



DOR:

کنترل فعال ارتعاشات و کاهش نیروی برشی توربین بادی ۵ مگاواتی به وسیله عملگر ژيروسکوپ

وحید مصطفوی^{۱*}، مهدی سلیمانی^۲ و مهدی بقایی^۳

^۱ کارشناسی ارشد مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

^۳ دکتری هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

چکیده

یکی از دغدغه‌های اساسی در فن‌آوری‌های انرژی تجدید پذیر مانند، توربین بادی، هزینه‌های اقتصادی و صرفه جویی در هزینه‌های مرتبط با ساخت آن است. کاهش ارتعاشات سازه توربین بادی می‌تواند خستگی مکانیکی سازه ناشی از بارهای باد را کاهش داده و منجر به کاهش مواد مصرفی و هزینه شود. علاوه بر این اگر نیروی برشی و ممان خمشی در پایه سازه توربین کاهش یابد، می‌توان از فونداسیون با ابعاد کوچکتر و مصالح کمتر استفاده کرد. همه این عوامل تاثیر مثبت در کاهش هزینه یک توربین بادی دارد. در این مطالعه یک ژيروسکوپ پایدارساز جهت کاهش ارتعاشات ناشی از باد در یک توربین ۵ مگاواتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار مدل معتبر فست مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این از دو نسخه ژيروسکوپ استفاده شده است در حالت اول ژيروسکوپ بصورت غیرفعال نقش پایدار ساز داشته و در حالت دوم به عنوان عملگر فعال عمل می‌کند؛ همچنین یک کنترل کننده PID جهت کنترل سیستم فعال طراحی شده است. تاثیر عملگر ژيروسکوپ بر ارتعاشات، نیروی برشی و ممان خمشی ناشی از بارهای باد از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که سیستم پیشنهادی در حالت فعال توانایی کاهش میزان ارتعاشات، نیروی برشی و ممان خمشی پایه توربین را در حدود ۳۲ درصد و در حالت غیرفعال در حدود ۱۴ درصد داراست.

کلمات کلیدی: توربین بادی؛ ژيروسکوپ؛ کنترل غیرفعال؛ کنترل کننده فعال؛ کنترل ارتعاش؛ نیروی برشی؛ گشتاور پایه.

Active Vibration Control and Reduction of Shear Force of 5MW Wind Turbine with the Help of Gyroscope Actuator

V. Mostafavi^{1,*}, M. Soleymani², M. Baghaee³

¹ Master of Science Mechatronic Engineering, Mechanical Department, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

² Associate Professor Mechanical Engineering, Mechanical Department, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

³ PhD, Aerospace Engineering, Mechanical Department, Faculty of Engineering, Tarbiat-Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

One of the main concerns in renewable energy technologies, such as wind turbines, is the economic cost and cost savings associated with its construction. Reducing the vibrations of a turbine structure can attenuate the fatigue damage caused by wind loads led to reduction in material consumption and cost. Besides, if the force and flexural moment at the base of the structure is reduced, a smaller foundation can be used to install the wind turbine. All of these factors have a positive impact on lowering the cost of a wind turbine. In this study, application of gyroscopic stabilization to decrease the wind-induced vibrations in 5 mega Watt wind turbine is studied. A valid FAST model is employed for this purpose. Moreover, two versions of the gyroscopic actuator including a passive stabilizer and an active gyroscopic actuator has been proposed. Furthermore, a PID controller has been designed to control the active system. The effect of gyroscope actuator on vibration, shear force and bending moment caused by wind loads is studied via extensive simulations. It was shown that the proposed system can reduce the decrease the tip vibration, base shear and base moment by 32 percent in active mode and 14 percent in passive mode. As a result enclosing circle of foundation reduces 5 meter.

Keywords: Wind Turbine; Gyroscope; Active Controller; Passive Controller; Vibration Control; Shear Force; Bending Moment.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۹۱۲۰۹۶۹۴۳

آدرس پست الکترونیک: vahid.mostafavi339@gmail.com

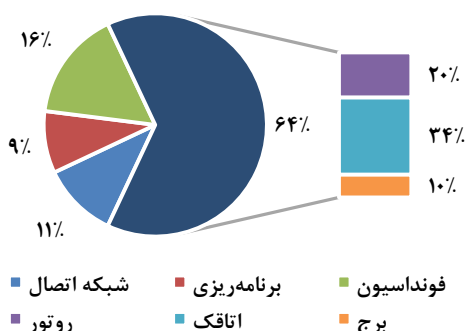
۱- مقدمه

امروزه نیاز به انرژی بیش از پیش احساس می‌شود، بطوری که در گزارش سالانه وضعیت انرژی توسط آژانس بین‌المللی انرژی، مصرف انرژی در سال ۲۰۱۸ به حدود دوبرابر رشد متوسط سال ۲۰۱۰ رسیده است که بیشتر از ۵۰ درصد این رشد مربوط به تقاضا در حوزه برق بوده که سهم سوخت‌های فسیلی نسبت به انرژی‌های تجدید پذیر جهت تولید انرژی الکتریکی بسیار بیشتر بوده است. مصرف سوخت‌های فسیلی، منجر به تولید گاز دی‌اکسید کربن شده که بزرگترین منبع افزایش دمای کره زمین است [۱-۳].

