل استفاده است.

⁴⁵ Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH⁴⁶ Horizontal axis wind turbine(HAWT)⁴⁷ National Renewable Energy Laboratory⁴⁸ tilt⁴⁹ Furl

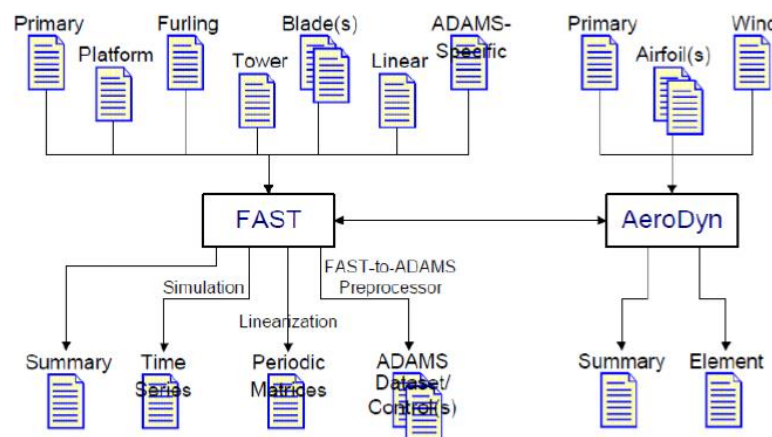
کد FAST بصورت مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده به زبان فرترن است که پس از کامپایل در یکی از ۳ مد عملکردی: شبیه‌سازی، خطی‌سازی و یا تحلیل مکانیکی توسط ارتباط با نرم‌افزار ADAMS قابل اجرا است. در مد شبیه‌سازی که می‌تواند بصورت اجرای یک فایل اجرایی (.exe) و یا بصورت واسط با یک فایل dll در محیط سیمولینک MATLAB و یا LabVIEW اجرا گردد، با حل معادلات غیرخطی حرکت و با دریافت ورودی‌های لازم و استخراج نیروها و ممان‌های آیرودینامیکی در برنامه AeroDyn، مقادیر زمانی پارامترهای مختلف توربین در اختیار قرار می‌گیرد. در واقع برنامه AeroDyn بصورت یک برنامه موازی در کنار FAST و یا ADAMS بکار گرفته می‌شود و مسئول شکل‌دهی میدان باد و محاسبه نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی مختلف اعمالی به توربین می‌باشد. در مد خطی‌سازی، معادلات خطی شده توربین با درجه دلخواه و حول یک نقطه کاری مطلوب در اختیار قرار می‌گیرد.

در نهایت در مد ارتباط با ADAMS، ساختار مکانیکی توربین توسط اطلاعات ورودی FAST در نرم‌افزار ADAMS تعریف شده و حل معادلات، خطی‌سازی و تحلیل دینامیکی در این محیط انجام می‌گیرد. شرکت NREL با بکارگیری این کد و انجام فرایند پیش‌پردازش در کد FAST به افزایش سرعت محاسبات این کد پرداخته است. کد ADAMS از قابلیت مدل‌سازی درجات آزادی بیشتری نظیر انعطاف‌پذیری پیچشی پره نیز برخوردار است (که البته در توربین‌های با پره‌های سخت، اهمیت چندانی ندارد).

شکل ۱۹-۱ و شکل ۲۰-۱ به ترتیب مدهای مختلف عملکردی و ورودی‌ها و خروجی‌های کد FAST را نشان می‌دهد. ورودی‌های FAST در واقع شامل مشخصات المانهای مختلف مکانیکی و همچنین تنظیمات اجرای کد FAST از قبیل مشخصات مد عملکردی، شرایط اولیه، پروفایل باد و تعریف درجات آزادی مورد نظر می‌باشد. پروفایل‌های مختلف باد، از قبل بصورت آفلاین توسط نرم‌افزار TurbSim که توسط شرکت NREL توسعه داده شده است، به ازای مشخصات مختلف باد از قبیل مقدار میانگین، اندازه توربولانس و پارامترهای تصادفی ساخته شده و در کد FAST(AeroDyn) صدا زده می‌شود.



شکل ۱۹-۱- مدهای عملکردی FAST



شکل ۲۰-۱- ورودی‌ها و خروجی‌های کد FAST

انتخاب کد مناسب برای استفاده در شبیه‌ساز

برای انتخاب یک کد مناسب جهت استفاده در شبیه‌ساز توربین بادی از میان کدهای معتبر موجود برای مدلسازی دینامیک توربین بادی که تعدادی از آن‌ها در بالا به اختصار شرح داده شد، علاوه بر دقت کد در مدلسازی، ۲ فاکتور مهم دیگر مورد نظر می‌باشد: ۱- منبع باز بودن و ۲- دارا بودن تأییدیه معتبر. به این ترتیب از آنجا که کد FAST دارای تأییدیه معتبر از شرکت GL برای انجام محاسبات بار است و همچنین بصورت منبع باز در دسترس است و در طی نزدیک به ۲۰ سال به‌روز شده و ایرادات آن با آزمایشات مختلف مرتفع گردیده است و به عنوان یک مرجع معتبر در صنایع، مؤسسات و دانشگاه‌های مختلف استفاده می‌شود، این کد در این پروژه به عنوان هسته اصلی محاسبات دینامیکی سازه و آیرودینامیک در شبیه‌ساز به کار گرفته خواهد شد.

مدل زیرسیستم الکتریکی

مدل زیرسیستم الکتریکی توربین بادی از ژنراتور و مبدل آن تشکیل می‌شود و رفتار سیستم الکتریکی را در حالت کارکرد عادی و در حضور خطاهای مختلف شبکه نظیر افت ولتاژ، اتصال کوتاه و مدار باز مدل می‌کند. ژنراتور می‌تواند به ۳ صورت ۱- مدل ساده، ۲- مدل میانگین و ۳- مدل جزئی مدل گردد. در مدل ساده ژنراتور همچون یک عملگر ساده و بصورت یک تابع تبدیل به همراه یک تاخیر مدل می‌شود که گشتاور مرجع را دریافت کرده و پس از یک حالت گذرای کوتاه، آن گشتاور را تولید می‌کند. مشخصات این حالت گذرا (بیشترین پرش، زمان رشد، زمان نشت،...) توسط تابع تبدیل مشخص می‌شود. همچنین در این مدل برای در نظر گرفتن رفتار در حضور خطاهای مختلف، بسته به نوع خطا یک ترم به خروجی مدل اضافه می‌گردد.

در مدل میانگین، ژنراتور به صورت فازوری مدل شده و فرکانس شبکه و فرکانس ولتاژها و جریان‌های روتور و استاتور ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این حالت مدارات استاتور و روتور بصورت تونن مدل شده و تنها مقادیر متوسط ولتاژها و جریان‌ها دیده می‌شوند و گشتاور و توان خروجی بصورت حالت پایدار از روی ولتاژها و جریان‌ها محاسبه می‌گردد. در این مدل نیز می‌توان اثرات خطاهای شبکه را با افزودن ترم‌های اضافی بصورت تقریبی در نظر گرفت.

منظور از مدل جزئی، مدلی است که مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان در مدارات استاتور و روتور دیده می‌شود. در این مدل شار و میدان‌های مغناطیسی روتور و استاتور و تأثیر متقابل این میدانها بر یکدیگر و همچنین تغییر فرکانس شبکه و یا تفاوت لحظه‌ای فرکانس چرخش با فرکانس شبکه مخصوصاً در زمان

راه‌اندازی در نظر گرفته می‌شود. در اینجا تأثیر رخداد هر نوع خطایی در شبکه خود بخود دیده می‌شود و نیازی به افزودن ترم‌های تقریبی نیست.

مبدل مورد استفاده برای ژنراتور DFIG در سیستم‌های توربین بادی از دو مبدل بصورت پشت-به-پشت تشکیل می‌شود. یک مبدل در سمت شبکه قرار دارد و وظیفه اصلی آن تولید یک ولتاژ DC ثابت برای مبدل دیگر تحت بارهای مختلف است. مبدل دیگر در سمت روتور قرار گرفته و وظیفه آن تنظیم ولتاژ و جریان روتور است به گونه‌ای که گشتاور و توان مورد نظر تولید گردد. هر یک از مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور به صورت یک سوئیچ IGBT در نظر گرفته شده و کنترل مربوط به آنها برای ساخت سیگنال PWM از روش کنترل برداری FOC استفاده می‌کند.

زیرسیستم کنترل

سیستم کنترل شامل سه زیر سیستم کنترل پیچ، کنترل یاو و کنترل گشتاور الکتریکی می‌باشد. سیستم کنترل پیچ که وظیفه آن کنترل سرعت چرخش روتور می‌باشد، از ساختار PID و بصورت جدول‌بندی بهره‌بردار است. این سیستم خطای سرعت ژنراتور را به عنوان ورودی دریافت کرده و اندازه زوایای پیچ پره‌ها را در خروجی تعیین می‌کند. سیستم کنترل یاو از یک کنترل on-off بهره می‌برد و نرخ تغییرات زاویه یاو را برای جبران خطای یاو در خروجی تعیین می‌کند.

کنترل گشتاور بصورت یک جدول جستجو شامل داده‌های منحنی گشتاور-سرعت تعریف می‌شود. این کنترلر بصورت حلقه-باز بر اساس اندازه سرعت ژنراتور، گشتاور مورد نیاز را در خروجی تعیین می‌کند.

عملگر پیچ و یاو

زیرسیستم پیچ شامل موتور و درایو مربوط به آن برای هر یک از پره‌ها می‌باشد. این بلوک با دریافت مقدار مطلوب زاویه پیچ از کنترلر پیچ و یا سیستم سوپروایزری، با در نظر گرفتن پارامترهای اصطکاک و ممان پره، محدودیت‌های سرعت و شتاب زاویه‌ای و محدودیت ماکزیمم گشتاور قابل اعمال، مقدار لحظه‌ای زاویه پیچ پره را مشخص می‌کند. همچنین خطاهای پره شامل خطای چرخش آزاد و یا خطای گیرکردن پره بر روی یک زاویه خاص، نیز در این بلوک مدل می‌شوند. مقدار زاویه پیچ حاصل شده در این بلوک، برای محاسبه نیروها و گشتاورهای اعمالی به توربین در کد FAST به کار می‌رود.

زیر سیستم یاو نیز شامل موتور و درایو آن می‌باشد. این زیرسیستم فرامین یاو را بصورت نرخ زاویه یاو از کنترلر یاو دریافت کرده و با چرخاندن ناسل توربین با نرخ مرجع در نهایت موجب همراستایی روتور با باد می‌گردد. دینامیک یاو به علت کندی این سیستم، با یک تابع تبدیل مرتبه اول قابل مدلسازی است.

سوپروایزری

سیستم توربین بادی بسته به شرایط مختلف کاری، در مدهای عملکردی متفاوتی قرار می‌گیرد. این مدها شامل مد آماده به کار، مد انتظار، مد تولید توان و مد خاموشی نرمال و اضطراری می‌باشد. سیستم سوپروایزری با رصد شرایط توربین از قبیل سرعت و شتاب روتور، گشتاور و توان ژنراتور، شتاب‌های برج، سرعت باد و سایر مقادیر مورد نیاز، مد کاری توربین را مشخص می‌کند. این بخش این امکان را به کاربر می‌دهد تا با انتخاب شرایط ورود و خروج به هر یک از مدهای کاری، عملیات مورد نظر شامل مقداردهی سیگنال‌های مرجع و یا اعمال ترمز و خاموشی را برنامه‌ریزی کند.

مانیتورینگ و شکل دهی سیگنال

در این بخش، خروجی‌های مورد نظر با نرخ دلخواه نمونه‌گیری شده و نمایش داده می‌شود. همچنین فیلترهای مختلف پایین‌گذر، میان‌گذر و فیلتر ناچ نیز با اطلاعات فرکانسی مطلوب قابل اعمال بر روی هر یک از خروجی‌ها می‌باشد.

۲-۳-۱- مروری بر فعالیت‌های انجام گرفته در شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی

در مرجع [44] برای ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی، ابتدا مدل دینامیکی توربین بادی بر اساس ژنراتور القایی در محیط سیمولینک Matlab پیاده‌سازی شده‌است، سپس برای اجرا به صورت زمان-حقیقی از RTLAB استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی صورت گرفته‌است. در مرجع [45] شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی با استفاده از ابزار RTLAB صورت گرفته‌است. ژنراتور مورد استفاده در این مقاله از نوع DFIG بوده و از طریق روش کنترل برداری، کنترل شده‌است. در مرجع [46] شبیه‌سازی زمان-حقیقی سخت افزار در حلقه توربین بادی و کنترل ژنراتور DFIG در محیط Simulink با استفاده از ابزار RTLAB، صورت گرفته‌است. در این مقاله از روش کنترل شار جهت یافته⁵⁰، استفاده شده‌است و کنترل توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل از هم صورت می‌گیرد. در مرجع [47] ارتباط بین توربین‌های بادی و شبکه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. شبکه توسط شبیه‌ساز زمان-حقیقی دیجیتال (RTDS) و توربین بادی به همراه تجهیزات الکترونیک قدرت در DSPACE شبیه‌سازی شده‌اند. در مرجع [48] با استفاده از Matlab\Simulink توربین بادی به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی شده‌است. در این مقاله معادلات دینامیکی هر قسمت از سیستم در سیمولینک پیاده‌سازی شده‌اند و با استفاده از Real time workshop شبیه‌سازی زمان-حقیقی صورت گرفته‌است. در مرجع [49] با استفاده از پلتفرم‌های Matlab و Labview و ارتباط بین آن‌ها توربین بادی را به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی کرده‌است. به وسیله Labview امکان ایجاد رابطه گرافیکی با کاربر برقرار می‌شود و در نتیجه این سیستم برای آموزش آکادمیک بدون نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی و با هزینه کم مورد استفاده قرار می‌گیرد و به وسیله ماژول Simulation Interface Toolkit (SIT)، نرم‌افزار Labview می‌تواند با مدل شبیه‌سازی شده در سیمولینک ارتباط برقرار کند و داده‌ها را از سیمولینک دریافت کرده و به صورت زمان-حقیقی آن‌ها را مشاهده کند. نتایج آزمایشگاهی، عملکرد شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی را تأیید می‌کنند. مرجع [50] به مقایسه عملکرد دو توربین بادی با دو ژنراتور مختلف پرداخته‌است. توربین بادی با ژنراتور DFIG و ژنراتور القایی قفس‌سنجایی (SCIG) در محیط سیمولینک از نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی و کنترل شده‌اند. در مرجع [51]، توربین بادی به صورت زمان-حقیقی در حالت سخت‌افزار در حلقه شبیه‌سازی شده‌است. در این مقاله از Labview برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی استفاده شده و در آن، روش کنترل گشتاور به کار گرفته شده‌است. معادلات مکانیکی توربین و معادلات مربوط به ژنراتور در شبیه‌ساز Labview پیاده‌سازی شده‌اند. در مرجع [52]، ژنراتور سنکرون با قطب-های برجسته که به موتور DC متصل است در نرم‌افزار شبیه‌سازی Labview به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی شده‌است. سیستم کنترلی که سرعت موتور و ولتاژ سیم پیچ‌های استاتور موتور القایی را کنترل می‌کند نیز در Labview پیاده‌سازی شده‌است. در مرجع [53] سیستم توربین بادی متصل به شبکه، در Dymola مدل‌سازی شده‌است و توسط کنترل‌کننده خارجی که در C++ نوشته شده، کنترل شده‌است.

⁵⁰ Field oriented control

۳-۱- ساختار نرم‌افزاری شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی

در این پروژه جهت شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی، هدف استفاده از یک بستر نرم‌افزاری است که بتواند کد FAST را به صورت زمان-حقیقی اجرا کند و علاوه بر آن سایر زیرسیستم‌های دخیل در عملکرد توربین بادی نظیر زیرسیستم الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل پشت به پشت، زیرسیستم کنترل و سوپروایزری و عملگرها و سنسورها نیز پیاده‌سازی و به صورت زمان-حقیقی اجرا گردند. همچنین این نرم‌افزار باید از یک بستر گرافیکی مناسب و قابلیت برقراری ارتباط با سخت‌افزارهای مختلف نیز برخوردار باشد. در ادامه با توجه به مطالب بخش‌های گذشته و همچنین مطالب فصل ۱، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مناسب برای بدست آوردن این اهداف شرح داده شده‌اند.

شبیه‌سازی زمان-حقیقی کد FAST

در این پروژه شبیه‌سازی بخش مکانیک و آیرودینامیک توربین بادی همانطور که در بخش گذشته گفته شد توسط اجرای کد FAST صورت می‌گیرد. کد FAST که بصورت مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده به زبان فرترن است، قابلیت اجرا در نرم‌افزارهای MATLAB و LabVIEW را دارد. در MATLAB کد FAST در قالب یک S-Function کامپایل شده و توسط برنامه Simulink صدا زده می‌شود. این عمل بطور مشابه در LabVIEW با کامپایل شدن بصورت یک فایل dll و اجرا توسط LabVIEW صورت می‌گیرد.

MATLAB علی‌رغم توانایی در اجرای کد FAST در محیط Simulink اما امکان اجرای زمان-حقیقی این کد در محیط xPC-Target میسر نمی‌باشد. نرم‌افزار LabVIEW اما بنا به اذعان مؤسسه NREL قابلیت اجرای زمان-حقیقی کد FAST را در محیط LabVIEW-RT دارد. به این ترتیب در این پروژه LabVIEW به عنوان بستر اصلی برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی کد FAST انتخاب می‌گردد.

شبیه‌سازی زمان-حقیقی بخش الکتریکی

در این پروژه، بخش الکتریکی شامل ژنراتور DFIG و مبدل پشت به پشت می‌باشد. از آنجا که محیط SimPower از نرم‌افزار MATLAB از ابزار و ماژول‌های قوی و متنوع در بخش سیستم‌های قدرت برخوردار است و مدل ژنراتور DFIG و تجهیزات قدرت نظیر ترانسفورماتور، سوئیچ‌های IGBT و ... در این محیط در دسترس است، لذا به منظور اطمینان بیشتر از مدل‌های این بخش، از این محیط برای شبیه‌سازی زیرسیستم الکتریکی استفاده می‌شود و ارتباط این زیرسیستم با قسمت‌های دیگر توربین از قبیل بخش مکانیک و سیستم کنترل از طریق LabView انجام می‌گیرد.

مسئله مهم در شبیه‌سازی این قسمت این است که مدل‌های توسعه داده شده در SimPower را به علت گام زمانی بسیار کوچک مورد نیاز برای اجرا نمی‌توان براحتی به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی کرد. برای حل این مشکل، چنانچه استفاده از xPC-Target جوابگو نباشد، از راه‌کارهای دیگر نظیر تولید کد C از مدل SimPower و اجرای آن در محیط LabVIEW-RT و یا به کارگیری ابزار شبیه‌سازی RTLAB استفاده می‌شود. این ابزار از طریق ارتباط با مدل Simpower و با استفاده از ابزارهای حل ARTEMIS و RT-Event آن را به صورت زمان-حقیقی شبیه‌سازی می‌کند.

ایجاد بستر گرافیکی مناسب و ارتباط با سخت‌افزارهای خارجی

همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد، در بین شبیه‌سازهای زمان-حقیقی، Labview دارای امکانات گرافیکی قوی‌تر می‌باشد و قابلیت ایجاد بستر گرافیکی پیشرفته‌تری برای ارتباط با کاربر را دارا می‌باشد. در نتیجه در این پروژه نیز برای ایجاد بستری گرافیکی در شبیه‌سازی از Labview استفاده می‌شود. به علاوه

Labview با داشتن کتابخانه‌های متنوع به راحتی می‌تواند با سخت‌افزارهای خارجی و با پروتکل‌های مختلف نظیر Ethernet ، USB و ... ارتباط برقرار نماید.

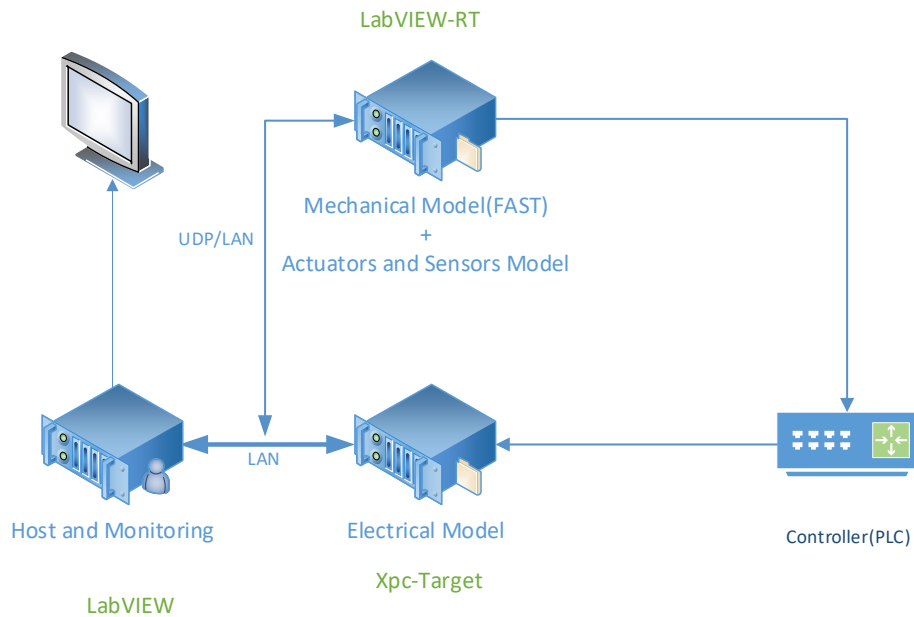
جدول ۱-۳ نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مورد استفاده برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی قسمت‌های مختلف توربین بادی را نشان می‌دهد

جدول ۱-۳- شبیه‌سازی بخش‌های گوناگون توربین بادی

نرم‌افزار شبیه‌ساز بخش‌های توربین بادی	Matlab/Simulink	Labview
کد FAST		✓
بخش الکتریکی (ژنراتور)	✓	
سایر بخش‌ها		✓
ارتباط گرافیکی با کاربر		✓

۴-۳-۱- ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز

شبیه‌ساز توربین بادی برای اجرای زمان-واقعی عملیات شبیه‌سازی نیازمند به یک بستر سخت‌افزاری مناسب می‌باشد که علاوه بر توانایی انجام محاسبات مورد نیاز برای مدل‌سازی بخش‌های مختلف توربین از قبیل سیستم مکانیکی و آیرودینامیک، کنترلر، سیستم الکتریکی، عملگرها و سنسورها و ... بتواند ارتباطات داده‌ای میان هر یک از زیر بخش‌ها را بصورت فیزیکی و واقعی و با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های ممکن از قبیل تاخیر و نویز نیز در نظر بگیرد. به این ترتیب بستر سخت‌افزاری شبیه‌ساز همانند شکل ۱-۲۱ از ۴ ماژول سخت‌افزاری تشکیل می‌گردد که یک ماژول متشکل از PLC و کارتهای مربوطه برای کنترلر، ۲ ماژول دیگر هر یک شامل یک PC یکی برای مدلسازی سیستم دینامیک حرکت توربین (کد FAST) و مجموعه عملگرها و سنسورها و دیگری جهت مدلسازی سیستم الکتریکی استفاده می‌شود. در نهایت ماژول آخر از یک PC با قابلیت‌های محاسباتی بالا به عنوان میزبان برای هماهنگی دیگر ماژول‌ها و همچنین برای سیستم مانیتورینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲۱-۱- بستر سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی

در این بخش به بیان مدل‌سازی قسمت‌های مختلف توربین بادی پرداخته شد. برای مدل‌سازی بخش مکانیکی از کد FAST و برای بخش الکتریکی از مدل ژنراتور DFIG موجود در جعبه‌ابزار SimPower در محیط Simulink استفاده می‌شود. سپس مروری بر روی کارهای انجام گرفته در شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی صورت گرفت. پس از آن نرم‌افزار شبیه‌سازی زمان-حقیقی مناسب برای توربین بادی انتخاب گردید. شبیه‌سازی زمان-حقیقی کد FAST در نرم‌افزار شبیه‌سازی Labview امکان پذیر است و همچنین از این نرم‌افزار برای ایجاد رابط گرافیکی با کاربر استفاده می‌شود. از آنجایی که مدل ژنراتور القایی DFIG در Labview وجود ندارد از مدل Simpower در Simulink نرم‌افزار Matlab استفاده می‌گردد. به علاوه، Labview امکان ایجاد ارتباط با پروتکل‌های مختلف داده و کارت‌های ورودی و خروجی را فراهم می‌کند. بدین ترتیب تمام اجزای سیستم به صورت زمان-حقیقی اجرا می‌گردند و اهداف شبیه‌سازی در این پروژه برآورده می‌گردند.

۴-۱- مدل‌سازی توربین بادی در نرم‌افزار LabVIEW

در این بخش به توصیف پیاده‌سازی مدل توربین بادی در نرم‌افزار LabVIEW پرداخته می‌شود. به این منظور بلوک‌های مختلف مورد استفاده در شبیه‌سازی و مدل‌سازی توربین بادی توصیف شده و پارامترهای مورد استفاده در آن معرفی می‌گردد.

زبان برنامه‌نویسی در LabVIEW یک زبان گرافیکی است که در اصطلاح به آن زبان G گفته می‌شود. برنامه نویسی در این زبان به این صورت است که بلوک‌ها مختلف مورد استفاده مانند بلوک‌ها عملیات ریاضی و مقایسه‌ای و یا بلوک‌های ذخیره و نمایش داده بصورت گرافیکی در دسترس است و برای انجام یک عملیات مشخص کافی است بلوک‌های مرتبط در کنار یکدیگر قرار گرفته و با ابزار اتصال به یکدیگر متصل گردند. به هر برنامه در LabVIEW در اصطلاح ابزار مجازی (VI)⁵¹ اطلاق می‌شود و برخلاف نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دیگر نظیر Simulink، این برنامه از دو پنجره تشکیل شده است. یک پنجره با عنوان بلوک دیاگرام دربر دارنده کد گرافیکی برنامه به صورت بلوک دیاگرام است و پنجره دیگر با عنوان پنل پیشین⁵² حاوی نمایشگرها و ابزارهای کنترلی جهت تعیین و تغییر پارامترهای پنجره بلوک دیاگرام است. یک vi می‌تواند شامل چندین subVI باشد. هر SubVI خود یک زیربرنامه است که از تعدادی ورودی و یک یا چند خروجی تشکیل می‌شود. مدل کلی شبیه‌سازی از ۶ بخش اصلی به صورت زیر تشکیل می‌گردد:

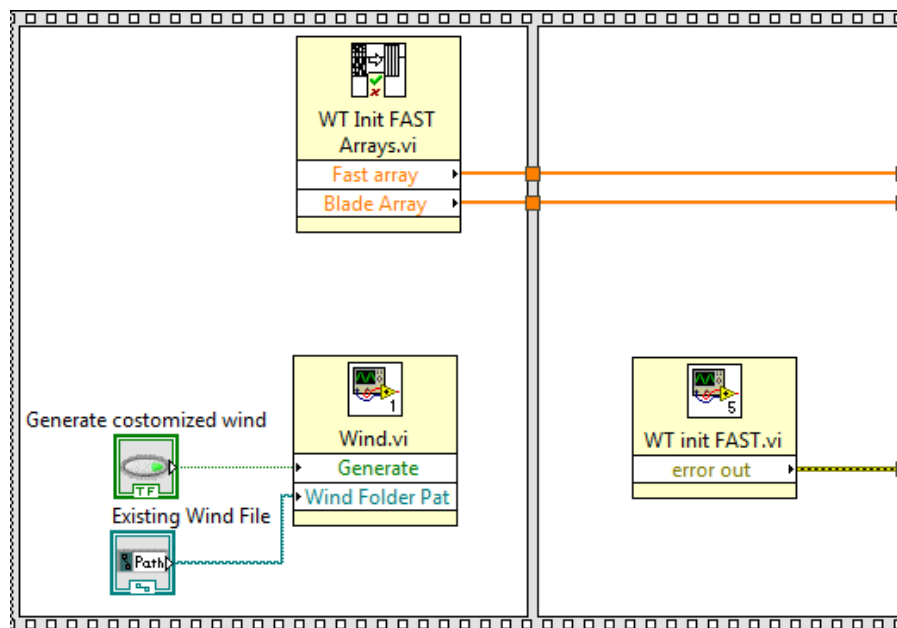
۱. بخش مقداردهی اولیه
 ۲. بخش اجرای مدل دینامیکی توربین (کد FAST)
 ۳. بخش اندازه‌گیری (مدل سنسورها) و شکل‌دهی سیگنال
 ۴. بخش سوپروایزری و مدیریت رخدادها
 ۵. بخش زیرسیستم کنترل
 ۶. بخش عملگرها و زیرسیستم الکتریکی
- هر یک از بخش‌های فوق می‌تواند خود شامل یک یا چند زیر بخش گردند و هر زیربخش خود از یک یا چند SubVI تشکیل می‌گردد. هر یک از این بخش‌ها در ادامه به تفصیل تشریح می‌گردد.

۴-۱-۱- بخش مقداردهی اولیه

بخش مقداردهی اولیه در برنامه شبیه‌سازی تنها یک بار و در ابتدای شبیه‌سازی اجرا می‌شود و متغیرهای مختلف موجود در سایر بخش‌ها را مقداردهی می‌کند. این بخش همانطور که در شکل ۲۲-۱ مشاهده می‌شود از سه SubVI اصلی تشکیل می‌گردد: WT init FAST.vi، WT FAST Array.vi و Wind.vi.

⁵¹ Virtual Instrument

⁵² Front Panel



شکل ۲۲-۱- بخش مقداردهی اولیه در برنامه شبیه‌ساز توربین بادی

زیر برنامه WT FAST Array.vi

در این زیر برنامه کلیه متغیرهای موجود در برنامه شبیه‌سازی از قبیل مقادیر اولیه حالات سیستم شامل سرعت روتور و مقادیر زاویه‌ای پره‌ها، ورودی‌های کد FAST و پارامترهای مربوط به سیستم کنترل، سوپروایزری، فیلترها، عملگرها و سیستم الکتریکی مقداردهی می‌گردد. همچنین خروجی‌های دینامیکی حاصل از اجرای کد FAST نیز در این بخش تعریف می‌گردد.

زیر برنامه WT init FAST.vi

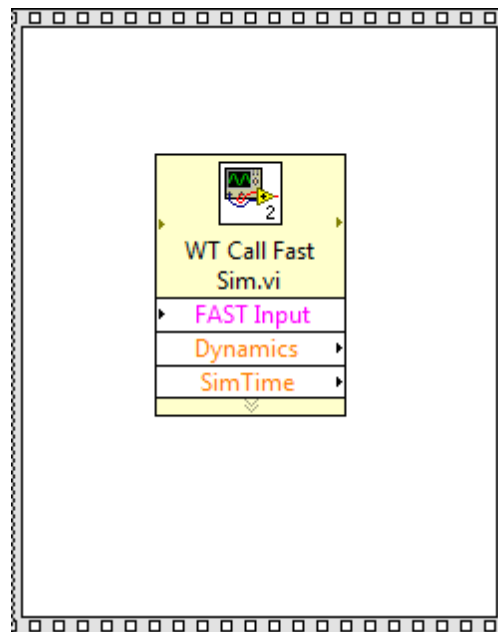
این زیر برنامه بخشی از فایل dll کد FAST را که مربوط به خواندن فایل‌های ورودی کد FAST شامل فایل ساختار پره، فایل ساختار برج، فایل ساختار پلتفرم، فایل ورودی آیرودینامیک و فایل ورودی اصلی است را اجرا می‌کند. به بیان دیگر این زیر برنامه به مقداردهی اولیه کد FAST می‌پردازد.

زیر برنامه Wind.vi

زیر برنامه Wind.vi فایل باد ورودی کد FAST را در اختیار این کد قرار می‌دهد. این زیر برنامه این قابلیت را برای کاربر ایجاد می‌کند که پروفایل باد را از میان یک پایگاه داده موجود در حافظه کامپیوتر انتخاب کرده و یا اینکه با اجرای برنامه TurbSim یک پروفایل جدید باد مطابق با مشخصات مورد نظر کاربر تولید نماید. برنامه TurbSim همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد با دریافت مشخصات مختلف یک باد، به تولید یک پروفایل باد به فرمتی که قابل خواندن توسط کد FAST باشد می‌پردازد.

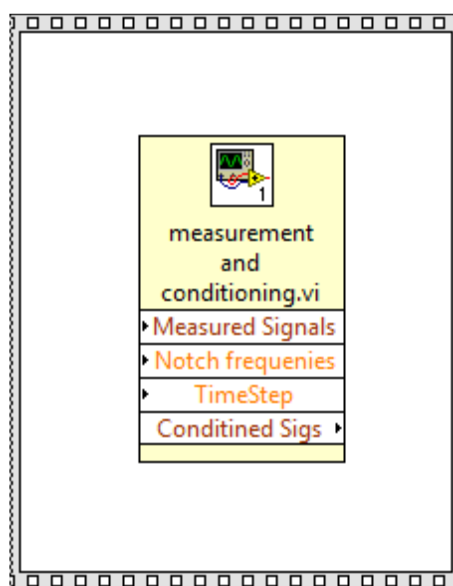
۲-۴-۱- بخش اجرای مدل دینامیکی توربین بادی

این بخش از یک زیر برنامه با عنوان WT Call FastSim.vi تشکیل شده است که با دریافت ورودی‌های مختلف نظیر مقادیر زاویه پیچ پره‌ها، زاویه یاو و گشتاور و توان الکتریکی و اجرای بخشی از فایل dll مرتبط با اجرای کد FAST، به اجرای این کد پرداخته و مقادیر دینامیک‌های مختلف سیستم را در خروجی قرار می‌دهد.



شکل ۱-۲۳- شماتیک بخش اجرای مدل دینامیکی توربین در نرم‌افزار LabVIEW

۳-۴-۱- بخش اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال

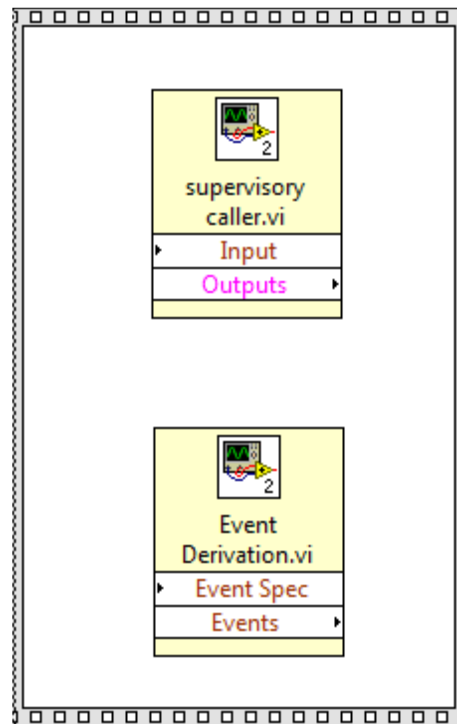


شکل ۱-۲۴- شماتیک زیربرنامه اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال

این بخش از یک زیر برنامه جهت مدل کردن سنسورهای زاویه پیچ، سرعت ژنراتور و سرعت و جهت باد و همچنین فیلتر کردن خروجی این سنسورها توسط فیلترهای مختلف ناچ، پایین‌گذر، FIR و IIR تشکیل شده است. سنسورها با یک پارامتر رزولوشن و یک بهره دقت که به میزان دقت و واریانس آن سنسور بستگی دارد مدلسازی می‌شود و دینامیکی برای آن در نظر گرفته نمی‌شود. این زیر برنامه مقادیر مختلف دینامیک‌های سیستم را از بخش مدل دینامیکی و همچنین فرکانسهای مختلف فیلترها را از کاربر

دریافت کرده و سیگنال‌های شکل‌دهی شده را جهت استفاده در سیستم‌های کنترل و سوپروایزری تولید می‌کند.

۴-۱-۴- بخش سوپروایزری و مدیریت رخدادها

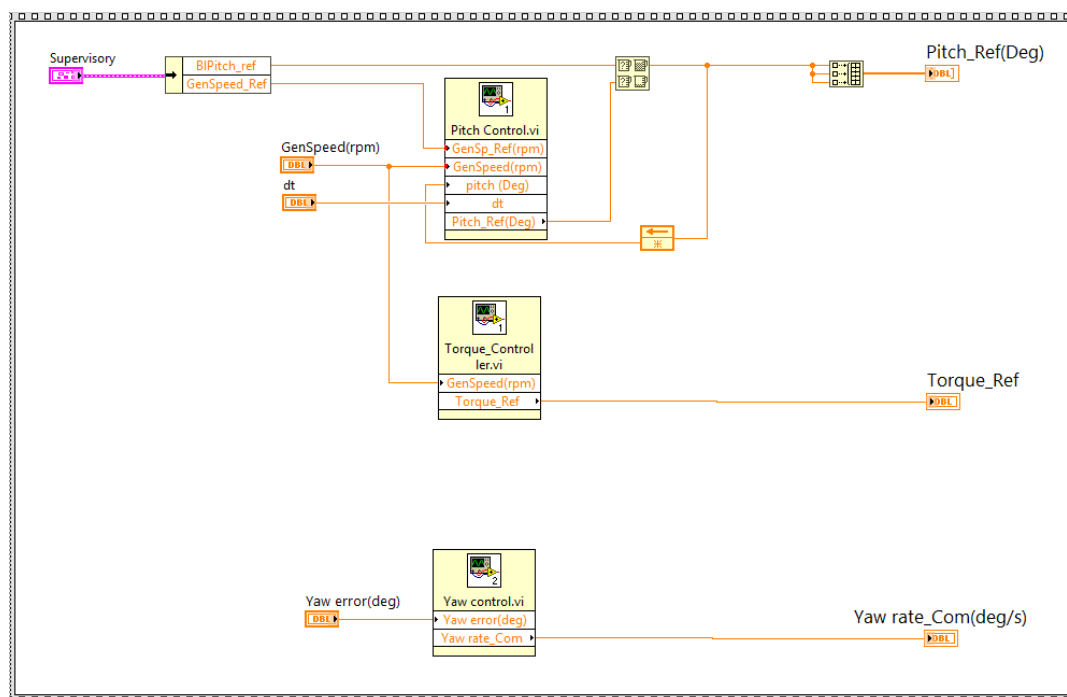


شکل ۲۵-۱- شماتیک بخش سوپروایزری و رخدادها در برنامه شبیه‌ساز

این بخش از دو زیر برنامه تشکیل شده است: Supervisory caller.vi و Event Derivation.vi. در زیر برنامه Supervisory caller بسته به وضعیت سیستم (مقادیر سرعت، توان، گشتاور...) که از بخش اندازه‌گیری دریافت می‌شود، مد کاری سیستم و مقادیر مرجع کنترل کننده‌ها تعیین می‌گردد. این زیر برنامه از ماژول StateChart برای ساخت دیاگرام حالت و تعیین مد کاری بهره می‌گیرد. در این بخش دیاگرام حالت از ۴ مد: آماده به کار، انتظار، تولید توان و خاموشی تشکیل می‌شود و اطلاعات مورد نیاز برای تعیین هر حالت نظیر مقادیر آستانه هر یک از سیگنال‌های پلنت توسط کاربر مشخص می‌شود. زیر برنامه Event Derivation.vi رخدادهای مختلفی نظیر اتصال کوتاه و مدار باز ژنراتور، خطاهای مرتبط با پره نظیر ثابت ماندن در یک زاویه و یا چرخش آزاد که در بحث محاسبات بار مطرح می‌شود را تولید می‌کند.

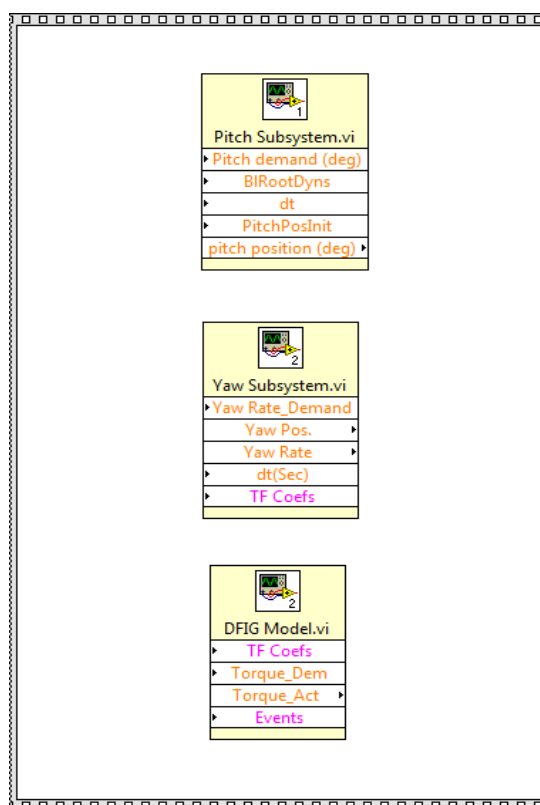
۵-۱-۴- بخش زیرسیستم کنترل

زیرسیستم کنترل از سه زیر برنامه Pitch Control.vi، Torque Control.vi و Yaw Control.vi به ترتیب برای کنترل پیچ، کنترل گشتاور و کنترل یاو استفاده می‌کند. کنترل پیچ از یک ساختار PID با جدول بندی بهره تشکیل شده و با دریافت سرعت ژنراتور از بخش اندازه‌گیری و مقدار مرجع آن از بخش سوپروایزری، زاویه پیچ مرجع را تعیین می‌کند. کنترل گشتاور از یک ساختار جدول جستجو برخوردار است و اندازه گشتاور لحظه‌ای را بسته به سرعت ژنراتور مشخص می‌کند. کنترل یاو نیز دارای ساختار On-Off می‌باشد و بسته به میزان خطای یاو سرعت زاویه‌ای یاو مورد نیاز را برای جبران این خطا تعیین می‌کند.



شکل ۲۶-۱- شماتیک زیر سیستم کنترل

۴-۶- بخش عملگرها و زیرسیستم الکتریکی



شکل ۲۷-۱- شماتیک بخش عملگرها و زیرسیستم الکتریکی

این بخش از ۳ زیربرنامه تشکیل می‌شود. زیربرنامه Pitch Subsystem.vi مدلی از عملگر پیچ ارائه می‌دهد. این مدل شامل موتور پیچ، گیربکس و درایو آن می‌باشد. درایو پیچ شامل حلقه‌های کنترل گشتاور، کنترل سرعت و کنترل موقعیت می‌باشد و با دریافت زاویه مرجع و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ماکزیمم گشتاور، ماکزیمم سرعت، ماکزیمم شتاب و در نظر گرفتن اصطکاک و ممانهای وارد بر ریشه پره و همچنین به کارگیری کنترلرهای تناسبی، انتگرالی و تناسبی-انتگرالی برای هر یک از حلقه‌ها زاویه پیچ پره را تعیین می‌کند.

زیربرنامه Yaw Subsystem.vi مدلی از عملگر یاو بصورت یک تابع تبدیل مرتبه ۲ ارائه می‌دهد. این زیربرنامه با دریافت سرعت زاویه‌ای مرجع، زاویه یاو توربین را معین می‌کند. زیربرنامه DFIG Model.vi یک مدل ساده از ژنراتور بصورت یک تابع تبدیل مرتبه ۲ در اختیار قرار می‌دهد که پارامترهای این مدل از طریق فیت کردن تابع تبدیل بر روی پاسخ پله مدل جزئی ژنراتور و مدل که در محیط SimPower از نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است، بدست آمده است. در این زیربرنامه گشتاورهای القایی ناشی از خطاهای اتصال کوتاه و مدار باز بصورت تقریبی و در بدترین حالت مدل شده است.

۷-۴-۱- شبیه‌سازی غیر زمان-حقیقی و ارزیابی پاسخ

در بخش قبل ساختار مدل شبیه‌سازی و زیربرنامه‌های تشکیل دهنده آن در بستر LabVIEW معرفی گردید. در این مرحله به منظور ارزیابی مدل‌ها، پاسخ شبیه‌سازی بصورت غیر زمان-حقیقی به ازای سناریوهای مختلف بررسی می‌گردد. به این منظور مدلی از توربین بادی ۲ مگاواتی ملی پیاده‌سازی و ۲ سناریو برای اجرای شبیه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

۱. شبیه‌سازی حلقه باز توربین بادی به ازای بادهای مختلف

۲. شبیه‌سازی حلقه بسته

لازم به ذکر است که در کلیه سناریوهای فوق پاسخ شبیه‌سازی با پاسخ شبیه‌سازی پیاده شده در Simulink مقایسه می‌شود. از آنجا که شبیه‌سازی صورت گرفته در بستر Matlab قبلاً توسط مرکز توربین بادی پژوهشگاه و با مقایسه با نتایج مشاور خارجی تأیید شده است، نتایج این شبیه‌سازی می‌تواند به عنوان مرجع برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی جدید در بستر LabVIEW استفاده گردد.

شبیه‌سازی حلقه باز

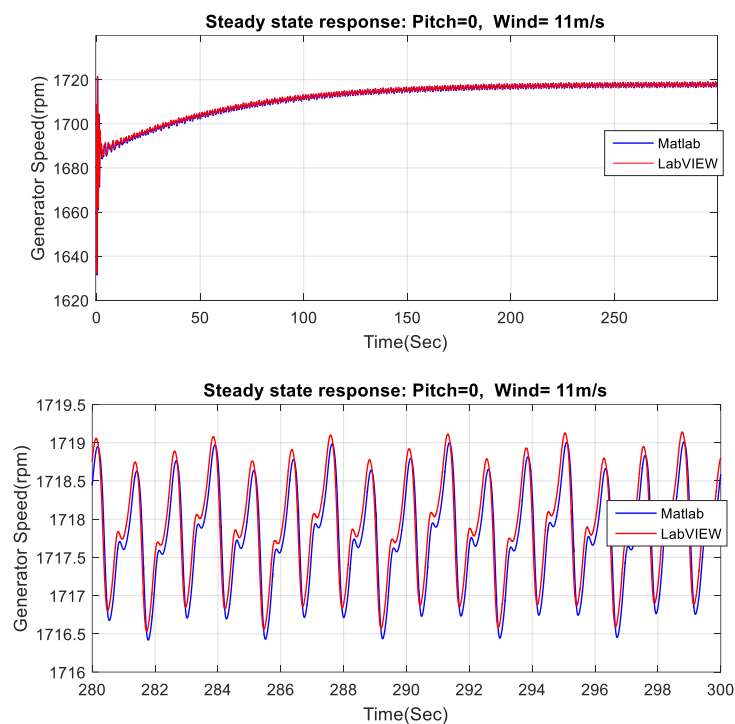
در این بخش با انجام چند شبیه‌سازی بصورت حلقه باز پاسخ اجرای کد FAST در بستر LabVIEW با اجرای این کد در نرم‌افزار Matlab مقایسه می‌شود. به این منظور ۳ سناریو با مشخصات باد و زاویه پیچ متفاوت بصورت به منظور شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. هر شبیه‌سازی به مدت ۲۰۰ ثانیه اجرا شده و سرعت‌نهایی توربین در دو شبیه‌سازی LabVIEW و Matlab مقایسه می‌گردد.

شکل ۲۸-۱ تا شکل ۳۰-۱ پاسخ شبیه‌سازی‌های فوق را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ شبیه‌سازی‌ها در بستر Labview کاملاً با نتایج مرجع Matlab منطبق می‌باشند.

جدول ۴-۱- مقایسه پاسخ حالت نهایی شبیه‌سازی حلقه باز به ازای مقادیر مختلف باد، زاویه پیچ و گشتاور الکتریکی در دو نرم‌افزار

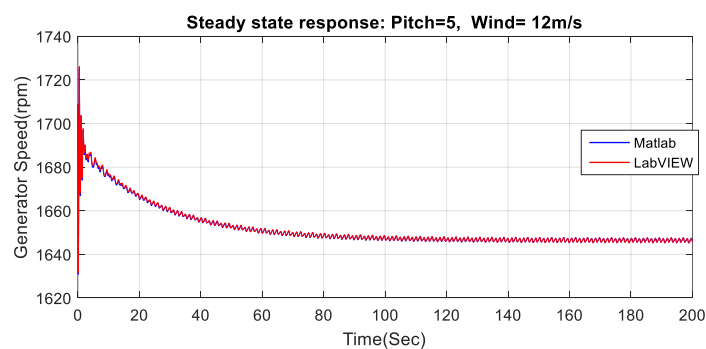
LabVIEW و Matlab

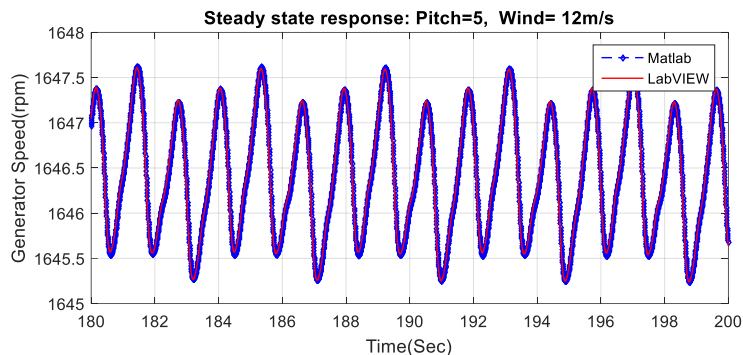
شماره آزمایش	زاویه پیچ (درجه)	باد	گشتاور الکتریکی	سرعت نهایی در اجرای LabVIEW	سرعت نهایی در اجرای Matlab
۱	0	NWP 11m/s	10861.3	1717.5	1717.5
۲	5	NWP 12m/s	11035	1646.5	1646.5
۳	16	NWP 18m/s	11035	1766.5	1766.6



شکل ۲۸-۱- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ برابر با 0 درجه و باد با سرعت 11m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار Matlab و

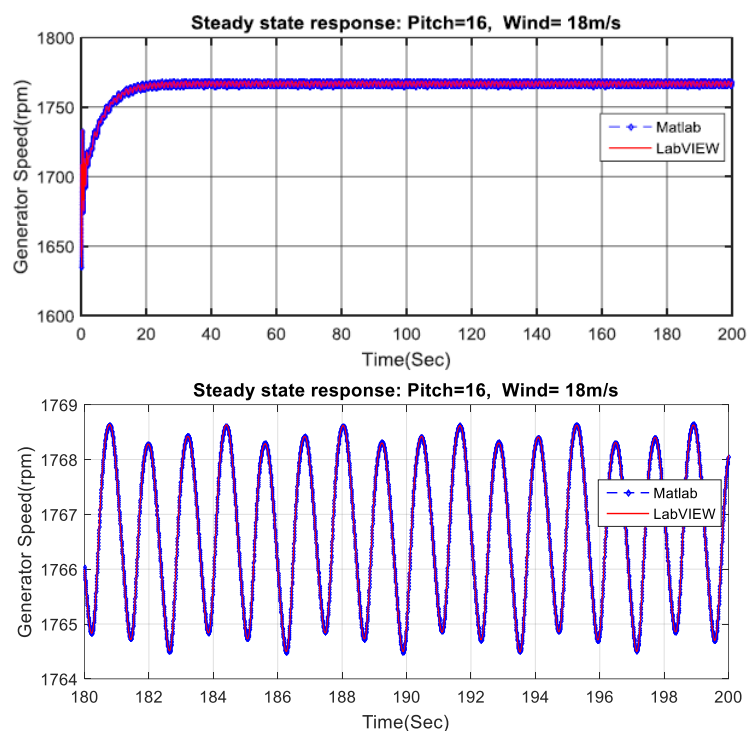
LabVIEW





شکل ۲۹-۱- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ=5 درجه و باد با سرعت 12m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار Matlab و

LabVIEW



شکل ۳۰-۱- پاسخ شبیه‌سازی به ازای زاویه پیچ=16 درجه و باد با سرعت 18m/s و شرایط اولیه یکسان در دو نرم‌افزار Matlab و

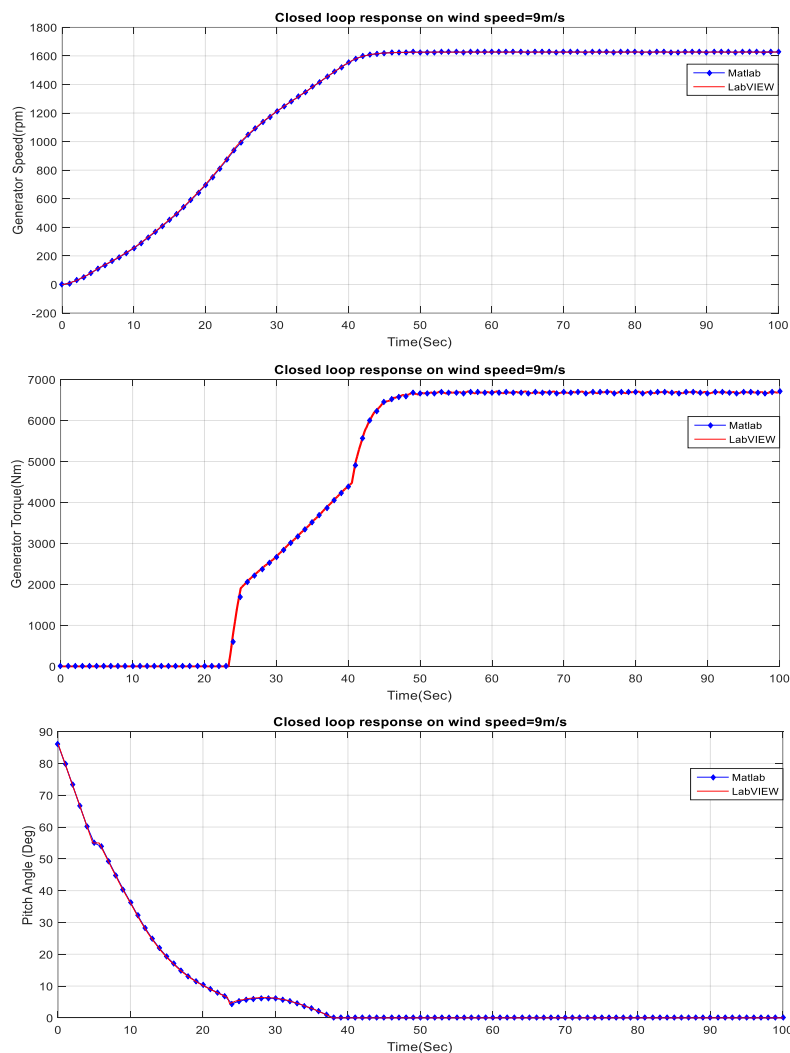
LabVIEW

شبیه‌سازی حلقه بسته

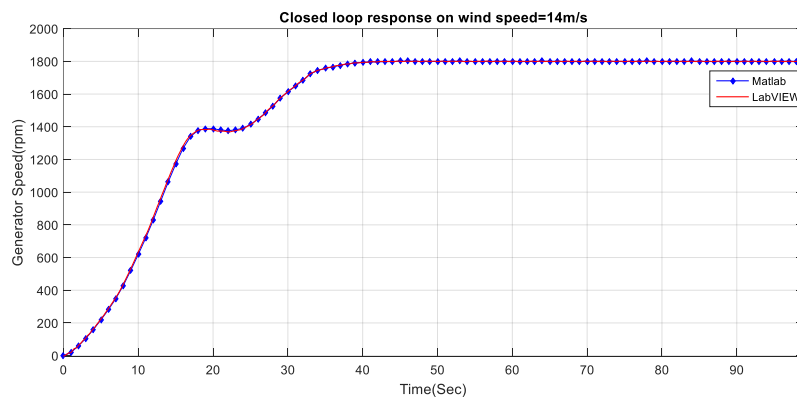
در بخش قبل صحت اجرای کد FAST در بستر LabVIEW با شبیه‌سازی حلقه باز و مقایسه نتایج با شبیه‌سازی موجود در بستر Matlab تأیید شد. در این بخش برای ارزیابی صحت مدلسازی سایر بخش‌های شبیه‌ساز توربین از قبیل سیستم سوپروایزری و کنترل، مدل ژنراتور و فیلترهای طراحی شده، شبیه‌سازی بصورت حلقه بسته انجام می‌گیرد و پاسخ‌های این شبیه‌سازی با شبیه‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار Matlab مقایسه می‌شود.

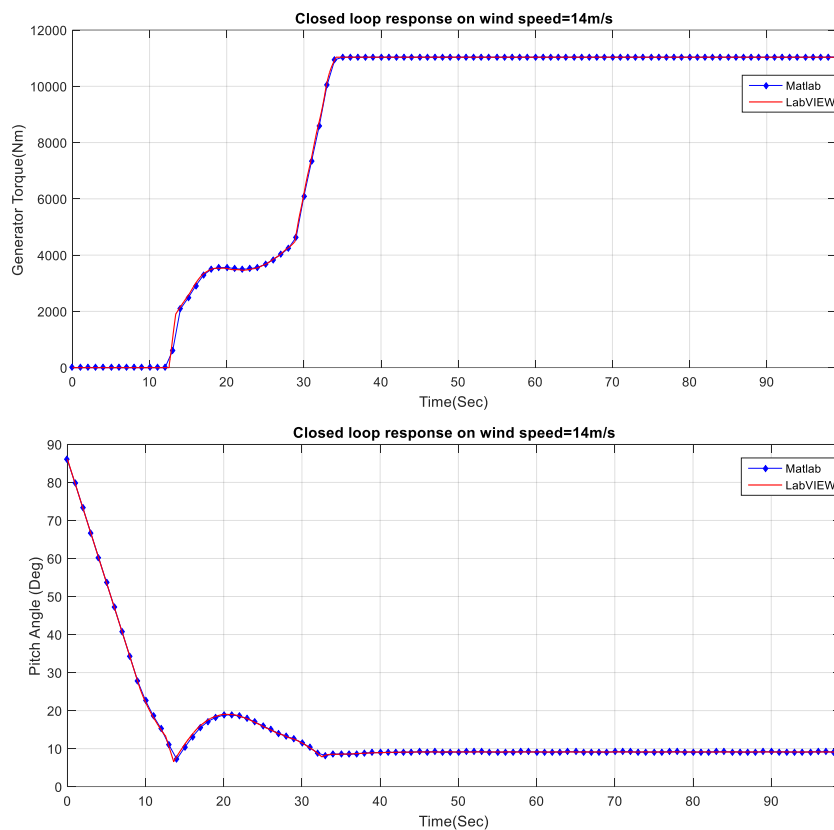
به این منظور دو شبیه‌سازی، یکی در حالت بار جزئی و باد با سرعت 9m/s و دیگری برای حالت بار کامل و باد با سرعت 14m/s انجام گرفت. در هر دو سناریو توربین از حالت ساکن (مد آماده به کار) و زاویه پیچ ۸۶ درجه شروع به کار می‌کند و تمامی مدهای کاری تا مد تولید توان توسط سیستم سوپروایزری تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ شبیه‌سازی در دو نرم‌افزار LabVIEW و

Matlab کاملاً بر هم منطبقند. این نتایج برای پاسخ‌های سرعت ژنراتور، گشتاور الکتریکی و زاویه پیچ در شکل ۱-۳۱ و شکل ۱-۳۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۱- نتایج شبیه‌سازی حلقه بسته در بار جزئی به ازای باد با سرعت 9m/s در دو نرم‌افزار Matlab و Simulink





شکل ۳۲-۱ نتایج شبیه‌سازی حلقه بسته در بار کامل به ازای باد با سرعت 14m/s در دو نرم‌افزار Simulink و MatLab

در این فصل ساختار برنامه شبیه‌سازی توربین بادی در محیط LabVIEW تشریح گردید. این برنامه که هسته اصلی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی را تشکیل می‌دهد، کلیه زیرسیستم‌های توربین بادی نظیر: بخش مکانیک و آیرودینامیک توربین بادی در قالب کد FAST، بخش اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال، بخش سوپروایزری و کنترل، بخش عملگرها، سیستم الکتریکی و ترمز مکانیکی را در بر می‌گیرد. در پایان کد توسعه داده شده در محیط LabVIEW جهت ارزیابی صحت طراحی، طی سناریوهای مختلف بصورت غیر زمان-حقیقی شبیه‌سازی شد و با پاسخ شبیه‌سازی موجود در محیط Matlab مقایسه گردید. نتایج نشان از تطابق کامل این دو کد با یکدیگر دارد.

۵-۱- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازهای زمان-حقیقی در صنایع پیشرفته، جزئی لاینفک از فرآیند طراحی و ساخت در پروژه‌های پیچیده محسوب می‌شوند. سیستم‌های توربین بادی بزرگ نیز به علت ماهیت تصادفی باد و فرآیندهای پیچیده آیرودینامیکی نیازمند به تست و ارزیابی سیستم کنترل و ایمنی در سناریوهای مختلف بصورت زمان-حقیقی می‌باشند. در این گزارش به طراحی نرم‌افزار یک شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی پرداخته شد. این نرم‌افزار از یک بستر اصلی برای انجام محاسبات و توسعه مدل‌های بخش‌های مختلف توربین بادی مانند مدل مکانیکی، مدل آیرودینامیک، مدل الکتریکی، مدل کنترل و سوپروایزری، مدل عملگرها و سنسورها و مدل فیلترینگ و شکل‌دهی سیگنال‌ها جهت اجرای فرآیند شبیه‌سازی برخوردار است. با بررسی بسترهای مختلف نرم‌افزاری نظیر نرم‌افزارهای Matlab، LabVIEW، Dymola و MapleSim از جنبه‌های گوناگون، این نتیجه حاصل گشت که هر چند هر یک از نرم‌افزارهای فوق از قابلیت اجرای شبیه‌سازی سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی با کیفیت بالا برخوردارند، اما در نهایت با توجه به ملاحظات هم‌چون استفاده از کد معتبر FAST از شرکت NREL برای مدلسازی بخش‌های مکانیکی و آیرودینامیکی، تصمیم به بکارگیری نرم‌افزار LabVIEW به عنوان بستر اصلی شبیه‌سازی گردید. چراکه طبق بررسی‌های صورت گرفته، کد FAST در حال حاضر تنها در پلتفرم LabVIEW قابلیت اجرا بصورت زمان-حقیقی را دارد (در گذشته تلاش‌های نافرجامی توسط کارشناسان پژوهشگاه برای اجرای زمان-حقیقی این کد در محیط Matlab-xPC-Target صورت گرفت که بی‌نتیجه ماند و شرکت NREL تنها به نرم‌افزار LabVIEW برای اجرای زمان حقیقی کد FAST اشاره کرده است). هم‌چنین LabVIEW از قابلیت‌های گرافیکی بالایی برای ارتباط با کاربر و از کتابخانه‌های متعددی برای پشتیبانی از پروتکل‌های ارتباطی متنوع برخوردار است. در ادامه زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی نظیر زیرسیستم کنترل و سوپروایزری، زیرسیستم اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال، زیرسیستم عملگرهای پیچ و یاو، زیرسیستم الکتریکی و زیرسیستم ترمز مکانیکی در محیط LabVIEW مدلسازی و پیاده‌سازی گردید. برای زیرسیستم مکانیکی همان‌طور که گفته شد از کد FAST که یک کد منبع باز است و دارای تأییدیه از شرکت GL به منظور انجام محاسبات بار می‌باشد، استفاده می‌گردد. این کد توانایی مدلسازی دینامیک بخش‌های مختلف سازه توربین نظیر پره، برج، درایوترین و پلتفرم را تا ۲۵ درجه آزادی دارد و با ارتباط با کد AeroDyn نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی و پدیده‌های مختلف آیرودینامیکی نظیر ویک پره، استال دینامیک، سایه برج و برش باد را به خوبی مدل می‌کند. سیستم کنترل از سه زیرسیستم کنترل پیچ با ساختار PID، زیرسیستم کنترل گشتاور با ساختار جدول جستجو و زیرسیستم کنترل یاو با ساختار on-off تشکیل می‌شود. زیرسیستم سوپروایزری از یک دیاگرام حالت برای تعیین مد کاری و نشان دادن مقادیر مرجع متغیرهای مختلف کنترلی بهره می‌گیرد. زیرسیستم الکتریکی نیز هم در حالت ساده توسط یک تابع تبدیل مرتبه ۲ به همراه ترم‌های مکمل برای مدل کردن حالت اتصال کوتاه، در نرم‌افزار LabVIEW مدل گردید و هم یک مدل جزئی از ژنراتور DFIG و مبدل آن بصورت پشت-به-پشت در محیط SimPower از Simulink توسعه داده شده است، که در حالت زمان-حقیقی قابلیت اجرا و فراخوانی نتایج به مدل اصلی در LabVIEW را دارد. در پایان با انجام شبیه‌سازی بصورت غیر زمان-حقیقی طی سناریوهای مختلف صحت طراحی مدل نرم‌افزاری با مقایسه نتایج با شبیه‌سازی موجود در نرم‌افزار Matlab تأیید گردید.

۶-۱- مراجع

1. J. Belanger, "The what, where and why of real time simulation" IEEE International Conference, 2010.
2. E. Bringmann, "Model based testing of automotive systems," International Conference on Software Testing, Verification, and Validation, 2008.
3. S. Shah, "Real time simulation of wind turbine converter grid systems", Power Electronics Conference , 2014.
4. M. L. Buhl, A Manjock. "A comparison of wind turbine aero elastic codes used for certification". NREL/CP-50039113, NREL, CO, USA
5. "Power Systems Analysis Software" Internet: http://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Power_Systems_Analysis_Software
6. P. M. Menghal, "Real time simulation: recent progress and challenges," IEEE International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012.
7. M. O. Faruque, "Real-time simulation technologies for power systems design, testing and analysis," IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015.
8. "Processor-in-the-Loop (PIL)" Internet: <https://www.plexim.com/plecs/pil>
9. W. Li, "Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery super capacitor energy storage system," IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 57, NO. 4, 2010.
10. C. Dufour and J. Bélanger. "Real-time simulation of doubly fed induction generator for wind turbine application", Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, Volume: 5.
11. J.-J. Huselstein, "Interactive Simulations of Power Electronics Converters, " in 12th international Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2006), Portoroz, 2006, pp. 1721-1726.
12. X. Guillaud, "Applications of Real-Time Simulation Technologies in Power", IEEE Power Energy and Technology, 2015.
13. F. E. Cellier and E. Kofman, "Continues time simulation," Springer, 2006.
14. S. Mikili, "Review of real time simulator and the steps involved for implementation of a model from Matlab/Simulink to real-time," Springer, 2014.
15. "What Can You Do With LabVIEW?" Internet: <http://www.ni.com/labview/why>.
16. "LabVIEW" Internet: <https://en.wikipedia.org/wiki/Labview>.
17. S. Anitha, "Virtual instrumentation using Labview", SRM university,
18. "Top 10 Reasons to Use NI LabVIEW for Automating Test and Validation Systems" Internet: <http://www.ni.com/white-paper/8995/en/> . May 09, 2013
19. J. Belander, "EMEGASIM: an open high performance distributed real time power grid simulator. Architecture and specification", International Conference on Power Systems, 2007.
20. P. J. Mosterman et. al, "Embedded real-time control via Matlab, Simulink, and xPC Target" In *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, Control Engineering, 2005, III, 419-446
21. R. Asmundis, "Modeing, programming and simulations using Labview software", 2011.

22. U. S. Ragu, "Real time digital simulation of control system with Labview simulation interface toolkit and simulation module," International Journal of Research in Engineering & Technology, vol. 1, pp. 23-28, 2013.
23. "MapleSim: Overview" Internet: <http://www.altairhyperworks.com/partner/Maplesim>.
24. "Real time simulation and HIL testing", Maple soft, Canada, 2013.
25. "Modelica libraries". Internet: <https://www.modelica.org/libraries/>
26. "Dymola Real-time HIL simulation" Internet: <http://www.claytex.com/products/dymola/features/hil-simulation>.
27. H. Martikka, "Comparison study of two competing models for an all mechanical power transmission system", Research report, 2004.
28. "Dymola and Simulink" <http://www.claytex.com/products/dymola/features/simulink-interface>.
29. C. Dufour, "RT-LAB real time simulation of electric drives and systems," Indian institute of technology, 2005.
30. M. Rashed, "Modeling of doubly-fed induction generators connected to distribution system based on EMEGASIM real time digital simulator", thesis submitted to the faculty of Tennessee, 2014.
31. "Advanced Real-Time ElectroMagnetic Simulation" Internet: <http://www.opal-rt.com/solver/>
32. "Benefits of Programming Graphically in NI LabVIEW" Internet: <http://www.ni.com/white-paper/14556/en>. Jun 14, 2013
33. "RTLAB user's guid", OPAL-RT.
34. "The Advantages of Symbolic Computation" Internet: http://www.maplesoft.com/products/maplesim/symbolic_computation.aspx.
35. J. J. V. Boekel, "SimMechanics, MapleSim and Dymola: a first look on three multibody packages", DCT, 2009.
36. "TechTip: Choosing a Software Environment for Data Acquisition" Internet: <http://www.mccdaq.com/TechTips/TechTip-3.aspx>.
37. S. Humayun, "Developing a Labview and Matlab-based test bed for data acquisition, analysis and calibration for frequency generators over GPIB", International journal of computer applications, 2012.
38. "OP5142 PCIe reconfigurable platform with RT-XSG toolbox support", OPAL-RT technologies INC, 2008.
39. "Getting started with the MapleSim connector for B&R Automation studio", Maple soft, 2014.
40. A. Ahlstrom, "Aeroelastic simulation of wind turbine dynamic", Doctoral Thesis from Royal Institute of Technology Department of Mechanics SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2005.
41. M. Singh, "Simulation for wind turbine generators with FAST and Matlab-Simulink modules", National renewable energy laboratory, 2014.
42. M. A. Asareh, "Dynamic behavior of operational wind turbines considering aerodynamic and seismic load interaction", Doctoral Dissertation, 2015.
43. M. L. Buhlr, "A comparison of wind turbine aeroelastic codes used for certification", American Institute of Aeronautics and Astronautics.
44. Y. Zhao, "Real-time simulation on wind power system dynamics incorporating STATCOM", Research gate, 2013.
45. C. Dufour, "A real time simulator for doubly fed induction generator based wind turbine applications", IEEE conference of power electronics, 2004.
46. A. Tanvir, "Real time control of active and reactive power for doubly fed induction generator (DFIG) based wind energy conversion system", Energies, 2015.

47. A. Makinnen, "Wind turbine and grid interaction studies using integrated real-time simulation environment", Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2008.
48. E. L. Hooft, "Real-time process simulator for evaluation of wind turbine control system", 2007.
49. L. Nailu, "A real-time simulation system of wind power based on Labview DSC module and Matlab/Simulink", IEEE conference on electronic measurement and instruments, 2009.
50. K. Suman, "Simulation of wind power based induction generator", International journal of science and research, 2012.
51. M. Toper, "Wind turbine emulator development using NI CRIO9068 and ABB ACS 800 drive", Journal of electrical engineering.
52. G. Dumi, "Real-time control of synchronous generator in island model based on Labview software for education purpose", Wseas TRANSACTIONS on Advances in Engineering Education, 2016.
53. J. Pettersson, "Modeling and simulation of a vertical wind power plant in Dymola/Modelica", Proceedings of the 9th International Modelica Conference, 2012.
54. International Electrotechnical Commission, "Standard IEC 61400-1: Wind Turbines Part 1: Design Requirements', Rev. 3, 2005.
55. Germanischer Lloyd (GL), "Rules and Guidelines. IV Industrial Services. Guideline for the Certification of Wind Turbines', GL 2010, Hamburg, Edition 2010.
56. Jonkman BJ and Kilcher L "TurbSim User's Guide: Version 1.06.00", NREL Technical report, 2012

فصل دوم:

شبیه‌سازی زمان-حقیقی و طراحی پروسه سخت‌افزار در حلقه

۲- شبیه‌سازی زمان-حقیقی و طراحی پروسه سخت‌افزار در حلقه

۱-۲- مقدمه

در فصل اول با بررسی بسترهای مختلف نرم‌افزاری برای توسعه کدهای مورد استفاده در شبیه‌ساز، نرم‌افزار LabVIEW به عنوان بستر اصلی نرم‌افزاری شبیه‌ساز انتخاب گردید و از کد FAST جهت مدلسازی مکانیکی و آیرودینامیکی توربین بادی استفاده گردید. در حقیقت با کامپایل کد FAST که بصورت مجموعه‌ای از کدهای فرترن در دسترس است، یک فایل dll بدست می‌آید که این فایل توسط LabVIEW قابل فراخوانی و اجرا است. سایر زیرسیستم‌های توربین بادی نظیر زیرسیستم کنترل و سوپروایزری، مدل عملگرهای پیچ و یاو، زیر سیستم اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال و یک مدل ساده از زیرسیستم الکتریکی در بستر LabVIEW توسعه داده شد. علاوه بر آن یک مدل دقیق نیز از ژنراتور DFIG و مبدل آن که قبلاً در محیط SimPower از نرم‌افزار Matlab توسعه داده شده بود جهت استفاده در شبیه‌ساز آماده گردید.

در این فصل به اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی توربین بادی پرداخته می‌شود. به این منظور، می‌بایست کدهای نرم‌افزاری زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی که در فاز اول توسعه داده شد، در یک بستر زمان-حقیقی اجرا شوند. اهمیت اجرای زمان-حقیقی از آن رو است که شرایطی کاملاً مشابه با واقعیت ایجاد می‌کند که در آن می‌توان چگونگی عملکرد سیستم کنترل و ایمنی را در مواجهه با عوامل تاثیرگذار مختلفی نظیر تاخیرهای تبادل اطلاعات با سخت‌افزارهای جانبی مانند سنسورها و عملگرها و خطاهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مشاهده و ارزیابی کرد. اجرای زمان-حقیقی همچنین لازمه اجرای پروسه‌های سخت‌افزار-در-حلقه است که تقریباً در همه صنایع پیشرفته و سیستم‌های پیچیده پیش‌نیاز اصلی پروسه راه‌اندازی می‌باشد.

از میان بسترهای مختلف زمان-حقیقی موجود، بسترهای SLRT از نرم‌افزار Matlab و بستر LabVIEW-RT از شرکت NI دو بستر متداول در سیستم‌های تست زمان-حقیقی می‌باشند که در آزمایشگاه‌های تست زمان-حقیقی در کاربردهای دانشگاهی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شبیه‌ساز مورد نظر از سه مازول هدف برای پیاده‌سازی بخش‌های مختلف شبیه‌سازی تشکیل می‌شود. به این ترتیب که سیستم کنترل بر روی یک PLC و زیرسیستم الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل و زیرسیستم مکانیکی شامل کد FAST و مدل عملگرهای پیچ و یاو بطور مجزا بر روی دو کامپیوتر مختلف اجرا شده و ارتباطات میان این سه مازول بصورت ارتباط شبکه و سریال پیاده‌سازی می‌گردد. دلیل در نظر گرفتن ساختار فوق این است که اولاً بار محاسباتی میان ۳ پردازنده تقسیم شود و در نتیجه امکان اجرای زمان-حقیقی در ثابت زمانی‌های پایین‌تر که مورد نیاز مدلسازی توربین‌های بزرگتر و با انعطاف‌پذیری بالاتر می‌باشد، فراهم گردد و ثانیاً تا جای ممکن بخش‌های اصلی توربین که قابلیت تفکیک و پیاده‌سازی سخت‌افزاری دارند به طور مجزا در دسترس باشند. به عنوان مثال سیستم کنترل می‌تواند بر روی یک PLC و یا یک پردازنده پیاده شده و با رعایت یک پروتکل مشخص به راحتی در ساختار شبیه‌ساز قرار گیرد. در این ساختار همانطور که قبلاً گفته شد مسائل مرتبط با تبادل اطلاعات میان کنترلر و سایر سخت‌افزارها نیز در نظر گرفته می‌شود.

در این فصل، ابتدا به تشریح نحوه کامپایل کد FAST جهت فراخوانی و اجرا در محیط LabVIEW پرداخته می‌شود. به این منظور ابتدا الزامات سخت‌افزاری سیستم مورد نیاز جهت اجرای فرآیند کامپایل و همچنین نرم‌افزارهای مورد نیاز بررسی شده و سپس چگونگی اجرای پروسه کامپایل به تفصیل و بصورت گام به گام بیان می‌گردد. در بخش بعد، پیکربندی و آماده‌سازی کامپیوترهای هدف جهت اجرای پروسه‌های زمان-حقیقی در محیط LabVIEW-RT و SLRT مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش همچنین ساختار برنامه

اصلی توسعه داده شده در محیط LabVIEW جهت شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی تشریح می‌گردد. بخش سوم به پیاده‌سازی سیستم کنترل بر روی PLC و اجرای آن در حلقه شبیه‌سازی می‌پردازد و نحوه پیکربندی و تنظیمات PLC های شرکت Beckhoff آلمان را توضیح می‌دهد. در این بخش همچنین نحوه ایجاد یک ارتباط سریال میان PLC و کامپیوتر هدف توضیح داده می‌شود. در نهایت به جمع‌بندی و بیان ساختار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شبیه‌ساز مورد نظر می‌پردازیم.

۲-۲- کامپایل کد FAST جهت اجرا بصورت زمان-حقیقی در LabVIEW

کد FAST که دربرگیرنده معادلات دینامیکی و آیرودینامیکی حاکم بر مکانیک چرخش روتور و نوسانات برج و درایوتورین است، مشتمل بر تعداد زیادی فایل حاوی کدهای به زبان فترن می‌باشد. جهت اجرای این کد می‌بایست مجموعه کدهای موجود توسط یک کامپایلر مناسب به یکی از فایل‌های اجرایی در ویندوز مانند exe. و یا یک کتابخانه دینامیک dll. تبدیل شود. به عنوان مثال فایل اجرایی برای اجرای کد FAST در محیط Matlab به فرمت mex* می‌باشد. این فایل اگرچه قابلیت اجرا توسط Matlab در محیط ویندوز را دارد اما به صورت زمان-حقیقی در محیط xPC-Target بطور مستقیم قابل اجرا نمی‌باشد.^۱ از طرف دیگر نرم افزار LabVIEW توانایی بارگزاری انواع فایل‌های DLL و اجرای آن به صورت زمان-حقیقی در محیط LabVIEW-RT را دارد و همچنین سندی توسط شرکت NREL برای کامپایل کد FAST مناسب برای اجرا در این محیط انتشار یافته است [۱]. به این ترتیب در ادامه به نحوه کامپایل کد FAST به فرمت DLL که سازگار با اجرا در نرم‌افزار LabVIEW است، پرداخته می‌شود.

۱-۲-۲- الزامات سیستم مورد نیاز برای کامپایل

PharLab به عنوان سیستم عامل زمان-حقیقی در مجموعه LabVIEW-RT توسط شرکت National Instruments مورد استفاده قرار گرفته است. پیاده‌سازی سیستم عامل‌های زمان-حقیقی با محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری خاصی همراه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به پشتیبانی محدود از API Win32 اشاره نمود. یکی از کارکردهای این API، بارگذاری کتابخانه‌های DLL و پیاده‌سازی توابع سیستمی به کار گرفته شده در این کتابخانه‌ها می‌باشد. PharLab اجازه بارگذاری DLL را فراهم کرده است اما توابع سیستمی را با توجه به محدودیت‌های یک سیستم زمان-حقیقی به طور خاص و محدودی پیاده‌سازی نموده است؛ لذا در هنگام کامپایل DLL باید به این نکته توجه نمود.

بر طبق توصیه سازندگان FAST بهتر است جهت کامپایل از کامپایلر Fortran ساخته شده توسط شرکت اینتل نسخه ۲۰۱۰ استفاده نمود و جهت Link و استخراج DLL به توصیه PharLab از Linker همراه مجموعه Visual Studio شرکت مایکروسافت نسخه ۲۰۰۸ استفاده کرد. پس از کامپایل و استخراج DLL می‌توان جهت بررسی سازگاری با API پیاده‌سازی شده، از نرم‌افزار DLL Checker 2015.exe توسعه داده شده توسط NI استفاده کرد و در صورت نبود مغایرت می‌توان از DLL مورد نظر استفاده نمود.

^۱ برای کامپایل کد FAST جهت اجرا در محیط xPC-Target در سال‌های گذشته تلاش زیادی توسط همکاران در گروه (کنترل و) ابزار دقیق صورت گرفت اما به نتیجه نرسید. در این زمینه مکاتبه با کارشناسان شرکت Mathwoks نیز جهت برطرف کردن مشکلات موجود کارساز نبود.

^۲ Application Programming Interface

الزامات سخت افزاری

به منظور کامپایل و آزمایش کد، می‌توان از دو سیستم مجزا استفاده نمود. یک سیستم جهت نصب کامپایلرها برای تولید DLL و سیستم دیگر مطابق با الزامات سخت‌افزاری سیستم عامل زمان-حقیقی جهت تست فایل DLL. در ادامه ملزومات سخت‌افزاری این دو سیستم ذکر می‌گردد.

الزامات سخت افزاری لازم جهت سیستم کامپایل

از آنجایی که کامپایلرهای مورد استفاده، نیازمند به امکانات سخت‌افزاری خاصی نمی‌باشند لذا می‌توان از یک PC با پردازنده ای از خانواده X86 (معماری ۳۲ بیتی) و یا X64 (معماری ۶۴ بیتی) استفاده نمود. حداقل مشخصات سیستم قابل استفاده به شرح زیر است [۲]:

- 1.6 GHz or faster processor
- 1024 MB RAM (1.5 GB if running on a virtual machine)
- 4 GB of available hard-disk space
- 5400 RPM hard-disk drive
- DirectX 9-capable video card running at 1024 x 768 or higher display resolution
- DVD-ROM drive
- Windows XP SP3
- 1024 x 768 or higher-resolution display

الزامات سخت افزاری لازم جهت سیستم تست

سیستم تست باید توانایی اجرای سیستم عامل زمان-حقیقی LabVIEW RT را داشته باشد. به دلیل وابستگی شدید سیستم عامل‌های زمان-حقیقی به سخت افزار، لازم است تا سازگاری تک تک سخت‌افزارها به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد و تنها به حداقل‌های مورد نیاز بسنده نگردد. [۳]

- پردازنده: جدول پ ۱ در پیوست نشان دهنده معماری پردازنده‌هایی است که در نسخه‌های مختلف ماژول زمان-حقیقی LabVIEW مورد پشتیبانی قرار گرفته است. این جدول به طور دقیق مشخص می‌کند که هر معماری از کدام نسخه به بعد پشتیبانی شده است. با توجه به نسخه مورد استفاده که ۲۰۱۶ می‌باشد تمامی پردازنده‌ها از Intel® Pentium® 3 تا Intel® Core i7 (Haswell architecture) پشتیبانی می‌شوند.

- کارت شبکه: سیستم زمان حقیقی باید فقط از چیپست‌های مشخص شده در جدول پ ۲ از پیوست برای کارت شبکه استفاده نماید.

- دیسک سخت^۱: دیسک سخت می‌تواند از نوع Parallel ATA (IDE) و یا Serial ATA (SATA) و حجم آن حداکثر 1.99 TB باشد.

- رم: حداکثر رم قابل پشتیبانی 4GB است (در واقع LabVIEW RT حداکثر از 4GB فضای رم می‌تواند استفاده کند).
- درگاه USB: حداقل از یک درگاه USB پشتیبانی شود و قابلیت برپایی از طریق آن^۲ وجود داشته باشد.

¹ Hard Disk Drive

^۲ در صورت عدم وجود پورت USB می‌توان از 3.5 inch floppy drive (1.44 MB) نیز استفاده نمود.

- برد مادر^۱: برد مادر باید از صفحه کلید USB و یا PS/2 پشتیبانی کند.

در صورت مغایرت هر کدام از سخت‌افزارها، سیستم عامل زمان حقیقی در برپایی دچار مشکل خواهد شد.

آماده‌سازی نرم‌افزاری سیستم جهت کامپایل

سیستم عامل پیشنهادی جهت راه اندازی یک سیستم زمان-حقیقی، Windows XP SP3 است. هرچند که می‌توان از نسخه‌های بعدی ویندوز نیز استفاده نمود. پس از نصب ویندوز به ترتیب نرم‌افزارهای Microsoft Visual Studio 2008 و پس از آن Intel Visual Fortran Compiler 10.1 for Windows نصب شوند.

پس از آماده شدن کامپایلرها، لازم است کلیه فایل‌های مورد نیاز جمع‌آوری و در دسترس کامپایلر قرار گیرد. این فایل‌ها شامل فایل‌های f90، مربوط به کد FAST و همچنین کتابخانه‌های سیستمی dll و lib. مورد نیاز برای کامپایل می‌باشد. فایل‌های کد FAST را می‌توان با دانلود فایل FAST 7.01.00a-bjz.zip از وبسایت شرکت NREL [4] به صورت رایگان بدست آورد. این فایل شامل پوشه‌های FAST، AeroDyn و NWTC Library می‌باشد. فایل‌های شاخه LIBs به صورت مجزا در پوشه‌های مختلف از کامپایلر ماکروسافت قرار دارد و یا بر روی شبکه اینترنت توسط سازندگان آن‌ها قابل دانلود است. این پوشه باید به صورت دستی جمع‌آوری شود. کل فایل‌های لازم جهت کامپایل FAST در جدول پ ۳ از پیوست (ب) آورده شده است.

همچنین به کمک یک ویرایشگر متن، فایلی با نام VS_Correction.bat ایجاد شده است که وظیفه آن اضافه کردن آدرس کامپایلرها به متغیر PATH و ایجاد متغیر LIB به همراه مسیر کتابخانه‌های لازم است تا در زمان کامپایل از ایجاد مشکل جلوگیری شود. محتوای این فایل در جدول پ ۴ از پیوست (ب) قابل مشاهده است.

در نهایت جهت انجام فرآیند کامپایل کد FAST، به کمک یک ویرایشگر متن، فایلی با نام Compile_FASTforLabview_Optimized.bat با محتوای نشان داده شده در جدول پ ۵ از پیوست (ب) ایجاد می‌گردد. در بخش بعد به چگونگی استفاده از فایل‌های ذکر شده در فوق در فرآیند کامپایل پرداخته می‌شود.

۲-۲-۲- روش‌های کامپایل

کد FAST به دو روش قابل اجرا است:

- اجرا در قالب یک کتابخانه دینامیک^۲.
- اجرا به صورت یک برنامه اجرایی مستقل^۳.

در روش اول، کد به صورت یک کتابخانه از مجموعه‌ای از توابع در می‌آید که می‌توان هر تابع از آن را به کمک API Win32 فراخوانی و اجرا نمود. علاوه بر این، سه تابع اساسی نیز در اختیار برنامه نویس قرار می‌گیرد که در زمان مقدار دهی اولیه، اجرای گام به گام^۴ و خاتمه می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. این سه تابع، کلیه محاسبات و فراخوانی‌های لازم را به صورت خودکار انجام می‌دهند و برنامه نویس را از دانستن جزئیات پیاده‌سازی کتابخانه FAST بی‌نیاز می‌کنند. این همان روشی است که توسط LabVIEW و Matlab به کار

¹ Motherboard

² Dynamic Linked Library(DLL)

³ Stand-Alone Executable(exe)

⁴ Epoch

گرفته می‌شود. به کمک این روش می‌توان شبیه‌سازی‌هایی کاملاً کنترل شده را پیاده‌سازی نمود و نتایج را در هر گام اجرایی ملاحظه کرد و در صورت لزوم پارامترهای سیستم را در لحظه تغییر داد.

در روش دوم کد به صورت یک برنامه کاملاً مستقل ورودی‌های لازم را از فایل‌های تنظیمات همراه می‌خواند و نتایج به دست آمده را نیز در فایل‌های خروجی می‌نویسد. در این حالت از اجرا هیچ کد دیگری توانایی دخالت و یا حتی پایش لحظه به لحظه خروجی‌های تولید شده را ندارد. به کمک این روش می‌توان شبیه‌سازی‌های کاملاً مستقل را اجرا نمود و پس از اتمام اجرا، نتایج را بررسی کرد.

برای تولید کد FAST به صورت هر یک از قالب‌های اشاره شده، به ۲ طریق می‌توان عمل کرد: ۱- با استفاده از خط فرمان و ۲- با استفاده از برنامه Visual Studio. در ادامه این دو روش تشریح می‌گردند.

کامپایل از طریق خط فرمان

کامپایل، شامل مشخص کردن فایل‌هایی است که لازم است در کنار یکدیگر به کامپایلر معرفی شوند تا کامپایلر با ترجمه آن‌ها به زبان ماشین هدف، فایل‌های obj. را ایجاد کند. پس از آن لازم است تا برنامه مرتبط کننده^۱ بر اساس ساختار سیستم عامل هدف، با انجام محاسبات مربوط به پیکربندی حافظه و ارتباطات توابع مختلف موجود در فایل‌های obj. یک برنامه اجرایی و یا کتابخانه قابل استفاده به وجود بیاورد. همچنین در صورتیکه از کتابخانه‌های خاصی در هنگام برنامه نویسی استفاده شده باشد لازم است تا این کتابخانه‌ها در دسترس کامپایلر و مرتبط کننده قرار گیرد.

از آنجایی که این عملیات به کررات و بدون هیچ تغییری در تعداد فایل‌ها، کتابخانه‌ها و تنظیمات اتفاق می‌افتد، لذا این فرامین در یک فایل دسته‌ای ذخیره می‌شوند تا در هر تکرار، از نوشتن فرامین پیچیده و زمان‌گیر جلوگیری شود. محتوای این فایل در جدول پ ۵ آورده شده است (لازم به ذکر که بعضی از تنظیمات تنها یکبار و آن هم در هنگام باز کردن مفسر خط فرمان (CMD.exe) باید اجرا شوند. این تنظیمات در قالب فایل VS_Correction.bat که در جدول پ ۴ آورده شده است، نوشته شده است. یکبار اجرای این فایل لازم و کافی است).

با هر بار اجرای فایل Compile_FASTforLabview_Optimized.bat تمامی عملیات مربوط به احضار کامپایلر و مرتبط کننده به صورت خودکار انجام می‌شود و در نهایت، در صورت عدم وجود خطا باید متنی مانند آنچه در جدول ۱-۲ دیده می‌شود، نمایش داده شود.

جدول ۱-۲- پیام نتیجه اجرای فایل دسته‌ای Compile_FASTforLabview_Optimized.bat

```
Intel(R) Visual Fortran Compiler for applications running on IA-32, Version 10.1    Build
20100611 Package ID: w_fc_p_10.1.034
Copyright (C) 1985-2010 Intel Corporation. All rights reserved.

Compiling FAST, AeroDyn, InflowWind, and NWTCLibrary routines to create ..\FAST_RT_DLL.dll:
Compelete Build
LINK : LNK6004: ..\FAST_RT_DLL.dll not found or not built by the last incremental link;
performing full link
LIBCMT.lib(clock.obj) : warning LNK4078: multiple '.CRT' sections found with different attributes
(40300040)
LIBCMT.lib(clock.obj) : warning LNK4078: multiple '.CRT' sections found with different attributes
(40300040)
Creating library ..\FAST_RT_DLL.lib and object ..\FAST_RT_DLL.exp
LINK : warning LNK4078: multiple '.rdata' sections found with different attributes (C0000040)

' file(s) copied.
```

¹ Linker

خروجی نهایی، فایل FAST_RT_DLL.dll است که کتابخانه‌ای قابل اجرا بر روی سیستم عامل‌های ویندوز و Phar lap ETS (سیستم عامل زمان-حقیقی سیستم هدف) می‌باشد.

کامپایل با استفاده از محیط گرافیکی Visual Studio

محیط توسعه گرافیکی Visual Studio محصول شرکت ماکروسافت این امکان را به کاربر می‌دهد که در یک محیط بصری زیبا کلیه عملیات لازم جهت کد نویسی و کامپایل و خطایابی را به صورت یکپارچه انجام دهد. برای کامپایل کد FAST نیز می‌توان از قابلیت‌های این محیط بهره جست. این بخش چگونگی ایجاد یک پروژه، اضافه کردن کدها، تنظیمات کامپایلر و در نهایت کامپایل کردن را در مجموعه Microsoft Visual Studio 2008 نشان می‌دهد. ترتیب عملیات مورد نیاز به صورت زیر خواهد بود:

۱. ساخت یک پروژه جدید

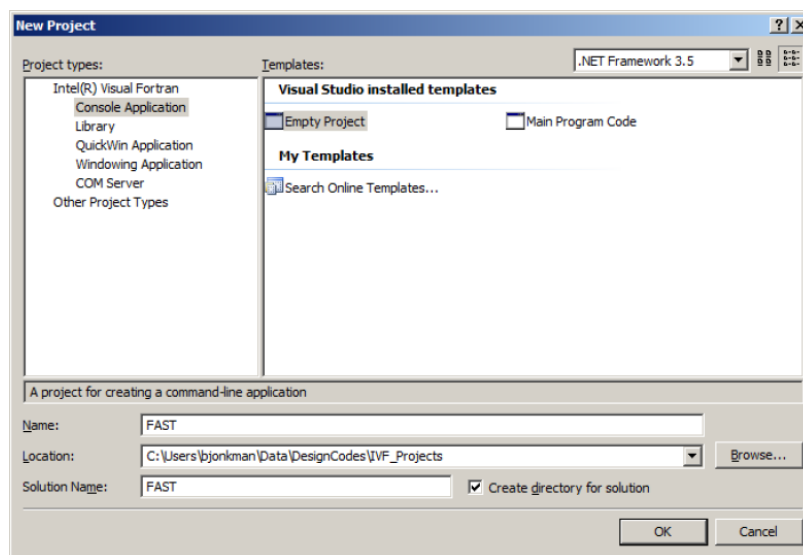
۲. افزودن فایل‌های کد به پروژه ایجاد شده

۳. تنظیمات کامپایلر و مرتبط کننده^۱

۴. ساخت پروژه^۲

ساخت یک پروژه جدید

برای ساخت یک پروژه جدید ابتدا محیط Visual Studio باز شده و با انتخاب گزینه New Project از منو فایل، یک پروژه جدید از زیر مجموعه Intel Visual Fortran و از نوع Console Application انتخاب شود. از سمت راست Empty Project انتخاب شده و نام FAST در قسمت Name برای آن انتخاب شود (شکل ۲-۱).



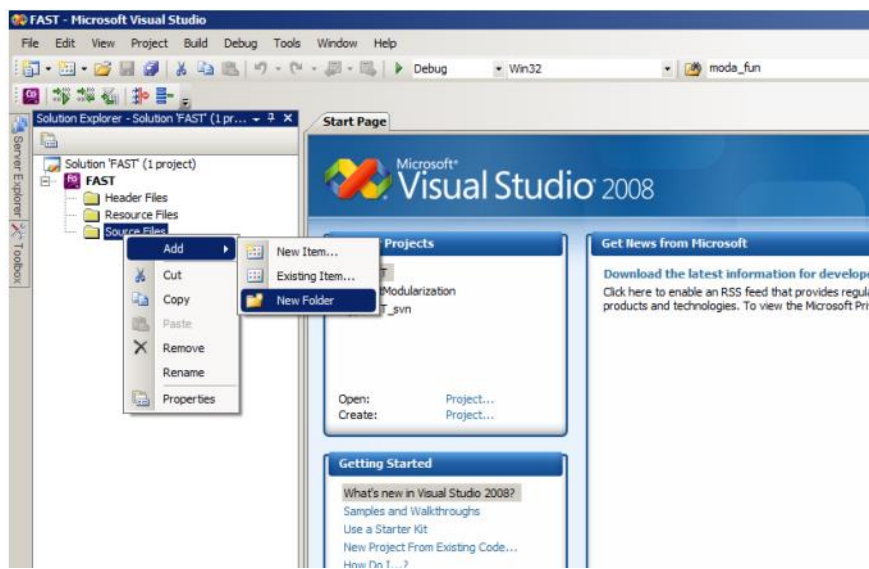
شکل ۲-۱- ساخت یک پروژه جدید در Visual Studio

^۱ Linker

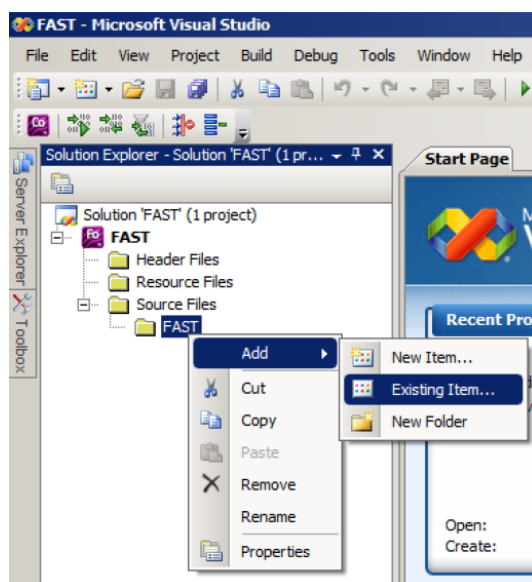
^۲ در مجموعه ویژوال استدیو به عملیات کامپایل و لینک، ساخت پروژه گفته می‌شود.

افزودن فایل‌های کد به پروژه/ایجاد شده

پس از ایجاد پروژه جدید لازم است تا فایل‌های کد FAST و ماژول‌های مورد نظر به آن اضافه شوند. برای نظم دهی بهتر به ساختار پروژه بهتر است تا با کلیک راست بر روی ساختار پروژه در زیر مجموعه Source Files، گزینه Add > New Folder انتخاب شود. Visual Studio یک پوشه خالی با نام NewFolder1 را اضافه خواهد کرد که بهتر است نام آن به اسم معنی دار FAST تغییر داده شود. با کلیک راست بر روی فولدر جدید، گزینه Add > Existing Item انتخاب شود تا پنجره مدیریت فایل باز شود.