استقبال از تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد توسط توربین‌های بادی در سال‌های اخیر رشد قابل تاملی داشته، بطوری که از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸ ظرفیت کل ذخیره انرژی بادی، بیش از ۱۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد [۴]. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در توسعه توربین‌های بادی، صرفه اقتصادی و افزایش بازده آن‌هاست و همین امر باعث شده، دانشمندان و محققان در سرتاسر دنیا به تحقیق و مطالعه توربین‌های بادی بپردازند. شکل ۱ به شناسایی و بررسی هزینه‌های مربوط به ساخت توربین‌های بادی با پایه ثابت در خشکی پرداخته است [۵].

با کنترل ارتعاش سازه توربین بادی و کاهش نیرو و گشتاور برشی موجود در پایه آن می‌توان از مواد کمتری در سازه توربین و فونداسیون ضعیف‌تری جهت نصب توربین بادی استفاده کرد که در کاهش هزینه‌های تمام شده در نصب و راه‌اندازی توربین بادی نقش دارد. علاوه بر موارد فوق، کاهش ارتعاشات و خستگی، عمر مفید توربین را افزایش می‌دهد. یکی از محدودیت‌هایی که مانع از نصب توربین‌های با ارتفاع بالاتر و در نتیجه پره‌های بلندتر می‌شود، وجود همین ارتعاشات است که در صورت کنترل آن می‌توان از بادهای با سرعت بیشتر بهره برد که می‌تواند تولید انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی را به صرفه‌تر کند [۶].

در سال ۲۰۰۳، بوسانی ایده‌ای مطرح کرد که طبق آن هر پره توربین را بصورت جداگانه کنترل کرد. از اهداف او برای این کار می‌توان به مواردی چون استفاده از پره‌ها به عنوان ترمزهای مستقل و عدم نیاز به ترمز شفت با ظرفیت بالا و کاهش بارهای نامتقارن ناشی از تغییر سرعت باد اشاره کرد که می‌تواند موجب خستگی و ارتعاش در سازه توربین



شکل ۱- مقایسه درصد هزینه‌های قسمت‌های مختلف یک توربین بادی نصب شده در خشکی [۵، ۷، ۸]

بادی و پره‌ها شود. به کمک این روش او توانست، توان مصرفی عملگرهای مربوط به پیچش پره‌ها را نیز کاهش دهد [۹]. آرگیوادیس و هیل، در سال ۲۰۰۴، از یک آونگ جهت کنترل غیرفعال سازه توربین بادی استفاده کردند و نشان دادند که با این روش می‌توان ارتعاشات و خستگی سازه توربین را کاهش داد [۱۰]. در سال ۲۰۰۸، مورتاق و همکاران توربین بادی متشکل از سه پره یکسان که به یک برج منعطف با مقطع ثابت حلقوی است را بصورت یک سیستم دینامیکی چند جسمی در نظر گرفتند و از یک میراگر جرمی تنظیم شده جهت کنترل غیر فعال ارتعاش نوک برج استفاده کردند و نشان دادند که به کمک این میراگر می‌توان ارتعاشات را کاهش داد [۱۱]. کولور و باسو در سال ۲۰۰۹، به بررسی اثر میراگر ستون مایع تنظیم شده روی توربین بادی با پایه ثابت در دریا پرداختند. توربین بادی با چندین درجه آزادی در نظر گرفته شد و اثر باد و امواج دریا روی مدل ریاضی اعمال گردید. آن‌ها نشان دادند، این نوع میراگر می‌تواند گشتاور خمشی، ارتعاشات برج و خستگی سازه توربین را کاهش دهد [۱۲]. در سال ۲۰۱۰ کریمی و همکاران، به بررسی کنترل توربین بادی با پایه ثابت در دریا پرداختند. آن‌ها از میراگر ستون مایع تنظیم شده واقع در بالای توربین بصورت نیمه فعال بهره بردند. جهت طراحی قوانین کنترلی از روش فیدبک خروجی H_{∞} استفاده شد. آن‌ها به کمک این روش توانستند، ارتعاش سازه توربین را کاهش دهند [۱۳]. در سال ۲۰۱۱ لنکتر و لوتیا جهت مدل‌سازی سازه از کدهای هوا-کشسان (سازه در مقابل هوا و

این روش به کمک دریافت کننده‌های انرژی، به جای اینکه انرژی جنبشی میراگر تلف شود، انرژی الکتریکی تولید می‌شود. از نظر تئوری این مقدار انرژی تولید شده بر حسب کیلووات است و می‌تواند انرژی مورد نیاز سنسورها و عملگرهای کنترلی را تامین کند [۱۹].