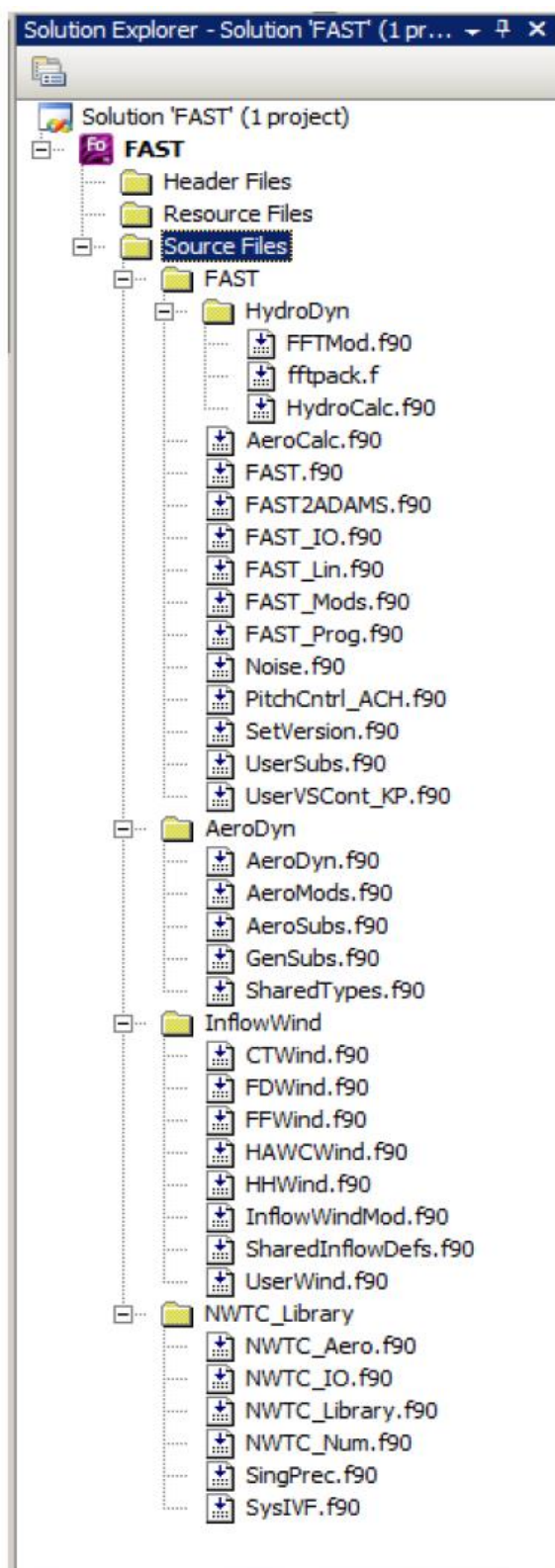


شکل ۲-۲- اضافه کردن فولدر جدید به ساختار پروژه



شکل ۲-۳- افزودن فایل‌های موجود به پروژه

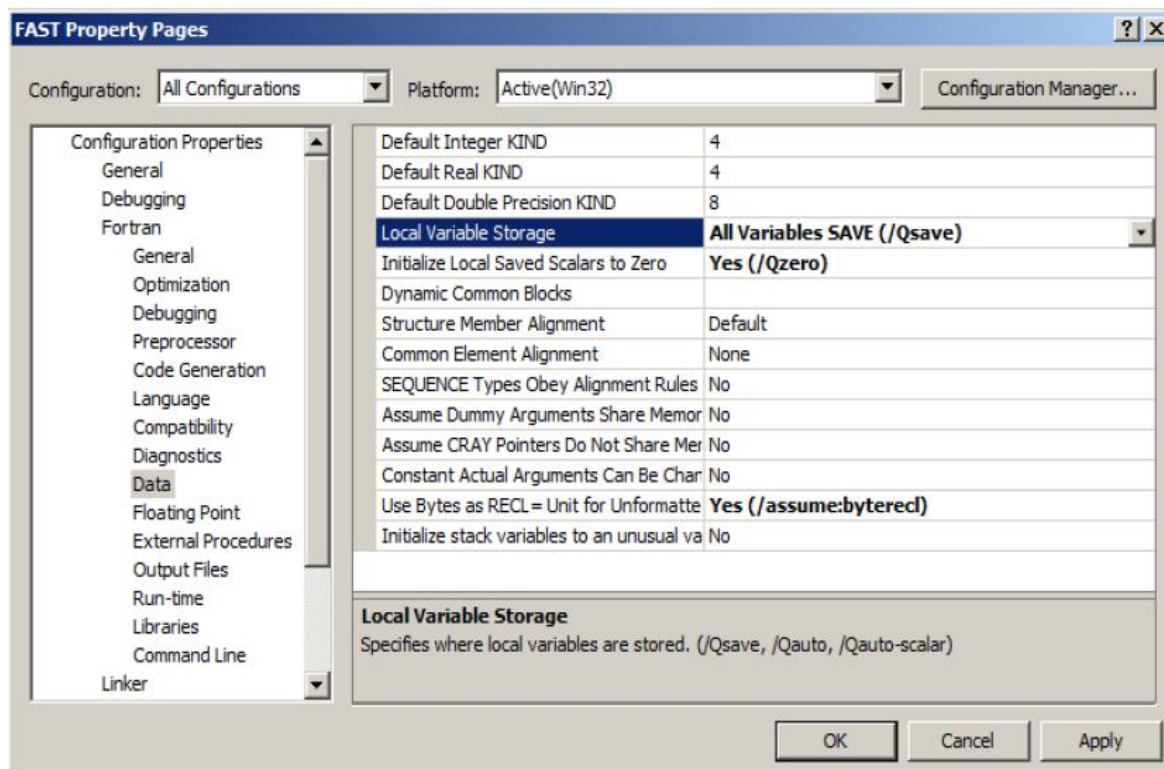
در پنجره مدیر فایل تمامی فایل‌های مربوط به پروژه انتخاب شده و به پروژه افزوده شوند. بر همین منوال تمامی فایل‌ها و ساختارهای لازم به پروژه اضافه شوند تا ساختار شکل ۲-۴ حاصل گردد.



شکل ۴-۲- ساختار پروژه FAST

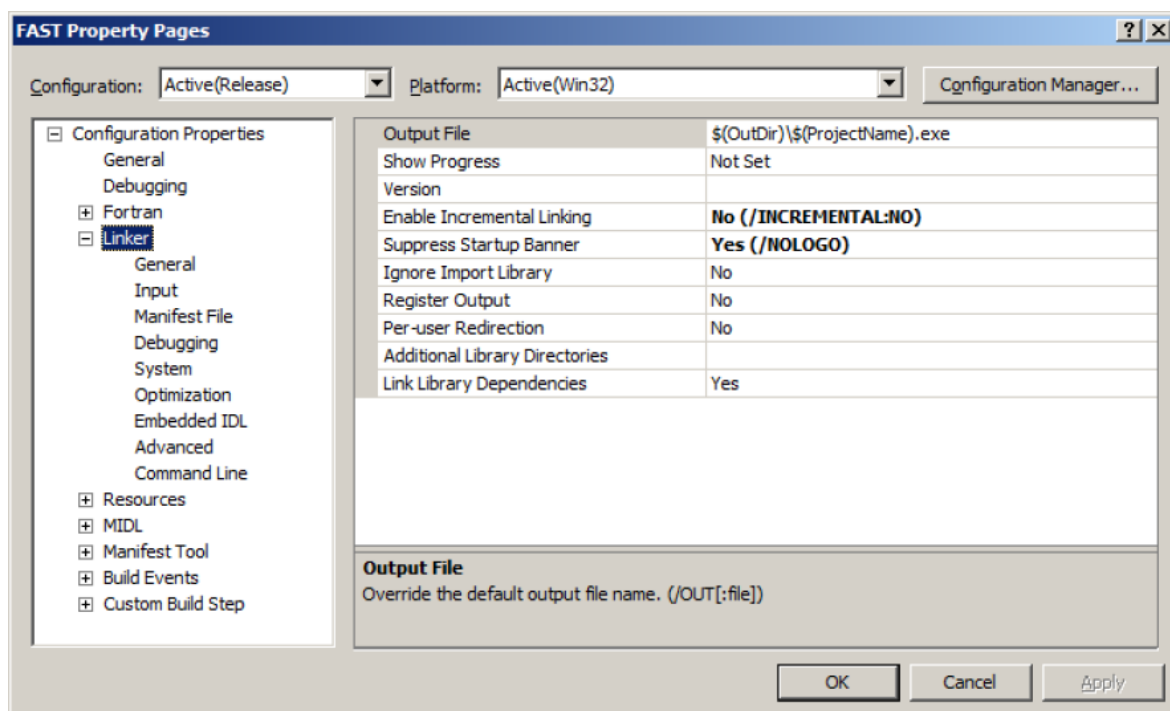
تنظیمات کامپایلر و مرتبط کننده

در مرحله بعد لازم است تا تنظیمات مربوط به کامپایلر و مرتبط کننده انجام شود. به این منظور از بخش ساختار درختی پروژه، با کلیک راست بر روی نام پروژه و انتخاب گزینه Properties، پنجره‌ای با نام FAST Property Pages نمایان می‌شود.



شکل ۵-۲- پنجره تنظیمات پروژه

در ادامه در بخش Configurations گزینه All Configurations انتخاب شود. همچنین در سمت چپ پنجره از ساختار درختی، گزینه Configuration Properties > Fortran > Data انتخاب شود. تمامی گزینه‌های سمت راست باید همانند شکل ۵-۲ انجام گیرد. مجدداً در سمت چپ پنجره از ساختار درختی گزینه Configuration Properties > Linker > General انتخاب شود. تمامی گزینه‌های سمت راست باید همانند شکل ۶-۲ انجام شود.

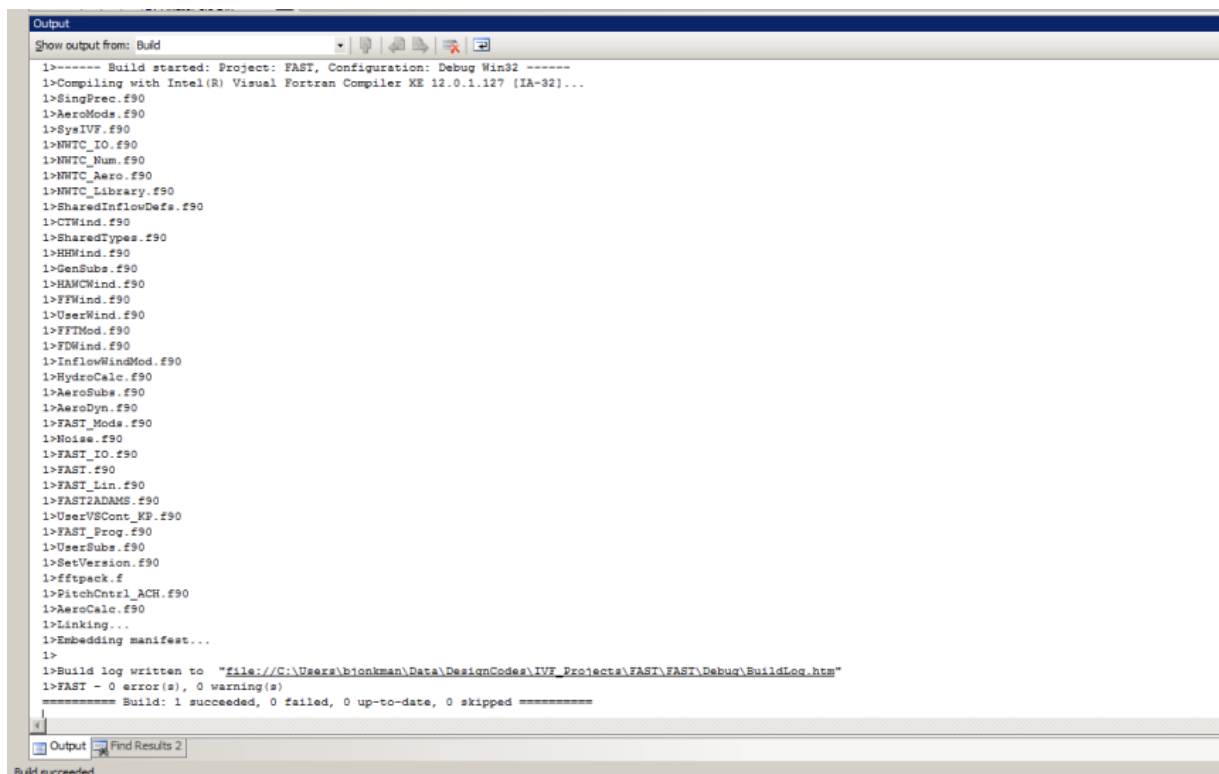


شکل ۶-۲-تنظیمات مرتبط کننده

ساخت پروژه

ساخت پروژه در دو حالت Debug و Release امکان پذیر است. حالت Debug به کاربر امکان خطایابی در هنگام اجرا را می‌دهد که البته این قابلیت همراه با کاهش سرعت اجرای محاسبات و ساخت غیر بهینه پروژه است. حالت Release حالتی است که در آن کدهای بهینه جهت اجرای سریع کدها تولید می‌شوند اما در صورت وجود خطا، برنامه بطور کلی متوقف می‌شود و امکان مشاهده خطاهای اتفاق افتاده و محل آن‌ها در کد وجود ندارد.

جهت ساخت پروژه، یکی از دو حالت Debug و یا Release از محل Build > Configuration Manager انتخاب شود. پس از آن از منو اصلی Build Solution > Build انتخاب شود. به این ترتیب پنجره Output نمایان خواهد شد و پیام‌های کامپایلر و مرتبط کننده را نمایش خواهد داد.



شکل ۷-۲- پنجره خروجی کامپایلر و مرتبط کننده

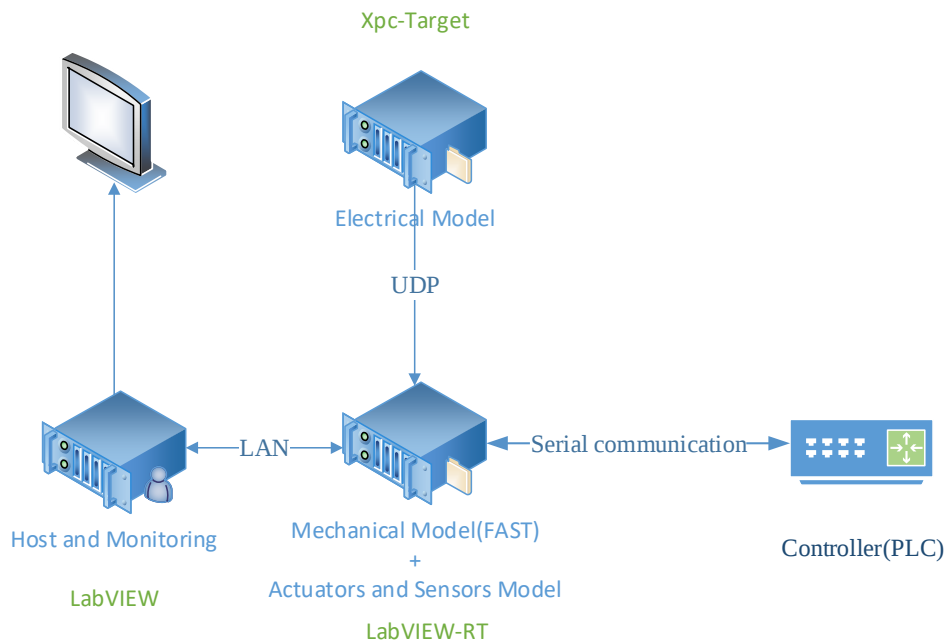
در صورت وجود هرگونه خطا در هنگام ساخت، پیام مربوطه و محل آن در پنجره Output نمایش داده خواهد شد. در نهایت در صورت موفق بودن کلیه عملیات، یک برنامه اجرایی با پسوند .exe ساخته خواهد شد و در مسیر پروژه روی دیسک سخت ذخیره می‌شود. این فایل به تنهایی قابل اجرا است و می‌تواند یک شبیه‌سازی را به طور کامل اجرا کند.

۲-۳- ساختار بندی کامپیوترهای هدف برای اجرای زمان-حقیقی

سیمولاتور مورد نظر برای توربین بادی باید علاوه بر اجرای زمان-حقیقی کد FAST توانایی اجرای زمان-حقیقی یک مدل دقیق از سیستم الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل را نیز داشته باشد. از آنجا که کد FAST از حجم محاسباتی بالایی برخوردار است و همچنین اجرای دقیق سیستم الکتریکی نیازمند به ثابت زمانی اجرای بسیار پایین (در حدود ۵۰ میکرو ثانیه) دارد، بنابراین اجرای این دو زیرسیستم در کنار هم و بر روی یک پردازنده میسر نیست و نیازمند به پیاده‌سازی بر روی دو پردازنده مجزا می‌باشند.

همچنین زیرسیستم کنترل به عنوان مغز توربین بادی با رصد سیگنالهای مختلف و پایش وضعیت توربین و ارسال فرامین متعدد به قسمتهای گوناگون نظیر عملگرهای پیچ و یاو، ژنراتور الکتریکی، رله‌های حفاظت، فن‌های خنک کننده و... عملکرد مناسب و ایمن توربین بادی را تامین می‌کند. بنابراین حجم انبوهی از اطلاعات در هر لحظه به سیستم کنترل وارد شده و فرامین مختلفی از آن خارج می‌شود که تاخیر در دریافت و ارسال این اطلاعات در عملکرد توربین بادی اهمیت زیادی دارد. به این ترتیب، برای اینکه سیستم شبیه‌ساز به واقعیت نزدیکتر شود، می‌توان سیستم کنترل را بصورت یک سیستم کنترل واقعی و مجزا همانند آنچه بطور عملی در یک توربین واقعی استفاده می‌شود در نظر گرفت و سیگنال‌های ورودی را بصورت شبیه‌سازی شده از یک بستر فیزیکی واقعی به آن ارسال و فرامین کنترلی را نیز از طریق بستر فیزیکی واقعی به شبیه‌ساز دینامیک انتقال داد.

با توجه به مطالب گفته شده، ساختار سخت افزاری مورد نظر برای سیمولاتور به صورت شکل ۸-۲ در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز از دو کامپیوتر هدف یکی برای پیاده‌سازی زمان-حقیقی کد FAST و مدل عملگرها و سنسورها در محیط LabVIEW-RT و دیگری جهت اجرای زمان-حقیقی مدل الکتریکی ژنراتور و مبدل در محیط Matlab_xPC-Target تشکیل می‌شود. همچنین یک PLC کنترل برای پیاده‌سازی سیستم کنترل در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن یک کامپیوتر میزبان به عنوان رابط کاربری گرافیکی جهت مقداردهی پارامترهای شبیه‌سازی و نمایش سیگنال‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۸-۲- شماتیک ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز

در ادامه به بررسی ساختار و عملکرد هر یک از اجزاء شبیه‌ساز پرداخته می‌شود.

۱-۲-۳- کامپیوتر هدف LabVIEW-RT

مهمترین قسمت شبیه‌ساز را می‌توان حل معادلات دینامیکی و آیرودینامیکی حاکم بر چرخش روتور و جابجایی و نوسانات برج، درایوت‌ترین و پره‌ها از طریق اجرای کد FAST به صورت زمان-حقیقی دانست. در فصل گذشته روش کامپایل کدهای FAST و ساخت یک فایل dll مناسب برای اجرا در بستر LabVIEW تشریح گردید. در این بخش به نحوه ساختار بندی کامپیوتر هدف جهت اجرای کدهای زمان-حقیقی پرداخته می‌شود.

ساختار بندی کامپیوتر هدف

برای آماده‌سازی کامپیوتر هدف به منظور ساختار بندی آن جهت برقراری یک سیستم زمان-حقیقی، انجام گام‌های زیر به ترتیب لازم است:

- نصب ماژول LabVIEW Real-Time بر روی سیستم میزبان.
- انجام تنظیمات سیستم هدف.

- نصب سیستم عامل زمان-حقیقی^۱ و درایورهای لازم بر روی سیستم هدف.

نصب مازول Real-Time

به منظور نصب مازول Real-Time باید ابتدا با نام کاربری administrator به سیستم وارد شد. پس از آن به کمک فایل نصاب (Setup.exe) به نصب مازول پرداخت. در نهایت در صورت نیاز، درایورهای سخت‌افزاری نصب گردد.

با اتمام نصب مازول Real-Time سه سیستم عامل زمان-حقیقی زیر در دسترس خواهند بود:

- NI Linux Real-Time
- Phar Lap ETS
- VxWorks

بسته به سخت‌افزار مورد استفاده به عنوان سیستم هدف، یکی از سه سیستم عامل معرفی شده به صورت خودکار انتخاب می‌شود و کدها متناسب با آن کامپایل و به سیستم هدف منتقل می‌شود. پس از اتمام نصب مازول، لازم است تا اجازه نامه استفاده^۲ صادره از شرکت NI توسط NI License Manager نصب شود.

نصب سیستم عامل زمان-حقیقی

برای نصب سیستم عامل زمان-حقیقی بر روی سیستم هدف، یک حافظه فلش USB لازم است. عملیات نصب به ترتیب زیر است:

- آماده‌سازی حافظه فلش USB برای برپایی^۳ سیستم هدف.

- تنظیم سیستم هدف جهت برپایی با USB

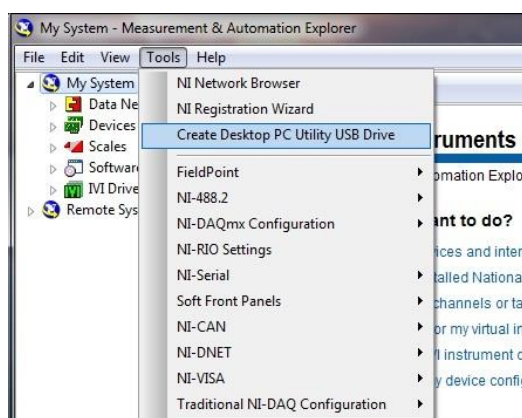
- ساختار بندی مجدد سیستم هدف

آماده‌سازی حافظه فلش USB برای برپایی سیستم هدف

- فلش USB به سیستم میزبان متصل شود.

- NI MAX باز شود.

- از منو Tools گزینه Create Desktop PC Utility USB Drive انتخاب شود (شکل ۹-۲).



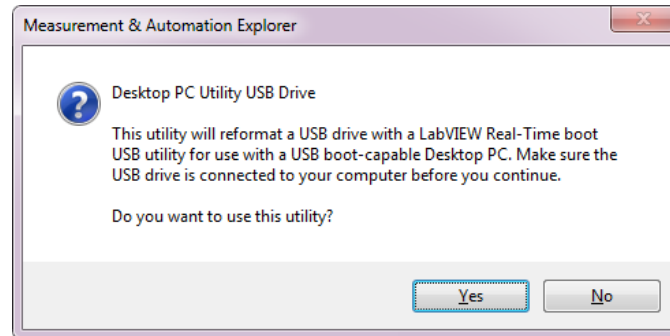
¹ Real Time Operating System(RTOS)

² License

³ Boot

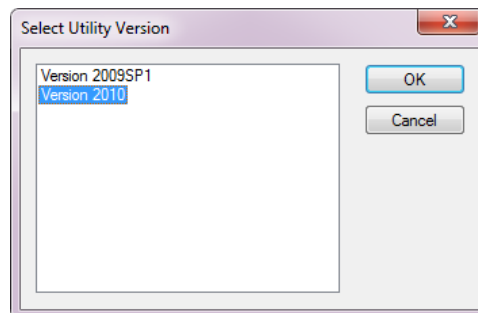
شکل ۹-۲ - انتخاب Create Desktop PC Utility USB Drive

- NI MAX فلش را فرمت خواهد کرد و تمامی اطلاعات آن حذف خواهد شد. جهت اطمینان از تصمیم کاربر، پیام خطاری همانند شکل ۱۰-۲ نمایش داده خواهد شد. با کلیک بر روی کلید Yes عملیات ادامه می‌یابد.



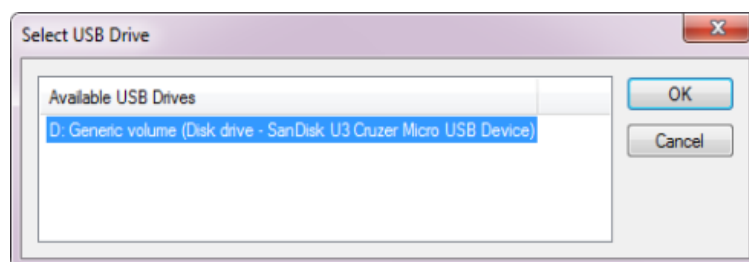
شکل ۱۰-۲ - پیام خطا از ادامه عملیات فرمت حافظه فلش USB

- در صورتیکه بر روی سیستم میزبان چند نسخه از مژول LabVIEW Real-Time نصب شده باشد، پنجره‌ای همانند شکل ۱۱-۲ جهت انتخاب نسخه مورد نظر نمایش داده می‌شود.



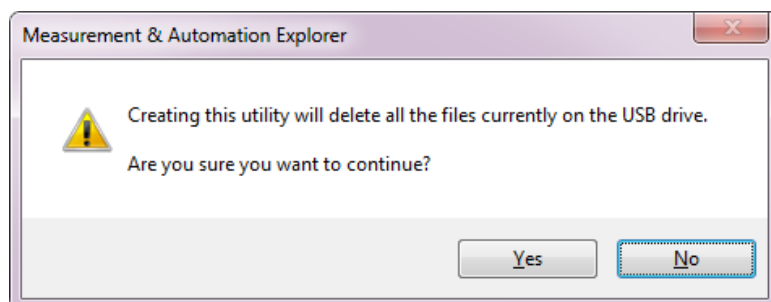
شکل ۱۱-۲ - پنجره انتخاب نسخه مورد نظر

- در ادامه، پنجره‌ای جهت انتخاب حافظه فلش مورد نظر نمایش داده می‌شود.



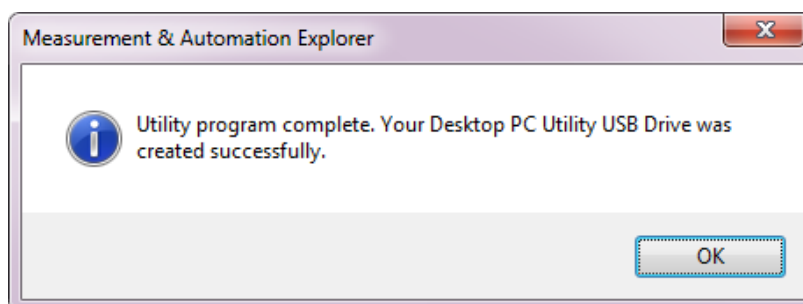
شکل ۱۲-۲ - پنجره انتخاب حافظه فلش

- مجدداً پنجره‌ای جهت اطمینان از ادامه عملیات و حذف تمامی فایل‌های موجود بر روی حافظه فلش نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۳-۲ - پنجره اخطار به کاربر در مورد حذف تمامی فایل‌های حافظه فلش

- پس از اتمام موفق عملیات فرمت حافظه فلش، پیام موفقیت در اتمام عملیات نشان داده می‌شود.



شکل ۱۴-۲ - پیام عملیات موفق

تنظیم سیستم هدف جهت برپایی با USB

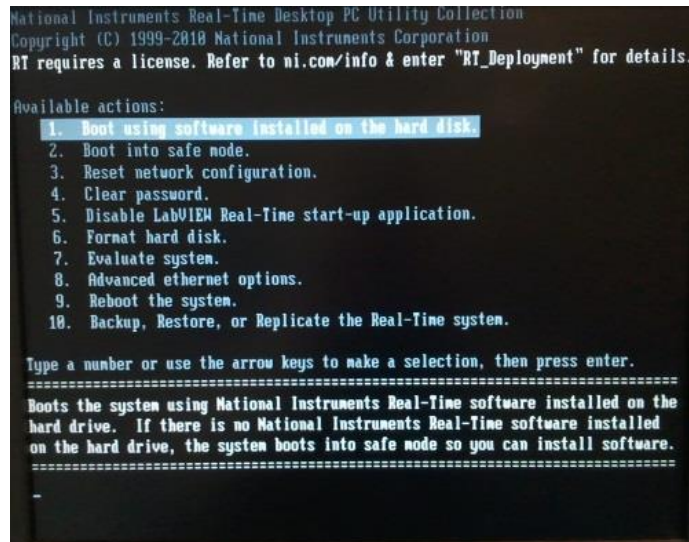
به منظور پیکربندی سیستم هدف و نصب سیستم عامل زمان-حقیقی باید ابتدا در هنگام بالا آمدن سیستم هدف، وارد تنظیمات BIOS^۱ شده و برپایی از طریق USB را فعال کرد.^۲

پیکربندی سیستم هدف

بعد از انجام تنظیمات BIOS و راه‌اندازی سیستم، سیستم به طور خودکار به کمک USB برپا خواهد شد و نرم‌افزار پیکربندی سیستم عامل زمان-حقیقی نشان داده می‌شود. این نرم‌افزار به صورت یک منو متنی است که در شکل ۱۵-۲ دیده می‌شود.

^۱ Basic Input/Output System(BIOS)

^۲ چگونگی ورود به BIOS و تنظیمات آن در دفترچه راهنمای مادربرد ذکر شده است.



شکل ۱۵-۲- منو متنی نرم‌افزار پیکربندی سیستم عامل زمان حقیقی

باید گزینه شماره ۶ از فهرست، یعنی گزینه "Format Hard Disk" انتخاب شود. در این حالت سیستم عامل بر روی قسمتی از دیسک سخت کامپوتر نصب شده و با هر بار روشن کردن کامپیوتر چنانچه در تنظیمات BIOS راه‌اندازی بر روی دیسک سخت انتخاب شده باشد، سیستم عامل زمان-حقیقی به طور خودکار بالا آمده و راه‌اندازی می‌گردد. پس از انتخاب گزینه ساختار بندی دیسک سخت، سه گزینه زیر نمایش داده خواهد شد (شکل ۱۶-۲).

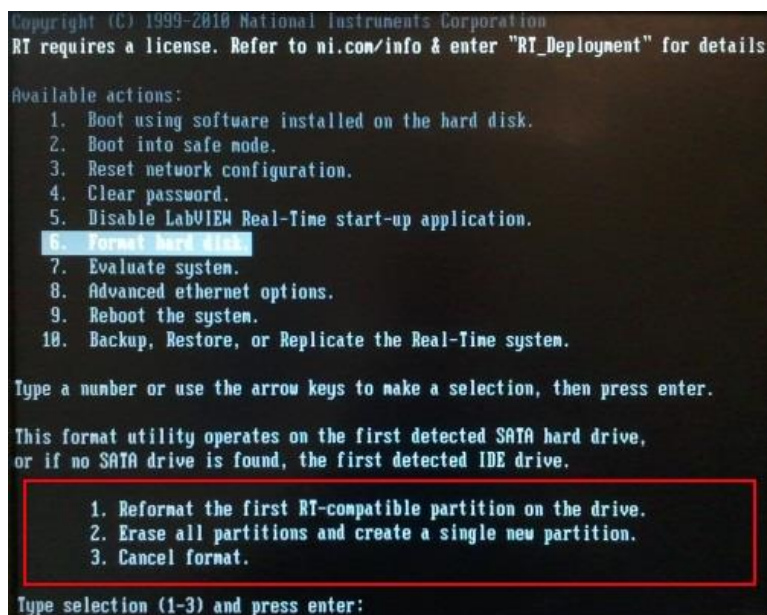
- فرمت مجدد اولین پارتیشن^۱ سازگار با سیستم عامل زمان حقیقی.

- پاک کردن تمامی پارتیشن‌ها و ایجاد تنها یک پارتیشن.

- نادیده گرفتن و بازگشت به منو اصلی

در صورتیکه اطلاعات روی دیسک سخت اهمیتی ندارند، می‌توان با انتخاب گزینه دوم عملیات پارتیشن‌بندی را به نرم‌افزار واگذار کرد. در صورتیکه قصد برپایی همزمان چند سیستم عامل در کنار یکدیگر وجود دارد باید گزینه اول انتخاب شود (دقت شود که قبل از ورود به نرم‌افزار پیکربندی، به کمک نرم‌افزارهای پارتیشن‌بندی یک پارتیشن از نوع Primary با فرمت FAT ایجاد شده باشد تا نرم افزار به صورت خودکار آن را پیدا کرده و سیستم عامل را روی آن نصب کند).

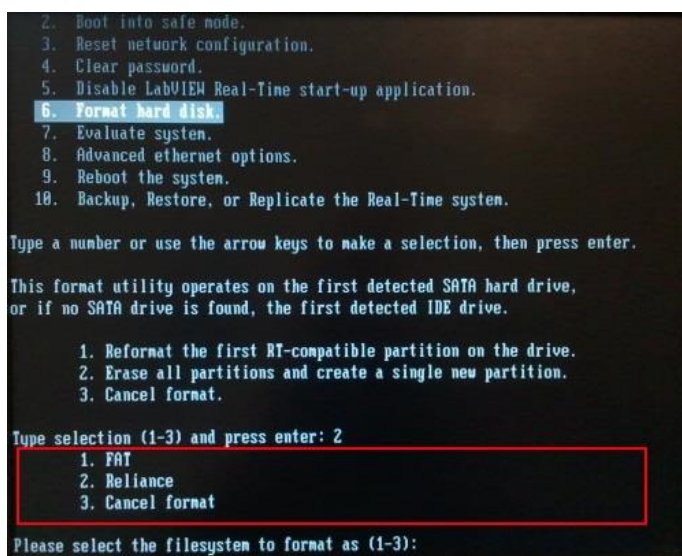
^۱ Partition: به بخش‌بندی‌های منطقی دیسک سخت پارتیشن گفته می‌شود. هر پارتیشن به صورت یک درایو مجزا در سیستم عامل ویندوز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶-۲- گزینه ساختار بندی دیسک سخت

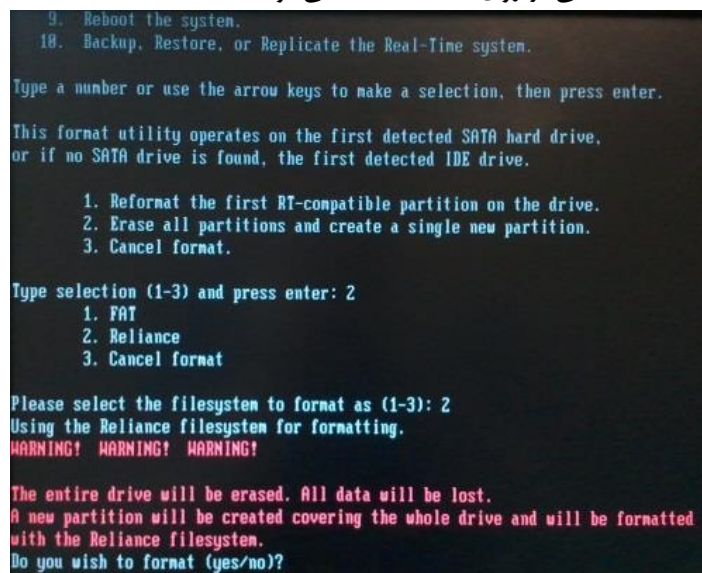
در مرحله بعد سه گزینه جهت انتخاب نوع فایل سیستم نمایش داده می‌شود (شکل ۱۷-۲):

- فایل سیستم FAT که یک فایل سیستم قدیمی است و توسط اکثر سیستم عامل‌ها پشتیبانی می‌شود. این فایل سیستم بسیار ساده و ابتدایی است و در مقابل قطع ناگهانی برق و یا مشکلات دیگر چندان قابل اطمینان نیست و امکان از دست رفتن اطلاعات وجود دارد.
- فایل سیستم Reliance که در سیستم عامل‌های خاصی پشتیبانی می‌شود و امکان خواندن آن به طور مستقیم در سیستم عامل ویندوز وجود ندارد. این فایل سیستم در مقابل قطع ناگهانی برق قابل اطمینان است و اطلاعات را تا حد ممکن حفظ می‌کند.
- لغو و بازگشت به منو اصلی.



شکل ۱۷-۲- منو مربوط به انتخاب فایل سیستم

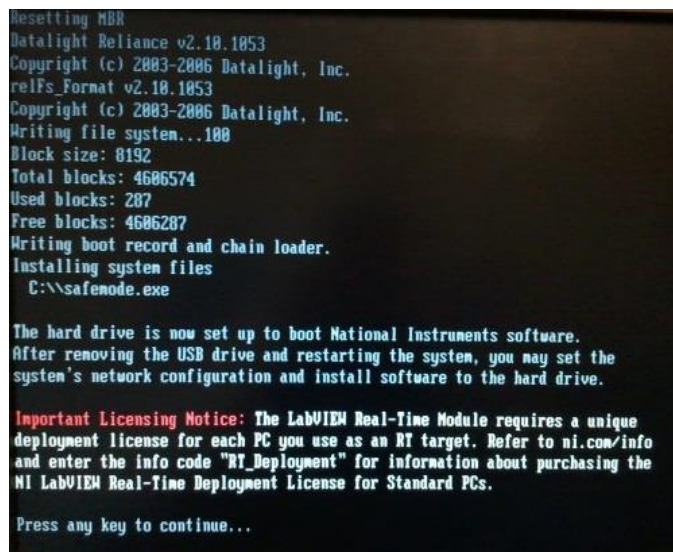
در سیستم‌های HIL، قطع برق منجر به از کار افتادن تمامی شبیه‌سازی خواهد شد و نگهداری اطلاعات چندان حیاتی نیست لذا جهت سهولت در دسترسی‌های بعدی به اطلاعات ذخیره شده در هنگام شبیه‌سازی می‌توان FAT را به عنوان فایل سیستم انتخاب کرد. پس از انتخاب فایل سیستم، پیغام هشدار به کاربر نمایش داده می‌شود زیرا که عملیات پیکربندی و پارتیشن‌بندی موجب حذف اطلاعات فعلی بر روی دیسک سخت می‌شود.



شکل ۱۸-۲-پیام اخطار قبل از اجرای پارتیشن‌بندی و فرمت

پس از تایید عملیات، پارتیشن‌بندی مجدد و فرمت آغاز می‌شود و در نهایت سیستم با پیامی شبیه آنچه در شکل ۱۹-۲ دیده می‌شود خاتمه عملیات را نشان می‌دهد و منتظر می‌ماند تا کاربر کلیدی را فشار دهد. با فشار کلید، سیستم راه‌اندازی مجدد می‌شود و در صورتیکه در حین راه‌اندازی USB جدا شود، سیستم عامل زمان حقیقی کنترل را به دست خواهد گرفت.

پس از برپایی سیستم هدف و اجرای سیستم عامل زمان حقیقی، کلیه عملیات مربوط به تنظیمات و انتقال برنامه از طریق NI MAX انجام خواهد شد و امکان استفاده از موس و صفحه کلید وجود نخواهد داشت. نمایشگر سیستم تنها پیام‌های مربوط به وضعیت سیستم عامل را نمایش خواهد داد و از گرافیک پیشرفته خبری نخواهد بود. این مسئله به علت حفظ منابع سیستم و جلوگیری از ایجاد کمترین تاخیر پیش‌بینی نشده ناشی از تعامل با کاربر و یا ایجاد نمایش گرافیکی است.



شکل ۱۹-۲- پیام نهایی ساختار بندی

تنظیمات سیستم هدف زمان-حقیقی

به کمک NI MAX می‌توان تنظیمات سیستم هدف را از طریق شبکه انجام داد و درایورهای لازم را روی آن نصب کرد. فایل نصب NI MAX بر روی دی-وی-دی LabVIEW موجود است. دو نوع سیستم هدف زمان حقیقی وجود دارد:

- Networked RT Targets
- Desktop PC Targets

توجه شود که جهت اتصال به سیستم هدف لازم است تا آن سیستم در یک زیر شبکه محلی با سیستم میزبان قرار گیرد. در صورت نصب NI Web-based Configuration & Monitoring می‌توان تنظیمات سیستم هدف را به صورت مستقیم از طریق یک مرورگر وب انجام داد.

نصب نرم‌افزار بر روی سیستم هدف

پس از انجام موفق تنظیمات اولیه بر روی سیستم هدف، با کمک LabVIEW Real-Time Software Wizard از داخل NI MAX می‌توان نرم‌افزارها و درایورهای لازم را به سیستم هدف منتقل نمود و بر روی آن نصب کرد. جهت اجرای برنامه Wizard نرم‌افزار زمان-حقیقی، باید مراحل زیر به ترتیب انجام گیرد:

۱. اجرای برنامه NI MAX.
۲. یافتن سیستم هدف از داخل بخش Remote Systems و باز کردن زیرمجموعه‌های آن با کلیک بر روی گره مربوطه.
۳. اجرای زیربرنامه LabVIEW Real-Time Software Wizard با کلیک راست بر روی زیر مجموعه Software و انتخاب گزینه Add/Remove Software از منو باز شده.

در صفحه Wizard لیستی از تمامی نرم‌افزارهای موجود بر روی سیستم میزبان که قابلیت نصب بر روی سیستم هدف را دارند نمایش داده می‌شود و می‌توان بنا به نیاز هر کدام از نرم‌افزارها را بر روی سیستم هدف حذف یا اضافه نمود.

۴. نصب نرم‌افزار موردنظر با کلیک بر روی گزینه Install the Feature.

بهینه‌سازی برای اجرا با چند پردازنده موازی

در صورتیکه سیستم هدف به پردازنده چند هسته‌ای یا چند پردازنده مجهز است، سیستم عامل زمان حقیقی این مسئله را تشخیص داده و درایورهای SMP^۱ لازم را نصب خواهد کرد. جهت استفاده از این قابلیت لازم است تا در هنگام توسعه کدهای نرم‌افزاری از روش‌ها و تکنیک‌ها مقتضی استفاده نمود. جهت اطلاع از این روش‌ها می‌توان به سیستم کمک داخل نرم‌افزار LabVIEW مراجعه کرد.

۲-۳-۲- کامپیوتر هدف SLRT^۲

یکی از محیط‌های قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های الکتریکی، بستر SimPower از نرم‌افزار Matlab می‌باشد. این بستر با دارا بودن المانهای متعدد الکتریکی شامل مقاومت، خازن، سلف، منابع ولتاژ و جریان، ترانسفورماتور، مدارات دیودی و سوئیچ‌های IGBT و... به علت برخورداری از مدل‌های معتبری از ماشین‌های الکتریکی مختلف و ارائه روش‌های حل عددی دقیق برای حل معادلات حاکم بر مدارات الکتریکی یکی از ابزارهای پرکاربرد می‌باشد. قابلیت‌های بالای این بستر در کنار امکان اجرای زمان حقیقی شبیه‌سازی مدل‌های توسعه داده شده در این بستر در محیط SLRT موجب به‌کارگیری یک بستر شبیه‌سازی زمان-حقیقی مبتنی بر SLRT در شبیه‌ساز گردید. در ادامه به توصیف ساختار شبیه‌سازی زمان-حقیقی در محیط SLRT و نحوه ساختاربندی کامپیوتر هدف جهت پیاده‌سازی این شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

مروری بر تاریخچه SLRT و نسخه انتخابی

جعبه ابزار Real-Time Simulink (SLRT) اولین بار در نسخه R2014a ارائه شده است و پس از آن در هر سال در دو نسخه a و b محصولات شرکت Mathworks ارائه شده است.

در واقع جعبه ابزار xPC-Target که قبل از این نسخه وجود داشت با بروزرسانی به SLRT تغییر نام پیدا کرد. محصول xPC-Target Embedded نیز که قبل از این نسخه دارای یک مجوز^۳ مستقل بود، نیز به قابلیت‌های SLRT اضافه شده و دیگر دارای مجوز مستقل نیست و با مجوز SLRT نصب می‌شود.

با توجه به سابقه بسیار زیاد جعبه ابزار xPC-Target شهرت نام xPC-Target بسیار بیشتر از Simulink Real-Time می‌باشد و برای جستجو در صفحات اینترنت و پیدا کردن مطالب بیشتر بهتر است از واژه xPC-Target استفاده شود. البته در سایت Mathworks به طور اتوماتیک با جستجوی واژه Simulink Real-Time مطالب راجع به واژه xPC-Target نیز آورده می‌شود.

جعبه ابزار xPC-Target از نسخه‌های اولیه Matlab به شماره R14SP1 وجود داشته است. این جعبه ابزار تا نسخه R2011a تنها بر روی نسخه‌های ۳۲ بیتی Matlab وجود دارد و از نسخه R2011b نیز علاوه بر نسخه‌های ۳۲ بیتی بر روی نسخه‌های ۶۴ بیتی Matlab نیز وجود دارد.

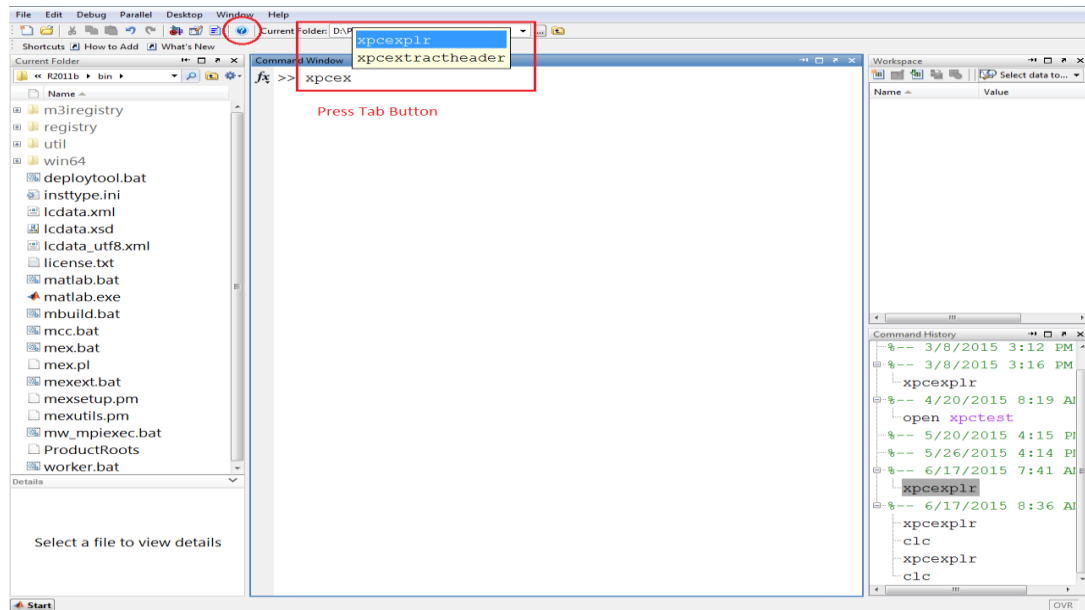
در شکل ۲۰-۲ نمایشی از نسخه R2011b و همچنین دستور xpcexplr را برای آوردن واسط گرافیکی xPC-Target در کامپیوتر میزبان مشاهده می‌شود. پس از اجرای دستور xpcexplr واسط گرافیکی xPC-Target برای انجام تنظیمات کامپایلر، کامپیوتر هدف و ... مطابق شکل ۲۱-۲ باز می‌شود.

در صورت برپا شدن کامپیوتر هدف با هسته بلادرنگ xPC-Target صفحه نمایش کامپیوتر هدف مطابق شکل ۲۲-۲ می‌باشد. در صورت بارگذاری و اجرای یک برنامه نمونه نیز صفحه نمایش کامپیوتر هدف مطابق شکل ۲۳-۲ می‌باشد.

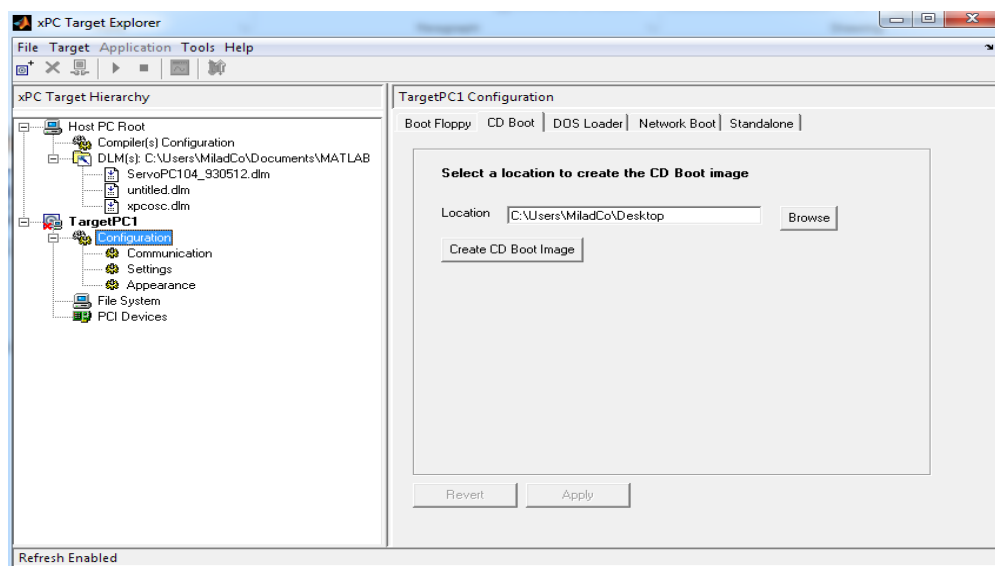
^۱ Symmetric multiprocessing

^۲ Simulink Real-Time

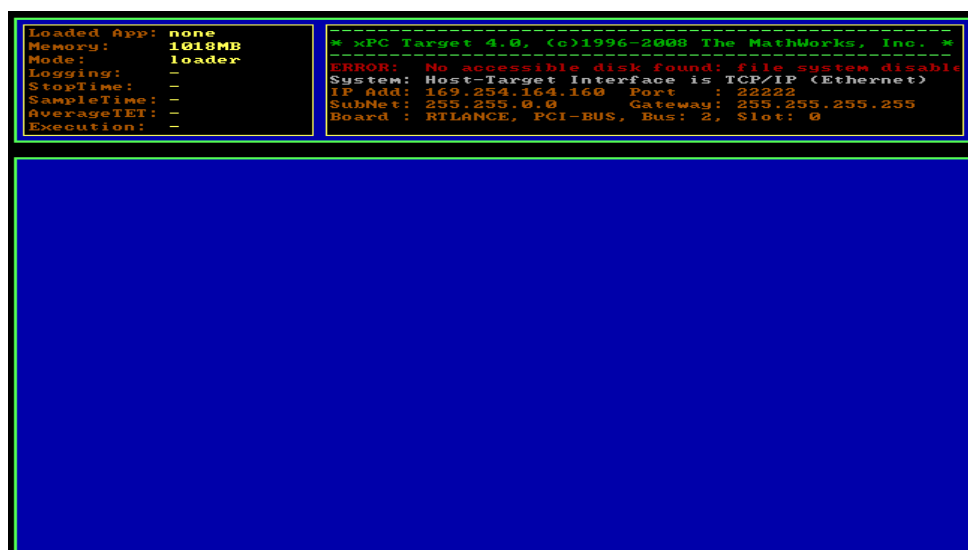
^۳ License



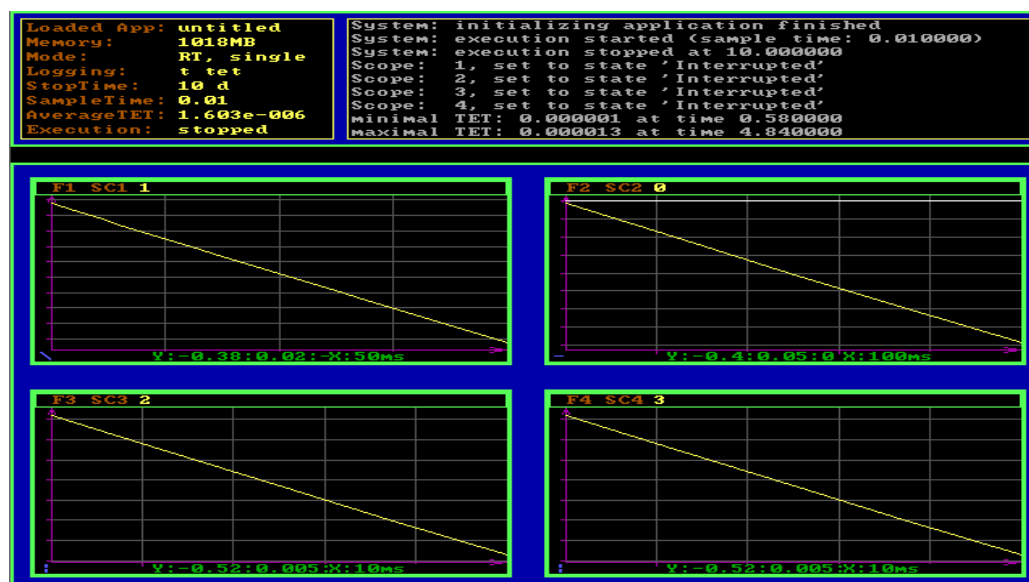
شکل ۲۰-۲ نمایشی از نسخه R2011b نرم افزار Matlab و دستور xpceexplr



شکل ۲۱-۲ واسطه گرافیکی xPC Target در نسخه R2011b نرم افزار Matlab

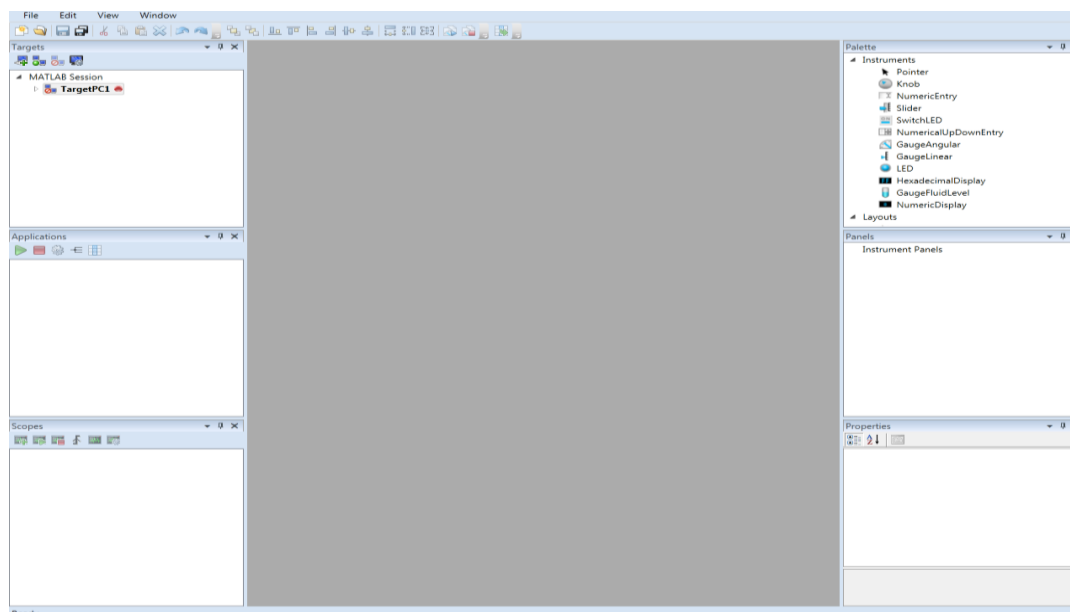


شکل ۲۲- صفحه نمایش کامپیوتر هدف پس از برپا شدن با هسته بلادرنگ xPC Target در نسخه R2011b نرم افزار Matlab



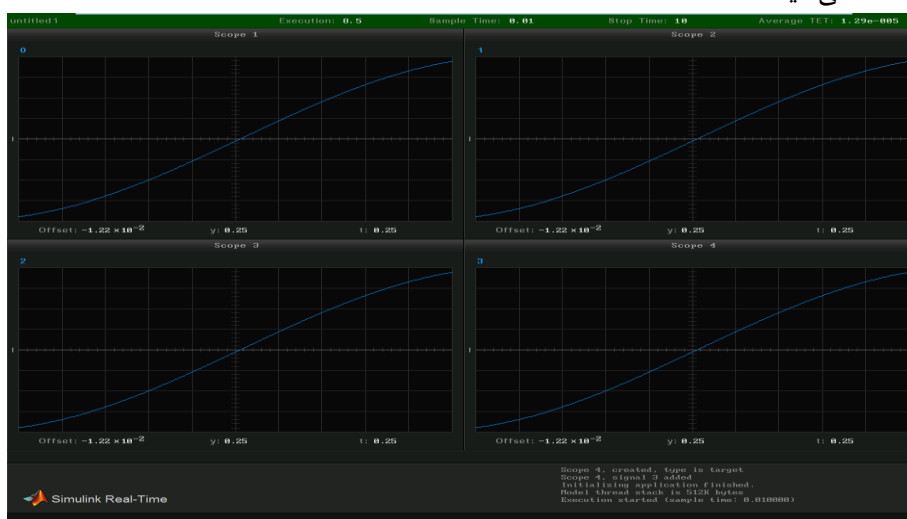
شکل ۲۳- صفحه نمایش کامپیوتر هدف پس از اجرای یک برنامه در نسخه R2011b نرم افزار Matlab

تا نسخه R2011b راهنمای Matlab و پیرو آن xPC-Target به صورت کاملاً درختی و ساختار یافته می‌باشد. در نسخه R2012a ظاهر Matlab بسیار تغییر کرد و با گرافیک بالاتری ارائه شد. ظاهر ارائه شده بسیار شبیه Microsoft Visual Studio است. در این نسخه، راهنمای Matlab دیگر به صورت کاملاً درختی نمی‌باشد و به مرور در نسخه‌های بعدی نیز از قابلیت‌های درختی آن کم شد و حتی بعضی از مطالب حذف گردید. اما قابلیت‌هایی مانند چند جستجو در راهنما اضافه شد. در نسخه R2012b واسط گرافیکی xPC-Target با نمای جدید و قابلیت‌های بیشتر مجدداً طراحی شد. نمایی از این واسط جدید را در شکل ۲۴-۲ مشاهده می‌کنید.



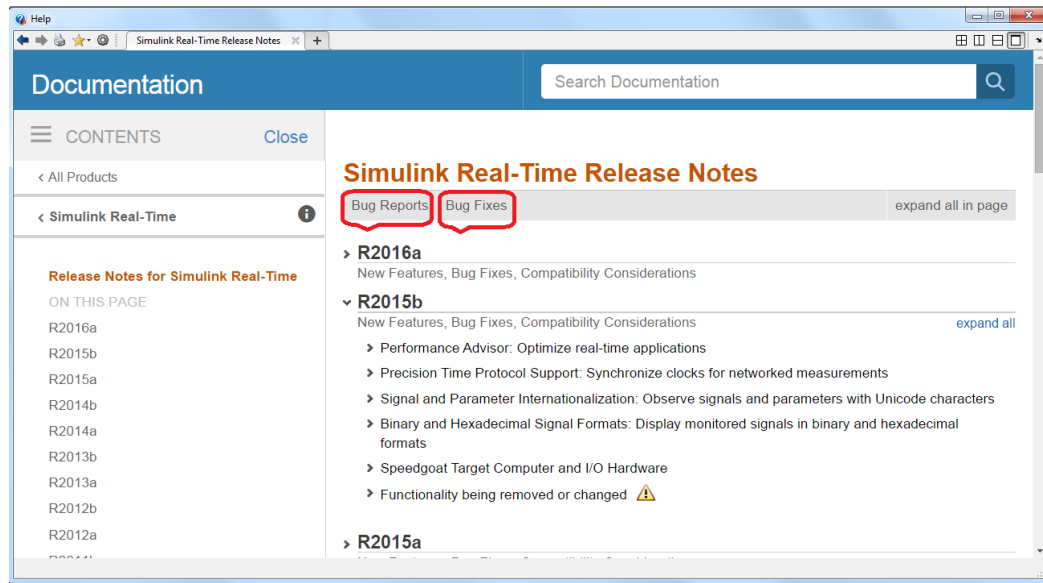
شکل ۲۴-۲- ظاهر واسط گرافیکی xPC Target در نسخه R2012b

در نسخه R2014a همانطور که ذکر شد جعبه ابزار SLRT برای اولین بار ارائه شد. در این نسخه گرافیک کامپیوتر هدف بسیار بهبود بخشیده شد. نمایی از صفحه نمایش کامپیوتر هدف را در حین اجرای یک برنامه در شکل ۲۵-۲ مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۵-۲- صفحه نمایش کامپیوتر هدف در نسخه R2014a

مطابق شکل ۲۶-۲ در قسمت Release Notes جعبه ابزار SLRT می‌توانید ویژگی‌های نسخه‌های مختلف را ببینید. همچنین در این قسمت از دو بخش Bug Reports و Bug Fixes می‌توان به باگ‌های گزارش شده و اصلاح شده در اینترنت دسترسی پیدا کرد.



شکل ۲۶-۲. بخش Release Notes جعبه ابزار SLRT

در حال حاضر شرکت Mathworks هر چند برخی از قابلیت‌ها را برای SLRT افزایش و توسعه می‌دهد اما در نسخه‌های جدید بسیاری از خصوصیات و راه‌انداز کارت‌ها را حذف می‌کند. به طور مثال در نسخه R2013b راه‌انداز بسیاری از کارت‌ها از جمله کلیه کارت‌های شرکت Advantech را که در ایران بسیار مرسوم بود حذف کرد. همچنین این شرکت به شدت سیاست انحصاری کردن کارت‌های پشتیبانی شونده از شرکت Speedgoat که مؤسسين آن از شرکت Mathworks بوده را دنبال می‌کند.

برای انتخاب یک نسخه Matlab برای SLRT یا xPC-Target باید امکانات ارائه شده برای نسخه‌ها و ملاحظات پشتیبانی از سخت افزار و باگ‌های موجود را مد نظر قرار داد.

در صورت عدم محدودیت‌های سخت‌افزاری و با توجه به رو به توسعه بودن جعبه ابزارهای Matlab، قابلیت‌های Simulink برای نسخه‌های جدید، برنامه‌نویسی را دلپذیرتر می‌کند و بهتر است که از نسخه‌های جدیدتر استفاده شود. با توجه به تجربه‌های قبلی که نسخه‌های مختلف مورد تست و بهره‌برداری قرار گرفته است، برای انجام این پروژه نسخه R2015b که جزء بهترین نسخه‌ها است انتخاب می‌شود.

نصب و پیکربندی

در این بخش ابتدا به بررسی نیازمندی‌های لازم برای برپایی یک سیستم SLRT پرداخته شده و سپس نحوه پیکربندی و تنظیمات مورد نیاز تشریح می‌گردد. با توجه به مطالب بیان شده در بخش گذشته که بیان کننده ساختار SLRT بود، حداقل اجزاء ابتدایی SLRT مورد نیاز برای اجرای برنامه شامل یک کامپیوتر میزبان، یک کامپیوتر هدف و ارتباط بین این دو کامپیوتر می‌باشد. در عمل برای ارتباط با محیط بیرونی، کامپیوتر هدف به کارت‌های سخت‌افزاری نیز مجهز می‌شود.

نیازمندی‌های اجزاء SLRT در حالت کلی به دو دسته نیازمندی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تقسیم می‌شود.

نیازمندی‌های سخت‌افزاری

منظور از نیازمندی‌های سخت‌افزاری، الزاماتی است که هر یک از اجزاء سیستم SLRT باید از آن الزامات برخوردار باشند. این الزامات برای هر یک از اجزاء سخت‌افزاری در ادامه آورده شده است.

کامپیوتر میزبان

برای نصب SLRT، Matlab و Simulink و دیگر نرم‌افزارهای مورد نیاز، کامپیوتر میزبان باید شامل یک سیستم ۶۴ بیت سازگار با Net Framework. نسخه ۴.۵ یا جدیدتر باشد. به طور معمول سیستم مورد نیاز برای کامپیوتر میزبان می‌تواند یک کامپیوتر رومیزی معمولی یا یک نوت‌بوک باشد. بهتر است برای کامپیوتر میزبان یک کامپیوتر با سرعت بسیار خوب برای اجرای نرم‌افزار Matlab انتخاب شود و شرط خاص دیگری برای آن وجود ندارد. برای ارتباط با کامپیوتر هدف نیز باید این کامپیوتر دارای یک کارت شبکه باشد.

کامپیوتر هدف

کامپیوتر هدف باید یک سیستم ۶۴ یا ۳۲ بیتی باشد. این سیستم می‌تواند شامل یک کامپیوتر رومیزی، کامپیوتر صنعتی، یک کامپیوتر PC104 یا یک سیستم CompactPCI به عنوان کامپیوتر هدف باشد. حداقل پیکربندی کامپیوتر هدف باید مطابق جدول زیر باشد.

جدول ۲-۲- حداقل سخت‌افزارهای کامپیوتر هدف

Mainboard	Description
CPU	Intel® 386/486/Pentium or AMD® K5/K6/Athlon with or without a floating-point coprocessor
Chip set	PC compatible with UART, programmable interrupt controller, keyboard controller, and counter
RAM	The Simulink Real-Time requires 8 MB or more of dynamic RAM

همچنین ملاحظات زیر برای انتخاب کامپیوتر هدف می‌بایست در نظر گرفته شود:

- SLRT برای کار با کامپیوترهای هدف رومیزی طراحی شده است. یک لپ‌تاپ را نمی‌توان به عنوان کامپیوتر هدف به کار برد.
- برای پشتیبانی از SLRT کامپیوترهای هدف ۶۴ بیتی باید در مد ۳۲ بیتی اجرا شود.
- هسته SLRT حداکثر ۴ GB از حافظه کامپیوتر هدف (Ram) را پشتیبانی می‌کند. بسته به اینکه چه میزان حافظه روی کامپیوتر هدف نصب کرده باشید، می‌توانید چندین مگابایت دیتا در حین اجرا بدست آورید.
- کامپیوتر هدف برای اجرای هسته SLRT به یک یا چند مورد از لوازم جانبی ذیل نیاز دارد.
- درایو CD-RW یا DVD-RW
- درایو USB
- درایو سخت قابل حمل
- ...

همچنین یک صفحه کلید^۱ برای کنترل کامپیوتر هدف مورد نیاز است. بخصوص هنگامی که برنامه‌های کاربردی بلادرنگ Standalone ایجاد می‌شود، اگر صفحه کلید متصل نباشد BIOS ممکن است پیغام خطا (خرابی صفحه کلید) نمایش دهد. برای یک BIOS متداول می‌توان تنظیمات BIOS را برای پرش از تست صفحه کلید به کار برد.

¹ Keyboard

در نهایت یک مانیتور برای نمایش نتایج روی کامپیوتر هدف مورد نیاز است. با این وجود توانایی دسترسی به نتایج با استفاده از توابع SLRT بر روی کامپیوتر میزبان نیز وجود دارد.

ارتباطات

برای برقراری ارتباط کامپیوتر هدف با کامپیوتر میزبان به یک مبدل شبکه آزاد (ISA، PCI یا USB) متصل به شبکه نیاز می‌باشد. این مبدل شبکه باید دارای چیپست مشخص باشد تا توسط راه‌اندازهای مبدل‌های شبکه نرم‌افزار SLRT پشتیبانی شود. راه‌اندازها برای چیپست‌های شرکت‌های مختلف به طور کلی به صورت زیر می‌باشند.

۱. راه انداز I82559 برای مبدل‌های شبکه سری Intel 10/100
 ۲. راه انداز I8254x برای مبدل‌های شبکه سری Intel Gigabit
 ۳. راه انداز R8139 برای مبدل‌های شبکه Realtek R8139
 ۴. راه انداز R8168 برای مبدل‌های شبکه سری Realtek Gigabit
 ۵. راه انداز Rhine برای مبدل‌های شبکه سری VIA VT6105L PCI
 ۶. راه انداز 3C90x برای مبدل‌های شبکه سری 3Com 90x
 ۷. راه انداز RTLANCE برای مبدل‌های شبکه سری AMD PCnet-FAST
 ۸. راه انداز NS83815 برای مبدل‌های شبکه سری National Semiconductor 83815
 ۹. راه‌انداز NE2000 برای مبدل‌های شبکه سری Novell 2000
- با توجه به گستردگی استفاده از مبدل‌های شبکه Giagabit در ایران بیشتر مبدل‌های موجود در کشور مربوط به ردیف‌های شماره ۲ و ۴ می‌باشد.

تنظیمات بایاس

- برای اجرای هسته SLRT نیازی به نصب بودن یک سیستم عامل بر روی کامپیوتر هدف نیست. با این حال برای عملکرد مناسب SLRT باید تنظیمات زیر را در بایوس^۱ کامپیوتر هدف انجام داد.
- غیر فعال کردن حالت ذخیره/انرژی^۲: تمام حالت‌های ذخیره انرژی باید غیر فعال شود.
 - غیر فعال نمودن Hyper-Threading: اگر کامپیوتر هدف از قابلیت‌های Hyper-Threading پشتیبانی می‌کند این قابلیت غیر فعال شود. فعال کردن Hyper-Threading می‌تواند کارایی کامپیوتر هدف را کاهش دهد.
 - تنظیم ترتیب برپایی^۳: کامپیوتر هدف می‌تواند با استفاده از روش‌های مختلف شروع به کار کند. در اینجا محل برپا شدن کامپیوتر هدف بر روی CD تنظیم شده است.
 - قابلیت پشتیبانی پردازنده چند هسته‌ای: اگر کامپیوتر هدف شامل پردازنده چندبیتی است، می‌توان نرم‌افزار SLRT را برای بهره‌برداری از چند هسته پیکربندی کرد.
 - غیرفعال کردن ارتباط USB: برای دستیابی به زمان نمونه‌برداری کوچک، می‌توان پورت‌های USB کامپیوتر هدف را غیر فعال نمود.

¹ BIOS

² Power Saving Mode

³ Boot Order

نیازمندی‌های نرم‌افزاری

- نصب نرم افزار SLRT تنها بر روی کامپیوتر میزبان صورت می‌پذیرد. کامپیوتر میزبان، هسته نرم‌افزار و برنامه کاربردی بلادرنگ را بر روی کامپیوتر در زمان اجرا بارگذاری می‌کند.
- برای اجرای صحیح نرم افزار SLRT باید موارد زیر رعایت شوند.
- مطابق راهنمای این نرم افزار نسخه‌های قبلی نصب شده SLRT را باید حذف کرد.
 - باید یک مجوز معتبر برای محصولات مورد نیاز وجود داشته باشد. البته در ایران معمولاً تمامی جعبه‌ابزارهای Matlab و Simulink با هم در یک بسته و به صورت قفل شکسته ارائه می‌شود و در هنگام نصب، با یک مجوز همگی آنها نصب می‌شوند.
 - باید Net Framework نسخه ۴.۵ یا بالاتر بر روی کامپیوتر میزبان نصب شود.
 - باید کامپایلر Microsoft C متناسب با نسخه SLRT بر روی کامپیوتر میزبان نصب شود. همچنین باید نوع کامپایلر انتخابی برای SLRT با دستور slrtsetCC انتخاب گردد. برای این کار کافی است در خط فرمان مطابق زیر این دستور اجرا و سپس کامپایلر مورد نظر انتخاب شود.

```
slrtsetCC setup
Select your compiler for Simulink Real-Time.

[1] Microsoft Visual C++ Compilers 2008 Professional Edition (SP1)
    in c:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 9.0
[2] Microsoft Visual C++ Compilers 2010 Professional
    in C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 10.0
[0] None

Compiler:2

Verify your selection:
Compiler: Microsoft Visual C++ Compilers 2010 Professional
Location: C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 10.0

Are these correct [y]/n?y

Done...
```

پس از نصب، با استفاده از دستور slrtgetCC می‌توان از نسخه نصب شده کامپایلر مطلع شد. در این پروژه از نسخه Visual Studio 2013 استفاده شده است که با اجرای این دستور در کامپیوتر میزبان برای این پروژه پیغام زیر نمایش داده می‌شود.

```
>> slrtgetCC

Compiler Settings:

Type = VisualC
Location = D:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 12.0
```

لازم به ذکر است که با دستور setup-mex کامپایلر پیش فرض انتخابی برای Mex و SLRT تعیین می‌شود. با دستور slrtsetCC کامپایلر اختصاصی انتخابی برای SLRT می‌تواند با Mex متفاوت باشد.

تنظیم یک پوشه کاری اولیه

پوشه کاری اولیه Matlab باید خارج از پوشه اصلی Matlab تنظیم شود. پوشه اصلی Matlab بصورت پیش‌فرض c:\matlab می‌باشد. اگر پوشه کاری Matlab زیر شاخه و یا داخل مسیر اصلی Matlab باشد،

فایل‌های Simulink و Simulink Coder با پوشه‌های Matlab مخلوط می‌شود. می‌توان با فرمان cd به طور موقت پوشه کاری را تغییر داد یا پوشه اولیه کاری را در میان‌بر^۱ Matlab به صورت زیر تنظیم نمود.

۱. بر روی میان‌بر Matlab بر روی صفحه رومیزی^۲ کلیک سمت راست شود.

۲. بر روی Properties کلیک شده و در قسمت Start in مسیر پوشه اولیه مورد نظر وارد گردد. باید مطمئن شد که یک پوشه، خارج از پوشه اصلی Matlab انتخاب شده است.

۳. بر روی دکمه Ok کلیک شده و سپس Matlab دوباره راه‌اندازی گردد.

۴. برای چک پوشه کاری در پنجره خط فرمان Matlab دستور pwd تایپ و اجرا شود.

به طور معمول برای شبیه‌سازی‌های بزرگ، مدل شامل یک فایل اصلی Simulink است که به چند m فایل، تابع، GUI، فایل‌های dat و mat و یا مدل‌های Simulink دیگر باشد که با بلوک " Model Reference" در فایل اصلی فراخوانی می‌شوند. در این حالت برای مخلوط نشدن این فایل‌ها با فایل‌های تولید شده SLRT نیز بهتر است کلیه این فایل‌ها در یک پوشه کنار فایل اصلی Simulink دسته‌بندی شده و قرار بگیرند. در این حالت باید مسیر این پوشه به مسیرهای جستجوی Matlab از طریق منوی اصلی قسمت Set Path اضافه گردد.

تنظیمات شبکه ویندوز

در اینجا برای ارتباط بین کامپیوتر هدف و میزبان از ارتباط شبکه استفاده می‌شود. کامپیوتر هدف دارای یک IP ثابت است. برای ارتباط کامپیوتر میزبان با هدف لازم است تا IP کامپیوتر میزبان به صورت ثابت تعریف شود. این کار به راحتی و در تنظیمات کارت شبکه قابل انجام است. با توجه به سادگی این موضوع از بیان جزئیات اجتناب می‌شود.

معرفی اجمالی رابط گرافیکی مرورگر شبیه‌ساز بلادرنگ^۳

محیط SLRT یک واسط قابل تنظیم برای کامپیوتر هدف می‌باشد. می‌توان این واسط را از Matlab، Simulink یا محیط‌های توسعه دیگر مستقل از Matlab به کار برد. به دلیل این محیط باز، راه‌های گوناگونی برای ارتباط با برنامه کاربردی بلادرنگ از کامپیوتر میزبان و هدف وجود دارد. ساده‌ترین و به طور معمول پرکاربردترین این روش‌ها، استفاده از رابط گرافیکی مرورگر شبیه‌ساز بلادرنگ (مرورگر SLRT) است که در این بخش به طور مفصل به آن پرداخته می‌شود.

مرورگر SLRT یک رابط گرافیکی برای پیکربندی کامپیوترهای میزبان، هدف و تعامل با برنامه کاربردی بلادرنگ می‌باشد. این رابط گرافیکی بر روی کامپیوتر میزبان اجرا می‌شود و برای بسیاری از تعامل‌ها تنها نقطه اتصال را فراهم می‌کند. می‌توان توسط مرورگر SLRT عملیات اصلی زیر را انجام داد.

- افزودن و پیکربندی کامپیوترهای هدف. این کار را تا ۶۴ کامپیوتر هدف می‌توان انجام داد.
- ایجاد دیسک‌های برپایی، برپایی درایو قابل حمل و برپایی شبکه برای کامپیوترهای ویژه هدف.
- اتصال کامپیوترهای هدف به کامپیوتر میزبان برای SLRT.
- بارگزاری یک برنامه کاربردی از قبل ساخته شده، یا DLM، بر روی کامپیوتر هدف.
- اجرا و یا توقف برنامه کاربردی بلادرنگ بارگذاری شده بر روی کامپیوتر هدف.

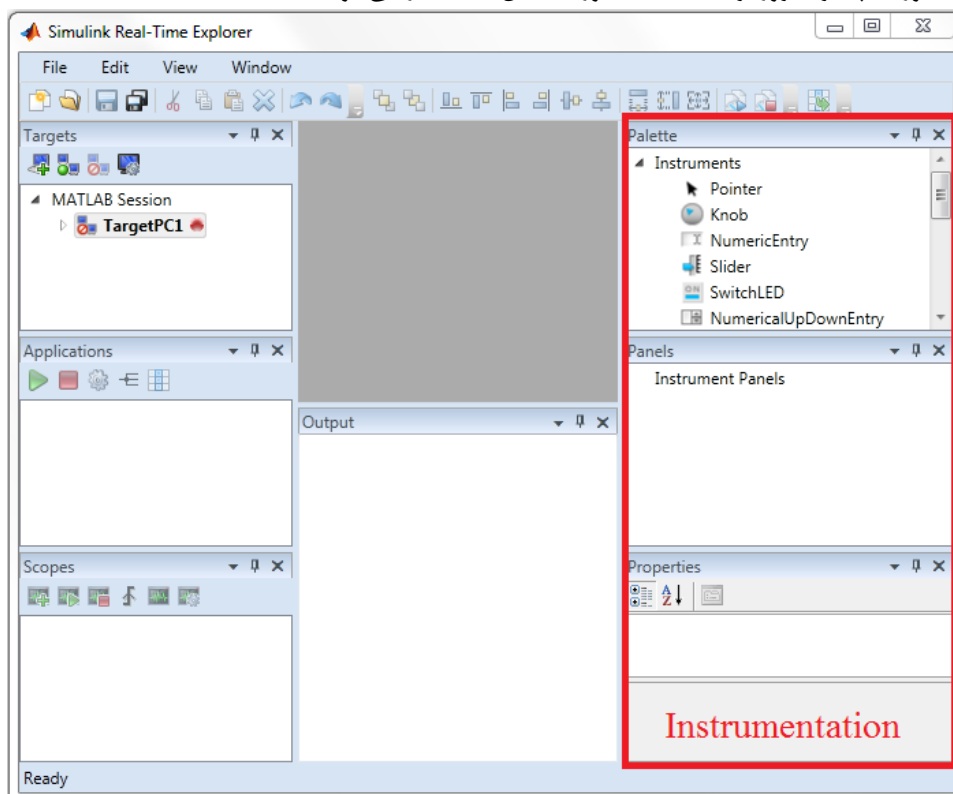
¹ Shortcut

² Desktop

³ Simulink Real-Time Explorer

- افزودن و یا کاستن نمایشگرهای از نوع Host، Target یا File، برای برنامه کاربردی بلادرنگ بارگذاری شده.
- نمایش سیگنال‌ها.
- تنظیم مقادیر پارامترها برای سیگنال‌ها در هنگام اجرای برنامه کاربردی بلادرنگ.
- ایجاد یک پیکربندی رابط گرافیکی مرورگر SLRT بصورت یک برنامه اجرایی مستقل.

با تایپ عبارت slrtexplr در پنجره خط فرمان Matlab رابط گرافیکی مرورگر SLRT اجرا و بارگذاری می‌گردد. در اینصورت، پنجره مرورگر SLRT به صورت شکل ۲۷-۲ باز می‌شود.



شکل ۲۷-۲ پنجره مرورگر SLRT

این پنجره شامل ۴ قاب^۱ اصلی زیر است.

- **قاب Targets:** قاب بالای سمت چپ، هدف‌ها را در SLRT به صورت سلسله مراتب^۲ لیست می‌کند. گره‌های زیر هر هدف خصوصیات آن و (در صورت دسترس بودن حافظه آن) سیستم فایل^۳ کامپیوتر هدف را نشان می‌دهد.
- **قاب Applications:** قاب میانی سمت چپ، برنامه‌های کاربردی در حال اجرای کامپیوتر هدف را لیست می‌کند. گره‌های زیر هر برنامه کاربردی، خصوصیات گروه‌های سیگنال و پارامتر و (در صورت وجود) سلسله مراتب مدل برنامه کاربردی را نشان می‌دهد.
- **قاب Scopes:** قاب پایینی سمت چپ، نمایشگرهای سیگنال تعریف شده در برنامه کاربردی بلادرنگ فعال را لیست

^۱ Pane

^۲ Hierarchy

^۳ File System

می‌کند. این نمایشگرها شامل موارد از قبل تعریف شده و یا نمایشگرهای ایجاد شده فعلی می‌باشند.

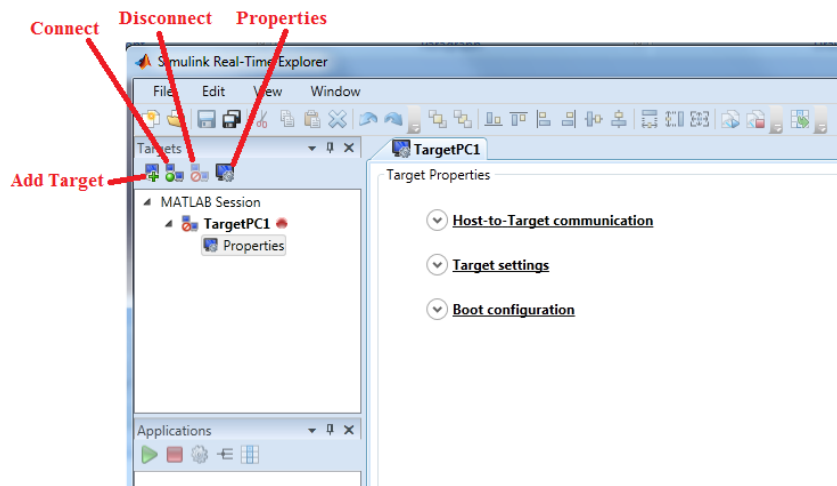
- **قاب Output :** چهارگوش پایین میانی، پیغام‌های وضعیت را از مرورگر SLRT دریافت می‌کند.

قاب بالای میانی، به صورت جداگانه زیر هر Tab اطلاعات مربوط به گره انتخاب شده در قاب‌های دیگر را نشان می‌دهد. همچنین ۳ قاب فرعی سمت چپ، تحت عنوان‌های Palette, Panels و Properties مربوط به Instrumentation می‌باشد.

از میان قاب‌های اصلی، قاب Target چون برای تنظیمات و راه‌اندازی اولیه کامپیوتر هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد از اهمیت زیادی برخوردار است و دیگر قاب‌ها پس از بارگذاری برنامه کاربردی روی کامپیوتر هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در این بخش تنها به معرفی قاب Target پرداخته می‌شود.

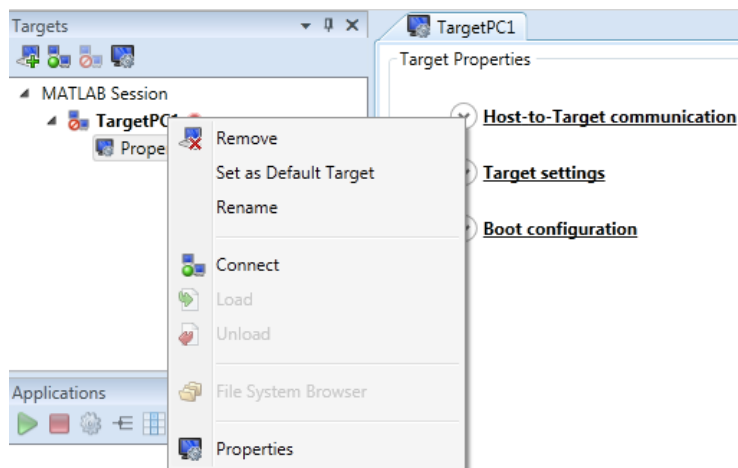
قاب Target

پس از باز کردن پنجره مرورگر SLRT، در قاب Target یک هدف تحت عنوان TargetPC1 وجود دارد. با کلیک کردن بر روی TargetPC1>Properties در قاب میانی، پنجره Target Properties مربوط به TargetPC1 مطابق شکل ۲۸-۲ باز می‌شود. در این شکل آیکن‌های مربوط به قاب Target نیز معرفی شده‌اند.



شکل ۲۸-۲- قاب Target به همراه پنجره Target Properties در پنجره مرورگر SLRT

با آیکون Add Target می‌توان هدف‌های دیگری را تا ۶۴ هدف اضافه کرد. آیکون‌های Connect و Disconnect نیز برای اتصال و قطع شدن از کامپیوتر هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با کلیک سمت راست بر روی TargetPC1 منوی کرکره‌ای مطابق شکل ۲۸-۲ باز می‌شود.



شکل ۲۹-۲- منوی کرکرهای TargetPC1

در این منوی کرکرهای گزینه‌های اضافه دیگر زیر وجود دارند.

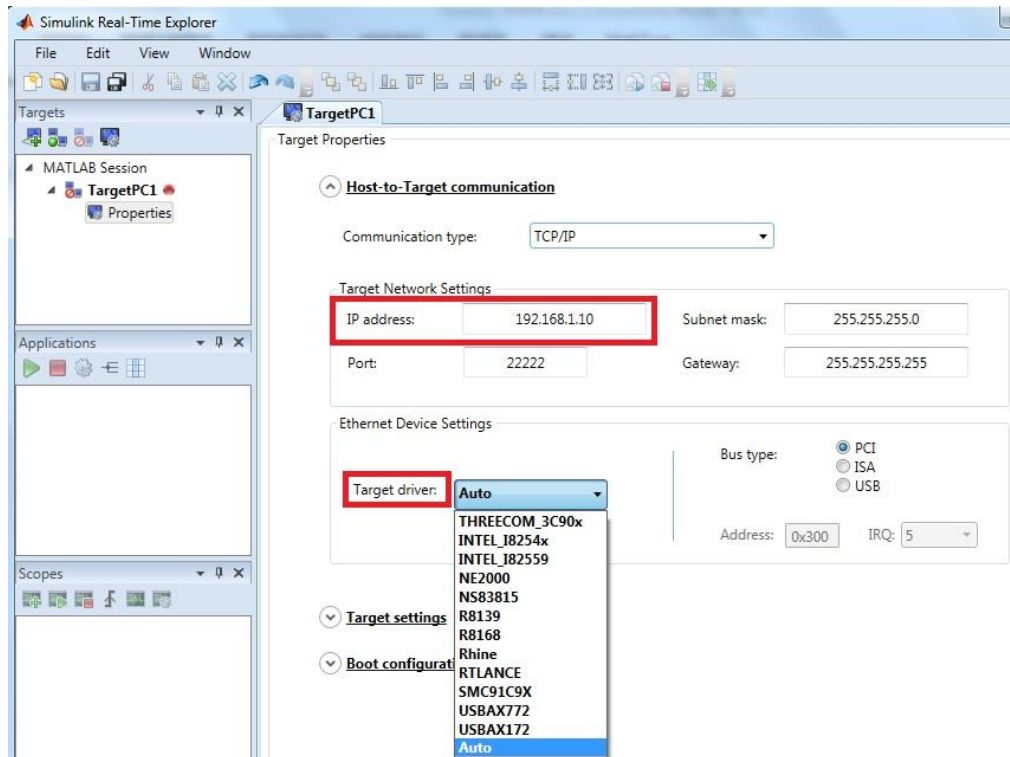
- Remove: برای حذف هدف به کار می‌رود.
 - Set as Default Target: برای تنظیم این هدف به عنوان هدف پیش فرض به کار می‌رود.
 - Rename: برای تغییر نام هدف به کار می‌رود.
 - Load: برای بارگذاری یک برنامه کاربردی از قبل ساخته شده با پسوند DLM بر روی کامپیوتر هدف به کار می‌رود.
 - Unload: برای حذف برنامه کاربردی از کامپیوتر هدف به کار می‌رود.
 - File System Browser: برای مشاهده و دسترسی سیستم فایل کامپیوتر هدف به کار می‌رود.
- همانطور که مشاهده شد، گزینه‌های Load، Unload و File System Browser غیر فعال می‌باشند. این گزینه‌ها پس از اتصال به کامپیوتر هدف فعال می‌شوند.
- در پنجره Target Properties سه گزینه زیر وجود دارد.
- Host-to-Target Communication
 - Target setting
 - Boot configuration
- در ادامه به نحوه تنظیمات آنها پرداخته می‌شود.

Host-to-Target Communication

قبل از انجام تنظیمات، نیاز به آگاهی از اطلاعات زیر در ارتباط با کامپیوتر هدف می‌باشد

- آدرس IP
- آدرس Subnet mask
- شماره پورت (اختیاری)
- Gateway (اختیاری)

پس از فشردن دکمه  در کنار Host-to-Target Communication پنجره تنظیمات باز می‌شود. در شکل ۳۰-۲ تنظیمات شبکه مربوط به کامپیوتر هدف انجام شده است.



شکل ۳۰-۲ تنظیم Host-to-Target communication

۱. تنها قسمت خالی در این پنجره IP Address می‌باشد. در این قسمت باید IP کامپیوتر هدف را تعیین کنید. این فیلد در این پروژه با مقدار 192.168.1.10 پر شده است.
۲. مقدار Subnet mask را با آدرس Subnet mask شبکه خود پر کنید. مقدار پیش فرض 255.225.255.0 تنظیم شده است.
۳. با مقدار پیش فرض Subnet mask، IP کامپیوتر هدف تنها در رقم چهارم می‌تواند با IP کامپیوتر میزبان تفاوت داشته باشد. مقدار IP کامپیوترها می‌تواند 192.168.1.X باشد. مقدار X بین 0 تا 255 بوده و نباید این مقدار در هیچ دو کامپیوتری در یک شبکه یکسان باشد.
۴. مقدار Port (اختیاری) را بیش از ۲۰۰۰۰ و کمتر از ۶۵۵۳۶ تنظیم کنید. مقدار پیش فرض ۲۲۲۲۲ تنظیم شده است.
۵. مقدار Gateway (اختیاری) در صورت نیاز به یک گذرگاه^۱ برای دسترسی به کامپیوتر هدف تنظیم می‌شود. مقدار پیش فرض 255.255.255.255 تنظیم شده است و به معنی آن می‌باشد که برای اتصال به کامپیوتر هدف از گذرگاه استفاده نمی‌کنید.
- اگر کامپیوترها با یک کابل کراس به یکدیگر متصل شوند، همان مقدار پیش فرض را می‌توان در نظر گرفت. چنانچه ارتباط با کامپیوتر هدف از طریق شبکه برقرار می‌شود، ممکن است به تغییر این پارامتر احتیاج باشد. اگر از کامپیوتر میزبان در یک شبکه متفاوت از کامپیوتر هدف خود (به ویژه از اینترنت) ارتباط برقرار می‌گردد، باید یک گذرگاه و IP آن در اینجا تنظیم شود.
۵. Target diver به طور پیش فرض Auto می‌باشد. در حالت Auto نرم افزار درایور TCP/IP، کارت شبکه کامپیوتر هدف را از کارت نصب شده بر روی آن مشخص می‌کند. اگر کارت شبکه مورد پشتیبانی بر روی کامپیوتر هدف نصب

^۱ Gateway

نشده باشد نرم افزار خطا نشان می‌دهد. زمانی که از مدل کارت و پشتیبانی آن توسط نرم افزار SLRT اطلاع دقیق وجود ندارد گزینه Auto بهترین گزینه می‌باشد.

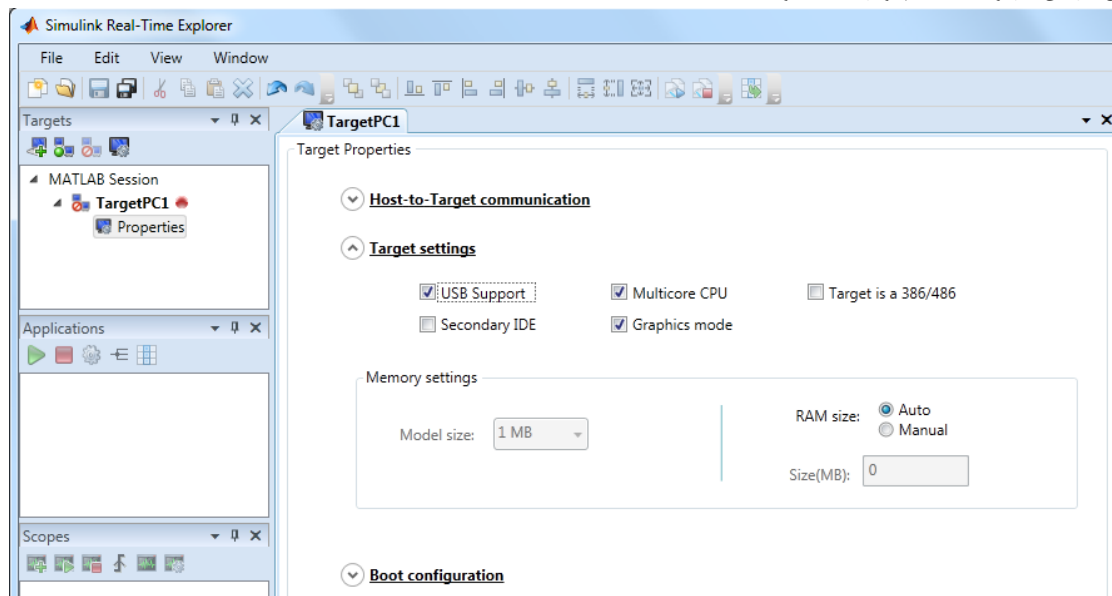
در صورت وجود چند کارت شبکه نصب شده مورد پشتیبانی بر روی کامپیوتر هدف، در حالت Auto کارتی به صورت اتوماتیک انتخاب می‌شود که شماره Bus و Slot نصب آن کمتر باشد. برای کامپیوتر هدف استفاده شده در این پروژه Driver را Auto یا R8168 انتخاب کنید.

۶. پس از انجام کلیه تغییرات، با کلیک بر روی دکمه ذخیره  در نوار ابزار، تنظیمات ذخیره می‌گردد.

Target setting

تنظیمات این قسمت برای مطابقت با توانایی‌های کامپیوتر هدف انجام می‌گیرد.

پس از فشردن دکمه  در کنار Target settings پنجره تنظیمات باز می‌شود. در شکل ۲-۳۱ تنظیمات پیش فرض مربوط به کامپیوتر هدف آورده شده است.



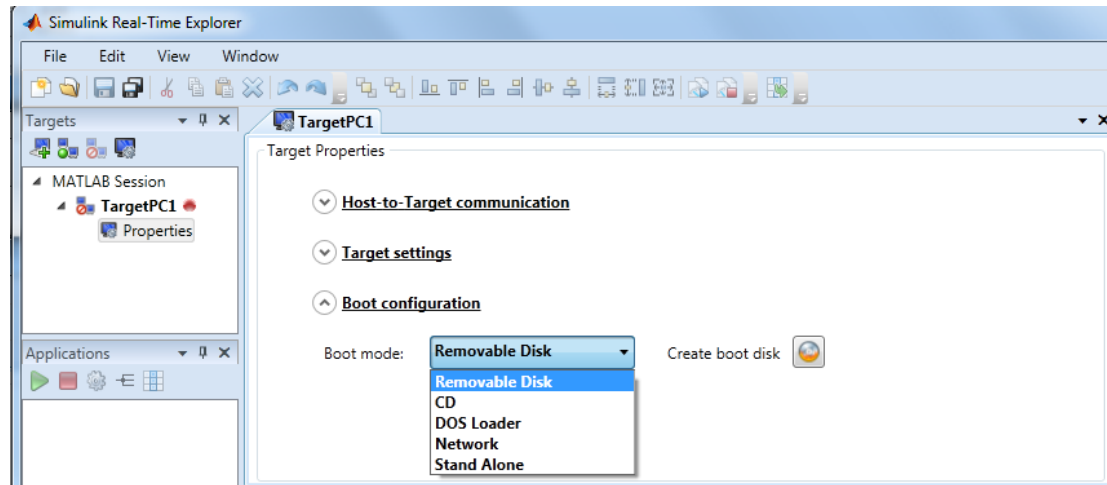
شکل ۲-۳۱- تنظیم Target settings

در این پروژه کلیه تنظیمات این بخش به صورت پیش فرض استفاده شده‌اند. بنابراین از توضیحات اضافه راجع به این تنظیمات خودداری می‌شود.

Boot configuration

در این قسمت روش مورد پشتیبانی برای اجرای هسته SLRT بر روی کامپیوتر هدف انتخاب می‌شود.

پس از فشردن دکمه  در کنار Boot Configuration پنجره تنظیمات باز می‌شود. در شکل ۲-۳۲ کلیه روش‌های قابل انتخاب برای برپا شدن در تنظیم پارامتر Boot mode، آورده شده است.



شکل ۳۲-۲- تنظیم Boot Configuration

این روشها عبارتند از

- روش برپایی CD/DVD
- روش برپایی Network
- روش برپایی Removable Disk Boot
- روش برپایی DOS Loader
- روش برپایی Standalone

در این پروژه با توجه به اینکه سیستم عامل ویندوز کامپیوتر هدف مورد استفاده قرار می‌گرفت و دسترسی و تغییر در دیسکت سخت آن هم امکان پذیر نبود، بهترین و ساده‌ترین روش استفاده از روش برپایی CD/DVD می‌باشد که مورد استفاده قرار گرفت.

روش برپایی CD/DVD

این روش ساده‌ترین روش برپایی کامپیوتر هدف می‌باشد. در صورت وجود ROM CD/DVD پیشنهاد می‌شود برای اولین بار این روش اجرا گردد.

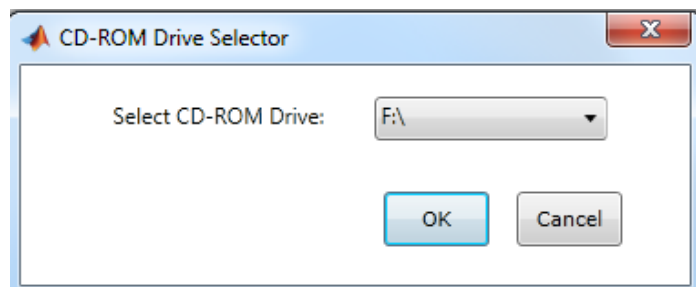
بعد از تنظیم پارامترهای محیط کامپیوتر هدف با استفاده از مرورگر SLRT می‌توان CD یا DVD برپایی که هسته SLRT را بارگذاری و اجرا می‌کند، ایجاد نمود. کامپیوتر میزبان باید با ویندوز ۷ یا جدیدتر اجرا شود. برای اجرای تمامی روش‌های برپایی، دو راه وجود دارد. یکی به صورت گرافیکی و از طریق پنجره مرورگر SLRT و دیگری از طریق برنامه نویسی با زبان Matlab است. با توجه به سهولت کار و استفاده بیشتر از پنجره مرورگر SLRT، تنها این روش بیان می‌شود.

برای ایجاد CD یا DVD راه‌اندازی، با پنجره مرورگر SLRT مراحل زیر می‌بایست انجام گیرد.

۱. وارد شدن به قسمت Boot Configuration کامپیوتر هدف مورد نظر در پنجره مرورگر SLRT مطابق شکل ۳۲-۲.

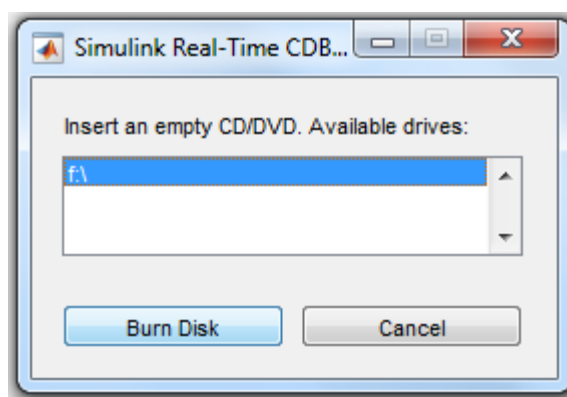
۲. تنظیم Boot mode بر روی CD.

۳. کلیک بر روی دکمه Create boot disk. به این ترتیب پنجره شکل ۳۳-۲ باز می‌شود.



شکل ۳۳-۲ پنجره انتخاب درایو CD/DVD برای رایت

۴. انتخاب درایو CD/DVD مورد نظر در لیست Select CD-ROM Drive.
۵. پنجره‌ای مطابق شکل ۳۴-۲ باز می‌شود که می‌خواهد CD یا DVD خام در داخل درایو CD/DVD کامپیوتر میزبان قرار گیرد. در صورتیکه CD/DVD خام نباشد T پیغام خطا ظاهر خواهد شد.



شکل ۳۴-۲ پنجره ساخت CD/DVD برپایی

۶. پس از قرار دادن CD/DVD خام در درایو مورد نظر با کلیک بر روی دکمه Burn Disk نوار وضعیت نمایش داده می‌شود.
- هنگامی که عملیات نوشتن پایان یافت، محتویات CD/DVD برپایی، قابل مشاهده نیست. بنابراین برای اطمینان از درست نوشته شدن، تلاش برای مشاهده فایل‌ها بی‌نتیجه است.
۷. CD/DVD را از درایو خارج کنید. پیشنهاد می‌شود بر روی CD/DVD شماره نسخه Matlab و IP کامپیوتر هدف را بنویسید.
۸. CD/DVD قابل برپایی را داخل CD/DVD کامپیوتر هدف قرار دهید. کامپیوتر هدف را راه‌اندازی مجدد کنید تا هسته SLRT بر روی آن بارگذاری شود.
۹. با کلیک بر روی دکمه  از نوار ابزار، تغییرات ذخیره می‌شوند.

اجرای مدل DFIG در SLRT

آماده‌سازی مدل DFIG برای اجرا در SLRT

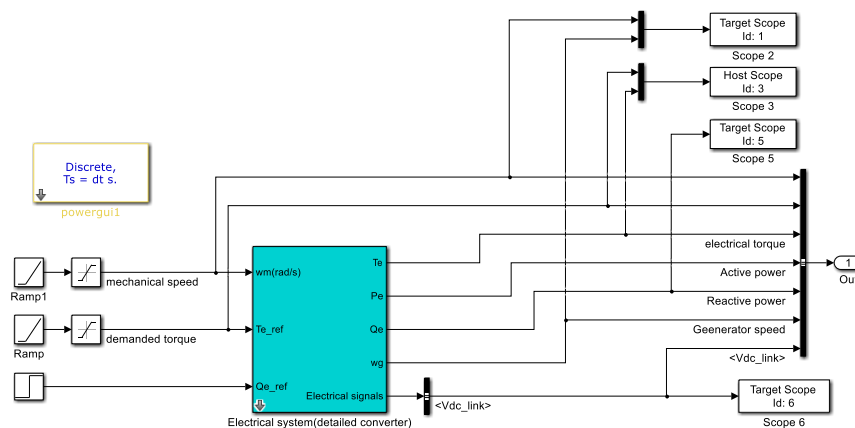
قبل از اجرای مدل DFIG در SLRT ابتدا مدل آن در Simulink در مد Normal با ورودی‌های مرجع در مدل و مشاهده خروجی‌های سیستم به تعداد دفعات زیاد مورد تست و ارزیابی قرار گرفت. پس از اطمینان از

عملکرد صحیح مدل در مد Normal و تنظیم کلیه پارامترها و اطمینان از عملکرد صحیح آن، تلاش برای اجرای مدل DFIG در SLRT انجام شد.

محدودیتی که برای اجرای صحیح مدل DFIG وجود دارد دوره نمونه‌برداری کوچک مورد نیاز در حدود ۵۰ میکرو ثانیه می‌باشد. چنانچه پردازنده کامپیوتر SLRT توانایی انجام محاسبات مربوط به یک سیکل کاری را در مدت زمان تعریف شده را نداشته باشد و یا به عبارتی محاسبات زمانی فراتر از حداکثر زمان مجاز طول بکشد، آنگاه یک پیغام CPU Overload نمایش داده می‌شود و اجرا متوقف می‌گردد. هرچند می‌توان یک مقدار حداکثری مجاز برای این افزایش بار جهت کنار گذاشتن موارد خاص ناشی از پاره‌ای تداخل‌ها، تنظیم کرد، اما چنانچه ایراد اصلی حجم محاسباتی بالای برنامه باشد باید تا جای ممکن برنامه را بهینه کرد و یا از پردازنده قوی‌تری استفاده نمود. به عنوان مثال موارد زیر در برخی موارد می‌تواند راه‌گشا باشد.

- حذف کلیه بلوک‌های نمایش در مد Normal و اضافه کردن تنها بلوک‌های نمایش SLRT.
- حذف کلیه بلوک‌های غیرضروری مربوط به کارهای تحقیقاتی.
- ویرایش بلوک‌های شرطی برای مدل‌سازی صحیح.
- استفاده از Bus برای سامان‌دهی سیگنال‌ها و ذخیره سیگنال‌ها در SLRT
- گسسته‌سازی مدل‌های پیوسته
- ...

در نهایت و با انجام ویرایش‌های لازم، یک مدل از سیستم الکتریکی به صورت شکل ۳۵-۲ آماده شد که با دوره نمونه‌برداری $40\mu s$ و بدون ناپایداری قابل اجرا است. مدل مربوطه به تعداد دفعات زیاد با ورودی‌های مختلف مرجع اجرا شد و از صحت اجرای آن با تغییرات اعمال شده اطمینان حاصل گردید.



شکل ۳۵-۲- مدل DFIG آماده شده تنها برای اجرا در SLRT

در این مدل با تنظیم پارامترهای بلوک‌های Ramp و Step می‌توان ورودی‌های مختلف مرجعی را به مدل اعمال کرد. توسط بلوک‌های Scope از کتابخانه SLRT از نوع Target Scope، سیگنال‌های مورد نظر بر روی کامپیوتر هدف و از نوع Host Scope بر روی کامپیوتر میزبان نمایش داده می‌شوند. برای دسترسی به Scope‌های نوع Host باید از مرورگر SLRT استفاده شود.

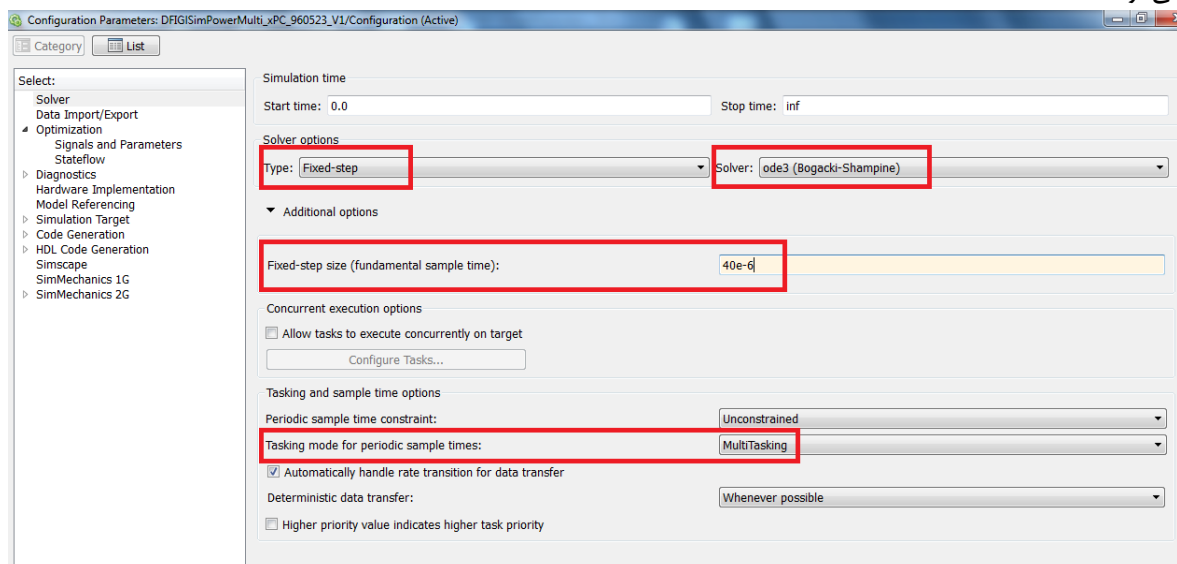
همچنین هر سیگنالی که به بلوک Out در مسیر بالاترین قسمت فایل Simulink متصل شود بر روی RAM کامپیوتر هدف ذخیره خواهد شد. پس از توقف اجرای مدل با اجرای دستورات زیر در خط فرمان Matlab می‌توان اطلاعات اجرا را از کامپیوتر هدف به کامپیوتر میزبان منتقل کرده و تحلیل نمود.

```
tg=slrt;
tout=tg.TimeLog;
tet=tg.TETLog;
yout=tg.OutputLog;
```

- اطلاعات بدست آمده شامل موارد زیر می‌باشد.
- **tout**: این بردار، زمان‌های اجرای شبیه‌سازی مدل را نشان می‌دهد که به طور طبیعی از صفر شروع می‌شود. در صورتیکه این بردار از مقدار دیگری غیر از صفر شروع شود نشان دهنده این است که با توجه به زیاد شدن زمان شبیه‌سازی نتایج مجدداً بروی نتایج قبلی ذخیره شده‌اند.
- **tet**: این بردار، زمان گرفته شده از CPU برای اجرای هر دوره نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. با رسم این بردار می‌توان مشاهده کرد که دوره نمونه‌برداری را تا چه میزانی می‌توان کاهش داد.
- **yout**: این ماتریس سیگنال‌های متصل شده به بلوک **Output** می‌باشد. هر سطر این ماتریس مربوط به یک زمان نمونه‌برداری می‌باشد. هر ستون این ماتریس نیز مربوط به سیگنال متصل شده به آن است. ترتیب ستون‌ها مطابق ترتیب سیگنال‌ها در بلوک **Output** می‌باشد.

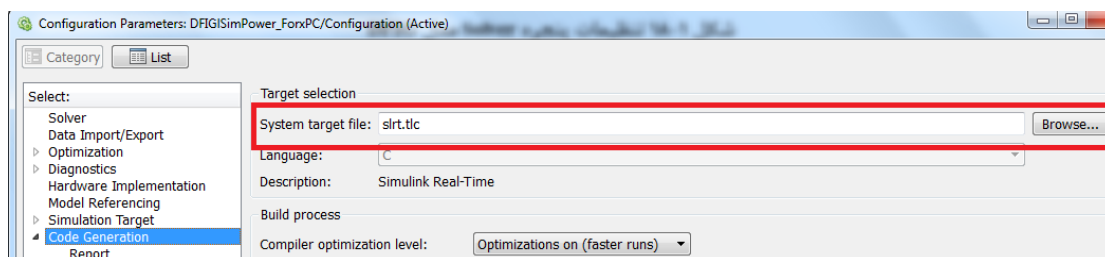
برای اجرای مدل در SLRT باید تنظیماتی را در **Model Configuration Parameter** مدل مربوطه به صورت زیر انجام داد.

تنظیمات پنجره **Solver** به صورت شکل ۳۶-۲ می‌باشد. در SLRT مدل باید به صورت **Fixed-step** یعنی با دوره نمونه‌برداری ثابت اجرا شود. روش حل معادلات دیفرانسیل، **ode3** انتخاب شده و دوره نمونه‌برداری نیز بر روی ۴۰ میکرو ثانیه تنظیم می‌شود. مدل مربوطه برای افزایش سرعت اجرا در حالت **MultiTasking** اجرا می‌گردد.



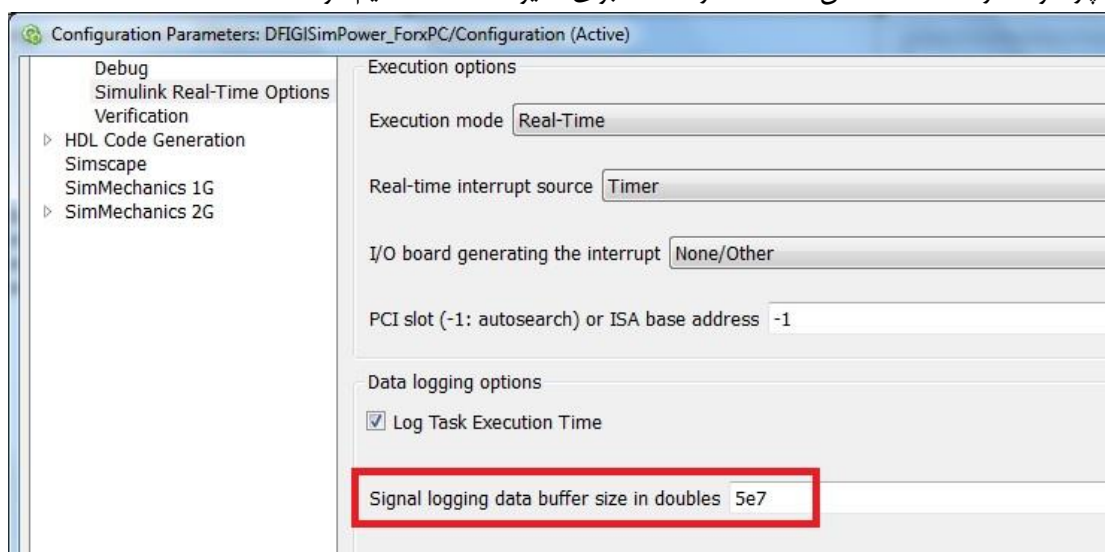
شکل ۳۶-۲- تنظیمات پنجره Solver مدل DFIG

تنظیمات پنجره **Code Generation** به صورت شکل ۳۷-۲ می‌باشد. در اینجا باید توسط **Browse** گزینه **slrt.tlc** انتخاب شود.



شکل ۳۷-۲ تنظیمات پنجره Code Generation مدل DFIG

تنظیمات پنجره Simulink Real-Time Options به صورت شکل ۳۸-۲ می‌باشد. در اینجا تنها کافی است پارامتر مقدار حافظه اختصاص داده شده در RAM برای ذخیره اطلاعات تنظیم گردد.

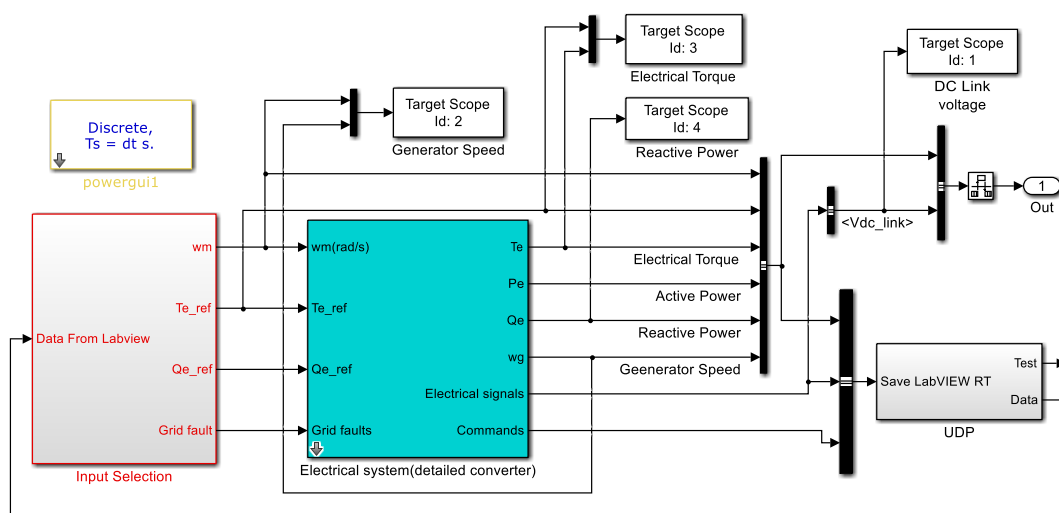


شکل ۳۸-۲ تنظیمات پنجره Simulink Real-Time Options مدل DFIG

ایجاد ارتباط مدل DFIG با کد Fast در LabVIEW RT

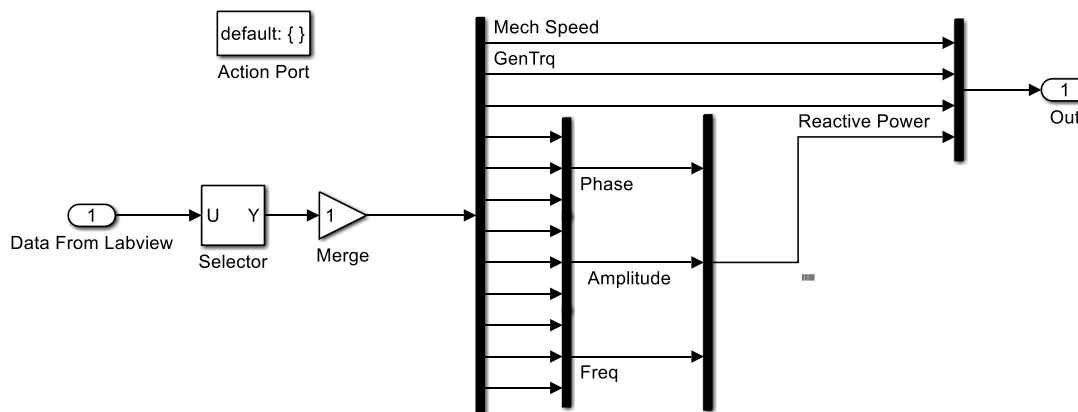
پس از اجرای مدل DFIG به صورت مستقل و بدون ارتباط با کد Fast در بخش‌های قبل، در این مرحله به مراحل مختلف برای ارتباط مدل DFIG با کد Fast در نرم‌افزار LabVIEW RT پرداخته می‌شود. برای ارتباط مدل DFIG با کد Fast در نرم‌افزار LabVIEW RT یا به اختصار SLRT با LabVIEW RT از پروتکل UDP استفاده شده است. پروتکل UDP یک پروتکل شبکه می‌باشد که برای کارهای زمان حقیقی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای این ارتباط، در نرم‌افزار SLRT از همان کارت شبکه‌ای که با کامپیوتر میزبان وجود دارد برای ارتباط با LabVIEW RT استفاده می‌شود. از همین رو برای ارتباط بین تمامی کامپیوترها باید از سوئیچ شبکه استفاده شود.

مدل Simulink برای ارتباط UDP به صورت شکل ۳۹-۲ تغییر می‌کند.



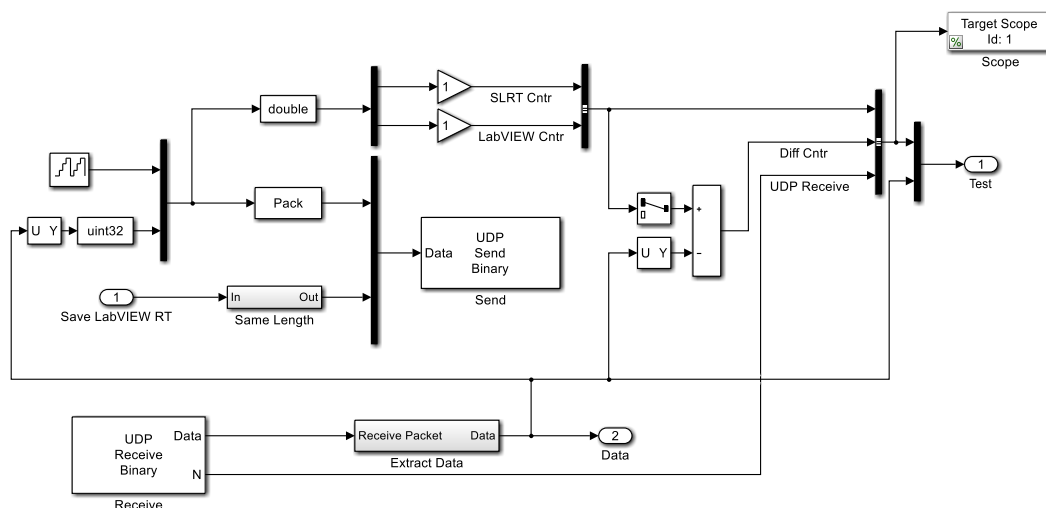
شکل ۳۹-۲- مدل DFIG تغییر داده شده برای ایجاد ارتباط UDP

در این مدل ورودی‌های سیستم الکتریکی که شامل سرعت چرخش مکانیکی، گشتاور الکتریکی مرجع، توان راکتیو مرجع و رخدادهای خطای شبکه می‌باشند، توسط ارتباط UDP از LabVIEW RT دریافت شده و پس از تفکیک در بلوک Input Selection به بلوک سیستم الکتریکی وارد می‌شوند. در واقع وظیفه بلوک Input Selection، که ساختار آن در شکل ۴۰-۲ نشان داده شده است، دریافت رشته داده دریافتی از بلوک UDP و جداسازی و دسته‌بندی داده‌ها بر مبنای پروتکل تعریف شده ارسال داده می‌باشد.



شکل ۴۰-۲- ساختار بلوک Input Selection

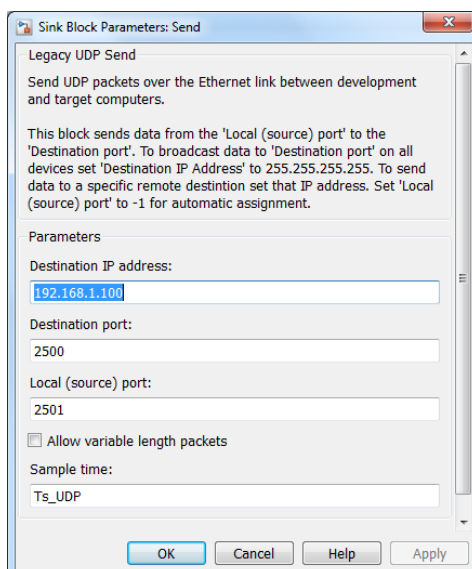
همانطور که قبلاً ذکر شد، در بلوک UDP نیز اطلاعات لازم برای LabVIEW RT ارسال و دریافت می‌شود. بلوک UDP به صورت شکل ۴۱-۲ می‌باشد.



شکل ۲-۴۱- محتویات بلوک UDP

در این بلوک پس از اینکه داده‌ها به صورت یک بردار از نوع Uint8 تبدیل شدند توسط بلوک UDP Send Binary به LabVIEW RT ارسال می‌شوند. برای تبدیل انواع داده به Uint8 در Simulink از بلوک Pack استفاده شده است. تنظیمات بلوک UDP Send Binary به صورت شکل ۲-۴۲ می‌باشد. در این بلوک IP برای کامپیوتر LabVIEW RT مقدار 192.168.1.100 و پورت دریافتی آن ۲۵۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین پورت ارسالی نیز ۲۵۰۱ می‌باشد. زمان ارسال و دریافت به LabVIEW RT نیز توسط پارامتر Ts_UDP مشخص می‌شود.

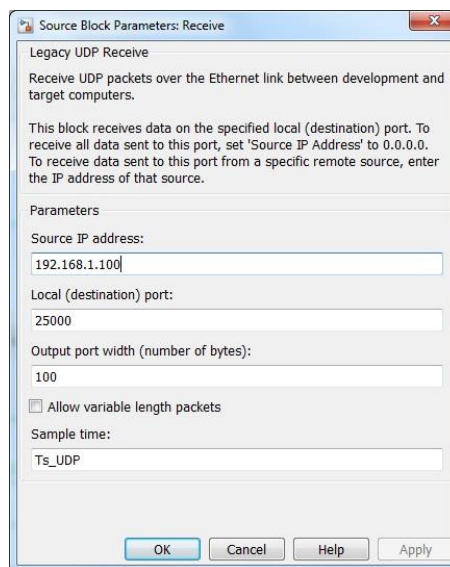
دیتای ارسالی به LabVIEW RT برای نیازهای فعلی و کارهای توسعه‌ای آینده دارای طول ثابت ۲۰۰ بایت در نظر گرفته شده است. از همین رو پارامتر Allow variable length packets که به معنی انتخاب بسته‌هایی با طول متغیر است، انتخاب نشده است.



شکل ۲-۴۲- تنظیمات بلوک UDP Send Binary

در اینجا توسط بلوک UDP Receive Binary، دیتاها به صورت یک بردار از نوع Uint8 دریافت می‌شوند. سپس در بلوک Extract Data بردار Uint8 مطابق پروتکل ارتباطی به دیتاهای مورد نظر تبدیل می‌شود. برای این تبدیل از بلوک Unpack استفاده می‌شود.

تنظیمات بلوک UDP Receive Binary به صورت شکل ۲-۴۳ می‌باشد. در اینجا پورت دریافتی SLRT مقدار ۲۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. طول دیتای دریافتی نیز ثابت و ۱۰۰ بایت برای کارهای توسعه‌ای در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۴۳- تنظیمات بلوک UDP Receive Binary

پروتکل ارتباطی بین SLRT و LabVIEW RT

همانطور که قبلاً بیان شد ارتباط بین SLRT و LabVIEW RT پروتکل UDP می‌باشد. طول ارسال و دریافت اطلاعات مابین این دو نرم‌افزار نیز به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. در اینجا دیتای دریافتی از LabVIEW دارای طول ثابت ۱۰۰ بایت و دیتای ارسالی به آن دارای طول ثابت ۲۰۰ بایت می‌باشد. برای تبادل دیتا بین این دو نرم‌افزار برای ارسال و دریافت اطلاعات پروتکل خاصی برای آنها در نظر گرفته شده است که در این بخش به آنها پرداخته می‌شود. پروتکل اطلاعات دریافتی از LabVIEW RT به صورت جدول ۲-۳ می‌باشد.

جدول ۲-۳ پروتکل اطلاعات دریافتی از LabVIEW RT

ردیف	نام دیتا	نوع دیتا	بایت	توضیحات
۱	SLRT Cntr	1*UInt32	1-4	شمارنده مستقل SLRT برگشتی از LabVIEW
۲	LabVIEW Cntr	1*UInt32	5-8	شمارنده مستقل LabVIEW
۳	Data	23*Single	9-100	دیتای مورد نیاز شبیه‌سازی

برای اینکه زمان حقیقی بودن ارتباط دو نرم‌افزار SLRT و LabVIEW RT با یکدیگر چک شود هر دو نرم‌افزار یک شمارنده مستقل از یکدیگر دارند که آنها را برای یکدیگر ارسال می‌کنند. هر نرم‌افزار پس از دریافت شمارنده نرم‌افزار دیگر، آن را مجدداً برای نرم‌افزار ارسال کننده برمی‌گرداند. با این کار هر نرم‌افزار به صورت مستقل با اختلاف شمارنده ارسالی و دریافتی می‌تواند از خوب بودن و زمان حقیقی بودن ارتباط UDP اطمینان

حاصل کند. داشتن مقدار بین ۱ تا ۳ برای یک ارتباط خوب مناسب می‌باشد. این شماره‌ها با عنوان SLRT Cntr و LabVIEW Cntr نام‌گذاری شده‌اند.

Data یک بردار ۲۳ تایی است که کل اطلاعات مورد نیاز برای ورودی‌های سیستم الکتریکی در آن وجود دارد. ترتیب Data به صورت جدول ۴-۲ می‌باشد.

جدول ۴-۲ ترتیب Data در پروتکل اطلاعات دریافتی از LabVIEW RT

ردیف	نام دیتا	ترتیب در Data	توضیحات
۱	Mech Speed	1	سرعت چرخش مکانیکی
۲	GenTrq	2	گشتاور الکتریکی مرجع
۳	Reactive Power	3	توان راکتیو مرجع
۴	Grid fault_Phase	4-6	بردار خطای مقدار فاز ولتاژهای شبکه
۵	Grid fault_Amplitude	7-9	بردار خطای مقدار اندازه ولتاژهای شبکه
۶	Grid fault_Freq	10-12	بردار خطای مقدار فرکانس ولتاژهای شبکه
۷	LabVIEW-PLC Mode	13	مشخص می‌کند که مدل DFIG از اطلاعات کدام یک از LabVIEW یا PLC استفاده کند.
۸	رزرو	14-23	

لازم به ذکر است که در نسخه حاضر از شبیه‌ساز، تمامی اطلاعات مورد نیاز از LabVIEW RT به SLRT منتقل می‌شود. به عبارت دیگر، اطلاعات فرستاده شده از PLC نیز ابتدا به کامپیوتر هدف LabVIEW RT فرستاده شده سپس از آنجا همراه با سایر داده‌ها از طریق ارتباط UDP به SLRT فرستاده می‌شود. به همین دلیل برای تغییرات احتمالی آینده، در ردیف ۷ از جدول فوق یک بیت داده برای مشخص کردن مبدأ ارسال اطلاعات کنترلی در نظر گرفته شده است. اطلاعات ۱۴ تا ۲۳ در ردیف ۶ از جدول فوق نیز برای کارهای توسعه‌ای آینده در نظر گرفته شده است. پروتکل اطلاعات ارسالی به LabVIEW RT نیز به صورت جدول ۵-۲ می‌باشد.

جدول ۵-۲ پروتکل اطلاعات ارسالی به LabVIEW RT

ردیف	نام دیتا	نوع دیتا	بایت	توضیحات
۱	SLRT Cntr	1*UInt32	1-4	شمارنده مستقل SLRT
۲	LabVIEW Cntr	1*UInt32	5-8	شمارنده مستقل دریافتی از LabVIEW
۳	Data	48*Single	9-200	دیتای خروجی شبیه‌سازی

در اینجا Data یک بردار ۴۸ تایی می‌باشد که کل اطلاعات برگشتی از سیستم الکتریکی در آن وجود دارد. ترتیب Data به صورت جدول ۶-۲ می‌باشد. فیلدهای Data در حال حاضر همان اطلاعاتی است که در شبیه‌سازی سیستم الکتریکی برای ارزیابی آن ذخیره شد.

جدول ۶-۲ ترتیب Data در پروتکل اطلاعات ارسالی به LabVIEW RT

ردیف	نام دیتا	ترتیب در Data	توضیحات
۱	wm	1	سرعت چرخش مکانیکی
۲	Te-ref	2	گشتاور الکتریکی مرجع
۳	Te	3	گشتاور الکتریکی تولیدی
۴	Pe	4	توان حقیقی تولیدی
۵	Qe	5	توان راکتیو تولیدی
۶	wg	6	سرعت چرخش ژنراتور
۷	Vg_abc	7-9	بردار ولتاژ شبکه
۸	Ig_abc	10-12	بردار جریان شبکه
۹	Vs_abc	13-15	بردار ولتاژ استاتور
۱۰	Is_abc	16-18	بردار جریان استاتور
۱۱	Vr_abc	19-21	بردار ولتاژ روتور
۱۲	Ir_abc	22-24	بردار جریان روتور
۱۳	Vdc	25	ولتاژ لینک DC
۱۴	I_dc_link	26	جریان لینک DC
۱۵	CB_on	27	وضعیت Crowbar
۱۶	RC_on	28	وضعیت فعال شدن کنترل مبدل
۱۷	GC_on	29	وضعیت اتصال ژنراتور به شبکه
۱۸	رزرو	30-48	

اطلاعات ۳۰ تا ۴۸ نیز برای کارهای توسعه‌ای در نظر گرفته شده است.

راه‌اندازی و اجرای مدل SLRT توسط نرم‌افزار LabVIEW

پس از نهایی‌سازی مدل سیستم الکتریکی و تولید کد آن در نرم‌افزار Matlab، برای اجرا توسط SLRT یک فایل با پسوند dlm تولید می‌شود. در صورتیکه مدل Simulink مربوط به سیستم الکتریکی تغییر نکند، احتیاج به کامپایل مجدد مدل نیست و فایل dlm تولید شده، برای اجرای تست‌های مختلف سخت‌افزار در حلقه تغییر نمی‌کند.

با توجه به اینکه کلیه رابط‌های گرافیکی تنظیمات و نمایش در LabVIEW نوشته شده است، برای راحتی کار کاربر، بدون باز کردن نرم‌افزار Matlab، کلیه عملیات بارگذاری فایل dlm بر روی کامپیوتر هدف، اجرا و توقف آن و ... نیز از نرم‌افزار LabVIEW انجام می‌شود.

نرم‌افزار Matlab از این قابلیت برخوردار است که برنامه‌کاربردی بلادرنگ، خارج از محیط Matlab با برنامه‌های نوشته شده در .NET یا زبان C اجرا شوند. این برنامه‌ها قادر به انجام تنظیمات، اجرا و توقف برنامه، تنظیم پارامتر، مشاهده سیگنال‌ها، عیب‌یابی و ... می‌باشند.

نرم‌افزار SLRT برای API NET دو کتابخانه xPCFramework.dll و xpcapi.dll را در اختیار قرار می‌دهد. این دو کتابخانه در آدرس MATLAB Root \toolbox\rtw\targets\xpc\api قرار دارند. در این آدرس چند مثال توسط برنامه‌های نوشته شده در C# نیز وجود دارد. این کتابخانه‌ها کلاس xPCTargetPC را برای دسترسی به کامپیوتر هدف و کلاس xPCApplication را برای دسترسی به برنامه‌کاربردی بلادرنگ بارگذاری شده بروی کامپیوتر هدف به کاربر می‌دهد. همچنین کلاس‌های دیگری را برای تنظیم پارامترها، مشاهده سیگنال اسکوپ‌ها و ... نیز در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای توضیحات بیشتر راجع به این دو کلاس کافی است که نام آنها در راهنمای Matlab جستجو شود.

نرم‌افزار LabVIEW به راحتی قادر به فراخوانی و اجرای API NET است. بنابراین کلیه عملیات مورد نیاز برای بارگذاری و اجرای برنامه‌کاربردی بلادرنگ بر روی کامپیوتر هدف در LabVIEW توسط این دو کلاس تحقق داده شد.

۳-۲- ساختار برنامه توسعه داده شده برای اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی توربین بادی

برنامه توسعه داده شده برای شبیه‌ساز زمان-حقیقی در پلتفرم LabVIEW از دو برنامه اصلی Main.vi و Moderator.vi تشکیل می‌شود. برنامه Main.vi که هسته اصلی شبیه‌ساز است، بر روی کامپیوتر هدف اجرا شده و شامل کلیه مدل‌های دینامیکی بخش‌های مختلف توربین بادی است که وضعیت توربین را بصورت زمان-حقیقی تعیین می‌کند. برنامه Moderator.vi بر روی کامپیوتر میزبان اجرا شده و اجرای برنامه اصلی را تحت کنترل می‌گیرد. این برنامه در واقع از طریق ارتباط با برنامه اصلی فرمان شروع و پایان شبیه‌سازی را صادر کرده و به دریافت داده‌های شبیه‌سازی برای نمایش و همچنین تنظیم پارامترهای بخش‌های مختلف می‌پردازد. در ادامه ساختار این دو برنامه و جزئیات عملکرد هر یک تشریح می‌گردد.

ساختار برنامه اصلی Main.vi

همانطور که گفته شد، حل معادلات بخش‌های مختلف و استخراج وضعیت توربین بادی بصورت زمان-حقیقی در برنامه Main.vi در کامپیوتر هدف LabVIEW-RT صورت می‌گیرد. در واقع این برنامه شامل مدل‌های بخش‌های مختلف از قبیل مدل‌های آیرودینامیک و مکانیک حرکت توربین در قالب کد FAST، مدل سیستم اندازه‌گیری، مدل سیستم کنترل شامل زیرسیستم شکل‌دهی سیگنال، زیرسیستم سوپروایزری و زیرسیستم کنترل، مدل عملگرهای پیچ و یاو و همچنین مدل زیرسیستم الکتریکی می‌باشد. ساختار کلی این برنامه در شکل ۲-۴۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، ساختار بلوک دیاگرامی برنامه از ۳ بخش اصلی: "Initialization"، "Main Loop" و "Termination" تشکیل می‌شود.

برنامه Main.vi با دریافت فرمان شروع فرآیند شبیه‌سازی از سیستم میزبان، ابتدا وارد بخش "Initialization" می‌گردد. در این بخش تمامی عملیات مربوط به مقداردهی اولیه متغیرهای مدل‌های مختلف و متغیرهای شبکه که میان سیستم هدف و میزبان مشترک است انجام می‌گیرد. این عملیات همچنین شامل بارگذاری فایل‌های ورودی کد FAST و همچنین پیکربندی پورت سریال و ساخت نقطه نویسنده جریان شبکه^۱ می‌باشد.

^۱Network stream writer endpoint

پس از مقداردهی اولیه متغیرهای برنامه، در بخش “Main Loop” اجرای کلیه مدل‌های دینامیکی بخش‌های مختلف توربین و انتقال داده میان این بخش‌ها صورت می‌گیرد. به این منظور یک حلقه زمانی^۱ برای اجرای زنجیره زیرسیستم‌های مختلف با یک زمان اجرای ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این پروژه ثابت زمانی اجرای حلقه به صورت پارامتر قابل تنظیم در نظر گرفته شده است. این زمان باید با ثابت زمانی حل معادلات کد FAST که در فایل ورودی این کد تنظیم می‌شود، یکسان در نظر گرفته شود. در این حلقه زمانی در هر تکرار به ترتیب مدل دینامیک و آیرودینامیک توربین در قالب کد FAST، مدل سیستم اندازه‌گیری، مدل سیستم سوپروایزری و کنترل و در نهایت مدل عملگرها و سیستم الکتریکی اجرا شده و وضعیت زوایای پیچ، یاو و سرعت و گشتاور الکتریکی علاوه بر متغیرهای کد FAST محاسبه می‌شوند و به عنوان شرایط اولیه حل معادلات مختلف در تکرار بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در بخش “Main Loop” علاوه بر حلقه زمانی اجرای مدل زیرسیستم‌های توربین، دو حلقه اجرایی دیگر نیز بطور موازی برای دریافت و ارسال داده یکی از طریق ارتباط UDP و دیگری از طریق ارتباط سریال وجود دارد. هسته LabVIEW این سه حلقه را بصورت موازی و هم‌زمان اجرا می‌کند و از داده‌های دریافتی از ارتباطات سریال و UDP در پردازش حلقه زمانی مدل توربین استفاده می‌کند. لازم به توجه است که به منظور حفظ عملکرد اجرای زمان-حقیقی هرگز نباید یک پیوند مستقیم میان هر یک از دو حلقه ارتباطی با حلقه زمانی اصلی برقرار گردد.

با به پایان رسیدن زمان شبیه‌سازی و یا دریافت فرمان پایان از سیستم میزبان، شبیه‌سازی وارد بخش “Termination” شده و عملیات ذخیره‌سازی نتایج و آزادسازی حافظه اشغال شده توسط برنامه از طریق خاتمه و بستن کد FAST و نقطه نویسنده جریان شبکه انجام می‌گیرد. در ادامه به تشریح هر یک از ماژول‌های مورد استفاده در برنامه Main.vi پرداخته می‌شود.

ماژول اجرای کد FAST

همانطور که در فصل اول تشریح گردید، کد FAST بکارگرفته شده در هسته شبیه‌ساز، یک فایل پیوند دینامیکی کتابخانه‌ای (.dll) است که حاصل از کامپایل مجموعه‌ای از کدهای به زبان فرترن می‌باشد. برای فراخوانی و اجرای این فایل در نرم‌افزار LabVIEW از بلوک “Call Library Function Node” در دسته “Connectivity” استفاده می‌شود.

Call Library Function Node



شکل ۴۴-۲- بلوک فراخوانی و اجرای یک فایل dll در LabVIEW

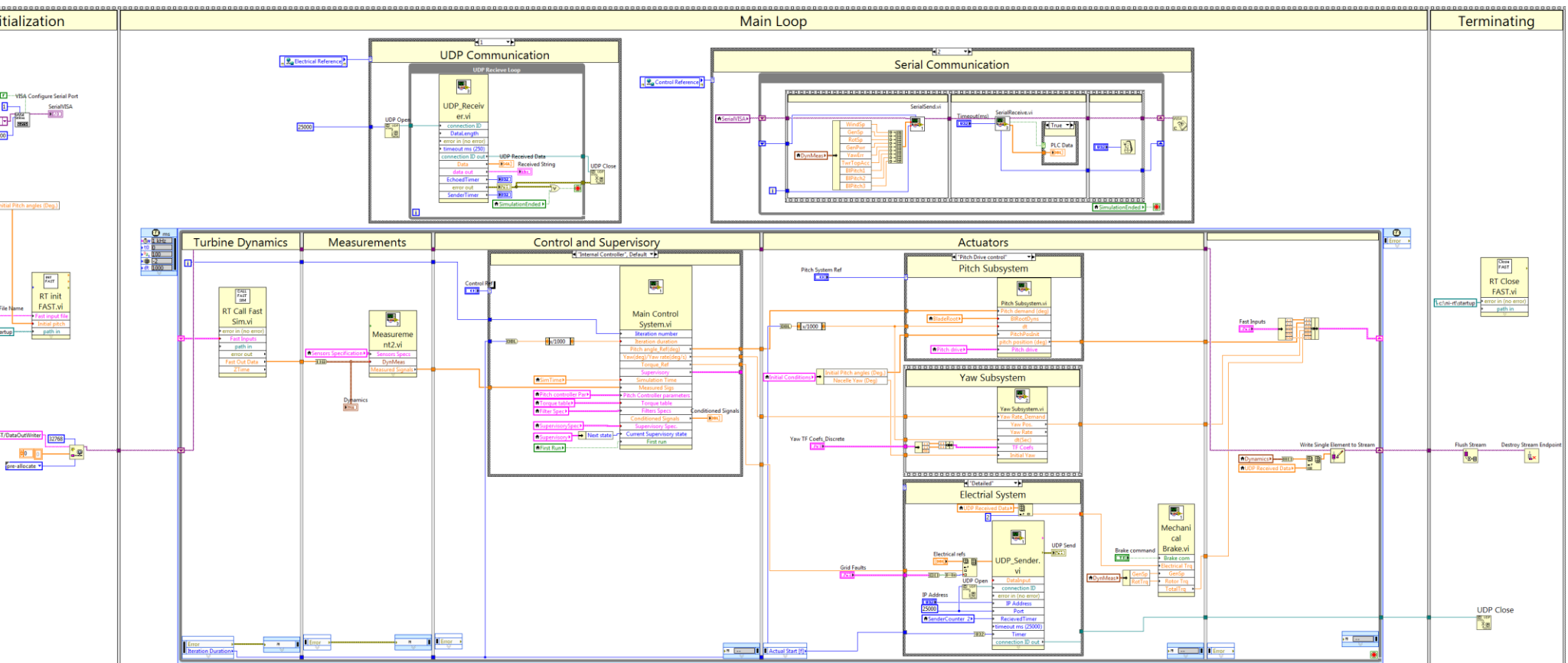
با دبل کلیک بر روی این بلوک، یک پنجره تنظیمات بصورت شکل ۴۶-۲ باز می‌شود.

با وارد کردن مسیر فایل dll مورد نظر در قسمت مربوطه در نوار “Function”، بصورت خودکار برنامه‌های زیرمجموعه این فایل در قسمت “Fuction name” ظاهر می‌شود. در این مورد ۳ زیربرنامه “FAST_RT_DLL_END”، “FAST_RT_DLL_INIT” و “FAST_RT_DLL_SIM” ظاهر می‌شوند. این سه زیربرنامه همانطور که از نام آنها برمی‌آید، یکی به منظور مقداردهی اولیه و بارگذاری فایل‌های ورودی FAST، دیگری به منظور حل معادلات دینامیکی و اجرای مدل‌ها و زیر برنامه سوم جهت اجرای فرآیند خاتمه کد FAST مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب برای اجرای کد FAST نیاز به بکارگیری ۳ بلوک “Call

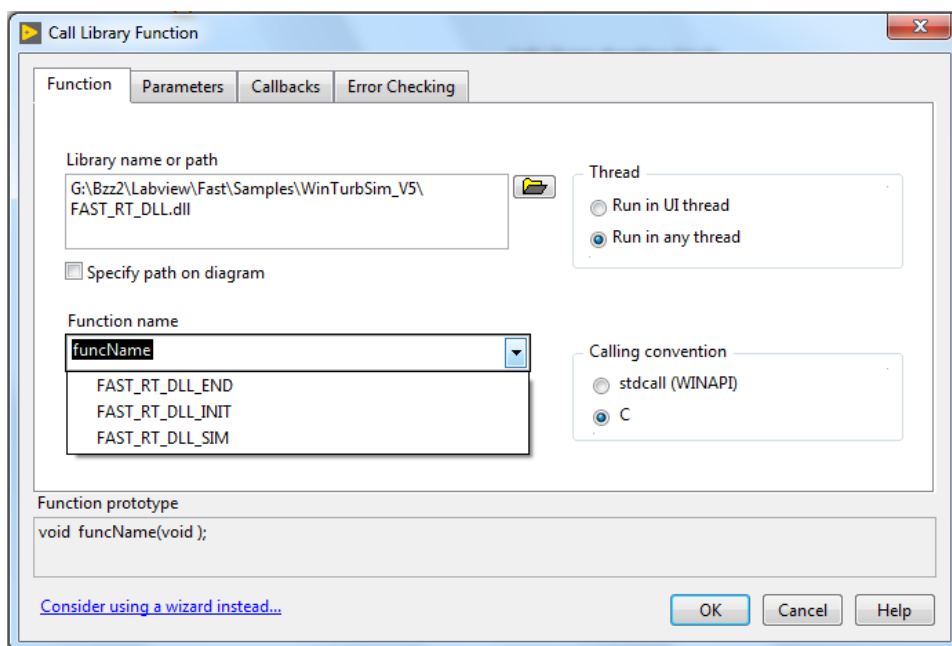
¹ Time Loop

”*Library Function Node*” در بخش‌های مختلف برنامه اصلی می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-۴۵ مشاهده می‌شود از این بلوک یکی در قسمت ”*Initialization*“، دیگری در حلقه زمانی از بخش ”*Main Loop*“ و بلوک آخر در قسمت ”*Termination*“ استفاده شده است.

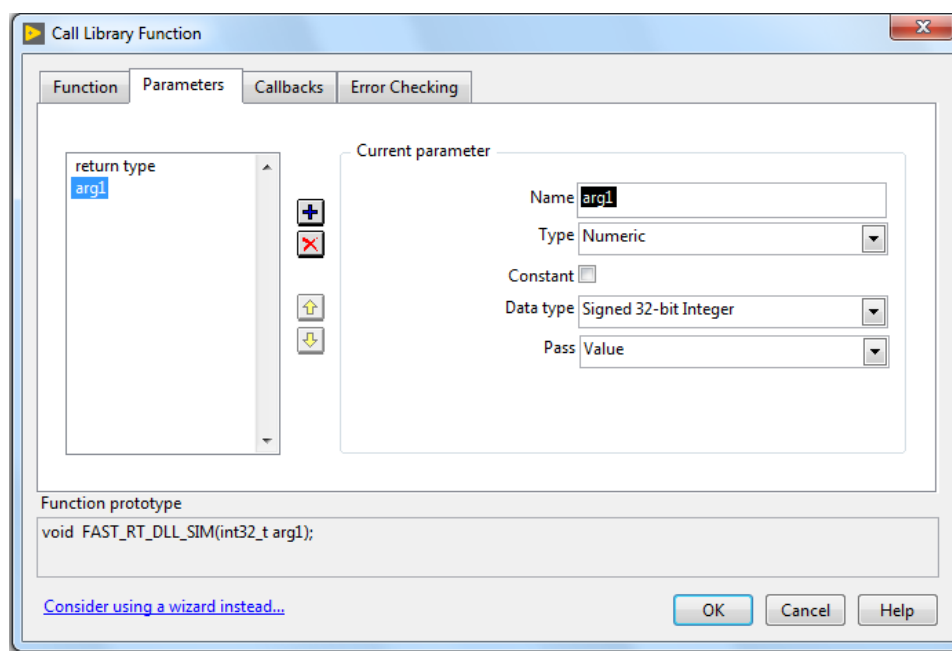
پس از مشخص کردن زیربرنامه مورد نظر، در مرحله بعد می‌باید آرگومان‌های تابع هر زیربرنامه که در واقع بیان‌گر ورودی‌ها و خروجی‌های زیربرنامه می‌باشند را مشخص کرد. به این منظور، در پنجره تنظیمات بلوک (شکل ۲-۴۶) با کلیک بر روی نوار ”*Parameters*“، صفحه‌ای مطابق شکل ۲-۴۷ باز می‌شود.



شکل ۴۵-۲- بلوک دیاگرام برنامه Main.vi



شکل ۴۶-۲ پنجره تنظیمات بلوک "Call Library Function Node"



شکل ۴۷-۲ صفحه تنظیمات آرگومان‌های تابع زیربرنامه

در این صفحه در قسمت سمت چپ، با کلیک بر روی علامت  یک پارامتر جدید ظاهر می‌شود که نام، نوع و سایر مشخصات آن در سمت راست قابل تنظیم است. در این حالت در قسمت پایین صفحه نام تابع به همراه آرگومان‌های آن مشخص می‌شود.

برای آگاهی از آرگومان‌های هر یک از زیربرنامه‌های فایل dll کد FAST می‌توان به فایل کامپایل نشده *FAST_RT_DLL.f90* مراجعه کرد. محتوای این فایل در پیوست (ب) آورده شده است. همانطور که در این فایل دیده می‌شود، سه زیر برنامه با توابع زیر وجود دارند.

- FAST_RT_DLL_INIT (FileName_RT_Byte, FLen)

این زیر برنامه همانطور که قبلاً گفته شد، به منظور مقداردهی اولیه متغیرهای کد FAST اجرا می‌گردد و از دو آرگومان تشکیل می‌شود. آرگومان FileName_RT_Byte یک آرایه از کدهای ASCII متناظر با کاراکترهای نام فایل ورودی FAST به همراه آدرس آن می‌باشد. آرگومان دیگر، FLen، یک عدد از نوع Int32 است و بیانگر تعداد کاراکترهای نام فایل ورودی است.

- FAST_RT_DLL_SIM (BIPitchCom_RT, YawPosCom_RT, YawRateCom_RT, ElecPwr_RT, GenTrq_RT, OutData_RT, Time_RT, HSSBrFrac_RT)

آرگومان‌های زیربرنامه FAST_RT_DLL_SIM شامل یک آرایه^۳ تایی از زوایای پیچ پره‌ها، زاویه و نرخ تغییرات زاویه یاو، توان الکتریکی، گشتاور الکتریکی، بردار خروجی FAST، زمان شبیه‌سازی و نسبت ترمز است. که البته پارامتر آخر به دلیل اینکه در شبیه‌سازی، ترمز مکانیکی در خارج از کد FAST به صورت جداگانه مدل شده است، صفر در نظر گرفته می‌شود.

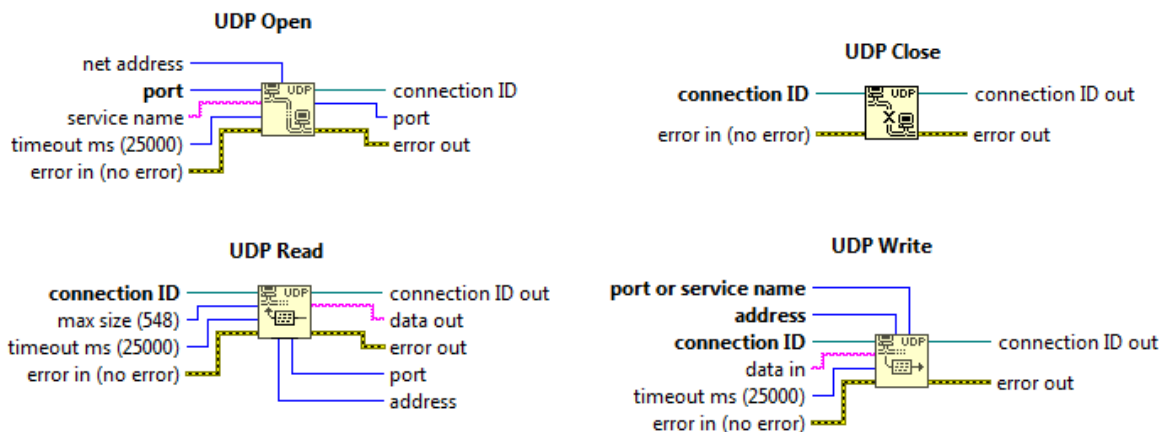
- FAST_RT_DLL_END ()

همانطور که مشاهده می‌شود، این زیربرنامه فاقد آرگومان می‌باشد.

ماژول ارتباط UDP

به منظور ارسال و دریافت داده از طریق ارتباط UDP، از بلوک‌های UDP در دسته "Protocols" از بخش "Data Communication" استفاده می‌شود. این بلوک‌ها که در شکل ۲-۴۸ مشاهده می‌شوند، عبارتند از "UDP Open"، "UDP Read"، "UDP Write" و "UDP Close".

بلوک "UDP Open" با دریافت آدرس پورت مورد نظر، یک شناسه اتصال^۱ برای ارتباط با آن پورت تخصیص می‌دهد. بلوک "UDP Read" با دریافت شناسه اتصال و بیشترین سایز داده ورودی، داده از پورت مشخص شده می‌خواند و در خروجی قرار می‌دهد. بلوک "UDP Write" نیز با دریافت یک رشته از داده مورد نظر، آن را بر روی پورت مشخص شده ارسال می‌کند. در نهایت، بلوک "UDP Close" پورت ارتباطی را آزاد کرده و به ارتباط خاتمه می‌دهد.



شکل ۲-۴۸- بلوک‌های مرتبط با ارتباط UDP

به منظور برقراری ارتباط و ارسال و دریافت داده در شبیه‌ساز، دو ماژول UDP_Send.vi و UDP_Receive.vi در محیط LabVIEW توسعه داده شد که ساختار آنها در شکل ۲-۴۹ و شکل ۲-۵۰ نشان داده شده است.

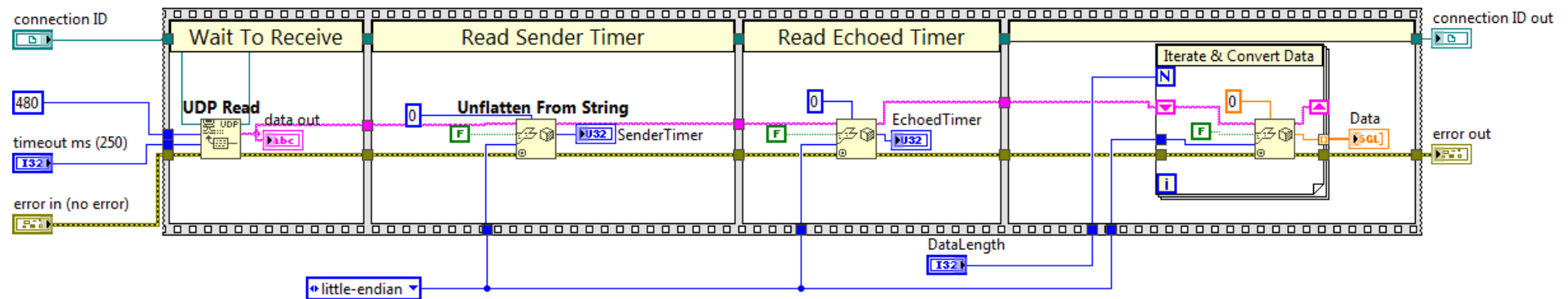
¹ Connection ID

قابل توجه است که داده‌های ارسالی باید به فرمت رشته باشند. به این منظور از بلوک *"Flatten To String"* استفاده شده است. این بلوک، داده ورودی را به یک فرمت رشته‌ای از داده‌های باینری که برای خواندن و نوشتن مناسب است، تبدیل می‌کند. همچنین داده باینری دریافتی نیز به شکل رشته‌ای می‌باشد. این داده پس از دریافت توسط بلوک *"Unflatten From String"* به فرمت دلخواه قابل تبدیل است.

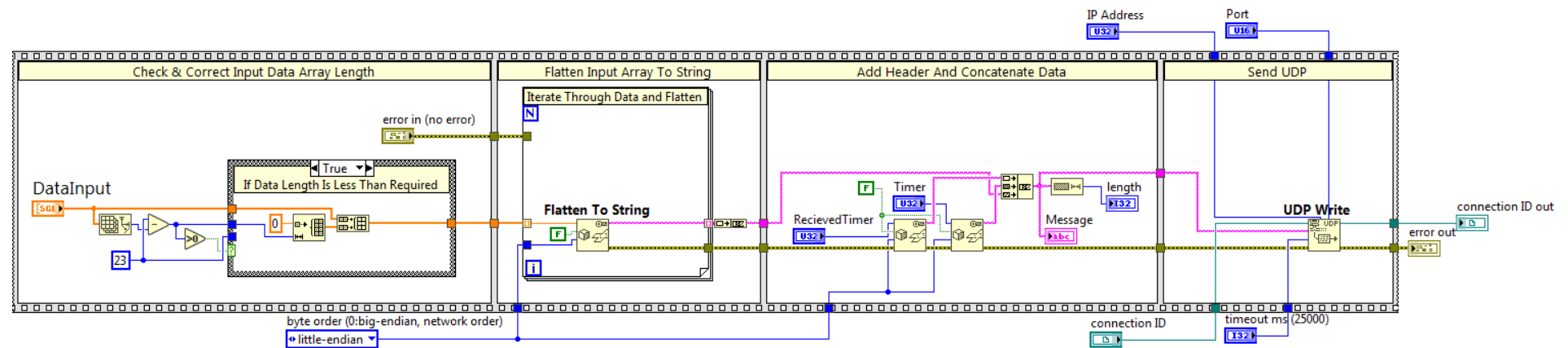
لازم به ذکر است که برای چک کردن نحوه برقراری ارتباط و میزان تاخیر در ارسال و دریافت داده، علاوه بر داده مورد نیاز برای شبیه‌سازی، دو داده اضافی در ابتدای رشته ارسالی در مبدا و مقصد قرار داده می‌شود. داده اول مقدار یک زمان سنج است که از داده ارسالی از سمت مقابل دریافت شده است. داده دوم مقدار زمان سنجی است که در سمت فرستنده قرار دارد. به این ترتیب در هر سمت، با دریافت و جداسازی داده زمانی مربوط به خود، و مقایسه آن با زمان سنج موجود به میزان تاخیر در ارسال و دریافت پی برده می‌شود.

قابل توجه است که داده‌های ارسالی باید به فرمت رشته باشند. به این منظور از بلوک *"Flatten To String"* استفاده شده است. این بلوک داده ورودی را به یک فرمت رشته‌ای از داده‌های باینری که برای خواندن و نوشتن مناسب است، تبدیل می‌کند. همچنین داده باینری دریافتی نیز به شکل رشته‌ای می‌باشد. این داده پس از دریافت توسط بلوک *"Unflatten From String"* به فرمت دلخواه قابل تبدیل است.

لازم به ذکر است که برای چک کردن نحوه برقراری ارتباط و میزان تاخیر در ارسال و دریافت داده، علاوه بر داده مورد نیاز برای شبیه‌سازی، دو داده اضافی در ابتدای رشته ارسالی در مبدا و مقصد قرار داده می‌شود. داده اول مقدار یک زمان سنج است که از داده ارسالی از سمت مقابل دریافت شده است. داده دوم مقدار زمان سنجی است که در سمت فرستنده قرار دارد. به این ترتیب در هر سمت، با دریافت و جداسازی داده زمانی مربوط به خود، و مقایسه آن با زمان سنج موجود به میزان تاخیر در ارسال و دریافت پی برده می‌شود.



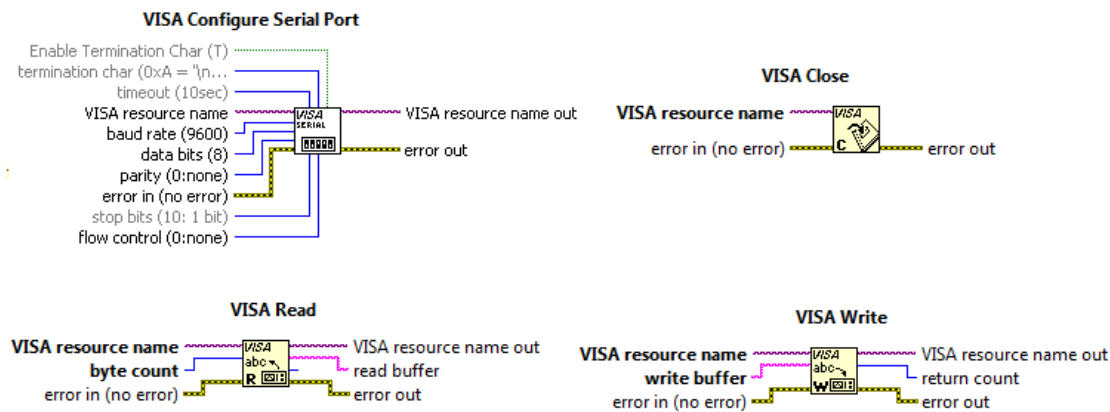
شکل ۴۹-۲- مازول دریافت داده از طریق ارتباط UDP



شکل ۵۰-۲- مازول ارسال داده از طریق ارتباط UDP

ماژول ارتباط سریال

همانطور که قبلاً گفته شد، برای ارتباط داده میان مدل توربین در کد FAST و سیستم کنترل در PLC از ارتباط سریال استفاده می‌شود. به این منظور جهت برقراری ارتباط، در برنامه "Maim.vi" از بلوک‌های "Serial" در بخش "Protocols" از دسته "Data Communication" استفاده می‌شود. شکل ۵۱-۲ بلوک‌های به کار رفته در این برنامه را نشان می‌دهد.



شکل ۵۱-۲- بلوک‌های مورد استفاده در ارتباط سریال

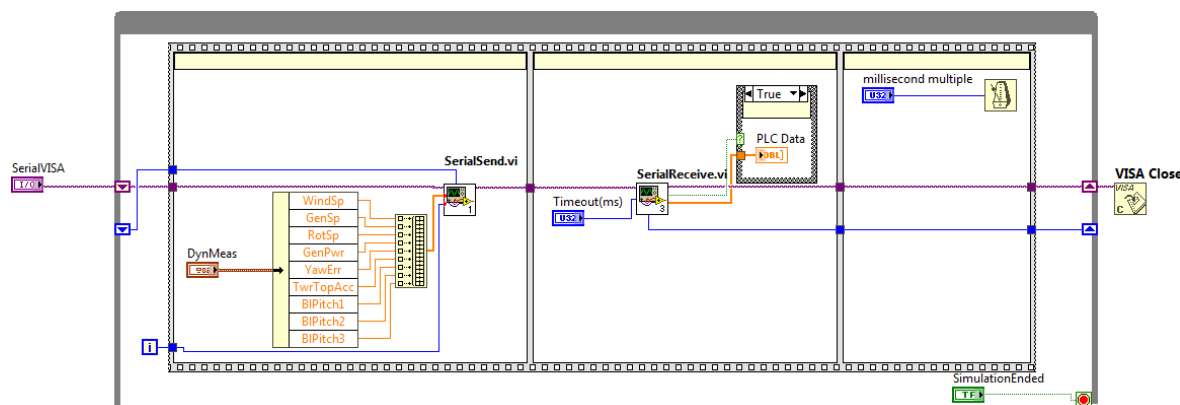
بلوک "VISA Configure Serial Port" برای تعیین درگاه سریال مورد نظر و تنظیم آن از قبیل نرخ باود^۱، الگوی توازن^۲، حداکثر زمان انتظار^۳، بکارگیری پارامتر خاتمه، بیت پایانی،... بکار می‌رود. در این برنامه نرخ باود بر روی ۱۱۵۲۰۰، حداکثر زمان انتظار به اندازه ۱ ثانیه، بکارگیری کاراکتر خاتمه، غیرفعال و بقیه پارامترها مقدار پیش‌فرض در نظر گرفته شده است. همچنین در ورودی "VISA resource name"، درگاه مورد نظر که در اینجا "COM1" است، تعیین می‌شود.

بلوک‌های "VISA Read" و "VISA Write" نیز با دریافت نام درگاه سریال مورد نظر، در مورد اول، داده‌ها را از بافر مربوط به آن خوانده و یا در مورد دوم بر روی بافر آن می‌نویسد. در نهایت بلوک "VISA Close" درگاه مورد استفاده را بسته و آزاد می‌سازد. شکل ۵۲-۲ ساختار حلقه یک ارتباط سریال را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً گفته شد، این حلقه، خارج از حلقه زمانی اجرای مدل‌های شبیه‌سازی است و موازی با حلقه اصلی بطور مرتب داده‌ها به تبادل داده با PLC می‌پردازد. از آنجا که دوره زمانی کار PLC برابر با 4ms می‌باشد، در حلقه ارتباط سریال یک تاخیر به اندازه 4ms در نظر گرفته شده است تا از تلاش بیش از حد پردازنده در این حلقه جلوگیری شود.

¹ Baud rate

² Parity

³ TimeOut

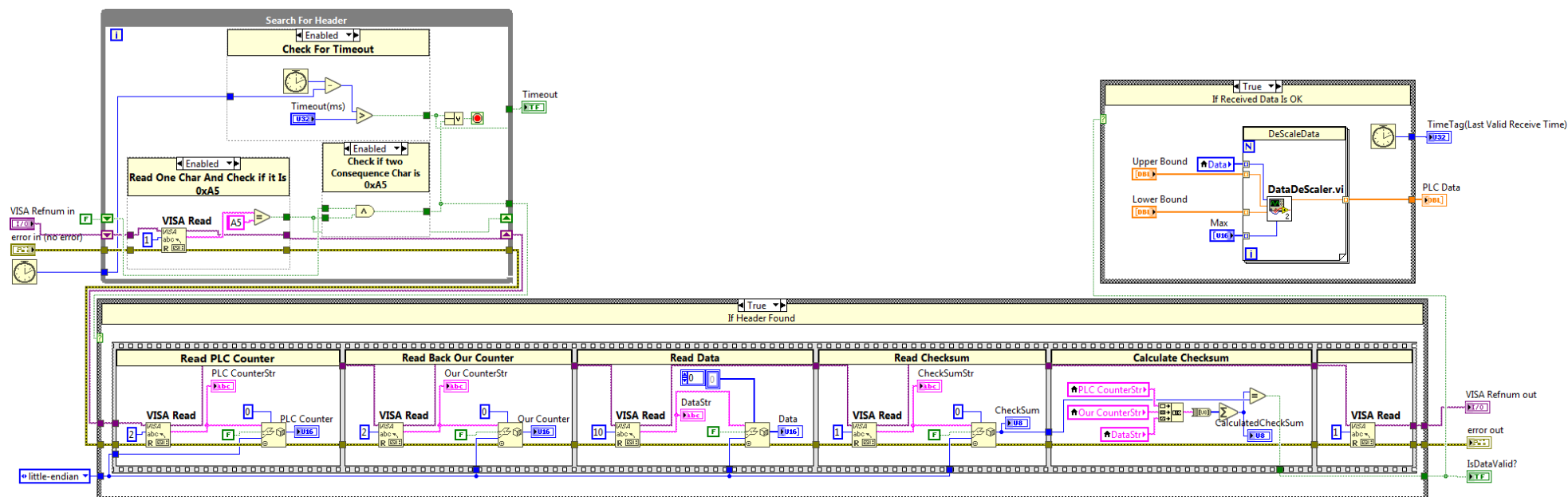


شکل ۵۲-۲- حلقه برقراری ارتباط سریال

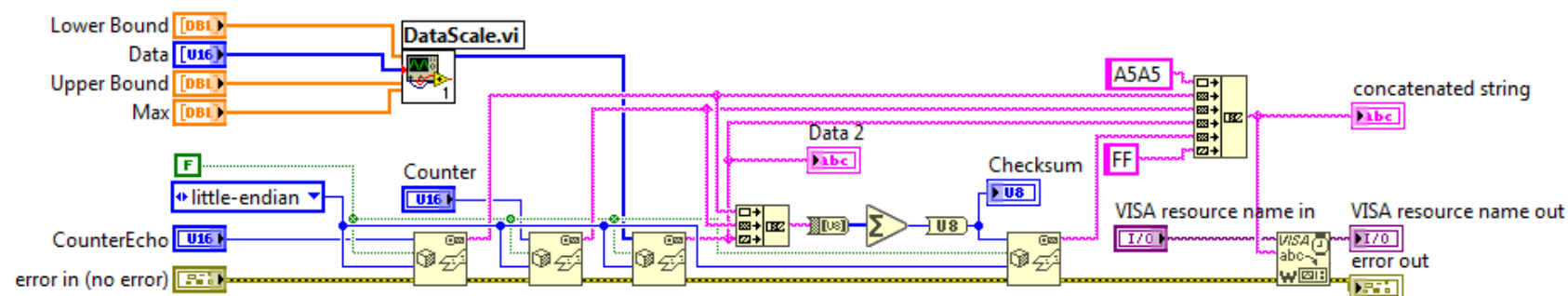
عملیات ارسال و دریافت داده توسط دو زیربرنامه *“SerialSend.vi”* و *“Serial receive.vi”* انجام می‌گیرد. ساختار این دو زیربرنامه در شکل ۵۴-۲ و شکل ۵۳-۲ نشان داده شده است. در برنامه *“SerialSend.vi”* ابتدا داده مورد نظر برای ارسال آماده‌سازی می‌شود. فرآیند آماده‌سازی^۱ شامل دو مرحله است. در مرحله اول داده مورد نظر بسته به دقت و طول داده مورد نیاز بر روی یک محدوده نرمالایز می‌شود. این عمل توسط زیربرنامه *“DataScale.vi”* انجام می‌گیرد. در مرحله دوم، داده‌های نرمال شده جهت ارسال بسته‌بندی می‌گردند. بسته‌بندی داده، شامل افزودن اطلاعاتی خاص در ابتدا و انتهای داده اصلی می‌باشد. بدین ترتیب یک بسته داده از ۶ قسمت تشکیل می‌گردد: ۱- پیشوند، ۲- شمارنده بازتابی، ۳- شمارنده فرستنده، ۴ داده اصلی، ۵- جمع کنترلی^۲ و ۶- پسوند.

¹ Preparation

² Checksum



شکل ۵۳-۲- ساختار زیربرنامه "SerialReceive.vi"



شکل ۵۴-۲- ساختار زیربرنامه "SerialSend.vi"

پیشوند بطول ۲ بایت و برابر با عدد A5A5 در مبنای شانزده می‌باشد و شروع بسته داده را نشان می‌دهد. شمارنده بازتابی، یک عدد ۲ بایتی است که شمارنده ارسالی از سمت مقصد در دوره قبل را دربر دارد. گیرنده در مقصد با دریافت این عدد و مقایسه آن با شمارنده خود از میزان تاخیر در ارتباط آگاه می‌شود. به همین ترتیب شمارنده فرستنده نیز بصورت یک عدد ۲ بایتی فرستاده می‌شود تا گیرنده پس از دریافت آنرا بازتاب دهد. جمع کنترلی نیز یک عدد ۱ بایتی است که از جمع دودویی اعداد مربوط به شمارنده بازتابی، شمارنده و داده اصلی حاصل می‌گردد. گیرنده پس از دریافت بسته، یکبار دیگر جمع کنترلی را با داده‌های دریافتی محاسبه می‌کند و با مقایسه این عدد با جمع کنترلی دریافتی از صحت داده دریافتی اطمینان می‌یابد. چنانچه این دو عدد با یکدیگر متفاوت باشند، آن داده نامعتبر بوده و کنترلر از داده پیشین در محاسبات استفاده می‌کند. در نهایت در پایان بسته داده یک عدد ۱ بایتی برابر با FF در مبنای شانزده قرار می‌گیرد که انتهای بسته را نشان می‌دهد.

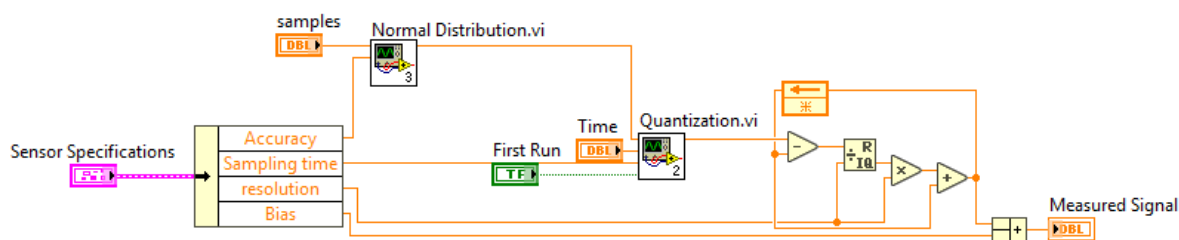
در زیر برنامه "SerialReceive.vi" که ساختار آن در شکل ۵۳-۲ نشان داده شده است. داده ارسال شده از سمت PLC از درگاه مورد نظر برداشته شده و پس از استخراج داده اصلی از بسته ارسالی، توسط زیر برنامه "DataDescaler.vi" به داده اصلی مقیاس می‌گردد. فرآیند استخراج داده خود شامل مراحل مختلفی همچون: تشخیص پیشوند، جداسازی شمارنده‌ها، جداسازی داده اصلی، محاسبه جمع کنترلی، جداسازی جمع کنترلی ارسال شده و تعیین اعتبار داده دریافتی با مقایسه جمع کنترلی دریافتی با مقدار محاسبه شده می‌باشد.

برای تشخیص پیشوند در برنامه از یک حلقه While استفاده شده است که در آن یک داده از بافر خوانده شده و زمانی که ۲ داده پشت سر هم عدد A5 باشد، شروع بسته تشخیص داده می‌شود. در این زمان، برنامه از حلقه خارج شده و به ترتیب داده‌های مربوط به شمارنده‌ها، داده اصلی و جمع کنترلی از بافر برداشته می‌شود. طول داده برداشته شده از روی بافر در هر مرحله توسط ورودی "Byte count" از بلوک "VISA Read" مشخص می‌شود.

ماژول اندازه‌گیری

ماژول اندازه‌گیری به مدلسازی سنسورهای مختلف می‌پردازد. هر سنسور علاوه بر سیگنال فیزیکی متناظر با آن، توسط ۴ پارامتر: زمان نمونه‌برداری، رزولوشن، دقت و بایاس مشخص می‌شود. تعداد این سنسورها و مشخصه هر یک توسط کاربر قابل تنظیم است.

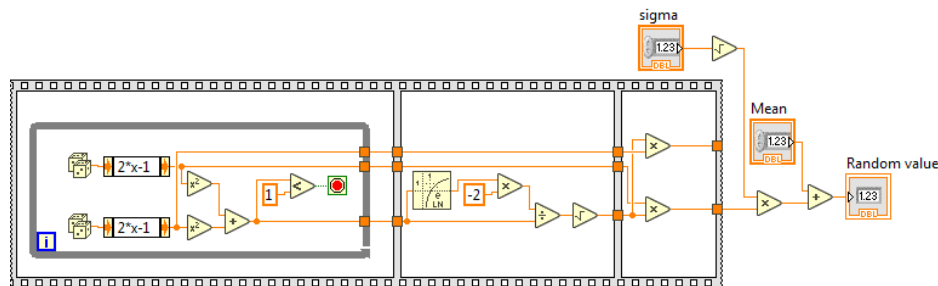
شکل ۵۵-۲ ساختار بلوکی مدل یک سنسور را در محیط LabVIEW نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در این ساختار از ۳ زیر برنامه NormalDistribution.vi، Quantization.vi و Resolution.vi استفاده شده است.



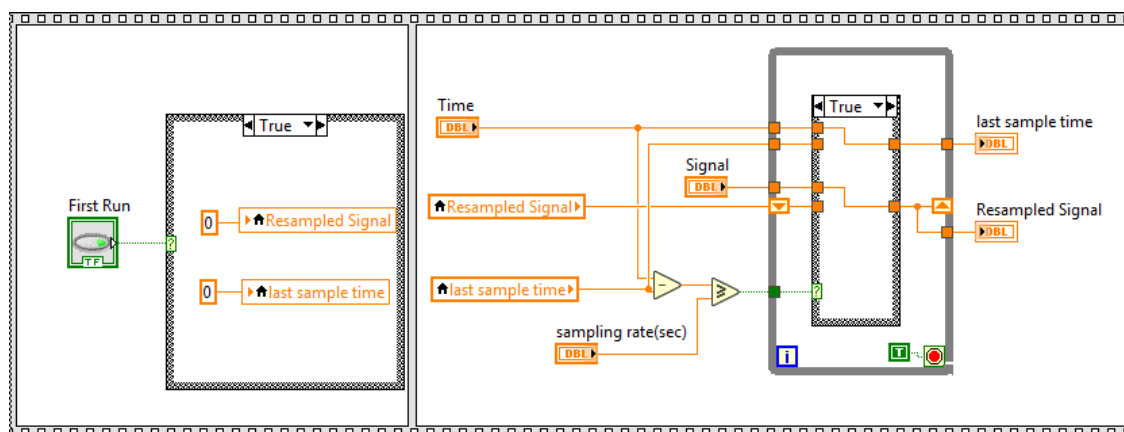
شکل ۵۵-۲- ساختار مدل سنسور

در زیر برنامه Normal Distribution.vi بسته به دقت در نظر گرفته شده برای سنسور، یک عدد تصادفی که از یک توزیع نرمال با میانگین داده مورد اندازه‌گیری و واریانسی برابر با دقت اندازه‌گیری پیروی می‌کند، به

عنوان مقدار اندازه‌گیری شده تولید می‌شود. برای تولید یک توزیع نرمال از روش قطبی مارساگلیا^۱ که در واقع بهبود روش معروف باکس-مولر^۲ است استفاده شده است. شکل ۵۶-۲ ساختار این برنامه را نشان می‌دهد. هر سنسور بسته به تکنولوژی ساخت آن، قابلیت اندازه‌گیری با یک فرکانس محدود را دارد. زیربرنامه Quantization.vi با دریافت سیگنال و زمان نمونه‌برداری مورد نظر، در خروجی خود، مقادیر سیگنال را در فواصل زمانی تعیین شده در اختیار می‌گذارد. علاوه بر این خروجی خوانده شده یک سنسور به علت محدودیت مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، تغییرات کوچکتر از یک مقدار مشخص را تشخیص نمی‌دهد. این محدودیت توسط زیربرنامه Resolution.vi مدل می‌شود. ساختار این زیربرنامه نیز در شکل ۵۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵۶-۲- ساختار زیربرنامه Normal Distribution.vi



شکل ۵۷-۲- ساختار زیربرنامه Quantization.vi

ماژول سیستم کنترل

سیستم کنترل در شبیه‌ساز توربین بادی به ۳ صورت قابل اعمال می‌باشد: ۱- سیستم کنترل تعریف شده داخلی، ۲- سیستم کنترل تعریف شده توسط کاربر و ۳- سیستم کنترل تعریف شده بر روی سخت‌افزار خارجی. در حالت اول، سیستم کنترل و تمامی زیرسیستم‌های آن شامل ماژول سوپروایزری^۳، شکل‌دهی سیگنال^۴ و کنترل‌کننده به یک ساختار ثابت اما با پارامترهای قابل تنظیم، در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. در اینجا کاربر تنها می‌تواند پارامترهای سیستم کنترل را مطابق با طراحی خود برای ساختار موجود تغییر داده و به سیستم اعمال نماید. همچنین سیستم کنترل در درون نرم‌افزار اصلی و بر روی سیستم هدف LabVIEW-RT اجرا می‌گردد. در حالت دوم، تنها ورودی‌های سیستم کنترل که شامل مقادیر اندازه‌گیری شده است، در اختیار کاربر قرار می‌گیرد و کاربر می‌تواند برنامه سیستم کنترل خود را در هر ساختاری بصورت یک فایل .vi نوشته و آدرس آن

¹ Marsaglia polar method

² Box-Muler method

³ Supervisory

⁴ Signal conditioning

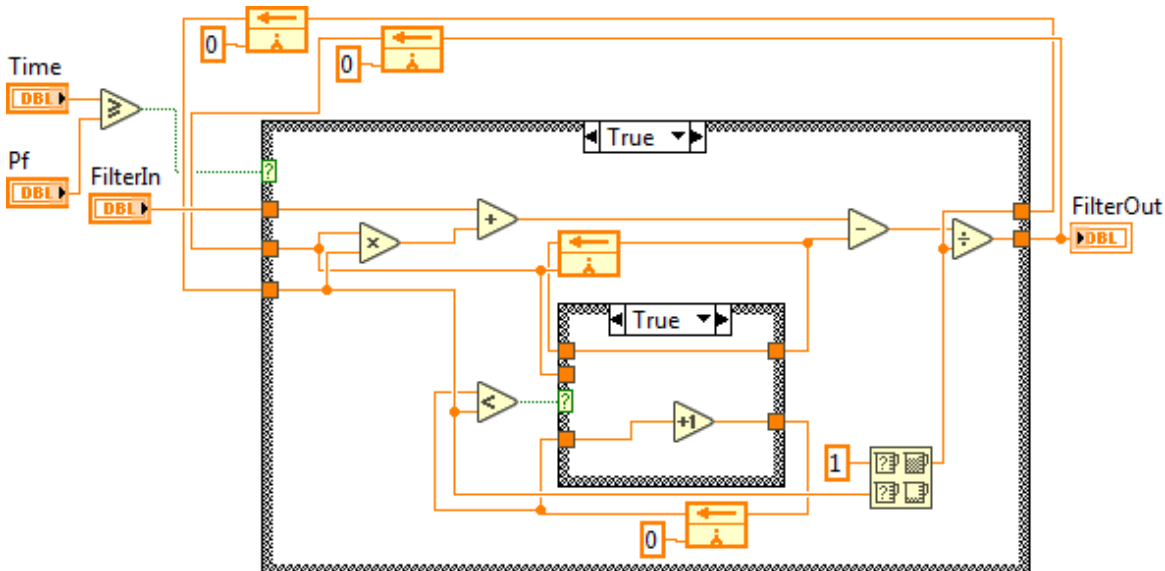
را در اختیار قرار دهد. در این حالت برنامه بصورت خودکار آن فایل را از آدرس وارد شده فراخوانی و اجرا کرده و خروجی‌های آن را در اختیار برنامه شبیه‌ساز جهت اعمال به عملگرها قرار می‌دهد. در اینجا چنانچه فایل سیستم کنترل به صورت یک فایل اجرایی .exe و یا فایل کتابخانه‌ای .dll نوشته شده باشد، کاربر می‌تواند آن را در قالب یک فایل .vi و با استفاده از بلوک‌های فراخوانی این فایل‌ها به صورت قابل اجرا در LabVIEW در آورده و در شبیه‌ساز به کار برد.

در حالت سوم نیز همانند حالت دوم سیستم کنترل تنها از مقادیر اندازه‌گیری شده، ورودی می‌گیرد و مقادیر خروجی را در اختیار می‌دهد. اما تفاوت آن با حالت دوم در این است که در اینجا سیستم کنترل بر روی یک سخت‌افزار خارجی اجرا می‌شود و تبادل داده با شبیه‌ساز از طریق ارتباط سریال انجام می‌گیرد.

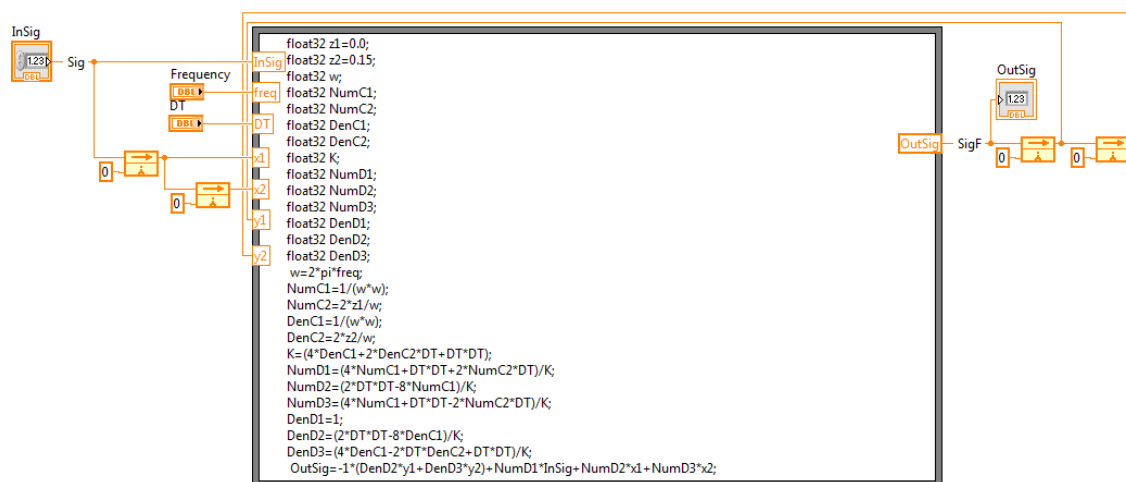
در ادامه ساختار سیستم کنترل در حالت اول تشریح می‌گردد.

هنگامی که سیستم کنترل داخلی با ساختار ثابت انتخاب گردد، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده پس از ورود به سیستم کنترل ابتدا وارد ماژول شکل‌دهی سیگنال می‌شوند. در این ماژول سیگنال‌های مورد نظر تحت تأثیر یکی از فیلترهای پایین‌گذر و ناچ و یا تحت عملیات میانگین‌گیری قرار می‌گیرد. سیگنال مورد نیاز و مشخصه فیلترهای متناظر با آن توسط کاربر در واسط کاربری قابل تنظیم است. هر سیگنال می‌تواند تحت تأثیر هیچ فیلتری قرار نگیرد و یا اینکه چند فیلتر از یک نوع با پارامترهای مختلف بر روی آن اعمال شود. در نهایت خروجی ماژول شکل‌دهی سیگنال به عنوان ورودی به دو ماژول دیگر یعنی ماژول سوپروایزری و ماژول کنترلر اعمال می‌شود.

شکل ۵۸-۲ و شکل ۵۹-۲ به ترتیب ساختار برنامه نوشته شده برای فیلتر میانگین‌گیری و فیلتر ناچ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، فیلتر میانگین علاوه بر سیگنال مورد نظر، پارامتر بازه میانگین‌گیری، Pf، را نیز دریافت کرده و بصورت پیوسته میانگین مقادیر زمانی سیگنال ورودی را در بازه زمانی مشخص شده محاسبه می‌کند. فیلتر ناچ نیز فرکانس ناچ و همچنین ثابت زمانی فیلترگیری را دریافت کرده و سیگنال خروجی را در اختیار می‌گذارد. برای نوشتن فیلتر ناچ از مدل اسکریپت که مشابه زبان C می‌باشد استفاده شده است.



شکل ۵۸-۲- ساختار فیلتر میانگین‌گیری



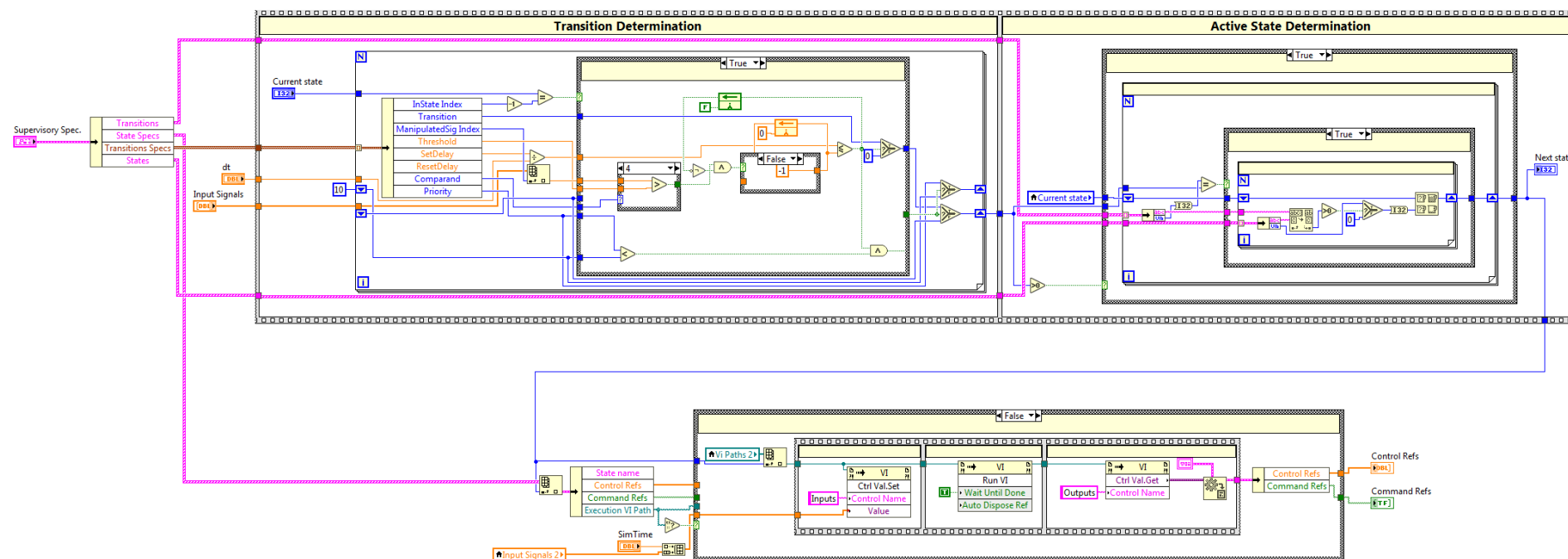
شکل ۵۹-۲- ساختار ماژول فیلتر ناچ

در ماژول سوپروایزری که بصورت یک الگوریتم ماشین حالت^۱ نوشته می‌شود، مقادیر مرجع کنترل‌کننده‌ها بسته به وضعیت توربین بادی، نظیر سرعت باد، سرعت چرخش روتور، توان تولیدی و ... تعیین می‌شود. به این منظور ابتدا مدهای کاری مختلفی تعریف شده و شرایط ورود و عملیات مورد نیاز برای انجام در هر مد مشخص می‌شود. سپس با رصد شرایط مختلف، چنانچه شرط ورود متناظر یک مد برآورده شود، عملیات مربوط به آن انجام می‌گیرد.

شرایط ورود بصورت برآورده شدن یک حد آستانه و به همراه یک زمان انتظار برای تثبیت شرایط تعریف می‌شود. به این صورت که چنانچه یکی از سیگنال‌های سیستم برای مدت مشخصی از یک حد آستانه فراتر برود، آنگاه شرط ورود به مد متناظر فعال می‌شود. لازم به ذکر است که ساختار کامل ماژول سوپروایزری شامل تعداد مدهای کاری و شرایط ورود و عملیات هر مد، توسط کاربر و در پنل کاربری قابل تعریف است.

ماژول کنترلر خود از سه ماژول کنترلر پیچ، کنترلر گشتاور و کنترلر یاو تشکیل می‌شود. کنترلر پیچ همانطور که در گزارش فاز اول گفته شد، از یک ساختار PID با بهره جدول‌بندی‌شده برخوردار است. کنترلرهای گشتاور و یاو نیز به ترتیب بصورت جدول جستجو و کنترلر on-off مدل شده‌اند. تمامی پارامترهای این کنترل‌کننده‌ها در پنل کاربری توسط کاربر قابل تنظیم است.

¹ State machin



شکل ۶۰-۲- ساختار ماژول Supervisory

ماژول عملگر پیچ

فرمان کنترلی پیچ پس از صدور از سیستم کنترل به مدل عملگر پیچ اعمال می‌شود. عملگر پیچ در شبیه‌ساز توربین به ۲ صورت مدل شده است. در حالت اول بصورت ساده یک تابع تبدیل به همراه یک تاخیر و محدودیت‌های زاویه و سرعت به عنوان مدل عملگر به کار می‌رود. ساختار این تابع تبدیل که مرتبه و پارامترهای آن توسط کاربر قابل تنظیم است در شکل ۶۱-۲ نشان داده شده است.

در حالت دوم یک مدل دقیق از درایو پیچ وبا در نظر گرفتن مشخصات عملگر از قبیل ممان اینرسی‌های پره و گیربکس، بازدهی گیربکس، نسبت‌های تبدیل گیربکس و محدودیت‌های سرعت، شتاب و گشتاور در اختیار قرار می‌گیرد. در این مدل که کنترلر درایور آن از سه حلقه موقعیت، سرعت و گشتاور برخوردار است، مقادیر کنترل‌کننده‌های هر یک از این حلقه‌ها که دارای ساختار PID می‌باشند، توسط کاربر قابل تنظیم است. همچنین در مدل مذکور، مقادیر لحظه‌ای ممان‌های هر یک از پره‌ها ناشی از باد از کد FAST، و همچنین نیروهای اصطکاکی بیرینگ پره محاسبه شده و تأثیر آن در مدل وارد می‌شود. شکل ۶۲-۲ ساختار مدل دقیق این عملگر را نشان می‌دهد.

ماژول عملگر یاو

عملگر یاو به علت دینامیک کند حرکت آن، می‌تواند تنها با یک تابع تبدیل مدل شود و نیازی به مدل کردن آن با جزئیات بیشتر ندارد. به عبارت دیگر حالت گذرای حرکت یاو در مقابل سایر دینامیک‌های سیستم توربین باد، براحتی قابل چشم‌پوشی است. به این ترتیب در شبیه‌ساز تنها یک تابع تبدیل با پارامترهای قابل تنظیم توسط کاربر به منظور مدل‌سازی یاو اختصاص داده شده است.

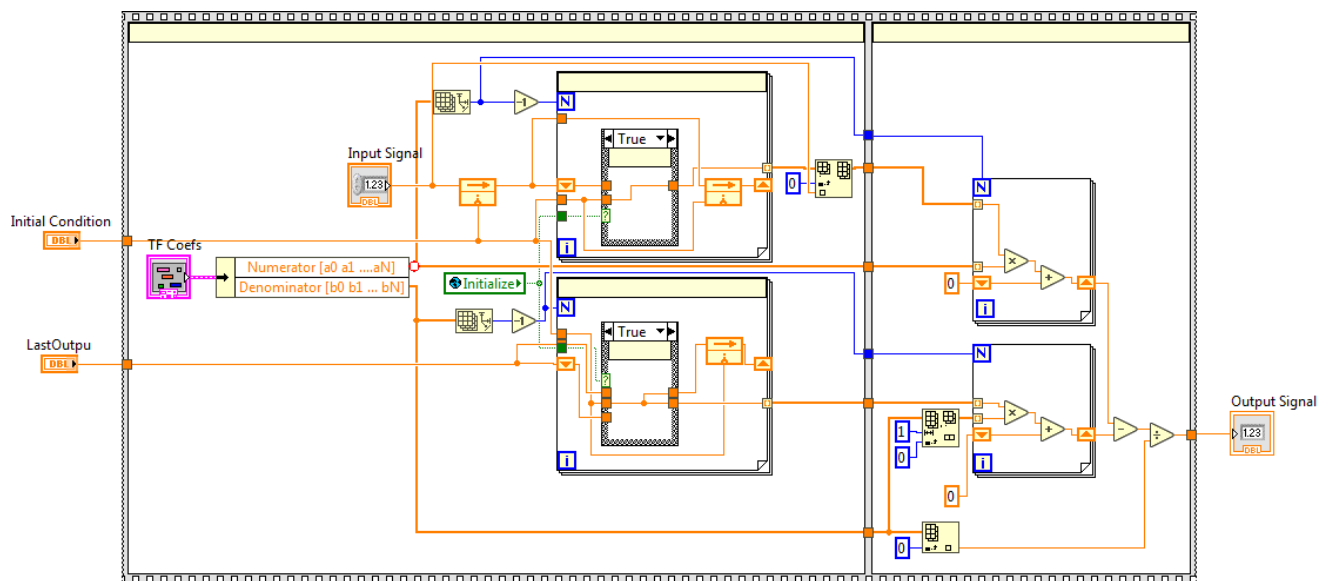
ماژول سیستم الکتریکی

سیستم الکتریکی شامل ژنراتور DFIG و مبدل آن می‌گردد. این سیستم در شبیه‌ساز به دو صورت در دسترس است: ۱- مدل ساده و ۲- مدل دقیق. در مدل ساده دینامیک گشتاور الکتریکی تنها بصورت یک تابع تبدیل مدل می‌شود. پارامترهای این تابع تبدیل قابل تنظیم توسط کاربر می‌باشد. در این مدل همچنین گشتاور الکتریکی ناشی از خطای اتصال کوتاه بصورت تقریبی مدل شده است. علاوه بر آن فرامین اتصال به شبکه و باز شدن سوئیچ قطع‌کننده مدار نیز در نظر گرفته شده است. ساختار این مدل در شکل ۶۳-۲ نشان داده شده است.

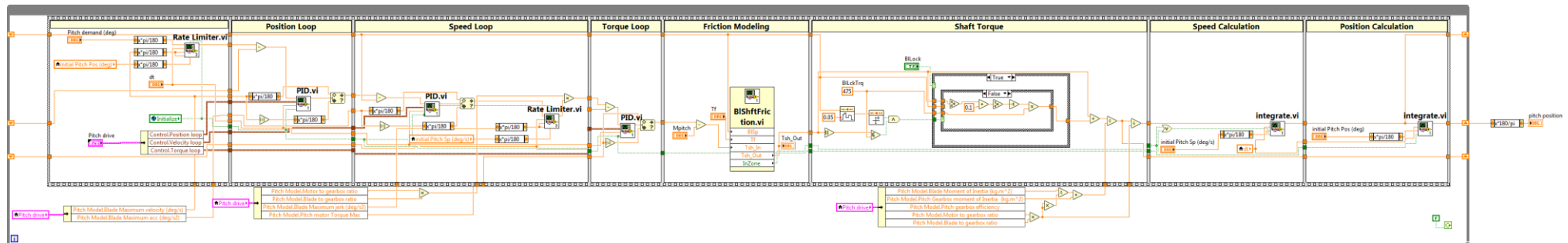
مدل دقیق سیستم الکتریکی شامل ژنراتور DFIG، مبدل پشت-به-پشت با سوئیچ سه مرحله‌ای IGBT و کنترلر درایور آن به همراه سایر ادوات قدرت نظیر قطع‌کننده‌ها و مدار crowbar، در محیط Simpower از نرم‌افزار Matlab، توسعه داده شده است و در شبیه‌ساز به صورت زمان-حقیقی بر روی یک سیستم SLRT^۱ اجرا می‌گردد. ارتباط این سیستم با مدل توربین در سیستم LabVIEW-RT توسط یک رابط UDP برقرار گردیده است و ورودی‌های مدل و خروجی‌های آن توسط این ارتباط مبادله می‌گردد. در بخش‌های گذشته چگونگی ایجاد یک ارتباط UDP در نرم‌افزار LabVIEW تشریح گردید.

در مدل دقیق سیستم الکتریکی همچنین امکان اعمال خطاهای شبکه از قبیل خطاهای افت ولتاژ، تغییر فرکانس و یا تغییر فاز، اتصال کوتاه و مدار باز نیز فراهم گردیده است.