در این تحقیق برای اولین بار از عملگر ژيروسکوپ جهت کنترل ارتعاش سازه توربین بادی، کاهش نیروی برشی و گشتاور پایه توربین به دو صورت استفاده شده است؛ در حالت اول ارتعاشات برج، سبب پیشروش ژيروسکوپ شده و تولید کوپل ژيروسکوپی می‌کند. این کوپل در جهتی است که با ارتعاشات برج مخالفت می‌کند. در این روش، ژيروسکوپ بدون هیچ کنترل‌کننده‌ای روی ناسل نصب می‌شود. در روش دوم یک گشتاور کنترلی در جهت پیشروش به ژيروسکوپ اعمال می‌گردد و باعث تولید کوپل ژيروسکوپی می‌شود. این حالت بصورت کنترل فعال در نظر گرفته می‌شود.

۲- شبیه سازی نرم افزاری

سیستم مورد مطالعه از دو بخش اصلی توربین بادی و عملگر ژيروسکوپ تشکیل شده است. توربین بادی با ظرفیت ۵ مگاوات با پایه ثابت در خشکی شامل ۳ پره است که روبه‌باد قرار دارد. ژيروسکوپ بصورت ثابت روی اتافاک^۲ قرار گرفته شده است.

۲-۱- شبیه‌سازی توربین بادی

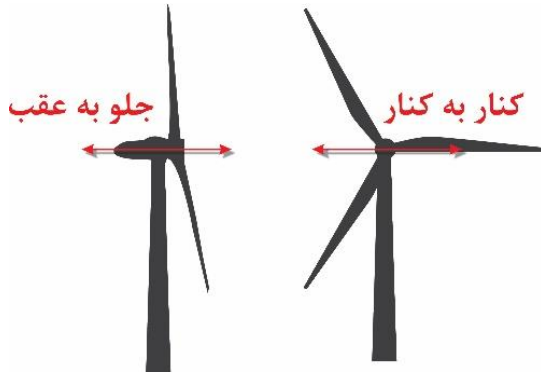
جهت بررسی اثر ژيروسکوپ روی توربین بادی، نیاز به مدلی معتبر از توربین است. در این تحقیق مدل مورد استفاده توسط کدهای فست ساخته می‌شود. مقایسه بین نتایج فست و مدل‌های آزمایشگاهی، اعتبار این کدها را نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱]. کد فست، یک شبیه‌ساز گسترده ابروالاستیک است که در حوزه زمان و به کمک روش حل دینامیک چند جسمی به بررسی اثر بارهای شدید و خستگی روی توربین‌های بادی می‌پردازد. تعداد درجات آزادی سازه‌ای در فست محدود هستند، ولی با این حال توربین‌های متنوعی از نظر نوع ساختار و روش‌های کنترلی در آن قابل مدل‌سازی و اجرا است [۲۲]. در فست کلیه درجات آزادی به جز پره‌ها و

گازها) فست^۱ استفاده کردند. استفاده از این کدها، نتایج واقعی‌تری از رفتار توربین بادی را ارائه می‌کند و جزئیات بیشتری از توربین در نظر می‌گرفت. میراگر جرم تنظیم شده بصورت غیرفعال در قسمت ناسل جهت کاهش ارتعاشات قرار گرفت [۱۴]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۲، توربین با مقایسه ۱/۱۳ را ساختند و تاثیر توپ به عنوان جاذب ارتعاشی روی آن مورد بررسی قرار گرفت. اثربخشی این روش جهت کاهش جابجایی و شتاب نوک سازه توربین، همچنین تنش وارده بر پایه سازه تحت بار زلزله و باد نشان داده شد [۱۵]. یولین و همکاران در سال ۲۰۱۴، به کمک میراگر جرمی تنظیم شده به کنترل ارتعاش توربین بادی با پایه شناور در آب پرداختند. جهت مدل‌سازی ریاضی توربین از اصل دالامبر کمک گرفته شد. پارامترهای میراگر به کمک الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت تعیین گردید و مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از خروجی فست جهت تعیین میزان تطابق مقایسه شد. سپس روش‌های بهینه سازی پارامترهای میراگر، مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. در سال ۲۰۱۵ کاترینو، یک مدل آزمایشگاهی با مقایسه ۱/۲۰ از توربین بادی ساخت. دو نمونه متفاوت از شتاب توسط میز لرزه به سازه فوق اعمال گردید. یکی از این شتاب‌ها، معرف بادهای کوچک ناگهانی و دیگری به عنوان باد با سرعت بالاست. آن‌ها موفق شدند، با اضافه کردن یک میراگر مغناطیسی بصورت نیمه فعال، تنش خمشی به وجود آمده در پایه سازه و جابجایی نوک سازه را کاهش دهند [۱۷]. زوو و همکاران در سال ۲۰۱۷، به جای استفاده از یک میراگر جرمی تنظیم شده که در ناسل قرار دارد، از چند میراگر جرمی تنظیم شده در مکان‌های مختلف برج توربین استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که برای حالت‌هایی که توربین تحت بارهای ارتعاشی اساسی با فرکانس بالاست، مانند باد، امواج دریا و زلزله بصورت همزمان، بیش از یک میراگر جهت کنترل ارتعاشات توربین مورد نیاز است [۱۸]. در سال ۲۰۱۹ جهانگیری و همکاران، یک توربین بادی پایه ثابت در آب ۵ مگاواتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از یک میراگر جرمی تنظیم شده آونگ سه بعدی بصورتی استفاده کردند که علاوه بر کاهش ارتعاشات توربین بادی ناشی از باد و امواج دریا، بتواند مقداری انرژی الکتریکی نیز تولید کند. در

² Nacelle

¹ FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence)

در شکل ۲ مدل ادامز ایجاد شده به همراه درجات آزادی جلو به عقب^۴ و کنار به کنار^۵ نوک برج توربین بادی نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل ادامز تولید شده پس از اجرای کدهای فست

جدول ۱- مشخصات توربین بادی مورد مطالعه [۲۳]

Rating	5 MW
Rotor Orientation Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple-Stage Gearbox
Rotot, Hub Diameter	۱۲۶ m, ۳ m
Hub height	۹۰ m
Cut-In, Rated, Cut Out Wind Speed	۳ m/s, ۱۱/۴ m/s, ۲۵ m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	۶/۹ rpm, ۱۲/۱ rpm
Rated Tip Speed	۸۰ m/s
Overhang, Shaft Till, Precone	5 m, ۵°, ۲/۵°
Rotor Mass	۱۱۰,۰۰۰ kg
Nacelle Mass	۲۴۰,۰۰۰ kg
Tower Mass	۳۴۷,۴۶۰ kg
Coordinate Location of Overall CM	(-۰/۲ m, ۰/۰ m, ۶۴/۰ m)

^۴ Fore-Aft Displacement

^۵ Side-To-Side

برج بدون از دست دادن دقت می‌تواند جابجایی‌های بزرگی داشته باشند. انعطاف پره‌ها و برج توربین به کمک نمایش مدال خطی تعیین می‌شود. در این روش انحراف و تغییر شکل هر عضو کوچک در نظر گرفته می‌شود و از فنر و دمپ‌های توزیع شده در طول اعضا استفاده می‌شود. اتافک و توپی^۱ به صورت صلب با جرم و اینرسی مشخص در نظر گرفته می‌شوند. یکی از مهمترین خروجی‌های حاصل از اجرای کدهای فست، مدل وابسته به زمان ادامز^۲ است. نرم افزار ادامز نیز به کمک روش‌های حل دینامیک چند جسمی می‌تواند به تحلیل و بررسی توربین بادی بپردازد. بخش‌های منعطف همچون، پره‌ها و برج در این نرم افزار بصورت مجموعه‌ای از اجسام صلب در نظر گرفته می‌شود که بوسیله ماتریس‌های فنر و دمپر خطی با هم در ارتباط هستند. بسیاری از ویژگی‌ها در توربین بادی نیاز به کدهای پیچیده‌ای دارد که معمولاً توسط کدهای فست قابلیت اجرا ندارند و باید از کدهای پیشرفته ادامز جهت عملیاتی کردن آن‌ها استفاده کرد. این ویژگی‌ها شامل مواردی چون، درجات آزادی پیچشی و کششی در پره‌ها و برج توربین، تعیین هندسه اتصالات پره‌ها و برج و دینامیک عملگرها در کنترل پیچش پره‌ها^۳ است.

در این تحقیق، مدل مورد نظر که یک توربین بادی ۵ مگاواتی مستقر در خشکی با مشخصات مندرج در جدول ۱ و جدول ۲ است، با اجرای کدهای فست ساخته شد و روی مدل ادامز حاصل از اجرای کدهای فست ژيروسکوپ قرار گرفت. گشتاور کنترلی و سرعت زاویه‌ای دیسک ژيروسکوپ، به عنوان ورودی‌های سیستم و جابجایی‌های نوک توربین، سرعت‌های خطی نوک توربین، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای ژيروسکوپ، به عنوان خروجی‌های سیستم تعریف شد. عملیات فوق در ادامز سلور و به کمک کدهای فورتن انجام پذیرفت. ورودی‌ها و خروجی‌های فوق در سیمولینک متلب جهت طراحی و اجرای سیستم کنترلی مورد استفاده قرار گرفت.