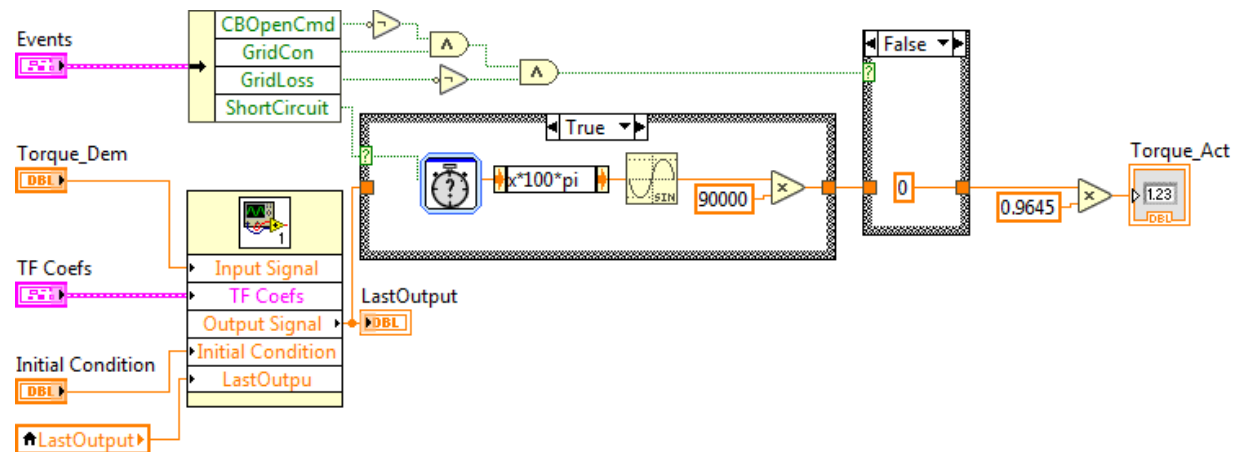
¹ Simulink Real-Time



شکل ۶۱-۲- ساختار برنامه نوشته شده برای یک تابع تبدیل



شکل ۶۲-۲- ساختار مدل دقیق عملکرد پیچ



شکل ۶۳-۲- ساختار مدل ساده سیستم الکتریک

در این فبخش ساختار سخت‌افزاری و همچنین الزامات و شیوه برپایی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی به طور کامل تشریح گردید. ساختار شبیه‌ساز از یک سیستم میزبان و ۳ سیستم هدف تشکیل می‌شود که سیستم میزبان حاوی رابط کاربری است و به نوعی اجرای سه سیستم هدف را کنترل می‌کند. سیستم‌های هدف نیز شامل سیستم LabVIEW-RT به عنوان پلتفرم مرکزی برای اجرای برنامه اصلی شبیه‌ساز و کد FAST و ارتباط با سیستم میزبان و سایر سیستم‌های هدف دیگر، سیستم SLRT برای اجرای زمان-حقیقی مدل سیستم الکتریکی شامل مدل ژنراتور DFIG و مبدل آن، و در نهایت یک PLD جهت پیاده‌سازی و اجرای سیستم کنترل می‌باشد. این ساختار بگونه‌ای طراحی شد که شبیه‌ساز قابلیت اجرا بصورت زمان-حقیقی را هم بصورت کامل و با در نظر گرفتن تمامی سیستم‌های هدف در حلقه شبیه‌سازی داشته باشد و هم بتوان هر یک از دو سیستم هدف دیگر را از حلقه اجرا خارج کرده و از ماژول جایگزین داخلی به جای آن‌ها استفاده کرد. به عبارت دیگر می‌توان بجای مدل دقیق سیستم الکتریکی در سیستم SLRT از یک مدل ساده در برنامه اصلی استفاده کرد و یا سیستم کنترل را بجای PLC از یک زیربرنامه داخلی فراخوانی کرد. همچنین شیوه پیاده‌سازی هر یک از سیستم‌های LabVIEW-RT، SLRT و PLC به تفصیل و بصورت گام به گام تشریح گردید و ساختار برنامه اصلی اجرای شبیه‌سازی معرفی شد.

۲-۴- پیاده‌سازی سیستم کنترل بر روی PLC و راه‌اندازی آن در حلقه شبیه‌ساز

یکی از مراحل مهم در ارزیابی و صحت سنجی عملکرد سیستم کنترل قبل از اعمال و راه‌اندازی در سیستم واقعی، انجام آزمایشات پردازنده-در-حلقه و در نهایت سخت‌افزار-در-حلقه می‌باشد. در این فصل به منظور افزودن قابلیت‌های فوق به شبیه‌ساز موجود، لاجیک سیستم کنترل بر روی یک PLC پیاده‌سازی و اجرا می‌شود. از آنجا که اکثر درایوهای صنعتی از ارتباط داده بصورت سریال پشتیبانی می‌کنند، ارتباط میان PLC و مدل عملگرها از نوع RS232 انتخاب گردیده است. در ادامه به معرفی PLC و نحوه پیاده‌سازی سیستم کنترل بر روی آن پرداخته می‌شود.

۱-۴-۲- PLC شرکت Beckhoff و نرم‌افزار TwinCAT

شرکت Beckhoff یک شرکت آلمانی است که در اوایل دهه ۸۰ میلادی کار خود را در زمینه اتوماسیون و کنترل سیستم‌های صنعتی آغاز کرد. این شرکت جزء پیشتازان توسعه سیستم کنترل مبتنی بر PC است و تمرکز خود را در طراحی کامپیوترهای صنعتی^۱ و PCهای جاسازی شده^۲ قرار داده است. EPCهای این شرکت مبتنی بر سیستم عامل می‌باشند و از ساختاری مائولار برخوردارند که محدوده وسیعی از کارت‌های ورودی و خروجی و مائول‌های مختلف فیلدباس را پشتیبانی می‌کنند. این شرکت همچنین مائول‌های مختلفی برای کنترل حرکت و کنترل پروسه‌های صنعتی توسعه داده و راه‌حلهایی برای پروسه‌های مختلف از جمله کنترل توربین بادی ارائه داده است.

یکی از شاخص‌های مهم در انتخاب یک PLC، محیط نرم‌افزاری برنامه نویسی و نحوه پیاده‌سازی آرایش سیستم در نرم‌افزار است. هرچه این نرم‌افزار کامل‌تر و مطابق با استانداردهای مطرح باشد، کارکردن با PLC ساده‌تر و قدرت مانور کل سیستم بیشتر خواهد بود. نرم‌افزار TwinCAT برای برنامه‌ریزی و آرایش سخت‌افزاری سیستم Beckhoff در سال ۱۹۹۶ ارائه شد و از آن زمان تا کنون، امکانات زیادی به آن افزوده شده است و می‌تواند برای برنامه‌ریزی انواع PLC و EPCها مورد استفاده قرار گیرد. این نرم‌افزار از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که مهمترین آنها محیط PLC Control برای برنامه نویسی PLC و محیط System Manager برای مشخص نمودن آرایش سخت‌افزاری سیستم و ارتباط ورودی و خروجی‌های برنامه با مائول‌های سخت‌افزاری سیستم، استفاده می‌شود. در این پروژه از نرم‌افزار TwinCAT v2.11.0 استفاده شده است.

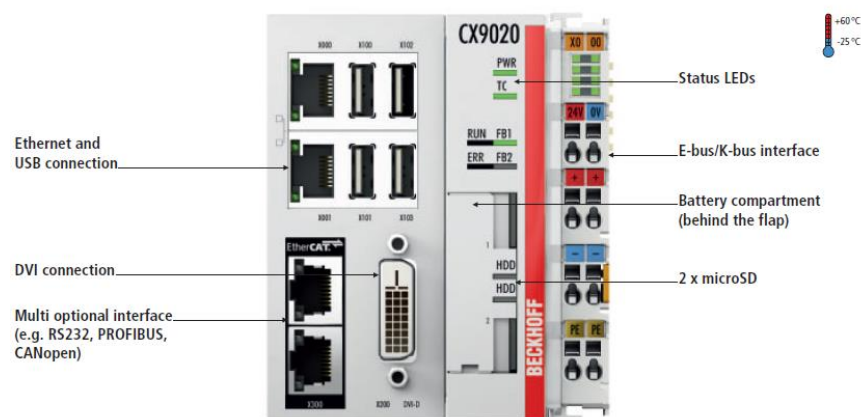
EPCهای شرکت Beckhoff با کنترلرهای سری CX مشخص می‌شود که کنترلرهایی با قدرت بالا در محصولات این شرکت می‌باشند. این سری دارای ساختار مائولار بوده و برای برنامه‌ریزی و ارتباط با دیگر کنترلرها و یا با لایه مانیتورینگ بصورت توکار^۳ دارای یک یا دو پورت اترنت می‌باشند.

تمامی CPUهای این سری قابلیت اجرای هم‌زمان بیش از یک برنامه را دارند. کنترلرهای CX سری CX90x0 دارای پردازنده ARM با فرکانس 1GHz و حافظه داخلی اصلی 512MB می‌باشند. تمامی اعضای این خانواده دارای دو پورت اترنت به همراه ۴ پورت USB هستند و بصورت انتخابی می‌توان یک پروتکل ارتباطی دیگر بصورت توکار در کنار CUP داشت. ولتاژ مورد نیاز برای راه‌اندازی این PLC، حداقل ۲۰ ولت می‌باشد.

^۱ IPC

^۲ EPC(Embedded PC)

^۳ Built-in



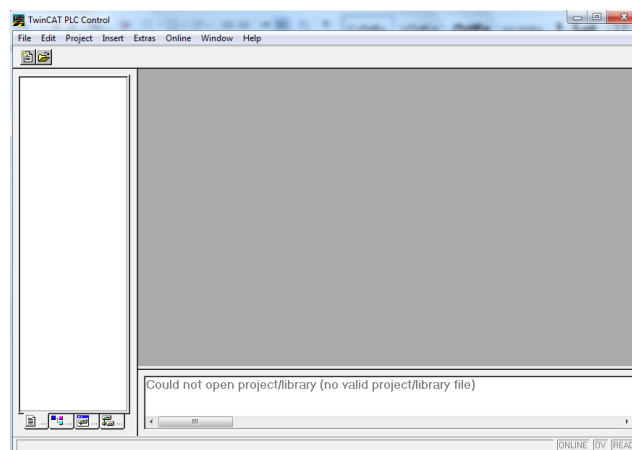
شکل ۶۴-۲- شماتیک مدل CX9020 شرکت Beckhoff

محیط برنامه نویسی PLC Control در نرم‌افزار TwinCAT

محیط PLC Control بخشی از نرم‌افزار TwinCAT است که به برنامه‌نویسی اختصاص داده شده است. در این محیط از زبان‌های پنج‌گانه برنامه نویسی PLC طبق استاندارد IEC61131-3 بهره گرفته می‌شود.

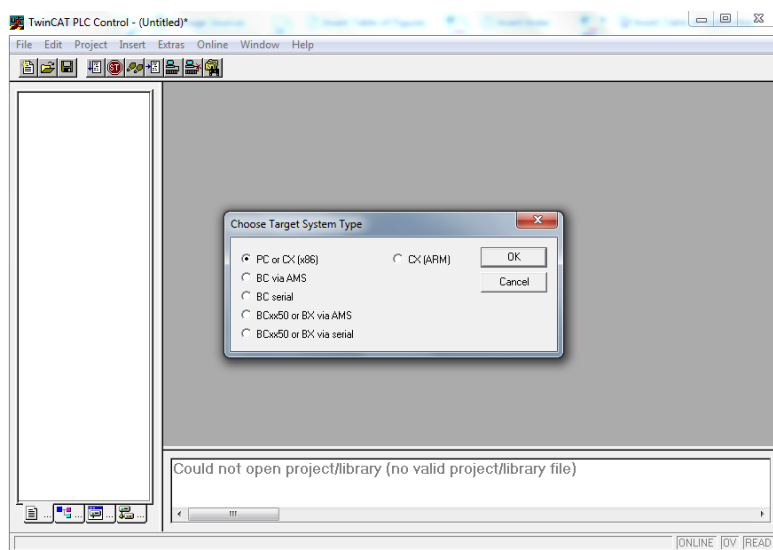
- Ladder Diagram (LD)
- Function Block Diagram (FBD)
- Sequential Function Chart (SFC)
- Structure Text (ST)
- Instruction List (LS)

نرم‌افزار TwinCAT علاوه بر این زبان‌های برنامه نویسی، از زبان برنامه نویسی Continuous Function Chart (CFC) ، که در استاندارد IEC61131-3 وجود ندارد نیز پشتیبانی می‌کند. محیط PLC Control بصورت شکل ۶۵-۲ است.



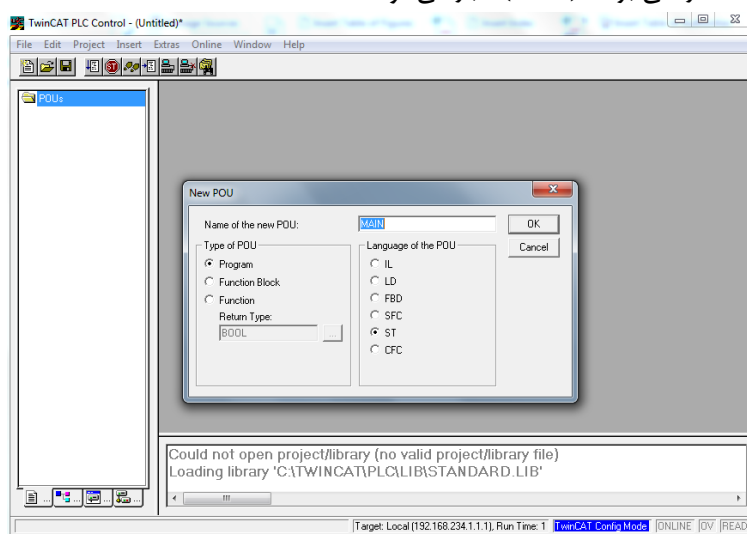
شکل ۶۵-۲- محیط نرم‌افزار TwinCAT

برای ایجاد یک پروژه جدید با کلیک بر روی آیکن New از قسمت نوار ابزار، یک پنجره به صورت شکل زیر ظاهر می‌شود.



شکل ۶۶-۲- انتخاب نوع PLC مورد استفاده

در این قسمت باید نوع PLC مورد استفاده را انتخاب نماییم. به طور کلی، در محصولات Beckhoff چهار دسته وجود دارد که این دسته بندی با توجه به ساختار سخت‌افزاری و قدرت پردازش آنها قابل تفکیک است. با توجه به اینکه PLC استفاده شده در این پروژه که از مدل CX9020 است، دارای CPU هایی از دسته پردازنده‌های ARM است بنابراین با انتخاب مورد CX(ARM)، و زدن دکمه Ok پنجره دیگری برای انتخاب زبان مورد نظر و نوع واحد سازمانی برنامه (POU)^۱ باز می‌شود.



شکل ۶۷-۲- پنجره مربوط به انتخاب زبان برنامه‌نویسی و نوع برنامه POU

در قسمت “Name of new POU” یک اسم جدید برای برنامه انتخاب می‌شود، و در قسمت “Type of POU” نوع برنامه‌ای که مد نظر است نوشته شود انتخاب می‌شود. یک POU می‌تواند به یکی از انواع ۱- برنامه ۲- بلوک تابعی^۳ و یا ۳- تابع^۴ نوشته شود. در نوع برنامه، تمامی متغیرها به صورت داخلی تعریف شده و

^۱ Program Organizational Unit

^۲ Program

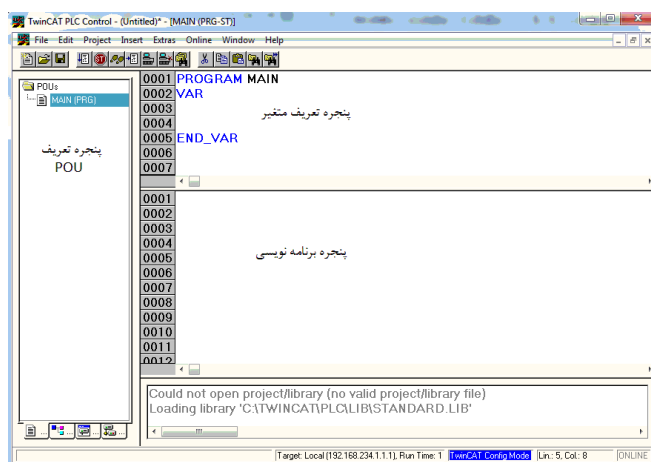
^۳ Function block

^۴ Function

مقداردهی می‌گردند و تنها یکبار در طول هر سیکل اجرا، فراخوانی و اجرا می‌گردد اما کلیه متغیرهای درونی آن قابل دسترسی توسط دیگر برنامه‌ها است. یک POU از نوع بلوک تابعی، می‌تواند ورودی و خروجی‌های فراوان داشته باشد. همچنین می‌تواند به صورت متعدد در یک سیکل فراخوانی شود اما در هر بار فراخوانی یک فضای مجزا برای ذخیره متغیرهای داخلی به آن تخصیص می‌یابد. توابع تنها یک خروجی دارند و در هر بار فراخوانی با انجام عملیات بر روی متغیرهای ورودی، متغیر خروجی را محاسبه می‌کنند. از آنجا که به هر تابع تنها یک فضا برای ذخیره متغیرهای آن تخصیص داده می‌شود بنابراین چنانچه چندین بار در یک سیکل فراخوانی شوند، مقادیر متغیرهای داخلی آن مطابق با فراخوانی قبلی باقی مانده و در محاسبات فراخوانی جدید وارد می‌شود.

در آخر، زبان برنامه‌نویسی از قسمت "Language of the POU" انتخاب می‌گردد.

بدیهی است که هر برنامه حداقل باید دارای یک POU از نوع Program (به عنوان برنامه اصلی که توسط task فراخوانی می‌شود) باشد تا از طریق آن POU های دیگر فراخوانی شوند. با زدن دکمه Ok پروژه جدید ایجاد می‌شود.



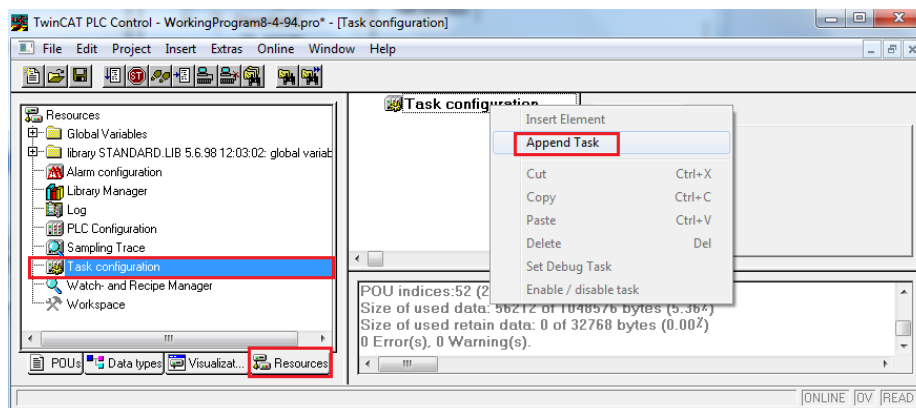
شکل ۶۸-۲- محیط PLC Control پس از ایجاد یک پروژه

همانطور که در شکل ۶۸-۲ دیده می‌شود برنامه POU با اسم MAIN و با زبان برنامه نویسی ST ایجاد شده است. هر POU از دو قسمت تشکیل شده است که یکی از آنها پنجره‌ای برای نام گذاری متغیر و دیگری پنجره برای نوشتن برنامه است.

ایجاد تکلیف^۱ در PLC

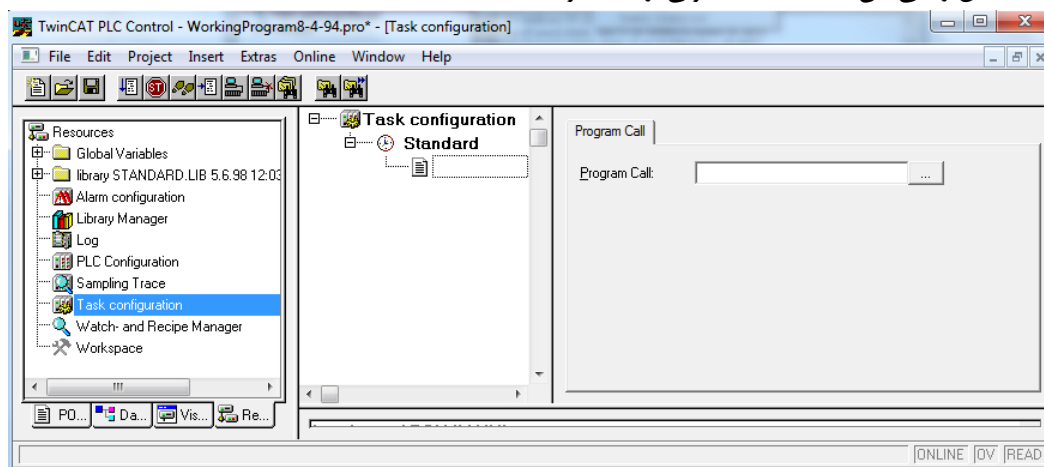
برنامه نوشته شده باید در یک تکلیف تعریف گردد تا PLC آن را در حلقه اجرای خود قرار دهد. برای تعریف یک تکلیف باید از قسمت پایین سمت چپ پنجره PLC Control بر روی آیکون Resources کلیک شود، سپس از منوی باز شده منوی Task Configuration انتخاب گردد. در سمت راست، پنجره مربوط به تنظیمات تکلیف نمایان می‌گردد. با راست کلیک بر روی Task Configuration و انتخاب Append Task، تکلیف جدید افزوده می‌گردد.

¹ Task



شکل ۶۹-۲- تعریف تکلیف برای برنامه نوشته شده

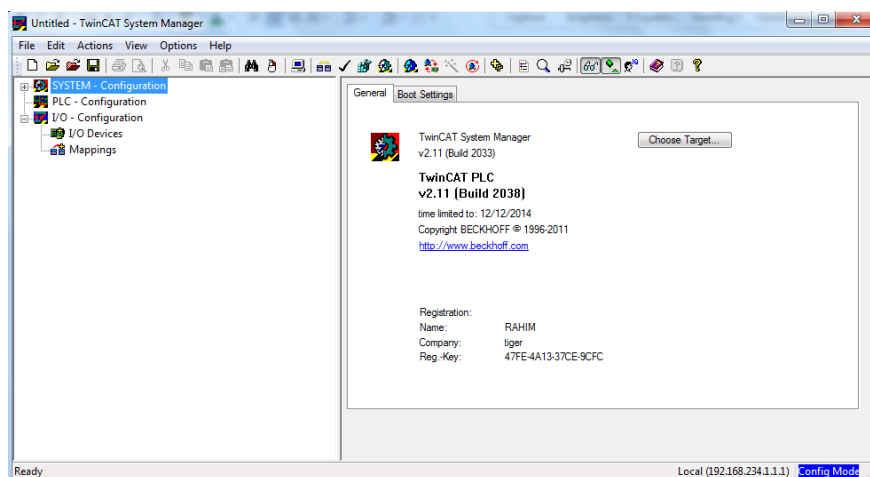
سپس یک قسمت به نام Standard به زیر مجموعه Task Configuration همانند شکل ۷۰-۲ اضافه می‌گردد. با راست کلیک بر روی آن و انتخاب گزینه Append Program Call، یک بخش نیز به زیر گروه Standard اضافه می‌گردد. اکنون می‌توان برنامه مورد نظر را در بخش Program Call از POU های اصلی انتخاب کرد. برای انتخاب سیکل کاری تکلیف مورد نظر، باید از طریق پنجره Task attributes، زمان تکلیف درون کادر properties در بخش Interval بصورت T#xms نوشته شود. با انجام این کار، سیکل کاری برنامه‌های درون تکلیف، x میلی‌ثانیه تعریف می‌گردد. لازم به ذکر است که چنانچه برنامه از چند تکلیف تشکیل شده باشد، سیکل زمانی این تکالیف باید مضربی از یکدیگر باشند.



شکل ۷۰-۲- فراخوانی برنامه نوشته شده برای تعریف تکلیف

محیط System Manager در نرم‌افزار TwinCAT

همانطور که محیط PLC Control برای تعریف بخش های منطقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، محیط System Manager نیز ساختار سخت‌افزاری و همچنین، ارتباط بین برنامه نوشته شده در محیط PLC Control و سخت‌افزار را مدیریت می‌نماید.



شکل ۷۱-۲- محیط نرم افزار System Manager

از مهمترین وظایف System Manager می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

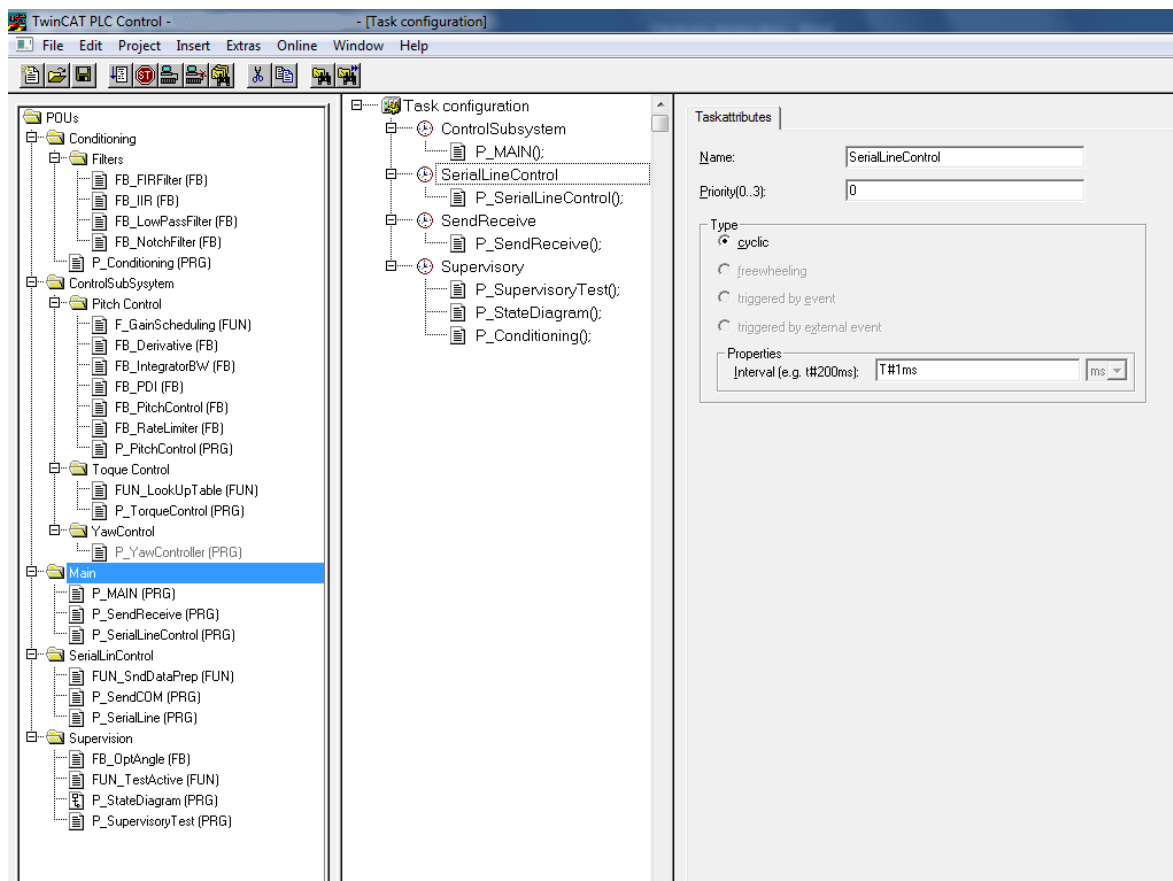
- مشاهده و تعریف سخت افزارها، چیدمان کارت‌ها، ارتباط و توپولوژی شبکه‌ها
- برقراری ارتباط بین متغیرهای برنامه با کارت‌های ورودی و خروجی
- اجرا کردن سرورهای PLC
- امکان مشاهده آنلاین مقادیر سیگنال‌های متصل به کارت‌های ورودی و خروجی
- تنظیم پارامترهای کارت‌های مختلف

برای اطلاع از چگونگی انجام موارد فوق همچون ارتباط با EPC و بارگزاری برنامه نوشته شده در محیط PLC Control و همچنین نحوه تنظیم ورودی و خروجی‌ها بر روی درگاه سریال می‌توان به [5] رجوع کرد.

۲-۴-۲- ساختار لاجیک کنترلی در PLC

در نوشتن برنامه سیستم کنترل در PLC از هر سه ساختار: برنامه، بلوک تابعی و تابع استفاده شده است که در ۴ دسته: ۱- شکل‌دهی سیگنال ۲- سوپروایزری ۳- کنترل و ۴- ارسال و دریافت داده سریال قرار می‌گیرند. در شکل ۷۲-۲ ساختار برنامه نوشته شده در PLC نشان داده شده است.

همچنین همانطور که در شکل ۷۲-۲ در قسمت سمت راست مشخص است، برنامه از ۴ تکلیف مجزا تشکیل شده است که هر یک با یک سیکل زمانی مجزا اجرا می‌گردد. کمترین سیکل زمانی برابر با ۱ میلی ثانیه به برنامه P_SerialLinecontrol که به خواندن پورت سریال و ذخیره آن در بافر داخلی می‌پردازد، اختصاص داده شده است. برنامه P_SendReceive که به بسته‌بندی و ارسال داده به بافر ارسال و دریافت داده از بافر دریافت و تفسیر آن می‌پردازد، در تکلیفی با سیکل زمانی ۳ میلی ثانیه قرار دارد. برنامه‌های سوپروایزری و شکل‌دهی سیگنال در یک تکلیف با سیکل زمانی ۱۲ میلی ثانیه و برنامه کنترل در تکلیفی با سیکل زمانی ۲۴ میلی ثانیه قرار دارند.



شکل ۷۲-۲- شماتیک ساختار برنامه سیستم کنترل در PLC

۳-۴-۲- راه‌اندازی ارتباط سریال

سیستم کنترل با دریافت داده‌های اندازه‌گیری شده از سنسورها فرمان کنترلی لازم را محاسبه و به عملگرها انتقال می‌دهد. در ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز مورد نظر، مدل عملگرها و سنسورها در کامپیوتر هدف پیاده‌سازی شده و ارتباط آن با PLC کنترل از طریق ارتباط سریال صورت می‌گیرد. PLC انتخاب شده برای سیستم کنترل دارای یک درگاه سریال که به PcComPort معروف است، می‌باشد، به این ترتیب نیازی به استفاده از کارت سریال اضافی دیگری مانند کارت EL6022 نمی‌باشد. یکی از مزایای درگاه سریال PcComPort به کارت EL6022 پهنای باند بیشتر آن است بطوریکه از طریق درگاه PcComPort می‌توان تا ۳۲ بایت داده را در هر سیکل انتقال داد. این مقدار برای کارت EL6022 حداکثر ۲۲ بایت است.

ماژول Serial Line Control

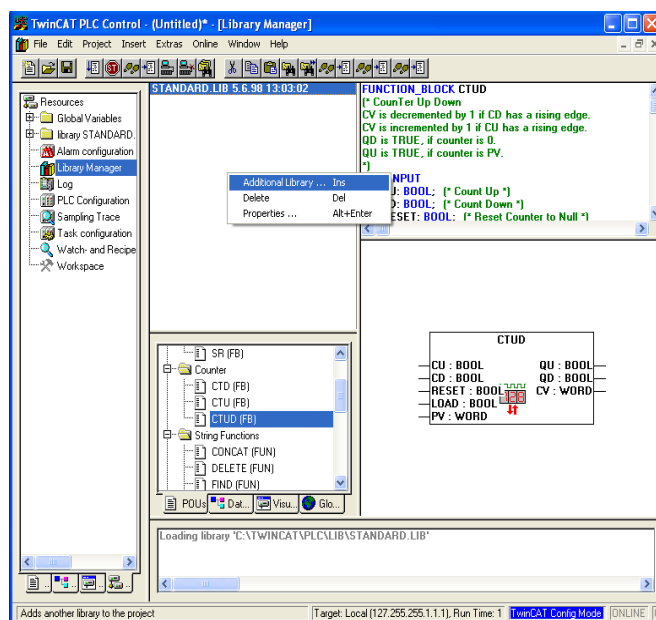
برای ارسال و دریافت داده در برنامه TwinCAT، توابعی برای حالت‌های مختلف تعریف می‌شود. ماژول Serial Line Control جهت ساختار بندی و انتقال داده بصورت سریال به کار می‌رود. این ماژول به طور مستقیم با لایه فیزیکی در ارتباط بوده و داده‌های ارسالی را از بافر ارسال برداشته و جهت ارسال بر روی لایه فیزیکی قرار می‌دهد. همچنین داده دریافتی نیز توسط این ماژول از لایه فیزیکی برداشته شده و بر روی بافر دریافت ذخیره می‌گردد. برای استفاده از این ماژول نیاز است کتابخانه COMlibV2.lib به برنامه اضافه گردد. برای این کار در برنامه TwinCat بصورت زیر عمل می‌شود.

۱. ابتدا از قسمت Resources، در پایین سمت چپ محیط TwinCAT PLC Control، بخش Library Manager

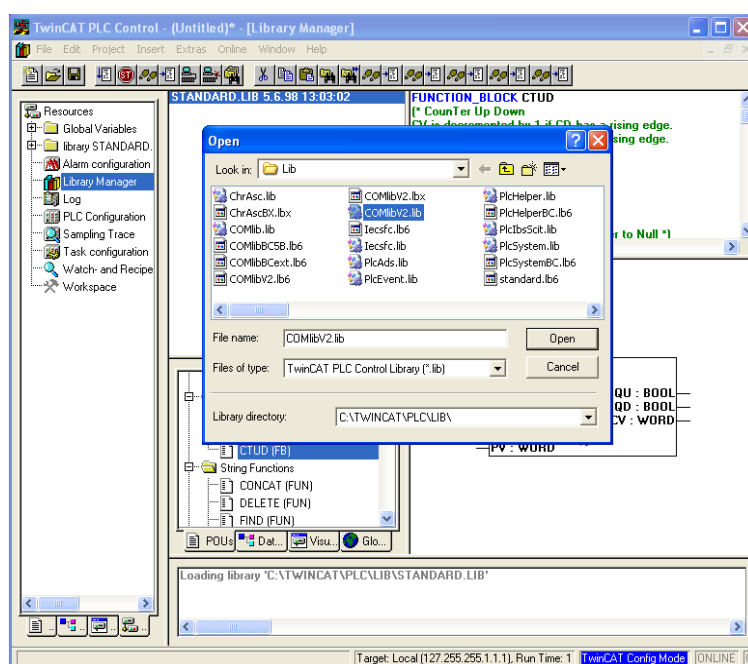
انتخاب شود.

۲. برای افزودن کتابخانه‌ها در قسمت سفید رنگ راست کلیک کرد و گزینه Add library انتخاب شود.

۳. از پنجره باز شده کتابخانه‌های مورد نیاز به برنامه اضافه گردد.



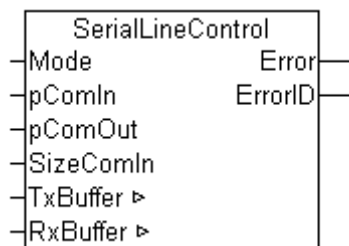
شکل ۷۳-۲- روش افزودن کتابخانه جدید



شکل ۷۴-۲- انتخاب کتابخانه مورد نیاز

ساختار ماژول SerialLineControl

شکل ۷۵-۲ شماتیک ماژول SerialLineControl را نشان می‌دهد. در ادامه به توصیف متغیرهای این ماژول پرداخته می‌شود.



شکل ۷۵-۲- بلوک ارتباط سریال در TwinCAT

Mode: بسته به درگاه سریال مورد استفاده و نوع ارتباط سریال، مدهای مختلفی قابل تعریف است. برای مثال وقتی از مازول ارتباطی EL6022 استفاده شده است، متغیر Mode به صورت زیر تعریف می‌شود.

Mode:=SERIALLINEMODE_EL6_22B,

این متغیر برای حالتی که از درگاه PcComPort استفاده می‌شود بصورت زیر تعریف می‌شود:

Mode:=SERIALLINEMODE_PC_COM_PORT

pComIn: یک متغیر از نوع اشاره‌گر است و حاوی آدرس متغیری است که برای دریافت داده از سخت افزار استفاده شده برای ارسال و دریافت که در ورودی MODE مشخص گردیده است، تعریف شده است. آدرس این متغیر به وسیله تابع ADR() به ورودی pComIn داده می‌شود. برای مثال وقتی از کارت EL6022 استفاده می‌شود، ابتدا فرض می‌گردد متغیری به اسم InData برای دریافت داده در نظر گرفته شده است. ابتدا نوع InData برای این مازول بصورت زیر تعریف می‌شود.

```
VAR_GLOBAL
InData : EL6inData22b;
END_VAR
```

pComIn در تابع SerialLineControl برای این متغیر به صورت زیر تعریف می‌شود.

pComIn:=ADR(InData);

pComOut: این متغیر یک متغیر خروجی از نوع اشاره‌گر است و حاوی آدرس متغیری است که جهت ارسال داده تعریف می‌شود. برای ارسال داده به واسط سخت افزار سریال، متغیر تعریف شده باید از نوع داده سخت افزار سریال مورد استفاده باشد. برای مثال وقتی از مازول ارتباطی EL6022 استفاده می‌کنیم، اگر متغیر ما به اسم OutData باشد، ابتدا نوع OutData برای این مازول بصورت زیر تعریف می‌شود.

```
VAR_GLOBAL
OutData : EL6outData22b;
END_VAR
```

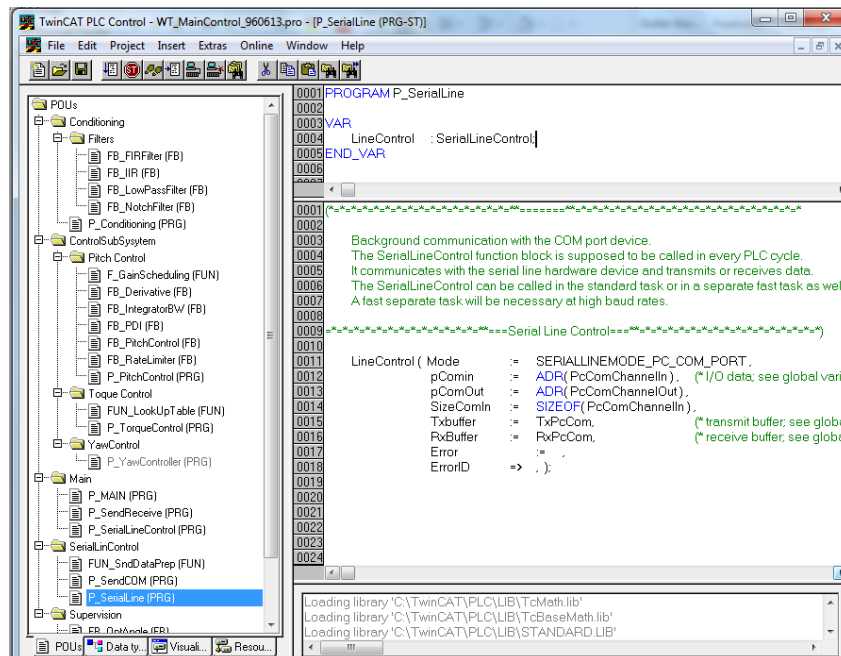
pComOut در تابع SerialLineControl به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

pComOut:=ADR(OutData);

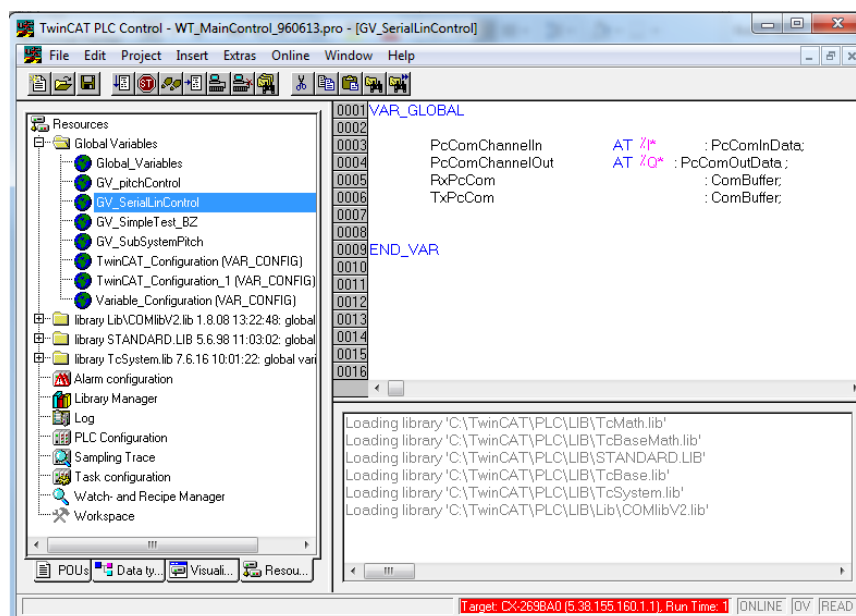
SizeComIn: سایز دریافت ورودی با توجه به سخت‌افزار مورد استفاده تعیین می‌گردد. با استفاده از تابع (SIZEOF) متغیری که برای ورودی سخت افزار سریال تعیین شده است، مشخص می‌گردد. برای مثال، متغیر ورودی pComIn وقتی از مازول EL6022 استفاده می‌شود، از نوع EL6inData22b استفاده گردید که شامل ۲۲ بایت داده است و در تنظیم این ورودی در Configuration System می‌توان از ۱ بایت تا ۲۲ بایت آن را مورد استفاده قرار داد.

RxBuffer و TxBuffer: بافر تعریف شده برای TwinCAT یک آرایه ۳۰۰ تایی است. هرگاه داده‌ای ارسال شود، به بافر ارسال TxBuffer می‌رود، و هرگاه داده‌ای دریافت شود، از بافر دریافت یا RxBuffer برداشته می‌شود. دو متغیر از نوع داده ComBuffer تعریف می‌گردد، یکی برای TxBuffer و دیگری برای RxBuffer. در ادامه نحوه استفاده این دو متغیر در توابع ارسال و دریافت نشان داده خواهد شد.

ErrorID و Error: هرگاه در ارسال و دریافت داده خطایی رخ دهد این خروجی که از نوع دیجیتال است از FALSE به TRUE تغییر وضعیت می‌دهد. و نوع خطای اتفاق افتاده را در ErrorID می‌توان دید. خروجی ErrorID از نوع ComError_t است که در آن خطاهای ممکن بیان می‌شود. در شکل ۷۶-۲ تابع نوشته شده به زبان ST برای SerialLineControl جهت دریافت و ارسال داده از درگاه PcComPort آورده شده است.



شکل ۷۶-۲- برنامه نوشته شده برای ساختار بندی ماژول SerialLineControl

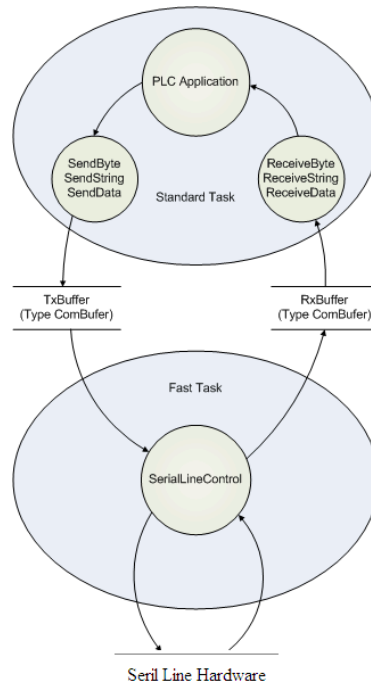


شکل ۷۷-۲- تعریف متغیرهای جهانی برای استفاده در ارتباط سریال

ارسال و دریافت داده با استفاده از ماژول SerialLineControl

برای ارسال و دریافت داده در ارتباط سریال، نیاز به سرعتی بالاتر از سرعت برنامه اصلی است. به این منظور باید برنامه ای که تابع SerialLineControl در آن نوشته شده است، با سرعت بیشتری اجرا شود. با توجه به

شکل زیر دو تکلیف برای سیستم در نظر گرفته می‌شود؛ یکی برای برنامه اصلی و دیگری برای برنامه SerialLineControl. برای اولویت بندی نیز اولویت اول به تکلیف سریع داده می‌شود.



شکل ۷۸-۲- نمایی از ارسال و دریافت داده بین برنامه کاربردی و سخت‌افزار سریال

در شکل ۷۸-۲ نحوه ایجاد تکلیف برای برنامه نشان داده شده است. زمان اجرای تکلیف سریع برابر یک میلی ثانیه و اولویت آن نیز صفر می‌باشد، یعنی بالاترین اولویت در اجرا برنامه را دارد. اما زمان اجرای برنامه اصلی را باید بیشتر از این مقدار قرار داد و اولویت آن بعد از SerialLineControl است.

توابع ارسال و دریافت داده از بافرها

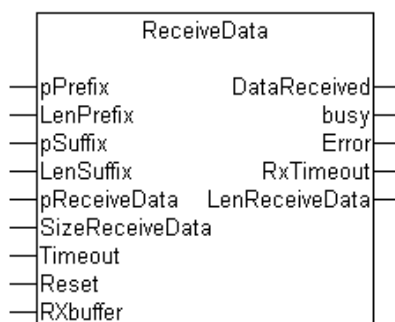
همانطور که قبلاً گفته شد، ماژول SerialLineControl داده‌های ارسالی را از بافر ارسال بر روی لایه فیزیکی قرار داده و داده‌های دریافتی را از لایه فیزیکی برداشته و در بافر دریافت ذخیره می‌کند. چنانچه در برنامه اصلی نیاز به ارسال داده‌ای باشد می‌باید ابتدا این داده توسط توابعی بر روی بافر ارسال نوشته شود و سپس توسط ماژول SerialLineControl به مقصد ارسال گردد. همین مطلب برای دریافت داده از بافر دریافت و وارد کردن آن به برنامه اصلی برقرار است، یعنی تابعی نیاز است که داده دریافتی را از بافر دریافت برداشته و به برنامه مورد نظر وارد کند. به این منظور توابع مختلفی در TwinCAT تعریف شده‌اند که به قرار زیر می‌باشند:

1. ReceiveByte
2. SendByte
3. ReceiveString
4. SendString
5. ReceiveData
6. SendData

از میان توابع فوق، توابع `ReceiveByte` و `SendByte` برای دریافت و ارسال یک بایت داده، توابع `ReceiveString` و `SendString` برای دریافت و ارسال داده‌های از نوع رشته و توابع `ReceiveData` و `SendData` برای دریافت و ارسال داده‌های با طول چندین بایت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پروژه از دو تابع آخر یعنی `ReceiveData` و `SendData` جهت دریافت همزمان داده‌های اندازه‌گیری سنسورها و ارسال فرامین کنترلی بصورت یکجا استفاده می‌شود. در ادامه ساختار این توابع شرح داده می‌شود.

ارسال و دریافت داده با استفاده از توابع `Send/Receive Data`

یکی از توابع مهم در ارتباط سریال `SendData` و `ReceiveData` است زیرا با توجه به سخت‌افزار سریال می‌توان تعداد داده‌های بیشتری ارسال و یا دریافت کرد. شماتیک بلوک تابعی `ReceiveData` در شکل زیر آورده شده است. متغیرهای این بلوک در ادامه شرح داده می‌شوند.



شکل ۷۹-۲- بلوک تابعی دریافت داده در TwinCAT

pPrefix: یک ورودی برای نشانه شروع دریافت داده است و شروع دریافت داده‌ها با دریافت این داده‌ها انجام می‌پذیرد. برای مثال اگر شروع دریافت داده ۴ تا `16#FF` باشد، برای این منظور ابتدا یک متغیر از نوع Array که تعداد آرایه‌های این متغیر چهار مورد باشد، تعریف می‌شود و مقادیر این آرایه‌ها همگی `16#FF` قرار داده می‌شود.

```

0001 PROGRAM MAIN
0002 VAR
0003     receiveCannel2 : ReceiveData;
0004     Array1          : ARRAY [0..3] OF BYTE := 255,255,255,255;
0005
0006
0007 END_VAR
0008
0009
0010
0011
0001 ReceiveCannel2(
0002
0003     pPrefix:=ADR(Array1),
0004     LenPrefix:=4,
0005 )
0006

```

شکل ۸۰-۲- مثالی برای استفاده از `LenPrefix` و `pPrefix`

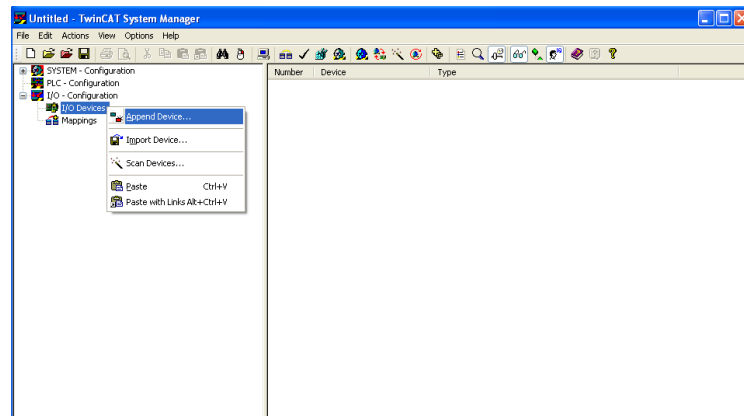
LenPrefix: طول نشانه پیشوند بسته داده را معین می‌کند. در مثال بالا طول نشانه ۴ بود که به این متغیر مقدار ۴ تخصیص داده شده است.

pSuffix: نشانه اتمام دریافت داده می‌باشد. وقتی این نشانه دریافت شود به این منظور است که بسته داده دریافتی کامل شده است.

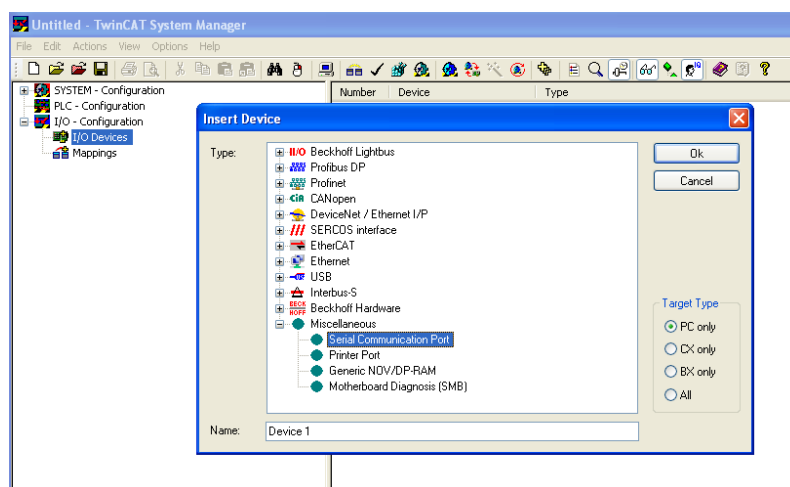
ورودی LenSuffix: تعداد نشانه‌های استفاده شده برای آخر بسته داده‌های دریافت شده، در این قسمت مشخص می‌شود.

```

0001 PROGRAM MAIN
0002 VAR
0003   receiveChannel2 : ReceiveData;
0004   Array1           : ARRAY [0..3] OF BYTE := 255,255,255,255;
0005   Array2           : ARRAY [0..3] OF BYTE := 25,25,25,25;
0006
0007 END_VAR
0008
0009
0010
0011
0012
0013
0014
0015
0016
0017
0018
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
0027
0028
0029
0030
0031
0032
0033
0034
0035
0036
0037
0038
0039
0040
0041
0042
0043
0044
0045
0046
0047
0048
0049
0050
0051
0052
0053
0054
0055
0056
0057
0058
0059
0060
0061
0062
0063
0064
0065
0066
0067
0068
0069
0070
0071
0072
0073
0074
0075
0076
0077
0078
0079
0080
0081
0082
0083
0084
0085
0086
0087
0088
0089
0090
0091
0092
0093
0094
0095
0096
0097
0098
0099
0100
0101
0102
0103
0104
0105
0106
0107
0108
0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168
0169
0170
0171
0172
0173
0174
0175
0176
0177
0178
0179
0180
0181
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0190
0191
0192
0193
0194
0195
0196
0197
0198
0199
0200
0201
0202
0203
0204
0205
0206
0207
0208
0209
0210
0211
0212
0213
0214
0215
0216
0217
0218
0219
0220
0221
0222
0223
0224
0225
0226
0227
0228
0229
0230
0231
0232
0233
0234
0235
0236
0237
0238
0239
0240
0241
0242
0243
0244
0245
0246
0247
0248
0249
0250
0251
0252
0253
0254
0255
0256
0257
0258
0259
0260
0261
0262
0263
0264
0265
0266
0267
0268
0269
0270
0271
0272
0273
0274
0275
0276
0277
0278
0279
0280
0281
0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0289
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
0297
0298
0299
0300
0301
0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
0310
0311
0312
0313
0314
0315
0316
0317
0318
0319
0320
0321
0322
0323
0324
0325
0326
0327
0328
0329
0330
0331
0332
0333
0334
0335
0336
0337
0338
0339
0340
0341
0342
0343
0344
0345
0346
0347
0348
0349
0350
0351
0352
0353
0354
0355
0356
0357
0358
0359
0360
0361
0362
0363
0364
0365
0366
0367
0368
0369
0370
0371
0372
0373
0374
0375
0376
0377
0378
0379
0380
0381
0382
0383
0384
0385
0386
0387
0388
0389
0390
0391
0392
0393
0394
0395
0396
0397
0398
0399
0400
0401
0402
0403
0404
0405
0406
0407
0408
0409
0410
0411
0412
0413
0414
0415
0416
0417
0418
0419
0420
0421
0422
0423
0424
0425
0426
0427
0428
0429
0430
0431
0432
0433
0434
0435
0436
0437
0438
0439
0440
0441
0442
0443
0444
0445
0446
0447
0448
0449
0450
0451
0452
0453
0454
0455
0456
0457
0458
0459
0460
0461
0462
0463
0464
0465
0466
0467
0468
0469
0470
0471
0472
0473
0474
0475
0476
0477
0478
0479
0480
0481
0482
0483
0484
0485
0486
0487
0488
0489
0490
0491
0492
0493
0494
0495
0496
0497
0498
0499
0500
0501
0502
0503
0504
0505
0506
0507
0508
0509
0510
0511
0512
0513
0514
0515
0516
0517
0518
0519
0520
0521
0522
0523
0524
0525
0526
0527
0528
0529
0530
0531
0532
0533
0534
0535
0536
0537
0538
0539
0540
0541
0542
0543
0544
0545
0546
0547
0548
0549
0550
0551
0552
0553
0554
0555
0556
0557
0558
0559
0560
0561
0562
0563
0564
0565
0566
0567
0568
0569
0570
0571
0572
0573
0574
0575
0576
0577
0578
0579
0580
0581
0582
0583
0584
0585
0586
0587
0588
0589
0590
0591
0592
0593
0594
0595
0596
0597
0598
0599
0600
0601
0602
0603
0604
0605
0606
0607
0608
0609
0610
0611
0612
0613
0614
0615
0616
0617
0618
0619
0620
0621
0622
0623
0624
0625
0626
0627
0628
0629
0630
0631
0632
0633
0634
0635
0636
0637
0638
0639
0640
0641
0642
0643
0644
0645
0646
0647
0648
0649
0650
0651
0652
0653
0654
0655
0656
0657
0658
0659
0660
0661
0662
0663
0664
0665
0666
0667
0668
0669
0670
0671
0672
0673
0674
0675
0676
0677
0678
0679
0680
0681
0682
0683
0684
0685
0686
0687
0688
0689
0690
0691
0692
0693
0694
0695
0696
0697
0698
0699
0700
0701
0702
0703
0704
0705
0706
0707
0708
0709
0710
0711
0712
0713
0714
0715
0716
0717
0718
0719
0720
0721
0722
0723
0724
0725
0726
0727
0728
0729
0730
0731
0732
0733
0734
0735
0736
0737
0738
0739
0740
0741
0742
0743
0744
0745
0746
0747
0748
0749
0750
0751
0752
0753
0754
0755
0756
0757
0758
0759
0760
0761
0762
0763
0764
0765
0766
0767
0768
0769
0770
0771
0772
0773
0774
0775
0776
0777
0778
0779
0780
0781
0782
0783
0784
0785
0786
0787
0788
0789
0790
0791
0792
0793
0794
0795
0796
0797
0798
0799
0800
0801
0802
0803
0804
0805
0806
0807
0808
0809
0810
0811
0812
0813
0814
0815
0816
0817
0818
0819
0820
0821
0822
0823
0824
0825
0826
0827
0828
0829
0830
0831
0832
0833
0834
0835
0836
0837
0838
0839
0840
0841
0842
0843
0844
0845
0846
0847
0848
0849
0850
0851
0852
0853
0854
0855
0856
0857
0858
0859
0860
0861
0862
0863
0864
0865
0866
0867
0868
0869
0870
0871
0872
0873
0874
0875
0876
0877
0878
0879
0880
0881
0882
0883
0884
0885
0886
0887
0888
0889
0890
0891
0892
0893
0894
0895
0896
0897
0898
0899
0900
0901
0902
0903
0904
0905
0906
0907
0908
0909
0910
0911
0912
0913
0914
0915
0916
0917
0918
0919
0920
0921
0922
0923
0924
0925
0926
0927
0928
0929
0930
0931
0932
0933
0934
0935
0936
0937
0938
0939
0940
0941
0942
0943
0944
0945
0946
0947
0948
0949
0950
0951
0952
0953
0954
0955
0956
0957
0958
0959
0960
0961
0962
0963
0964
0965
0966
0967
0968
0969
0970
0971
0972
0973
0974
0975
0976
0977
0978
0979
0980
0981
0982
0983
0984
0985
0986
0987
0988
0989
0990
0991
0992
0993
0994
0995
0996
0997
0998
0999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
24
```

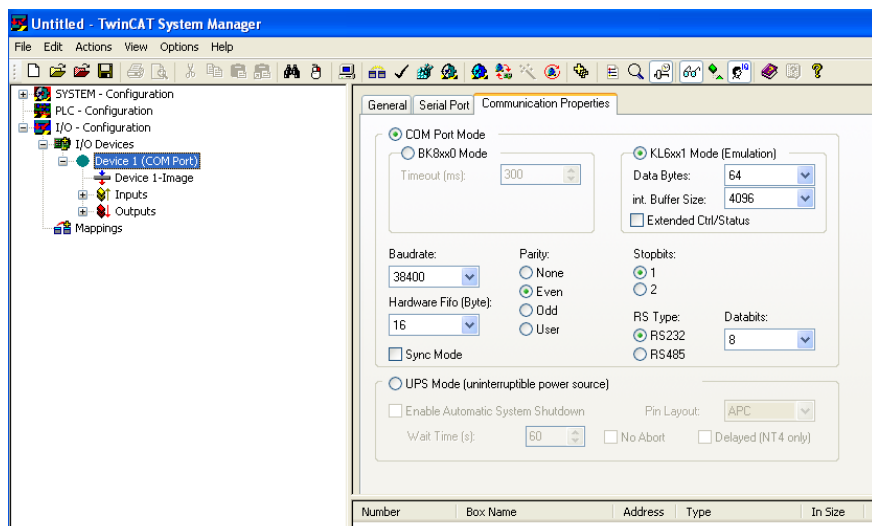


شکل ۸۲-۲ افزودن دستگاه‌های متصل به PLC به ساختار برنامه TwinCAT در قسمت مدیریت سیستم



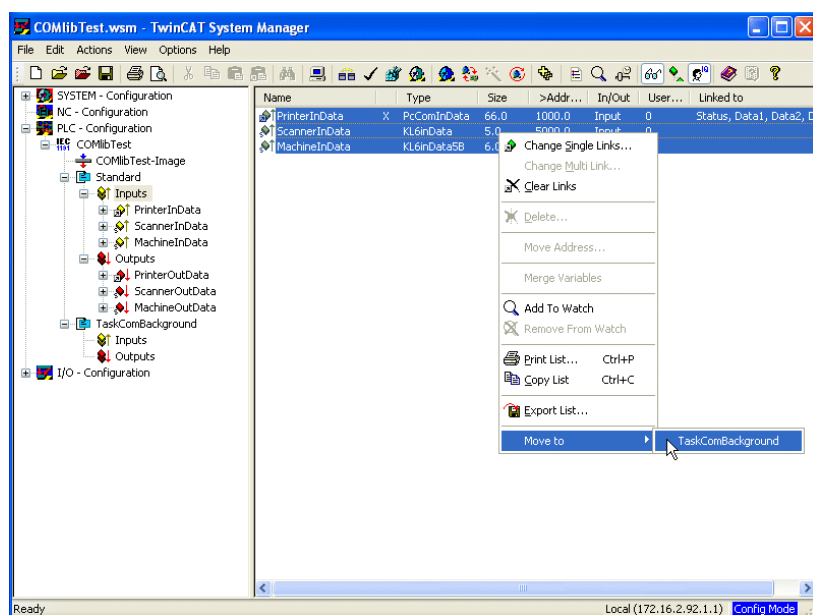
شکل ۸۳-۲ انتخاب دستگاه برای استفاده از PComPort

سپس همانطور که در شکل ۸۴-۲ مشاهده می‌شود، در بخش دستگاه‌های ورودی/خروجی یک بخش با اسامی "Device1 (Com Port)" اضافه می‌شود. با کلیک بر روی آن و در قسمت تنظیمات آن گزینه "Communication Properties" انتخاب می‌گردد. در این قسمت با انتخاب تیک KL6xx1، و تنظیمات BaudRate و Parity و... پورت آماده لینک کردن با متغیرهای تعریف شده در برنامه می‌باشد. اگر گزینه‌های Inputs و Output در Device1 (Com Port) انتخاب شوند، مشاهده می‌شود که دارای ۶۴ بیت آدرس متمایز می‌باشند.



شکل ۸۴-۲- تنظیمات PComPort در بخش مدیریت سیستم

ورودی و خروجی هایی که برای ارتباط سریال در نظر گرفته شده‌اند، در بخش Standard ظاهر می‌شود که مانند شکل زیر به قسمت SerialLinControl انتقال داده می‌شوند. اکنون ورودی و خروجی ها باید با ورودی و خروجی های Device1 (Com Port) لینک شوند. بنابراین می توان بدون از دست دادن داده از این ارتباط استفاده کرد.



شکل ۸۵-۲- انتقال ورودی و خروجی PComPort از تکلیف با سرعت پایین به تکلیف با سرعت بالا

۵-۲- نتیجه‌گیری

در این فصل به اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی توربین بادی پرداخته شد. به این منظور، می‌بایست کدهای نرم‌افزاری زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی که در فاز اول توسعه داده شد، در یک بستر زمان-حقیقی اجرا شوند. اهمیت اجرای زمان-حقیقی از آن رو است که شرایطی کاملاً مشابه با واقعیت ایجاد می‌کند که در آن می‌توان چگونگی عملکرد سیستم کنترل و ایمنی را در مواجهه با عوامل تاثیرگذار مختلفی نظیر تاخیرهای تبادل اطلاعات با سخت‌افزارهای جانبی مانند سنسورها و عملگرها و خطاهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مشاهده و ارزیابی کرد. اجرای زمان-حقیقی همچنین لازمه اجرای پروسه‌های سخت‌افزار-در-حلقه است که تقریباً در همه صنایع پیشرفته و سیستم‌های پیچیده پیش‌نیاز اصلی پروسه راه‌اندازی می‌باشد.

از میان بسترهای مختلف زمان-حقیقی موجود، بسترهای xPC-Target از نرم‌افزار Matlab و بستر LabVIEW-RT از شرکت NI که دو بستر متداول جهت استفاده در سیستم‌های تست زمان-حقیقی در کاربردهای دانشگاهی و صنعتی می‌باشند، به ترتیب جهت اجرای زمان-حقیقی مدل‌های الکتریکی و مکانیکی انتخاب شدند.

شبیه‌ساز مورد نظر از سه ماژول هدف برای پیاده‌سازی بخش‌های مختلف شبیه‌سازی تشکیل می‌شود. به این ترتیب که سیستم کنترل بر روی یک PLC و زیرسیستم الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل و زیرسیستم مکانیکی شامل کد FAST و مدل عملگرهای پیچ و یو بطور مجزا بر روی دو کامپیوتر مختلف اجرا شده و ارتباطات میان این سه ماژول بصورت ارتباط شبکه و سریال پیاده‌سازی می‌گردد. دلیل در نظر گرفتن ساختار فوق این است که اولاً بار محاسباتی میان ۳ پردازنده تقسیم شود و در نتیجه امکان اجرای زمان-حقیقی در ثابت زمانی‌های پایین‌تر که مورد نیاز مدلسازی توربین‌های بزرگتر و با انعطاف‌پذیری بالاتر می‌باشد، فراهم گردد و ثانیاً تا جای ممکن بخش‌های اصلی توربین که قابلیت تفکیک و پیاده‌سازی سخت‌افزاری دارند به طور مجزا در دسترس باشند. به عنوان مثال سیستم کنترل می‌تواند بر روی یک PLC و یا یک پردازنده پیاده شده و با رعایت یک پروتکل مشخص به راحتی در ساختار شبیه‌ساز قرار گیرد. در این ساختار همانطور که قبلاً گفته شد مسائل مرتبط با تبادل اطلاعات میان کنترلر و سایر سخت‌افزارها نیز در نظر گرفته می‌شود.

در بخش اول، ضمن بررسی الزامات سخت‌افزاری سیستم مورد نیاز جهت اجرای فرآیند کامپایل و همچنین نرم‌افزارهای مورد نیاز، چگونگی اجرای پروسه کامپایل کد FAST جهت فراخوانی و اجرا در محیط LabVIEW به تفصیل و بصورت گام به گام تشریح گردید. سپس در بخش دوم پیکربندی و آماده‌سازی کامپیوترهای هدف جهت اجرای پروسه‌های زمان-حقیقی در محیط LabVIEW-RT و SLRT در فصل دوم مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ساختار برنامه اصلی توسعه داده شده در محیط LabVIEW جهت شبیه‌سازی زمان-حقیقی توربین بادی تشریح شد. در ادامه به پیاده‌سازی سیستم کنترل بر روی PLC و اجرای آن در حلقه شبیه‌سازی پرداخته شد و نحوه پیکربندی و تنظیمات PLC های شرکت Beckhoff آلمان بررسی گردید. همچنین نحوه ایجاد یک ارتباط سریال میان PLC و کامپیوتر هدف نیز توضیح داده شد.

پیوست‌ها

پیوست الف- سخت‌افزار مورد پشتیبانی در نسخه‌های مختلف مازول زمان-حقیقی نرم‌افزار LabVIEW

جدول پ ۱- معماری پردازنده‌های مورد پشتیبانی در نسخه‌های مختلف مازول زمان-حقیقی نرم‌افزار LabVIEW

Processors supported	LabVIEW Real-Time version
Intel® Pentium® 3 Intel® Pentium® 4	7.1+
Intel® Celeron® Intel® Pentium® M AMD Athlon™ 64 AMD Athlon™ XP	8.0+
Intel® Core 2 family of processors Intel® Pentium® D Intel® Multi-core Xeon® AMD Multi-core Opteron®	8.5+
Intel® Core i3 Intel® Core i5 Intel® Core i7	2010+
Intel® Core i3 (Sandy Bridge architecture) Intel® Core i5 (Sandy Bridge architecture) Intel® Core i7 (Sandy Bridge architecture) AMD Quad-Core A6-Series APUs	2011+
Intel® Core i3 (Ivy Bridge architecture) Intel® Core i5 (Ivy Bridge architecture) Intel® Core i7 (Ivy Bridge architecture)	2012+
Intel® Core i3 (Haswell architecture) Intel® Core i5 (Haswell architecture) Intel® Core i7 (Haswell architecture)	2014+

جدول پ ۲- لیست چیپ‌ست‌های پشتیبانی شده در نسخه‌های مختلف سیستم عامل زمان-حقیقی نرم‌افزار LabVIEW

Supported Ethernet Chipsets	LabVIEW Real-Time Version
Intel® 82557 Intel® 82558 Intel® 82559 "0x1229" Intel® 82559er "0x1209" Intel® 82551 NI-PCI-8232 GPIB/Gigabit Ethernet	7.1+
Intel® 82550 Intel® 82540 Broadcom® BCM5751 "0x1677"	8.0+
Intel® 82573	8.2.1+
Intel® InBusiness® 82559 "0x103A" 82562em "0x2449" Intel® 82562et "0x1039" Intel® 82562etb "0x103B" Intel® Pro/100 VM "0x1033, 0x1034, 0x1038, 0x103C, 0x103E" Intel® Pro/100 VE "0x1032, 0x103D" Intel® 82801 CAM (ICH3) "0x1031, 0x1035, 0x1036, 0x1037" Intel® 82540EM "0x100E"	8.5+

Intel® 82541EI "0x1013" Intel® 82541EP "0x1018" Intel® 82541GI "0x1076" Intel® 82541GI-Mobile "0x1077" Intel® 82541ER "0x1078" Intel® 82573E/V "0x108B" Intel® 82573E/V w/AMT "0x108C" Intel® 82573L "0x109A"	
nVidia® nForce MCP nVidia® nForce MCP2 nVidia® nForce MCP3 nVidia® nForce 400 MCP4 nVidia® nForce 400 MCP5 nVidia® nForce 250 MCP6 nVidia® nForce MCP7 nVidia® nForce CK804 MCP8 nVidia® nForce CK804 MCP9 nVidia® nForce 430 MCP12 nVidia® nForce 430 MCP13 nVidia® nForce MCP04 nVidia® nForce MCP55 nVidia® nForce MCP61 nVidia® nForce MCP65	8.5.1+
Intel® 82571xx Intel® 82572 - Quadport Intel® 82563EB Intel® 82567 "0x10BE" and "0x10F5" VLX Emulated Ethernet PXIe-8234	8.6+
Intel® 82574L CT "0x10D3" Intel® 82546EB PCI-X Ethernet "0x1010" Intel® 82546EB PCI-X Ethernet "0x1079" Intel® 82545EM PCI-X Ethernet "0x100F" Intel® 82545GM PCI-X Ethernet "0x1026" Intel® 82540EP_LP Ethernet "0x101E" Intel® 82545EM Ethernet "0x100F" Intel® 82545GM Ethernet "0x1026" Intel® 82572EI Ethernet "0x10B9" Intel® 4-port LP(2x82571EB) Ethernet "0x10BC"	2009+
Intel® PCH-LM 82577 (Hanksville) "0x10EA" Intel® PCH-LC 82577 (Hanksville) "0x10EB" Intel® PCH-DM 82577 (Hanksville) "0x10EF" Intel® PCH-DC 82577 (Hanksville) "0x10F0" Intel® 82541PI "0x107C"	2010+
Intel® 82577LM Intel® 82579LM*	2011+
Intel® 82579LM (Lewisville) Intel® 82579V (Lewisville)	2012+
Intel® I217-LM Gigabit Clarkville Ethernet Intel® I217-V Gigabit Clarkville Ethernet Intel® I210 Gigabit Springville Ethernet	2014+

پیوست ب- برنامه‌های مورد نیاز برای کامپایل کد FAST

جدول پ ۳- لیست فایل‌های لازم جهت کامپایل FAST

```

\CompileTemp\
  VS_Correction.bat
  Compile_FASTforLabview_Optimized.bat
\NTWC Library\Source\
  DoubPrec.f90
  ModMesh.f90
  NWTc_Aero.f90
  NWTc_IO.f90
  NWTc_Library.f90
  NWTc_Num.f90
  SingPrec.f90
  SysGnuLinux.f90
  SysGnuWin.f90
  SysIFL.f90
  SysIVF.f90
  SysIVF_Labview.f90
  SysMatlab.f90
\AeroDyn\Source\
  AeroDyn.f90
  AeroMods.f90
  AeroSubs.f90
  GenSubs.f90
  SharedTypes.f90
\Wind\Source\
  CTWind.f90
  FDWind.f90
  FFWind.f90
  HAWCWind.f90
  HHWind.f90
  InflowWindMod.f90
  InflowWind_Make.txt
  SharedInflowDefs.f90
  UserWind.f90
  AeroCalc.f90
  BladedDLLInterface.f90
  FAST.f90
  FAST2ADAMS.f90
  FAST_IO.f90
  FAST_Lin.f90
  FAST_Mods.f90
  FAST_Prog.f90
  FFTMod.f90
  fftpack.f
  HydroCalc.f90
  Noise.f90
  PitchCntrl_ACH.f90
  SetVersion.f90
  UserSubs.f90
  UserVSCont_KP.f90
\Labview\Source\
  Compile_FASTforLabview.bat
  FAST_RT_DLL.f90
\LIBs\
  delayimp.lib
  ifconsol.lib
  IMAGEHLP.DLL
  libc.lib
  libcmtd.lib
  libcpmtd.lib
  libifcore.lib
  libifcoremd.dll
  libirc.lib
  libm.lib
  libmmd.dll
  msvcr90.dll
  msvcr90d.dll
  RTImage

```

```
WinSDK
x.txt
RTImage\msvcr90.dll
WinSDK\msvcr90.dll
```

جدول پ ۴- محتوای فایل VS_Correction.bat

```
SET PATH=C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 9.0\Common7\Tools;C:\Program Files
(x86)\Microsoft Visual Studio 9.0\Common7\IDE;C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual
Studio 9.0\VC\lib;%PATH%

SET LIB=C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 9.0\VC\lib\;C:\Program Files
(x86)\Microsoft SDKs\Windows\v7.1A\Lib;D:\NREL\LIBs;%LIB%
```

جدول پ ۵- محتوای فایل Compile_FASTforLabview_Optimized.bat

```
@ECHO OFF

REM The calling syntax for this script is
REM          Compile_FASTforLabview
REM
REM -----
REM          set compiler internal variables
REM -----
REM You can run this bat file from the IVF compiler's command prompt (and not
REM do anything in this section). If you choose not to run from the IVF command
REM prompt, you must call the compiler's script to set internal variables.
REM TIP: Right click on the IVF Compiler's Command Prompt shortcut, click
REM properties, and copy the target (without cmd.exe and/or its switches) here:

REM: PLEASE NOTE: newer versions of the IVF compiler are not yet supported.

IF "%INTEL_SHARED%"==" " CALL "C:\Program Files
(x86)\Intel\Compiler\Fortran\10.1.034\IA32\Bin\IFortVars.bat"

DEL FAST_RT_DLL.DLL
DEL FAST_RT_DLL.EXP
DEL FAST_RT_DLL.ILK
DEL FAST_RT_DLL.LIB
REM -----
REM ----- LOCAL VARIABLES -----
REM -----

SET ROOT_NAME=..\FAST_RT_DLL

REM DO NOT USE /threads. It causes a memory leak when the DLL runs in LabVIEW.
SET CompOpts=/Ox /Os /inline:speed /Qzero /Qsave /real_size:32 /assume:byterec1 /nothreads
/vms /check:none /keep /libs:static /MT /warn:none /nodebug
SET LinkOpts=/NODEFAULTLIB:LIBC /DLL /DELAYLOAD:imagehlp.dll delayimp.lib /INCREMENTAL
/ASSEMBLYDEBUG:DISABLE /NOLOGO /OPT:NOREF /link
REM -----
REM ----- LOCAL PATHS -----
REM -----
REM -- USERS WILL NEED TO EDIT THESE PATHS TO POINT TO FOLDERS ON THEIR LOCAL --
REM -- MACHINES. NOTE: do not use quotation marks around the path names!!!! ---
REM -----
REM NWTC_Lib_Loc is the location of the NWTC subroutine library files
REM AeroDyn_Loc is the location of the AeroDyn source files
REM Wind_Loc is the location of the AeroDyn wind inflow source files
REM FAST_Loc is the location of the FAST source files
REM -----
SET NWTC_Lib_Loc=D:\NREL\NTWC Library\Source
SET AeroDyn_Loc=D:\NREL\AeroDyn\Source
SET Wind_Loc=D:\NREL\Wind\Source
SET FAST_Loc=D:\NREL\FAST\Source
SET Labview_Loc=D:\NREL\Labview\Source
SET LIBs_Loc=D:\NREL\LIBs
REM -----
REM ----- LIST OF ALL SOURCE FILES -----
REM -----
```

```

SET NWTC_Files=
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\SingPrec.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\SysIVF_Labview.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\NWTC_IO.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\NWTC_Num.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\NWTC_Aero.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\ModMesh.f90"
SET NWTC_Files=%NWTC_Files% "%NWTC_Lib_Loc%\NWTC_Library.f90"
SET Wind_Files=
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\SharedInflowDefs.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\HHWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\FFWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\HAWCWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\FDWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\CTWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\UserWind.f90"
SET Wind_Files=%Wind_Files% "%Wind_Loc%\InflowWindMod.f90"
SET AeroDyn_Files=
SET AeroDyn_Files=%AeroDyn_Files% "%AeroDyn_Loc%\SharedTypes.f90"
SET AeroDyn_Files=%AeroDyn_Files% "%AeroDyn_Loc%\AeroMods.f90"
SET AeroDyn_Files=%AeroDyn_Files% "%AeroDyn_Loc%\GenSubs.f90"
SET AeroDyn_Files=%AeroDyn_Files% "%AeroDyn_Loc%\AeroSubs.f90"
SET AeroDyn_Files=%AeroDyn_Files% "%AeroDyn_Loc%\AeroDyn.f90"
SET FAST_Files=
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\fftpack.f"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FFTMod.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\HydroCalc.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FAST_Mods.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\Noise.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FAST_IO.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FAST.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FAST_Lin.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\FAST2ADAMS.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\PitchCntrl_ACH.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\UserSubs.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\UserVSCont_KP.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\AeroCalc.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%FAST_LOC%\SetVersion.f90"
SET FAST_Files=%FAST_Files% "%Labview_Loc%\FAST_RT_DLL.f90"
SET LIBs_Files=
:ivf
REM -----
REM ----- COMPILE WITH INTEL VISUAL FORTRAN -----
REM -----
ECHO.
ECHO Compiling FAST, AeroDyn, InflowWind, and NWTC_Library routines to create
%ROOT_NAME%.dll:
cd .\CompileTemp
DEL *.obj
DEL *.mod
ifort /dll
REM -----
REM ----- CLEAR MEMORY -----
REM ----- and delete all .mod and .obj files -----
REM -----
ECHO
SET ROOT_NAME=
SET NWTC_Files=
SET Wind_Files=
SET AeroDyn_Files=
SET FAST_Files=
SET A2AD_Files=
SET Fixed_Files=
SET NWTC_Lib_Loc=
SET Wind_Loc=
SET AeroDyn_Loc=
SET A2AD_Loc=
SET FAST_Loc=
SET Labview_Loc=
SET COMPOPTS=
SET LINKOPTS=
cd ..

```

جدول پ ۶- محتوان فایل FAST_RT_DLL.f90

```

! FAST_RT_DLL.f90
! (c) 2009, 2012 National Renewable Energy Laboratory
! Paul Fleming, National Wind Technology Center, September 2009, October 2012
! Bonnie Jonkman, National Wind Technology Center, October 2012, January 2013
!
! Modification of FAST for Labview RT
! Also includes code from FAST_Simulink Adaptation
!=====
SUBROUTINE FAST_RT_DLL_INIT (FileName_RT_Byte, FLen)

! Expose subroutine FAST_RT_DLL_INIT to users of this DLL
!
!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::FAST_RT_DLL_INIT

USE                               NWTC_Library
USE                               General, ONLY : PriFile, Cmpl4LV, SumPrint

USE                               FAST_IO_Subs ! FAST_Input(), FAST_Begin()
USE                               FASTSubs      ! FAST_Initialize()
USE                               SimCont

! This sub-routine is called by RT to initialize all internal variables

IMPLICIT                          NONE

INTEGER, PARAMETER                :: MaxFileNameLen = 100
INTEGER(B1Ki)                    :: FileName_RT_Byte(MaxFileNameLen) ! FileName_RT_Byte

CHARACTER(MaxFileNameLen) :: FileName_RT_Char ! FileName_RT_Byte converted to
ASCII characters
INTEGER                        :: FLen ! trim length of FileName_RT_Byte
INTEGER                        :: I ! temporary loop counter

!Set compiler flag for Simulink

Cmpl4LV = .TRUE.

! Initialize the NWTC Library (set Pi constants)

CALL NWTC_Init()

CALL SetVersion() ! Set the Program name
CALL DispNVD()

! Set the name of the input file

IF (FLen > MaxFileNameLen) CALL ProgAbort('File name is too long in FAST_RT_DLL_INIT.')
DO I=1,FLen
  FileName_RT_Char(I:I) = ACHAR(FileName_RT_Byte(I))
END DO
! old method:
!EQUIVALENCE(FileName_RT_Byte2,FileName_RT_Char) !Make the character filename
equivalent to incoming filename byte array

!FileName_RT_Byte2(:) = FileName_RT_Byte(:)

! Set Step and ZTime, in case we're starting over:

Step = 0
ZTime = 0.0

!Assign PriFile based on passed in string

PriFile = FileName_RT_Char(1:FLen)

```

```

! Open and read input files, initialize global parameters.

CALL FAST_Begin()

CALL FAST_Input()

! Set up initial values for all degrees of freedom.

CALL FAST_Initialize()

!-----
!-----
! Print summary information to "*.fsm"? [ see
FASTProg.f90 ]
!-----
!-----

IF ( SumPrint ) CALL PrintSum()

!-----
!-----
! Set up output file format. [ see
FAST.f90/TimeMarch() ]
!-----
!-----

CALL WrOutHdr()

!-----
!-----
! Initialize the simulation status. [ see
FAST.f90/TimeMarch() ]
!-----
!-----

CALL WrScr ( ' ' )
CALL SimStatus()

END SUBROUTINE FAST_RT_DLL_INIT

!=====
SUBROUTINE FAST_RT_DLL_SIM (BlPitchCom_RT, YawPosCom_RT, YawRateCom_RT, ElecPwr_RT,
GenTrq_RT, OutData_RT, Time_RT, HSSBrFrac_RT)

! Expose subroutine FAST_RT_DLL_SIM to users of this DLL
!
!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::FAST_RT_DLL_SIM

USE                               SimCont      !ZTime

! These are needed for FirstTime = .FALSE.
USE                               DriveTrain    ! GenTrq and now also HSSBrFrac
USE                               TurbCont      ! BlPitch
USE                               TurbConf      ! NumBl
USE                               Blades        ! TipNode
USE                               Precision     ! ReKi
USE                               Features      ! CompAero
USE                               Output        ! for WrOutHdr

USE                               FASTSubs      ! TimeMarch()
USE                               General

USE                               DOFs
USE                               SimCont
USE                               FAST_IO_SubS  ! WrOutHdr(), SimStatus(),
WrOutput()
USE                               NOISE        ! PredictNoise(), WriteAveSpecOut()

IMPLICIT                          NONE

```

```

! This sub-routine implements n-iterations of time step and returns outputs to
Labview RT

! Variables
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: GenTrq_RT      ! Mechanical
generator torque.
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: ElecPwr_RT      ! Electrical power
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: YawPosCom_RT     ! Yaw position
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: YawRateCom_RT    ! Yaw rate
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: BLPitchCom_RT    (*)
REAL(ReKi), INTENT(OUT)     :: OutData_RT      (*)
REAL(ReKi), INTENT(OUT)     :: Time_RT
REAL(ReKi), INTENT(IN)      :: HSSBrFrac_RT     ! Brake Fraction

! Local variables.

REAL(ReKi), SAVE            :: TiLstPrn = 0.0    ! The time
of the last print.

! Copy in inputs from RT
BLPitchCom = BLPitchCom_RT(1:NumBl)
YawPosCom = YawPosCom_RT
YawRateCom = YawRateCom_RT
ElecPwr = ElecPwr_RT
GenTrq = GenTrq_RT
HSSBrFrac = HSSBrFrac_RT

! Set the command pitch angles to the actual pitch angles since we have no
! built-in pitch actuator:
BLPitch = BLPitchCom
! Run simulation
!-----
! code copied from DO LOOP in TimeMarch()
!-----
! Call predictor-corrector routine:

CALL Solver()

! Make sure the rotor azimuth is not greater or equal to 360 degrees:

IF ( ( Q(DOF_GeAz,IC(1)) + Q(DOF_DrTr,IC(1)) ) >= TwoPi ) THEN
  Q(DOF_GeAz,IC(1)) = Q(DOF_GeAz,IC(1)) - TwoPi
ENDIF

! Advance time:

Step = Step + 1
ZTime = Step*DT

! Compute all of the output channels and fill in the OutData() array:

CALL CalcOuts()

! Check to see if we should output data this time step:

IF ( ZTime >= TStart ) THEN
  IF ( CompNoise ) CALL PredictNoise
  IF ( MOD( Step, DecFact ) == 0 ) CALL WrOutput
ENDIF

! Display simulation status every SttsTime-seconds:

IF ( ZTime - TiLstPrn >= SttsTime ) THEN

  TiLstPrn = ZTime

  CALL SimStatus()
ENDIF
!-----
! Copy outputs
OutData_RT(1:NumOuts) = OutData(1:NumOuts)

```

```

Time_RT = ZTime;
OutData_RT(NumOuts+1) = TMax;
OutData_RT(NumOuts+2) = Time_RT;

END SUBROUTINE FAST_RT_DLL_SIM
=====
SUBROUTINE FAST_RT_DLL_END ( )
! This subroutine cleans up the memory that was allocated during the
! simulation and closes any files that may be open.
!-----
-----

! Expose subroutine FAST_RT_DLL_END to users of this DLL
!
!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::FAST_RT_DLL_END

USE          AeroDyn,          ONLY: AD_Terminate

USE          FAST_IO_Subs, ONLY: RunTimes, WrBinOutput
USE          FASTSubs,        ONLY: FAST_Terminate
USE          Features,        ONLY: CompNoise
USE          General
USE          HydroDyn
USE          Noise,           ONLY: WriteAveSpecOut, Noise_Terminate
USE          Output

IMPLICIT NONE

INTEGER                               :: ErrStat
CHARACTER(1024)                       :: ErrMsg

IF ( CompNoise ) CALL WriteAveSpecOut() ! [ FAST.f90\TimeMarch() ]

!CALL RunTimes( )                      ! [ FAST_Prog.f90 ] !If not initialized,
these numbers don't mean anything

! Output the binary file if requested

IF (WrBinOutFile) THEN
  CALL WrBinOutput(UnOuBin, OutputFileFmtID, FileDesc, OutParam(:)%Name,
OutParam(:)%Units, TimeData, &
AllOutData(:,1:CurrOutStep), ErrStat, ErrMsg)

  IF ( ErrStat /= ErrID_None ) THEN
    CALL WrScr( 'Error '//Num2LStr(ErrStat)//' writing binary output file:
'//TRIM(ErrMsg) )
    END IF
  END IF

  CALL FAST_Terminate(ErrStat)          ! [ FAST_Prog.f90 ]
  CALL AD_Terminate(ErrStat)            ! [ FAST_Prog.f90 ]
  CALL Hydro_Terminate( )               ! [ FAST_Prog.f90 ]
  CALL Noise_Terminate( )               ! [ FAST_Prog.f90 ]

  RETURN

END SUBROUTINE FAST_RT_DLL_END
=====

```

۶-۲- مراجع

- [1] P.Fleming and B.Jonkman, “Using FAST for LabVIEW”, National Renewable Energy Laboratory, 11 Feb.2013.
- [2] <http://download.microsoft.com/download/9/a/e/9ae0f6cc-7032-408e-9ca7-989f9e4af4ec/VS2008Readme.htm>
- [3] <http://www.ni.com/product-documentation/8239/en/>
- [4] <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/>
- [5] B.McClure ,“TwinCAT 2 - BECKHOFF New Automation Technology”
<https://www.beckhoff.com/english.asp?download/tc2-download.htm>, 8 November 2013

فصل سوم: طراحی رابط گرافیکی

۳- طراحی رابط گرافیکی

۳-۱- مقدمه

در فاز اول پروژه "توسعه شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی" با بررسی بسترهای مختلف نرم‌افزاری برای توسعه کدهای مورد استفاده در شبیه‌ساز، نرم‌افزار LabVIEW به عنوان بستر اصلی نرم‌افزاری شبیه‌ساز انتخاب گردید و از کد FAST جهت مدلسازی مکانیکی و آیرودینامیکی توربین بادی استفاده شد. همچنین سایر زیرسیستم‌های توربین بادی نظیر زیرسیستم کنترل و سوپروایزری، مدل عملگرهای پیچ و یاو، زیر سیستم اندازه‌گیری و شکل‌دهی سیگنال و یک مدل ساده از زیرسیستم الکتریکی در بستر LabVIEW توسعه داده شد. علاوه بر آن یک مدل دقیق نیز از ژنراتور DFIG و مبدل آن که قبلاً در محیط SimPower از نرم‌افزار Matlab توسعه داده شده بود جهت استفاده در شبیه‌ساز آماده گردید.

در فاز دوم به اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی توربین بادی پرداخته شد. به این منظور، کدهای نرم‌افزاری زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی که در فاز اول توسعه داده شده بود، در یک بستر زمان-حقیقی در نرم‌افزار LabVIEW قرار گرفت. شبیه‌ساز از سه سیستم هدف برای پیاده‌سازی بخش‌های مختلف شبیه‌سازی تشکیل شده است. به این ترتیب که سیستم کنترل بر روی یک PLC و زیرسیستم الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل بر روی بستر زمان-حقیقی SLRT از نرم‌افزار Matlab و زیرسیستم مکانیکی شامل کد FAST و مدل عملگرهای پیچ و یاو بر روی بستر LabVIEW-RT اجرا شد و ارتباطات میان این سه ماژول بصورت ارتباط شبکه و سریال پیاده‌سازی گردید.

فاز سوم پروژه، به طراحی یک رابط کاربری جامع برای شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی می‌پردازد. این رابط کاربری به طور کلی ۳ وظیفه اصلی را بر عهده دارد: ۱- گرفتن اطلاعات مورد نیاز برای تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی از کاربر، ۲- نمایش لحظه‌ای نتایج شبیه‌سازی بر روی پنل کاربری و ۳- فراهم کردن امکاناتی برای تحلیل و پردازش آسان نتایج. مورد اول شامل طراحی صفحاتی برای وارد کردن مشخصات مکانیکی توربین و بارگذاری مدل‌های مکانیکی پره، برج و فونداسیون و همچنین مدل آیرودینامیکی توربین در قالب فایل‌های متن به فرمت مورد استفاده در کد FAST است. در این مورد همچنین ساختار کنترلی مورد نظر کاربر به همراه مشخصات سنسورها و عملگرها تعیین می‌شود. در مورد دوم، صفحه‌هایی برای نمایش داده‌های مرسوم خروجی شبیه‌سازی مانند گشتاور و توان الکتریکی تولیدی، سرعت چرخش، زاویه پره‌ها و اندازه باد به فرمت‌های مختلف از قبیل رسم نمودار و گیج‌های گوناگون طراحی می‌شود. مورد سوم نیز به مواردی نظیر امکان ذخیره نتایج، رسم نمودارهای مختلف، مقایسه سیگنال‌ها و فراهم کردن ابزارهای تحلیلی مانند میانگین، واریانس و FFT می‌پردازد.

به این منظور در بخش اول از این فصل به تشریح نحوه راه‌اندازی، بارگذاری یک پروژه، اجرای شبیه‌سازی، ذخیره و مشاهده و تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. در بخش دوم، سایر صفحات موجود جهت تعریف یک توربین بادی و زیرسیستم‌های آن شامل زیرسیستم‌های کنترل و سوپروایزری، سنسورها و عملگرها، بخش شکل‌دهی سیگنال، زیرسیستم الکتریکی و بخش تعریف رخدادهای خطا، معرفی می‌گردد. در نهایت به جمع‌بندی مطالب فصل پرداخته می‌شود.

۲-۳- راه‌اندازی برنامه شبیه‌ساز

نرم‌افزارهای کاربردی بطور کلی از دو لایه تشکیل می‌شوند. یک لایه درونی که حاوی هسته اصلی و کدهای اجرایی برنامه است و لایه بیرونی که در ارتباط با کاربر است و دسترسی کاربر را به لایه زیرین تسهیل می‌کند. به عبارت دیگر لایه بیرونی محیطی را فراهم می‌کند که کاربر از طریق آن می‌تواند بدون نیاز به دانستن جزئیات دقیق برنامه اصلی، به کار با آن و بهره‌گیری از امکانات نرم‌افزار بپردازد. به این لایه بیرونی در اصطلاح واسط کاربری یا UI^۱ گویند و از آنجا که عموماً حاوی المان‌های گرافیکی به صورت یک پنل مجازی است به آن واسط کاربری گرافیکی یا GUI^۲ اطلاق می‌شود.

۱-۲-۳- راه‌اندازی و اجرای شبیه‌ساز

برای اجرای برنامه شبیه‌ساز زمان-حقیقی باید فایل Moderator.vi در پوشه اصلی اجرا گردد. این فایل با فراخوانی کلیه زیربرنامه‌های لازم و ارتباط با برنامه اصلی، Main.vi، به اجرای شبیه‌سازی و ذخیره‌سازی و نمایش نتایج می‌پردازد. بنابراین در پوشه اصلی علاوه بر فایل Moderator.vi می‌باید تمامی توابع و ماژول‌های نوشته شده در قالب زیربرنامه^۳ و متغیرهای کنترلی و متغیرهای شبکه تعریف شده در قالب فایل‌های ctrl و کتابخانه‌های lvlib قرار داده شوند. در جدول ۱-۳ فهرستی از کلیه فایل‌های مورد نیاز آورده شده است.

جدول ۱-۳- فهرست کلیه فایل‌های توسعه داده شده برای شبیه‌ساز

شماره	عنوان فایل	شرح عملکرد
1	Moderator.vi	رابط کاربری
2	Main_N.vi	شبیه‌سازی توربین بادی در مد نرمال
3	Main_RT.vi	شبیه‌سازی توربین بادی در مد زمان-حقیقی
4	VarsLib.lvlib	کتابخانه حاوی متغیرهای شبکه
5	FAST_RT_DLL.dll	کد اصلی FAST
6	xPCFramework.dll	کد ارتباط با بستر SLRT
7	AverageFilter.vi	فیلتر میانگین
8	Blade Pitch Drive1.vi	درایو موتور پیچ
9	Blade Pitch Drive2.vi	درایو موتور پیچ
10	Blade Pitch Drive3.vi	درایو موتور پیچ
11	BlShftFriction.vi	مدل اصطکاک پره
12	Conditioning.vi	ماژول شکل‌دهی سیگنال
13	Control System.vi	ماژول سیستم کنترل (پیچ، یاو و گشتاور)
14	CTF2DTF.vi	مبدل تابع تبدیل زمان پیوسته به گسسته
15	DataScaler.vi	مقیاس‌دهی به داده
16	DataDescaler.vi	مقیاس‌دهی معکوس به داده
17	Derivative.vi	مشتق‌گیر

¹ User Interface

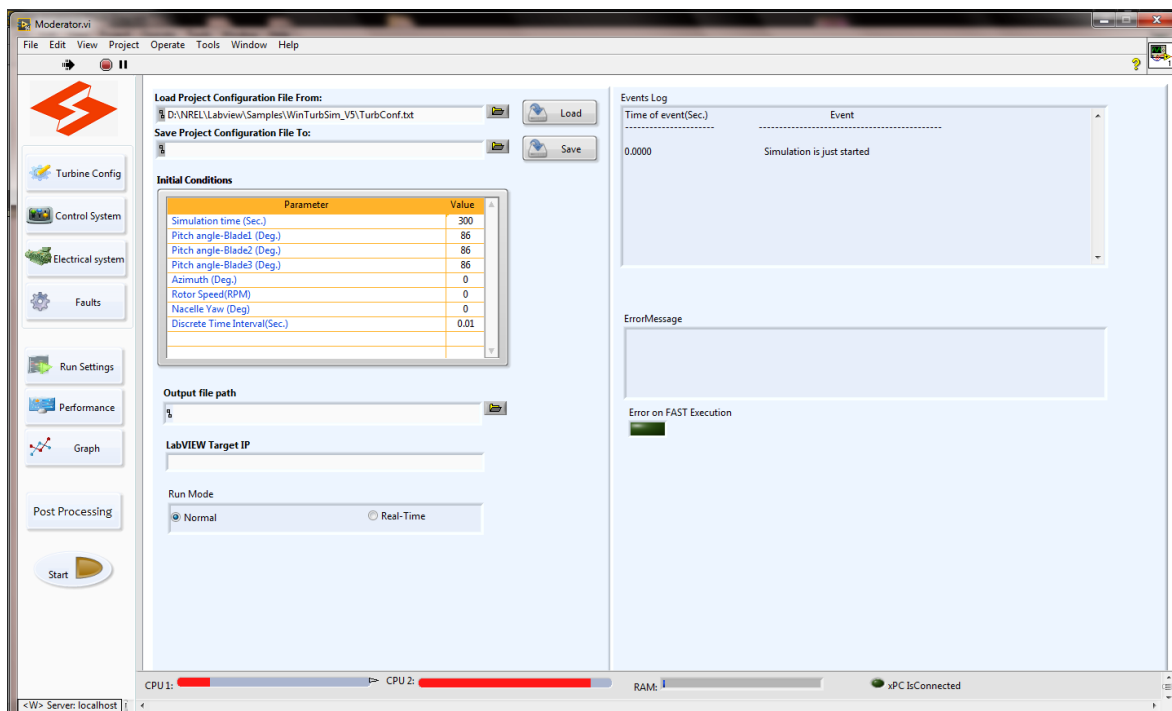
² Graphical User Interface

³22 SubVI

18	DFIG Model.vi	مدل ساده ژنراتور DFIG
19	DLPFilterPreparation.vi	تبدیل ضرایب فیلتر آنالوگ به دیجیتال
20	FFT.vi	تبدیل FFT
21	Global Vars.vi	متغیرهای جهانی
22	Initialization.vi	ماژول مقداردهی اولیه
23	Integrate.vi	انتگرال گیر
24	LoadFilesToTarget.vi	بارگذاری فایل بر روی کامپیوتر هدف
25	LookUp Table.vi	جدول جستجو
26	LowPassFilter.vi	فیلتر پایین‌گذر
27	Main Control System.vi	سیستم کنترل اصلی
28	Measurement.vi	ماژول اندازه‌گیری
29	Mechanical Brake.vi	مدل ترمز مکانیکی
30	Normal Distribution.vi	تولید یک توزیع نرمال
31	Notch.vi	فیلتر ناچ
32	OfflinePlotter.vi	پردازش نتایج
33	OpenFileConvertToStringarray.v	بازکردن و خواندن فایل بصورت رشته
34	PID.vi	کنترلر PID
35	Pitch Cintrol.vi	ماژول کنترل پیچ
36	Pitch Subsystem.vi	زیرسیستم پیچ
37	Quantization.vi	کوانتیزه کردن
38	Rate Limiter.vi	محدودکننده نرخ
39	ReadOutListFromSFT.vi	خواندن اسامی خروجی‌های FAST
40	RemoveCharactorFromStringArr	حذف یک کاراکتر از آرایه رشته‌ای
41	RemoveEmptyLineFromArray.vi	حذف المانهای خالی از آرایه
42	RT Call FAST Sim.vi	ماژول اجرای کد FAST
43	RT Close FAST.vi	ماژول بستن کد FAST
44	RT init FAST.vi	ماژول مقداردهی اولیه به کد FAST
45	SearchForCommandInStringArra	جستجوی یک عبارت در یک آرایه و انتخاب متن
46	Sensor Model.vi	مدل سنسور
47	SerialReceive.vi	ماژول دریافت سریال
48	SerialSend.vi	ماژول ارسال سریال
49	SubVi Caller.vi	ماژول صدا زدن و اجرای یک SubVI
50	Supervisory Caller.vi	ماژول سوپروایزری
51	Torque Controller.vi	کنترلر گشتاور
52	TransferFunction.vi	تابع تبدیل

53	UDP_Receiver.vi	ماژول دریافت UDP
54	UDP_Sender.vi	ماژول ارسال UDP
55	Yaw control.vi	کنترلر یاو
56	Yaw Subsystem.vi	زیرسیستم یاو
57	Connect_xPC.vi	اتصال به کامپیوتر هدف SLRT
58	Disconnect_xPC.vi	قطع ارتباط با کامپیوتر هدف SLRT
59	Load_xPC.vi	بارگذاری فایل dlm بر روی کامپیوتر هدف SLRT
60	Start_xPC.vi	شروع اجرای شبیه‌سازی SLRT
61	Stop_xPC.vi	توقف اجرای شبیه‌سازی SLRT
62	Filters Specifications.ctl	متغیرکنترلی معرف مشخصات فیلترها
63	GridFaultType.ctl	متغیرکنترلی معرف خطای شبکه
64	InitialConditionsType.ctl	متغیرکنترلی معرف شرایط اولیه
65	LVStringsAndValuesArrayType	متغیرکنترلی معرف ساختار ترکیبی
66	Pitch controller Parameters.ctl	متغیرکنترلی معرف پارامترهای کنترلر پیچ
67	Pitch drive control.ctl	متغیرکنترلی معرف مشخصات کنترل درایو پیچ
68	Pitch system faults.ctl	متغیرکنترلی معرف مشخصات خطای پیچ
69	Sensors Specification.ctl	متغیرکنترلی معرف مشخصات سنسورها
70	Supervisory Spec.ctl	متغیرکنترلی معرف مشخصات سوپروایزری
71	Torque table.ctl	متغیرکنترلی معرف ساختار جدول گشتاور
72	Transfer function.ctl	متغیرکنترلی معرف ساختار تابع تبدیل

پس از اجرای برنامه Moderator.vi، پنجره‌ای مطابق شکل ۱-۳ باز می‌شود. این پنجره از سه بخش تشکیل می‌گردد. یک نوار در سمت چپ پنجره، متشکل از دکمه‌هایی برای ورود به صفحه تنظیمات بخش‌های مختلف توربین بادی است. این دکمه‌ها شامل تنظیمات ساختار توربین، تنظیمات سیستم کنترل، تنظیمات سیستم الکتریکی، بخش ایجاد خطاها، تنظیمات اجرا، نمایش عملکرد، ترسیم گراف بصورت آنلاین، پردازش نتایج و در نهایت اجرا و توقف شبیه‌سازی می‌باشد. با فشردن هر یک از دکمه‌های این نوار، تنظیمات مرتبط با آن در بخش سمت راست نشان داده خواهد شد که کاربر می‌تواند موارد مورد نیاز را تنظیم و ویرایش نماید.



شکل ۱-۳- شمای کلی پنجره برنامه Moderator.vi

بخش سوم از پنجره اصلی، در قسمت پایین پنجره شامل نمایشگرهایی از وضعیت هسته‌های مختلف CPU کامپیوتر هدف است که میزان بار روی CPU را نشان می‌دهد. در این قسمت همچنین وضعیت اتصال به کامپیوتر SLRT توسط یک نشانگر مشخص می‌شود.

شبیه‌ساز توربین بادی در دو مد اجرایی قابل راه‌اندازی می‌باشد: ۱- مد اجرایی نرمال و ۲- مد اجرایی زمان-حقیقی. در مد اجرایی نرمال، شبیه‌سازی در حلقه‌های زمانی ثابت انجام نمی‌گیرد و به این ترتیب الزام زمان-حقیقی بودن اجرا برداشته می‌شود. در این مد، کامپیوترهای هدف از شبکه خارج شده و تمامی حلقه‌های شبیه‌سازی تنها در کامپیوتر میزبان اجرا می‌گردند. این مد در واقع برای ارزیابی اولیه الگوریتم‌های کنترلی و سناریوهای سوپروایزری و منطق سیستم ایمنی تحت آزمایشات مدل-در-حلقه^۱ و نرم‌افزار-در-حلقه^۲ مناسب است.

در مد اجرایی زمان-حقیقی کلیه مدل‌های نرم‌افزاری بصورت زمان-حقیقی بر روی کامپیوتر هدف LabVIEW-RT اجرا می‌شوند و می‌تواند حلقه‌های کنترل را بر روی کنترلر خارجی (PLC) و زیرسیستم الکتریکی را بر روی سیستم SLRT اجرا کرد و از داده‌های آنها بصورت زمان-حقیقی در شبیه‌سازی استفاده کرد. این مد به منظور انجام آزمایشات سخت‌افزار-در-حلقه به کار می‌رود. نوع مد اجرایی، در صفحه تنظیمات اجرا یا "Run Setting" قابل انتخاب است.

۲-۲-۳- تنظیمات اجرا

تنظیمات اجرا، شامل بارگذاری فایل ساختار بندی، ذخیره ساختار بندی در یک فایل، تنظیم شرایط اولیه شبیه‌سازی، تعیین محل ذخیره نتایج شبیه‌سازی، تعیین مد اجرا و تنظیم آدرس کامپیوتر هدف LabVIEW-RT می‌باشد. با فشردن دکمه "Run Settings" در نوار سمت چپ پنجره اصلی، صفحه مربوط به تنظیمات اجرا در سمت راست باز می‌شود. شکل ۲-۳ شمای این صفحه را نشان می‌دهد.

¹ Model-In-The-Loop

² Software-In-The-Loop

چنانچه قبلاً تنظیمات مربوط به شبیه‌سازی توربین بادی شامل تنظیمات ساختار توربین و تنظیمات سیستم کنترل و سیستم الکتریکی انجام شده و درون یک فایل ذخیره شده باشد، می‌توان بدون نیاز به تکمیل دوباره این موارد، تمام آن تنظیمات را بازنشانی کرد. به این منظور کافی است آدرس محل فایل ساختاربندی پروژه را در بخش "Load Project Configuration File From:" وارد کرد و دکمه "Load" را فشار داد. در این حالت چنانچه عملیات بارگذاری با موفقیت انجام گیرد، پیغام "Configuration file is loaded successfully" ظاهر می‌گردد. در غیر این صورت چنانچه به دلیل انتخاب فایل نامربوط و یا فایل مخدوش عملیات بارگذاری ناموفق باشد، پیغام "Configuration file can not be loaded" ظاهر می‌شود.

برای ذخیره تنظیمات شبیه‌سازی در یک فایل، باید ابتدا نام و پسوند دلخواه فایل به همراه آدرس محل ذخیره آن را در بخش "Save Project Configuration File To:" وارد کرد. پس از آن با فشردن دکمه "Save" تنظیمات پروژه، در فایل مورد نظر ذخیره می‌گردد. چنانچه عملیات ذخیره با موفقیت به انجام رسد، پیغام "Configuration file saved successfully" بر روی صفحه ظاهر می‌گردد. در غیر این صورت چنانچه آدرس وارد شده معتبر نباشد، پیغام زیر ظاهر می‌شود.

"The path entered for saving the configuration file does not exist or is empty. Please enter a valid path."

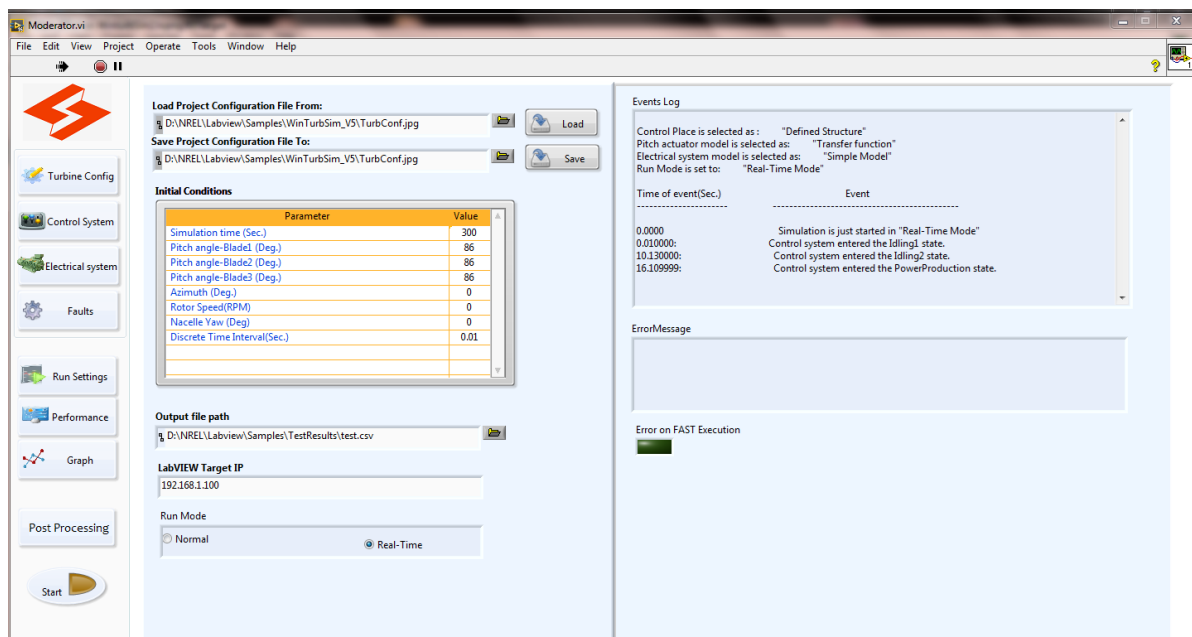
شرایط اولیه اجرا شامل زمان شبیه‌سازی، زوایای پیچ هر یک از پره‌ها، زاویه آزیموث روتور، سرعت چرخش روتور، زاویه یاو ناسل و بازه زمانی گسسته‌سازی می‌باشد. این مقادیر در جدول سمت چپ قابل تنظیم‌اند.

پس از هر بار اجرا تمامی سیگنال‌های دینامیکی تعریف شده در فایل ورودی FAST و همچنین سیگنال‌های تعریف شده در سیستم کنترل از قبیل سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و سیگنال‌های شکل‌دهی شده، در یک فایل در کامپیوتر میزبان ذخیره می‌شود. محل ذخیره این فایل باید توسط کاربر و در بخش "Output file path" مشخص گردد. فرمت فایل ذخیره نتایج می‌تواند هر یک از فایل‌های متن نظیر txt و csv باشد. اما جهت استفاده در بخش رسم نمودار و تحلیل نتایج شبیه‌ساز که بعداً توضیح داده می‌شود، بهتر است در قالب csv ذخیره گردد.

برای ارتباط با کامپیوتر هدف LabVIEW-RT جهت اجرای شبیه‌سازی زمان-حقیقی باید آدرس IP مشخص گردد. این آدرس در بخش "LabVIEW Target IP" قابل تعریف است.

در نهایت از آنجا که شبیه‌سازی می‌تواند در ۲ مد اجرای زمان-حقیقی و اجرای نرمال انجام گیرد، باید مد اجرای مورد نظر در بخش "Run Mode" از بین یکی از گزینه‌های "Normal" و "Real-Time" انتخاب گردد.

علاوه بر موارد گفته شده برای تنظیمات اجرا، در سمت راست صفحه، یک بخش با عنوان "Events Log" برای نمایش پاره‌ای از تنظیمات مهم اجرا مانند محل سیستم کنترل، نوع مدل عملگر پیچ، نوع مدل سیستم الکتریکی و مد اجرا و همچنین رخدادهای صورت گرفته در شبیه‌سازی از قبیل ورود به حالت‌های مختلف سیستم سوپروایزری و رخداد خطاهای الکتریکی و مکانیکی وجود دارد. همچنین بخشی دیگر برای نمایش خطای صورت گرفته در کد FAST نیز وجود دارد.



شکل ۲-۳- نمای صفحه “Run Settings” برای تنظیمات اجرای شبیه‌سازی

پس از انجام تنظیمات بخش‌های مختلف شبیه‌ساز، که در فصل آینده به تفصیل توضیح داده می‌شود، با زدن دکمه “Start” در نوار سمت چپ، اجرای شبیه‌سازی آغاز می‌شود و نتایج برخط آن در صفحه “Performance” و یا صفحه “Graph” قابل مشاهده است. همچنین پس از اتمام شبیه‌سازی نتایج در یک فایل با نامی که کاربر انتخاب می‌کند ذخیره می‌شود. این نتایج پس از اجرا در بخش “Post Processing” قابل مشاهده بصورت رسم نمودار است.

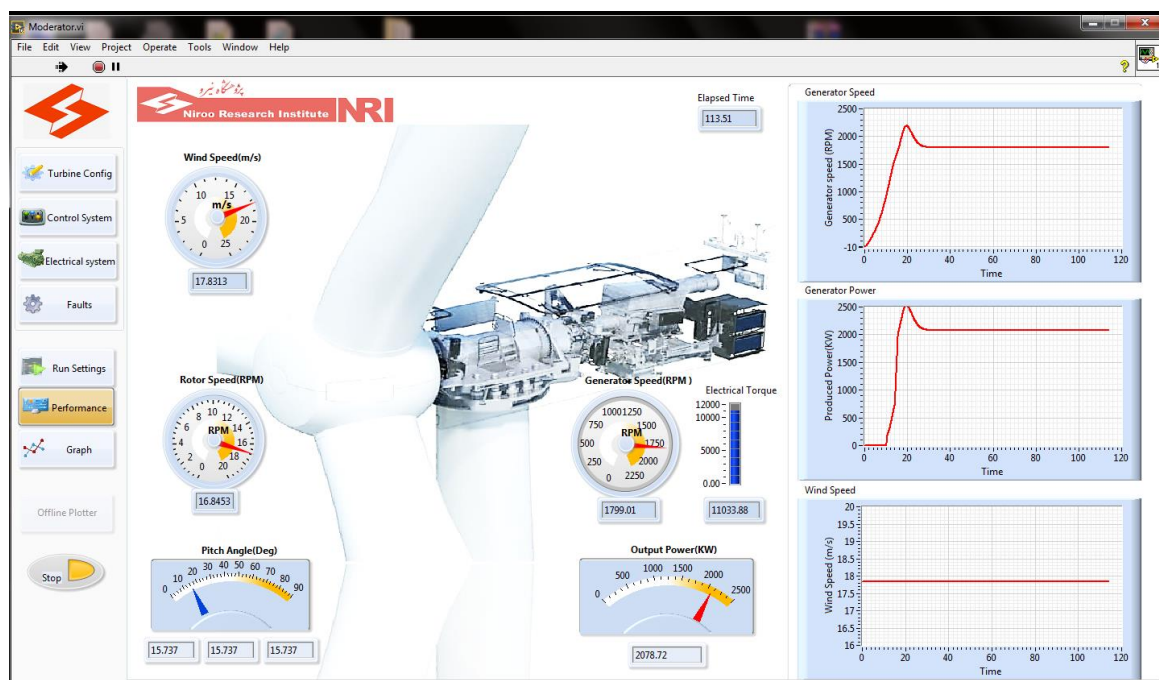
۳-۲-۳- صفحه نمایش عملکرد

شکل ۳-۳ صفحه نمایش برخط عملکرد توربین بادی را نشان می‌دهد. در این صفحه کاربر می‌تواند مقادیر لحظه‌ای متغیرهای اصلی شبیه‌سازی را شامل سرعت ژنراتور، سرعت روتور، سرعت باد، گشتاور و توان الکتریکی و همچنین زوایای پیچ پره‌ها را مشاهده نماید. علاوه بر آن نمودارهای زمانی سیگنال‌های سرعت ژنراتور، توان الکتریکی تولیدی و سرعت باد نیز به صورت لحظه‌ای رسم و به‌روز می‌گردد.

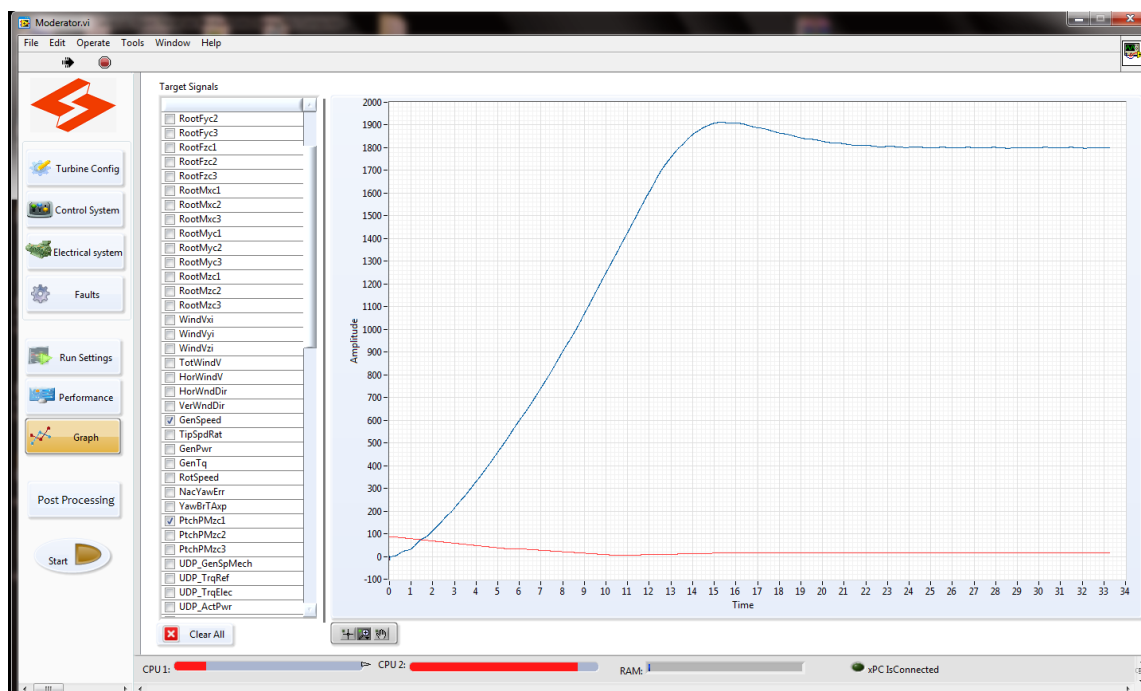
۳-۲-۴- صفحه رسم گراف بصورت برخط

از آنجا که تعداد سیگنال‌های قابل نمایش بصورت گرافیکی در صفحه “Performance” محدود است، تنها تعداد اندکی از سیگنال‌های اصلی در این صفحه نمایش داده شده است. برای نمایش سایر سیگنال‌های موجود در شبیه‌سازی اعم از سیگنال‌های دینامیکی کد FAST، سیگنال‌های سیستم الکتریکی و سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و شکل‌دهی شده، یک صفحه جداگانه طراحی شده است. برای باز کردن این صفحه باید دکمه “Graph” در نوار سمت چپ فشرده شود. در این حالت صفحه‌ای مطابق با شکل ۳-۴ باز می‌شود.

در این صفحه در سمت چپ، لیستی از کلیه سیگنال‌های تعریف شده در شبیه‌سازی قرار دارد که با کلیک بر روی هر یک از سیگنال‌ها یک علامت ✓ در سمت چپ عنوان سیگنال ظاهر شده و آن سیگنال در سمت راست از لحظه صفر رسم و بطور پیوسته به‌روز می‌گردد. در اینجا هر تعداد سیگنال، قابل انتخاب و رسم به صورت برخط در حین اجرای شبیه‌سازی می‌باشند. برای پاک کردن تمامی گراف‌ها به طور همزمان می‌توان کلید “Clear All” در پایین صفحه را فشار داد.



شکل ۳-۳- صفحه نمایش عملکرد توربین بادی

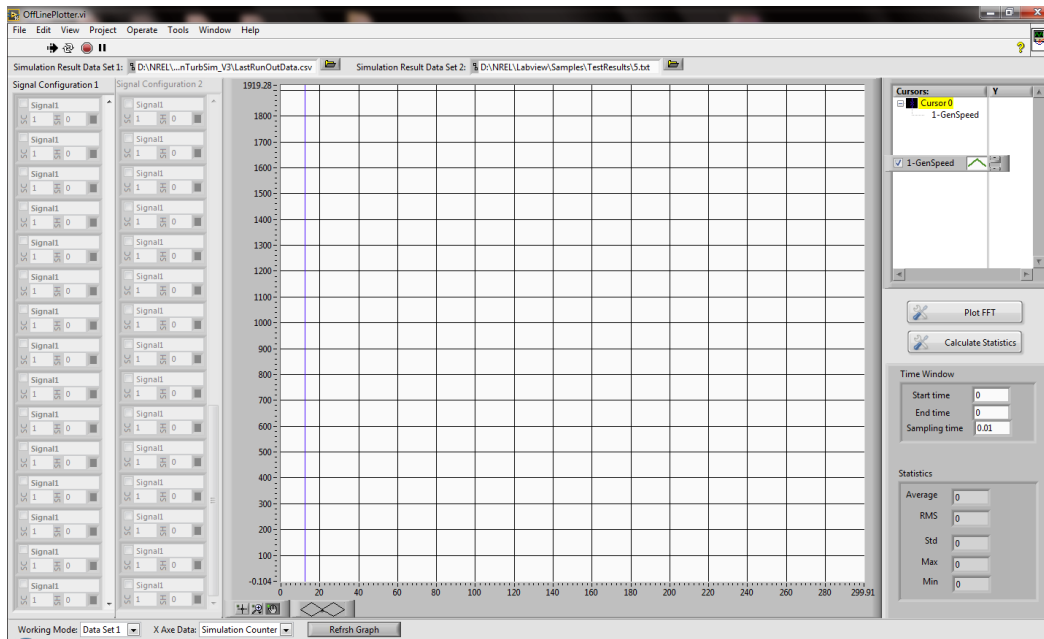


شکل ۳-۴- صفحه رسم گراف بصورت برخط

۵-۲-۳- تحلیل و پردازش نتایج پس از اتمام شبیه‌سازی

چنانچه نتایج شبیه‌سازی شامل سیگنال‌های مختلف تعریف شده در صفحات رابط کاربری، به یک فرمت متن همانند CSV ذخیره شده باشند، می‌توان پس از اتمام شبیه‌سازی این نتایج را بازخوانی و تحلیل نمود. به این منظور با زدن دکمه “Post Processing” در نوار سمت چپ، یک پنجره جدید همانند شکل ۳-۵ باز می‌شود.

این پنجره در واقع پنجره پانل پیشخوان^۱ یک زیربرنامه نوشته شده برای عملیات پردازش نتایج می‌باشد. این زیربرنامه قابلیت فراخوانی نتایج دو اجرا متفاوت و نمایش سیگنال‌ها و مقایسه این نتایج را دارد. به این ترتیب پس از اجرای زیربرنامه باید آدرس فایل ذخیره شده نتایج را در بخش “Simulation Results Data Set1:” و “Simulation Results Data Set2:” واقع در بخش بالای صفحه را وارد نمود. پس از معرفی فایل نتایج، لیست مربوط به هر مجموعه داده در سمت چپ صفحه به‌روز شده و عناوین سیگنال‌ها در لیست مربوطه ظاهر می‌گردد.

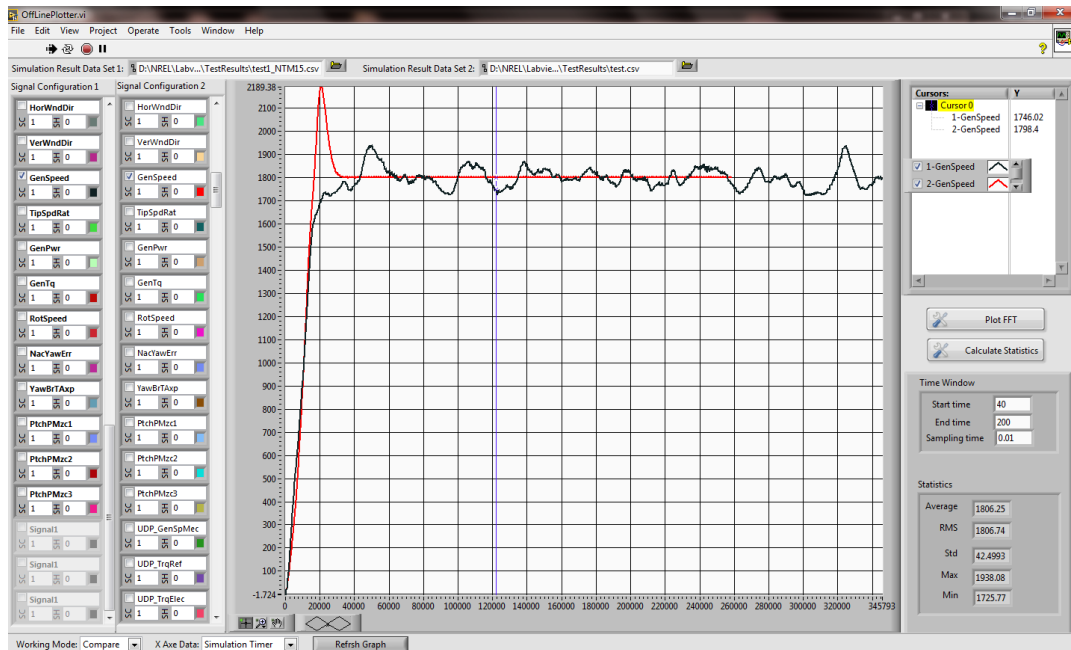


شکل ۵-۳- شمای پنجره برنامه “Post Processing”

در سمت چپ عنوان هر سیگنال یک مربع کوچک قرار دارد که با کلیک بر روی آن یک علامت ✓ بر روی آن ظاهر شده و سیگنال برای رسم انتخاب می‌شود. همچنین در پایین عنوان هر سیگنال یک مربع رنگی قرار دارد که معرف رنگ گراف سیگنال مربوطه می‌باشد. علاوه بر آن دو پارامتر SC و SH به هر سیگنال اختصاص می‌یابد که به ترتیب معرف ضریب مقیاس و شیفت زمانی سیگنال انتخابی می‌باشند. این پارامترها زمانی اهمیت می‌یابند که وضعیت یک سیگنال نسبت به سیگنال دیگر ارزیابی گردد مثلاً سرعت ژنراتور در سرعت‌های باد مختلف سنجیده شود. از آنجا که سرعت ژنراتور بالای ۱۰۰۰ است و سرعت باد کمتر از ۲۰، رسم دو نمودار در یک مقیاس مفهومی نیست. در اینجا بهتر است پارامتر SC را برای سیگنال باد در حدود ۵۰-۱۰۰ در نظر گرفت.

پس از انتخاب سیگنال‌های مورد نظر، برای رسم گراف سیگنال‌ها در نوار پایین صفحه دو پارامتر مد کاری (Working Mode) و داده محور (x-Axis Data) باید تنظیم گردد. برای پارامتر مد کاری ۳ حالت قابل انتخاب است: Data Set 1، Data Set 2 و Compare؛ که به ترتیب بیانگر رسم سیگنال‌های انتخابی مجموعه داده اول، رسم سیگنال‌های انتخابی مجموعه داده دوم و رسم سیگنال‌های انتخابی هر دو مجموعه جهت مقایسه می‌باشد. به عنوان مثال شکل ۶-۳ رسم گراف سیگنال سرعت ژنراتور را در اجرای مختلف به ازای باد ثابت و باد توربولانسی نشان می‌دهد.

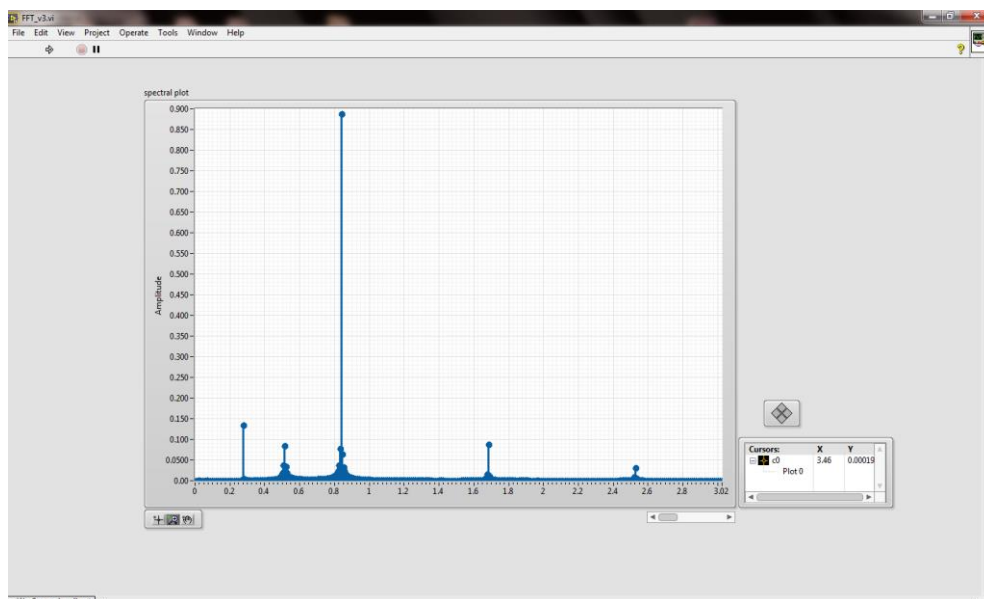
¹ Front Panel



شکل ۳-۶- رسم گراف یک سیگنال از دو اجرای مختلف

علاوه بر رسم گراف، امکانات دیگری نیز در زیربرنامه گسترش یافته است، از جمله محاسبه مقادیر آماری همچون مقدار میانگین، میانگین حداقل مربعات، واریانس و مقادیر ماکزیمم و مینیمم سیگنال در طول بازه زمانی تعریف شده. برای محاسبه این مقادیر باید پس از تعیین بازه زمانی مورد نظر، کلید “Calculate Statistics” را فشار داد. در این صورت مقادیر محاسبه شده در کادر سمت راست و پایین صفحه مشخص می‌گردند.

امکان دیگری که در زیربرنامه گنجانده شده است، امکان محاسبه و رسم تبدیل فوریه سریع (FFT) از سیگنال مورد نظر می‌باشد. به این منظور باید پس از تعیین بازه زمانی مورد نظر، کلید “Plot FFT” را فشار داد. در این صورت پنجره‌ای مطابق شکل ۳-۷ باز شده و گراف FFT سیگنال مورد نظر به ازای فرکانسهای مختلف رسم می‌گردد.



شکل ۳-۷- نمایش نمودار FFT سیگنال

در این بخش، نحوه راه‌اندازی و اجرای برنامه شبیه‌ساز تشریح گردید. شبیه‌ساز در دو مد اجرایی نرمال و زمان-حقیقی قابل اجرا است و پس از تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی و اجرای آن، نتایج بصورت برخط در صفحات "Performance" و "Gragh" قابل مشاهده است. همچنین می‌توان پس از اتمام شبیه‌سازی در بخش "Post Processing" به مشاهده سیگنال‌های مختلف و تحلیل نتایج از طریق رسم نمودار زمانی و محاسبه پارامترهای آماری و همچنین رسم نمودار FFT هر یک از سیگنال‌ها پرداخت.

۳-۳- تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی

واسط کاربری در شبیه‌ساز توربین بادی از صفحات گوناگونی تشکیل شده است که توسط آن‌ها اطلاعات مورد نیاز برای تعریف و مدل‌سازی یک توربین بادی و کلیه زیرسیستم‌های آن از قبیل زیرسیستم سوپروایزری و کنترل، زیرسیستم الکتریکی، زیرسیستم اندازه‌گیری و عملگرها از کاربر دریافت می‌شود و کاربر با تنظیم شرایط اولیه، پروفایل باد مورد نظر و سایر مشخصات شبیه‌سازی، به اجرای شبیه‌سازی می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی شامل مقادیر کلیه سیگنال‌های مکانیکی و الکتریکی (بالغ بر ۲۰۰ سیگنال) که حاصل از اجرای کد FAST و زیرسیستم الکتریکی است به صورت لحظه‌ای در اختیار کاربر قرار می‌گیرد و کاربر می‌تواند به انتخاب، هر یک از این سیگنال‌ها را به صورت رسم نمودار مشاهده نماید. در نهایت پس از اتمام اجرا، کلیه نتایج ذخیره شده و کاربر می‌تواند از طریق یک زیربرنامه، نتایج دو اجرای مختلف را فراخوانی کرده و با رسم نمودار و استخراج پارامترهای آماری نظیر میانگین، واریانس، ماکزیمم و مینیمم و همچنین انجام تبدیل FFT^۱، به تجزیه و تحلیل و مقایسه آن‌ها بپردازد.

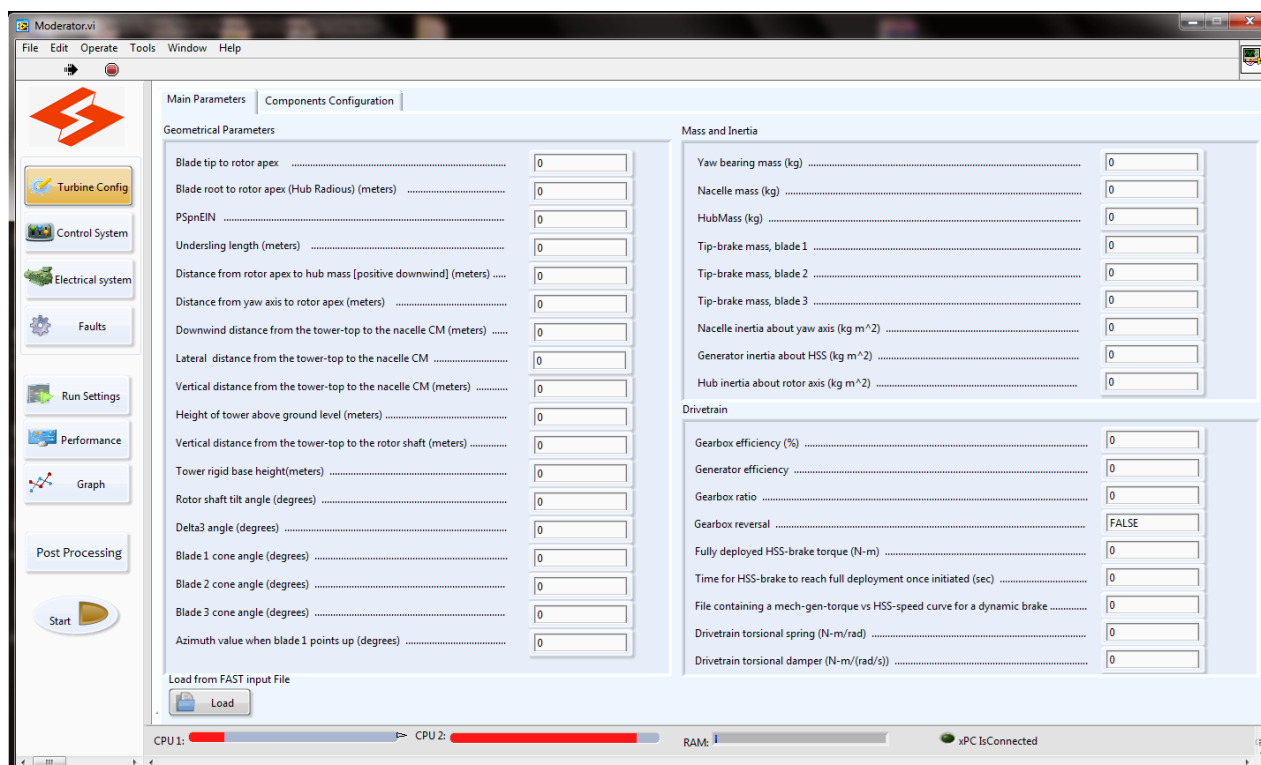
در ادامه به معرفی بخش‌های مختلف رابط کاربری شبیه‌ساز و امکانات آن پرداخته می‌شود.

۱-۳-۳- تنظیمات ساختار توربین بادی

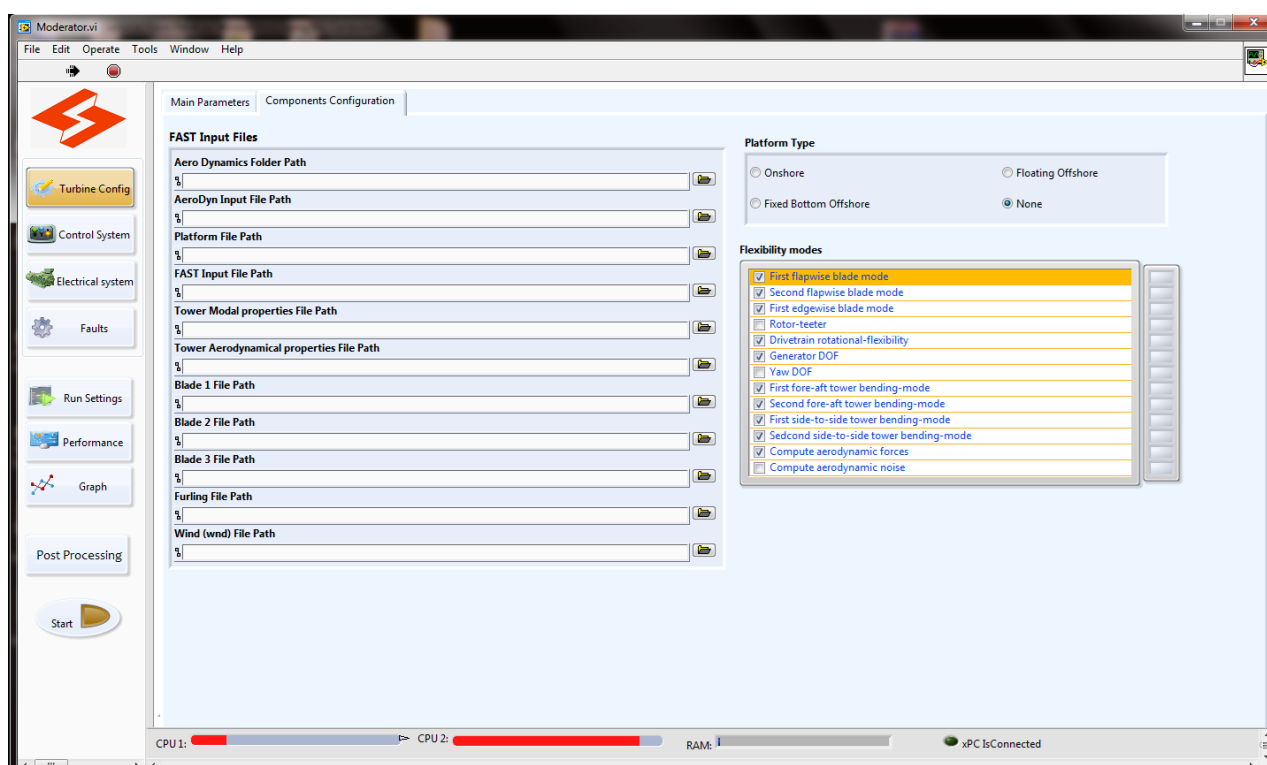
با فشردن دکمه "Turbine Config" در نوار سمت چپ، تنظیمات مربوطه در سمت راست آشکار می‌شود. این بخش از ۲ صفحه تشکیل می‌شود: ۱- "Main Parameters" و ۲- "Components Parameters" که هر صفحه توسط نوار بالایی قابل انتخاب است. در صفحه "Main Parameters" پارامترهای هندسی توربین شامل طول پره‌ها، مراکز جرم و فواصل نسبی بخش‌های مختلف توربین نسبت به نقاط مشخص و همچنین پارامترهای جرمی و اینرسی بخش‌های مختلف و مشخصات درایوتترین تنظیم می‌شود. نمای این صفحه در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. در این صفحه همچنین در قسمت پایین، کلیدی قرار داده شده است که با فشردن آن، کلیه تنظیمات این صفحه از طریق فایل ورودی FAST بارگذاری می‌گردد. آدرس این فایل در صفحه تنظیمات "Components Configuration" مشخص می‌گردد.

ساختار مکانیکی سایر اجزاء توربین از قبیل مشخصات مکانیکی و آیرودینامیکی برج و هر یک از پره‌ها، مشخصات مکانیکی پلتفرم و دم توربین و همچنین پروفایل باد مورد نظر، در صفحه "Components Configuration" مشخص می‌گردد. نمای این صفحه در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.

¹ Fast Fourier Transform



شکل ۸-۳- صفحه “Main Parameters” برای تنظیم پارامترهای اصلی ساختار مکانیکی توربین بادی



شکل ۹-۳- صفحه “Components Configuration” برای تنظیم مشخصات اجزاء مختلف توربین بادی

از آنجا که در شبیه‌ساز از کد FAST برای مدل‌سازی دینامیک و آیرودینامیک توربین بادی استفاده شده است، فایل‌های ورودی کد FAST شامل مدل آیرودینامیک از ماژول AeroDyn، مدل پلتفرم، مدل ساختار

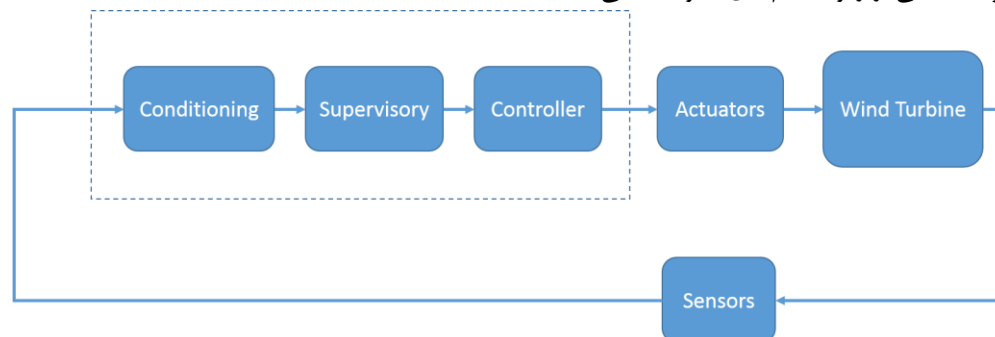
مودال برج، مدل آیرودینامیکی برج، مدل هر یک از پره‌ها، مدل دم^۱ و فایل ورودی باد باید توسط رابط کاربری دریافت گردد. آدرس هر یک از این فایل‌ها در صفحه "Components Configuration" در سمت چپ قابل بارگذاری است. در ارتباط با ساختار هر یک از فایل‌های ورودی می‌توان به راهنمای کد FAST [۱] رجوع کرد.

نوع پلنفرم اعم از اینکه روی خشکی باشد و یا خارج از خشکی و همچنین حالت شناوری و یا ثابت بودن آن، در سمت راست و بالای صفحه قابل تعیین است. در نهایت نوع و تعداد درجات آزادی و به عبارتی مودهای انعطاف‌پذیری توربین در سمت راست قابل انتخاب است. این مودها شامل: مودهای اول و دوم فلپ پره، مود اول لبه پره، مودهای اول و دوم جلو-عقب برج، مودهای اول و دوم پهلوی-به-پهلوی برج، مود پیچش درایوتترین، اثر ژنراتور و چرخش یاو می‌باشد. همچنین تأثیر نیروهای آیرودینامیکی و اثر نویز آیرودینامیک نیز در اینجا با کلیک بر روی موارد مورد نظر قابل انتخاب است.

با انجام تنظیمات فوق در حقیقت کد FAST برای مدلسازی توربین بادی مقداردهی می‌گردد. باقی صفحات که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، به تنظیم مازول‌های افزوده شده در شبیه‌ساز از قبیل سیستم کنترل و سیستم الکتریکی و امکانات نمایش و تحلیل نتایج می‌پردازد.

۲-۳-۳- تنظیمات سیستم کنترل

یک سیستم کنترل بطور کلی همانند شکل ۱۰-۳ از ۵ زیرسیستم تشکیل می‌شود: ۱- سنسورها، ۲- زیرسیستم شکل‌دهی سیگنال، ۳- زیرسیستم سوپروایزری، ۴- کنترل کننده و ۵- عملگرها. جهت مدل‌سازی جامع و دقیق سیستم کنترل توربین بادی، تمامی این زیرسیستم‌ها در شبیه‌ساز تعریف شده و پارامترهای آن قابل تنظیم می‌باشد. به این منظور با فشردن دکمه "Control System" در نوار ابزار سمت چپ، تنظیمات سیستم کنترل همانند شکل ۱۱-۳ در سمت راست ظاهر می‌شود. این تنظیمات از ۵ صفحه تشکیل شده است که هر صفحه مربوط به یکی از زیرسیستم‌های ذکر شده می‌باشد.

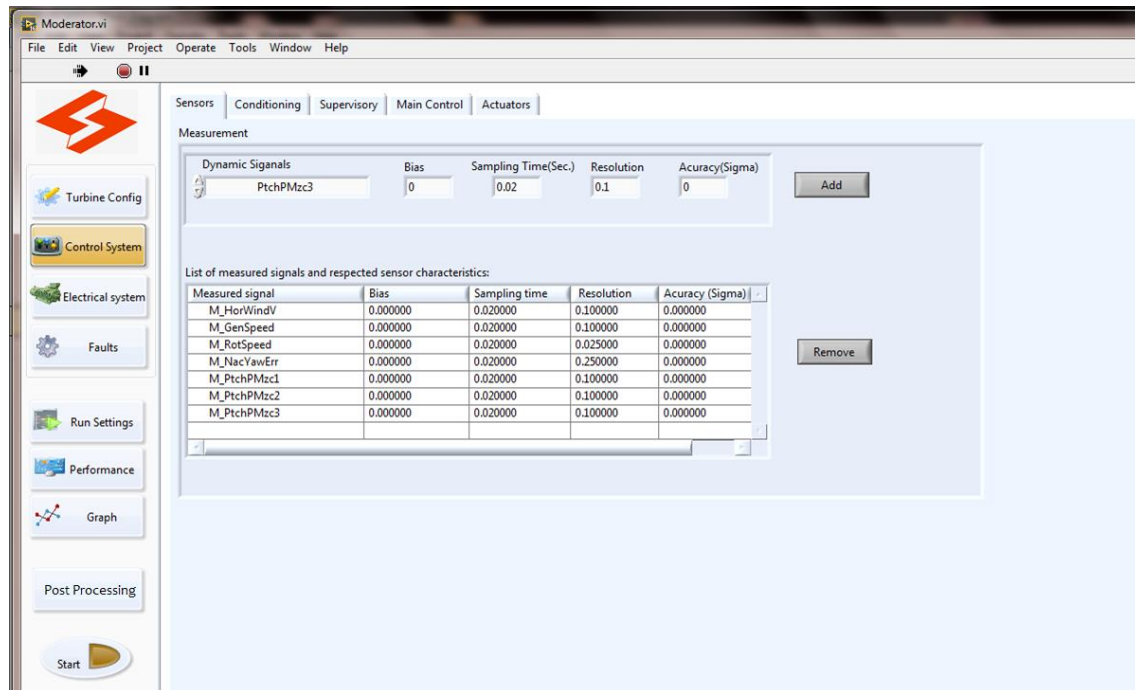


شکل ۱۰-۳- ساختار کلی یک سیستم کنترل

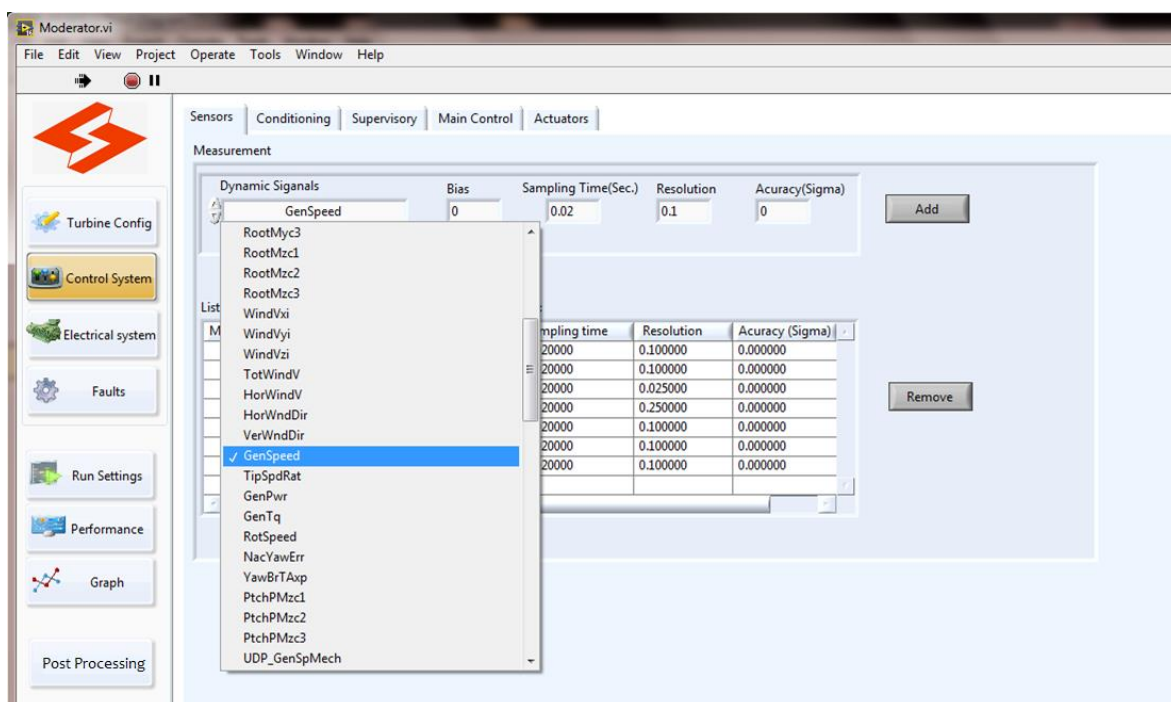
صفحه "Sensors"

اولین صفحه از سمت چپ با عنوان "Sensors" مربوط به تعریف سنسورهای مختلف و تعیین مشخصات هر یک از این سنسورها می‌باشد. در کادر بالای صفحه در قسمت "Dynamic Signals" لیستی از کلیه سیگنال‌های دینامیکی خروجی کد FAST که در فایل ورودی FAST با پسوند .fst تعریف شده است، وجود دارد. در این لیست همچنین سیگنال‌های سیستم الکتریکی که در کامپیوتر هدف SLRT اجرا می‌شود نیز با پیشوند UDP وجود دارد. به این ترتیب با کلیک بر روی این قسمت فهرست کشویی مربوط به آن همانند شکل ۱۲-۳ باز شده و سیگنال مورد نظر برای جایگذاری سنسور قابل انتخاب است.

¹ Furling



شکل ۱۱-۳- تنظیمات سیستم کنترل؛ صفحه مربوط به تعریف مشخصات سنسورها



شکل ۱۲-۳- منوی کشویی مربوط به سیگنال‌های دینامیکی موجود

پس از انتخاب سیگنال، مشخصات سنسور مورد نظر توسط پارامترهای: بایاس^۱، نرخ نمونه برداری^۲، تفکیک‌پذیری^۳ و دقت^۴، تنظیم می‌شود. پس از تنظیم پارامترهای مشخصه سنسور با کلیک بر روی گزینه Add

^۱ Bias

^۲ Sampling Time

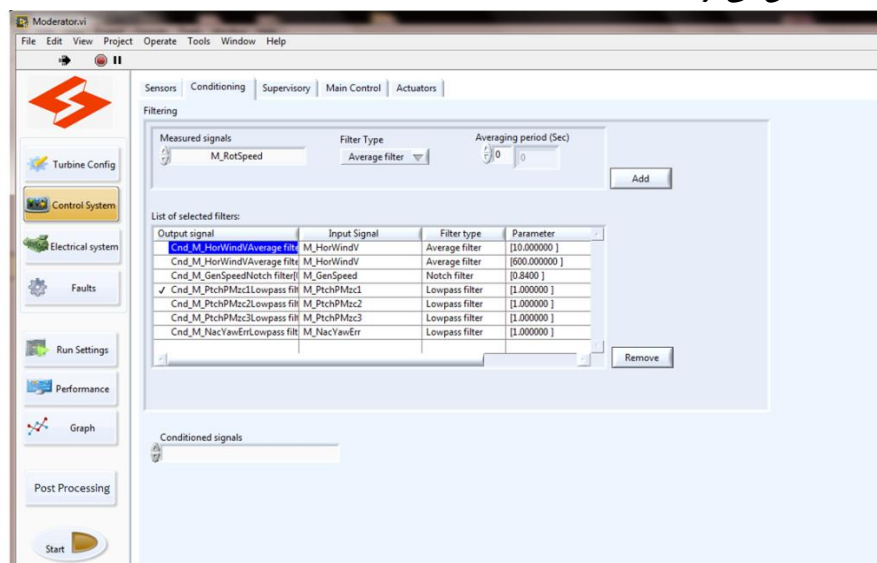
^۳ Resolution

^۴ Accuracy

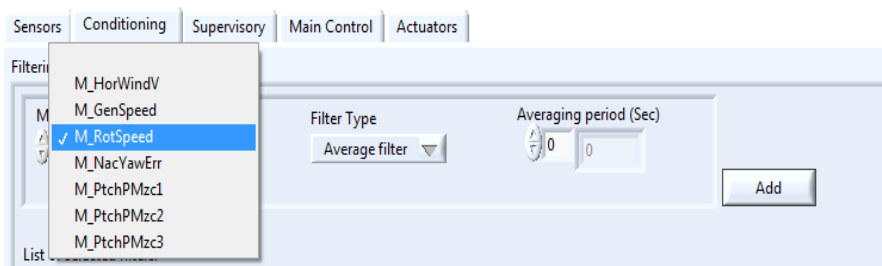
سیگنال اندازه‌گیری شده و مشخصات سنسور مربوطه در جدول پایین صفحه ثبت می‌گردد. نام سیگنال اندازه‌گیری شده با یک پیشوند M در ابتدای نام سیگنال اصلی مشخص می‌گردد.

صفحه “Conditioning”

همانطور که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است، سیگنال‌های دینامیکی پس از اندازه‌گیری توسط سنسورها، جهت شکل‌دهی مناسب وارد ماژول شکل‌دهی سیگنال^۱ می‌شوند. در این بلوک با انجام عملیات فیلتر کردن، به حذف نویز و یا تضعیف فرکانس‌های مشخص پرداخته می‌شود. با کلیک بر روی دکمه “Conditioning” در نوار ابزار سمت چپ، صفحه مربوط به این بلوک همانند شکل ۳-۱۳ نمایان می‌شود. در کادر بالای صفحه، یک فهرست کشویی با عنوان “Measured signals” شامل عناوین سیگنال‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد. با کلیک بر روی این آیکن، فهرست سیگنال‌های اندازه‌گیری شده که در صفحه “Sensors” تعریف شده است، همانند شکل ۳-۱۴ مشخص می‌گردد.



شکل ۳-۱۳- صفحه “Conditioning” مربوط به تنظیمات سیستم شکل‌دهی سیگنال



شکل ۳-۱۴- فهرست سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

در بخش میانی کادر بالا یک گزینه برای انتخاب نوع فیلتر مورد نظر از میان یکی از گزینه‌های فیلتر میانگین، فیلتر پایین‌گذر و فیلتر ناچ قرار داده شده است. با انتخاب نوع فیلتر، پارامتر مربوط به آن در سمت راست کادر نمایان می‌شود. به طور مثال چنانچه فیلتر میانگین‌گیری انتخاب شود، بازه زمانی میانگین‌گیری جهت تنظیم مشخص می‌گردد. این پارامتر در مورد فیلترهای پایین‌گذر و ناچ نیز به ترتیب برابر با فرکانس 3db و فرکانس ناچ است. لازم به ذکر است که پارامتر تنظیم فیلترها به صورت یک آرایه در نظر گرفته شده است. این بدان دلیل است که چنانچه نیاز به افزودن چند فیلتر یکسان بر روی یک سیگنال باشد مثلاً نیاز به حذف دو یا سه فرکانس

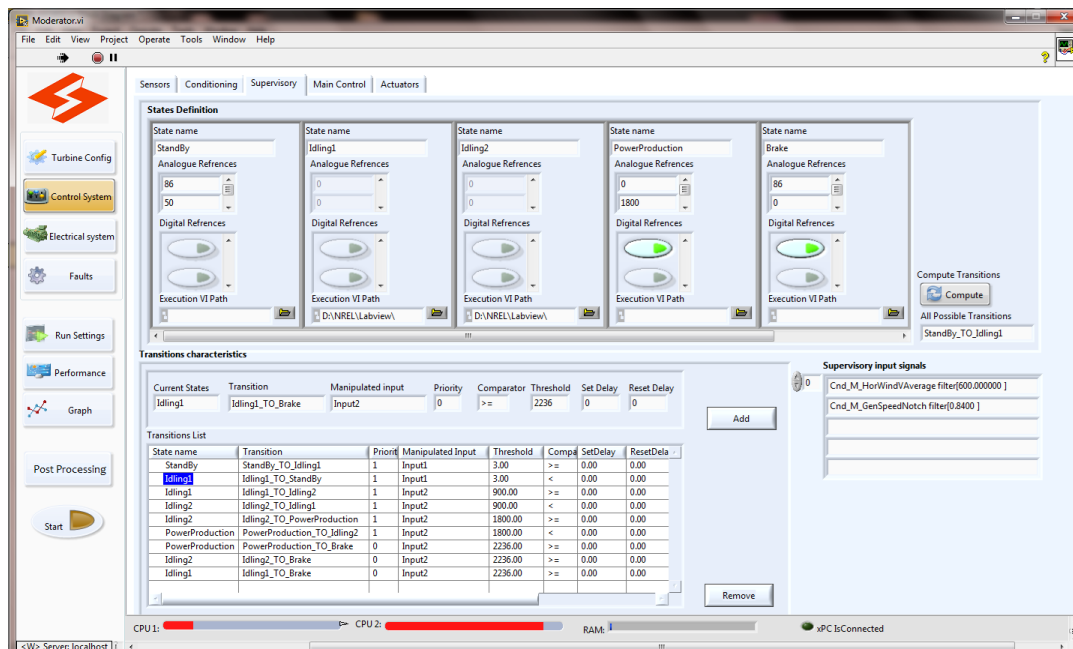
¹ Signal Conditioning

ناچ باشد، هر یک از پارامترها (در این مثال هر یک از فرکانس‌های ناچ) بر روی یکی از درایه‌های آرایه وارد می‌شود. در این صورت به تعداد المان‌های آرایه، فیلترهایی به صورت سری بر روی سیگنال مورد نظر اعمال می‌شود.

پس از انتخاب سیگنال و فیلتر مورد نظر و تنظیم پارامتر مربوطه، با کلیک بر روی کلید Add، نام سیگنال شکل‌دهی شده به همراه مشخصات فیلتر مربوطه در جدول پایین صفحه ثبت می‌شود. نام سیگنال شکل‌دهی شده از افزودن حروف Cnd به ابتدای سیگنال اندازه‌گیری شده تشکیل می‌گردد.

صفحه “Supervisory”

بخش سوپروایزری با پایش وضعیت توربین بادی به طور پیوسته، حالت^۱ یا مد^۲ کاری توربین را در هر لحظه تعیین می‌کند و بسته به مد کاری، مقادیر مرجع پارامترهای کنترلی و عملکردی مختلف را مقداری می‌کند. به این ترتیب بخش سوپروایزری برای عملکرد فوق به اطلاعاتی از قبیل مشخصات حالت‌ها، گذرهای مورد نیاز از هر حالت به حالات دیگر، مقادیر آستانه فعال شدن و مقادیر تاخیر در فعال شدن و بازنشانی هر یک از گذرها نیاز دارد. این اطلاعات در صفحه “Supervisory” قابل تنظیم می‌باشد. شکل ۱۵-۳ نمای این صفحه را نشان می‌دهد.



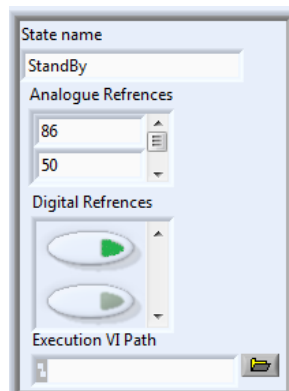
شکل ۱۵-۳- نمای صفحه “Supervisory”

در قسمت بالای صفحه، در بخشی با عنوان “States Definition” یک بردار با طول متغیر برای تعریف حالات وجود دارد. هر یک از المانهای این بردار در واقع مشخصات مربوط به یکی از حالات است. این مشخصات در شکل ۱۶-۳ بصورت جداگانه نشان داده شده است.

¹ State

² Mode

³ Transition

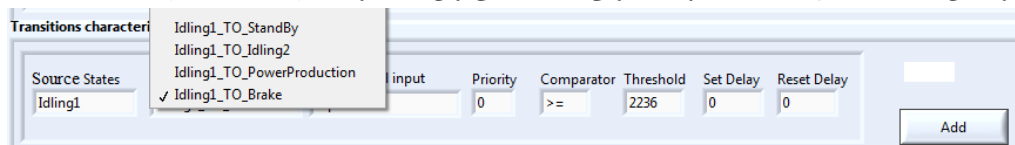


شکل ۱۶-۳- پارامترهای مورد نیاز برای تعریف یک حالت کاری

در بخش ابتدایی این پارامتر از بالا محلی برای تعیین نام حالت وجود دارد. از نام وارد شده در ساختن نام گذرها بصورت خودکار استفاده می‌شود. در بخش بعدی، دو آرایه با طول متغیر برای تعریف مقادیر مرجع قرار دارد. آرایه اول مربوط به مقادیر آنالوگ همچون سرعت روتور و گشتاور الکتریکی است که با وارد کردن اعداد تنظیم می‌شود و آرایه دوم مربوط به مقادیر دیجیتالی نظیر اتصال به شبکه و راه‌اندازی مبدل می‌باشد و با دکمه‌های دو وضعیتی مشخص می‌گردند. چنانچه نیاز باشد مقادیر مرجع از انجام عملیات خاصی بدست آید، می‌توان این عملیات بصورت یک زیربرنامه نوشته شود و آدرس آن در بخش انتهایی وارد گردد. در این صورت با ورود به حالت مورد نظر، دو آرایه آنالوگ و دیجیتالی کنار گذاشته شده و تنها خروجی‌های زیربرنامه‌ای که آدرس آن وارد شده است معتبر می‌باشند.

پس از تعریف حالات مورد نیاز، با فشردن دکمه "Compute" در سمت راست، کلیه گذرهای ممکن بین تمامی حالات محاسبه و نام‌گذاری می‌گردد و در آرایه‌ای با عنوان "All Possible transitions" قابل مشاهده است. از این آرایه در تعریف مشخصات گذرها استفاده می‌شود.

در قسمت پایین صفحه "Supervisory" همانطور که در شکل ۱۵-۳ دیده می‌شود، کادری با عنوان "Transitions characteristics" جهت تنظیم مشخصات گذرها وجود دارد. بالای این کادر یک کلاستر از پارامترهای مختلف همچون حالت مبدا، گذر به حالت مقصد، سیگنال ورودی، ارجحیت^۱، مقدار آستانه^۲، نوع مقایسه‌گر، مقادیر تاخیر نشان دادن و بازنشانی گذر وجود دارد. برای تعریف یک گذر و تنظیم مشخصات آن، باید ابتدا با کلیک بر روی پارامتر "Source State" از منوی کشویی باز شده حالت مبدا انتخاب شود. با انتخاب حالت مبدا، کلیه گذرهای ممکن از این حالت به حالت‌های موجود دیگر در آرایه سمت راست ایجاد می‌شوند که با کلیک بر روی آن، همانند شکل ۱۷-۳ از منوی کشویی باز شده می‌توان گذر مورد نظر را انتخاب کرد.



شکل ۱۷-۳- انتخاب گذر مورد نظر از لیست

پس از انتخاب گذر مورد نظر، سیگنال ورودی که باید مورد پایش قرار گیرد از گزینه سمت راست انتخاب می‌شود. این گزینه شامل ۸ ورودی Input1 تا Input8 است که به ترتیب متناظر با ورودی‌های مشخص شده در قسمت سمت راست و پایین صفحه "Supervisory" می‌باشند. به عنوان مثال در شکل ۱۵-۳ ورودی

¹ Priority

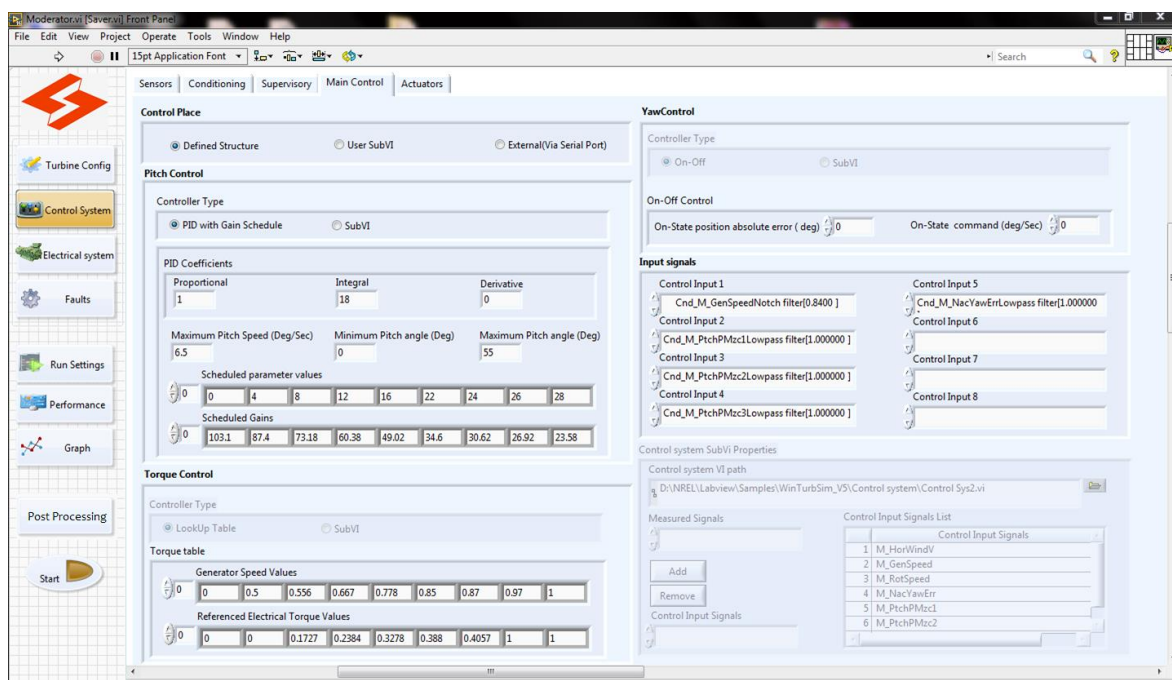
² Threshold

Input1 متناظر با سیگنال `Cnd_M_HorWindAverage filter[600.000]` و ورودی Inpu2 متناظر با سیگنال `Cnd_M_GenSpeedNotch filter[0.8400]` است.

اولویت هر گذر با یک عدد صحیح بزرگتر مساوی با ۰ تعیین می‌شود به این صورت که عدد ۰ نشان‌دهنده بالاترین اولویت است. بدین ترتیب چنانچه دو گذر بطور همزمان فعال شوند، گذر با اولویت بالاتر اجرا می‌گردد. فعال شدن یک گذر به این صورت است که سیستم سوپروایزری با مقایسه سیگنال ورودی با مقدار آستانه، چنانچه در مدت زمانی برابر با "Set Delay" شرط مقایسه برآورده شود، این گذر را فعال می‌کند. نوع مقایسه گر می‌تواند یکی از انواع: $<$ ، $>$ ، $=$ ، $\geq$ و $\leq$ باشد. پس از تنظیم مشخصات گذر مورد نظر با فشردن دکمه "ADD" مشخصات آن در جدول پایین صفحه ثبت می‌گردد. به همین ترتیب تمامی گذرهای مورد نظر قابل تنظیم می‌باشند.

صفحه "Main Control"

در بخش‌های پیشین پس از تعریف سنسورهای لازم برای استخراج سیگنال‌های دینامیکی مورد نیاز و شکل‌دهی این سیگنال‌ها با به‌کارگیری فیلترهای مناسب، الگوریتم سوپروایزری بصورت کاملاً پارامتریک از طریق رابط کاربری طراحی گردید. در این بخش به تنظیم پارامترهای زیرسیستم کنترل اصلی که شامل کنترلر پیچ، کنترلر گشتاور و کنترلر یاو می‌باشد، پرداخته می‌شود. این زیرسیستم با دریافت مقادیر مرجع هر یک از کنترلرها، با اعمال الگوریتم‌های مناسب، فرامین لازم را برای عملگرهای پیچ و یاو و همچنین ژنراتور محاسبه و ارسال می‌کند. شکل ۱۸-۳ صفحه تنظیمات زیرسیستم کنترل اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸-۳- صفحه "Main Control" جهت تنظیمات سیستم کنترل اصلی

در کادر بالا سمت چپ از صفحه "Main Control" با عنوان "Control Place" سه گزینه برای انتخاب محل اجرای سیستم کنترل وجود دارد: ۱- "Defined Structure"، ۲- "User SubVI" و ۳- "External(Via Serial Port)". با انتخاب گزینه اول، ساختار کنترلر بصورت یک ساختار ماژولار شامل ماژول‌های شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری و کنترلرهای پیچ، یاو و گشتاور انتخاب می‌شود که پارامترهای هر ماژول از طریق رابط GUI قابل تنظیم است. چنانچه کاربر بخواهد کل سیستم کنترل را بصورت جداگانه و از

طریق فراخوانی یک زیربرنامه از قبل نوشته شده، در برنامه شبیه‌ساز اجرا کند، باید گزینه دوم یعنی "User SubVI" را انتخاب نماید. در این صورت ماژول‌های شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری و کنترلرهای پیچ، یاو و گشتاور از برنامه شبیه‌ساز غیرفعال شده و زیربرنامه با دریافت سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، فرامین کنترل را صادر می‌کند. این قسمت برای اجرای یک فایل dll از طریق یک زیربرنامه نیز کاربرد دارد. در نهایت با انتخاب گزینه "External (Via Serial Port)" سیستم کنترل به صورت زمان-حقیقی بر روی یک پردازنده خارجی مانند PLC اجرا شده و از طریق یک ارتباط سریال به تبادل داده با شبیه‌ساز می‌پردازد.

چنانچه گزینه "Defined Structure" برای ساختار کنترلر انتخاب شود، می‌باید پارامترهای مربوط به کنترلرهای پیچ، یاو و گشتاور تنظیم گردد. کنترلر پیچ بصورت یک کنترلر PID با ساختار جدول‌بندی بهره^۱ در نظر گرفته شده است. ضرایب I، P و D در کادر "Pitch Coefficients" وارد می‌شود و حدود آستانه برای زاویه و نرخ تغییرات زاویه پیچ و همچنین مقادیر جدول ضرایب بهره نیز در این بخش قابل تنظیم است.

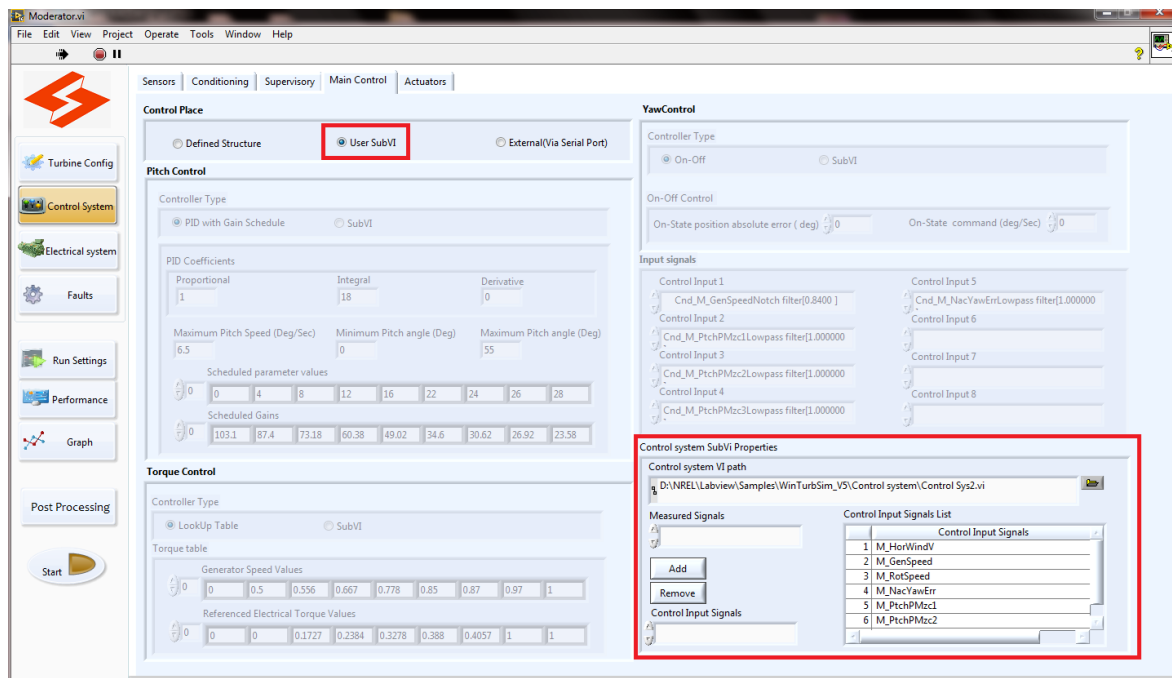
کنترلر گشتاور به صورت یک جدول جستجو وابسته به سرعت ژنراتور در نظر گرفته شده است که مقادیر این جدول در بخش "Torque Table" قابل تنظیم است. برای کنترل یاو نیز از یک کنترلر on-off بهره گرفته شده است که با دریافت زاویه یاو در هر لحظه نرخ مناسب تغییرات زاویه را تعیین می‌کند. این کنترلر از دو پارامتر تنظیم تشکیل می‌گردد. پارامتر اول با عنوان "On-state position absolute error" مقدار آستانه خطای مطلق زاویه یاو را برای وضعیت روشن معین می‌کند. پارامتر دوم با عنوان "On-State command"، فرمان کنترلی به عملکرد را بصورت نرخ تغییرات زاویه مشخص می‌کند.

لازم به ذکر است که در بخش مربوط به تنظیمات هر یک از کنترلرهای پیچ، یاو و گشتاور، بخشی با عنوان "Controller Type" جهت انتخاب نوع کنترلر وجود دارد. این بخش شامل دو گزینه است؛ گزینه اول، کنترلر پیش‌فرض است که قبلاً توضیح داده شد و گزینه دوم انتخاب یک زیربرنامه است که در صورت انتخاب آن باید آدرس محل زیربرنامه در کادر باز شده وارد شود. از آنجا که در نسخه حاضر هنوز این بخش به طور کامل نهایی نشده است، این گزینه در حال حاضر غیرفعال است.

در نهایت در بخش "Input signals" ورودی‌های سیستم کنترل از میان سیگنال‌های شکل‌دهی شده انتخاب می‌گردد. به این منظور به تعداد ۸ کانال ورودی برای سیستم کنترل در نظر گرفته شده است که سیگنال مربوط به هر کانال بصورت جداگانه از میان سیگنال‌های شکل‌دهی شده قابل انتخاب است. لازم به ذکر است که در حالتی که کنترلرهای پیش‌فرض برای سیستم کنترل انتخاب شوند، در این صورت ورودی اول باید سیگنال شکل‌دهی شده سرعت ژنراتور و یا روتور، ورودی‌های دوم تا چهارم سیگنال زاویه پیچ هر یک از پره‌ها و ورودی پنجم سیگنال زاویه یاو باشد.

با انتخاب گزینه "User SubVI" در "Control Place" به عنوان محل سیستم کنترل، کلیه تنظیمات مربوط به ساختار پیش‌فرض غیر فعال شده و تنها یک کادر در بخش راست و پایین صفحه با عنوان "Control System SubVI Properties" فعال می‌گردد. در این بخش در قسمت "Control system VI path" آدرس زیربرنامه مورد نظر وارد می‌شود و در قسمت پایین، ورودی‌های سیستم کنترل از میان سیگنال‌های اندازه‌گیری شده انتخاب می‌گردند.

¹ Gain Scheduled



شکل ۱۹-۳- تنظیمات مربوط به سیستم کنترل در حالت زیربرنامه

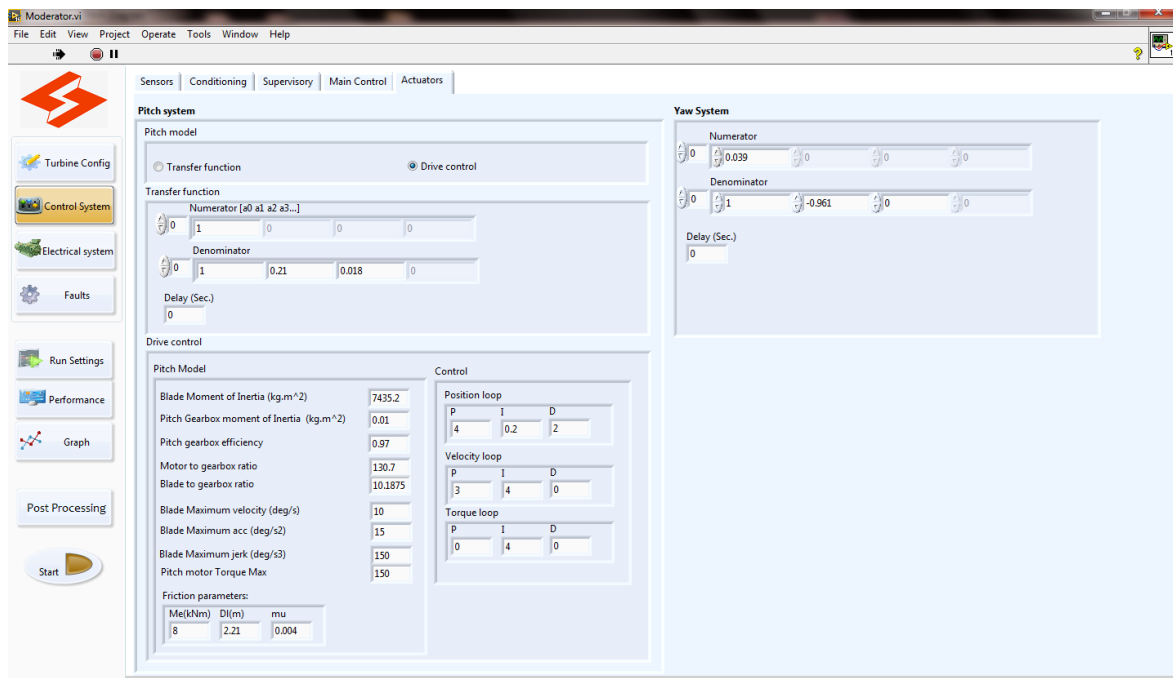
در نهایت چنانچه سیستم کنترل بصورت خارجی وجود داشته باشد مثلاً در یک PLC پیاده‌سازی شده باشد، جهت تست این سیستم باید گزینه “External(Via Serial Port)” در بخش “Control Place” انتخاب گردد. در این صورت، سیستم کنترل از طریق یک ارتباط سریال به شبیه‌ساز متصل شده و با دریافت سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و انجام محاسبات لازم، فرامین کنترلی را از بستر سریال به شبیه‌ساز ارسال می‌کند.

صفحه “Actuators”

توربین‌های بادی به جز ژنراتور الکتریکی که یک گشتاور الکتریکی بر روی شفت درایوترین اعمال می‌کند، از دو نوع عملگر دیگر نیز بهره می‌برند: عملگر پیچ و عملگر یاو. این عملگرها به عنوان قطعه پایانی حلقه‌های کنترلی، فرمان کنترلی مربوطه را اعمال می‌کنند و به این ترتیب دینامیک پاسخ این عملگرها در عملکرد کلی یک حلقه کنترلی تأثیر گذار است. مدل این عملگرها در شبیه‌ساز در صفحه “Actuators” قابل تنظیم است. شکل ۲۰-۳ نمای این صفحه را نشان می‌دهد. این صفحه از دو قسمت تشکیل می‌شود. در سمت چپ تنظیمات مربوط به عملگر پیچ و در سمت راست تنظیمات مربوط به عملگر یاو قرار گرفته است.

در بخش مربوط به عملگر پیچ به دو صورت می‌توان این عملگر را مدل کرد: تابع تبدیل و یا درایو کنترل. در حالت تابع تبدیل، دینامیک عملگر توسط یک تابع تبدیل مدل می‌شود. در حالت درایو کنترل، مجموعه شفت و گیربکس و موتور پیچ بصورت یک سیستم مرتبه ۲ مدل شده و از یک درایو شامل ۳ حلقه کنترلی موقعیت، سرعت و گشتاور برای کنترل زاویه پیچ استفاده می‌شود. کنترلر هر حلقه بصورت یک کنترلر PID در نظر گرفته می‌شود و مقادیر بیشینه موقعیت، سرعت، شتاب و تنش زاویه پیچ نیز در مدل لحاظ می‌گردد. همچنین در این مدل گشتاور اصطکاکی نیز محاسبه شده و اعمال می‌گردد.

به این ترتیب جهت انتخاب تابع تبدیل برای مدل عملگر، باید در کادر “Pitch model” گزینه “Transfer function” انتخاب شود. در این صورت باید در کادر میانی پارامترهای تابع تبدیل پیوسته مورد نظر شامل ضرایب صورت و مخرج و همچنین تاخیر زمانی وارد شود. متغیرهای صورت و مخرج بصورت دو آرایه در نظر گرفته شده است که شامل ضرایب S از مرتبه پایین به بالا می‌باشند.



شکل ۲۰-۳- نمای صفحه “Actuators” برای تنظیم پارامترهای عملگرهای پیچ و یاو

$$TF = \frac{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0}{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0}$$

برای انتخاب حالت درایو کنترل باید گزینه “Drive control” در کادر مربوط به مدل پیچ انتخاب گردد. در این حالت باید پارامترهای مدل پیچ و کنترل درایو در قسمت پایین بخش سیستم پیچ تنظیم گردد. همانطور که مشاهده می‌شود در این بخش پارامترهای مختلفی از قبیل ممان‌های اینرسی پره و گیربکس، بازدهی گیربکس پیچ، نسبت‌های گیربکس، بیشینه سرعت، شتاب، شوک و گشتاور قابل تحمل و همچنین پارامترهای اصطکاکی قابل تنظیم است. علاوه بر آن ضرایب PID مربوط به هریک از حلقه‌های کنترلی به طور جداگانه تنظیم می‌شوند.

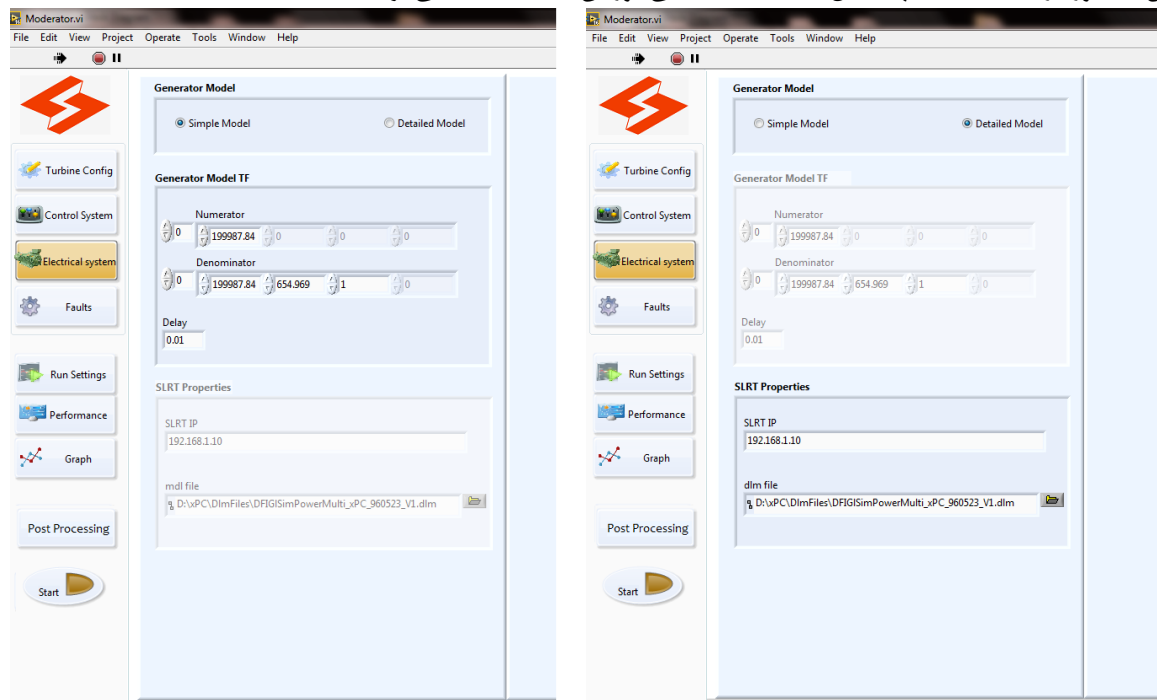
برای سیستم یاو نیز به علت دینامیک کند آن تنها یک تابع تبدیل در نظر گرفته شده است که پارامترهای آن در سمت راست صفحه همانند سیستم پیچ قابل تنظیم است.

۳-۳-۳- تنظیمات سیستم الکتریکی

منظور از سیستم الکتریکی توربین بادی، در اینجا مجموعه ژنراتور DFIG و مبدل آن می‌باشد. این سیستم با تولید توان الکتریکی متناسب با سرعت چرخش روتور، یک گشتاور الکتریکی بر روی شفت درایوترین اعمال کرده و از این طریق در معادلات مکانیکی توربین تأثیر می‌گذارد. به این ترتیب پاسخ دائم و حالت گذرای این سیستم بخصوص در موارد رخداد خطاهای الکتریکی می‌تواند در رفتار مکانیکی توربین مؤثر باشد.

در شبیه‌ساز توربین بادی، سیستم الکتریکی به دو صورت قابل مدلسازی است. در حالت اول که رفتار توربین در حالت کاری نرمال مد نظر است، مدل کردن گشتاور الکتریکی بصورت ساده توسط یک تابع تبدیل کفایت می‌کند. به این منظور کافی است در صفحه تنظیمات سیستم الکتریکی (شکل ۲۱-۳) در بخش “Generator Model” گزینه “Simple Model” انتخاب گردد. در این صورت در قسمت پایین آن، بخش مربوط به مدل تابع تبدیل ژنراتور فعال می‌شود. ساختار این تابع تبدیل همانند بخش عملگرهای پیچ و یاو است و شامل آرایه‌های ضرایب صورت و مخرج و پارامتر تأخیر زمانی می‌باشد.

در حالت دوم، معادلات ژنراتور و مبدل در یک کامپیوتر با سیستم زمان-حقیقی SLRT بصورت جداگانه اجرا شده و گشتاور الکتریکی لحظه‌ای توسط یک ارتباط UDP به کامپیوتر شبیه‌ساز توربین بادی منتقل می‌شود. از این گشتاور در کد FAST جهت حل معادلات دینامیکی توربین بادی استفاده می‌گردد.



شکل ۳-۲۱- صفحه تنظیمات سیستم الکتریکی

برای انتخاب مدل دقیق برای سیستم الکتریکی باید ابتدا گزینه “Detailed Model” در بخش مدل ژنراتور انتخاب گردد. با این انتخاب، بخش مربوط به تابع تبدیل غیرفعال شده و بخش مربوط به تنظیمات سیستم زمان-حقیقی SLRT فعال می‌گردد. در این بخش می‌باید آدرس IP سیستم SLRT و همچنین آدرس فایل dlm حاوی کد کامپایل شده Matlab برای اجرای زمان حقیقی مدل سیستم الکتریکی وارد گردد.

۳-۳-۴- تنظیمات خطاها

یکی از قابلیت‌های مهم شبیه‌ساز توربین بادی، امکان تولید خطاهای مختلف الکتریکی و مکانیکی است. به این ترتیب می‌توان رفتار توربین و بخصوص سیستم ایمنی و کنترل را در شرایط مختلف خطا مشاهده کرد و گستره نیروها و گشتاورهای اعمالی به نقاط مختلف را بدست آورد و در صورت نیاز به اصلاح الگوریتم‌های کنترلی اقدام نمود.

با زدن دکمه “Faults” در نوار سمت چپ پنجره اصلی GUI، صفحه‌ای همانند شکل ۳-۲۲ مربوط به تنظیمات خطاهای مکانیکی و الکتریکی باز می‌شود. در سمت چپ صفحه، بخش تنظیمات خطاهای مکانیکی مشاهده می‌شود. خطاهای مکانیکی مربوط به خطای سیستم پیچ است که شامل سه نوع خطای ۱- گیرکردن^۱، ۲- رانش به استال^۲ و ۳- بایاس^۳ می‌باشد. در خطای اول در یک زمان مشخص یکی از پره‌ها ثابت مانده و زاویه آن تغییر نمی‌کند. در خطای دوم در یک لحظه مشخص یکی از پره‌ها بدون هیچ کنترلی و با یک سرعت ثابت به سمت زاویه استال شروع به چرخیدن کند. خطای سوم نیز باعث ایجاد یک شیفث ثابت در زاویه پره می‌گردد.

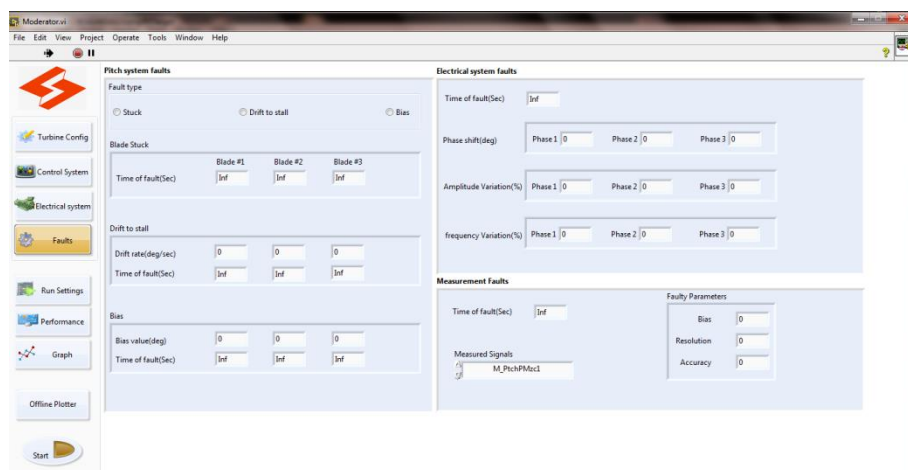
¹ Stuck

² Drift to stall

³ Bias

برای تولید خطاهای سیستم پیچ باید ابتدا در بخش “Fault type” نوع خطا را از میان یکی از گزینه‌های “Stuck”، “Drift to stall” و “Bias” انتخاب کرد. پس از آن چنانچه گزینه “Stuck” انتخاب شده باشد باید زمان وقوع این خطا را برای هر یک از پره‌ها در بخش “Blade Stuck” مشخص کرد. این زمان‌ها در حالت پیش‌فرض دارای مقدار بینهایت یا Inf است که معادل عدم رخداد خطا است. برای ایجاد خطای رانش به استال، پس از انتخاب گزینه “Drift to stall” باید نرخ افزایش زاویه و زمان وقوع خطا را در بخش تنظیمات “Drift to stall” برای هر پره وارد نمود. در نهایت برای خطای بایاس نیز، مقادیر میزان بایاس و زمان رخداد آن در بخش “Bias” تنظیم می‌گردد.

تنظیمات خطاهای سیستم الکتریکی در سمت راست و بالای صفحه خطاها قابل مشاهده است. این تنظیمات قابلیت ایجاد سه نوع خطای شبکه را به طور همزمان فراهم می‌کند. این خطاها شامل تغییر فاز، تغییر دامنه و تغییر فرکانس ولتاژ شبکه می‌باشد. برای ایجاد تغییرات فاز، باید میزان شیفت زاویه‌ای هر فاز در بخش “Phase shift” به درجه وارد گردد. برای خطاهای دامنه و فرکانس نیز باید درصد تغییرات هر یک برای هر فاز در بخش مربوطه تعریف شود. در این صورت در زمان مشخص شده، خطای مورد نظر روی می‌دهد.



شکل ۲۲-۳- صفحه Faults مربوط به تنظیمات خطاها

در نهایت خطاهای سیستم اندازه‌گیری در سمت راست و پایین صفحه، قابل تعریف می‌باشد. در این بخش می‌توان بر روی یکی از سیگنال‌های اندازه‌گیری، خطا ایجاد کرد. خطاهای قابل ایجاد شامل خطای بایاس، خطای تفکیک‌پذیری و خطای صحت می‌باشد. به این منظور سیگنال مورد نظر از منوی کشویی “Measured Signals” قابل انتخاب است و هر یک پارامترهای “Bias”، “Resolution”، “Accuracy” و مربوط به آن سیگنال در سمت راست قابل تنظیم است.

۴-۳- نتیجه‌گیری

در این فصل به معرفی رابط کاربری توسعه داده شده برای شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی پرداخته شد. ساختار رابط کاربری بگونه‌ای توسعه داده شد که علاوه بر توانایی انجام شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی، قابلیت اجرا بصورت غیر زمان-حقیقی و تنها بر روی کامپیوتر میزبان نیز فراهم گردد. در رابط کاربری صفحات مختلفی برای تعریف ساختار توربین بادی به فرمت کد FAST و همچنین طراحی و اجرای یک سیستم کنترل کامل شامل مازول‌های اندازه‌گیری، شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری، کنترل و در نهایت عملگرهای پیچ و یو طراحی شده است. همچنین قابلیت انتخاب سیستم کنترل خارجی نظیر PLC و ایجاد ارتباط سریال نیز فراهم گردید. رابط کاربری همچنین از یک صفحه جهت نمایش متغیرهای اصلی توربین بادی نظیر سرعت ژنراتور و روتور، گشتاور و توان الکتریکی تولیدی، زوایای پیچ و سرعت باد بطور لحظه‌ای و بصورت گرافیکی برخوردار است. علاوه بر آن یک صفحه برای رسم گراف هر یک از سیگنال‌های تعریف شده، طراحی شده و قابلیت رسم برخط و لحظه‌ای کلیه سیگنال‌ها در آن تعبیه شده است.

از قابلیت‌های دیگر رابط کاربری، امکان ایجاد خطا در سیستم الکتریکی، تولید خطا در هر یک از سنسورهای اندازه‌گیری و ایجاد خطای مکانیکی در چرخش هر یک از پره‌ها می‌باشد. امکان دیگری که در رابط کاربری گنجانده شده است، وجود یک بستر برای تحلیل نتایج پس از اتمام شبیه‌سازی از طریق فراخوانی نتایج ذخیره شده و رسم نمودار هر یک از سیگنال‌ها است. در این بستر قابلیت تحلیل زمانی، بررسی آماری و تحلیل فرکانسی (از طریق محاسبه FFT سیگنال‌ها) نیز وجود دارد.

ساختار مازولار در نظر گرفته شده برای شبیه‌ساز و دسترسی به مازول‌های مختلف به صورت مستقل از طریق رابط کاربری این امکان را به کاربر می‌دهد که علاوه بر تعریف و مدلسازی آسان بخش‌های مختلف یک توربین بادی، امکان تست و ارزیابی الگوریتم‌های مختلف کنترلی در یک بستر زمان-حقیقی در قالب آزمایشات سخت‌افزار-در-حلقه و با جایگزینی مازول‌های مختلف با قطعات سخت‌افزاری همچون عملگرها و سنسورها به راحتی میسر گردد.

رابط کاربری در بستر نرم‌افزاری LabVIEW توسعه داده شده است که از قابلیت‌های بالای ارتباطی با سخت‌افزارهای مختلف برخوردار است. این ویژگی موجب کاربردهای گوناگون صنعتی این نرم‌افزار به ویژه در داده‌برداری، ذخیره و تحلیل داده‌ها با حجم و سرعت بالا شده است. امکانات مختلفی که LabVIEW ارائه می‌دهد، توسعه رابط کاربری را در آینده بسیار آسان می‌کند بگونه‌ای که بر راحتی می‌توان مازول‌های حاضر را با افزودن توابع موجود در نرم‌افزار و مازول‌های توسعه داده شده توسط شرکت NI گسترش داد.

۵-۳- مراجع

- [3] Jonkman, J. M. and Buhl, M. L., "FAST User's Guide," Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, NREL/EL-500-38230, 2005.

فصل چهارم:

ارزیابی و صحت‌سنجی شبیه‌ساز زمان-

حقیقی توربین بادی

۴- ارزیابی و صحت‌سنجی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی

۴-۱- مقدمه

امروزه در صنعت تولید نیروی برق پاک و با حمایت دولت‌ها از انرژی‌های تجدیدپذیر و در رقابت با انرژی‌های فسیلی، روز به روز شاهد گسترش و پیشرفت صنایع مرتبط با توربین‌های بادی هستیم. این پیشرفت هم در راستای گسترش مزارع بادی و هم در جهت افزایش ابعاد و ظرفیت تولیدی توربین‌های بادی و به تبع آن پیچیدگی و پیشرفت صنایع مرتبط با آن در طراحی و ساخت زیرسیستم‌های مختلف یک توربین بادی انجامیده است. با افزایش طول و وزن پره‌ها و برج در توربین‌های بادی، گشتاورهای اعمالی به نقاط مختلف پره و برج نیز افزایش می‌یابد که این نیاز به محکم‌سازی سازه با افزایش مواد اولیه مورد استفاده را طلب می‌کند. از طرفی به دلیل ملاحظات اقتصادی در افزایش استحکام سازه محدودیت وجود دارد. این موضوع منجر به افزایش خاصیت انعطاف‌پذیری در پره، برج و درایوترین و در نتیجه پیچیدگی رفتار دینامیکی توربین‌ها می‌گردد که خود بکارگیری الگوریتم‌های پیچیده‌تر در سیستم‌های کنترل و حفاظت را به همراه دارد.