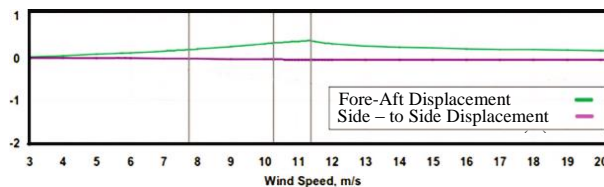
^۱ Hub

^۲ Adams

^۳ Blade Pitch Control

جدول ۲- فرکانس های طبیعی سیستم مورد مطالعه [۲۳]

Mode	Description	FAST	ADAMS
۱	1 st Twer Fore-Aft	۰/۳۲۴۰	۰/۳۱۹۵
۲	1 st Tower Side-to-Side	۰/۳۱۲۰	۰/۳۱۶۴
۳	1 st Drivetrain Torsion	۰/۶۲۰۵	۰/۶۰۹۴
۴	1 st Blade Asymmetric Flapwise Yaw	۰/۶۶۶۴	۰/۶۲۹۶
۵	1 st Blade Asymmetric Flapwise Pitch	۰/۶۶۷۵	۰/۶۶۸۶
۶	1 st Blade Collective Flap	۰/۶۹۹۳	۰/۷۰۱۹
۷	1 st Blade Asymmetric Edgewise Pitch	۱/۰۷۹۳	۱/۰۷۴۰
۸	1 st Blade Asymmetric Edgewise Yaw	۱/۰۸۹۸	۱/۰۸۷۷
۹	2 nd Blade Asymmetric Flapwise Yaw	۱/۹۳۳۷	۱/۶۵۰۷
۱۰	2 nd Blade Asymmetric Flapwise Pitch	۱/۹۲۲۳	۱/۸۵۵۸
۱۱	2 nd Blade Collective Flap	۲/۰۲۰۵	۱/۶۹۰۱
۱۲	2 nd Tower Fore-Aft	۲/۹۰۰۳	۲/۸۵۹۰
۱۳	2 nd Tower Sidto-Side	۲/۹۳۶۱	۲/۹۴۰۸



شکل ۳- پاسخ حالت ماندگار جابجایی نوک برج توربین بادی [۲۳]

می تواند ارتعاشات برج را کاهش دهد، در حالی که در عملکرد توربین خلی ایجاد نکند.

جهت تعیین پایداری سازه فونداسیون توربین بادی از پارامتر محوریت^۱ استفاده می شود که عبارت از فاصله بین نقطه واقعی اعمال بار و نقطه اثر آن در فونداسیون است که طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است [۲۴].

$$e = \frac{M}{V} \quad (1)$$

¹ Eccentricity

پاسخ حالت ماندگار توربین ۵ مگاواتی برای حالتی که باد آرام و بدون هرگونه اغتشاشی است در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج به وسیله کدهای فست تولید شده اند و زمان اجرا در حدی است که کل رفتار گذرای سیستم به اتمام رسیده است. همان گونه که مشاهده می شود، در حدود سرعت ۱۱/۵ متربرثانیه که توربین وارد ناحیه سوم کنترلی می شود، بیشترین جابجایی در جهت جلو-به-عقب بوجود می آید. از آن جا که در این سرعت توربین در حال دریافت حداکثر توان از باد است و کنترل محدودی روی زاویه پیچش پره ها وجود دارد، استفاده از عملگرهای دیگری همچون ژيروسکوپ

$$A_{eff} = 2 \left[R^2 \arccos \left(\frac{e}{R} \right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right] \quad (3)$$

که در آن e محوریت، M ممان در پایه توربین و V بار عمودی اعمال شده به فونداسیون توربین بادی است. جهت پایداری سازه باید مقدار e در محدوده رابطه ۲ قرار بگیرد.

جهت محاسبه ابعاد فونداسیون توربین بادی، محاسبه سطح موثر^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در شکل ۴ مشخص شده است. سطح موثر که با A_{eff} نشان داده می‌شود، عبارت از مساحتی از زمین است که فشار بصورت یکنواخت در آن توزیع می‌شود.

$$b_e = 2(R - e)$$

$$l_e = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b_e}{2R}\right)^2} \quad (4)$$

بنابراین اضلاع مستطیل معادل از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$L_{eff} = \sqrt{A_{eff} \frac{l_e}{b_e}}$$

$$B_{eff} = \frac{L_{eff}}{l_e} b_e \quad (5)$$

در جدول ۳ مشخصات مربوط به سطح موثر و محوریت بیان شده است.

جهت محاسبه ابعاد فونداسیون توربین بادی، محاسبه سطح موثر^۲ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در شکل ۴ مشخص شده است. سطح موثر که با A_{eff} نشان داده می‌شود؛ عبارت از مساحتی از زمین است که فشار بصورت یکنواخت در آن توزیع می‌شود.