با افزایش پیچیدگی دینامیکی توربین‌های بادی، به کارگیری سیستم‌های شبیه‌ساز در فرآیند توسعه الگوریتم‌های کنترل و حفاظت جهت ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها اجتناب ناپذیر است. شبیه‌سازها با مدل‌کردن دینامیک توربین بادی و پدیده‌های مختلف آیرودینامیکی، رفتار توربین بادی را تحت تاثیر کنشگرهای مختلفی همچون باد، وضعیت پره‌ها، سرعت چرخش روتور و گشتاور الکتریکی ژنراتور نمایش می‌دهد. به این ترتیب حصول اطمینان از صحت عملکرد شبیه‌ساز، اطمینان از صحت عملکرد توربین بادی و در نتیجه رفتار مناسب توربین بادی در عمل را افزایش می‌دهد.

در این فصل با اجرای آزمایشات مختلف، به ارزیابی و صحت‌سنجی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توسعه داده شده برای توربین بادی پرداخته می‌شود. به این منظور در ۲ بخش به بررسی عملکرد شبیه‌ساز پرداخته می‌شود. در بخش اول، توابع اصلی مورد استفاده در شبیه‌ساز همچون انتگرال‌گیر، مشتق‌گیر، فیلترهای مختلف، جدول جستجو، کنترلر PID و ... و همچنین ارتباطات سریال و UDP مورد آزمایش و صحت‌سنجی قرار می‌گیرند. در بخش دوم، با پیاده‌سازی مدل‌های معیار معتبر موجود همانند توربین‌های CART و NREL5MW شرکت NREL و همچنین مدل توربین ۲ مگاوات ملی و مقایسه نتایج شبیه‌ساز با نتایج موجود از این توربین‌ها، دقت شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲- ارزیابی ماژول‌های اصلی توسعه داده شده

برای شبیه‌سازی بخش‌های مختلف یک توربین بادی توسط شبیه‌ساز زمان-حقیقی، ماژول‌های متعدد و گوناگونی در محیط LabVIEW توسعه داده شد. این ماژول‌ها در ارتباط با یکدیگر بصورت سری و یا موازی اجرا شده و به تبادل اطلاعات می‌پردازند. بنابراین عملکرد هر یک از این ماژول‌ها می‌تواند در عملکرد کل شبیه‌ساز تأثیرگذار باشد. به این ترتیب صحت عملکرد هر ماژول به تنهایی از اهمیت بالایی برخوردار است.

کلید ماژول‌های طراحی شده در شبیه‌ساز را می‌توان در ۲ دسته: ۱- توابع ریاضی و منطقی و ۲- ماژول‌های عملکردی قرار داد. به عنوان مثال توابعی نظیر انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر در دسته اول و

ماژول‌های ارتباط سریال و UDP در دسته دوم قرار می‌گیرند. در این فصل با بررسی دقیق هر یک از این توابع و ماژول‌ها، صحت عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱- ارزیابی توابع ریاضی و منطقی

شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی حاضر، در بستر نرم‌افزاری LabVIEW و با استفاده از توابع ریاضی و بلوک‌های تابعی موجود در این نرم‌افزار توسعه داده شده است. این شبیه‌ساز با دارا بودن یک ساختار ماژولار بصورت جامع بخش‌های مختلف یک توربین بادی را همچون ساختار مکانیکی و آیرودینامیکی (کد FAST)، سیستم کنترل شامل زیرسیستم‌های شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری و کنترل، سیستم اندازه‌گیری، عملگرها و سیستم الکتریکی را مدل می‌کند. علاوه بر آن، امکان تولید خطا در بخش‌های مختلف و همچنین ابزارهایی برای ذخیره، نمایش و تحلیل نتایج در آن وجود دارد. ایجاد تمامی این امکانات نیازمند به استفاده از انبوهی از توابع ریاضی و بلوک‌های تابعی مختلف در ارتباط با یکدیگر است. بنابراین صحت اجرای یک شبیه‌سازی، مستلزم صحت عملکرد تک تک این توابع و بلوک‌ها می‌باشد. پاره‌ای از این توابع به شکل مناسب در کتابخانه‌های نوشته شده نرم‌افزار LabVIEW وجود دارد اما تعداد زیادی از توابع مورد نیاز به علت کاربرد خاص نیاز به طراحی داشته است که نیازمند به انجام پروسه صحت‌سنجی دارند. در ادامه به ارزیابی این توابع و بلوک‌ها پرداخته می‌شود.

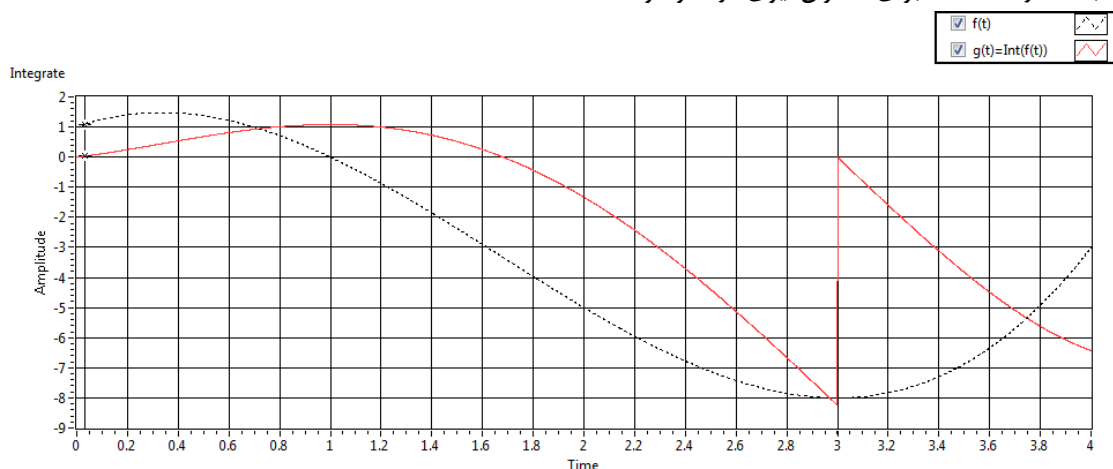
انتگرال گیر

انتگرال‌گیری یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین عملیات در مدل‌سازی یک سیستم دینامیکی است. وجود یک خطای کوچک در فرآیند انتگرال‌گیری منجر به ایجاد یک خطای تجمعی شده که در طول بازه انتگرال‌گیری بزرگ‌تر می‌گردد. یکی از قابلیت‌های مهم برای تابع انتگرال‌گیر، امکان بازنشانی مقدار انتگرال به صفر با ارسال یک فرمان است.

برای توسعه انتگرال‌گیر از روش Runge-Kutta مرتبه سوم استفاده شده است. شکل ۴-۱ خروجی تابع انتگرال‌گیر توسعه داده شده را به ازای یک ورودی چندجمله‌ای نشان می‌دهد. چند جمله‌ای مورد نظر برابر است با:

$$f(t) = t^3 - 5t^2 + 3t + 1$$

همچنین مقدار انتگرال‌گیر در لحظه $t=3$ به مقدار صفر بازنشانی می‌گردد. لازم به ذکر است که در اینجا مقدار $\Delta t=0.1$ برای انتگرال‌گیری در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۱- محاسبه عددی انتگرال تابع چندجمله‌ای $f(t)$

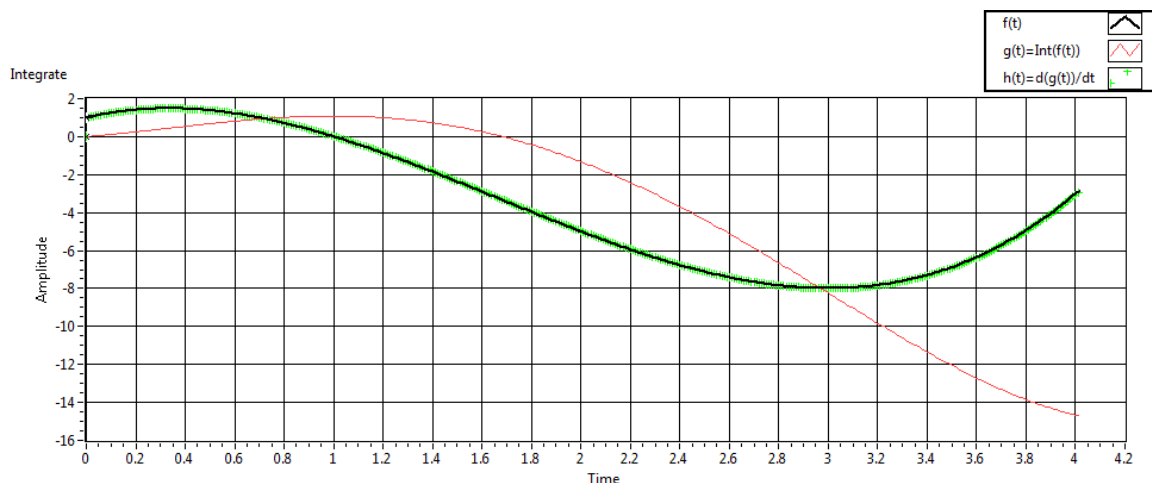
مقادیر لحظه‌ای پاسخ انتگرال‌گیر توسعه داده شده و حل تحلیلی رابطه ریاضی در جدول ۴-۱ جهت مقایسه آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود علی‌رغم بازه بزرگ Δt ، پاسخ حل عددی تا ۴ رقم اعشار با مقدار واقعی برابری می‌کند.

جدول ۴-۱- مقادیر حل عددی و محاسبه مستقیم انتگرال تابع $f(t)$

t	حل عددی	محاسبه ریاضی
0.2	0.247067	0.247067
0.4	0.539735	0.539733
0.6	0.812402	0.81239
0.8	1.00907	1.00907
1	1.08334	1.08333
1.2	0.998403	0.998400
1.4	0.727070	0.727067
1.6	0.251737	0.251733
1.8	-0.435597	-0.4356
2	-1.3332	-1.3332
2.2	-2.43026	-2.43027
2.4	-3.7056	-3.7056
2.6	-5.12893	-5.12893
2.8	-6.66026	-6.66027
3	0	0
3.2	-1.58893	-1.58893
3.4	-3.10827	-3.108266
3.6	-4.4796	-4.47959
3.8	-5.61494	-5.614933
4	-6.41667	-6.41667

مشتق‌گیر

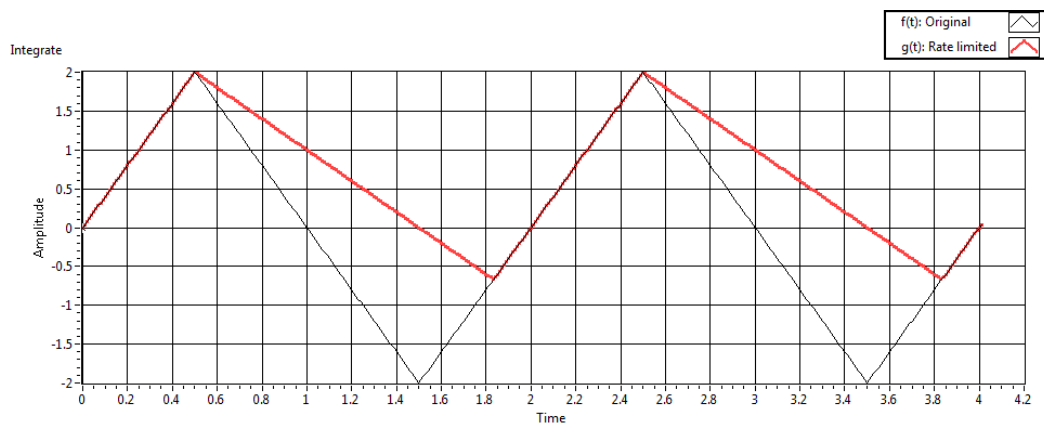
در شبیه‌ساز از مشتق‌گیر در محاسبه توابع تبدیل و کنترلر PID به دفعات در ماژول‌های مختلف استفاده می‌شود. مشتق‌گیر توسعه داده شده از روش مشتق‌گیری برگشتی^{۱۳۱} بهره می‌گیرد. در شکل ۴-۲ نتیجه اعمال تابع مشتق‌گیر بر روی انتگرال تابع چندجمله‌ای بخش قبل نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود خروجی مشتق‌گیر به طور دقیقی با تابع اولیه $f(t)$ برابر است که این نشان از صحت عملکرد مشتق‌گیر دارد.



شکل ۲-۴- نتیجه اعمال تابع مشتق‌گیر بر روی انتگرال تابع $f(t)$

محدود کننده نرخ

وظیفه تابع محدود کننده نرخ همانطور که از نامش پیداست، محدود کردن نرخ افزایش و یا کاهش یک سیگنال است. این تابع در سیستم کنترل و سوپروایزری و درایور موتورهای پیچ بکار می‌رود. شکل ۳-۴ نتیجه اعمال این تابع را بر روی یک سیگنال مثلثی با فرکانس ۰.۵ هرتز نشان می‌دهد. در این مثال مقدار آستانه نرخ افزایشی بر روی ۴ واحد بر ثانیه و مقدار آستانه نرخ کاهشی بر روی ۲ واحد بر ثانیه تنظیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تابع محدود کننده، نرخ کاهشی را بر روی ۲ محدود کرده است.



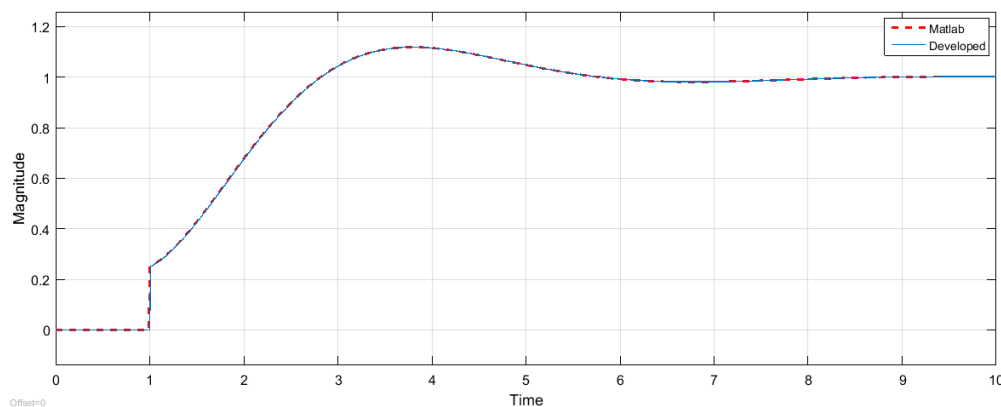
شکل ۳-۴- نتیجه اعمال تابع محدود کننده نرخ

تابع تبدیل

استفاده از توابع تبدیل در مدلسازی ریاضی سیستم‌ها و طراحی سیستم‌های کنترل بسیار مرسوم است. صحت عملکرد این تابع در صحت انجام شبیه‌سازی بسیار تأثیرگذار است. در ادامه نتیجه اعمال یک تابع تبدیل مرتبه ۲ بر روی یک سیگنال پله با استفاده از تابع تبدیل توسعه داده شده برای شبیه‌ساز و تابع تبدیل توسعه داده شده در نرم‌افزار MATLAB با یکدیگر مقایسه می‌گردد. تابع تبدیل را بصورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$TF = \frac{S^2 + 2S + 6}{4S^2 + 5S + 6}$$

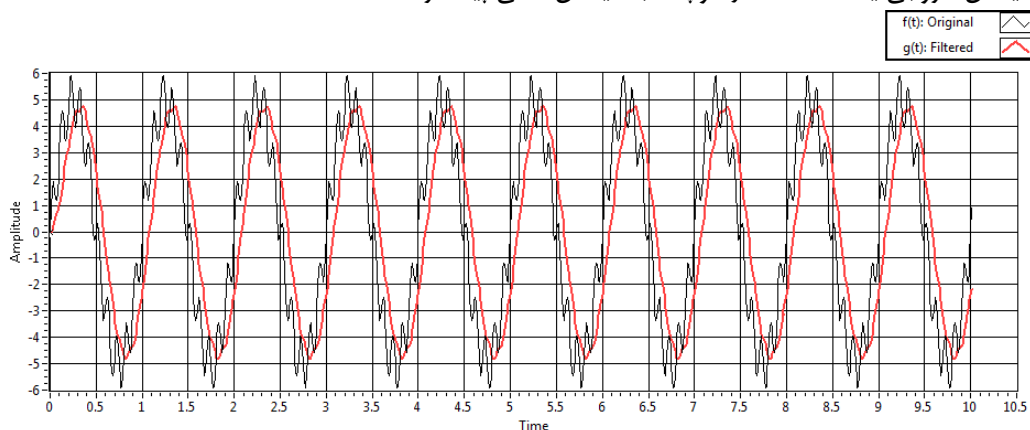
نتایج اعمال تابع تبدیل فوق به سیگنال پله واحد در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج در شبیه‌ساز و نرم‌افزار MATLAB کاملاً بر یکدیگر منطبق می‌باشند.



شکل ۴-۴- نتایج اعمال تابع تبدیل توسعه داده شده در شبیه‌ساز و در نرم‌افزار MATLAB به یک سیگنال پله واحد

فیلتر پایین‌گذر

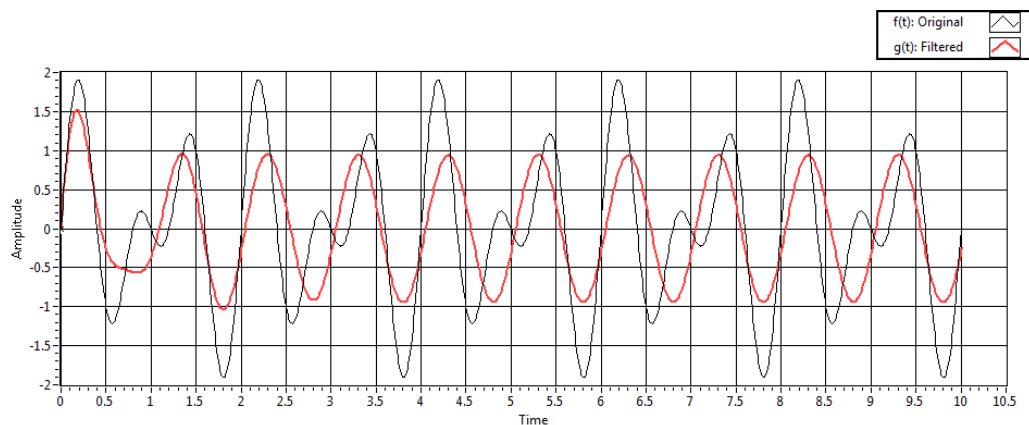
از فیلتر پایین‌گذر در سیستم کنترل و بخش شکل‌دهی سیگنال برای حذف نویز اندازه‌گیری هر یک از سیگنال‌ها استفاده می‌شود. به این منظور از یک تابع تبدیل مرتبه ۲ برای این فیلتر در شبیه‌ساز استفاده شده است. پاسخ این فیلتر به یک سیگنال که از مجموع دو سیگنال سینوسی با فرکانس‌های ۱ و ۱۰ هرتز تشکیل شده است، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در این مثال فرکانس 3db برابر با ۴ هرتز در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال سینوسی فرکانس بالا بخوبی تضعیف شده است، اما سیگنال خروجی یک اختلاف فاز کوچک با سیگنال اصلی پیدا کرده است.



شکل ۴-۵- پاسخ اعمال فیلتر پایین‌گذر

فیلتر ناچ

فیلتر ناچ یا فیلتر حذف فرکانس، یک فرکانس دلخواه را از طیف فرکانسی سیگنال حذف می‌کند. نتیجه اعمال این فیلتر به یک سیگنال حاصل از مجموع دو سیگنال سینوسی با فرکانس‌های ۱.۵ و ۱۰ هرتز در شکل ۴-۶ آورده شده است. فرکانس حذف در این مثال بر روی ۱.۵ هرتز تنظیم شده است و همانطور که دیده می‌شود، فیلتر ناچ بخوبی این فرکانس را حذف کرده است.



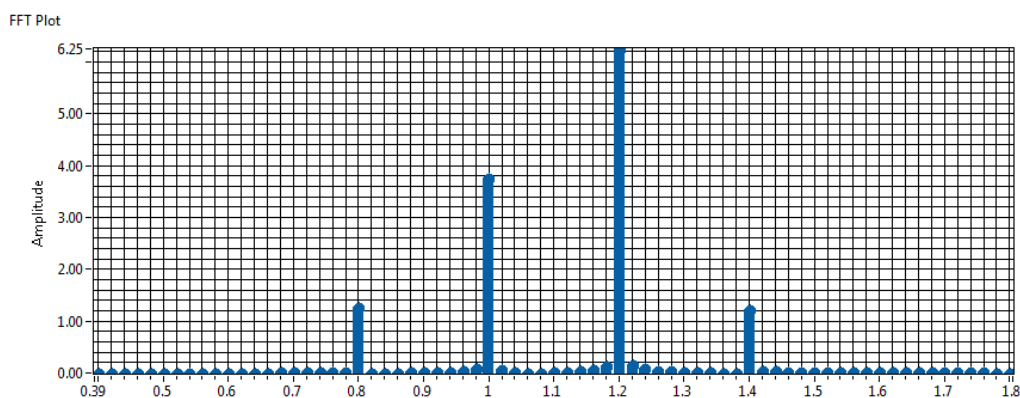
شکل ۶-۴- پاسخ اعمال فیلتر Notch

تبدیل FFT

از تبدیل FFT برای تحلیل فرکانسی یک سیگنال و شناخت طیف فرکانسی و میزان تأثیر فرکانس‌های موجود در آن استفاده می‌شود. به منظور آزمایش درستی عملکرد ماژول نوشته شده در شبیه‌ساز، یک سیگنال حاصل از جمع ۴ سینوسی با فرکانس‌های ۰.۵، ۰.۷۵، ۱ و ۱.۲۵ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$v(t) = \sin(0.8 \times 2\pi t) + 3\sin(1 \times 2\pi t) + 5\sin(1.2 \times 2\pi t) + \sin(1.4 \times 2\pi t)$$

حاصل اعمال تبدیل FFT بر روی سیگنال فوق در شکل ۷-۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تبدیل FFT به درستی فرکانس‌های موجود در طیف فرکانسی سیگنال $v(t)$ را به همراه میزان اهمیت مؤلفه فرکانسی مربوطه مشخص می‌کند.

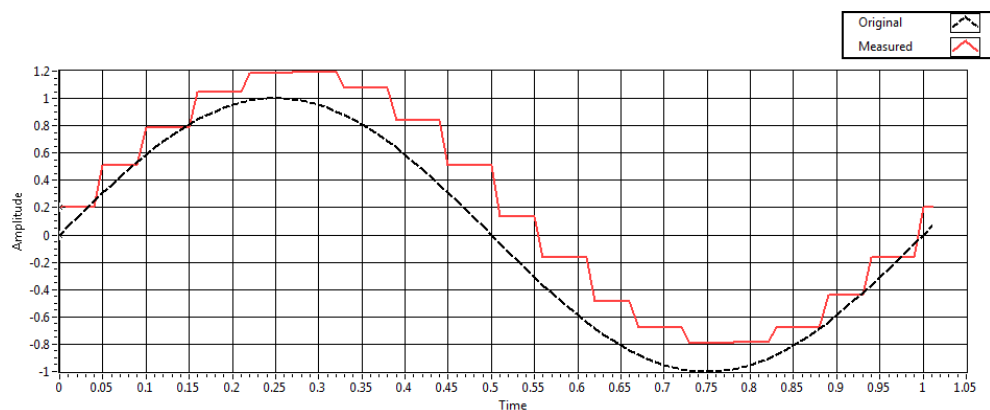


شکل ۷-۴- پاسخ تبدیل FFT بر روی سیگنال $v(t)$

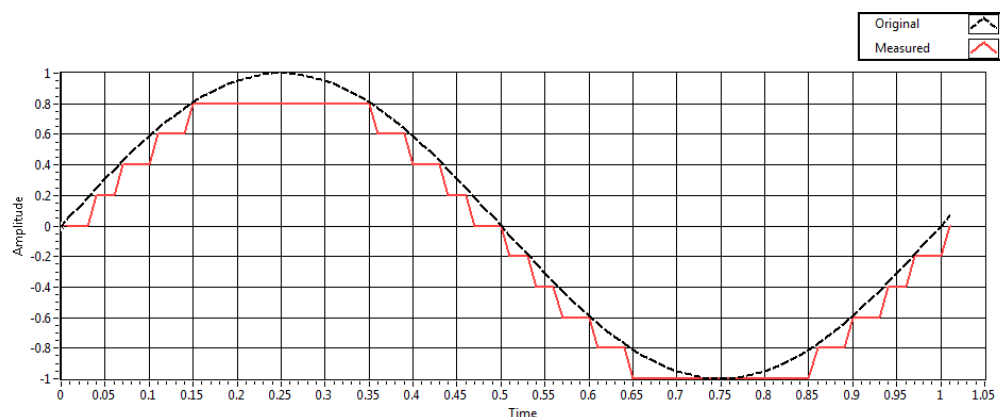
مدل سنسور

فرآیند اندازه‌گیری سنسور باعث ایجاد تغییراتی بر روی سیگنال فیزیکی می‌گردد. این تغییرات بصورت پارامترهای بایاس، دقت اندازه‌گیری، قدرت تفکیک‌پذیری و نرخ نمونه‌برداری مدل می‌شوند. در ادامه به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی پارامترهای فوق، طی ۳ آزمایش تأثیر این پارامترها بر روی سیگنال اندازه‌گیری بررسی می‌گردد. در این آزمایش‌ها یک سیگنال سینوسی با دامنه ۱ و فرکانس ۱ هرتز به عنوان سیگنال مورد اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. در آزمایش اول مقدار بایاس بر روی ۰.۲ و نرخ نمونه‌برداری بر روی ۰.۰۵ ثانیه و باقی پارامترها بر روی ۰ تنظیم شد. نتیجه این آزمون در شکل ۸-۴

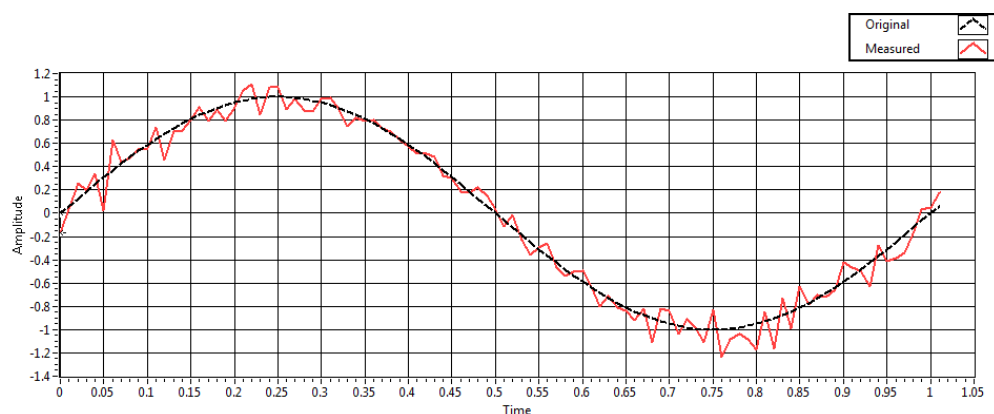
آورده شده است. در آزمایش دوم تمامی پارامترها بر روی صفر تنظیم شد و تنها مقدار پارامتر تفکیک‌پذیری برابر با ۰.۲ در نظر گرفته شد. نتیجه این آزمون نیز در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. در نهایت در آزمون سوم، دقت اندازه‌گیری به صورت پارامتر انحراف از معیار و برابر با $\delta = 0.1$ در نظر گرفته شد. نتیجه اندازه‌گیری حاصل از این پارامتر در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال اندازه‌گیری دارای خطاهایی تصادفی در اطراف مقدار واقعی می‌باشد. با محاسبه انحراف از معیار این خطا عدد 0.1078 بدست می‌آید که تقریباً برابر با دقت در نظر گرفته شده برای سنسور می‌باشد.



شکل ۴-۸- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامترهای بایاس و نرخ نمونه‌برداری به ترتیب برابر با ۰.۲ و ۰.۰۵



شکل ۴-۹- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامتر تفکیک‌پذیری برابر با ۰.۲



شکل ۱۰-۴- نتیجه آزمون اندازه‌گیری با پارامتر دقت اندازه‌گیری برابر با $\delta=0.1$

تعیین مد کاری

یکی از وظایف مهم سیستم سوپروایزری، پایش وضعیت سیستم و متعاقب آن تعیین مد کاری مناسب بر اساس وضعیت موجود می‌باشد. به این منظور به صورت پیوسته سیگنال‌های اندازه‌گیری شده پایش شده و بر اساس آن در هر لحظه شرایط ورود به مدهای کاری که از قبل تعیین شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنانچه شرط ورود به یک مد کاری برآورده گردد، آن مد فعال شده و عملیات برنامه‌ریزی شده مربوط به آن اجرا می‌گردد. در مازول سوپروایزری طراحی شده در شبیه‌ساز توربین بادی، شرایط ورود به یک مد کاری به صورت عبور از یک حد آستانه در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که چنانچه یک سیگنال به اندازه یک بازه زمانی قابل تعریف، از یک حد آستانه قابل تنظیم تجاوز نماید، آن مد فعال می‌گردد.

به منظور آزمایش صحت عملکرد این مازول یک سیگنال سینوسی با دامنه ۵ و فرکانس ۱ هرتز به عنوان سیگنال معیار به مازول سوپروایزری اعمال می‌گردد و در طی چندین آزمون، عملکرد آن بررسی می‌شود. ابتدا ۴ مد کاری: POSH، POSL، NEGL و NEGH تعریف می‌شود که سیگنال خروجی مرجع بسته به مد کاری فعال، به ترتیب یکی از مقادیر $1/25$ ، $3/75$ ، $-1/25$ و یا $-3/75$ را اختیار می‌کند. چنانچه سیگنال معیار دارای مقداری بین ۰ و $2/5$ باشد، مد کاری POSL فعال می‌گردد و چنانچه مقداری بزرگتر از $2/5$ داشته باشد سیستم وارد مد کاری POSH می‌شود. به همین ترتیب بسته به اینکه سیگنال معیار بین ۰ و $-2/5$ باشد و یا کوچکتر از $-2/5$ ، به ترتیب مدهای NEGL و NEGH فعال می‌شود.

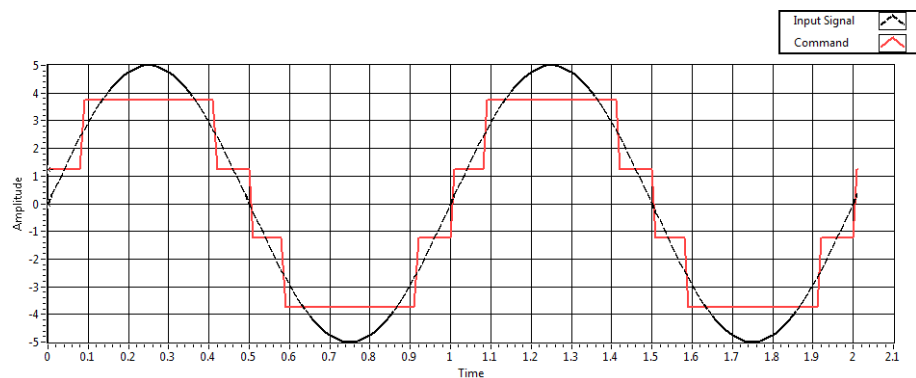
در آزمون اول، مقادیر تاخیر نشانند^{۱۳۲}، t_{ds} ، و تاخیر بازنشانی^{۱۳۳}، t_{dr} ، برای تمامی گذرها برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۱-۴ سیگنال خروجی سیستم را در این حالت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود گذر به مدهای کاری مختلف به درستی و در زمان‌های صحیح صورت گرفته است.

شکل ۱۲-۴ سیگنال خروجی را در حالتی نشان می‌دهد که مقدار تاخیر نشانند برای گذرهای به سطح بالاتر برابر با $0/1$ ثانیه و برای گذرهای به سطح پایین‌تر برابر با $0/2$ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در ابتدا سیستم در مد کاری POSL و سطح خروجی بر روی $1/25$ قرار دارد. در لحظه $0/07$ ، سطح سیگنال معیار به مقدار $2/5$ رسیده و از آن می‌گذرد اما ورود به مد کاری POSH در لحظه $0/17$ یعنی با تأخیری برابر با $0/1$ ثانیه که برابر با تأخیر نشانند تعریف شده می‌باشد صورت می‌گیرد. همچنین سیگنال معیار در ثانیه $0/43$ در حالت کاهشی به مقدار $2/5$ می‌رسد. این در حالی است که تغییر مد کاری به POSL در لحظه $0/63$ و با تأخیری $0/2$ ثانیه‌ای صورت می‌گیرد. این تأخیر برای ورود از مد POSL به مد NEGL نیز قابل مشاهده است.

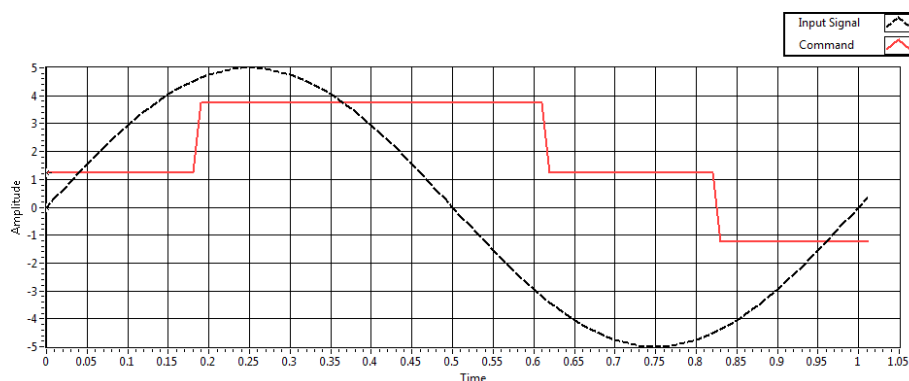
در آزمون سوم که نتیجه آن در شکل ۱۳-۴ آورده شده است، زمان نشانند برای گذراز مد POSL به مد NEGL برابر با $0/51$ ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، گذر از مد POSL به POSH در لحظه $0/8$ و زمانی که سیگنال معیار به مقدار $2/5$ می‌رسد انجام می‌گیرد اما با وجود ورود سیگنال به مقادیر کوچکتر از صفر در لحظه $0/5$ ، از آنجا که در انتهای بازه تأخیر، مقدار سیگنال دوباره مثبت می‌شود، گذر به مد NEGL صورت نمی‌گیرد و سیستم در همان مد POSL باقی می‌ماند.

¹³² Set Delay

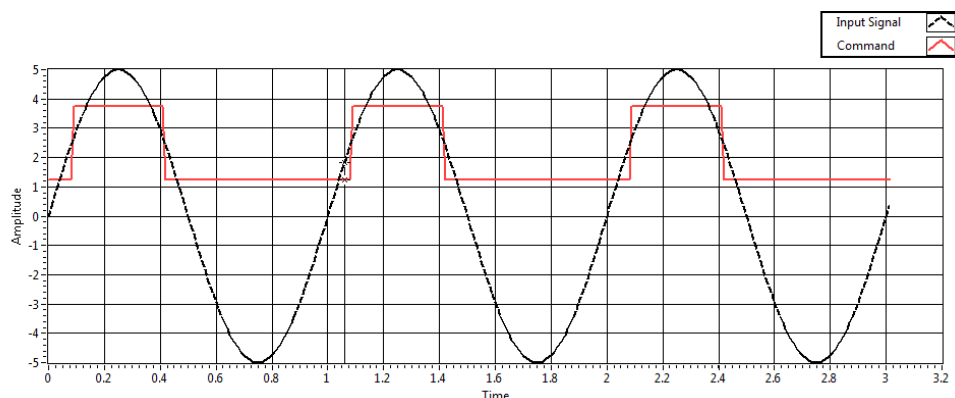
¹³³ Reset Delay



شکل ۱۱-۴- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برابر با $t_{ds}=0$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲-۴- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برای گذرهای رو به بالا برابر با $t_{ds}=0.1$ و برای گذرهای رو به پایین برابر با $t_{ds}=0.2$ در نظر گرفته شده است

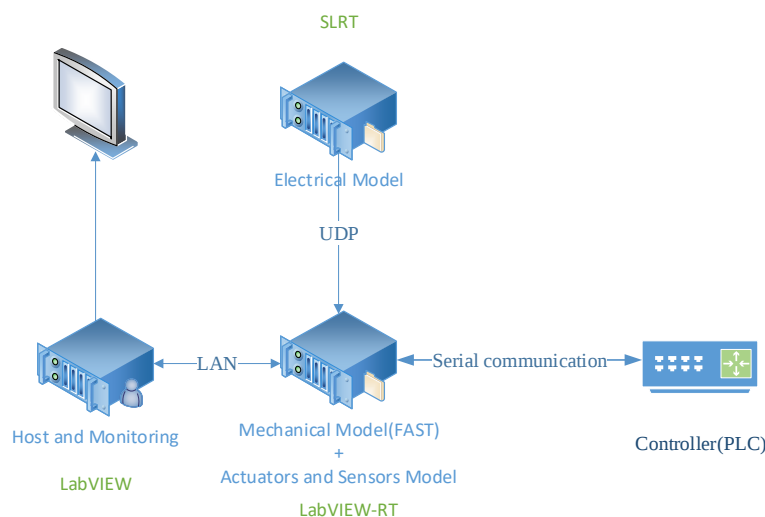


شکل ۱۳-۴- خروجی سوپروایزری در حالتی که زمان نشانیدن برای گذر POSL به NEGL برابر با $t_{ds}=0.51$ در نظر گرفته شود.

۴-۲-۲- ارزیابی ماژول‌های ارتباطی

در بخش قبل توابع ریاضی و منطقی توسعه داده شده برای شبیه‌ساز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. از این توابع در کلیه عملیات محاسباتی مورد نیاز استفاده می‌شود. علاوه بر عملیات محاسباتی، در شبیه‌ساز، عملیات عملکردی دیگری نظیر ارسال و دریافت داده‌ها میان بخش‌های مختلف سخت‌افزاری نظیر کامپیوترهای هدف و PLC کنترل نیز صورت می‌گیرد. صحت انجام این عملیات است که اجرای

موفق یک پروسه سخت‌افزار-در-حلقه را در یک بستر زمان-حقیقی تضمین می‌کند. منظور از صحت اجرای یک عملیات ارتباطی در واقع ارسال و دریافت داده مورد نظر با نرخ مناسب و حداقل تلفات است. شماتیک سخت‌افزاری شبیه‌ساز توربین بادی در شکل ۱۴-۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، شبیه‌ساز از یک میزبان و سه هدف تشکیل شده است: ۱- کنترلر PLC، ۲- کامپیوتر SLRT حاوی مدل سیستم الکتریکی و ۳- کامپیوتر LabVIEW-RT حاوی مدل دینامیکی توربین بادی (کد FAST). برای تبادل داده میان این سه سیستم از دو بستر سریال (RS485) و شبکه (UDP) استفاده می‌شود. بستر سریال به منظور ارسال داده‌های دینامیکی (داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از مدل سنسورها) از کامپیوتر LabVIEW-RT به کنترلر PLC و ارسال فرامین کنترلی از PLC به مدل عملگرها در کامپیوتر LabVIEW-RT به کار می‌رود. ارتباط UDP نیز جهت ارسال گشتاور الکتریکی مرجع و فرامین رخداد خطای الکتریکی از کامپیوتر LabVIEW-RT به کامپیوتر SLRT و دریافت داده‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش به ارزیابی این ارتباطات پرداخته می‌شود.



شکل ۱۴-۴- ساختار سخت‌افزاری شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی

ارتباط سریال

همانطور که گفته شد، به منظور ارسال فرامین کنترلی به مدل عملگرها و همچنین ارسال داده‌های اندازه‌گیری از مدل سنسورها به کنترلر در شبیه‌سازی زمان-حقیقی از ارتباط سریال استفاده می‌شود. بسته داده ارسالی در ارتباط سریال به طول ۳۲ بایت است که ازین میان ۲۴ بایت به داده ارسالی اختصاص می‌یابد. از ۸ بایت باقیمانده، ۲ بایت به پیشوند، ۲ بایت به شمارنده مبدأ، ۲ بایت به شمارنده بازتابی دریافتی از مقصد در آخرین تبادل موفق قبلی، ۱ بایت به جمع کنترلی و در نهایت ۱ بایت به پسوند تعلق می‌گیرد.

در دو سمت ارتباط، در مبدأ و مقصد همواره بافر ورودی در بازه‌های زمانی مشخص بررسی می‌شود. به محض تشخیص عبارت پیشوند (که در اینجا عدد A5A5 است) تعداد ۳۰ بایت بعدی به عنوان بسته ارسالی از سمت دیگر دریافت می‌شود. پس از دریافت بسته، بخش‌های مختلف آن جدا شده و پس از اطمینان از صحت داده ارسال شده، داده مورد نظر در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

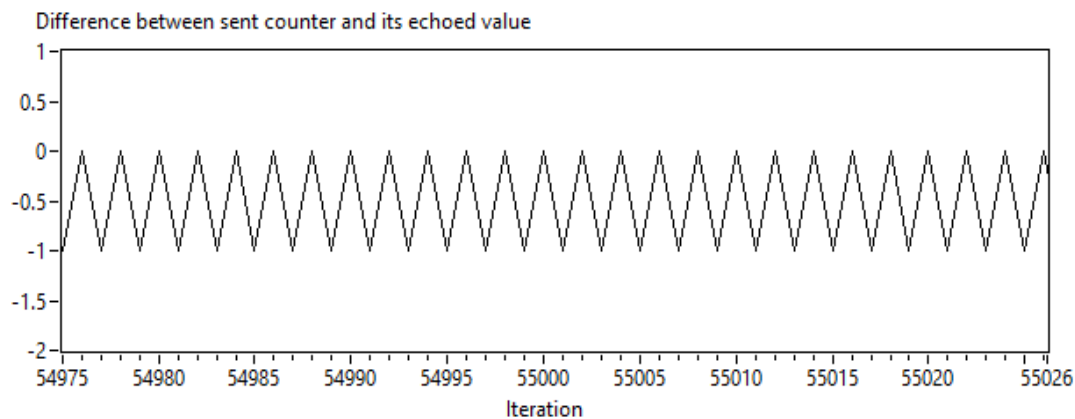
کیفیت ارتباط سریال را می‌توان در هر سمت با مقایسه شمارنده تولید شده در آن لحظه با شمارنده بازتابی از سمت دیگر مورد بررسی قرار داد. هرچه اختلاف میان شمارنده بازتابی با شمارنده تولید شده بیشتر باشد نشان از اتلاف بیشتر داده و کیفیت پایین ارتباط می‌باشد. همچنین می‌توان یک سیگنال

مشخص را در یک سمت ارسال کرد و در سمت دیگر سیگنال دریافتی را بازتاب داد و با مقایسه دو سیگنال ارسالی و دریافتی در سمت نخست، پارامترهای کیفی همچون بیشترین نرخ دریافت داده صحیح، میزان تاخیر در دریافت یک داده و میزان از دست داده داده را به دست آورد.

به این ترتیب به منظور بررسی کیفیت ارتباط سریال، با اتصال PLC کنترل به کامپیوتر هدف توسط یک کابل سریال مناسب، مازول ارتباط سریال به کار رفته در شبیه‌ساز توربین بادی در حالت زمان-حقیقی اجرا می‌گردد. در این مازول عملیات ارسال و دریافت داده درون یک حلقه بطور پیوسته انجام می‌گردد. در این آزمایش یک سیگنال سینوسی با فرکانس ۱ هرتز در جایگاه اولین داده از بسته ارسالی قرار گرفته و فرستاده می‌شود. در سمت PLC این داده از بسته دریافتی استخراج شده و درون یک بسته جدید به سمت کامپیوتر هدف ارسال می‌گردد. در نهایت در کامپیوتر هدف مقدار داده ارسالی با مقدار دریافتی مقایسه می‌گردد.

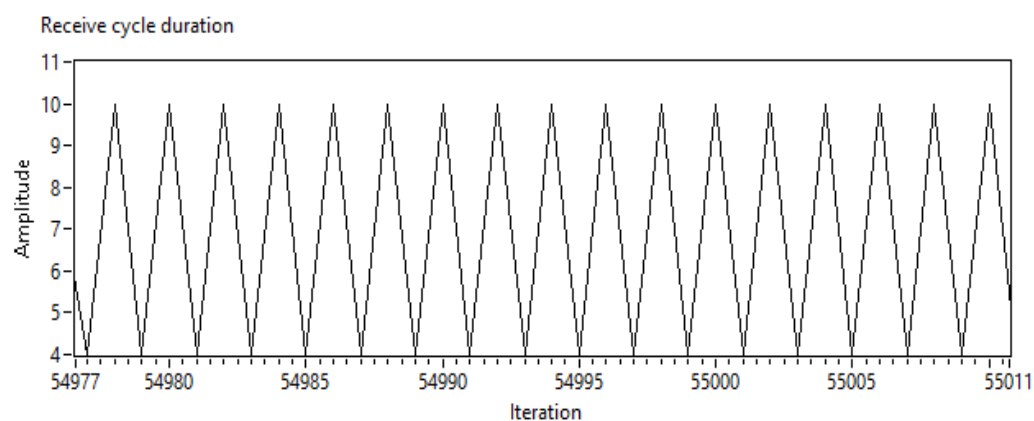
اختلاف میان شمارنده ارسالی با شمارنده بازگشتی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این اختلاف میان صفر و یک متغیر است. به این معنی که در هر دو سیکل کاری، یک تبادل داده صورت می‌گیرد. این امر در شکل ۴-۱۶ نیز مشخص است. در این شکل، زمان مصرف شده در هر سیکل دریافت داده نشان داده شده است. مطابق شکل این زمان در یک سیکل برابر با ۴ میلی ثانیه و در سیکل بعد ۱۰ میلی ثانیه است. در حقیقت، در سیکل اول که ۴ میلی ثانیه طول می‌کشد، روند ارسال و دریافت داده به درستی صورت می‌گیرد اما در سیکل دوم داده‌ای از مقصد ارسال نشده و دریافت کننده پس از گذشت زمان مهلت^{۱۳۴} همان داده قبل را در اختیار قرار می‌دهد که این امر به طولانی شدن این سیکل می‌انجامد.

شکل ۴-۱۷ سیگنال سینوسی ارسالی و سیگنال بازگشتی را نشان می‌دهد. در این شکل نیز منظم بودن تبادل داده و عدم رخداد پرش و داده نامربوط در داده‌های دریافتی مشهود است. با بزرگنمایی این شکل در شکل ۴-۱۸ می‌توان میزان تاخیر و نرخ دریافت داده صحیح را بدست آورد.

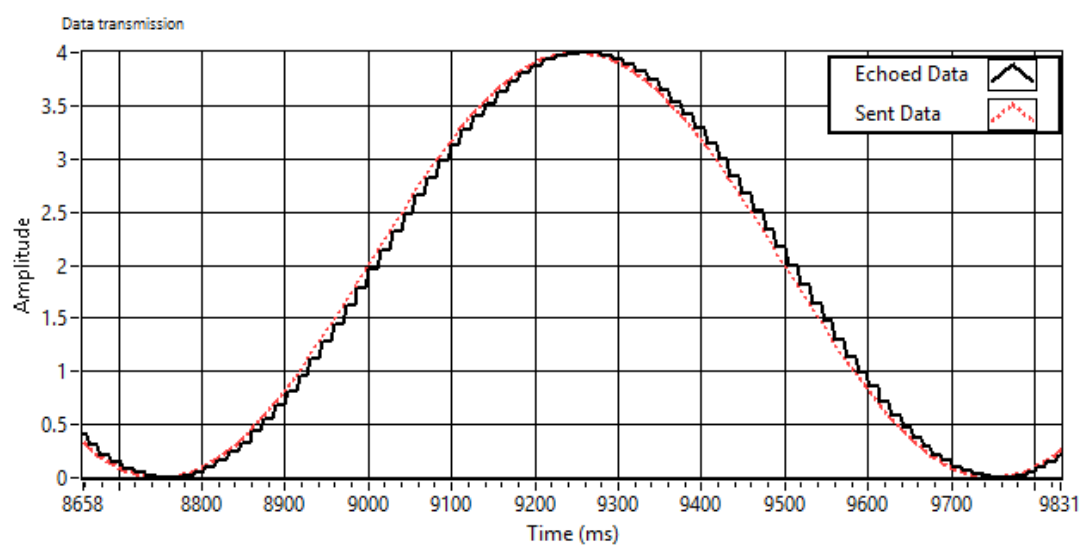


شکل ۴-۱۵- اختلاف میان شمارنده ارسالی و شمارنده بازتابی

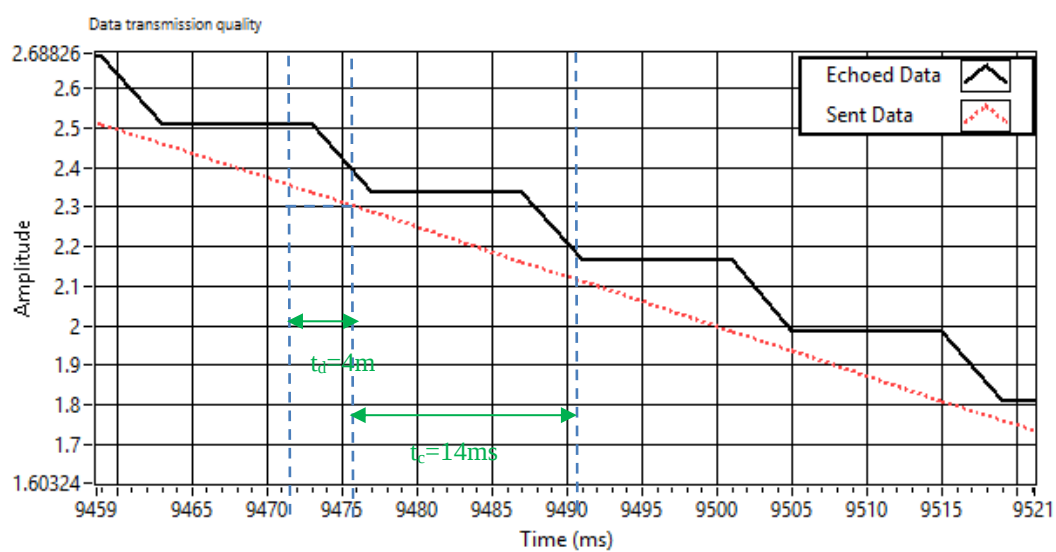
¹³⁴ Timeout



شکل ۱۶-۴- مدت زمان انجام تبادل داده در هر سیکل از اجرا



شکل ۱۷-۴- سیگنال سینوسی ارسالی و سیگنال بازگشتی



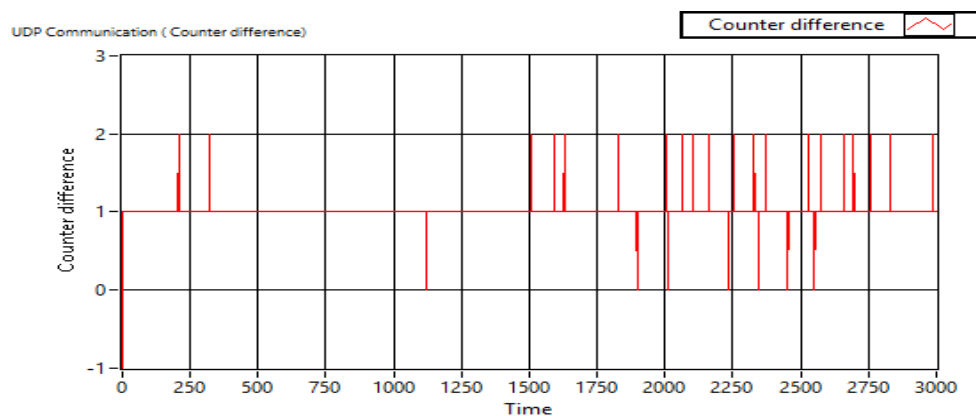
شکل ۱۸-۴- نمای بزرگ شده از سیگنال‌های سینوسی ارسالی و بازگشتی

همانطور که در شکل ۱۸-۴ دیده می‌شود، در هر ۱۴ میلی ثانیه یک داده جدید دریافت می‌شود که این داده متناظر با داده ارسالی در زمان ۴ میلی ثانیه قبل است. به این ترتیب بیشترین نرخ تبادل داده را می‌توان در حدود ۷۰ هرتز در نظر گرفت.

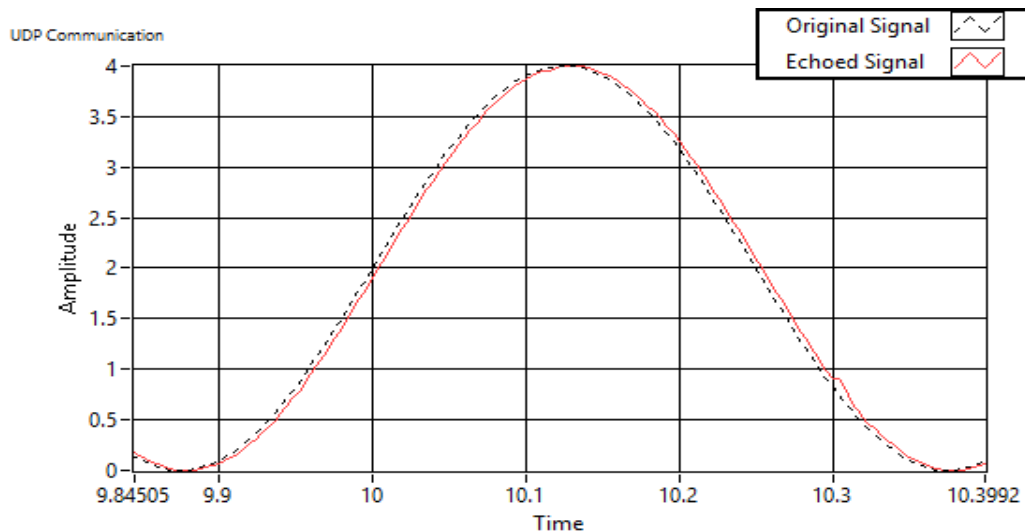
ارتباط UDP

ارتباط UDP در بستر شبکه برای ارتباط کامپیوترهای SLRT و LabVIEW-RT به کار می‌رود. در این ارتباط بسته‌های ارسالی از سمت LabVIEW-RT به SLRT به طول ۲۰۰ بایت می‌باشند. دو داده اول در این بسته‌ها به ترتیب شمارنده مبدا و شمارنده بازگشتی است و طول هر داده نیز برابر با ۴ بایت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در اینجا نیز همانند ارتباط سریال می‌توان با مقایسه شمارنده تولیدی و شمارنده بازتابی به کیفیت ارتباط پی برد. با انجام یک آزمایش، نتیجه حاصل از اختلاف شمارنده ارسالی و شمارنده بازتابی در شکل ۱۹-۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود به طور میانگین اختلاف دو شمارنده برابر با ۱ است که این نشان از یک ارتباط مناسب بدون از دست دادن زیاد داده دارد.

همانند آزمایش مربوط به ارتباط سریال، در این آزمایش نیز یک سیگنال سینوسی با فرکانس ۲ هرتز در سمت کامپیوتر هدف LabVIEW-RT ساخته شده و توسط ارتباط UDP به کامپیوتر SLRT ارسال می‌گردد. در سمت SLRT این سیگنال دریافت شده و بلافاصله به سمت LabVIEW-RT ارسال می‌شود. مقایسه این سیگنال بازتابی در سمت فرستنده اولیه یعنی کامپیوتر LabVIEW-RT با سیگنال اصلی در شکل ۲۰-۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که سیگنال سینوسی بازتابی با دقت خوبی مشابه به سیگنال سینوسی اصلی است. تنها یک تاخیر به اندازه ۴ میلی ثانیه برابر با ثابت زمانی اجرا در این شکل مشهود است که این طبیعی است چراکه حداقل یک سیکل میان ارسال سیگنال و دریافت آن فاصله است.



شکل ۱۹-۴- اختلاف شمارنده ارسالی با شمارنده بازتابی در یک ارتباط UDP



شکل ۲۰-۴- مقایسه سیگنال سینوسی ارسالی و سیگنال بازتابی

۴-۳- شبیه‌سازی توربین‌های بادی معیار

در فصل گذشته مازول‌ها و توابع اصلی به کار گرفته شده در شبیه‌ساز توربین بادی به طور مجزا مورد ارزیابی قرار گرفت و صحت عملکرد هر یک با انجام آزمایش بررسی گردید. جدای از ارزیابی صحت عملکرد تک تک اجزاء، بررسی عملکرد مجموعه این اجزاء در کنار یکدیگر در سناریوهای مختلف نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور سه توربین بادی مختلف شامل توربین‌های NREL5MW، CART2 و WENRI87 توسط شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی هر یک با نتایج موجود مقایسه می‌گردد.

۴-۳-۱- شبیه‌سازی توربین NREL 5MW

توربین NREL 5MW مدلی از یک توربین سه پره خارج از خشکی است که توسط شرکت NREL به منظور انجام تحقیقات در زمینه توربین‌های خارج از خشکی توسعه داده شده است [۲]. بیشترین الهام در طراحی مدل این توربین که از مشخصه سرعت متغیر و پیچ متغیر برخوردار است، از توربین آلمانی REpower 5M گرفته شده است. هر چند که در مواردی از خصوصیات مدل‌های مفهومی توربین‌های WindPACT، RECOFF و DOWEC نیز در طراحی مدل NREL 5MW استفاده شده است. در این شبیه‌سازی پس از پیاده‌سازی مدل توربین فوق بر روی شبیه‌ساز توسعه داده شده، رفتار توربین تحت بادهای مختلف رصد شده و با داده‌های ارائه شده توسط شرکت NREL مقایسه می‌گردد. به این ترتیب در ادامه ابتدا به چگونگی پیاده‌سازی مدل توربین بادی فوق توسط رابط کاربری شبیه‌ساز پرداخته می‌شود، سپس با اجرای شبیه‌سازی، صحت نتایج حاصل بررسی می‌گردد.

پیاده‌سازی مدل توربین بادی NREL5MW بر روی شبیه‌ساز

برای مدل‌سازی توربین بادی NREL 5MW در شبیه‌ساز زمان-حقیقی توربین بادی نیاز به پارامترهای مختلف مکانیکی پره، برج و درایوترین و همچنین پارامترهای آیرودینامیکی بخش‌های مختلف برج و پره می‌باشد. این پارامترها در قالب فایل‌های متن توسط شرکت NREL به منظور استفاده در کد FAST ارائه شده است [۲]. فهرست فایل‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی مدل توربین NREL5MW در

جدول ۲-۴ آورده شده است. محتوی هر یک از این فایل‌ها در مرجع [۲] و همچنین برای دسترسی راحت‌تر در بخش پیوست (الف) گزارش آورده شده است. از آنجا که در شبیه‌ساز حاضر، از کد FAST برای مدلسازی استفاده می‌شود، براحتی می‌توان این فایل‌ها را در شبیه‌ساز به کار برد و مدل توربین بادی را پیاده کرد.

جدول ۲-۴- فهرست فایل‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی توربین بادی NREL 5MW

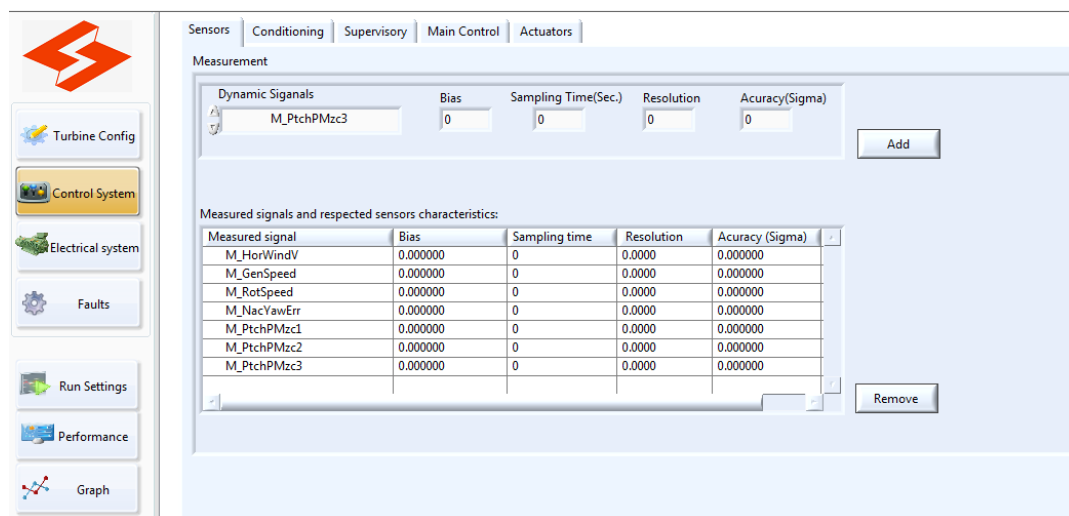
توضیحات	عنوان فایل ورودی	
مشخصات دینامیکی پره	NRELOffshrBslne5MW_Blade.dat	۱
مشخصات دینامیکی برج	NRELOffshrBslne5MW_Tower_Onshore.dat	۲
تنظیمات آیرودینامیکی	NRELOffshrBslne5MW_AeroDyn.ipt	۳
مشخصات ایرفویل پره	Cylinder1.dat	۴
مشخصات ایرفویل پره	Cylinder2.dat	۵
مشخصات ایرفویل پره	DU40_A17.dat	۶
مشخصات ایرفویل پره	DU35_A17.dat	۷
مشخصات ایرفویل پره	DU30_A17.dat	۸
مشخصات ایرفویل پره	DU25_A17.dat	۹
مشخصات ایرفویل پره	DU21_A17.dat	۱۰
مشخصات ایرفویل پره	NACA64_A17	۱۱
فایل ورودی FAST	*.fst	۱۲

پس از پیاده‌سازی مدل توربین بادی NREL5MW بر روی شبیه‌ساز در بخش “Turbine Config”، برای اجرای شبیه‌سازی نیاز به تنظیم سیستم کنترل می‌باشد. لازم به ذکر است که در ادامه از اطلاعات جدول ۳-۴ از مرجع [۲] در طراحی سیستم کنترل استفاده می‌شود. همچنین در اینجا از ساختار تعریف شده در شبیه‌ساز به منظور تعریف بخش‌های مختلف سیستم کنترل نظیر سنسورها، فیلترها، سوپروایزری و... استفاده می‌شود. به این ترتیب، در صفحه تنظیمات کنترلرهای اصلی و در بخش “Control Place” گزینه “Defined Structure” انتخاب می‌گردد.

برای مدل‌سازی سیستم کنترل ابتدا باید سیگنال‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری انتخاب و مدل شوند. این کار در بخش “Sensors” صورت می‌گیرد. در این بخش، از سنسورهای ایده‌آل برای اندازه‌گیری سیگنال‌های مورد نظر استفاده می‌شود. به عبارت دیگر در تعریف سنسورها، تمامی پارامترهای سنسور برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. سیگنال‌های مورد نظر شامل سرعت باد، سرعت ژنراتور، زوایای پیچ و زاویه یاو می‌باشند. شکل ۲۱-۴ فهرست سیگنال‌ها و مشخصات سنسورهای مربوطه را در قالب جدول تکمیل شده در رابط کاربری شبیه‌ساز نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴- پارامترهای طراحی سیستم کنترل توربین NREL 5MW [۲]

Corner Frequency of Generator-Speed Low-Pass Filter	0.25 Hz
Peak Power Coefficient	0.482
Tip-Speed Ratio at Peak Power Coefficient	7.55
Rotor-Collective Blade-Pitch Angle at Peak Power Coefficient	0.0 °
Generator-Torque Constant in Region 2	0.0255764 N•m/rpm ²
Rated Mechanical Power	5.296610 MW
Rated Generator Torque	43,093.55 N•m
Transitional Generator Speed between Regions 1 and 1½	670 rpm
Transitional Generator Speed between Regions 1½ and 2	871 rpm
Transitional Generator Speed between Regions 2½ and 3	1,161.963 rpm
Generator Slip Percentage in Region 2½	10 %
Minimum Blade Pitch for Ensuring Region 3 Torque	1 °
Maximum Generator Torque	47,402.91 N•m
Maximum Generator Torque Rate	15,000 N•m/s
Proportional Gain at Minimum Blade-Pitch Setting	0.01882681 s
Integral Gain at Minimum Blade-Pitch Setting	0.008068634
Blade-Pitch Angle at which the Rotor Power Has Doubled	6.302336 °
Minimum Blade-Pitch Setting	0 °
Maximum Blade-Pitch Setting	90 °
Maximum Absolute Blade Pitch Rate	8 °/s
Equivalent Blade-Pitch-Actuator Linear-Spring Constant	971,350,000 N•m/rad
Equivalent Blade-Pitch-Actuator Linear-Damping Constant	206,000 N•m/rad/s



شکل ۲۱-۴- صفحه مربوط به تنظیمات سنسورهای اندازه‌گیری در رابط کاربری شبیه‌ساز

پس از انتخاب سیگنال‌های اندازه‌گیری، در بخش شکل‌دهی سیگنال، از یک فیلتر میانگین‌گیری با مقدار میانگین ۱۰ ثانیه برای سیگنال باد و فیلترهای پایین‌گذر بر روی باقی سیگنال‌ها استفاده می‌شود. فرکانس 3db برای سیگنال سرعت ژنراتور برابر با ۰/۲۵ هرتز و برای سایر سیگنال‌ها برابر با ۱ هرتز در نظر گرفته می‌شود. فهرست این سیگنال‌ها و مشخصات فیلترهای مربوطه در قالب جدول تکمیل شده در رابط کاربری شبیه‌ساز در شکل ۲۲-۴ نشان داده شده است.

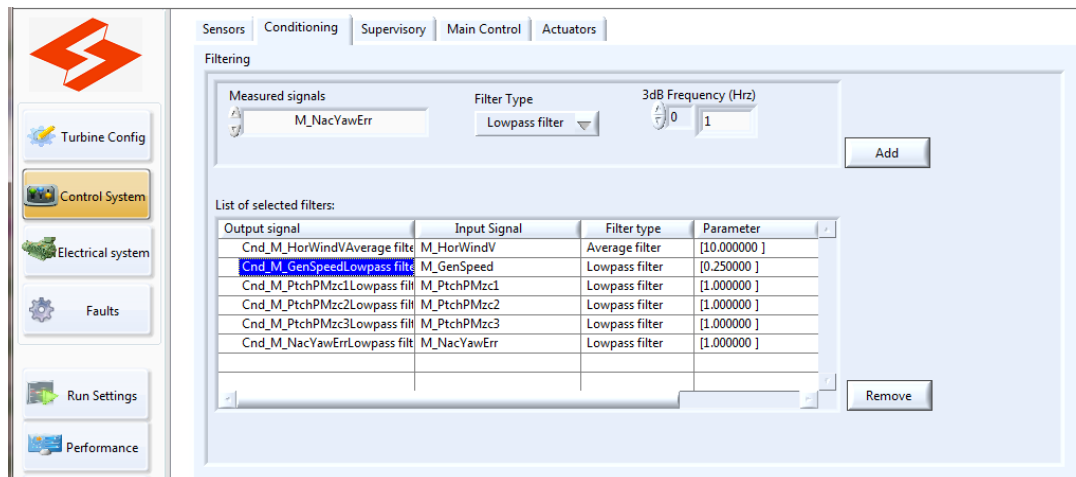
بعد از طراحی و انتخاب فیلترهای مورد نظر، نوبت به طراحی سیستم سوپروایزری می‌رسد. از آنجا که هدف در اینجا مقایسه پاسخ حالت پایدار توربین به ازای سرعت‌های باد مختلف است، جهت کاهش پیچیدگی، تنها ۴ حالت برای سیستم سوپروایزری در نظر گرفته می‌شود: ۱- حالت آماده به کار

(Standby)، ۲- حالت افزایش سرعت (Speed Up)، ۳- حالت توان‌گیری و ۴- حالت ترمز. در حالت آماده به کار، زاویه پره‌ها بر روی ۹۰ درجه قرار گرفته و کنترلر پیچ غیر فعال است. این حالت زمانی فعال است که سرعت باد کمتر از سرعت Cut Off یعنی ۳ متر بر ثانیه باشد. به محض افزایش سرعت باد به بالای ۳ متر بر ثانیه، توربین وارد مرحله افزایش سرعت شده و به منظور افزایش سرعت چرخش روتور، زاویه مرجع پیچ بر روی ۰ درجه قرار می‌گیرد. در این حالت سرعت مرجع ژنراتور بر روی ۶۸۰ دور در دقیقه که حداقل سرعت لازم برای شروع پروسه توان‌گیری از ژنراتور است، تنظیم می‌گردد. با رسیدن سرعت ژنراتور به مقدار ۶۸۰ دور در دقیقه، توربین وارد مرحله تولید توان شده و ژنراتور وارد مدار می‌شود. به این منظور سیگنال فرمان به سوئیچ اتصال ژنراتور در این حالت فعال می‌گردد. همچنین سرعت مرجع ژنراتور در این حالت بر روی مقدار نامی ۱۷۳/۸ دور در دقیقه تنظیم می‌شود. در نهایت در حالت ترمز، زاویه مرجع پیچ پره‌ها بر روی مقدار ۹۰ درجه و سرعت مرجع ژنراتور بر روی ۰ دور در دقیقه تنظیم می‌گردد. شکل ۲۳-۴ نمونه تکمیل شده صفحه سوپروایزری از رابط کاربری شبیه‌ساز را نشان می‌دهد.

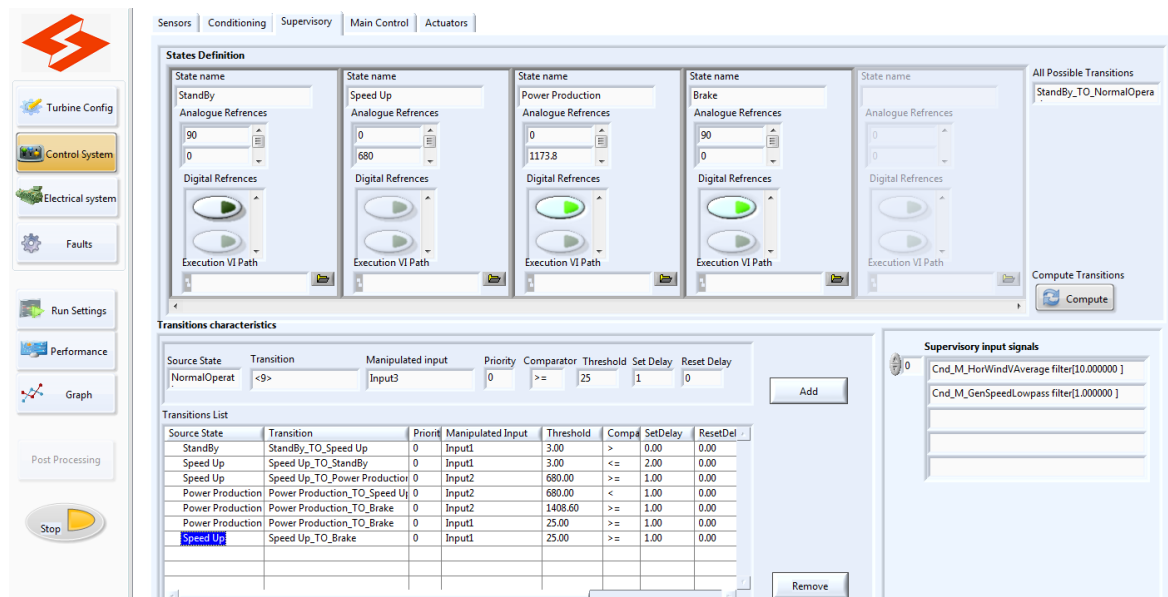
در مرجع [۲] برای کنترلر پیچ از یک کنترلر PI با ضرایب جدول‌بندی شده و برای کنترلر گشتاور از رابطه گشتاور ماکزیمم، که یک رابطه غیرخطی میان سرعت ژنراتور و گشتاور الکتریکی مرجع است، استفاده می‌شود. به این ترتیب از آنجا که این دو کنترلر با ساختار تعریف‌شده در شبیه‌ساز همخوانی دارد، در بخش تنظیمات این دو کنترلر در قسمت انتخاب نوع کنترلر، به ترتیب گزینه‌های "PID with Gain" و "Scheduling" و "LookUp Table" انتخاب می‌گردند. ضرایب PID و مقادیر ماکزیمم و مینیمم زاویه و سرعت پیچ طبق جدول ۳-۴ تنظیم شده و مقادیر پارامترهای جدول‌بندی از رابطه

$$G_k(\theta) = \frac{1}{1 + \frac{\theta}{\theta_k}}$$

محاسبه می‌شود [۲]. در این رابطه θ زاویه پیچ است و θ_k برابر با ۶/۳ درجه در نظر گرفته می‌شود.



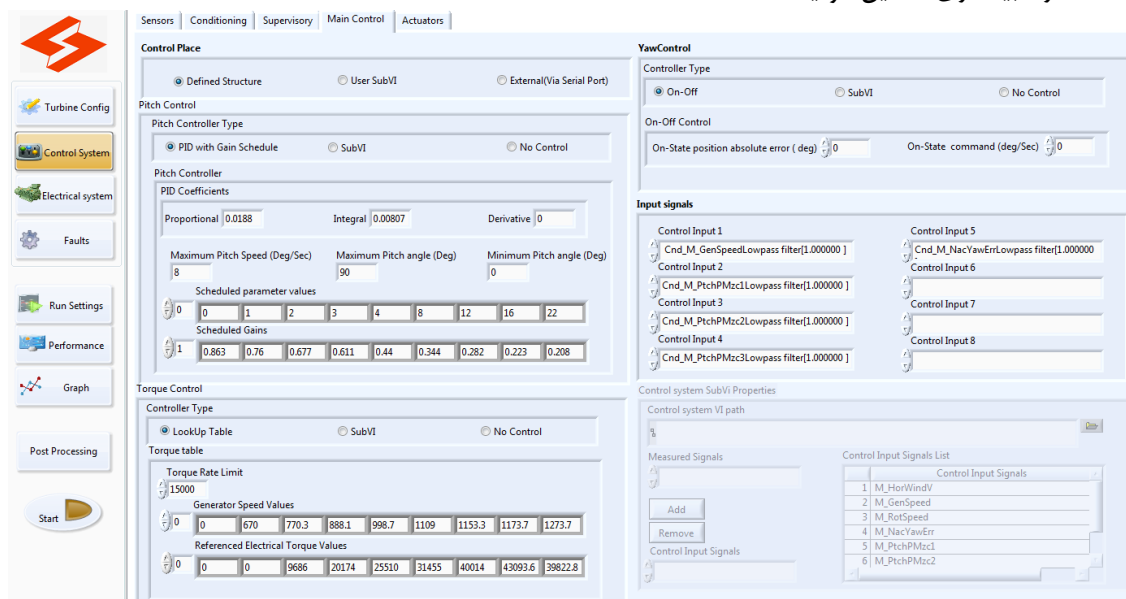
شکل ۲۳-۴ صفحه مربوط به تنظیمات فیلترهای مورد استفاده در شکل‌دهی سیگنال‌های اندازه‌گیری در رابط کاربری شبیه‌ساز



شکل ۲۳-۴- صفحه مربوط به تنظیمات سیستم سوپروایزری در رابط کاربری شبیه‌ساز

برای مقادیر جدول گشتاور-سرعت نیز از رابطه $T(\omega) = k \omega^2$ برای سرعت‌های میان ۸۷۱ و ۱۱۶۱/۹۶ دور در دقیقه استفاده می‌شود. برای بازه‌های ۶۷۰ تا ۸۷۱ دور در دقیقه و ۱۱۶۱/۹۶ تا ۱۱۷۳/۸ دور در دقیقه مقدار گشتاور به صورت خطی تغییر می‌کند به طوری که در سرعت نامی ۱۱۷۳/۸ دور در دقیقه، میزان گشتاور نامی یعنی ۴۳۰۹۳/۵ نیوتن متر حاصل می‌گردد. صفحه مربوط به تنظیم مقادیر کنترلرهای اصلی در رابط کاربری شبیه‌ساز، در شکل ۲۴-۴ نشان داده شده است.

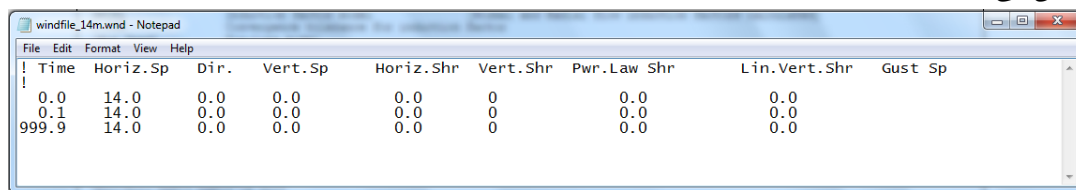
لازم به ذکر است که مدل عملکرد پیچ نیز بصورت یک مدل مرتبه دوم با فرکانس طبیعی برابر با ۱/۲ هرتز و ضریب میرایی برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد. به این ترتیب مدل کاملی از یک سیستم کنترل شامل تمامی زیرسیستم‌های اندازه‌گیری، شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری، کنترلرها و عملگرها جهت استفاده در شبیه‌سازی تشکیل گردید.



شکل ۲۴-۴- صفحه مربوط به تنظیمات پارامترهای کنترلرهای پیچ و گشتاور در رابط کاربری شبیه‌ساز

اجرای شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

پس از پیاده‌سازی مدل توربین بادی NREL5MW و تنظیم پارامترهای کنترلی در بخش قبل، شبیه‌ساز برای اجرای سناریوهای شبیه‌سازی آماده است. سناریو مورد آزمایش در اینجا، اعمال بادهای ثابت با سرعت‌های مختلف به توربین بادی و مقایسه پاسخ حالت پایدار توربین شامل پارامترهای سرعت روتور، زاویه پیچ، گشتاور و توان الکتریکی و خمش پره‌ها با مقادیر ذکر شده در مرجع [۲] است. به این ترتیب ابتدا پروفایل‌های بادهای ثابت با سرعت‌های از ۳ متر بر ثانیه تا ۲۵ متر بر ثانیه تعریف گردید. هر یک از این پروفایل‌ها به صورت یک فایل متن است که توسط کد FAST دریافت شده و در محاسبات آیرودینامیکی نیروها و گشتاورها به کار می‌رود. شکل ۲۵-۴ نمونه‌ای از یک پروفایل باد ثابت با سرعت ۱۴ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.



Time	Horiz.Sp	Dir.	Vert.Sp	Horiz.Shr	Vert.Shr	Pwr.Low Shr	Lin.Vert.Shr	Gust Sp
0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
0.1	14.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0
999.9	14.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0

شکل ۲۵-۴- نمونه یک فایل باد غیر توربولانسی با سرعت افقی ۱۴ متر بر ثانیه

نتایج حالت پایدار پارامترهای مختلف حاصل از اجرای شبیه‌سازی به ازای پروفایل‌های باد گوناگون، در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴- مقادیر حالت پایدار متغیرهای مختلف توربین بادی به ازای بادهای ثابت با سرعت ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه

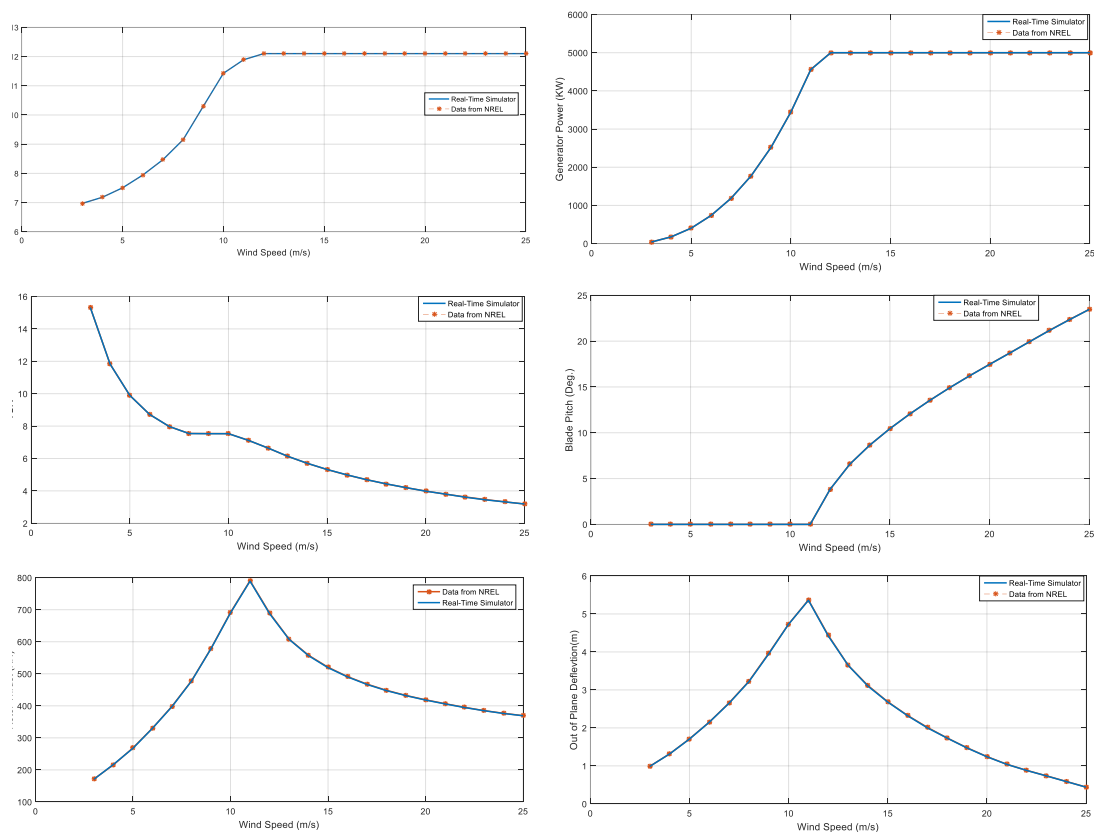
Wind Speed	GenSP	RotPwr	GenPwr	RotThrust	RotTorq	RotSpeed	BldPitch1	GenTq	TSR	OoPDefl1	IPDefl1	TTDspFA
3	676.37	42.53	40.3796	170.809	58.243	6.973	0	0.604	15.32	0.986	-0.065	0.016
4	696.74	187.6	177.0566	217.22	249.43	7.183	0	2.58	11.83	1.315	-0.1	0.034
5	728.16	427.63	404.0037	267.5	543.28	7.507	0	5.61	9.896	1.705	-0.1415	0.055
6	770.36	780.93	737.5916	329.9	939.19	7.942	0	9.68	8.724	2.15	-0.192	0.08
7	821.47	1257.53	1186.938	397.55	1417.8	8.469	0	14.61	7.974	2.65	-0.25	0.107
8	887.75	1875.67	1770.529	477.22	1957.26	9.152	0	20.172	7.54	3.22	-0.3165	0.138
9	998.55	2666.25	2516.836	578.3	2473.1	10.294	0	25.49	7.53	3.95	-0.391	0.178
10	1108.47	3649.28	3445.279	689.95	3050.1	11.427	0	31.44	7.53	4.73	-0.4705	0.222
11	1153.2	4832.2	4557.726	789.15	3877.5	11.89	0	39.977	7.124	5.36	-0.561	0.261
12	1173.84	5297.34	5000.245	687.82	4179.9	12.101	3.837	43.093	6.647	4.42	-0.7113	0.222
13	1173.84	5297.34	5000.245	607.67	4179.9	12.101	6.598	43.093	6.136	3.65	-0.7367	0.19
14	1173.84	5297.34	5000.245	556.45	4179.9	12.101	8.673	43.093	5.7	3.1	-0.7193	0.17
15	1173.84	5297.34	5000.245	518.91	4179.9	12.101	10452	43.093	5.32	2.68	-0.7033	0.155
16	1173.84	5297.34	5000.245	490.21	4179.9	12.101	12.054	43.093	4.99	2.32	-0.6703	0.144
17	1173.84	5297.34	5000.245	466.55	4179.9	12.101	13.533	43.093	4.69	2	-0.6213	0.135
18	1173.84	5297.34	5000.245	447.34	4179.9	12.101	14.92	43.093	4.43	1.73	-0.5691	0.127
19	1173.84	5297.34	5000.245	431.68	4179.9	12.101	16.22	43.093	4.2	1.47	-0.5192	0.121
20	1173.84	5297.34	5000.245	417.96	4179.9	12.101	17.46	43.093	3.98	1.24	-0.4658	0.116
21	1173.84	5297.34	5000.245	405.92	4179.9	12.101	18.682	43.093	3.8	1.04	-0.4065	0.112
22	1173.84	5297.34	5000.245	394.62	4179.9	12.101	19.93	43.093	3.61	0.88	-0.3537	0.108
23	1173.84	5297.34	5000.245	384.75	4179.9	12.101	21.16	43.093	3.45	0.735	-0.3063	0.104
24	1173.84	5297.34	5000.245	376.065	4179.9	12.101	22.33	43.093	3.32	0.587	-0.2558	0.101
25	1173.84	5297.34	5000.245	368.95	4179.9	12.101	23.465	43.093	3.19	0.4395	-0.1941	0.098

در شکل ۲۶-۴ مقادیر تعدادی از پارامترهای جدول فوق، به ازای بادهای مختلف به همراه مقادیر ارائه شده توسط شرکت NREL در مرجع [۲] رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر پارامترهای حاصل از اجرای شبیه‌ساز حاضر، با دقت بسیار خوبی با مقادیر مرجع منطبق است. تنها مقدار پارامتر

انحراف برج با یک ضریب $1/5$ با مقدار مرجع تفاوت دارد. این تفاوت می‌تواند بر اثر تفاوت در مدل پلتفرم باشد. چرا که در شبیه‌سازی حاضر به دلیل مشخص نبودن مدل پلتفرم، مدل آن از محاسبات کد FAST حذف شده است.

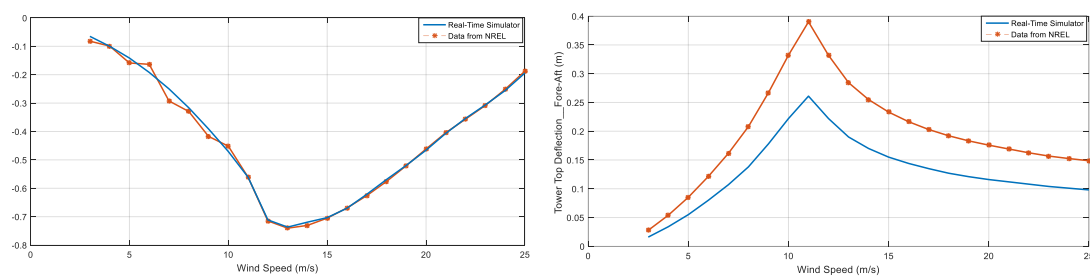
۲-۳-۴- شبیه‌سازی توربین CART 2

مرکز ملی تکنولوژی بادی آمریکا^{۱۳۵} به منظور انجام تحقیقات بر روی کنترل توربین‌های بادی، اقدام به نصب و تجهیز دو توربین بادی CART^{۱۳۶} با عناوین CART2 و CART3 نموده است. این توربین‌ها از تغییر و اصلاح توربین‌های ۶۰۰ کیلوواتی Westinghouse WTG-600 ساخته شدند. به عنوان مثال سیستم پیچ ابتدایی این توربین‌ها بصورت هیدرولیکی بود که در ساختار جدید از نوع الکترومکانیکی شامل موتور و گیربکس به کار گرفته شد. همچنین ژنراتور این توربین که از نوع سنکرون و سرعت ثابت بود در طراحی جدید با یک ژنراتور القایی و مبدل کامل جایگزین گردید که قابلیت عملکرد با سرعت متغیر را به توربین اضافه کرد. علاوه بر این موارد، سنسورهای متعددی نیز شامل سنسورهای فشار، شتاب و موقعیت بر روی آن نصب گردید که امکان اندازه‌گیری بارهای اعمالی به نقاط مختلف پره و برج را فراهم می‌کند [۳].



¹³⁵ NWT

¹³⁶ Control Advanced Research Turbine



شکل ۲۶-۴- مقایسه نتایج حاصل از اجرای شبیه‌ساز با نتایج ارائه شده توسط شرکت NREL

توربین CART2 یک توربین ۲ پره، رو به باد^{۱۳۷}، با امکان تیتراژ^{۱۳۸} و امکان چرخش یاو^{۱۳۹} است. این توربین همانطور که گفته شد یک توربین سرعت-متغیر است و هر پره می‌تواند به طور مستقل بچرخد. سیستم پیچ قابلیت چرخاندن پره‌ها تا سرعت ۱۸ درجه بر ثانیه و با شتابی حداکثر تا ۱۵۰ درجه بر مجذور ثانیه را دارد[۴]. سیستم الکتریکی ژنراتور نیز از توانایی تولید گشتاور از منفی مقدار نامی تا مثبت مقدار نامی با هر نرخ بر خوردار است. مقادیر پارامترهای اصلی این توربین از مرجع[۴] در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵- مقادیر پارامترهای اصلی توربین CART2[۴]

Rotor radius(m)	21.64
Maximum C_p	0.3659
Optimum Tip-to-Speed Ratio	7.5
Rated Torque(Nm)	3524.4
Rated Generator Speed(rpm)	1800
Gearbox Turning constant	43.165

مرجع[۴] گزارشی از طراحی سیستم کنترل در سطوح مختلف بر روی این توربین ارائه می‌دهد. در این مرجع چندین شبیه‌سازی با استفاده از کد FAST و در محیط Matlab صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده است. هر یک از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته مربوط به یک طراحی از سیستم کنترل است. در این بخش با پیاده‌سازی ۲ نمونه از این طراحی‌ها و انجام شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج ذکر شده در مرجع[۴] مقایسه می‌گردد. در شبیه‌سازی اول، کنترل پایه^{۱۴۰} بر روی یک مدل ساده شده از توربین که تنها درجه آزادی مربوط به گشتاور ژنراتور و نیروهای آیرودینامیکی فعال است، اعمال می‌شود. در شبیه‌سازی دوم از یک کنترل جدول‌بندی بهره برای کنترل توربین به ازای دو پروفایل باد مختلف استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی ۱: اعمال کنترل کننده پایه بر روی مدل ساده توربین بادی CART2

در این شبیه‌سازی تمامی درجات آزادی توربین بادی غیر فعال است و تنها تأثیر گشتاورهای آیرودینامیکی و گشتاور الکتریکی ژنراتور در نظر گرفته می‌شود و از یک کنترل‌کننده با ساختار PI برای سیستم کنترل استفاده می‌گردد. در ادامه نحوه پیاده‌سازی توربین CART2 و تنظیم سیستم کنترل تشریح می‌گردد.

¹³⁷ Upwind

¹³⁸ Teeter

¹³⁹ Active Yaw

¹⁴⁰ Baseline

پایه‌سازی مدل توربین بادی CART2 بر روی شبیه‌ساز

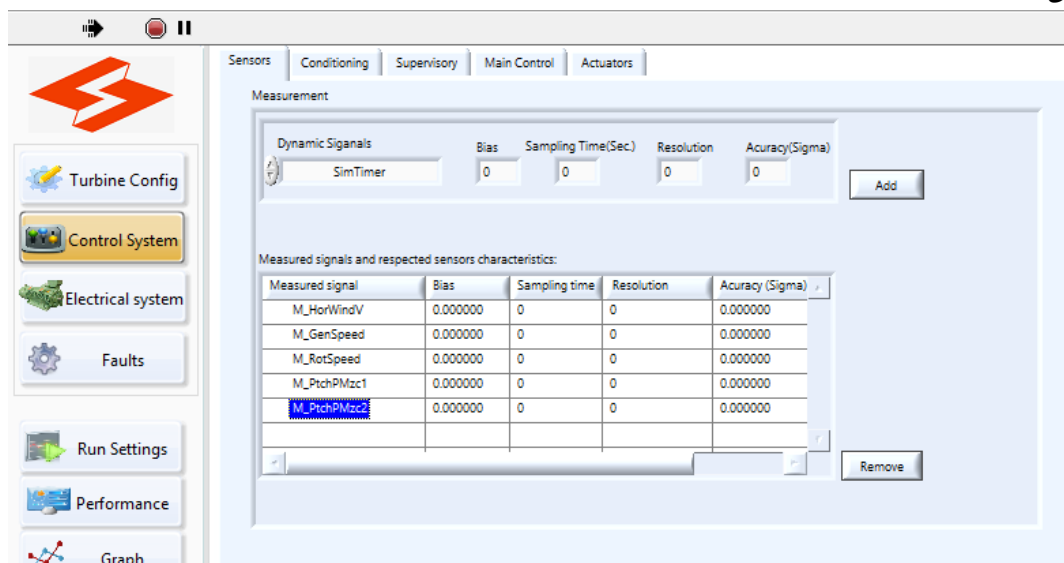
برای پایه‌سازی مدل توربین بادی CART2 بر روی شبیه‌ساز نیاز است فایل‌های ورودی کد FAST مربوط به ساختار مکانیکی و آیرودینامیکی پره و مشخصات هندسی، جرمی و اینرسی بخش‌های مختلف توربین را در اختیار داشته باشیم. این فایل‌ها برای توربین CART2 توسط شرکت NREL ارائه شده است که از سایت این شرکت قابل دانلود می‌باشد. محتوای این فایل‌ها که عناوین آنها در جدول ۴-۶ ذکر شده است، در پیوست (ب) آورده شده است. با وارد کردن آدرس فایل‌های فوق و سایر مشخصات جرمی و هندسی توربین در بخش "Turbine Config"، مدل توربین بادی بر روی شبیه‌ساز، پایه‌سازی شده و قابل اجرا می‌باشد. در این بخش همچنین خروجی‌های مورد نیاز جهت مشاهده و یا به کارگیری در سیستم کنترل قابل تعریف است. عناوین این خروجی‌ها که پارامترهای دینامیکی نظیر: موقعیت، سرعت، شتاب، نیروها و ممان‌های اعمالی به نقاط مختلف توربین می‌باشند، در راهنمای کد FAST [۱] آورده شده است. این موارد برای دسترسی راحت‌تر در پیوست (پ) این گزارش نیز آورده شده است.

پس از تعریف ساختار توربین بادی، در مرحله بعد، سیستم کنترل تنظیم می‌گردد. اولین مرحله تنظیم سیستم کنترل، انتخاب سیگنال‌های مورد نیاز سیستم کنترل و مشخصات سیگنال اندازه‌گیری شده متناظر است. در اینجا به جهت سادگی با صفر در نظر گرفتن پارامترهای اندازه‌گیری نظیر دقت، تفکیک‌پذیری، نرخ نمونه‌برداری و میزان بایاس، تأثیر سیستم اندازه‌گیری بر روی سیگنال‌های سیستم حذف می‌شود. شکل ۲۷-۴ صفحه تنظیمات سیستم اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. سیگنال‌های اندازه‌گیری جهت استفاده در کنترلر پیچ و یاو شامل سرعت باد، سرعت روتور، سرعت ژنراتور و زوایای پیچ پره‌ها می‌باشند.