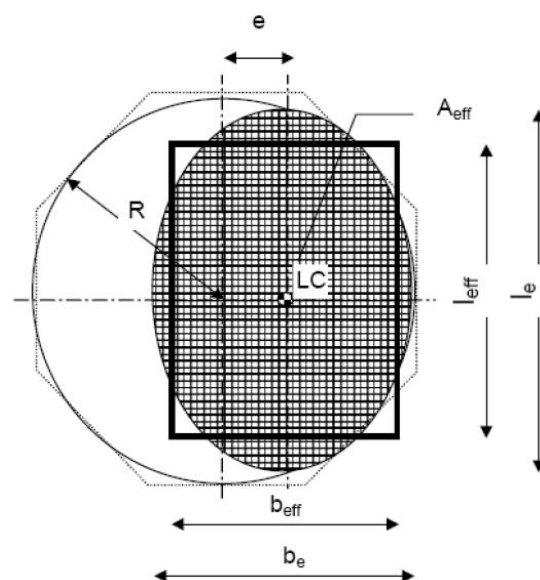
سطح محاسبه ابعاد فونداسیون توربین بادی، محاسبه سطح موثر^۳ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در شکل ۴ مشخص شده است. سطح موثر که با A_{eff} نشان داده می‌شود؛ عبارت از مساحتی از زمین است که فشار بصورت یکنواخت در آن توزیع می‌شود.

سطح موثر برای فونداسیون با سطح دایره‌ای شکل می‌تواند بصورت یک مستطیل بیان شود که اضلاع آن از نقاط مشخصی از بیضی می‌گذرند. سطح موثر از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

جدول ۳- مقادیر مربوط به سطح موثر و محوریت فونداسیون توربین بادی

کمیت	نماد	مقدار عددی (واحد)
ممان پایه توربین	M	$98/400 (KN.m)$
بار عمودی	V	$3477/6 (KN)$
محوریت	e	$28/3 (m)$
شعاع دایره محاطی فونداسیون	R	$63 (m)$
سطح موثر	A_{eff}	$5586 (m^2)$

در این تحقیق سعی شده به کمک ژيروسکوپ ممان اعمالی به پایه توربین کاهش یافته که طبق رابطه ۱ موجب کاهش محوریت خواهد شد. با این کار برای مقدار ثابتی از سطح موثر، می‌توان به سطح کوچکتری از فونداسیون دستیابی پیدا کرد.



شکل ۴- سطح موثر برای فونداسیون دایره‌ای

۲-۲- شبیه سازی ژيروسکوپ

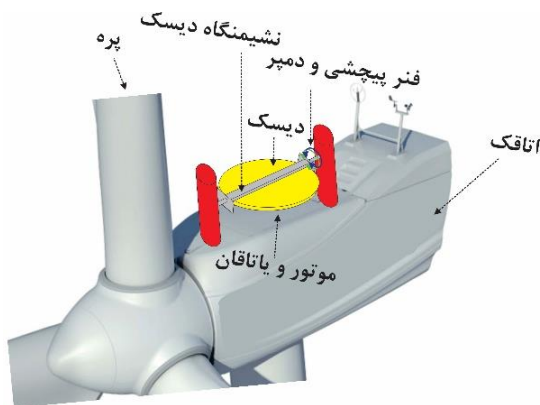
یکی از عملگرهای کاربردی که می‌تواند در کنترل سازه‌ها و تجهیزات مختلف مورد استفاده قرار گیرد، ژيروسکوپ است. مهمترین عضو ژيروسکوپ، یک دیسک دوار مطابق شکل ۵

¹ Effective Area

² Effective Area

جدول ۴- مشخصات فیزیکی ژيروسکوپ

کمیت	نماد	مقدار عددی (واحد)
جرم دیسک	m	$۳/۰۶۳ \times ۱۰^{-۴} (kg)$
شعاع دیسک	r	$۲/۵ (m)$
ضخامت دیسک	d	$۰/۲ (m)$
ممان اینرسی دورانی دیسک	I_p	$۹/۵۷۳ \times ۱۰^{-۴} (kg/m^2)$
ممان اینرسی جرمی دیسک	I_o	$۴/۷۹۶ \times ۱۰^{-۴} (kg/m^2)$
چگالی دیسک	ρ^*	$۷۸۰۱ (kg/m^3)$
ثابت فنریت	k	$۱۰۰ \times ۱۰^{-۳} (N.m/rad)$
ثابت میرایی	c	$۲۹۷ \times ۱۰^{-۳} (N.m.s/rad)$
سرعت زاویه‌ای دیسک	Ω	$۱۰۰ (rad/s)$

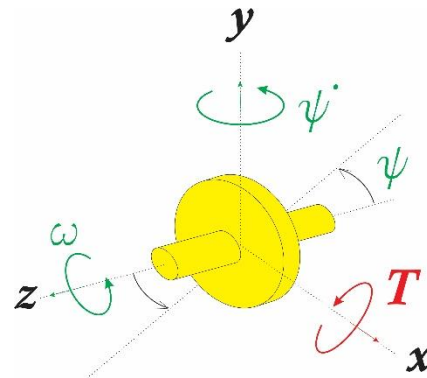


شکل ۶- اجزای تشکیل دهنده ژيروسکوپ و محل قرارگیری آن‌ها بر روی توربین بادی

اگر از اتلاف انرژی حاصل از تماس بین دیسک و هوا صرفنظر شود، بیشترین اتلاف انرژی ژيروسکوپ پس از این که به سرعت ثابت ۱۰۰ رادیان بر ثانیه رسید، در یاتاقان‌ها رخ می‌دهد. در این تحقیق از دو عدد یاتاقان کف گرد دو ردیفه استوانه‌ای^۱ مطابق شکل ۸ با مشخصات مندرج در جدول ۵ استفاده شده است [۲۶، ۲۵].

^۱ Spool Type Double Acting Cylindrical (TTP)

است که با سرعت بالای ω حول محور تقارن خود (محور z) دوران می‌کند. اگر این دیسک دوار تحت تاثیر گشتاور T حول یکی از محورهای عمود بر محور تقارن (محور x) قرار گرفته شود، دیسک در جهت محوری که بر دو محور دیگر عمود است (محور y) با سرعت زاویه‌ای ψ موسوم به سرعت پیشروش دوران خواهد کرد. به این رفتار اثر ژيروسکوپی گفته می‌شود. در این تحقیق، دیسک بصورتی روی ناسل قرار گرفته است که جهت پیشروش در جهت ارتعاشات توربین قرار بگیرد تا بتوان به کمک اثر ژيروسکوپی بر ارتعاشات حاصل از باد غلبه کرد.



شکل ۵- دیسک متقارن دوار حول محور تقارن

در این تحقیق، ژيروسکوپ بصورت یک دیسک دوار از جنس استیل با مشخصات مندرج در جدول ۴ در نظر گرفته شده است. ژيروسکوپ بصورت شکل ۶ روی اتاقک توربین بادی ثابت شده است. جهت کنترل ژيروسکوپ به شکل غیر فعال، ثابت فنر بصورتی است که فرکانس طبیعی ژيروسکوپ با فرکانس طبیعی اول در جهت جلو به عقب توربین بادی برابر گردد.

یکی از چالش‌های موجود در این تحقیق، سرعت دادن به دیسکی است که دارای ممان اینرسی بالایی است. جهت رسیدن به این هدف پیشنهاد می‌شود، ابتدا کل تولیدی توسط توربین به کمک مکانیزیم شکل ۷ در اختیاری ژيروسکوپ قرار داده شود و هنگامی که ژيروسکوپ به سرعت مشخص رسید، توان مورد نیاز جهت حفظ سرعت به کمک یک موتور در اختیار آن قرار گیرد که حداقل توانی برابر با توان اتلافی اجزای ژيروسکوپ دارد.

جدول ۵- مشخصات یاتاقان مورد استفاده در زیروسکوپ [۲۷]

مشخصات	مقدار عددی (واحد)
قطر داخلی (B)	۱۰۱/۶۰۰ (mm)
قطر خارجی (D)	۲۰۳/۲۰۰ (mm)
قطر شانه شفت (S)	۱۳۳/۳۵۰ (mm)
قطر شانه پوسته (T)	۱۵۵/۵۸۰ (mm)
ارتفاع (H)	۱۰۱/۶۰۰ (mm)
شعاع گرد شدگی (R)	۱/۵۰۰ (mm)
جرم کل (M)	۱۶ (kg)
ظرفیت دینامیکی (C)	۳۲۰۰۰۰۰ (N)
ظرفیت استاتیکی (C ₀)	۱۰۰۵۰۰۰۰۰ (N)

$$\Omega_{limit} = \frac{\text{ضریب محدودیت سرعت}^1}{d_m} \quad (۸)$$

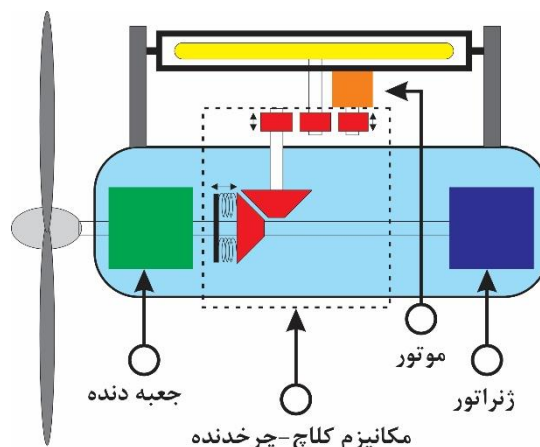
ضریب محدودیت سرعت در این نوع یاتاقان برابر با حدوداً برابر با $۱۵۱/۲ \text{ rad/s}$ بدست می‌آید که حدود ۶۶ درصد بیشتر از سرعت دیسک مورد مطالعه در این تحقیق است.