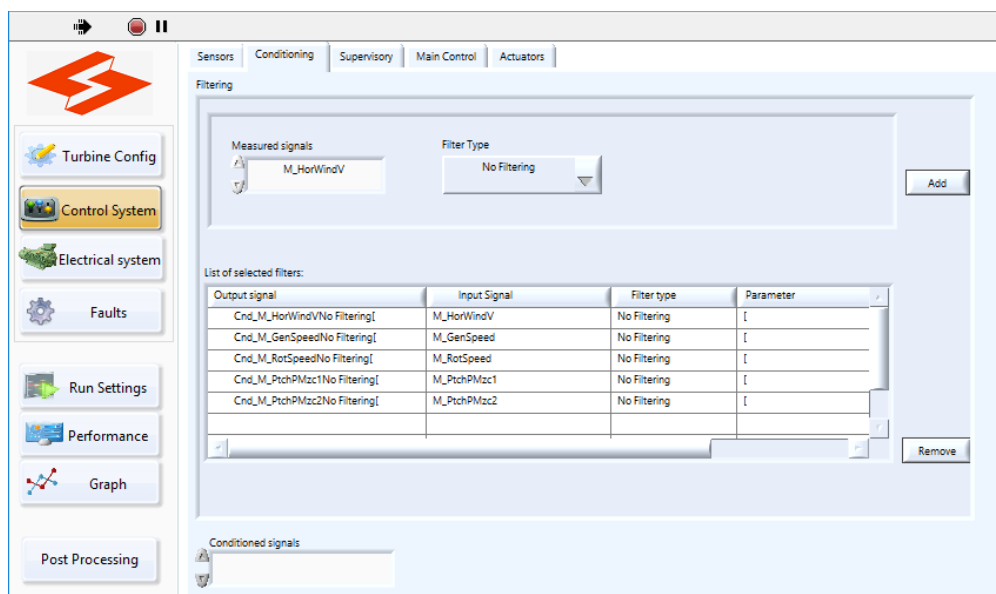
جدول ۴-۶- فایل‌های ورودی کد FAST به منظور مدل‌سازی توربین بادی CART2

توضیحات	عنوان فایل ورودی	
مشخصات دینامیکی پره	CART_Blades.dat	۱
مشخصات دینامیکی برج	CART_Towersoft.dat	۲
تنظیمات آیرودینامیکی	AeroDyn01sim.ipt	۳
مشخصات ایرفویل پره	art15.air	۴
مشخصات ایرفویل پره	art25.air	۵
مشخصات ایرفویل پره	art35.air	۶
مشخصات ایرفویل پره	art45.air	۷
مشخصات ایرفویل پره	art55.air	۸
مشخصات ایرفویل پره	art65.air	۹
مشخصات ایرفویل پره	art75.air	۱۰
مشخصات ایرفویل پره	art85.air	۱۱
مشخصات ایرفویل پره	art85-5.air	۱۲
مشخصات ایرفویل پره	art95.air	۱۳
فایل ورودی FAST	*.fst	۱۴

سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بدون هیچگونه فیلتری مستقیماً در سیستم کنترل به کار گرفته می‌شوند. بنابراین صفحه شکل‌دهی سیگنال در رابط کاربری مطابق شکل ۲۸-۴ تنظیم می‌گردد. سیستم سوپروایزری نیز به صورت ساده تنها از ۳ حالت: ۱- آماده به کار، ۲- افزایش سرعت و ۳- تولید توان تشکیل می‌گردد. در حالت آماده به کار، زوایای پره‌ها بر روی ۹۰ درجه قرار گرفته و منتظر می‌ماند تا سرعت باد به بالای ۳ متر بر ثانیه برسد. با افزایش سرعت باد به بالای ۳ متر بر ثانیه، حالت افزایش سرعت فعال شده و زوایای پیچ به مقدار مینیمم خود یعنی ۱- درجه کاهش می‌یابد. در نهایت با افزایش سرعت ژنراتور به ۱۰۰۰ دور بر ثانیه، سیستم وارد حالت تولید توان شده و سرعت مرجع روتور بر روی ۴۱/۷ دور بر دقیقه تنظیم می‌گردد. صفحه تنظیمات سیستم سوپروایزری در رابط کاربری در شکل ۲۹-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲۷-۴- صفحه تنظیمات سیستم اندازه‌گیری برای شبیه‌سازی توربین CART2



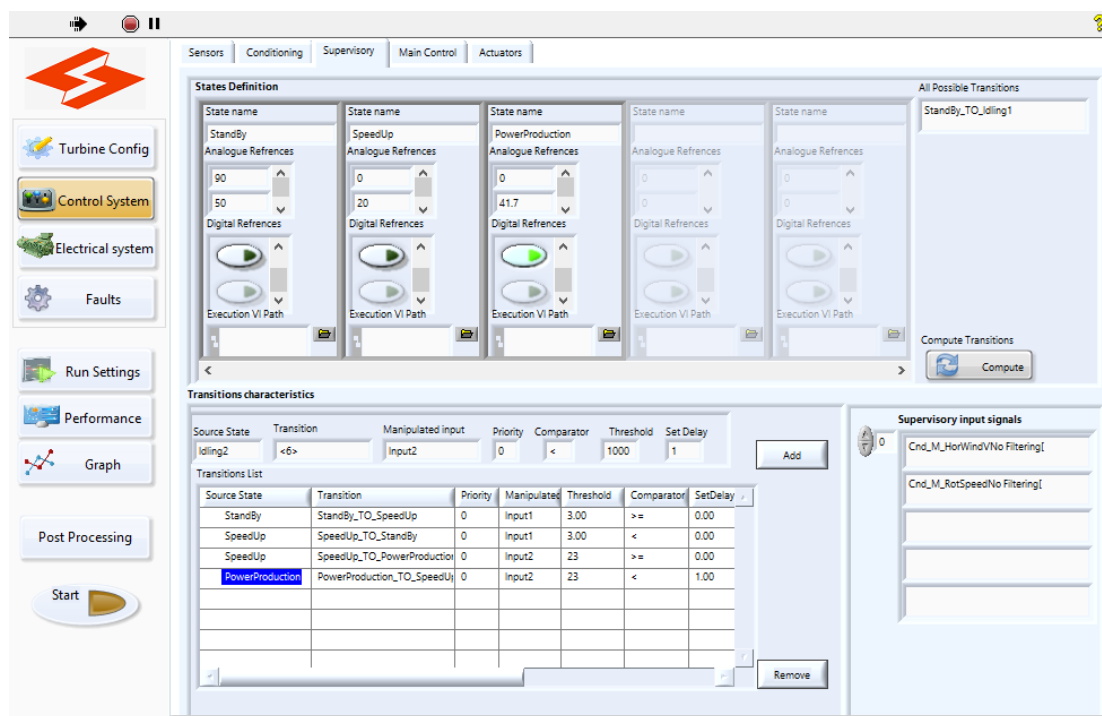
شکل ۲۸-۴- تنظیمات سیستم شکل‌دهی سیگنال برای شبیه‌سازی توربین CART2

سیستم کنترل در این شبیه‌سازی از یک کنترل پایه بصورت یک کنترلر PI برای کنترلر پیچ استفاده می‌کند. همچنین مقدار گشتاور الکتریکی مرجع نیز از رابطه گشتاور بهینه $T(\omega) = k\omega^2$ محاسبه می‌گردد. به این منظور ضرایب کنترلر پیچ مطابق با مرجع [۴] از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} K_i = \frac{-\omega^2}{B} \\ K_p = -\frac{A}{B} - \frac{2\delta\omega}{B} \end{cases} \quad A = -0.194, B = -2.650$$

که در آن ω و δ به ترتیب برابر با فرکانس طبیعی و ضریب میرایی می‌باشند. در این شبیه‌سازی $\omega = 0.6$ در نظر گرفته شده و به ازای مقادیر مختلف ۱، ۲ و ۳/۰ برای δ ، مقدار K_i برای هر سه حالت برابر با ۰/۱۳۵۸ و مقدار K_p به ترتیب برابر با ۰/۳۷۹۶، ۰/۸۳۲۶ و ۰/۰۶۲۶ به دست می‌آید. همچنین ورودی این کنترلر سرعت روتور است.

برای کنترل گشتاور نیز از یک جدول جستجو استفاده می‌شود. در این جدول همانطور که گفته شد، مقادیر بهینه گشتاور برای سرعت‌های مابین ۱۰۰۰ تا ۱۶۹۲ دور بر دقیقه اعمال می‌گردد. در اینجا به منظور سرعت‌گیری سریع‌تر توربین، برای سرعت‌های کمتر از ۱۰۰۰ دور بر دقیقه گشتاوری اعمال نمی‌شود. به ازای سرعت‌های بزرگتر از ۱۶۹۲ دور بر دقیقه تا سرعت ۱۷۸۲ دور بر دقیقه نیز گشتاور به صورت خطی تا مقدار نامی افزایش می‌یابد.

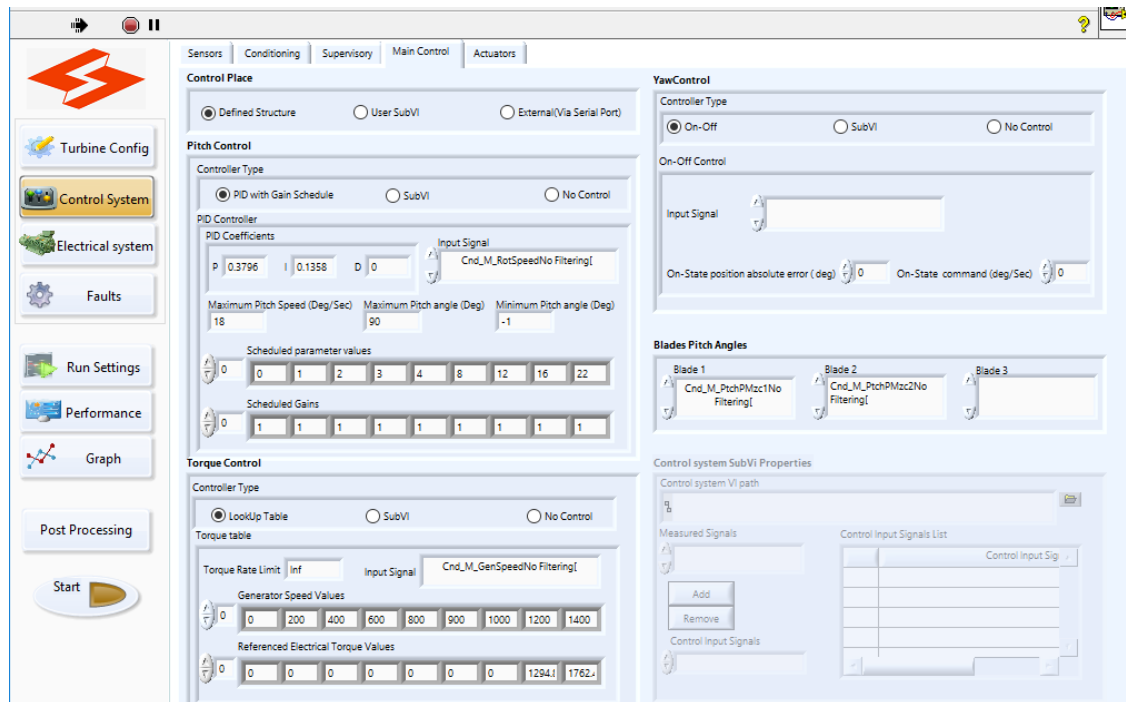


شکل ۲۹-۴- تنظیمات صفحه سوپروایزری در رابط کاربری شبیه‌ساز

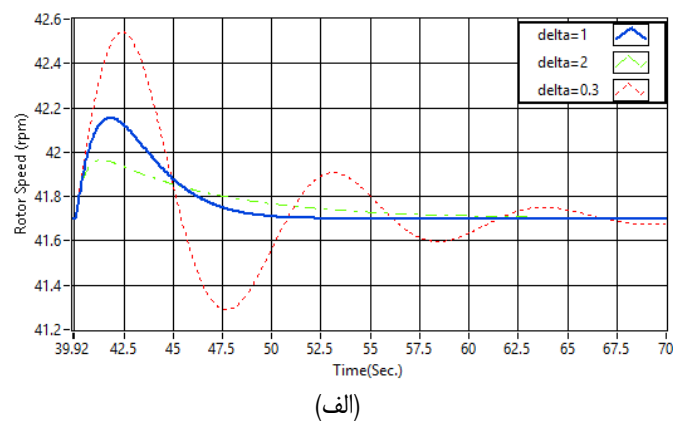
به این ترتیب صفحه تنظیمات کنترلر اصلی در رابط کاربری شبیه‌ساز مطابق با شکل ۳۰-۴ تنظیم می‌گردد. لازم به ذکر است که از آنجا که کنترل‌کننده پیچ از یک ساختار PI ساده استفاده می‌کند، ضرایب جدول بهره تماماً ۱ در نظر گرفته شده است. در نهایت برای حذف مدل عملگر پیچ، در صفحه تنظیمات

این عملگر، گزینه تابع تبدیل انتخاب شده و با در نظر گرفتن ضریب ۱ برای صورت و مخرج در واقع یک گین ۱ به عنوان مدل عملگر انتخاب می‌شود.

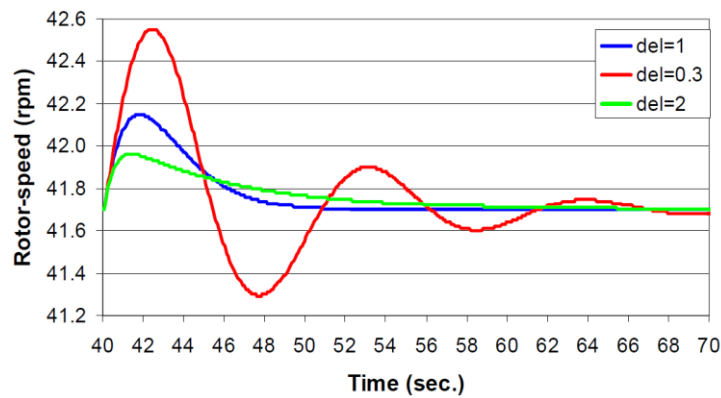
نتایج شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف ضریب K_p در شکل ۳۱-۴-الف) نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی، یک باد پله به عنوان ورودی به توربین اعمال می‌گردد که در ثانیه $t=40s$ اندازه آن از ۱۷ متر بر ثانیه به ۱۸ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این نتایج از مرجع [۴] نیز در شکل ۳۱-۴-ب) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج مرجع کاملاً مطابقت دارد.



شکل ۳۰-۴- صفحه تنظیمات سیستم کنترل اصلی در رابط کاربری شبیه‌ساز



(الف)



(ب)

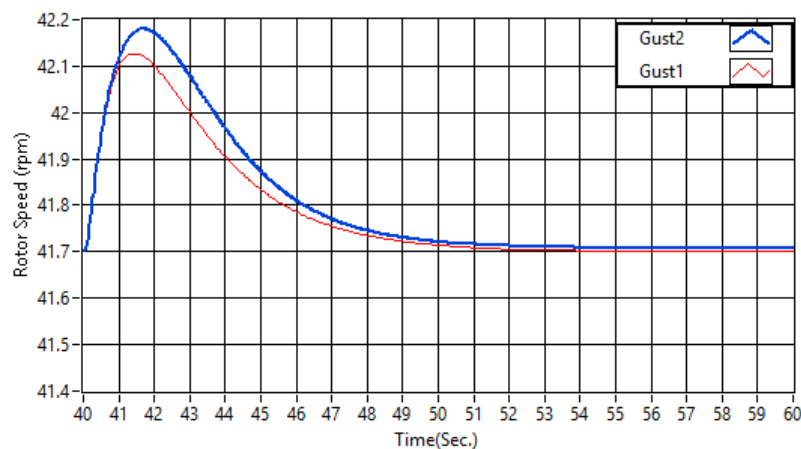
شکل ۳۱-۴ نتایج شبیه‌سازی توربین CART2 به ازای باد پله و ضرایب مختلف K_p کنترلر (الف) نتیجه شبیه‌سازی توسط شبیه‌ساز حاضر و (ب) نتیجه نشان داده شده در مرجع [۴]

شبیه‌سازی ۲: اعمال کنترل جدول‌بندی بهره

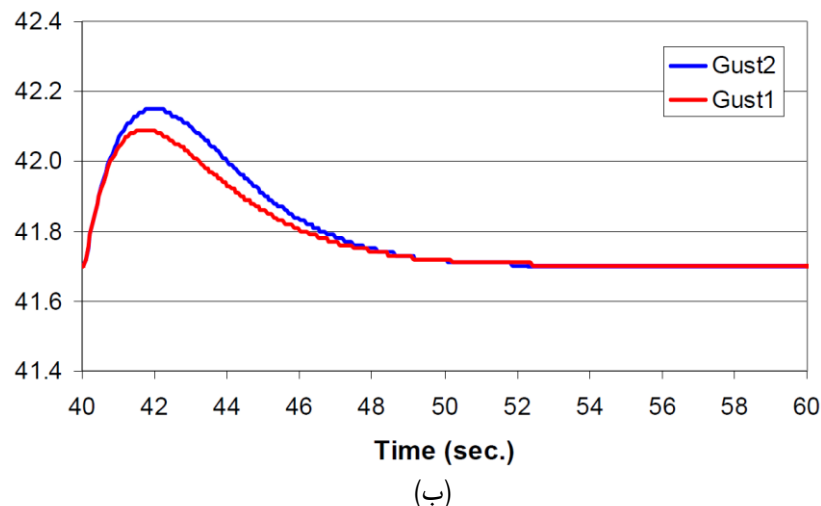
در این شبیه‌سازی بجای کنترل PI ساده از یک کنترلر PI با جدول‌بندی بهره استفاده می‌شود. نحوه پیاده‌سازی توربین CART2 و تنظیمات سیستم کنترل دقیقاً همانند شبیه‌سازی قبل است به جز کنترل‌کننده پیچ که ضرایب جدول بهره آن به ازای زوایای مختلف پیچ از رابطه زیر پیروی می‌کند [۴]:

$$GK(\theta) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\theta}{2.62}\right)}$$

همچنین ضرایب K_p و K_i برای کنترل‌کننده پیچ نیز به ترتیب برابر با ۰/۷۸۰ و ۲/۳۴۸ تعیین می‌شوند. نمودار سرعت روتور حاصل از اجرای شبیه‌سازی به ازای ۲ پروفایل مختلف در شکل ۳۲-۴- (الف) آورده شده است. هر دو پروفایل شامل یک باد پله است که در پروفایل اول در ثانیه ۴۰ از مقدار ۱۴ متر بر ثانیه به مقدار ۱۵ متر بر ثانیه و در پروفایل دوم از مقدار ۱۷ متر بر ثانیه به مقدار ۱۸ متر بر ثانیه تغییر می‌یابد. شکل ۳۲-۴- (ب) نمودار سرعت روتور را از مرجع [۴] نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، دو نمودار به طور دقیقی با یکدیگر مطابقت دارند.



(الف)



شکل ۳-۴- نتایج شبیه‌سازی توربین CART2 به ازای دو پروفایل باد مختلف با کنترل‌کننده PI به صورت جدول‌بندی بهره. (الف) نتیجه شبیه‌سازی توسط شبیه‌ساز حاضر و (ب) نتیجه نشان داده شده در مرجع [۴]

۳-۴-۳- شبیه‌سازی توربین ۲ مگاوات ملی

طراحی توربین ۲ مگاواتی ملی به عنوان اولین توربین مگاواتی ملی به طور کامل در پژوهشگاه نیرو صورت گرفته است و مقدمات نصب نمونه اولیه آن در سایت کهک قزوین در آینده‌ای نزدیک در حال انجام است. این توربین با ارتفاع برج در حدود ۸۰ متر و طول پره ۴۳ متری از یک ژنراتور DFIG جهت تولید توان الکتریکی بهره می‌برد. مدل FAST این توربین توسط کارشناسان مرکز توربین‌های بادی تهیه شده و می‌تواند در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این مدل در این مرکز به صورت غیر زمان-حقیقی در بستر نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است که می‌توان از قابلیت‌های این نرم‌افزار برای طراحی سیستم کنترل استفاده کرد. همچنین در این مرکز مدل توربین بادی ۲ مگاوات ملی در قالب کد FAST به صورت زمان حقیقی در یک بستر لینوکس نیز پیاده‌سازی شده است که از قابلیت ارتباط با سخت‌افزار کنترلی برخوردار است. در این بخش با پیاده‌سازی مدل این توربین در شبیه‌ساز حاضر و اجرای آزمایشات مختلف به ارزیابی و صحت‌سنجی جنبه‌های مختلف شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

پیاده‌سازی مدل توربین ۲ مگاوات ملی و اجرا به صورت کنترلر-در-حلقه

در این بخش ابتدا مدل توربین بادی بر روی شبیه‌ساز پیاده‌سازی می‌شود، سپس با تنظیم سیستم کنترل جهت اجرا به صورت کنترلر-در-حلقه، الگوریتم کنترلی بر روی یک PLC اجرا شده و داده‌های کنترلی از طریق ارتباط سریال میان PLC و کامپیوتر میزبان که مدل FAST را اجرا می‌کند، تبادل می‌یابد. مشخصات دینامیکی و آیرودینامیکی بخش‌های مختلف توربین از قبیل پره، برج و پلتفرم در قالب فایل‌های ورودی کد FAST، در جدول ۴-۷ آورده شده است. با وارد کردن آدرس فایل‌های مذکور و سایر مشخصات جرمی و هندسی توربین در بخش "Turbine Config"، مدل توربین بادی بر روی شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده و قابل اجرا می‌باشد.

جدول ۴-۷- فایل‌های ورودی کد FAST جهت مدل‌سازی توربین بادی ۲ مگاوات ملی

توضیحات	عنوان فایل ورودی	
مشخصات دینامیکی پره	Rotating_Heavier_Blade.dat	۱
مشخصات دینامیکی پره	Rotating_Lighter_Blade.dat	۲

۳	Rotating_Normal_Blade.dat	مشخصات دینامیکی پره
۴	Tower.dat	مشخصات دینامیکی برج
۵	AeroDyn2MW_Tower.dat	مشخصات آیرودینامیکی
۶	Platform.dat	مشخصات مکانیکی
۷	RunIEC_AD.ipt	تنظیمات آیرودینامیکی
۸	Cylinder.dat	مشخصات ایرفویل پره
۹	Mix16.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۰	Mix18.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۱	Mix21.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۲	Mix25.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۳	Mix30.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۴	Mix35.dat	مشخصات ایرفویل پره
۱۵	Mix40.dat	مشخصات ایرفویل پره

سیستم کنترل این توربین به ۳ صورت در اختیار است: ۱- فایل Simulink در نرم‌افزار Matlab، ۲- یک زیربرنامه (SubVI) در نرم‌افزار LabVIEW و ۳- یک کد PLC. مورد اول در مرکز توربین‌های بادی پژوهشگاه توسعه داده شده و در نرم‌افزار MATLAB قابل اجراست. مورد دوم در واقع برگردان مدل Simulink در نرم‌افزار LabVIEW است و مدل سوم نیز کد پیاده‌سازی شده از مدل Simulink بر روی PLC است که در مرکز توربین‌های بادی پژوهشگاه به انجام رسیده است.

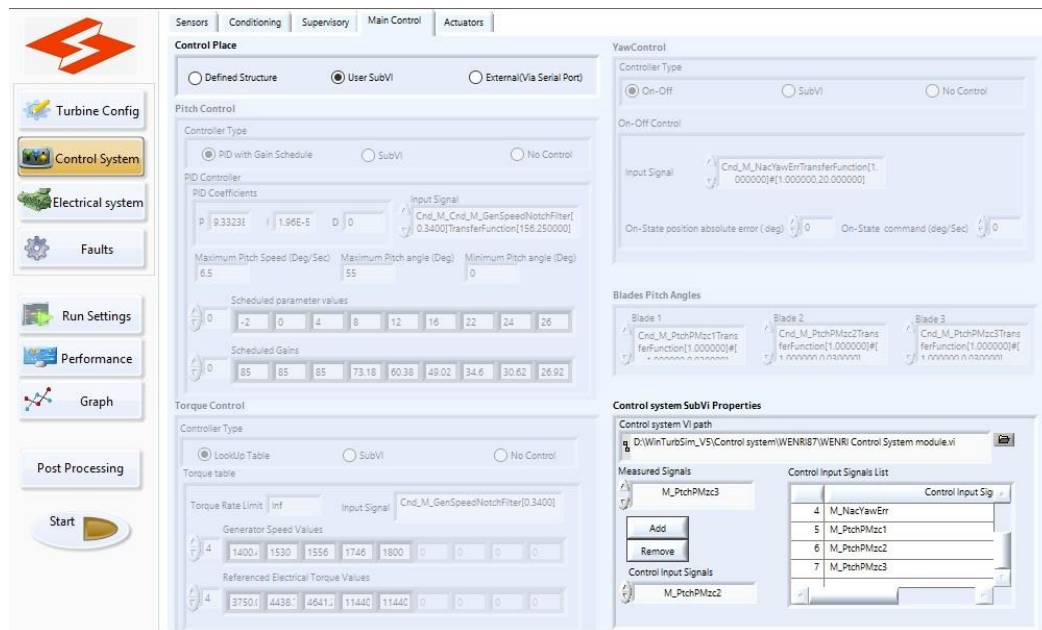
در این آزمایش قصد داریم عملکرد سیستم کنترل را در حالت‌های ۲ و ۳ از موارد فوق با شبیه‌ساز حاضر بررسی کرده و با حالت اول یعنی پاسخ‌های دریافتی از اجرای Matlab که مورد تایید مرکز توربین‌های بادی می‌باشد، مقایسه کنیم. به این منظور در ادامه نحوه پیاده‌سازی سیستم کنترل در هر یک از حالت‌های ۲ و ۳ بر روی شبیه‌ساز توربین بادی تشریح می‌گردد.

اعمال سیستم کنترل توسط زیربرنامه نوشته شده در LabVIEW

از آنجا که زیربرنامه نوشته شده برای سیستم کنترل، کلیه بخش‌های شکل‌دهی سیگنال، سوپروایزری، کنترلرهای گشتاور، پیچ و یاو را در بر می‌گیرد، روش اعمال سیستم کنترل در رابط کاربری بر روی گزینه "User SubVI" تنظیم می‌شود. در این حالت داده‌های اندازه‌گیری شده به زیربرنامه کنترلی داده می‌شود و فرامین کنترلی محاسبه شده توسط زیربرنامه کنترلی به مدل عملگرها اعمال می‌شود.

با انتخاب گزینه "User SubVI" پنل مربوط به تنظیمات کنترلرهای گشتاور، پیچ و یاو غیر فعال شده و همانند شکل ۳۳-۴ پنل مربوط به انتخاب زیربرنامه کنترلی و ورودی‌های آن در قسمت پایین و سمت راست صفحه فعال می‌گردد. با وارد کردن آدرس زیربرنامه اصلی در قسمت بالای پنل و پس از آن انتخاب ورودی‌های مورد نظر از میان سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، تنظیمات سیستم کنترل به پایان می‌رسد.

اکنون با اجرای شبیه‌سازی، سیستم کنترل از زیربرنامه اختصاص داده شده فراخوانی شده و اجرا می‌گردد. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۳۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳۳-۴- انتخاب روش اعمال سیستم کنترل در صفحه تنظیم سیستم کنترل در پنل کاربری

اعمال سیستم کنترل از طریق اجرای PLC

در این بخش، سیستم کنترل، تحت یک بستر سخت‌افزار-در-حلقه بر روی یک PLC اجرا شده و فرامین کنترلی از طریق یک ارتباط سریال به مدل عملگرها اعمال می‌گردد. به این منظور در صفحه تنظیمات سیستم کنترل در پنل کاربری، گزینه “External” برای محل سیستم کنترل انتخاب می‌گردد. در این حالت تمامی تنظیمات این صفحه غیرفعال می‌شود.

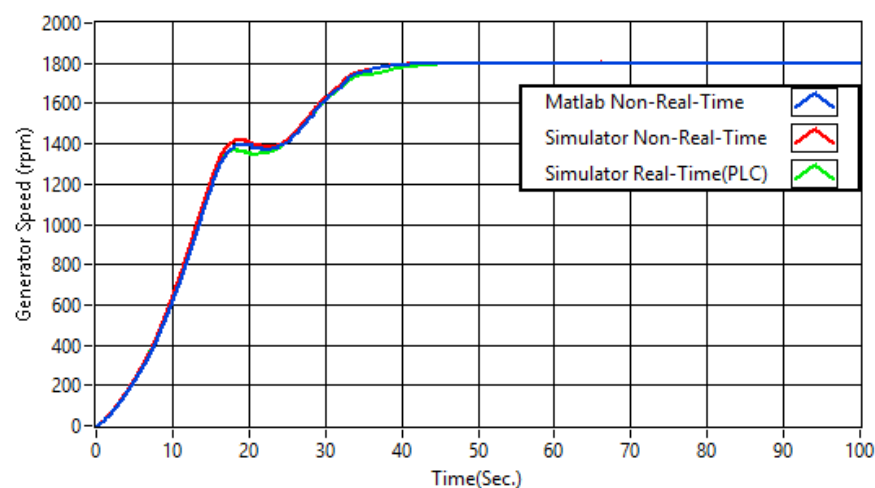
با اجرای شبیه‌سازی، ورودی‌های کنترلی شامل سرعت چرخش ژنراتور، زوایای پیچ، سرعت باد و میزان انحراف زاویه یاو از طریق ارتباط سریال ارسال می‌گردد. PLC به محض دریافت داده‌های ورودی، فرامین کنترلی را بر اساس این داده‌ها محاسبه کرده و بر روی بستر سریال به کامپیوتر مدل که حاوی کد زمان-حقیقی مدل توربین بادی است می‌فرستد. نتایج شبیه‌سازی توربین بادی در این حالت شامل پروفایل سرعت ژنراتور، گشتاور الکتریکی و زاویه پیچ به همراه نتایج شبیه‌سازی در حالت فراخوانی زیربرنامه کنترلی در برنامه اصلی در شکل ۳۴-۴ آورده شده و با نتایج اجرای مرجع که در نرم‌افزار Matlab انجام گرفته مقایسه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها یک باد با سرعت ثابت ۱۴ متر بر ثانیه اعمال گردید.

همانطور که از نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص است، پاسخ‌های شبیه‌سازی در ۳ حالت گفته شده یعنی اجرای الگوریتم اصلی در نرم‌افزار Matlab، اجرای غیر زمان-حقیقی از طریق فراخوانی زیربرنامه نوشته شده در محیط LabVIEW و اجرای زمان-حقیقی بصورت سخت‌افزار-در-حلقه، با دقت بالایی با یکدیگر همخوانی دارند.

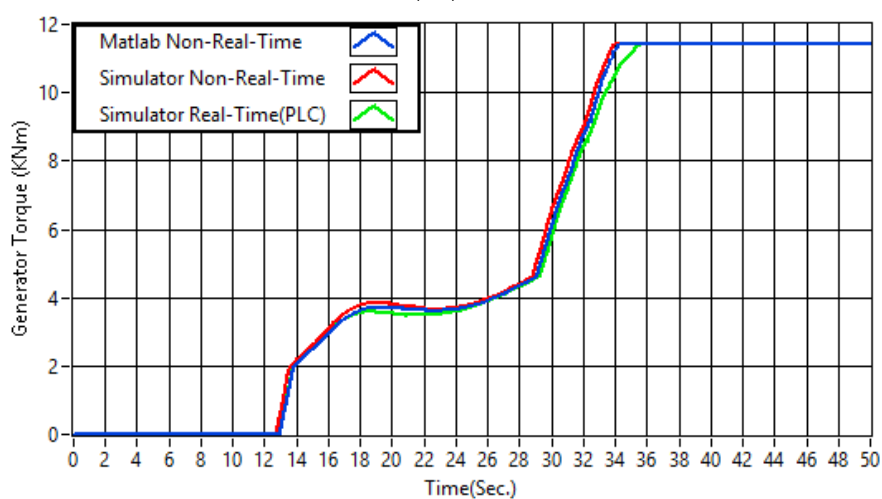
در این بخش به منظور ارزیابی و صحت سنجی عملکرد شبیه‌ساز توسعه داده شده، به پیاده‌سازی مدل ۳ توربین مرجع NREL5MW، CART2 و توربین بادی ۲ مگاوات ملی، و اجرای شبیه‌سازی پرداخته شد. با مقایسه نتایج حاصله در هر مورد با نتایج مرجع و همخوانی این نتایج با یکدیگر، صحت عملکرد شبیه‌ساز قابل تأیید است.

۴-۴- نتیجه‌گیری

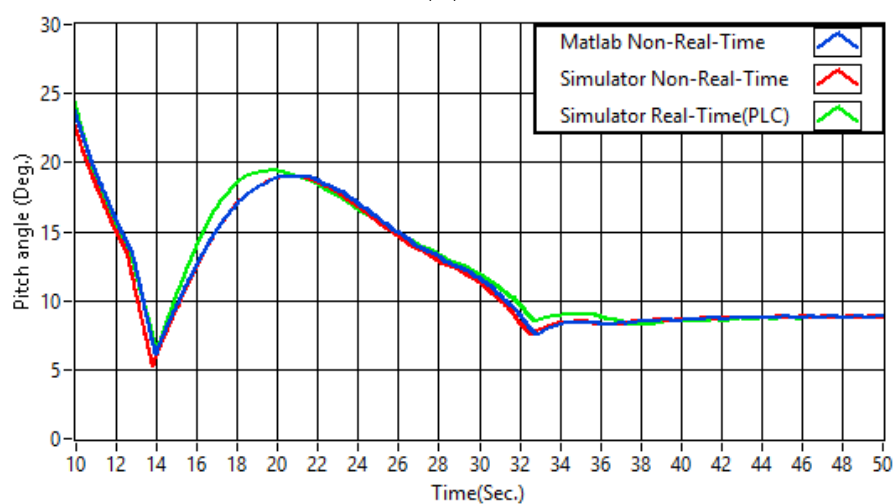
در این گزارش با اجرای آزمایشات مختلف، به ارزیابی و صحت‌سنجی شبیه‌ساز زمان-حقیقی توسعه داده شده برای توربین بادی پرداخته شد. به این منظور در ۲ بخش به بررسی عملکرد شبیه‌ساز پرداخته شد. نخست در فصل اول، توابع اصلی مورد استفاده در شبیه‌ساز همچون انتگرال‌گیر، مشتق‌گیر، فیلترهای مختلف، جدول جستجو، کنترلر PID و ... و همچنین ارتباطات سریال و UDP مورد آزمایش و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس در فصل دوم، با پیاده‌سازی مدل‌های معیار معتبر موجود همانند توربین‌های CART و NREL5MW شرکت NREL و همچنین مدل توربین ۲ مگاوات ملی و مقایسه نتایج شبیه‌ساز با نتایج موجود از این توربین‌ها، دقت شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفت.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳۴-۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین بادی ۲ مگاواتی ملی در سه حالت: ۱- اجرای غیر زمان-حقیقی در نرم‌افزار Matlab، ۲- اجرای غیر زمان-حقیقی در شبیه‌ساز توسعه داده شده و ۳- اجرای زمان-حقیقی بصورت کنترل-در-حلقه توسط شبیه‌ساز توسعه داده شده

پیوست‌ها

پیوست‌ها

پیوست الف- محتوی فایل‌های ساختار بندی کد FAST به منظور مدلسازی NREL 5MW توربین

الف- (۱) فایل ورودی اصلی (*.fst)

```

----- FAST INPUT FILE -----
NREL 5.0 MW Baseline Wind Turbine for Use in Offshore Analysis.
Properties from Dutch Offshore Wind Energy Converter (DOWEC) 6MW Pre-Design (10046_009.pdf) and REpower
5M 5MW (5m_uk.pdf); C
----- SIMULATION CONTROL -----
False      Echo      - Echo input data to "echo.out" (flag)
3          ADAMSPrep  - ADAMS preprocessor mode {1: Run FAST, 2: use FAST as a preprocessor to create an
ADAMS model, 3: do
1          AnalMode  - Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized
model} (switch)
3          NumBl     - Number of blades (-)
630.0      TMax      - Total run time (s) 0.0125 DT      - Integration time step (s)
----- TURBINE CONTROL -----
0          YCMode    - Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-
defined from Simulink}
TYCOn      - Time to enable active yaw control (s) [unused when YCMode=0]
PCMode     - Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCtrl, 2: user-defined from
Simulink}
0.0        TPCOn     - Time to enable active pitch control (s) [unused when PCMode=0]
VSContrl   - Variable-speed control mode {0: none, 1: simple VS, 2: user-defined from routine
UserVSCont, 3: use
9999.9     VS_RtGnSp - Rated generator speed for simple variable-speed generator control (HSS side)
(rpm) [used only when
9999.9     VS_RtTq   - Rated generator torque/constant generator torque in Region 3 for simple
variable-speed generator co
9999.9     VS_Rgn2K  - Generator torque constant in Region 2 for simple variable-speed generator
control (HSS side) (N-m/r
9999.9     VS_SlPc   - Rated generator slip percentage in Region 2 1/2 for simple variable-speed
generator control (%) [us
2          GenModel  - Generator model {1: simple, 2: Thevenin, 3: user-defined from routine UserGen}
(switch) [used only True   GenTiStr - Method to start the generator {T: timed using TimGenOn, F:
generator speed using SpdGenOn} (flag) True   GenTiStp - Method to stop the generator {T: timed
using TimGenOf, F: when generator power = 0} (flag)
9999.9     SpdGenOn  - Generator speed to turn on the generator for a startup (HSS speed) (rpm) [used
only when GenTiStr=F
0.0        TimGenOn  - Time to turn on the generator for a startup (s) [used only when GenTiStr=True]
9999.9     TimGenOf  - Time to turn off the generator (s) [used only when GenTiStp=True]
1          HSSBrMode - HSS brake model {1: simple, 2: user-defined from routine UserHSSBr} (switch)
9999.9     THSSBrDp  - Time to initiate deployment of the HSS brake (s)
9999.9     TiDynBrk  - Time to initiate deployment of the dynamic generator brake [CURRENTLY IGNORED]
(s)
9999.9     TTPBrDp(1) - Time to initiate deployment of tip brake 1 (s)
9999.9     TTPBrDp(2) - Time to initiate deployment of tip brake 2 (s)
9999.9     TTPBrDp(3) - Time to initiate deployment of tip brake 3 (s) [unused for 2 blades]
9999.9     TBDpISp(1) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 1 (rpm)
9999.9     TBDpISp(2) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 2 (rpm)
9999.9     TBDpISp(3) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 3 (rpm) [unused for 2
blades]
9999.9     TYawManS  - Time to start override yaw maneuver and end standard yaw control (s)
0.3        YawManRat - Yaw rate (in absolute value) at which override yaw maneuver heads toward final yaw
angle (deg/s)
0.0        NacYawF   - Final yaw angle for override yaw maneuvers (degrees)
9999.9     TPitManS(1) - Time to start override pitch maneuver for blade 1 and end standard pitch
control (s)
9999.9     TPitManS(2) - Time to start override pitch maneuver for blade 2 and end standard pitch
control (s)

```

```

9999.9 TPitManS(3) - Time to start override pitch maneuver for blade 3 and end standard pitch
control (s) [unused for 2
8.0 PitManRat(1)- Pitch rate (in absolute value) at which override pitch maneuver for blade 1 heads
toward final pitc
8.0 PitManRat(2)- Pitch rate (in absolute value) at which override pitch maneuver for blade 2 heads
toward final pitc
8.0 PitManRat(3)- Pitch rate (in absolute value) at which override pitch maneuver for blade 3 heads
toward final pitc
0.0 BLPitch(1) - Blade 1 initial pitch (degrees)
0.0 BLPitch(2) - Blade 2 initial pitch (degrees)
0.0 BLPitch(3) - Blade 3 initial pitch (degrees) [unused for 2 blades]
0.0 BLPitchF(1) - Blade 1 final pitch for override pitch maneuvers (degrees)
0.0 BLPitchF(2) - Blade 2 final pitch for override pitch maneuvers (degrees)
0.0 BLPitchF(3) - Blade 3 final pitch for override pitch maneuvers (degrees) [unused for 2 blades]
----- ENVIRONMENTAL CONDITIONS -----
9.80665 Gravity - Gravitational acceleration (m/s^2)
----- FEATURE FLAGS -----
True FlapDOF1 - First flapwise blade mode DOF (flag)
True FlapDOF2 - Second flapwise blade mode DOF (flag)
True EdgeDOF - First edgewise blade mode DOF (flag)
False TeetDOF - Rotor-teeter DOF (flag) [unused for 3 blades]
True DrTrDOF - Drivetrain rotational-flexibility DOF (flag)
True GenDOF - Generator DOF (flag) True YawDOF - Yaw DOF (flag)
True TwFADOF1 - First fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
True TwFADOF2 - Second fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
True TwSSDOF1 - First side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
True TwSSDOF2 - Second side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
True CompAero - Compute aerodynamic forces (flag) False CompNoise - Compute aerodynamic noise
(flag)
----- INITIAL CONDITIONS -----
0.0 OopDefl - Initial out-of-plane blade-tip displacement (meters)
0.0 IPDefl - Initial in-plane blade-tip deflection (meters)
0.0 TeetDefl - Initial or fixed teeter angle (degrees) [unused for 3 blades]
0.0 Azimuth - Initial azimuth angle for blade 1 (degrees)
12.1 RotSpeed - Initial or fixed rotor speed (rpm)
0.0 NacYaw - Initial or fixed nacelle-yaw angle (degrees)
0.0 TTDspFA - Initial fore-aft tower-top displacement (meters)
0.0 TTDspSS - Initial side-to-side tower-top displacement (meters)
----- TURBINE CONFIGURATION -----
63.0 TipRad - The distance from the rotor apex to the blade tip (meters)
1.5 HubRad - The distance from the rotor apex to the blade root (meters)
1 PSpnElN - Number of the innermost blade element which is still part of the pitchable portion
of the blade for
0.0 UndSling - Undersling length [distance from teeter pin to the rotor apex] (meters) [unused
for 3 blades]
0.0 HubCM - Distance from rotor apex to hub mass [positive downwind] (meters)
-5.01910 OverHang - Distance from yaw axis to rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] (meters)
1.9 NacCMxn - Downwind distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
0.0 NacCMyn - Lateral distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
1.75 NacCMzn - Vertical distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
87.6 TowerHt - Height of tower above ground level [onshore] or MSL [offshore] (meters)
1.96256 Twr2Shft - Vertical distance from the tower-top to the rotor shaft (meters)
0.0 TwrRBHt - Tower rigid base height (meters)
-5.0 ShftTilt - Rotor shaft tilt angle (degrees)
0.0 Delta3 - Delta-3 angle for teetering rotors (degrees) [unused for 3 blades]
-2.5 PreCone(1) - Blade 1 cone angle (degrees)
-2.5 PreCone(2) - Blade 2 cone angle (degrees)
-2.5 PreCone(3) - Blade 3 cone angle (degrees) [unused for 2 blades]
0.0 AzimB1Up - Azimuth value to use for I/O when blade 1 points up (degrees)
----- MASS AND INERTIA -----
0.0 YawBrMass - Yaw bearing mass (kg) 240.00E3 NacMass - Nacelle mass (kg) 56.78E3 HubMass
- Hub mass (kg)
0.0 TipMass(1) - Tip-brake mass, blade 1 (kg)
0.0 TipMass(2) - Tip-brake mass, blade 2 (kg)
0.0 TipMass(3) - Tip-brake mass, blade 3 (kg) [unused for 2 blades] 2607.89E3 NacYIner - Nacelle
inertia about yaw axis (kg m^2)
534.116 GenIner - Generator inertia about HSS (kg m^2)
115.926E3 HubIner - Hub inertia about rotor axis [3 blades] or teeter axis [2 blades] (kg m^2)
----- DRIVETRAIN -----
100.0 GBoxEff - Gearbox efficiency (%)
94.4 GenEff - Generator efficiency [ignored by the Thevenin and user-defined generator models]
(%)

```

```

97.0      GBRatio      - Gearbox ratio (-)
False     GBRevers    - Gearbox reversal {T: if rotor and generator rotate in opposite directions}
(flag) 28.1162E3 HSSBrTqF - Fully deployed HSS-brake torque (N-m)
0.6      HSSBrDT      - Time for HSS-brake to reach full deployment once initiated (sec) [used only when
HSSBrMode=1] DynBrkFi - File containing a mech-gen-torque vs HSS-speed curve for a dynamic brake
[CURRENTLY IGNORED] (quote
867.637E6 DTTorSpr    - Drivetrain torsional spring (N-m/rad)
6.215E6 DTTorDmp      - Drivetrain torsional damper (N-m/(rad/s))
----- SIMPLE INDUCTION GENERATOR -----
9999.9    SIG_SlPc     - Rated generator slip percentage (%) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
9999.9    SIG_SySp     - Synchronous (zero-torque) generator speed (rpm) [used only when VSContrl=0 and
GenModel=1]
9999.9    SIG_RtTq     - Rated torque (N-m) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
9999.9    SIG_PORT     - Pull-out ratio (Tpullout/Trated) (-) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
----- THEVENIN-EQUIVALENT INDUCTION GENERATOR -----
9999.9    TEC_Freq     - Line frequency [50 or 60] (Hz) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9998      TEC_NPol     - Number of poles [even integer > 0] (-) [used only when VSContrl=0 and
GenModel=2]
9999.9    TEC_SRes     - Stator resistance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9999.9    TEC_RRes     - Rotor resistance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9999.9    TEC_VLL      - Line-to-line RMS voltage (volts) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9999.9    TEC_SLR      - Stator leakage reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9999.9    TEC_RLR      - Rotor leakage reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
9999.9    TEC_MR       - Magnetizing reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
----- PLATFORM -----
0         PtfmModel    - Platform model {0: none, 1: onshore, 2: fixed bottom offshore, 3: floating
offshore} (switch) PtfmFile - Name of file containing platform properties (quoted string) [unused
when PtfmModel=0]
----- TOWER -----
20        TwrNodes     - Number of tower nodes used for analysis (-)
"NRELOffshrbaseline5MW_Tower_Onshore.dat" TwrFile - Name of file containing tower properties
(quoted string)
----- NACELLE-YAW -----
9028.32E6 YawSpr       - Nacelle-yaw spring constant (N-m/rad) 19.16E6 YawDamp - Nacelle-yaw damping
constant (N-m/(rad/s))
0.0       YawNeut      - Neutral yaw position--yaw spring force is zero at this yaw (degrees)
----- FURLING -----
False     Furling      - Read in additional model properties for furling turbine (flag)
FurlFile  - Name of file containing furling properties (quoted string) [unused when Furling=False]
----- ROTOR-TEETER -----
0         TeetMod      - Rotor-teeter spring/damper model {0: none, 1: standard, 2: user-defined from
routine UserTeet} (swi
0.0       TeetDmpP     - Rotor-teeter damper position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0.0       TeetDmp      - Rotor-teeter damping constant (N-m/(rad/s)) [used only for 2 blades and when
TeetMod=1]
0.0       TeetCDmp     - Rotor-teeter rate-independent Coulomb-damping moment (N-m) [used only for 2 blades
and when TeetMod
0.0       TeetSSStP    - Rotor-teeter soft-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when
TeetMod=1]
0.0       TeetHStP     - Rotor-teeter hard-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when
TeetMod=1]
0.0       TeetSSSp     - Rotor-teeter soft-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades
and when TeetMod=1]
0.0       TeetHSSp     - Rotor-teeter hard-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades
and when TeetMod=1]
----- TIP-BRAKE -----
0.0       TBDrConN     - Tip-brake drag constant during normal operation, Cd*Area (m^2)
0.0       TBDrConD     - Tip-brake drag constant during fully-deployed operation, Cd*Area (m^2)
0.0       TpBrDT       - Time for tip-brake to reach full deployment once released (sec)
----- BLADE -----
"NRELOffshrbaseline5MW_Blade.dat" BldFile(1) - Name of file containing properties for blade 1 (quoted
string) "NRELOffshrbaseline5MW_Blade.dat" BldFile(2) - Name of file containing properties for blade 2
(quoted string) "NRELOffshrbaseline5MW_Blade.dat" BldFile(3) - Name of file containing
properties for blade 3 (quoted string)
----- AERODYN -----
"NRELOffshrbaseline5MW_AeroDyn.ipt" ADFile - Name of file containing AeroDyn input
parameters (quoted strin
----- NOISE -----
NoiseFile - Name of file containing aerodynamic noise input parameters (quoted string) [used only when
CompNois
----- ADAMS -----

```

"NRELOffshrbaseline5MW_ADAMSSpecific.dat"	ADAMSFile	- Name of file containing ADAMS-specific input parameters (quote
----- LINEARIZATION CONTROL -----		
"NRELOffshrbaseline5MW_Linear.dat"	LinFile	- Name of file containing FAST linearization parameters (quoted
----- OUTPUT -----		
True	SumPrint	- Print summary data to "<RootName>.fsm" (flag)
True	TabDelim	- Generate a tab-delimited tabular output file. (flag)
"E510.3E2"	OutFmt	- Format used for tabular output except time. Resulting field should be 10 characters. (quoted string)
30.0	TStart	- Time to begin tabular output (s)
4	DecFact	- Decimation factor for tabular output {1: output every time step} (-)
1.0	SttsTime	- Amount of time between screen status messages (sec)
-3.09528	NcIMUxn	- Downwind distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.0	NcIMUyn	- Lateral distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters) 2.23336 NcIMUzn
- Vertical distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)		
1.912	ShftGagl	- Distance from rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] to shaft strain gages [positive for up
1	NTwGages	- Number of tower nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
10	TwrGagNd	- List of tower nodes that have strain gages [1 to TwrNodes] (-) [unused if NTwGages=0]
1	NBlGages	- Number of blade nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
9	BldGagNd	- List of blade nodes that have strain gages [1 to BldNodes] (-) [unused if NBlGages=0]
OutList - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutList.txt for a listing of available "WindVxi , WindVyi , WindVzi"		
vertical wind speeds		
"WaveElev"		- Wave elevation at the platform reference point
"Wave1Vxi , Wave1Vyi , Wave1Vzi"		- Longitudinal, lateral, and vertical wave particle velocities a
"Wave1Axi , Wave1Ayi , Wave1Azi"		- Longitudinal, lateral, and vertical wave particle acceleration
"GenPwr , GenTq"		- Electrical generator power and torque
"HSSBrTq"		- High-speed shaft brake torque
"BldPitch1, BldPitch2, BldPitch3"		- Pitch angles for blades 1, 2, and 3
"Azimuth"		- Blade 1 azimuth angle
"RotSpeed , GenSpeed"		- Low-speed shaft and high-speed shaft speeds
"NacYaw , NacYawErr"		- Nacelle yaw angle and nacelle yaw error estimate
"OoPDefl1 , IPDefl1 , TwstDefl1"		- Blade 1 out-of-plane and in-plane deflections and tip twist
"OoPDefl2 , IPDefl2 , TwstDefl2"		- Blade 2 out-of-plane and in-plane deflections and tip twist
"OoPDefl3 , IPDefl3 , TwstDefl3"		- Blade 3 out-of-plane and in-plane deflections and tip twist
"TwrClrnc1, TwrClrnc2, TwrClrnc3"		- Tip-to-tower clearance estimate for blades 1, 2, and 3
"NcIMUTAx, NcIMUTAy, NcIMUTAz"		- Nacelle IMU translational accelerations (absolute) in the nonr
"TTDspFA , TTDspSS , TTDspTwst"		- Tower fore-aft and side-to-side displacements and top twist
"PtfrmSurge, PtfrmSway , PtfrmHeave"		- Platform translational surge, sway, and heave displacements
"PtfrmRoll , PtfrmPitch, PtfrmYaw"		- Platform rotational roll, pitch and yaw displacements
"PtfrmTAXt , PtfrmTAYt , PtfrmTAzt"		- Platform translation accelerations (absolute) in the tower-bas
"RootFxc1 , RootFyc1 , RootFzc1"		- Out-of-plane shear, in-plane shear, and axial forces at the ro
"RootMxc1 , RootMyc1 , RootMzc1"		- In-plane bending, out-of-plane bending, and pitching moments a
"RootFxc2 , RootFyc2 , RootFzc2"		- Out-of-plane shear, in-plane shear, and axial forces at the ro
"RootMxc2 , RootMyc2 , RootMzc2"		- In-plane bending, out-of-plane bending, and pitching moments a
"RootFxc3 , RootFyc3 , RootFzc3"		- Out-of-plane shear, in-plane shear, and axial forces at the ro
"RootMxc3 , RootMyc3 , RootMzc3"		- In-plane bending, out-of-plane bending, and pitching moments a

"Spn1MLxb1, Spn1MLyb1, Spn1MLzb1"	- Blade 1 local edgewise bending, flapwise bending, and pitching
"Spn1MLxb2, Spn1MLyb2, Spn1MLzb2"	- Blade 2 local edgewise bending, flapwise bending, and pitching
"Spn1MLxb3, Spn1MLyb3, Spn1MLzb3"	- Blade 3 local edgewise bending, flapwise bending, and pitching
"RotThrust, LSSGagFya, LSSGagFza"	- Rotor thrust and low-speed shaft 0- and 90-rotating shear forc
"RotTorq , LSSGagMya, LSSGagMza"	- Rotor torque and low-speed shaft 0- and 90-rotating bending mo
"YawBrFxp , YawBrFyp , YawBrFzp"	- Fore-aft shear, side-to-side shear, and vertical forces at the
"YawBrMxp , YawBrMyp , YawBrMzp"	- Side-to-side bending, fore-aft bending, and yaw moments at the
"TwrBsFxt , TwrBsFyt , TwrBsFzt"	- Fore-aft shear, side-to-side shear, and vertical forces at the
"TwrBsMxt , TwrBsMyt , TwrBsMzt"	- Side-to-side bending, fore-aft bending, and yaw moments at the
"TwHt1MLxt, TwHt1MLyt, TwHt1MLzt"	- Local side-to-side bending, fore-aft bending, and yaw moments
"Fair1Ten , Fair1Ang , Anch1Ten , Anch1Ang"	- Line 1 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair2Ten , Fair2Ang , Anch2Ten , Anch2Ang"	- Line 2 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair3Ten , Fair3Ang , Anch3Ten , Anch3Ang"	- Line 3 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair4Ten , Fair4Ang , Anch4Ten , Anch4Ang"	- Line 4 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair5Ten , Fair5Ang , Anch5Ten , Anch5Ang"	- Line 5 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair6Ten , Fair6Ang , Anch6Ten , Anch6Ang"	- Line 6 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair7Ten , Fair7Ang , Anch7Ten , Anch7Ang"	- Line 7 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"Fair8Ten , Fair8Ang , Anch8Ten , Anch8Ang"	- Line 8 fairlead and anchor effective tensions and vertical ang
"TipSpdRat, RotCp , RotCt , RotCq"	- Rotor tip speed ratio and power, thrust, and torque
coefficient END of FAST input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last line).	

الف-۲) فایل ورودی پره – NRELOffshrBslne5MW_Blade.dat

----- FAST INDIVIDUAL BLADE FILE -----												
NREL 5.0 MW offshore baseline blade input properties.												
----- BLADE PARAMETERS -----												
49	NBlInpSt	- Number of blade input stations (-)										
False	CalcBMode	- Calculate blade mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below, F: use mode shapes from b 0.477465 BldFlDmp(1) - Blade flap mode #1 structural damping in percent of critical (%)										
0.477465	BldFlDmp(2)	- Blade flap mode #2 structural damping in percent of critical (%)										
0.477465	BldEdDmp(1)	- Blade edge mode #1 structural damping in percent of critical (%)										
----- BLADE ADJUSTMENT FACTORS -----												
1.0	FlStTunr(1)	- Blade flapwise modal stiffness tuner, 1st mode (-)										
1.0	FlStTunr(2)	- Blade flapwise modal stiffness tuner, 2nd mode (-) 1.04536 AdjBlMs - Factor to adjust blade mass density (-)										
1.0	AdjFlSt	- Factor to adjust blade flap stiffness (-)										
1.0	AdjEdSt	- Factor to adjust blade edge stiffness (-)										
----- DISTRIBUTED BLADE PROPERTIES -----												
BldFractAeroCentStrcTwstBMassDenFlpStff	EdgStff	GJStff	EASTff	AlphaFlpInerEdgInerPrecrvRefPre								
(-)	(-)	(deg)	(kg/m)	(Nm^2)	(Nm^2)	(Nm^2)	(N)	(-)	(kg m)	(kg m)	(m)	(m)
0.000000.25000	13.308	678.935	18110.00E6	18113.60E6	5564.40E6	69729.48E6	0.0	972.86	973.04	0.0	0.0	0.0
0.003250.25000	13.308	678.935	18110.00E6	18113.60E6	5564.40E6	69729.48E6	0.0	972.86	973.04	0.0	0.0	0.0
0.019510.24951	13.308	773.363	19424.90E6	19558.60E6	5431.59E6	610789.50E6	0.0	1091.52	1066.38	0.0	0.0	0.0
0.035770.24510	13.308	740.550	17455.90E6	19497.80E6	4993.98E6	610067.23E6	0.0	966.09	1047.36	0.0	0.0	0.0
0.052030.23284	13.308	740.042	15287.40E6	19788.80E6	4666.59E6	69867.78E6	0.0	873.81	1099.75	0.0	0.0	0.0
0.068290.22059	13.308	592.496	10782.40E6	14858.50E6	63474.71E6	67607.86E6	0.0	648.55	873.02	0.0	0.0	0.0
0.084550.20833	13.308	450.275	7229.72E6	10220.60E6	2323.54E6	65491.26E6	0.0	456.76	641.49	0.0	0.0	0.0
0.100810.19608	13.308	424.054	6309.54E6	9144.70E6	1907.87E6	64971.30E6	0.0	400.53	593.73	0.0	0.0	0.0
0.117070.18382	13.308	400.638	5528.36E6	8063.16E6	1570.36E6	64493.95E6	0.0	351.61	547.18	0.0	0.0	0.0
0.133350.17156	13.308	382.062	4980.06E6	6884.44E6	1158.26E6	64034.80E6	0.0	316.12	490.84	0.0	0.0	0.0
0.149590.15931	13.308	399.655	4936.84E6	7009.18E6	1002.12E6	64037.29E6	0.0	303.60	503.86	0.0	0.0	0.0
0.165850.14706	13.308	426.321	4691.66E6	7167.68E6	855.90E6	4169.72E6	0.0	289.24	544.70	0.0	0.0	0.0
0.182110.13481	13.181	416.820	3949.46E6	7271.66E6	672.27E6	4082.35E6	0.0	246.57	569.90	0.0	0.0	0.0
0.198370.12500	12.848	406.186	3386.52E6	7081.70E6	547.49E6	4085.97E6	0.0	215.91	601.28	0.0	0.0	0.0
0.214650.12500	12.192	381.420	2933.74E6	6244.53E6	448.84E6	3668.34E6	0.0	187.11	546.56	0.0	0.0	0.0
0.230890.12500	11.561	352.822	2568.96E6	5048.96E6	335.92E6	3147.76E6	0.0	160.84	468.71	0.0	0.0	0.0
0.247150.12500	11.072	349.477	2388.65E6	4948.49E6	311.35E6	3011.58E6	0.0	148.56	453.76	0.0	0.0	0.0
0.263410.12500	10.792	346.538	2271.99E6	4808.02E6	291.94E6	2882.62E6	0.0	140.30	436.22	0.0	0.0	0.0
0.295950.12500	10.232	339.333	2050.05E6	4501.40E6	261.00E6	2613.97E6	0.0	124.61	398.18	0.0	0.0	0.0

0.328460.12500	9.672	330.004	1828.25E6	4244.07E6	228.82E6	2357.48E6	0.0	109.42	362.08	0.0	0.0
0.360980.12500	9.110	321.990	1588.71E6	3995.28E6	200.75E6	2146.86E6	0.0	94.36	335.01	0.0	0.0
0.393500.12500	8.534	313.820	1361.93E6	3750.76E6	174.38E6	1944.09E6	0.0	80.24	308.57	0.0	0.0
0.426020.12500	7.932	294.734	1102.38E6	3447.14E6	144.47E6	1632.70E6	0.0	62.67	263.87	0.0	0.0
0.458550.12500	7.321	287.120	875.80E6	3139.07E6	119.98E6	1432.40E6	0.0	49.42	237.06	0.0	0.0
0.491060.12500	6.711	263.343	681.30E6	2734.24E6	81.19E6	1168.76E6	0.0	37.34	196.41	0.0	0.0
0.523580.12500	6.122	253.207	534.72E6	2554.87E6	69.09E6	1047.43E6	0.0	29.14	180.34	0.0	0.0
0.556100.12500	5.546	241.666	408.90E6	2334.03E6	57.45E6	922.95E6	0.0	22.16	162.43	0.0	0.0
0.588620.12500	4.971	220.638	314.54E6	1828.73E6	45.92E6	760.82E6	0.0	17.33	134.83	0.0	0.0
0.621150.12500	4.401	200.293	238.63E6	1584.10E6	35.98E6	648.03E6	0.0	13.30	116.30	0.0	0.0
0.653660.12500	3.834	179.404	175.88E6	1323.36E6	27.44E6	539.70E6	0.0	9.96	97.98	0.0	0.0
0.686180.12500	3.332	165.094	126.01E6	1183.68E6	20.90E6	531.15E6	0.0	7.30	98.93	0.0	0.0
0.718700.12500	2.890	154.411	107.26E6	1020.16E6	18.54E6	460.01E6	0.0	6.22	85.78	0.0	0.0
0.751220.12500	2.503	138.935	90.88E6	797.81E6	16.28E6	375.75E6	0.0	5.19	69.96	0.0	0.0
0.783760.12500	2.116	129.555	76.31E6	709.61E6	14.53E6	328.89E6	0.0	4.36	61.41	0.0	0.0
0.816260.12500	1.730	107.264	61.05E6	518.19E6	9.07E6	244.04E6	0.0	3.36	45.44	0.0	0.0
0.848780.12500	1.342	98.776	49.48E6	454.87E6	8.06E6	211.60E6	0.0	2.75	39.57	0.0	0.0
0.881300.12500	0.954	90.248	39.36E6	395.12E6	7.08E6	181.52E6	0.0	2.21	34.09	0.0	0.0
0.897560.12500	0.760	83.001	34.67E6	353.72E6	6.09E6	160.25E6	0.0	1.93	30.12	0.0	0.0
0.913820.12500	0.574	72.906	30.41E6	304.73E6	5.75E6	109.23E6	0.0	1.69	20.15	0.0	0.0
0.930080.12500	0.404	68.772	26.52E6	281.42E6	5.33E6	100.08E6	0.0	1.49	18.53	0.0	0.0
0.938210.12500	0.319	66.264	23.84E6	261.71E6	4.94E6	92.24E6	0.0	1.34	17.11	0.0	0.0
0.946360.12500	0.253	59.340	19.63E6	158.81E6	4.24E6	63.23E6	0.0	1.10	11.55	0.0	0.0
0.954470.12500	0.216	55.914	16.00E6	137.88E6	3.66E6	53.32E6	0.0	0.89	9.77	0.0	0.0
0.962600.12500	0.178	52.484	12.83E6	118.79E6	3.13E6	44.53E6	0.0	0.71	8.19	0.0	0.0
0.970730.12500	0.140	49.114	10.08E6	101.63E6	2.64E6	36.90E6	0.0	0.56	6.82	0.0	0.0
0.978860.12500	0.101	45.818	7.55E6	85.07E6	2.17E6	29.92E6	0.0	0.42	5.57	0.0	0.0
0.986990.12500	0.062	41.669	4.60E6	64.26E6	1.58E6	21.31E6	0.0	0.25	4.01	0.0	0.0
0.995120.12500	0.023	11.453	0.25E6	6.61E6	0.25E6	4.85E6	0.0	0.04	0.94	0.0	0.0
1.000000.12500	0.000	10.319	0.17E6	5.01E6	0.19E6	3.53E6	0.0	0.02	0.68	0.0	0.0
----- BLADE MODE SHAPES -----											
0.0622	BldF11Sh(2)	-	Flap mode 1, coeff of x^2								
1.7254	BldF11Sh(3)	-	, coeff of x^3								
-3.2452	BldF11Sh(4)	-	, coeff of x^4								
4.7131	BldF11Sh(5)	-	, coeff of x^5								
-2.2555	BldF11Sh(6)	-	, coeff of x^6								
-0.5809	BldF12Sh(2)	-	Flap mode 2, coeff of x^2								
1.2067	BldF12Sh(3)	-	, coeff of x^3								
-15.5349	BldF12Sh(4)	-	, coeff of x^4								
29.7347	BldF12Sh(5)	-	, coeff of x^5								
-13.8255	BldF12Sh(6)	-	, coeff of x^6								
0.3627	BldEdgSh(2)	-	Edge mode 1, coeff of x^2								
2.5337	BldEdgSh(3)	-	, coeff of x^3								
-3.5772	BldEdgSh(4)	-	, coeff of x^4								
2.3760	BldEdgSh(5)	-	, coeff of x^5								
-0.6952	BldEdgSh(6)	-	, coeff of x^6								

الف-۳) فایل ورودی برج - NRELOffshrBslne5MW_Tower_Onshore.dat

----- FAST TOWER FILE -----											
NREL 5.0 MW offshore baseline tower input properties.											
----- TOWER PARAMETERS -----											
11	NtwInpSt	-	Number of input stations to specify tower geometry								
False	CalcTMode	-	Calculate tower mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below, F: use mode shapes from b								
1.0	TwrFADmp(1)	-	Tower 1st fore-aft mode structural damping ratio (%)								
1.0	TwrFADmp(2)	-	Tower 2nd fore-aft mode structural damping ratio (%)								
1.0	TwrSSDmp(1)	-	Tower 1st side-to-side mode structural damping ratio (%)								
1.0	TwrSSDmp(2)	-	Tower 2nd side-to-side mode structural damping ratio (%)								
----- TOWER ADJUSTMUNT FACTORS -----											
1.0	FASTunr(1)	-	Tower fore-aft modal stiffness tuner, 1st mode (-)								
1.0	FASTunr(2)	-	Tower fore-aft modal stiffness tuner, 2nd mode (-)								
1.0	SSStunr(1)	-	Tower side-to-side stiffness tuner, 1st mode (-)								
1.0	SSStunr(2)	-	Tower side-to-side stiffness tuner, 2nd mode (-)								
1.0	AdjTwmA	-	Factor to adjust tower mass density (-)								
1.0	AdjFAST	-	Factor to adjust tower fore-aft stiffness (-)								
1.0	AdjSSSt	-	Factor to adjust tower side-to-side stiffness (-)								
----- DISTRIBUTED TOWER PROPERTIES -----											
HtFractTMassDenTwFASTif	TwSSStif	TwGJStif	TwEASTif	TwFAInerTwSSInerTwFACgOfTwSScgOf							
(-)	(kg/m)	(Nm^2)	(Nm^2)	(Nm^2)	(N)	(kg m)	(kg m)	(m)	(m)		
0.0	5590.87	614.343E9614.343E9472.751E9138.127E924866.3	24866.3	0.0	0.0						
0.1	5232.43	534.821E9534.821E9411.558E9129.272E921647.5	21647.5	0.0	0.0						
0.2	4885.76	463.267E9463.267E9356.495E9120.707E918751.3	18751.3	0.0	0.0						
0.3	4550.87	399.131E9399.131E9307.141E9112.433E916155.3	16155.3	0.0	0.0						
0.4	4227.75	341.883E9341.883E9263.087E9104.450E913838.1	13838.1	0.0	0.0						
0.5	3916.41	291.011E9291.011E9223.940E996.758E9	11779.0	11779.0	0.0	0.0					

0.6	3616.83	246.027E9	246.027E9	189.323E9	989.357E9	9958.2	9958.2	0.0	0.0
0.7	3329.03	206.457E9	206.457E9	158.874E9	982.247E9	8356.6	8356.6	0.0	0.0
0.8	3053.01	171.851E9	171.851E9	132.244E9	975.427E9	6955.9	6955.9	0.0	0.0
0.9	2788.75	141.776E9	141.776E9	109.100E9	968.899E9	5738.6	5738.6	0.0	0.0
1.0	2536.27	115.820E9	115.820E9	89.126E9	961.626E9	4688.0	4688.0	0.0	0.0
----- TOWER FORE-AFT MODE SHAPES -----									
0.7004	TwFAM1Sh(2) - Mode 1, coefficient of x^2 term								
2.1963	TwFAM1Sh(3) - , coefficient of x^3 term								
-5.6202	TwFAM1Sh(4) - , coefficient of x^4 term								
6.2275	TwFAM1Sh(5) - , coefficient of x^5 term								
-2.5040	TwFAM1Sh(6) - , coefficient of x^6 term								
-70.5319	TwFAM2Sh(2) - Mode 2, coefficient of x^2 term								
-63.7623	TwFAM2Sh(3) - , coefficient of x^3 term								
289.7369	TwFAM2Sh(4) - , coefficient of x^4 term								
-176.5134	TwFAM2Sh(5) - , coefficient of x^5 term								
22.0706	TwFAM2Sh(6) - , coefficient of x^6 term								
----- TOWER SIDE-TO-SIDE MODE SHAPES -----									
1.3850	TwSSM1Sh(2) - Mode 1, coefficient of x^2 term								
-1.7684	TwSSM1Sh(3) - , coefficient of x^3 term								
3.0871	TwSSM1Sh(4) - , coefficient of x^4 term								
-2.2395	TwSSM1Sh(5) - , coefficient of x^5 term								
0.5357	TwSSM1Sh(6) - , coefficient of x^6 term								
-121.2097	TwSSM2Sh(2) - Mode 2, coefficient of x^2 term								
184.4151	TwSSM2Sh(3) - , coefficient of x^3 term								
-224.9037	TwSSM2Sh(4) - , coefficient of x^4 term								
298.5360	TwSSM2Sh(5) - , coefficient of x^5 term								
-135.8377	TwSSM2Sh(6) - , coefficient of x^6 term								

الف-۴) فایل ورودی اصلی آیرودینامیک – NRELOffshrBslne5MW_AeroDyn.ipt

NREL 5.0 MW offshore baseline aerodynamic input properties; Compatible with AeroDyn v12.58.										
SI	SysUnits	- System of units used for input and output [must be SI for FAST] (unquoted string) BEDDOES								
StallMod	- Dynamic stall included [BEDDOES or STEADY] (unquoted string)									
USE_CM	UseCm	- Use aerodynamic pitching moment model? [USE_CM or NO_CM] (unquoted string) EQUIL							InfModel	
- Inflow model [DYNIN or EQUIL] (unquoted string)										
WAKE	IndModel	- Induction-factor model [NONE or WAKE or SWIRL] (unquoted string)								
0.005	AToler	- Induction-factor tolerance (convergence criteria) (-)								
PRANDtl	TLModel	- Tip-loss model (EQUIL only) [PRANDtl, GTECH, or NONE] (unquoted string)								
PRANDtl	HLModel	- Hub-loss model (EQUIL only) [PRANDtl or NONE] (unquoted string)								
"WindData\90m_12mps"		WindFile	- Name of file containing wind data (quoted string)							
90.0	HH	- Wind reference (hub) height [TowerHt+Twr2Shft+OverHang*SIN(ShftTilt)] (m)								
0.0	TwrShad	- Tower-shadow velocity deficit (-)								
9999.9	ShadHwid	- Tower-shadow half width (m)								
9999.9	T_Shad_Refpt	- Tower-shadow reference point (m)								
1.225	AirDens	- Air density (kg/m^3)								
1.464E-5	KinVisc	- Kinematic air viscosity [CURRENTLY IGNORED] (m^2/sec) 0.02479							DTAero	- Time interval for aerodynamic calculations (sec)
8	NumFoil	- Number of airfoil files (-)								
"AeroData\Cylinder1.dat"		FoilNm	- Names of the airfoil files [NumFoil lines] (quoted strings)							
"AeroData\Cylinder2.dat"										
"AeroData\DU40_A17.dat"										
"AeroData\DU35_A17.dat" "AeroData\DU30_A17.dat" "AeroData\DU25_A17.dat" "AeroData\DU21_A17.dat" "AeroData\NACA64_A17.dat"										
17	BldNodes	- Number of blade nodes used for analysis (-)								
RNodes	AeroTwst	DRNodes	Chord	NFoil	PrnElm	2.8667	13.308	2.7333	3.542 1 NOPRINT	
5.6000	13.308	2.7333	3.854	1	NOPRINT					
8.3333	13.308	2.7333	4.167	2	NOPRINT					
11.7500	13.308	4.1000	4.557	3	NOPRINT					
15.8500	11.480	4.1000	4.652	4	NOPRINT					
19.9500	10.162	4.1000	4.458	4	NOPRINT					
24.0500	9.011	4.1000	4.249	5	NOPRINT					
28.1500	7.795	4.1000	4.007	6	NOPRINT					
32.2500	6.544	4.1000	3.748	6	NOPRINT					
36.3500	5.361	4.1000	3.502	7	NOPRINT					
40.4500	4.188	4.1000	3.256	7	NOPRINT					
44.5500	3.125	4.1000	3.010	8	NOPRINT					
48.6500	2.319	4.1000	2.764	8	NOPRINT					
52.7500	1.526	4.1000	2.518	8	NOPRINT					
56.1667	0.863	2.7333	2.313	8	NOPRINT					
58.9000	0.370	2.7333	2.086	8	NOPRINT					
61.6333	0.106	2.7333	1.419	8	NOPRINT					

الف-۵) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره – Cylinder1.dat

Round root section with a Cd of 0.35
 Made by Jason Jonkman
 1 Number of
 airfoil tables in this file

```

0.0      Table ID parameter
0.0      Stall angle (deg)
0.0      No longer used, enter zero
0.0      No longer used, enter zero
0.0      No longer used, enter zero
0.0      Zero Cn angle of attack (deg)
0.0      Cn slope for zero lift (dimensionless)
0.0      Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack
0.0      Cn at stall value for negative angle of attack
0.0      Angle of attack for minimum CD (deg)
0.35     Minimum CD value
-180.00  0.000  0.3500  0.000
0.00     0.000  0.3500  0.000
180.00   0.000  0.3500  0.000

```

الف-۶) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره-DU40_A17.dat

DU40 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of DOW
 Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by

```

1      Number of airfoil tables in this file
0.0    Table ID parameter
9.00   Stall angle (deg)
0.0    No longer used, enter zero
0.0    No longer used, enter zero
0.0    No longer used, enter zero
-1.3430 Zero Cn angle of attack (deg)
7.4888 Cn slope for zero lift (dimensionless)
1.3519 Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack
-0.3226 Cn at stall value for negative angle of attack
0.00   Angle of attack for minimum CD (deg) 0.0113 Minimum CD value
-180.000.000  0.0602 0.0000
-175.000.218  0.0699 0.0934
-170.000.397  0.1107 0.1697
-160.000.642  0.3045 0.2813
-155.000.715  0.4179 0.3208
-150.000.757  0.5355 0.3516
-145.000.772  0.6535 0.3752
-140.000.762  0.7685 0.3926
-135.000.731  0.8777 0.4048
-130.000.680  0.9788 0.4126
-125.000.613  1.0700 0.4166
-120.000.532  1.1499 0.4176
-115.000.439  1.2174 0.4158
-110.000.337  1.2716 0.4117
-105.000.228  1.3118 0.4057
-100.000.114  1.3378 0.3979
-95.00 -0.002  1.3492 0.3887
-90.00 -0.120  1.3460 0.3781
-85.00 -0.236  1.3283 0.3663
-80.00 -0.349  1.2964 0.3534
-75.00 -0.456  1.2507 0.3394
-70.00 -0.557  1.1918 0.3244
-65.00 -0.647  1.1204 0.3084
-60.00 -0.727  1.0376 0.2914
-55.00 -0.792  0.9446 0.2733
-50.00 -0.842  0.8429 0.2543
-45.00 -0.874  0.7345 0.2342
-40.00 -0.886  0.6215 0.2129
-35.00 -0.875  0.5067 0.1906
-30.00 -0.839  0.3932 0.1670
-25.00 -0.777  0.2849 0.1422
-24.00 -0.761  0.2642 0.1371
-23.00 -0.744  0.2440 0.1320
-22.00 -0.725  0.2242 0.1268
-21.00 -0.706  0.2049 0.1215
-20.00 -0.685  0.1861 0.1162
-19.00 -0.662  0.1687 0.1097
-18.00 -0.635  0.1533 0.1012
-17.00 -0.605  0.1398 0.0907
-16.00 -0.571  0.1281 0.0784
-15.00 -0.534  0.1183 0.0646
-14.00 -0.494  0.1101 0.0494
-13.00 -0.452  0.1036 0.0330
-12.00 -0.407  0.0986 0.0156
-11.00 -0.360  0.0951 -0.0026
-10.00 -0.311  0.0931 -0.0213
-8.00  -0.208  0.0930 -0.0600
-6.00  -0.111  0.0689 -0.0500
-5.50  -0.090  0.0614 -0.0516

```

-5.00	-0.072	0.0547	-0.0532
-4.50	-0.065	0.0480	-0.0538
-4.00	-0.054	0.0411	-0.0544
-3.50	-0.017	0.0349	-0.0554
-3.00	0.003	0.0299	-0.0558
-2.50	0.014	0.0255	-0.0555
-2.00	0.009	0.0198	-0.0534
-1.50	0.004	0.0164	-0.0442
-1.00	0.036	0.0147	-0.0469
-0.50	0.073	0.0137	-0.0522
0.00	0.137	0.0113	-0.0573
0.50	0.213	0.0114	-0.0644
1.00	0.292	0.0118	-0.0718
1.50	0.369	0.0122	-0.0783
2.00	0.444	0.0124	-0.0835
2.50	0.514	0.0124	-0.0866
3.00	0.580	0.0123	-0.0887
3.50	0.645	0.0120	-0.0900
4.00	0.710	0.0119	-0.0914
4.50	0.776	0.0122	-0.0933
5.00	0.841	0.0125	-0.0947
5.50	0.904	0.0129	-0.0957
6.00	0.967	0.0135	-0.0967
6.50	1.027	0.0144	-0.0973
7.00	1.084	0.0158	-0.0972
7.50	1.140	0.0174	-0.0972
8.00	1.193	0.0198	-0.0968
8.50	1.242	0.0231	-0.0958
9.00	1.287	0.0275	-0.0948
9.50	1.333	0.0323	-0.0942
10.00	1.368	0.0393	-0.0926
10.50	1.400	0.0475	-0.0908
11.00	1.425	0.0580	-0.0890
11.50	1.449	0.0691	-0.0877
12.00	1.473	0.0816	-0.0870
12.50	1.494	0.0973	-0.0870
13.00	1.513	0.1129	-0.0876
13.50	1.538	0.1288	-0.0886
14.50	1.587	0.1650	-0.0917
15.00	1.614	0.1845	-0.0939
15.50	1.631	0.2052	-0.0966
16.00	1.649	0.2250	-0.0996
16.50	1.666	0.2467	-0.1031
17.00	1.681	0.2684	-0.1069
17.50	1.699	0.2900	-0.1110
18.00	1.719	0.3121	-0.1157
19.00	1.751	0.3554	-0.1242
19.50	1.767	0.3783	-0.1291
20.50	1.798	0.4212	-0.1384
21.00	1.810	0.4415	-0.1416
22.00	1.830	0.4830	-0.1479
23.00	1.847	0.5257	-0.1542
24.00	1.861	0.5694	-0.1603
25.00	1.872	0.6141	-0.1664
26.00	1.881	0.6593	-0.1724
28.00	1.894	0.7513	-0.1841
30.00	1.904	0.8441	-0.1954
32.00	1.915	0.9364	-0.2063
35.00	1.929	1.0722	-0.2220
40.00	1.903	1.2873	-0.2468
45.00	1.820	1.4796	-0.2701
50.00	1.690	1.6401	-0.2921
55.00	1.522	1.7609	-0.3127
60.00	1.323	1.8360	-0.3321
65.00	1.106	1.8614	-0.3502
70.00	0.880	1.8347	-0.3672
75.00	0.658	1.7567	-0.3830
80.00	0.449	1.6334	-0.3977
85.00	0.267	1.4847	-0.4112
90.00	0.124	1.3879	-0.4234
95.00	0.002	1.3912	-0.4343
100.00	-0.118	1.3795	-0.4437
105.00	-0.235	1.3528	-0.4514
110.00	-0.348	1.3114	-0.4573
115.00	-0.453	1.2557	-0.4610
120.00	-0.549	1.1864	-0.4623
125.00	-0.633	1.1041	-0.4606
130.00	-0.702	1.0102	-0.4554
135.00	-0.754	0.9060	-0.4462
140.00	-0.787	0.7935	-0.4323
145.00	-0.797	0.6750	-0.4127
150.00	-0.782	0.5532	-0.3863
155.00	-0.739	0.4318	-0.3521
160.00	-0.664	0.3147	-0.3085
170.00	-0.410	0.1144	-0.1858
175.00	-0.226	0.0702	-0.1022
180.00	0.000	0.0602	0.000

الف-۷) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره-DU35_A17.dat

DU35 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of DOW

Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by

```

1      Number of airfoil tables in this file
0.0    Table ID parameter
11.50   Stall angle (deg)
0.0     No longer used, enter zero
0.0     No longer used, enter zero
0.0     No longer used, enter zero
-1.8330 Zero Cn angle of attack (deg)
7.1838  Cn slope for zero lift (dimensionless)
1.6717  Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack
-0.3075 Cn at stall value for negative angle of attack
0.00    Angle of attack for minimum CD (deg) 0.0094 Minimum CD value
-180.000.000 0.0407 0.0000
-175.000.223 0.0507 0.0937
-170.000.405 0.1055 0.1702
-160.000.658 0.2982 0.2819
-155.000.733 0.4121 0.3213
-150.000.778 0.5308 0.3520
-145.000.795 0.6503 0.3754
-140.000.787 0.7672 0.3926
-135.000.757 0.8785 0.4046
-130.000.708 0.9819 0.4121
-125.000.641 1.0756 0.4160
-120.000.560 1.1580 0.4167
-115.000.467 1.2280 0.4146
-110.000.365 1.2847 0.4104
-105.000.255 1.3274 0.4041
-100.000.139 1.3557 0.3961
-95.00 0.021 1.3692 0.3867
-90.00 -0.098 1.3680 0.3759
-85.00 -0.216 1.3521 0.3639
-80.00 -0.331 1.3218 0.3508
-75.00 -0.441 1.2773 0.3367
-70.00 -0.544 1.2193 0.3216
-65.00 -0.638 1.1486 0.3054
-60.00 -0.720 1.0660 0.2884
-55.00 -0.788 0.9728 0.2703
-50.00 -0.840 0.8705 0.2512
-45.00 -0.875 0.7611 0.2311
-40.00 -0.889 0.6466 0.2099
-35.00 -0.880 0.5299 0.1876
-30.00 -0.846 0.4141 0.1641
-25.00 -0.784 0.3030 0.1396
-24.00 -0.768 0.2817 0.1345
-23.00 -0.751 0.2608 0.1294
-22.00 -0.733 0.2404 0.1243
-21.00 -0.714 0.2205 0.1191
-20.00 -0.693 0.2011 0.1139
-19.00 -0.671 0.1822 0.1086
-18.00 -0.648 0.1640 0.1032
-17.00 -0.624 0.1465 0.0975
-16.00 -0.601 0.1300 0.0898
-15.00 -0.579 0.1145 0.0799
-14.00 -0.559 0.1000 0.0682
-13.00 -0.539 0.0867 0.0547
-12.00 -0.519 0.0744 0.0397
-11.00 -0.499 0.0633 0.0234
-10.00 -0.480 0.0534 0.0060
-5.54 -0.385 0.0245 -0.0800
-5.04 -0.359 0.0225 -0.0800
-4.54 -0.360 0.0196 -0.0800
-4.04 -0.355 0.0174 -0.0800
-3.54 -0.307 0.0162 -0.0800
-3.04 -0.246 0.0144 -0.0800
-3.00 -0.240 0.0240 -0.0623
-2.50 -0.163 0.0188 -0.0674
-2.00 -0.091 0.0160 -0.0712
-1.50 -0.019 0.0137 -0.0746
-1.00 0.052 0.0118 -0.0778
-0.50 0.121 0.0104 -0.0806
0.00 0.196 0.0094 -0.0831
0.50 0.265 0.0096 -0.0863
1.00 0.335 0.0098 -0.0895
1.50 0.404 0.0099 -0.0924
2.00 0.472 0.0100 -0.0949
2.50 0.540 0.0102 -0.0973
3.00 0.608 0.0103 -0.0996
3.50 0.674 0.0104 -0.1016
4.00 0.742 0.0105 -0.1037
4.50 0.809 0.0107 -0.1057

```

5.00	0.875	0.0108	-0.1076
5.50	0.941	0.0109	-0.1094
6.00	1.007	0.0110	-0.1109
6.50	1.071	0.0113	-0.1118
7.00	1.134	0.0115	-0.1127
7.50	1.198	0.0117	-0.1138
8.00	1.260	0.0120	-0.1144
8.50	1.318	0.0126	-0.1137
9.00	1.368	0.0133	-0.1112
9.50	1.422	0.0143	-0.1100
10.00	1.475	0.0156	-0.1086
10.50	1.523	0.0174	-0.1064
11.00	1.570	0.0194	-0.1044
11.50	1.609	0.0227	-0.1013
12.00	1.642	0.0269	-0.0980
12.50	1.675	0.0319	-0.0953
13.00	1.700	0.0398	-0.0925
13.50	1.717	0.0488	-0.0896
14.00	1.712	0.0614	-0.0864
14.50	1.703	0.0786	-0.0840
15.00	1.671	0.1173	-0.0830
16.00	1.649	0.1377	-0.0848
16.50	1.621	0.1600	-0.0880
17.00	1.598	0.1814	-0.0926
17.50	1.571	0.2042	-0.0984
18.00	1.549	0.2316	-0.1052
19.00	1.544	0.2719	-0.1158
19.50	1.549	0.2906	-0.1213
20.00	1.565	0.3085	-0.1248
21.00	1.565	0.3447	-0.1317
22.00	1.563	0.3820	-0.1385
23.00	1.558	0.4203	-0.1452
24.00	1.552	0.4593	-0.1518
25.00	1.546	0.4988	-0.1583
26.00	1.539	0.5387	-0.1647
28.00	1.527	0.6187	-0.1770
30.00	1.522	0.6978	-0.1886
32.00	1.529	0.7747	-0.1994
35.00	1.544	0.8869	-0.2148
40.00	1.529	1.0671	-0.2392
45.00	1.471	1.2319	-0.2622
50.00	1.376	1.3747	-0.2839
55.00	1.249	1.4899	-0.3043
60.00	1.097	1.5728	-0.3236
65.00	0.928	1.6202	-0.3417
70.00	0.750	1.6302	-0.3586
75.00	0.570	1.6031	-0.3745
80.00	0.396	1.5423	-0.3892
85.00	0.237	1.4598	-0.4028
90.00	0.101	1.4041	-0.4151
95.00	-0.022	1.4053	-0.4261
100.00	-0.143	1.3914	-0.4357
105.00	-0.261	1.3625	-0.4437
110.00	-0.374	1.3188	-0.4498
115.00	-0.480	1.2608	-0.4538
120.00	-0.575	1.1891	-0.4553
125.00	-0.659	1.1046	-0.4540
130.00	-0.727	1.0086	-0.4492
135.00	-0.778	0.9025	-0.4405
140.00	-0.809	0.7883	-0.4270
145.00	-0.818	0.6684	-0.4078
150.00	-0.800	0.5457	-0.3821
155.00	-0.754	0.4236	-0.3484
160.00	-0.677	0.3066	-0.3054
170.00	-0.417	0.1085	-0.1842
175.00	-0.229	0.0510	-0.1013
180.00	0.000	0.0407	0.0000

الف-۸) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره-DU30_A17.dat

DU30 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of DOW
 Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by

1 Number of airfoil tables in this file
 0.0 Table ID parameter
 9.00 Stall angle (deg)
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero

-2.3220 Zero Cn angle of attack (deg)

7.3326	Cn slope for zero lift (dimensionless)
1.4490	Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack
-0.6138	Cn at stall value for negative angle of attack
0.00	Angle of attack for minimum CD (deg)
0.0087	Minimum CD value
-180.00	0.000 0.0267 0.0000
-175.00	0.274 0.0370 0.1379
-170.00	0.547 0.0968 0.2778
-160.00	0.685 0.2876 0.2740
-155.00	0.766 0.4025 0.3118
-150.00	0.816 0.5232 0.3411
-145.00	0.836 0.6454 0.3631
-140.00	0.832 0.7656 0.3791
-135.00	0.804 0.8807 0.3899
-130.00	0.756 0.9882 0.3965
-125.00	0.690 1.0861 0.3994
-120.00	0.609 1.1730 0.3992
-115.00	0.515 1.2474 0.3964
-110.00	0.411 1.3084 0.3915
-105.00	0.300 1.3552 0.3846
-100.00	0.182 1.3875 0.3761
-95.00	0.061 1.4048 0.3663
-90.00	-0.061 1.4070 0.3551
-85.00	-0.183 1.3941 0.3428
-80.00	-0.302 1.3664 0.3295
-75.00	-0.416 1.3240 0.3153
-70.00	-0.523 1.2676 0.3001
-65.00	-0.622 1.1978 0.2841
-60.00	-0.708 1.1156 0.2672
-55.00	-0.781 1.0220 0.2494
-50.00	-0.838 0.9187 0.2308
-45.00	-0.877 0.8074 0.2113
-40.00	-0.895 0.6904 0.1909
-35.00	-0.889 0.5703 0.1696
-30.00	-0.858 0.4503 0.1475
-25.00	-0.832 0.3357 0.1224
-24.00	-0.852 0.3147 0.1156
-23.00	-0.882 0.2946 0.1081
-22.00	-0.919 0.2752 0.1000
-21.00	-0.963 0.2566 0.0914
-20.00	-1.013 0.2388 0.0823
-19.00	-1.067 0.2218 0.0728
-18.00	-1.125 0.2056 0.0631
-17.00	-1.185 0.1901 0.0531
-16.00	-1.245 0.1754 0.0430
-15.25	-1.290 0.1649 0.0353
-14.24	-1.229 0.1461 0.0240
-13.24	-1.148 0.1263 0.0100
-12.22	-1.052 0.1051 -0.0090
-11.22	-0.965 0.0886 -0.0230
-10.19	-0.867 0.0740 -0.0336
-9.70	-0.822 0.0684 -0.0375
-9.18	-0.769 0.0605 -0.0440
-8.18	-0.756 0.0270 -0.0578
-7.19	-0.690 0.0180 -0.0590
-6.65	-0.616 0.0166 -0.0633
-6.13	-0.542 0.0152 -0.0674
-6.00	-0.525 0.0117 -0.0732
-5.50	-0.451 0.0105 -0.0766
-5.00	-0.382 0.0097 -0.0797
-4.50	-0.314 0.0092 -0.0825
-4.00	-0.251 0.0091 -0.0853
-3.50	-0.189 0.0089 -0.0884
-3.00	-0.120 0.0089 -0.0914
-2.50	-0.051 0.0088 -0.0942
-2.00	0.017 0.0088 -0.0969
-1.50	0.085 0.0088 -0.0994
-1.00	0.152 0.0088 -0.1018
-0.50	0.219 0.0088 -0.1041
0.00	0.288 0.0087 -0.1062
0.50	0.354 0.0087 -0.1086
1.00	0.421 0.0088 -0.1107
1.50	0.487 0.0089 -0.1129
2.00	0.554 0.0090 -0.1149
2.50	0.619 0.0091 -0.1168
3.00	0.685 0.0092 -0.1185
3.50	0.749 0.0093 -0.1201
4.00	0.815 0.0095 -0.1218
4.50	0.879 0.0096 -0.1233
5.00	0.944 0.0097 -0.1248
5.50	1.008 0.0099 -0.1260
6.00	1.072 0.0101 -0.1270
6.50	1.135 0.0103 -0.1280
7.00	1.197 0.0107 -0.1287
7.50	1.256 0.0112 -0.1289
8.00	1.305 0.0125 -0.1270
9.00	1.390 0.0155 -0.1207

9.50	1.424	0.0171	-0.1158
10.00	1.458	0.0192	-0.1116
10.50	1.488	0.0219	-0.1073
11.00	1.512	0.0255	-0.1029
11.50	1.533	0.0307	-0.0983
12.00	1.549	0.0370	-0.0949
12.50	1.558	0.0452	-0.0921
13.00	1.470	0.0630	-0.0899
13.50	1.398	0.0784	-0.0885
14.00	1.354	0.0931	-0.0885
14.50	1.336	0.1081	-0.0902
15.00	1.333	0.1239	-0.0928
15.50	1.326	0.1415	-0.0963
16.00	1.329	0.1592	-0.1006
16.50	1.326	0.1743	-0.1042
17.00	1.321	0.1903	-0.1084
17.50	1.331	0.2044	-0.1125
18.00	1.333	0.2186	-0.1169
18.50	1.340	0.2324	-0.1215
19.00	1.362	0.2455	-0.1263
19.50	1.382	0.2584	-0.1313
20.00	1.398	0.2689	-0.1352
20.50	1.426	0.2814	-0.1406
21.00	1.437	0.2943	-0.1462
22.00	1.418	0.3246	-0.1516
23.00	1.397	0.3557	-0.1570
24.00	1.376	0.3875	-0.1623
25.00	1.354	0.4198	-0.1676
26.00	1.332	0.4524	-0.1728
28.00	1.293	0.5183	-0.1832
30.00	1.265	0.5843	-0.1935
32.00	1.253	0.6492	-0.2039
35.00	1.264	0.7438	-0.2193
40.00	1.258	0.8970	-0.2440
45.00	1.217	1.0402	-0.2672
50.00	1.146	1.1686	-0.2891
55.00	1.049	1.2779	-0.3097
60.00	0.932	1.3647	-0.3290
65.00	0.799	1.4267	-0.3471
70.00	0.657	1.4621	-0.3641
75.00	0.509	1.4708	-0.3799
80.00	0.362	1.4544	-0.3946
85.00	0.221	1.4196	-0.4081
90.00	0.092	1.3938	-0.4204
95.00	-0.030	1.3943	-0.4313
100.00	-0.150	1.3798	-0.4408
105.00	-0.267	1.3504	-0.4486
110.00	-0.379	1.3063	-0.4546
115.00	-0.483	1.2481	-0.4584
120.00	-0.578	1.1763	-0.4597
125.00	-0.660	1.0919	-0.4582
130.00	-0.727	0.9962	-0.4532
135.00	-0.777	0.8906	-0.4441
140.00	-0.807	0.7771	-0.4303
145.00	-0.815	0.6581	-0.4109
150.00	-0.797	0.5364	-0.3848
155.00	-0.750	0.4157	-0.3508
160.00	-0.673	0.3000	-0.3074
170.00	-0.547	0.1051	-0.2786
175.00	-0.274	0.0388	-0.1380
180.00	0.000	0.0267	0.0000

الف-۹) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره-DU25_A17.dat

DU25 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of DOW
 Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by

```

1      Number of airfoil tables in this file
0.0    Table ID parameter
8.50   Stall angle (deg)
0.0    No longer used, enter zero
0.0    No longer used, enter zero
0.0    No longer used, enter zero
-4.2422 Zero Cn angle of attack (deg)
6.4462 Cn slope for zero lift (dimensionless)
  
```

1.4336	Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack		
-0.6873	Cn at stall value for negative angle of attack		
0.00	Angle of attack for minimum CD (deg)	0.0065	Minimum CD value
-180.00	0.000	0.0202	0.0000
-175.00	0.368	0.0324	0.1845
-170.00	0.735	0.0943	0.3701
-160.00	0.695	0.2848	0.2679
-155.00	0.777	0.4001	0.3046
-150.00	0.828	0.5215	0.3329
-145.00	0.850	0.6447	0.3540
-140.00	0.846	0.7660	0.3693
-135.00	0.818	0.8823	0.3794
-130.00	0.771	0.9911	0.3854
-125.00	0.705	1.0905	0.3878
-120.00	0.624	1.1787	0.3872
-115.00	0.530	1.2545	0.3841
-110.00	0.426	1.3168	0.3788
-105.00	0.314	1.3650	0.3716
-100.00	0.195	1.3984	0.3629
-95.00	0.073	1.4169	0.3529
-90.00	-0.050	1.4201	0.3416
-85.00	-0.173	1.4081	0.3292
-80.00	-0.294	1.3811	0.3159
-75.00	-0.409	1.3394	0.3017
-70.00	-0.518	1.2833	0.2866
-65.00	-0.617	1.2138	0.2707
-60.00	-0.706	1.1315	0.2539
-55.00	-0.780	1.0378	0.2364
-50.00	-0.839	0.9341	0.2181
-45.00	-0.879	0.8221	0.1991
-40.00	-0.898	0.7042	0.1792
-35.00	-0.893	0.5829	0.1587
-30.00	-0.862	0.4616	0.1374
-25.00	-0.803	0.3441	0.1154
-24.00	-0.792	0.3209	0.1101
-23.00	-0.789	0.2972	0.1031
-22.00	-0.792	0.2730	0.0947
-21.00	-0.801	0.2485	0.0849
-20.00	-0.815	0.2237	0.0739
-19.00	-0.833	0.1990	0.0618
-18.00	-0.854	0.1743	0.0488
-17.00	-0.879	0.1498	0.0351
-16.00	-0.905	0.1256	0.0208
-15.00	-0.932	0.1020	0.0060
-14.00	-0.959	0.0789	-0.0091
-13.00	-0.985	0.0567	-0.0243
-13.00	-0.985	0.0567	-0.0243
-12.01	-0.953	0.0271	-0.0349
-11.00	-0.900	0.0303	-0.0361
-9.98	-0.827	0.0287	-0.0464
-8.98	-0.753	0.0271	-0.0534
-8.47	-0.691	0.0264	-0.0650
-7.45	-0.555	0.0114	-0.0782
-6.42	-0.413	0.0094	-0.0904
-5.40	-0.271	0.0086	-0.1006
-5.00	-0.220	0.0073	-0.1107
-4.50	-0.152	0.0071	-0.1135
-4.00	-0.084	0.0070	-0.1162
-3.50	-0.018	0.0069	-0.1186
-3.00	0.049	0.0068	-0.1209
-2.50	0.115	0.0068	-0.1231
-2.00	0.181	0.0068	-0.1252
-1.50	0.247	0.0067	-0.1272
-1.00	0.312	0.0067	-0.1293
-0.50	0.377	0.0067	-0.1311
0.00	0.444	0.0065	-0.1330
0.50	0.508	0.0065	-0.1347
1.00	0.573	0.0066	-0.1364
1.50	0.636	0.0067	-0.1380
2.00	0.701	0.0068	-0.1396
2.50	0.765	0.0069	-0.1411
3.00	0.827	0.0070	-0.1424
3.50	0.890	0.0071	-0.1437
4.00	0.952	0.0073	-0.1448
4.50	1.013	0.0076	-0.1456
5.00	1.062	0.0079	-0.1445
6.00	1.161	0.0099	-0.1419
6.50	1.208	0.0117	-0.1403
7.00	1.254	0.0132	-0.1382
7.50	1.301	0.0143	-0.1362
8.00	1.336	0.0153	-0.1320
8.50	1.369	0.0165	-0.1276
9.00	1.400	0.0181	-0.1234
9.50	1.428	0.0211	-0.1193
10.00	1.442	0.0262	-0.1152
10.50	1.427	0.0336	-0.1115
11.00	1.374	0.0420	-0.1081
11.50	1.316	0.0515	-0.1052

12.00	1.277	0.0601	-0.1026
12.50	1.250	0.0693	-0.1000
13.00	1.246	0.0785	-0.0980
13.50	1.247	0.0888	-0.0969
14.00	1.256	0.1000	-0.0968
14.50	1.260	0.1108	-0.0973
15.00	1.271	0.1219	-0.0981
15.50	1.281	0.1325	-0.0992
16.00	1.289	0.1433	-0.1006
16.50	1.294	0.1541	-0.1023
17.00	1.304	0.1649	-0.1042
17.50	1.309	0.1754	-0.1064
18.00	1.315	0.1845	-0.1082
18.50	1.320	0.1953	-0.1110
19.00	1.330	0.2061	-0.1143
19.50	1.343	0.2170	-0.1179
20.00	1.354	0.2280	-0.1219
20.50	1.359	0.2390	-0.1261
21.00	1.360	0.2536	-0.1303
22.00	1.325	0.2814	-0.1375
23.00	1.288	0.3098	-0.1446
24.00	1.251	0.3386	-0.1515
25.00	1.215	0.3678	-0.1584
26.00	1.181	0.3972	-0.1651
28.00	1.120	0.4563	-0.1781
30.00	1.076	0.5149	-0.1904
32.00	1.056	0.5720	-0.2017
35.00	1.066	0.6548	-0.2173
40.00	1.064	0.7901	-0.2418
45.00	1.035	0.9190	-0.2650
50.00	0.980	1.0378	-0.2867
55.00	0.904	1.1434	-0.3072
60.00	0.810	1.2333	-0.3265
65.00	0.702	1.3055	-0.3446
70.00	0.582	1.3587	-0.3616
75.00	0.456	1.3922	-0.3775
80.00	0.326	1.4063	-0.3921
85.00	0.197	1.4042	-0.4057
90.00	0.072	1.3985	-0.4180
95.00	-0.050	1.3973	-0.4289
100.00	-0.170	1.3810	-0.4385
105.00	-0.287	1.3498	-0.4464
110.00	-0.399	1.3041	-0.4524
115.00	-0.502	1.2442	-0.4563
120.00	-0.596	1.1709	-0.4577
125.00	-0.677	1.0852	-0.4563
130.00	-0.743	0.9883	-0.4514
135.00	-0.792	0.8818	-0.4425
140.00	-0.821	0.7676	-0.4288
145.00	-0.826	0.6481	-0.4095
150.00	-0.806	0.5264	-0.3836
155.00	-0.758	0.4060	-0.3497
160.00	-0.679	0.2912	-0.3065
170.00	-0.735	0.0995	-0.3706
175.00	-0.368	0.0356	-0.1846
180.00	0.000	0.0202	0.0000

الف- (۱۰) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره-DU21_A17.dat

DU21 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of DOW
 Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by

1 Number of airfoil tables in this file
 0.0 Table ID parameter
 8.00 Stall angle (deg)
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero
 -5.0609 Zero Cn angle of attack (deg)
 6.2047 Cn slope for zero lift (dimensionless)
 1.4144 Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack
 -0.5324 Cn at stall value for negative angle of attack
 -1.50 Angle of attack for minimum CD (deg)
 0.0057 Minimum CD value
 -180.00 0.000 0.0185 0.0000

-175.00	0.394	0.0332	0.1978
-170.00	0.788	0.0945	0.3963
-160.00	0.670	0.2809	0.2738
-155.00	0.749	0.3932	0.3118
-150.00	0.797	0.5112	0.3413
-145.00	0.818	0.6309	0.3636
-140.00	0.813	0.7485	0.3799
-135.00	0.786	0.8612	0.3911
-130.00	0.739	0.9665	0.3980
-125.00	0.675	1.0625	0.4012
-120.00	0.596	1.1476	0.4014
-115.00	0.505	1.2206	0.3990
-110.00	0.403	1.2805	0.3943
-105.00	0.294	1.3265	0.3878
-100.00	0.179	1.3582	0.3796
-95.00	0.060	1.3752	0.3700
-90.00	-0.060	1.3774	0.3591
-85.00	-0.179	1.3648	0.3471
-80.00	-0.295	1.3376	0.3340
-75.00	-0.407	1.2962	0.3199
-70.00	-0.512	1.2409	0.3049
-65.00	-0.608	1.1725	0.2890
-60.00	-0.693	1.0919	0.2722
-55.00	-0.764	1.0002	0.2545
-50.00	-0.820	0.8990	0.2359
-45.00	-0.857	0.7900	0.2163
-40.00	-0.875	0.6754	0.1958
-35.00	-0.869	0.5579	0.1744
-30.00	-0.838	0.4405	0.1520
-25.00	-0.791	0.3256	0.1262
-24.00	-0.794	0.3013	0.1170
-23.00	-0.805	0.2762	0.1059
-22.00	-0.821	0.2506	0.0931
-21.00	-0.843	0.2246	0.0788
-20.00	-0.869	0.1983	0.0631
-19.00	-0.899	0.1720	0.0464
-18.00	-0.931	0.1457	0.0286
-17.00	-0.964	0.1197	0.0102
-16.00	-0.999	0.0940	-0.0088
-15.00	-1.033	0.0689	-0.0281
-14.50	-1.050	0.0567	-0.0378
-12.01	-0.953	0.0271	-0.0349
-11.00	-0.900	0.0303	-0.0361
-9.98	-0.827	0.0287	-0.0464
-8.12	-0.536	0.0124	-0.0821
-7.62	-0.467	0.0109	-0.0924
-7.11	-0.393	0.0092	-0.1015
-6.60	-0.323	0.0083	-0.1073
-6.50	-0.311	0.0089	-0.1083
-6.00	-0.245	0.0082	-0.1112
-5.50	-0.178	0.0074	-0.1146
-5.00	-0.113	0.0069	-0.1172
-4.50	-0.048	0.0065	-0.1194
-4.00	0.016	0.0063	-0.1213
-3.50	0.080	0.0061	-0.1232
-3.00	0.145	0.0058	-0.1252
-2.50	0.208	0.0057	-0.1268
-2.00	0.270	0.0057	-0.1282
-1.50	0.333	0.0057	-0.1297
-1.00	0.396	0.0057	-0.1310
-0.50	0.458	0.0057	-0.1324
0.00	0.521	0.0057	-0.1337
0.50	0.583	0.0057	-0.1350
1.00	0.645	0.0058	-0.1363
1.50	0.706	0.0058	-0.1374
2.00	0.768	0.0059	-0.1385
2.50	0.828	0.0061	-0.1395
3.00	0.888	0.0063	-0.1403
3.50	0.948	0.0066	-0.1406
4.00	0.996	0.0071	-0.1398
4.50	1.046	0.0079	-0.1390
5.00	1.095	0.0090	-0.1378
5.50	1.145	0.0103	-0.1369
6.00	1.192	0.0113	-0.1353
6.50	1.239	0.0122	-0.1338
7.00	1.283	0.0131	-0.1317
7.50	1.324	0.0139	-0.1291
8.00	1.358	0.0147	-0.1249
8.50	1.385	0.0158	-0.1213
9.00	1.403	0.0181	-0.1177

9.50	1.401	0.0211	-0.1142
10.00	1.358	0.0255	-0.1103
10.50	1.313	0.0301	-0.1066
11.00	1.287	0.0347	-0.1032
11.50	1.274	0.0401	-0.1002
12.00	1.272	0.0468	-0.0971
12.50	1.273	0.0545	-0.0940
13.00	1.273	0.0633	-0.0909
13.50	1.273	0.0722	-0.0883
14.00	1.272	0.0806	-0.0865
14.50	1.273	0.0900	-0.0854
15.00	1.275	0.0987	-0.0849
15.50	1.281	0.1075	-0.0847
16.00	1.284	0.1170	-0.0850
16.50	1.296	0.1270	-0.0858
17.00	1.306	0.1368	-0.0869
17.50	1.308	0.1464	-0.0883
18.00	1.308	0.1562	-0.0901
18.50	1.308	0.1664	-0.0922
19.00	1.308	0.1770	-0.0949
19.50	1.307	0.1878	-0.0980
20.00	1.311	0.1987	-0.1017
20.50	1.325	0.2100	-0.1059
21.00	1.324	0.2214	-0.1105
22.00	1.277	0.2499	-0.1172
23.00	1.229	0.2786	-0.1239
24.00	1.182	0.3077	-0.1305
25.00	1.136	0.3371	-0.1370
26.00	1.093	0.3664	-0.1433
28.00	1.017	0.4246	-0.1556
30.00	0.962	0.4813	-0.1671
32.00	0.937	0.5356	-0.1778
35.00	0.947	0.6127	-0.1923
40.00	0.950	0.7396	-0.2154
45.00	0.928	0.8623	-0.2374
50.00	0.884	0.9781	-0.2583
55.00	0.821	1.0846	-0.2782
60.00	0.740	1.1796	-0.2971
65.00	0.646	1.2617	-0.3149
70.00	0.540	1.3297	-0.3318
75.00	0.425	1.3827	-0.3476
80.00	0.304	1.4202	-0.3625
85.00	0.179	1.4423	-0.3763
90.00	0.053	1.4512	-0.3890
95.00	-0.073	1.4480	-0.4004
100.00	-0.198	1.4294	-0.4105
105.00	-0.319	1.3954	-0.4191
110.00	-0.434	1.3464	-0.4260
115.00	-0.541	1.2829	-0.4308
120.00	-0.637	1.2057	-0.4333
125.00	-0.720	1.1157	-0.4330
130.00	-0.787	1.0144	-0.4294
135.00	-0.836	0.9033	-0.4219
140.00	-0.864	0.7845	-0.4098
145.00	-0.869	0.6605	-0.3922
150.00	-0.847	0.5346	-0.3682
155.00	-0.795	0.4103	-0.3364
160.00	-0.711	0.2922	-0.2954
170.00	-0.788	0.0969	-0.3966
175.00	-0.394	0.0334	-0.1978
180.00	0.000	0.0185	0.0000

الف- (۱۱) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پرده-NACA64_A17.dat

NACA64 airfoil with an aspect ratio of 17. Original -180 to 180deg Cl, Cd, and Cm versus AOA data taken from Appendix A of D
 Cl and Cd values corrected for rotational stall delay and Cd values corrected using the Viterna method for 0 to 90deg AOA by
 1 Number of airfoil tables in this file
 0.0 Table ID parameter
 9.00 Stall angle (deg)
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero
 0.0 No longer used, enter zero
 -4.4320 Zero Cn angle of attack (deg)
 6.0031 Cn slope for zero lift (dimensionless)
 1.4073 Cn extrapolated to value at positive stall angle of attack

-0.7945 Cn at stall value for negative angle of attack			
-1.00	Angle of attack for minimum CD (deg)	0.0052	Minimum CD value
-180.00	0.000	0.0198	0.0000
-175.00	0.374	0.0341	0.1880
-170.00	0.749	0.0955	0.3770
-160.00	0.659	0.2807	0.2747
-155.00	0.736	0.3919	0.3130
-150.00	0.783	0.5086	0.3428
-145.00	0.803	0.6267	0.3654
-140.00	0.798	0.7427	0.3820
-135.00	0.771	0.8537	0.3935
-130.00	0.724	0.9574	0.4007
-125.00	0.660	1.0519	0.4042
-120.00	0.581	1.1355	0.4047
-115.00	0.491	1.2070	0.4025
-110.00	0.390	1.2656	0.3981
-105.00	0.282	1.3104	0.3918
-100.00	0.169	1.3410	0.3838
-95.00	0.052	1.3572	0.3743
-90.00	-0.067	1.3587	0.3636
-85.00	-0.184	1.3456	0.3517
-80.00	-0.299	1.3181	0.3388
-75.00	-0.409	1.2765	0.3248
-70.00	-0.512	1.2212	0.3099
-65.00	-0.606	1.1532	0.2940
-60.00	-0.689	1.0731	0.2772
-55.00	-0.759	0.9822	0.2595
-50.00	-0.814	0.8820	0.2409
-45.00	-0.850	0.7742	0.2212
-40.00	-0.866	0.6610	0.2006
-35.00	-0.860	0.5451	0.1789
-30.00	-0.829	0.4295	0.1563
-25.00	-0.853	0.3071	0.1156
-24.00	-0.870	0.2814	0.1040
-23.00	-0.890	0.2556	0.0916
-22.00	-0.911	0.2297	0.0785
-21.00	-0.934	0.2040	0.0649
-20.00	-0.958	0.1785	0.0508
-19.00	-0.982	0.1534	0.0364
-18.00	-1.005	0.1288	0.0218
-17.00	-1.082	0.1037	0.0129
-16.00	-1.113	0.0786	-0.0028
-15.00	-1.105	0.0535	-0.0251
-14.00	-1.078	0.0283	-0.0419
-13.50	-1.053	0.0158	-0.0521
-13.00	-1.015	0.0151	-0.0610
-12.00	-0.904	0.0134	-0.0707
-11.00	-0.807	0.0121	-0.0722
-10.00	-0.711	0.0111	-0.0734
-9.00	-0.595	0.0099	-0.0772
-8.00	-0.478	0.0091	-0.0807
-7.00	-0.375	0.0086	-0.0825
-6.00	-0.264	0.0082	-0.0832
-5.00	-0.151	0.0079	-0.0841
-4.00	-0.017	0.0072	-0.0869
-3.00	0.088	0.0064	-0.0912
-2.00	0.213	0.0054	-0.0946
-1.00	0.328	0.0052	-0.0971
0.00	0.442	0.0052	-0.1014
1.00	0.556	0.0052	-0.1076
2.00	0.670	0.0053	-0.1126
3.00	0.784	0.0053	-0.1157
4.00	0.898	0.0054	-0.1199
5.00	1.011	0.0058	-0.1240
6.00	1.103	0.0091	-0.1234
7.00	1.181	0.0113	-0.1184
8.00	1.257	0.0124	-0.1163
8.50	1.293	0.0130	-0.1163
9.00	1.326	0.0136	-0.1160
9.50	1.356	0.0143	-0.1154
10.00	1.382	0.0150	-0.1149
10.50	1.400	0.0267	-0.1145
11.00	1.415	0.0383	-0.1143
11.50	1.425	0.0498	-0.1147
12.00	1.434	0.0613	-0.1158
12.50	1.443	0.0727	-0.1165
13.00	1.451	0.0841	-0.1153
13.50	1.453	0.0954	-0.1131
14.00	1.448	0.1065	-0.1112
14.50	1.444	0.1176	-0.1101

15.00	1.445	0.1287	-0.1103
15.50	1.447	0.1398	-0.1109
16.00	1.448	0.1509	-0.1114
16.50	1.444	0.1619	-0.1111
17.00	1.438	0.1728	-0.1097
17.50	1.439	0.1837	-0.1079
18.00	1.448	0.1947	-0.1080
18.50	1.452	0.2057	-0.1090
19.00	1.448	0.2165	-0.1086
19.50	1.438	0.2272	-0.1077
20.00	1.428	0.2379	-0.1099
21.00	1.401	0.2590	-0.1169
22.00	1.359	0.2799	-0.1190
23.00	1.300	0.3004	-0.1235
24.00	1.220	0.3204	-0.1393
25.00	1.168	0.3377	-0.1440
26.00	1.116	0.3554	-0.1486
28.00	1.015	0.3916	-0.1577
30.00	0.926	0.4294	-0.1668
32.00	0.855	0.4690	-0.1759
35.00	0.800	0.5324	-0.1897
40.00	0.804	0.6452	-0.2126
45.00	0.793	0.7573	-0.2344
50.00	0.763	0.8664	-0.2553
55.00	0.717	0.9708	-0.2751
60.00	0.656	1.0693	-0.2939
65.00	0.582	1.1606	-0.3117
70.00	0.495	1.2438	-0.3285
75.00	0.398	1.3178	-0.3444
80.00	0.291	1.3809	-0.3593
85.00	0.176	1.4304	-0.3731
90.00	0.053	1.4565	-0.3858
95.00	-0.074	1.4533	-0.3973
100.00	-0.199	1.4345	-0.4075
105.00	-0.321	1.4004	-0.4162
110.00	-0.436	1.3512	-0.4231
115.00	-0.543	1.2874	-0.4280
120.00	-0.640	1.2099	-0.4306
125.00	-0.723	1.1196	-0.4304
130.00	-0.790	1.0179	-0.4270
135.00	-0.840	0.9064	-0.4196
140.00	-0.868	0.7871	-0.4077
145.00	-0.872	0.6627	-0.3903
150.00	-0.850	0.5363	-0.3665
155.00	-0.798	0.4116	-0.3349
160.00	-0.714	0.2931	-0.2942
170.00	-0.749	0.0971	-0.3771
175.00	-0.374	0.0334	-0.1879
180.00	0.000	0.0198	0.0000

پیوست ب- محتوی فایل‌های ساختار بندی کد FAST به منظور مدل سازی توربین CART2

ب-1) محتوی فایل ورودی اصلی FAST (*.fst)

```

----- FAST INPUT FILE for Turbine Simulation-----
---
CART Example.
Compatible with FAST v6.01.
----- SIMULATION CONTROL -----
False      Echo - Echo input data to "echo.out" (switch)
1  ADAMSPrep - ADAMS preprocessor mode {1: Run FAST, 2: use FAST as a preprocessor to create an
ADAMS model, 3: do both} (switch) 1  AnalMode - Analysis mode {1: Run a time-marching simulation,
2: create a periodic linearized model} (switch)
2  NumBl - Number of blades (-)
150.0 TMax - Total run time (s)
0.006 DT - Integration time step (s)
----- TURBINE CONTROL -----
0  YCMode - Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined
from Simulink} (switch)
9999.9 TYCon - Time to enable active yaw control (s)
PCMode - Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from
Simulink} (switch)
0.  TPCOn - Time to enable active pitch control (s)
VSContrl - Variable-speed control mode {0: none, 1: simple VS, 2: user-defined from routine
UserVSCont, 3: user-defined from Simulink} (switch)
1781.98 VS_RtGnSp - Rated generator speed for simple variable-speed generator control (HSS side)
(rpm) [used only when VSContrl=1]
3524.36 VS_RtTq - Rated generator torque/constant generator torque in Region 3 for simple variable-
speed generator control (HSS side) (N-m) [used only when VSContrl=1]
.0008992 VS_Rgn2K - Torque constant for simple variable-speed generator control in Region 2 (HSS
side) (N-m/rpm^2) [used only when VSContrl=1]
23.05 VS_SlPc - Rated generator slip percentage in Region 2 1/2 for simple variable-speed generator
control (%) [used only when VSContrl=1] 1  GenModel - Generator model {1: Simple, 2: Thevenin, 3:
User Defined} (-)
True  GenTiStr - Method to start the generator {T: timed using TimGenOn, F: generator speed using
SpdGenOn} (switch) True  GenTiStp - Method to stop the generator {T: timed using TimGenOf, F: when
generator power = 0} (switch)
900.0 SpdGenOn - Generator speed to turn on the generator for a startup (HSS speed) (rpm)
0.0 TimGenOn - Time to turn on the generator for a startup (s)
9999.9 TimGenOf - Time to turn off the generator (s)
1  HSSBrMode - HSS brake model {1: simple, 2: user-defined from routine UserHSSBr} (switch)
9999.9 THSSBrDp - Time to initiate deployment of the HSS brake (s)
9999.9 TiDynBrk - Time to initiate deployment of the dynamic generator brake [CURRENTLY IGNORED]
(s)
9999.9 TTPBrDp(1) - Time to initiate deployment of tip brake 1 (s)
9999.9 TTPBrDp(2) - Time to initiate deployment of tip brake 2 (s)
9999.9 TTPBrDp(3) - Time to initiate deployment of tip brake 3 (s) [unused for 2 blades]
9999.9 TBDepISp(1) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 1 (rpm)
9999.9 TBDepISp(2) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 2 (rpm)
9999.9 TBDepISp(3) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 3 (rpm) [unused for 2
blades]
9999.9 TYawManS - Time to start override yaw maneuver and end standard yaw control (s)
9999.9 TYawManE - Time at which override yaw maneuver reaches final yaw angle (s)
0.0 NacYawF - Final yaw angle for yaw maneuvers (degrees)
9999.9 TPitManS(1) - Time to start override pitch maneuver for blade 1 and end standard pitch
control (s)
9999.9 TPitManS(2) - Time to start override pitch maneuver for blade 2 and end standard pitch
control (s)
9999.9 TPitManS(3) - Time to start override pitch maneuver for blade 3 and end standard pitch
control (s) [unused for 2 blades]
9999.9 TPitManE(1) - Time at which override pitch maneuver for blade 1 reaches final pitch (s)
9999.9 TPitManE(2) - Time at which override pitch maneuver for blade 2 reaches final pitch (s)
9999.9 TPitManE(3) - Time at which override pitch maneuver for blade 3 reaches final pitch (s)
[unused for 2 blades]
-1. B1Pitch(1) - Blade 1 initial pitch (degrees)
-1. B1Pitch(2) - Blade 2 initial pitch (degrees)

```

```

11. B1Pitch(3) - Blade 3 initial pitch (degrees) [unused for 2 blades]
5.3 B1PitchF(1) - Blade 1 final pitch for pitch maneuvers (degrees)
5.3 B1PitchF(2) - Blade 2 final pitch for pitch maneuvers (degrees)
5.3 B1PitchF(3) - Blade 3 final pitch for pitch maneuvers (degrees) [unused for 2 blades]
----- ENVIRONMENTAL CONDITIONS -----
9.80665 !JASON: 9.80665 Gravity - Gravitational acceleration (m/s^2)
----- FEATURE SWITCHES -----
False FlapDOF1 - First flapwise blade mode DOF (switch) False FlapDOF2 - Second flapwise blade
mode DOF (switch) False EdgeDOF - First edgewise blade mode DOF (switch)
False TeetDOF - Rotor-teeter DOF (switch) [unused for 3 blades]
False DrTrDOF - Drivetrain rotational-flexibility DOF (switch)
True GenDOF - Generator DOF (switch) False YawDOF - Yaw DOF (switch)
False TwFADOF1 - First fore-aft tower bending-mode DOF (switch) False TwFADOF2 - Second fore-aft
tower bending-mode DOF (switch)
False TwSSDOF1 - First side-to-side tower bending-mode DOF (switch)
False TwSSDOF2 - Second side-to-side tower bending-mode DOF (switch) True CompAero - Compute
aerodynamic forces (switch)
False CompNoise - Compute aerodynamic noise (switch)
----- INITIAL CONDITIONS -----
0.0 OoPDefl - Initial out-of-plane blade-tip displacement, (meters)
0.0 IPDefl - Initial in-plane blade-tip deflection, (meters)
0.0 TeetDefl - Initial or fixed teeter angle (degrees) [unused for 3 blades]
0.0 Azimuth - Initial azimuth angle for blade 1 (degrees)
41.7 RotSpeed - Initial or fixed rotor speed (rpm)
-0.0 NacYaw - Initial or fixed nacelle-yaw angle (degrees)
0.0 TTDspFA - Initial fore-aft tower-top displacement (meters)
0.0 TTDspSS - Initial side-to-side tower-top displacement (meters)
----- TURBINE CONFIGURATION -----
21.336 TipRad - The distance from the rotor apex to the blade tip (meters)
1.381 HubRad - The distance from the rotor apex to the blade root (meters)
1 PSpnElN - Number of the innermost blade element which is still part of the pitchable portion of
the blade for partial-span pitch control [1 to BldNodes] [CURRENTLY IGNORED] (-)
0.000 UndSling - Undersling length [distance from teeter pin to the rotor apex] (meters) [unused
for 3 blades]
0.210 HubCM - Distance from rotor apex to hub mass [positive downwind] (meters)
-3.858 OverHang - Distance from yaw axis to rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] (meters)
-1.1 NacCMxn - Downwind distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
0.0 NacCMyn - Lateral distance from the tower-top to the nacelle CM (meters) 1.734 NacCMzn -
Vertical distance from the tower-top to the nacelle CM (meters) 34.862 TowerHt - Height of tower
above ground level (meters)
1.734 Twr2Shft - Vertical distance from the tower top to the yaw/shaft intersection (meters)
0.0 TwrRBHt - Tower rigid base height (meters)
-3.77 ShftTilt - Rotor shaft tilt angle (degrees)
0.0 Delta3 - Delta-3 angle for teetering rotors (degrees) [unused for 3 blades]
0.0 PreCone(1) - Blade 1 cone angle (degrees)
0.0 PreCone(2) - Blade 2 cone angle (degrees)
0.0 PreCone(3) - Blade 3 cone angle (degrees) [unused for 2 blades]
270.0 AzimB1Up - Azimuth value to use for I/O when blade 1 points up (degrees)
----- MASS AND INERTIA -----
0.0 YawBrMass - Yaw bearing mass (kg) 29113. NacMass - Nacelle mass (kg) 5852. HubMass - Hub mass
(kg)
0.0 TipMass(1) - Tip-brake mass, blade 1 (kg)
0.0 TipMass(2) - Tip-brake mass, blade 2 (kg)
0.0 TipMass(3) - Tip-brake mass, blade 3 (kg) [unused for 2 blades] 71750. NacYIner - Nacelle
inertia about yaw axis (kg m^2)
34.4 ! 64100. GenIner - Generator inertia about HSS (kg m^2)
15000. HubIner - Hub inertia about teeter axis (kg m^2) [unused for 3 blades]
----- DRIVETRAIN -----
100.0 GBoxEff - Gearbox efficiency (%)
100.0 GenEff - Generator efficiency [ignored by the Thevenin and user-defined generator models] (%)
43.165 !43.165 GBRatio - Gearbox ratio (-)
False GBRevers - Gearbox reversal {T: if rotor and generator rotate in opposite directions}
(switch)
6000.0 HSSBrTqF - Fully deployed HSS-brake torque (N-m)
0.5 HSSBrDt - Time for HSS-brake to reach full deployment once initiated (sec)
"DynBrk.dat" DynBrkFi - File containing a mech-gen-torque vs HSS-speed curve for a dynamic brake
[CURRENTLY IGNORED] (quoted string) 2.691e7 DTTorSpr - Drivetrain torsional spring (N-m/rad)
0.e0 DTTorDmp - Drivetrain torsional damper (N-m/s)
----- SIMPLE INDUCTION GENERATOR -----
0.001 SIG_SlPc - Rated generator slip percentage [>0] (%) Now HSS side!
1799.98 SIG_SySp - Synchronous (zero-torque) generator speed [>0] (rpm) Now HSS side!

```

```

1799.98 SIG_RtTq - Rated torque [>0] (N-m) Now HSS side! 2 SIG_PORT - Pull-out ratio
(Tpullout/Trated) [>1] (-)
----- THEVENIN-EQUIVALENT INDUCTION GENERATOR -----
60.0 TEC_Freq - Line frequency [50 or 60] (Hz)
6 TEC_NPol - Number of poles [even integer > 0] (-) 0.0185 TEC_SRes - Stator resistance [>0] (ohms)
0.017 TEC_RRes - Rotor resistance [>0] (ohms)
480.0 TEC_VLL - Line-to-line RMS voltage (volts)
0.0340 TEC_SLR - Stator leakage reactance (ohms)
0.0050 TEC_RLR - Rotor leakage reactance (ohms)
0.7750 TEC_MR - Magnetizing reactance (ohms)
----- PLATFORM MODEL -----
0 PtfmModel - Platform model {0: none, 1: onshore, 2: fixed bottom offshore, 3: floating offshore}
(switch) PtfmFile - Name of file containing platform properties (quoted string) [unused when
PtfmModel=0]
----- TOWER -----
15 TwrNodes - Number of tower nodes used for analysis (-)
"CART_towersoft.dat" TwrFile - Name of file containing tower properties (quoted string)
----- NACELLE-YAW -----
0.0 YawSpr - Nacelle-yaw spring constant (N-m/rad)
0.0 YawDamp - Nacelle-yaw constant (N-m/rad/s)
0.0 YawNeut - Neutral yaw position--yaw spring force is zero at this yaw (degrees)
----- FURLING -----
False Furling - Read in additional model properties for furling turbine (flag) FurlFile - Name of
file containing furling properties (quoted string)
----- ROTOR-TEETER -----
1 TeetDMod - Rotor-teeter damper model (0: none, 1: linear, 2: user-defined) (switch) [unused for 3
blades]
0.0 TeetDmpP - Rotor-teeter damper position (degrees) [unused for 3 blades] 0.0e4 TeetDmp - Rotor-
teeter damping constant (N-m/rad/s) [unused for 3 blades]
0.0 TeetCDmp - Rotor-teeter rate-independent Coulomb-damping moment (N-m) [unused for 3 blades]
0.0 TeetSSStP - Rotor-teeter soft-stop position (degrees) [unused for 3 blades]
180.0 TeetHStP - Rotor-teeter hard-stop position (degrees) [unused for 3 blades]
0.0e4 TeetSSSp - Rotor-teeter soft-stop linear-spring constant (N-m/rad) [unused for 3 blades]
5.0e6 TeetHSSp - Rotor-teeter hard-stop linear-spring constant (N-m/rad) [unused for 3 blades]
----- TIP-BRAKE -----
0.0 TBDrConN - Tip-brake drag constant during normal operation, Cd*Area (m^2)
0.0 TBDrConD - Tip-brake drag constant during fully-deployed operation, Cd*Area (m^2)
0.5 TpBrDT - Time for tip-brake to reach full deployment once released (sec)
----- BLADE -----
"CART_blades.dat" BldFile(1) - Name of file containing properties for blade 1 (quoted string)
"CART_blades.dat" BldFile(2) - Name of file containing properties for blade 2 (quoted string)
"CART_blades.dat" BldFile(3) - Name of file containing properties for blade 3 (quoted string)
[unused for 2 blades]
----- AERODYN -----
"AeroDyn01sim.ipt" ADFile - Name of file containing AeroDyn input parameters (quoted string)
----- NOISE -----
"Noise.dat" NoiseFile - Name of file containing aerodynamic noise input parameters (quoted string)
----- ADAMS -----
"ADAMS.dat" ADAMSFile - Name of file containing ADAMS-specific input parameters (quoted
string)
----- LINEARIZATION CONTROL -----
"CART_Linear.dat" LinFile - Name of file containing FAST linearization parameters (quoted string)
----- OUTPUT -----
True SumPrint - Print summary data to "<RootName>.fsm" (switch) True TabDelim - Generate a tab-
delimited tabular output file. (switch)
"ES10.3E2" OutFmt - Format used for tabular output except time. Resulting field should be 10
characters. (quoted string) [not checked for validity!]
0 TStart - Time to begin tabular output (s)
10 DecFact - Decimation factor for tabular output [1: output every time step] (-)
1.0 SttsTime - Amount of time between screen status messages (sec)
0.0 NcIMUxn - Downwind distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.0 NcIMUyn - Lateral distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.0 NcIMUzn - Vertical distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.99 ShftGagL - Distance from rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] to shaft strain gages
[positive for upwind rotors] (meters) 2 NTwGages - Number of tower nodes that have strain gages for
output [0 to 5] (-)
4,7 TwrGagNd - List of tower nodes that have strain gages [1 to TwrNodes] (-) [unused if
NTwGages=0]
3 NBlGages - Number of blade nodes that have strain gages for output [0 to 5] (-) 7,12,15 BldGagNd
- List of blade nodes that have strain gages [1 to BldNodes] (-)
OutList - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutList.txt for a listing of
available output channels, (-)

```

```

"Azimuth,LSSGagP" - Rotor and Gen Azimuth Angles "WindVxi" - Hub height windspeed
"LSSGagV,HSShftV,LSSTipVxa"
"LSSGagAxa,HSShftA " - Low-speed shaft vel. and generator vel. "BldPitch1,BldPitch2" - Blade 1 and
2 pitch angles "YawBrTDxt,YawBrTDyt" - Tower-top fore-aft and side-side displ "TwHt1MLxt,TwHt1MLyt"
"TipDxb1,TipDxb2" "TeetPya"
"TipDxc1, TipDyc1" - Blade 1 tip out-plane and in-plane defl "TipDxc2, TipDyc2" - Blade 2 tip out-
plane and in-plane defl
"RotTorq,LSShftTq,HSShftTq" - Rotor and shaft torque
"GenTq,RotThrust" - Generator torque and rotor thrust
"RotPwr,GenPwr,HSShftPwr" - rotor power
"TipSpdRat,RotCp"
"YawBrTAyp" "YawBrTAp" "YawBrTDyp" "LSSTipPxa" "YawBrMzn" "NcIMUTVys"
"RootMyb1" "RootMyb2" "RootMxb1" "RootMxb2" "RootFxb1" "RootFxc1" "LSSTipAxa" "HSShftA" "TwrBsMxt"
"YawBrFyp" "YawBrMxp" "LSShftFys"
END of FAST input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last line).

```

ب-۲) فایل ورودی پره – CART_Blades.dat

```

----- FAST INDIVIDUAL BLADE FILE -----
Standard AWT-27CR blade data. Used for FAST Certification Tests.
----- BLADE PARAMETERS -----
18      NBlInpSt   - Number of blade input stations (-)
False   CalcBMode - Calculate blade mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below,
F: use mode shapes from below} [CURRENTLY IGNORED] (switch)
0.0     BldFlDmp(1) - Blade flap mode #1 structural damping in percent of critical (%)
0.0     BldFlDmp(2) - Blade flap mode #2 structural damping in percent of critical (%)
0.2     BldEdDmp(1) - Blade edge mode #1 structural damping in percent of critical (%)
----- BLADE ADJUSTMENT FACTORS -----
1.0     FlStTunr(1) - Blade flapwise modal stiffness tuner, 1st mode (-)
1.0     FlStTunr(2) - Blade flapwise modal stiffness tuner, 2nd mode (-)
1.0     AdjBlMs   - Factor to adjust blade mass density (-)
1.0     AdjFlSt   - Factor to adjust blade flap stiffness (-)
1.      AdjEdSt   - Factor to adjust blade edge stiffness (-)
----- DISTRIBUTED BLADE PROPERTIES -----
BlFract  AeroCent  StrcTwst  BMassDen  FlpStfff  EdgStfff
(-)      (-)      (deg)      (kg/m)    (Nm^2)    (Nm^2)
0.000    0.000    3.440    282.92    165000000 283000000
0.022    0.000    3.370    290.24    161000000 318000000
0.053    0.000    3.270    261.88    142000000 328000000
0.114    0.000    3.080    201.28    98700000  307000000
0.175    0.000    2.880    186.52    78400000  340000000
0.236    0.000    2.690    169.10    59200000  342000000
0.299    0.000    2.450    149.28    45400000  278000000
0.364    0.000    2.210    133.19    34100000  237000000
0.427    0.000    1.910    111.74    25000000  169000000
0.491    0.000    1.610    96.86     17900000  138000000
0.555    0.000    1.240    78.57     12300000  94000000
0.618    0.000    0.860    65.03     8190000   72500000
0.682    0.000    0.380    49.68     5140000   46700000
0.745    0.000    -0.110   37.59     3020000   32600000
0.809    0.000    -0.770   25.01     1620000   19000000
0.873    0.000    -1.430   16.01     868000    13000000
0.936    0.000    -2.370   10.73     468000    8850000
1.000    0.000    -3.310   6.02      209000    6800000
----- BLADE MODE SHAPES -----
0.558    BldFl1Sh(2) - Flap mode 1, coeff of x^2
0.796    BldFl1Sh(3) - , coeff of x^3
-0.718    BldFl1Sh(4) - , coeff of x^4
0.877    BldFl1Sh(5) - , coeff of x^5
-0.513    BldFl1Sh(6) - , coeff of x^6
-1.198    BldFl2Sh(2) - Flap mode 2, coeff of x^2
0.805    BldFl2Sh(3) - , coeff of x^3
-4.554    BldFl2Sh(4) - , coeff of x^4
12.777    BldFl2Sh(5) - , coeff of x^5
-6.830    BldFl2Sh(6) - , coeff of x^6
1.778    BldEdgSh(2) - Edge mode 1, coeff of x^2
-2.071    BldEdgSh(3) - , coeff of x^3
2.445    BldEdgSh(4) - , coeff of x^4
-1.350    BldEdgSh(5) - , coeff of x^5
0.198    BldEdgSh(6) - , coeff of x^6

```

ب-۳) فایل ورودی برج - CART_Towersoft.dat

----- FAST TOWER FILE -----											
Standard AWT-27CR tower data. Used for FAST Certification Tests.											
----- TOWER PARAMETERS -----											
13	NTwInpSt	- Number of input stations to specify tower geometry									
False	CalcTMode	- Calculate tower mode shapes internally {T: ignore mode shapes from below, F: use mode shapes from below} [CURRENTLY IGNORED] (switch)									
0.15	TwrFADmp(1)	- Tower 1st fore-aft mode structural damping ratio (%)									
0.0	TwrFADmp(2)	- Tower 2nd fore-aft mode structural damping ratio (%)									
0.15	TwrSSDmp(1)	- Tower 1st side-to-side mode structural damping ratio (%)									
0.3	TwrSSDmp(2)	- Tower 2nd side-to-side mode structural damping ratio (%)									
----- TOWER ADJUSTMUNT FACTORS -----											
1.0	FAStTunr(1)	- Tower fore-aft modal stiffness tuner, 1st mode (-)									
1.0	FAStTunr(2)	- Tower fore-aft modal stiffness tuner, 2nd mode (-)									
1.0	SSStTunr(1)	- Tower side-to-side stiffness tuner, 1st mode (-)									
1.0	SSStTunr(2)	- Tower side-to-side stiffness tuner, 2nd mode (-)									
1.0	AdjTwMa	- Factor to adjust tower mass density (-)									
1.0	AdjFASt	- Factor to adjust tower fore-aft stiffness (-)									
1.0	AdjSSSt	- Factor to adjust tower side-to-side stiffness (-)									
----- DISTRIBUTED TOWER PROPERTIES -----											
HtFract	TMassDen	TwFAStif	TwSSStif	TwGJStif	TwEASTif	TwFAIner	TwSSIner	TwFACgOf	TwSScgOf	(m)	(m)
(-)	(kg/m)	(kg/m)	(Nm^2)		(Nm^2)		(Nm^2)	(N)	(kg m)	(kg m)	
0.0000	1548.	8.210e10		8.210e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0658	1361.	5.480e10		5.480e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1970	1428.	2.96e10		2.96e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2623	1311.	1.75e10		1.75e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3293	1311.	1.75e10		1.75e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4299	1311.	1.75e10		1.75e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5137	878.	1.14e10		1.14e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6143	878.	1.14e10		1.14e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6982	878.	1.14e10		1.14e10	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.7816	599.	7.63e09		7.63e09	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.8814	599.	7.63e09		7.63e09	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.9656	1311.	1.75e09		1.75e09	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0000	1311.	1.75e09		1.75e09	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
----- TOWER FORE-AFT MODE SHAPES -----											
0.408	TwFAM1Sh(2)	- Mode 1, coefficient of x^2 term									
0.949	TwFAM1Sh(3)	- , coefficient of x^3 term									
0.612	TwFAM1Sh(4)	- , coefficient of x^4 term									
-1.630	TwFAM1Sh(5)	- , coefficient of x^5 term									
0.661	TwFAM1Sh(6)	- , coefficient of x^6 term									
-23.056	TwFAM2Sh(2)	- Mode 2, coefficient of x^2 term									
-78.410	TwFAM2Sh(3)	- , coefficient of x^3 term									
197.460	TwFAM2Sh(4)	- , coefficient of x^4 term									
-102.757	TwFAM2Sh(5)	- , coefficient of x^5 term									
7.763	TwFAM2Sh(6)	- , coefficient of x^6 term									
----- TOWER SIDE-TO-SIDE MODE SHAPES -----											
0.408	TwFAM1Sh(2)	- Mode 1, coefficient of x^2 term									
0.949	TwFAM1Sh(3)	- , coefficient of x^3 term									
0.612	TwFAM1Sh(4)	- , coefficient of x^4 term									
-1.630	TwFAM1Sh(5)	- , coefficient of x^5 term									
0.661	TwFAM1Sh(6)	- , coefficient of x^6 term									
-23.056	TwFAM2Sh(2)	- Mode 2, coefficient of x^2 term									
-78.410	TwFAM2Sh(3)	- , coefficient of x^3 term									
197.460	TwFAM2Sh(4)	- , coefficient of x^4 term									
-102.757	TwFAM2Sh(5)	- , coefficient of x^5 term									
7.763	TwFAM2Sh(6)	- , coefficient of x^6 term									

ب-۴) فایل ورودی اصلی آیرودینامیک - AeroDyn01sim.ipt

CART aerodynamic parameters for FAST.	
SI	SysUnits - System of units for used for input and output [must be SI for FAST] (unquoted string)
STEADY	StallMod - Dynamic stall included [BEDDOES or STEADY] (unquoted string)
NO_CM	UseCm - Use aerodynamic pitching moment model? [USE_CM or NO_CM] (unquoted string)
EQUIL	!JASON:DYNIN InfModel - Inflow model [DYNIN or EQUIL] (unquoted string)
WAKE	IndModel - Induction-factor model [NONE or WAKE or SWIRL] (unquoted string)
0.001	!JASON: 0.001 AToler - Induction-factor tolerance (convergence criteria) (-)
PRANDTL	TLModel - Tip-loss model (EQUIL only) [PRANDtl, GTECH, or NONE] (unquoted string)
NONE	HLModel - Hub-loss model (EQUIL only) [PRANDtl or NONE] (unquoted string)
"Wind/step8mps-3.wnd"	Name of file containing wind data (quoted string)
37.	HH - Wind reference (hub) height [TowerHt+Twr2Shft+OverHang*SIN(NacTilt)] (m)
0.05	!JASON: 0.3 TwrShad - Tower-shadow velocity deficit (-)
3.0	ShadHwid - Tower-shadow half width (m)
4.0	T_Shad_Refpt - Tower-shadow reference point (m)
1.03	Rho - Air density (kg/m^3)
1.4639e-5	KinVisc - Kinematic air viscosity [CURRENTLY IGNORED] (m^2/sec)
0.002	DTAero - Time interval for aerodynamic calculations (sec)
11	NumFoil - Number of airfoil files (-)
"AeroData\art15.air"	FoilNm - Names of the airfoil files [NumFoil lines] (quoted strings)
"AeroData\art25.air"	

```

"AeroData\art35.air"
"AeroData\art45.air"
"AeroData\art55.air"
"AeroData\art65.air"
"AeroData\art75.air"
"AeroData\art75-5.air"
"AeroData\art85.air"
"AeroData\art85-5.air"
"AeroData\art95.air"
20      BldNodes - Number of blade nodes used for analysis (-)
      RNodes  AeroTwst  DRNodes  Chord  NFoil  PrnElm
1.8799  3.3740      0.998  1.1929   1  PRINT
2.8777  3.1895      0.998  1.3286   1  PRINT
3.8754  3.0569      0.998  1.4276   1  PRINT
4.8731  2.8685      0.998  1.5637   1  PRINT
5.8709  2.7371      0.998  1.6633   2  PRINT
6.8686  2.5294      0.998  1.6575   2  PRINT
7.8663  2.3700      0.998  1.6163   3  PRINT
8.8641  2.1379      0.998  1.5555   3  PRINT
9.8618  1.9386      0.998  1.5017  4PRINT
10.8595  1.6665      0.998  1.4274   4  PRINT
11.8573  1.4339      0.998  1.3735  5PRINT
12.8550  1.0945      0.998  1.3000   5  PRINT
13.8528  0.8374      0.998  1.2461   6  PRINT
14.8506  0.4020      0.998  1.1718   6  PRINT
15.8483  0.0770      0.998  1.1179  7PRINT
16.8460 -0.4568      0.998  1.0444  7PRINT
17.8438 -0.8951      0.998  0.9906  8PRINT
18.8416 -1.5209      0.998  0.9171  9PRINT
19.8393 -2.1452      0.998  0.8626  10   PRINT
20.8371 -2.9979      0.998  0.7889  11   PRINT

```

ب-۵) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره- art15.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      16.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -1.00      zero lift angle
      6.308      Cn slope
      0.45      Cn at stall
      -0.5      Cn at negative stall
      0.01      Alpha for Cd min
      0.738      Cd min
-180.0  0.00      0.7384
-170.0  0.32      0.7409
-160.0  0.44      0.7961
-150.0  0.49      0.9000
-140.0  0.54      1.0676
-130.0  0.53      1.1992
-120.0  0.46      1.2983
-110.0  0.36      1.3618
-100.0  0.25      1.4052
-90.0   0.00      1.4439
-80.0   -0.25     1.4052
-70.0   -0.36     1.3618
-60.0   -0.46     1.2983
-50.0   -0.53     1.1992
-40.0   -0.54     1.0676
-30.0   -0.50     0.9000
-20.0   -0.44     0.7961
-10.0   -0.32     0.7417
-8.0    -0.26     0.7409
-6.0    -0.19     0.7403
-4.0    -0.13     0.7389
-2.0    -0.06     0.7383
0.0     0.01     0.7384

```

2.0	0.07	0.7384
4.0	0.14	0.7384
6.0	0.21	0.7385
8.0	0.26	0.7402
10.0	0.32	0.7409
12.0	0.39	0.7417
14.0	0.43	0.7428
16.0	0.45	0.7463
18.0	0.46	0.7649
20.0	0.44	0.7961
40.0	0.54	1.0676
50.0	0.53	1.1992
60.0	0.46	1.2983
70.0	0.36	1.3618
80.0	0.25	1.4052
90.0	0.00	1.4439
100.0	-0.25	1.4052
110.0	-0.36	1.3618
120.0	-0.46	1.2983
130.0	-0.53	1.1992
140.0	-0.54	1.0676
150.0	-0.49	0.9000
160.0	-0.44	0.7961
170.0	-0.32	0.7409
180.0	0.00	0.7384

ب-6) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art25.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      16.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -0.00      zero lift angle
      6.308      Cn slope
      1.10      Cn at stall
      -1.1      Cn at negative stall
      0.01      Alpha for Cd min
      0.007      Cd min
-180.0  0.01  0.02
-170.0  0.72  0.05
-160.0  0.84  0.31
-150.0  1.08  0.62
-140.0  1.15  0.96
-130.0  1.09  1.3
-120.0  0.88  1.52
-110.0  0.60  1.66
-100.0  0.31  1.76
-90.0   0.00  1.8
-80.0   -0.31 1.76
-70.0   -0.60 1.66
-60.0   -0.88 1.52
-50.0   -1.09 1.3
-40.0   -1.15 0.96
-30.0   -1.08 0.62
-20.0   -0.84 0.31
-10.0   -0.72 0.0170
-8.0    -0.60 0.0146
-6.0    -0.54 0.0127
-4.0    -0.36 0.0086
-2.0    -0.18 0.0074
0.0     -0.01 0.0075
2.0     0.17  0.0077
4.0     0.35  0.0077
6.0     0.53  0.0077
8.0     0.65  0.0127
10.0    0.82  0.0146
12.0    0.97  0.0170

```

14.0	1.05	0.0199
16.0	1.10	0.0379
18.0	1.08	0.0948
20.0	1.04	0.1809
40.0	1.35	0.8750
50.0	1.33	1.2150
60.0	1.15	1.4650
70.0	0.89	1.6250
80.0	0.60	1.7350
90.0	0.31	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.72	0.05
180.0	0.01	0.02

ب-۷) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره- art35.air

ART15.air		
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98		
1	Number of airfoil tables in this file	
0	Table ID parameter	
18.00	Stall angle (deg)	
0	No longer used, enter zero	
0	No longer used, enter zero	
0	No longer used, enter zero	
-0.00	zero lift angle	
6.308	Cn slope	
1.18	Cn at stall	
-1.1	Cn at negative stall	
0.01	Alpha for Cd min	
0.007	Cd min	
-180.0	-0.06	0.02
-170.0	0.69	0.05
-160.0	0.84	0.31
-150.0	1.08	0.62
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.69	0.0166
-8.0	-0.55	0.0144
-6.0	-0.44	0.0119
-4.0	-0.27	0.0089
-2.0	-0.11	0.0071
0.0	0.06	0.0074
2.0	0.22	0.0075
4.0	0.38	0.0075
6.0	0.55	0.0084
8.0	0.69	0.0124
10.0	0.87	0.0144
12.0	1.02	0.0166
14.0	1.13	0.0192
16.0	1.18	0.0406
18.0	1.18	0.1012
20.0	1.13	0.1901
40.0	1.32	0.8818
50.0	1.29	1.2218

60.0	1.12	1.4694
70.0	0.85	1.6278
80.0	0.57	1.7370
90.0	0.28	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.69	0.05
180.0	-0.06	0.02

ب-۸) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره- art45.air

ART15.air		
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98		
1	Number of airfoil tables in this file	
0	Table ID parameter	
18.00	Stall angle (deg)	
0	No longer used, enter zero	
0	No longer used, enter zero	
0	No longer used, enter zero	
-2.00	zero lift angle	
6.308	Cn slope	
1.27	Cn at stall	
-1.1	Cn at negative stall	
0.01	Alpha for Cd min	
0.007	Cd min	
-180.0	-0.12	0.02
-170.0	0.58	0.05
-160.0	0.84	0.31
-150.0	1.08	0.62
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.58	0.0142
-8.0	-0.42	0.0123
-6.0	-0.34	0.0111
-4.0	-0.19	0.0092
-2.0	-0.04	0.0068
0.0	0.12	0.0074
2.0	0.27	0.0073
4.0	0.42	0.0073
6.0	0.58	0.0095
8.0	0.74	0.0123
10.0	0.92	0.0142
12.0	1.09	0.0163
14.0	1.20	0.0187
16.0	1.27	0.0453
18.0	1.27	0.1115
20.0	1.20	0.2042
40.0	1.29	0.8920
50.0	1.25	1.2320
60.0	1.07	1.4760
70.0	0.81	1.6320
80.0	0.52	1.7400
90.0	0.23	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66

120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.58	0.05
180.0	-0.12	0.02

ب-۹) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art55.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      16.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -2.00      zero lift angle
      6.308      Cn slope
      1.32      Cn at stall
      -1.1      Cn at negative stall
      0.01      Alpha for Cd min
      0.007      Cd min
-180.0  -0.17  0.02
-170.0  0.64  0.05
-160.0  0.84  0.31
-150.0  1.08  0.62
-140.0  1.15  0.96
-130.0  1.09  1.3
-120.0  0.88  1.52
-110.0  0.60  1.66
-100.0  0.31  1.76
-90.0   0.00  1.8
-80.0   -0.31 1.76
-70.0   -0.60 1.66
-60.0   -0.88 1.52
-50.0   -1.09 1.3
-40.0   -1.15 0.96
-30.0   -1.08 0.62
-20.0   -0.84 0.31
-10.0   -0.64 0.0144
-8.0    -0.48 0.0124
-6.0    -0.29 0.0104
-4.0    -0.14 0.0093
-2.0    0.02  0.0070
0.0     0.17  0.0074
2.0     0.33  0.0072
4.0     0.48  0.0076
6.0     0.64  0.0105
8.0     0.82  0.0124
10.0    0.99  0.0144
12.0    1.15  0.0166
14.0    1.26  0.0214
16.0    1.32  0.0566
18.0    1.31  0.1289
20.0    1.19  0.2249
40.0    1.26  0.9056
50.0    1.22  1.2456
60.0    1.04  1.4848
70.0    0.77  1.6376
80.0    0.48  1.7440
90.0    0.19  1.8000
100.0   -0.31 1.76
110.0   -0.6  1.66
120.0   -0.88 1.52
130.0   -1.09 1.3
140.0   -1.15 0.96
150.0   -1.08 0.62
160.0   -0.84 0.31
170.0   -0.64 0.05

```

180.0	-0.17	0.02
-------	-------	------

ب-۱۰) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art65.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
16.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
-6.00      zero lift angle
6.308      Cn slope
1.27      Cn at stall
-1.1      Cn at negative stall
0.01      Alpha for Cd min
0.007      Cd min
-180.0    -0.21    0.02
-170.0    0.69    0.05
-160.0    0.84    0.31
-150.0    1.08    0.62
-140.0    1.15    0.96
-130.0    1.09    1.3
-120.0    0.88    1.52
-110.0    0.60    1.66
-100.0    0.31    1.76
-90.0     0.00    1.8
-80.0     -0.31   1.76
-70.0     -0.60   1.66
-60.0     -0.88   1.52
-50.0     -1.09   1.3
-40.0     -1.15   0.96
-30.0     -1.08   0.62
-20.0     -0.84   0.31
-10.0     -0.69   0.0128
-8.0      -0.50   0.0111
-6.0      -0.35   0.0100
-4.0      -0.16   0.0088
-2.0      0.02    0.0084
0.0       0.21    0.0073
2.0       0.40    0.0075
4.0       0.59    0.0081
6.0       0.78    0.0111
8.0       0.94    0.0128
10.0      1.08    0.0159
12.0      1.19    0.0184
14.0      1.26    0.0268
16.0      1.27    0.0727
18.0      1.21    0.1519
20.0      1.06    0.2514
40.0      1.25    0.9226
50.0      1.20    1.2626
60.0      1.01    1.4958
70.0      0.73    1.6446
80.0      0.44    1.7490
90.0      0.15    1.8000
100.0     -0.31    1.76
110.0     -0.6    1.66
120.0     -0.88    1.52
130.0     -1.09    1.3
140.0     -1.15    0.96
150.0     -1.08    0.62
160.0     -0.84    0.31
170.0     -0.69    0.05
180.0     -0.21    0.02

```

ب-۱۱) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art75.air

ART15.air

```

FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      14.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -2.00      zero lift angle
      6.308      Cn slope
      1.34      Cn at stall
      -1.1      Cn at negative stall
      0.01      Alpha for Cd min
      0.007      Cd min
-180.0  -0.26  0.02
-170.0  0.67  0.05
-160.0  0.84  0.31
-150.0  1.08  0.62
-140.0  1.15  0.96
-130.0  1.09  1.3
-120.0  0.88  1.52
-110.0  0.60  1.66
-100.0  0.31  1.76
-90.0   0.00  1.8
-80.0  -0.31  1.76
-70.0  -0.60  1.66
-60.0  -0.88  1.52
-50.0  -1.09  1.3
-40.0  -1.15  0.96
-30.0  -1.08  0.62
-20.0  -0.84  0.31
-10.0  -0.67  0.0116
-8.0   -0.47  0.0097
-6.0   -0.34  0.0085
-4.0   -0.14  0.0079
-2.0   0.06  0.0071
0.0    0.26  0.0070
2.0    0.47  0.0076
4.0    0.67  0.0097
6.0    0.87  0.0116
8.0    1.05  0.0134
10.0   1.18  0.0155
12.0   1.27  0.0191
14.0   1.34  0.0371
16.0   1.33  0.0942
18.0   1.24  0.1806
20.0   1.03  0.2833
40.0   1.23  0.9430
50.0   1.18  1.2830
60.0   0.98  1.5090
70.0   0.70  1.6530
80.0   0.41  1.7550
90.0   0.12  1.8000
100.0  -0.31  1.76
110.0  -0.6  1.66
120.0  -0.88  1.52
130.0  -1.09  1.3
140.0  -1.15  0.96
150.0  -1.08  0.62
160.0  -0.84  0.31
170.0  -0.67  0.05
180.0  -0.26  0.02

```

ب-۱۲) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art85.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      14.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -6.00      zero lift angle

```

6.308		Cn slope
1.43		Cn at stall
-1.1		Cn at negative stall
0.01		Alpha for Cd min
0.007		Cd min
-180.0	-0.33	0.02
-170.0	0.75	0.05
-160.0	0.84	0.31
-150.0	1.08	0.62
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.75	0.0116
-8.0	-0.55	0.0097
-6.0	-0.30	0.0085
-4.0	-0.09	0.0079
-2.0	0.13	0.0071
0.0	0.33	0.0070
2.0	0.55	0.0076
4.0	0.75	0.0097
6.0	0.96	0.0116
8.0	1.15	0.0134
10.0	1.29	0.0155
12.0	1.38	0.0191
14.0	1.43	0.0371
16.0	1.42	0.0942
18.0	1.29	0.1806
20.0	0.99	0.2833
40.0	1.20	0.9430
50.0	1.15	1.2830
60.0	0.94	1.5090
70.0	0.67	1.6530
80.0	0.38	1.7550
90.0	0.09	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.75	0.05
180.0	-0.33	0.02

ب-۱۳) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره- art85-5.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
      14.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
      -5.00      zero lift angle
      6.308      Cn slope
      1.485      Cn at stall
      -1.1      Cn at negative stall
      0.01      Alpha for Cd min
      0.007      Cd min
      -180.0     -0.38     0.02

```

-170.0	0.70	0.05
-160.0	0.84	0.31
-150.0	1.08	0.62
-140.0	1.15	0.96
-130.0	1.09	1.3
-120.0	0.88	1.52
-110.0	0.60	1.66
-100.0	0.31	1.76
-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.70	0.0116
-8.0	-0.49	0.0097
-6.0	-0.27	0.0085
-4.0	-0.05	0.0079
-2.0	0.17	0.0071
0.0	0.38	0.0070
2.0	0.60	0.0076
4.0	0.80	0.0097
6.0	1.01	0.0116
8.0	1.21	0.0134
10.0	1.29	0.0155
12.0	1.36	0.0191
14.0	1.49	0.0371
16.0	1.46	0.0942
18.0	1.31	0.1806
20.0	0.94	0.2833
40.0	1.18	0.9430
50.0	1.13	1.2830
60.0	0.92	1.5090
70.0	0.64	1.6530
80.0	0.35	1.7550
90.0	0.06	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.75	0.05
180.0	-0.38	0.02

ب-۱۴) فایل ورودی اطلاعات ایرفویل پره - art95.air

```

ART15.air
FROM Dayton Griffin, Aug20, '98
1      Number of airfoil tables in this file
0      Table ID parameter
14.00      Stall angle (deg)
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
0      No longer used, enter zero
-4.00      zero lift angle
6.308      Cn slope
1.54      Cn at stall
-1.1      Cn at negative stall
0.01      Alpha for Cd min
0.007      Cd min
-180.0    -0.42    0.02
-170.0    0.64    0.05
-160.0    0.84    0.31
-150.0    1.08    0.62
-140.0    1.15    0.96
-130.0    1.09    1.3
-120.0    0.88    1.52
-110.0    0.60    1.66
-100.0    0.31    1.76

```

-90.0	0.00	1.8
-80.0	-0.31	1.76
-70.0	-0.60	1.66
-60.0	-0.88	1.52
-50.0	-1.09	1.3
-40.0	-1.15	0.96
-30.0	-1.08	0.62
-20.0	-0.84	0.31
-10.0	-0.64	0.0116
-8.0	-0.42	0.0098
-6.0	-0.23	0.0078
-4.0	-0.01	0.0073
-2.0	0.21	0.0063
0.0	0.42	0.0065
2.0	0.64	0.0077
4.0	0.85	0.0098
6.0	1.06	0.0116
8.0	1.26	0.0135
10.0	1.42	0.0163
12.0	1.50	0.0197
14.0	1.54	0.0452
16.0	1.50	0.1095
18.0	1.32	0.2003
20.0	0.88	0.3047
40.0	1.16	0.9566
50.0	1.10	1.2966
60.0	0.89	1.5178
70.0	0.61	1.6586
80.0	0.32	1.7590
90.0	0.03	1.8000
100.0	-0.31	1.76
110.0	-0.6	1.66
120.0	-0.88	1.52
130.0	-1.09	1.3
140.0	-1.15	0.96
150.0	-1.08	0.62
160.0	-0.84	0.31
170.0	-0.64	0.05
180.0	-0.42	0.02

پیوست پ- خروجی‌های دینامیکی کد FAST

پ-۱) پارامترهای خروجی مربوط به مشخصات باد

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
WindVxi	uWind	Nominally downwind component of the hub-height wind velocity (unavailable if CompAero is False)	Directed along the x _i -axis	(m/sec)
WindVyi	vWind	Cross-wind component of the hub-height wind velocity (unavailable if CompAero is False)	Directed along the y _i -axis	(m/sec)
WindVzi	wWind	Vertical component of the hub-height wind velocity (unavailable if CompAero is False)	Directed along the z _i -axis	(m/sec)
TotWindV		Total hub-height wind speed magnitude (unavailable if CompAero is False)	N/A	(m/sec)
HorWindV		Horizontal hub-height wind speed magnitude (unavailable if CompAero is False)	In the x _i - and y _i - plane	(m/sec)
HorWndDir		Horizontal hub-height wind direction. Please note that FAST uses the opposite of the sign convention that AeroDyn uses. Put a “-”, “_”, “m”, or “M” character in front of this variable name in the input file to change its sign if you want to use the AeroDyn convention. (unavailable if CompAero is False)	About the z _i -axis	(deg)

VerWndDir		Vertical hub-height wind direction (unavailable if CompAero is False)	About an axis orthogonal to the Z_i -axis and the $HorWindV$ -vector	(deg)
-----------	--	---	--	-------

پ-۲) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره ۱

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TipDxc1	OoPDefl1	Blade 1 out-of-plane tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $x_{c,1}$ -axis	(m)
TipDyc1	IPDefl1	Blade 1 in-plane tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $y_{c,1}$ -axis	(m)
TipDzc1	TipDzb1	Blade 1 axial tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $z_{c,1}$ - and $z_{b,1}$ -axes	(m)
TipDxb1		Blade 1 flapwise tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $x_{b,1}$ -axis	(m)
TipDyb1		Blade 1 edgewise tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $y_{b,1}$ -axis	(m)
TipALxb1		Blade 1 local flapwise tip acceleration (absolute)	Directed along the local $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
TipALyb1		Blade 1 local edgewise tip acceleration (absolute)	Directed along the local $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
TipALzb1		Blade 1 local axial tip acceleration (absolute)	Directed along the local $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
TipRDxb1	RollDefl1	Blade 1 roll (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 3 rd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the $x_{b,1}$ -axis	(deg)
TipRDyb1	PtchDefl1	Blade 1 pitch (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 2 nd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the $y_{b,1}$ -axis	(deg)
TipRDzc1	TipRDzb1 TwstDefl1	Blade 1 torsional tip deflection (relative to the undeflected position). This output will always be zero for FAST simulation results. Use it for examining blade torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 1 st rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. Please note that this output uses the opposite of the sign convention used for blade pitch angles.	About the $z_{c,1}$ - and $z_{b,1}$ -axes	(deg)

پ-۳) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TipDxc2	OoPDefl2	Blade 2 out-of-plane tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $x_{c,2}$ -axis	(m)
TipDyc2	IPDefl2	Blade 2 in-plane tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $y_{c,2}$ -axis	(m)
TipDzc2	TipDzb2	Blade 2 axial tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $z_{c,2}$ - and $z_{b,2}$ -axes	(m)
TipDxb2		Blade 2 flapwise tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $x_{b,2}$ -axis	(m)
TipDyb2		Blade 2 edgewise tip deflection (relative to the pitch axis)	Directed along the $y_{b,2}$ -axis	(m)
TipALxb2		Blade 2 local flapwise tip acceleration (absolute)	Directed along the local $x_{b,2}$ -axis	(m/sec ²)
TipALyb2		Blade 2 local edgewise tip acceleration (absolute)	Directed along the local $y_{b,2}$ -axis	(m/sec ²)
TipALzb2		Blade 2 local axial tip acceleration (absolute)	Directed along the local $z_{b,2}$ -axis	(m/sec ²)
TipRDxb2	RollDefl2	Blade 2 roll (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 3 rd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the $x_{b,2}$ -axis	(deg)
TipRDyb2	PtchDefl2	Blade 2 pitch (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 2 nd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the $y_{b,2}$ -axis	(deg)
TipRDzc2	TipRDzb2 TwstDefl2	Blade 2 torsional tip deflection (relative to the undeflected position). This output will always be zero for FAST simulation results. Use it for examining blade torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 1 st rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. Please note that this output uses the opposite of the sign convention used for blade pitch angles.	About the $z_{c,2}$ - and $z_{b,2}$ -axes	(deg)
TipClrnc2	TwrClrnc2 Tip2Twr2	Blade 2 tip-to-tower clearance estimate. This is computed as the perpendicular distance from the yaw axis to the tip of blade 2 when the blade tip is below the yaw bearing. When the tip of blade 2 is above the yaw bearing, it is computed as the absolute distance from the yaw bearing to the blade tip. Please note that you should reduce this value by the tower radius to obtain the actual tower clearance	N/A	(m)

پ-۴) پارامترهای خروجی مربوط به حرکت نوک پره ۳

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TipDxc3	OoPDefl3	Blade 3 out-of-plane tip deflection (relative to the pitch axis) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $x_{c,3}$ -axis	(m)
TipDyc3	IPDefl3	Blade 3 in-plane tip deflection (relative to the pitch axis) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $y_{c,3}$ -axis	(m)
TipDzc3	TipDzb3	Blade 3 axial tip deflection (relative to the pitch axis) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $z_{c,3}$ - and $z_{b,3}$ -axes	(m)
TipDxb3		Blade 3 flapwise tip deflection (relative to the pitch axis) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $x_{b,3}$ -axis	(m)
TipDyb3		Blade 3 edgewise tip deflection (relative to the pitch axis) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $y_{b,3}$ -axis	(m)
TipALxb3		Blade 3 <i>local</i> flapwise tip acceleration (absolute) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,3}$ -axis	(m/sec ²)
TipALyb3		Blade 3 <i>local</i> edgewise tip acceleration (absolute) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,3}$ -axis	(m/sec ²)
TipALzb3		Blade 3 <i>local</i> axial tip acceleration (absolute) (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,3}$ -axis	(m/sec ²)
TipRDxb3	RollDefl3	Blade 3 roll (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 3 rd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter. (unavailable for two-bladed turbines)	About the $x_{b,3}$ -axis	(deg)
TipRDyb3	PtchDefl3	Blade 3 pitch (angular/rotational) tip deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 2 nd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small blade deflections, so that the rotation sequence does not matter. (unavailable for two-bladed turbines)	About the $y_{b,3}$ -axis	(deg)
TipRDzc3	TipRDzb3 TwstDefl3	Blade 3 torsional tip deflection (relative to the undeflected position). This output will always be zero for FAST simulation results. Use it for examining blade torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 1 st rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. Please note that this output uses the opposite of the sign convention used for blade pitch angles. (unavailable for two-bladed turbines)	About the $z_{c,3}$ - and $z_{b,3}$ -axes	(deg)
TipClrnc3	TwrClrnc3 Tip2Twr3	Blade 3 tip-to-tower clearance estimate. This is computed as the perpendicular distance from the yaw axis to the tip of blade 3 when the blade tip is below the yaw bearing. When the tip of blade 3 is above the yaw bearing, it is computed as the absolute distance from the yaw bearing to the blade tip. Please note that you should reduce this value by the tower radius to obtain the actual tower clearance. (unavailable for two-bladed turbines)	N/A	(m)

*

پ-۵) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات گسترده محلی^{۱۴۱} پره ۱

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
Spn1ALxb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise acceleration (absolute) of span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn1ALyb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise acceleration (absolute) of span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn1ALzb1		Blade 1 <i>local</i> axial acceleration (absolute) of span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn2ALxb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise acceleration (absolute) of span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn2ALyb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise acceleration (absolute) of span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn2ALzb1		Blade 1 <i>local</i> axial acceleration (absolute) of span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn3ALxb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise acceleration (absolute) of span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn3ALyb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise acceleration (absolute) of span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn3ALzb1		Blade 1 <i>local</i> axial acceleration (absolute) of span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn4ALxb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise acceleration (absolute) of span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn4ALyb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise acceleration (absolute) of span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn4ALzb1		Blade 1 <i>local</i> axial acceleration (absolute) of span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn5ALxb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise acceleration (absolute) of span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	Directed along the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn5ALyb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise acceleration (absolute) of span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	Directed along the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)
Spn5ALzb1		Blade 1 <i>local</i> axial acceleration (absolute) of span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	Directed along the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(m/sec ²)

پ-۶) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچ پره

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
PtchPMzc1	PtchPMzb 1 BldPitch1 BIPitch1	Blade 1 pitch angle (position)	Positive towards feather about the <i>minus</i> $z_{c,1}$ - and <i>minus</i> $z_{b,1}$ -axes	(deg)
PtchPMzc2	PtchPMzb 2 BldPitch2 BIPitch2	Blade 2 pitch angle (position)	Positive towards feather about the <i>minus</i> $z_{c,2}$ - and <i>minus</i> $z_{b,2}$ -axes	(deg)
PtchPMzc3	PtchPMzb 3 BldPitch3 BIPitch3	Blade 3 pitch angle (position) (unavailable for two-bladed turbines)	Positive towards feather about the <i>minus</i> $z_{c,3}$ - and <i>minus</i> $z_{b,3}$ -axes	(deg)

¹⁴¹ Local span motions

پ-۷) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات تیتر^{۱۴۲}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TeetPya	RotTeetP TeetDefl	Rotor teeter angle (position) (unavailable for three-bladed turbines)	About the y_a -axis	(deg)
TeetVya	RotTeetV	Rotor teeter angular velocity (unavailable for three-bladed turbines)	About the y_a -axis	(deg/sec)
TeetAya	RotTeetA	Rotor teeter angular acceleration (unavailable for three-bladed turbines)	About the y_a -axis	(deg/sec ²)

پ-۸) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات شفت

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
LSSTipPxa	LSSTipPx s LSSTipP	Rotor azimuth angle (position)	About the x_a - and x_s -axes	(deg)
LSSTipVxa	LSSTipVx s LSSTip	Rotor azimuth angular speed	About the x_a - and x_s -axes	(rpm)
LSSTipAxa	LSSTipAx s LSSTip	Rotor azimuth angular acceleration	About the x_a - and x_s -axes	(deg/sec ²)
LSSGagPxa	LSSGagPx s LSSGagP	LSS strain-gage azimuth angle (position) (on the gearbox side of the LSS)	About the x_a - and x_s -axes	(deg)
LSSGagVxa	LSSGagVx s LSSGagV	LSS strain-gage angular speed (on the gearbox side of the LSS)	About the x_a - and x_s -axes	(rpm)
LSSGagAxa	LSSGagAx s LSSGagA	LSS strain-gage angular acceleration (on the gearbox side of the LSS)	About the x_a - and x_s -axes	(deg/sec ²)
HSShftV	GenSpeed	Angular speed of the HSS and generator	Same sign as LSSGagVxa / LSSGagVx	(rpm)
HSShftA	GenAccel	Angular acceleration of the HSS and generator	Same sign as LSSGagAxa / LSSGagAx	(deg/sec ²)
TipSpdRat	TSR	Rotor blade tip speed ratio (unavailable if CompAero is False)	N/A	(-)

¹⁴² Teeter motions

پ-۹) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات یونیت اندازه‌گیری اینرسی ناسل^{۱۴۳}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
NcIMUTVxs		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the x_S -axis	(m/sec)
NcIMUTVys		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the y_S -axis	(m/sec)
NcIMUTVzs		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the z_S -axis	(m/sec)
NcIMUTAxS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the x_S -axis	(m/sec ²)
NcIMUTAyS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the y_S -axis	(m/sec ²)
NcIMUTAzS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the z_S -axis	(m/sec ²)
NcIMURVxs		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the x_S -axis	(deg/sec)
NcIMURVys		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the y_S -axis	(deg/sec)
NcIMURVzs		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the z_S -axis	(deg/sec)
NcIMURAxS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the x_S -axis	(deg/sec ²)
NcIMURAyS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the y_S -axis	(deg/sec ²)
NcIMURAzS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the z_S -axis	(deg/sec ²)

پ-۱۰) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچش روتور^{۱۴۴}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
RotFurlP	RotFurl	Rotor-furl angle (position)	About the rotor-furl axis (see Figure 17)	(deg)
RotFurlV		Rotor-furl angular velocity	About the rotor-furl axis (see Figure 17)	(deg/sec)
RotFurlA		Rotor-furl angular acceleration	About the rotor-furl axis (see Figure 17)	(deg/sec ²)

پ-۱۱) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پیچش دم^{۱۴۵}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TailFurlP	TailFurl	Tail-furl angle (position)	About the tail-furl axis (see Figure 17)	(deg)
TailFurlV		Tail -furl angular velocity	About the tail-furl axis (see Figure 17)	(deg/sec)
TailFurlA		Tail -furl angular acceleration	About the tail-furl axis (see Figure 17)	(deg/sec ²)

¹⁴³ Nacelle Inertial Measurement Unit motions¹⁴⁴ Rotor-Furl motion¹⁴⁵ Tail-Furl motions

پ-۱۲) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات یاو ناسل

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
YawPzn	YawPzp NacYawP NacYaw YawPos	Nacelle yaw angle (position)	About the z_H - and z_P -axes	(deg)
YawVzn	YawVzp NacYawV YawRate	Nacelle yaw angular velocity	About the z_H - and z_P -axes	(deg/sec)
YawAzn	YawAzp NacYawA YawAcco	Nacelle yaw angular acceleration	About the z_H - and z_P -axes	(deg/sec ²)
NacYawErr		Nacelle yaw error <i>estimate</i> . This is computed as follows: $NacYawErr = HorWndDir - YawPzn - YawBrRDzt - PtfmRDzi$. This estimate is not accurate instantaneously in the presence of significant tower deflection or platform angular (rotational) displacement since the angles used in the computation are not all defined about the same axis of rotation. However, the estimate should be useful in a yaw controller if averaged over a time scale long enough to diminish the effects of tower and platform motions (i.e., much longer than the	About the z_i -axis	(deg)

پ-۱۳) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات بالای برج، بیرینگ یاو^{۱۴۶}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
YawBrTDxp		Tower-top / yaw bearing fore-aft (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the x_P -axis	(m)
YawBrTDyp		Tower-top / yaw bearing side-to-side (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the y_P -axis	(m)
YawBrTDzp		Tower-top / yaw bearing axial (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the z_P -axis	(m)
YawBrTDxt	TTDspFA	Tower-top / yaw bearing fore-aft (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the x_t -axis	(m)
YawBrTDyt	TTDspSS	Tower-top / yaw bearing side-to-side (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the y_t -axis	(m)
YawBrTDzt	TDspAx	Tower-top / yaw bearing axial (translational) deflection (relative to the undeflected position)	Directed along the z_t -axis	(m)
YawBrTAxp		Tower-top / yaw bearing fore-aft (translational) acceleration (absolute)	Directed along the x_P -axis	(m/sec ²)
YawBrTAyp		Tower-top / yaw bearing side-to-side (translational) acceleration (absolute)	Directed along the y_P -axis	(m/sec ²)
YawBrTAzp		Tower-top / yaw bearing axial (translational) acceleration (absolute)	Directed along the z_P -axis	(m/sec ²)

¹⁴⁶ Top-tower, Yaw-Bearing

YawBrRDxt	TTDspRoll	Tower-top / yaw bearing angular (rotational) roll deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 3 rd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small tower deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the x _t -axis	(deg)
YawBrRDyt	TTDspPch	Tower-top / yaw bearing angular (rotational) pitch deflection (relative to the undeflected position). In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 2 nd rotation in the yaw- pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small tower deflections, so that the rotation sequence does not matter.	About the y _t -axis	(deg)
YawBrRDzt	TTDspTwst	Tower-top / yaw bearing torsional deflection (relative to the undeflected position). This output will always be zero for FAST simulation results. Use it for examining tower torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 1 st rotation in the yaw- pitch-roll rotation sequence.	About the z _t -axis	(deg)
YawBrRVxp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) roll velocity (absolute)	About the x _p -axis	(deg/sec)
YawBrRVyp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) pitch velocity (absolute)	About the y _p -axis	(deg/sec)
YawBrRVzp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) torsion velocity. This output will always be very close to zero for FAST simulation results. Use it for examining tower torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor.	About the z _p -axis	(deg/sec)
YawBrRAxp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) roll acceleration (absolute)	About the x _p -axis	(deg/sec ²)
YawBrRAYp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) pitch acceleration (absolute)	About the y _p -axis	(deg/sec ²)
YawBrRAzp		Tower-top / yaw bearing angular (rotational) torsion acceleration. This output will always be very close to zero for FAST simulation results. Use it for examining tower torsional deflections of ADAMS simulations run using ADAMS datasets created using the FAST-to-ADAMS preprocessor.	About the z _p -axis	(deg/sec ²)

پ-۱۴) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات محلی برج^{۱۴۷}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TwHt1ALxt		Local tower fore-aft (translational) acceleration (absolute) of tower gage 1 (unavailable if NTwGages = 0)	Directed along the local x _t -axis	(m/sec ²)
TwHt1ALyt		Local tower side-to-side (translational) acceleration (absolute) of tower gage 1 (unavailable if NTwGages = 0)	Directed along the local y _t -axis	(m/sec ²)
TwHt1ALzt		Local tower axial (translational) acceleration (absolute) of tower gage 1 (unavailable if NTwGages = 0)	Directed along the local z _t -axis	(m/sec ²)

¹⁴⁷ local Tower motions

TwHt2ALxt		Local tower fore-aft (translational) acceleration (absolute) of tower gage 2 (unavailable if NTwGages < 2)	Directed along the local x_t -axis	(m/sec ²)
TwHt2ALyt		Local tower side-to-side (translational) acceleration (absolute) of tower gage 2 (unavailable if NTwGages < 2)	Directed along the local y_t -axis	(m/sec ²)
TwHt2ALzt		Local tower axial (translational) acceleration (absolute) of tower gage 2 (unavailable if NTwGages < 2)	Directed along the local z_t -axis	(m/sec ²)
TwHt3ALxt		Local tower fore-aft (translational) acceleration (absolute) of tower gage 3 (unavailable if NTwGages < 3)	Directed along the local x_t -axis	(m/sec ²)
TwHt3ALyt		Local tower side-to-side (translational) acceleration (absolute) of tower gage 3 (unavailable if NTwGages < 3)	Directed along the local y_t -axis	(m/sec ²)
TwHt3ALzt		Local tower axial (translational) acceleration (absolute) of tower gage 3 (unavailable if NTwGages < 3)	Directed along the local z_t -axis	(m/sec ²)
TwHt4ALxt		Local tower fore-aft (translational) acceleration (absolute) of tower gage 4 (unavailable if NTwGages < 4)	Directed along the local x_t -axis	(m/sec ²)
TwHt4ALyt		Local tower side-to-side (translational) acceleration (absolute) of tower gage 4 (unavailable if NTwGages < 4)	Directed along the local y_t -axis	(m/sec ²)
TwHt4ALzt		Local tower axial (translational) acceleration (absolute) of tower gage 4 (unavailable if NTwGages < 4)	Directed along the local z_t -axis	(m/sec ²)
TwHt5ALxt		Local tower fore-aft (translational) acceleration (absolute) of tower gage 5 (unavailable if NTwGages < 5)	Directed along the local x_t -axis	(m/sec ²)
TwHt5ALyt		Local tower side-to-side (translational) acceleration (absolute) of tower gage 5 (unavailable if NTwGages < 5)	Directed along the local y_t -axis	(m/sec ²)
TwHt5ALzt		Local tower axial (translational) acceleration (absolute) of tower gage 5 (unavailable if NTwGages < 5)	Directed along the local z_t -axis	(m/sec ²)

پ-۱۵) پارامترهای خروجی مربوط به حرکات پلتفرم

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
PtfmTDxt		Platform horizontal surge (translational) displacement	Directed along the x_t -axis	(m)
PtfmTDyt		Platform horizontal sway (translational) displacement	Directed along the y_t -axis	(m)
PtfmTDzt		Platform vertical heave (translational) displacement	Directed along the z_t -axis	(m)
PtfmTDxi	PtfmSurge	Platform horizontal surge (translational) displacement	Directed along the x_j -axis	(m)
PtfmTDyi	PtfmSway	Platform horizontal sway (translational) displacement	Directed along the y_j -axis	(m)
PtfmTDzi	PtfmHeave	Platform vertical heave (translational) displacement	Directed along the z_j -axis	(m)
PtfmTVxt		Platform horizontal surge (translational) velocity	Directed along the x_t -axis	(m/sec)
PtfmTVyt		Platform horizontal sway (translational) velocity	Directed along the y_t -axis	(m/sec)

PtfmTVzt		Platform vertical heave (translational) velocity	Directed along the Z _t -axis	(m/sec)
PtfmTVxi		Platform horizontal surge (translational) velocity	Directed along the X _j -axis	(m/sec)
PtfmTVyi		Platform horizontal sway (translational) velocity	Directed along the y _j -axis	(m/sec)
PtfmTVzi		Platform vertical heave (translational) velocity	Directed along the Z _j -axis	(m/sec)
PtfmTAXt		Platform horizontal surge (translational) acceleration	Directed along the X _t -axis	(m/sec ²)
PtfmTAYt		Platform horizontal sway (translational) acceleration	Directed along the y _t -axis	(m/sec ²)
PtfmTAZt		Platform vertical heave (translational) acceleration	Directed along the Z _t -axis	(m/sec ²)
PtfmTAXi		Platform horizontal surge (translational) acceleration	Directed along the X _j -axis	(m/sec ²)
PtfmTAYi		Platform horizontal sway (translational) acceleration	Directed along the y _j -axis	(m/sec ²)
PtfmTAzi		Platform vertical heave (translational) acceleration	Directed along the Z _j -axis	(m/sec ²)
PtfmRDxi	PtfmRoll	Platform roll tilt angular (rotational) displacement. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 3 rd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small rotational platform displacements, so that the rotation sequence does not matter.	About the x _j -axis	(deg)
PtfmRDyi	PtfmPitch	Platform pitch tilt angular (rotational) displacement. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 2 nd rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small rotational platform displacements, so that the rotation sequence does not matter.	About the y _j -axis	(deg)
PtfmRDzi	PtfmYaw	Platform yaw angular (rotational) displacement. In ADAMS, it is output as an Euler angle computed as the 1 st rotation in the yaw-pitch-roll rotation sequence. It is not output as an Euler angle in FAST, which assumes small rotational platform displacements, so that the rotation sequence does not matter.	About the Z _j -axis	(deg)
PtfmRVxt		Platform roll tilt angular (rotational) velocity	About the X _t -axis	(deg/sec)
PtfmRVyt		Platform pitch tilt angular (rotational) velocity	About the y _t -axis	(deg/sec)
PtfmRVzt		Platform yaw angular (rotational) velocity	About the Z _t -axis	(deg/sec)
PtfmRVxi		Platform roll tilt angular (rotational) velocity	About the X _j -axis	(deg/sec)
PtfmRVyi		Platform pitch tilt angular (rotational) velocity	About the y _j -axis	(deg/sec)
PtfmRVzi		Platform yaw angular (rotational) velocity	About the Z _j -axis	(deg/sec)
PtfmRAXt		Platform roll tilt angular (rotational) acceleration	About the X _t -axis	(deg/sec ²)

PtfmRAyt		Platform pitch tilt angular (rotational) acceleration	About the y_t -axis	(deg/sec ²)
PtfmRAzt		Platform yaw angular (rotational) acceleration	About the z_t -axis	(deg/sec ²)
PtfmRAxi		Platform roll tilt angular (rotational) acceleration	About the x_j -axis	(deg/sec ²)
PtfmRAyi		Platform pitch tilt angular (rotational) acceleration	About the y_j -axis	(deg/sec ²)
PtfmRAzi		Platform yaw angular (rotational) acceleration	About the z_j -axis	(deg/sec ²)

پ-۱۶) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۱

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
RootFxc1		Blade 1 out-of-plane shear force at the blade root	Directed along the $x_{c,1}$ -axis	(kN)
RootFyc1		Blade 1 in-plane shear force at the blade root	Directed along the $y_{c,1}$ -axis	(kN)
RootFzc1	RootFzb1	Blade 1 axial force at the blade root	Directed along the $z_{c,1}$ - and $z_{b,1}$ -axes	(kN)
RootFxb1		Blade 1 flapwise shear force at the blade root	Directed along the $x_{b,1}$ -axis	(kN)
RootFyb1		Blade 1 edgewise shear force at the blade root	Directed along the $y_{b,1}$ -axis	(kN)
RootMxc1	RootMIP1	Blade 1 in-plane moment (i.e., the moment caused by in-plane forces) at the blade root	About the $x_{c,1}$ -axis	(kN·m)
RootMyc1	RootMOoP1	Blade 1 out-of-plane moment (i.e., the moment caused by out-of-plane forces) at the blade root	About the $y_{c,1}$ -axis	(kN·m)
RootMzc1	RootMzb1	Blade 1 pitching moment at the blade root	About the $z_{c,1}$ - and $z_{b,1}$ -axes	(kN·m)
RootMxb1	RootMEDg1	Blade 1 edgewise moment (i.e., the moment caused by edgewise forces) at the blade root	About the $x_{b,1}$ -axis	(kN·m)
RootMyb1	RootMFlp1	Blade 1 flapwise moment (i.e., the moment caused by flapwise forces) at the blade root	About the $y_{b,1}$ -axis	(kN·m)

پ-۱۷) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۲

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
RootFxc2		Blade 2 out-of-plane shear force at the blade root	Directed along the $x_{c,2}$ -axis	(kN)
RootFyc2		Blade 2 in-plane shear force at the blade root	Directed along the $y_{c,2}$ -axis	(kN)
RootFzc2	RootFzb2	Blade 2 axial force at the blade root	Directed along the $z_{c,2}$ - and $z_{b,2}$ -axes	(kN)
RootFxb2		Blade 2 flapwise shear force at the blade root	Directed along the $x_{b,2}$ -axis	(kN)
RootFyb2		Blade 2 edgewise shear force at the blade root	Directed along the $y_{b,2}$ -axis	(kN)
RootMxc2	RootMIP2	Blade 2 in-plane moment (i.e., the moment caused by in-plane forces) at the blade root	About the $x_{c,2}$ -axis	(kN·m)
RootMyc2	RootMOoP2	Blade 2 out-of-plane moment (i.e., the moment caused by out-of-plane forces) at the blade root	About the $y_{c,2}$ -axis	(kN·m)

RootMzc2	RootMzb2	Blade 2 pitching moment at the blade root	About the $z_{c,2}$ - and $z_{b,2}$ -axes	(kN·m)
RootMxb2	RootMEdg2	Blade 2 edgewise moment (i.e., the moment caused	About the $x_{b,2}$ -axis	(kN·m)
RootMyb2	RootMFlp2	Blade 2 flapwise moment (i.e., the moment caused by flapwise forces) at the blade root	About the $y_{b,2}$ -axis	(kN·m)

پ-۱۸) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای ریشه پره ۳

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
RootFxc3		Blade 3 out-of-plane shear force at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $x_{c,3}$ -axis	(kN)
RootFyc3		Blade 3 in-plane shear force at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $y_{c,3}$ -axis	(kN)
RootFzc3	RootFzb3	Blade 3 axial force at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $z_{c,3}$ - and $z_{b,3}$ -axes	(kN)
RootFxb3		Blade 3 flapwise shear force at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $x_{b,3}$ -axis	(kN)
RootFyb3		Blade 3 edgewise shear force at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	Directed along the $y_{b,3}$ -axis	(kN)
RootMxc3	RootMIP3	Blade 3 in-plane moment (i.e., the moment caused by in-plane forces) at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	About the $x_{c,3}$ -axis	(kN·m)
RootMyc3	RootMOoP3	Blade 3 out-of-plane moment (i.e., the moment caused by out-of-plane forces) at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	About the $y_{c,3}$ -axis	(kN·m)
RootMzc3	RootMzb3	Blade 3 pitching moment at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	About the $z_{c,3}$ - and $z_{b,3}$ -axes	(kN·m)
RootMxb3	RootMEdg3	Blade 3 edgewise moment (i.e., the moment caused by edgewise forces) at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	About the $x_{b,3}$ -axis	(kN·m)
RootMyb3	RootMFlp3	Blade 3 flapwise moment (i.e., the moment caused by flapwise forces) at the blade root (unavailable for two-bladed turbines)	About the $y_{b,3}$ -axis	(kN·m)

پ-۱۹) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای گسترده محلی^{۱۴۸} پره ۱

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
Spn1MLxb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise moment at span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	About the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(kN·m)
Spn1MLyb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise moment at span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	About the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(kN·m)
Spn1MLzb1		Blade 1 <i>local</i> pitching moment at span station 1 (unavailable if NBIGages = 0)	About the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(kN·m)
Spn2MLxb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise moment at span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	About the <i>local</i> $x_{b,1}$ -axis	(kN·m)
Spn2MLyb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise moment at span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	About the <i>local</i> $y_{b,1}$ -axis	(kN·m)
Spn2MLzb1		Blade 1 <i>local</i> pitching moment at span station 2 (unavailable if NBIGages < 2)	About the <i>local</i> $z_{b,1}$ -axis	(kN·m)

Spn3MLxb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise moment at span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	About the <i>local</i> $x_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn3MLyb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise moment at span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	About the <i>local</i> $y_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn3MLzb1		Blade 1 <i>local</i> pitching moment at span station 3 (unavailable if NBIGages < 3)	About the <i>local</i> $z_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn4MLxb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise moment at span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	About the <i>local</i> $x_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn4MLyb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise moment at span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	About the <i>local</i> $y_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn4MLzb1		Blade 1 <i>local</i> pitching moment at span station 4 (unavailable if NBIGages < 4)	About the <i>local</i> $z_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn5MLxb1		Blade 1 <i>local</i> edgewise moment at span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	About the <i>local</i> $x_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn5MLyb1		Blade 1 <i>local</i> flapwise moment at span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	About the <i>local</i> $y_{b,1}$ axis	(kN·m)
Spn5MLzb1		Blade 1 <i>local</i> pitching moment at span station 5 (unavailable if NBIGages < 5)	About the <i>local</i> $z_{b,1}$ axis	(kN·m)

پ-۲۰) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای روتور و هاب

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
LSShftFxa	LSShftFxs LSSGagFxa LSSGagFxs RotThrust	LSS thrust force (this is constant along the shaft and is equivalent to the rotor thrust force)	Directed along the x_a - and x_s -axes	(kN)
LSShftFya	LSSGagFya	Rotating LSS shear force (this is constant along the shaft)	Directed along the y_a -axis	(kN)
LSShftFza	LSSGagFza	Rotating LSS shear force (this is constant along the shaft)	Directed along the z_a -axis	(kN)
LSShftFys	LSSGagFys	Nonrotating LSS shear force (this is constant along the shaft)	Directed along the y_s -axis	(kN)
LSShftFzs	LSSGagFzs	Nonrotating LSS shear force (this is constant along the shaft)	Directed along the z_s -axis	(kN)
LSShftMxa	LSShftMxs LSSGagMxa LSSGagMxs RotTorq LSShftTq	LSS torque (this is constant along the shaft and is equivalent to the rotor torque)	About the x_a - and x_s -axes	(kN·m)
LSSTipMya		Rotating LSS bending moment at the shaft tip (teeter pin for two-bladed turbines, apex of rotation for three-bladed turbines)	About the y_a -axis	(kN·m)
LSSTipMza		Rotating LSS bending moment at the shaft tip (teeter pin for two-bladed turbines, apex of rotation for three-bladed turbines)	About the z_a -axis	(kN·m)
LSSTipMys		Nonrotating LSS bending moment at the shaft tip (teeter pin for two-bladed turbines, apex of rotation for three-bladed turbines)	About the y_s -axis	(kN·m)
LSSTipMzs		Nonrotating LSS bending moment at the shaft tip (teeter pin for two-bladed turbines, apex of rotation for three-bladed turbines)	About the z_s -axis	(kN·m)
CThrstAzm		Azimuth location of the center of thrust. This is estimated using values of LSSTipMys, LSSTipMzs, and RotThrust.	About the x_a - and x_s -axes	(deg)

CThrstRad	CThrstArm	Dimensionless radial (arm) location of the center of thrust. This is estimated using values of LSSTipMys, LSSTipMzs, and RotThrust. (nondimensionalized using the undeflected tip radius normal to the shaft and limited to values between 0 and 1 (inclusive))	Always positive (directed radially outboard at azimuth angle CThrstAzM)	(-)
RotPwr	LSShftPwr	Rotor power (this is equivalent to the LSS power)	N/A	(kW)
RotCq	LSShftCq	Rotor torque coefficient (this is equivalent to the LSS torque coefficient) (unavailable if CompAero is False)	N/A	(-)
RotCp	LSShftCp	Rotor power coefficient (this is equivalent to the LSS power coefficient) (unavailable if CompAero is False)	N/A	(-)
RotCt	LSShftCt	Rotor thrust coefficient (this is equivalent to the LSS thrust coefficient) (unavailable if CompAero is False)	N/A	(-)

پ-۲۱) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای کرنش سنج^{۱۴۹} شفت

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
LSSGagMy _a		Rotating LSS bending moment at the shaft's strain	About the y _a -axis	(kN·m)
LSSGagMz _a		Rotating LSS bending moment at the shaft's strain	About the z _a -axis	(kN·m)
LSSGagMy _s		Nonrotating LSS bending moment at the shaft's strain gage (shaft strain gage located by input ShftGagL)	About the y _s -axis	(kN·m)
LSSGagMz _s		Nonrotating LSS bending moment at the shaft's strain gage (shaft strain gage located by input ShftGagL)	About the z _s -axis	(kN·m)

پ-۲۲) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای HSS و ژنراتور

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
HSShftTq		HSS torque (this is constant along the shaft)	Same sign as LSShftTq / RotTorq / LSShftMxa / LSShftMxs / LSSGagMxa / LSSGagMxs	(kN·m)
HSShftPwr		HSS power	Same sign as HSShftTq	(kW)
HSShftCq		HSS torque coefficient (unavailable if CompAero)	N/A	(-)
HSShftCp		HSS power coefficient (unavailable if CompAero)	N/A	(-)

GenTq		Electrical generator torque	Positive reflects power extracted and negative represents a motoring-up situation or power input	(kN·m)
GenPwr		Electrical generator power	Same sign as GenTq	(kW)
GenCq		Electrical generator torque coefficient (unavailable)	N/A	(-)
GenCp		Electrical generator power coefficient (unavailable)	N/A	(-)
HSSBrTq		HSS brake torque (i.e., the moment applied to the HSS by the brake)	Always positive (indicating dissipation of power)	(kN·m)

پ-۲۳) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بیرینگ پیچش روتور^{۱۵۰}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
RFrIBrM		Rotor-furl bearing moment	About the rotor-furl axis (see Figure 17)	(kN·m)

پ-۲۴) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بیرینگ پیچش دم^{۱۵۱}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TFrIBrM		Tail-furl bearing moment	About the tail-furl axis (see Figure 17)	(kN·m)

پ-۲۵) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای آیرودینامیک فین دم^{۱۵۲}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TFinAlpha		Tail fin angle of attack. This is the angle between the relative velocity of the wind-inflow at the tail fin center-of-pressure and the tail fin chordline. (unavailable if CompAero is False)	About the tail fin z-axis, which is the axis in the tail fin plane normal to the chordline (see Figure 19)	(deg)
TFinCLift		Tail fin dimensionless lift coefficient (unavailable if	N/A	(-)
TFinCDrag		Tail fin dimensionless drag coefficient (unavailable	N/A	(-)

¹⁵⁰ Rotor-Furl Bearing Loads

¹⁵¹ Tail-Furl Bearing Loads

¹⁵² Tail Fin aerodynamic Loads

TFinDnPrs		Tail fin dynamic pressure, equal to $\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2$ where V_{rel} is the relative velocity of the wind-inflow	N/A	(Pa)
TFinCPFx		Tangential aerodynamic force at the tail fin center-of-pressure (unavailable if CompAero is False)	Directed along the tail fin x-axis, which is the axis along the chordline, positive towards the trailing edge (see Figure 19)	(kN)
TFinCPFy		Normal aerodynamic force at the tail fin center-of-pressure (unavailable if CompAero is False)	Directed along the tail fin y-axis, which is orthogonal to the tail fin plane (see Figure 19)	(kN)

پ-۲۶) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای بالای برج، بیرینگ یاو

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
YawBrFxn		Rotating (with nacelle) tower-top / yaw bearing	Directed along the x_{η} -axis	(kN)
YawBrFyn		Rotating (with nacelle) tower-top / yaw bearing	Directed along the y_{η} -axis	(kN)
YawBrFzn	YawBrFzp	Tower-top / yaw bearing axial force	Directed along the z_{η} - and z_p -axes	(kN)
YawBrFxp		Tower-top / yaw bearing fore-aft (nonrotating) shear	Directed along the x_p -axis	(kN)
YawBrFyp		Tower-top / yaw bearing side-to-side (nonrotating)	Directed along the y_p -axis	(kN)
YawBrMxn		Rotating (with nacelle) tower-top / yaw bearing roll	About the x_{η} -axis	(kN·m)
YawBrMyn		Rotating (with nacelle) tower-top / yaw bearing	About the y_{η} -axis	(kN·m)
YawBrMzn	YawBrMzp YawMom	Tower-top / yaw bearing yaw moment	About the z_{η} - and z_p -axes	(kN·m)
YawBrMxp		Nonrotating tower-top / yaw bearing roll moment	About the x_p -axis	(kN·m)
YawBrMyp		Nonrotating tower-top / yaw bearing pitch moment	About the y_p -axis	(kN·m)

پ-۲۷) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای پایه برج^{۱۵۳}

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TwrBsFxt		Tower base fore-aft shear force	Directed along the x_t -axis	(kN)
TwrBsFyt		Tower base side-to-side shear force	Directed along the y_t -axis	(kN)

TwrBsFzt		Tower base axial force	Directed along the Z_t -axis	(kN)
TwrBsMxt		Tower base roll (or side-to-side) moment (i.e., the	About the x_t -axis	(kN·m)
TwrBsMyt		Tower base pitching (or fore-aft) moment (i.e., the	About the y_t -axis	(kN·m)
TwrBsMzt		Tower base yaw (or torsional) moment	About the Z_t -axis	(kN·m)

پ-۲۸) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای محلی برج

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
TwHt1MLxt		Local tower roll (or side-to-side) moment of tower	About the local x_t axis	(kN·m)
TwHt1MLyt		Local tower pitching (or fore-aft) moment of tower	About the local y_t axis	(kN·m)
TwHt1MLzt		Local tower yaw (or torsional) moment of tower	About the local Z_t axis	(kN·m)
TwHt2MLxt		Local tower roll (or side-to-side) moment of tower	About the local x_t axis	(kN·m)
TwHt2MLyt		Local tower pitching (or fore-aft) moment of tower	About the local y_t axis	(kN·m)
TwHt2MLzt		Local tower yaw (or torsional) moment of tower	About the local Z_t axis	(kN·m)
TwHt3MLxt		Local tower roll (or side-to-side) moment of tower	About the local x_t axis	(kN·m)
TwHt3MLyt		Local tower pitching (or fore-aft) moment of tower	About the local y_t axis	(kN·m)
TwHt3MLzt		Local tower yaw (or torsional) moment of tower	About the local Z_t axis	(kN·m)
TwHt4MLxt		Local tower roll (or side-to-side) moment of tower	About the local x_t axis	(kN·m)
TwHt4MLyt		Local tower pitching (or fore-aft) moment of tower	About the local y_t axis	(kN·m)
TwHt4MLzt		Local tower yaw (or torsional) moment of tower	About the local Z_t axis	(kN·m)
TwHt5MLxt		Local tower roll (or side-to-side) moment of tower	About the local x_t axis	(kN·m)
TwHt5MLyt		Local tower pitching (or fore-aft) moment of tower	About the local y_t axis	(kN·m)
TwHt5MLzt		Local tower yaw (or torsional) moment of tower	About the local Z_t axis	(kN·m)

پ-۲۹) پارامترهای خروجی مربوط به بارهای پلتفرم

Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units
PtfmFxt		Platform horizontal surge shear force	Directed along the x_t -axis	(kN)
PtfmFyt		Platform horizontal sway shear force	Directed along the y_t -axis	(kN)
PtfmFzt		Platform vertical heave force	Directed along the Z_t -axis	(kN)
PtfmFxi		Platform horizontal surge shear force	Directed along the x_t -axis	(kN)

PtfmFyi		Platform horizontal sway shear force	Directed along the y_t -axis	(kN)
PtfmFzi		Platform vertical heave force	Directed along the z_t -axis	(kN)
PtfmMxt		Platform roll tilt moment	About the x_t -axis	(kN·m)
PtfmMyt		Platform pitch tilt moment	About the y_t -axis	(kN·m)
PtfmMzt		Platform yaw moment	About the z_t -axis	(kN·m)
PtfmMxi		Platform roll tilt moment	About the x_i -axis	(kN·m)
PtfmMyi		Platform pitch tilt moment	About the y_i -axis	(kN·m)
PtfmMzi		Platform yaw moment	About the z_i -axis	(kN·m)

۵-۴- مراجع

- [4] Jason M. Jonkman, Marshall L. Buhl Jr., "FAST User's Guide", Technical report, NREL/EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory, August 2005.
- [5] Jonkman, J, Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," NREL/TP-500-38060, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, February 2009.
- [3] Fingersh, L.J. and Johnson, K., "Controls Advanced Research Turbine (CART) Commissioning and Baseline Data Collection" NREL/TP-500-32879, Golden, Colorado, October 2002.
- [4] Wright, A. D. & Fingersh, L. J. "Advanced Control Design for Wind Turbines; Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests," NREL/TP-500-42437 report, March 1, 2008; Golden, Colorado