با جای‌گذاری مقادیر در رابطه ۶ حداقل مقدار توان اتلافی در زیروسکوپ حدوداً برابر $۲/۴$ کیلووات بدست می‌آید؛ بنابراین پس از اینکه دیسک به سرعت ثابت رسید، نیاز به موتور با توان حداقل $۲/۴$ کیلووات است که بتواند دیسک را در این سرعت نگه دارد.

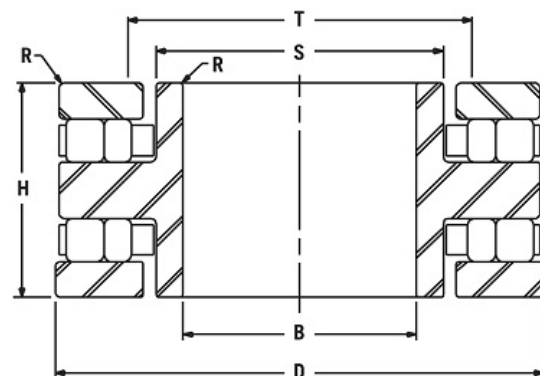
مدت زمانی که طول می‌کشد دیسک زیروسکوپ توسط مکانیزم شکل ۱ به سرعت ثابت ۱۰۰ rad/s برسد، از رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$t = \frac{I_p \times \Omega^2}{P_{net}} \quad (۹)$$

¹ Speed Limit Factor



شکل ۷- مکانیزم چرخاندن دیسک زیروسکوپ جهت رسیدن به سرعت ثابت



شکل ۸- نمایی از یاتاقان کف گرد مورد استفاده در زیروسکوپ [۲۷]

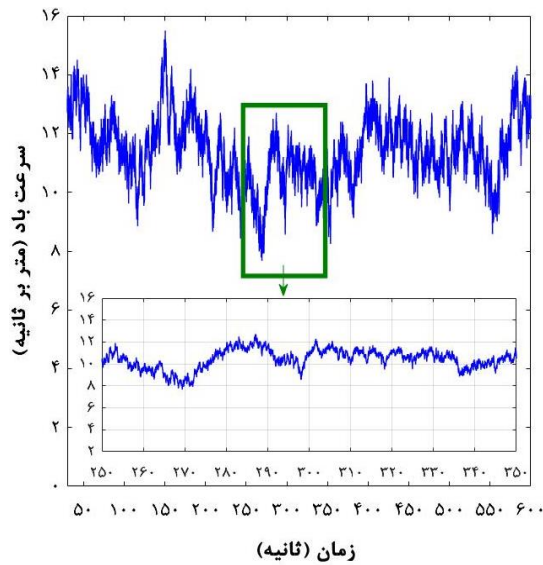
مقدار توان اتلافی $P_{friction}$ توسط یاتاقان‌ها از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$P_{friction} = \frac{F \times \mu \times d_m}{2} \times \Omega \quad (۶)$$

که در آن F بار معادل محوری وارده به یاتاقان، μ ضریب اصطکاک و d_m قطر گام است. ضریب اصطکاک در این نوع یاتاقان، برابر با $۰/۰۰۵$ است [۲۷] و قطر گام از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$d_m = \frac{(B + D)}{2} \quad (۷)$$

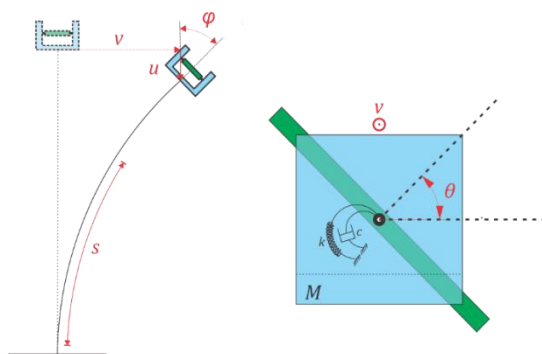
حد سرعتی که یاتاقان می‌تواند تحمل کند، Ω_{limit} از رابطه (۸) بدست می‌آید.



شکل ۱۰- باد اعمالی بر توربین بادی مورد مطالعه در سه جهت

۳- مدلسازی ریاضی سیستم

با توجه به پیچیدگی مدل توربین بادی، جهت ساده سازی سیستم، توربین بادی بصورت تیر یک سر گیردار منعطف به طول L در نظر گرفته شده که جرم متمرکز M به انتهای سر آزاد آن متصل شده است. تیر مورد نظر اویلر-برنولی با نسبت ضخامت به طول کوچک فرض شده است. چگالی تیر ρ ، سطح مقطع A ، مدول یانگ E و ممان اینرسی سطح برابر I در نظر گرفته شده است. ژيروسکوپ روی جرم متمرکز متصل شده است. شکل ۱۱ به نمایش مدل مورد نظر پرداخته است. در این تحقیق، معادلات تیر به کمک روش اویلر-لاگرانژ معرفی گردیده است [۲۹].

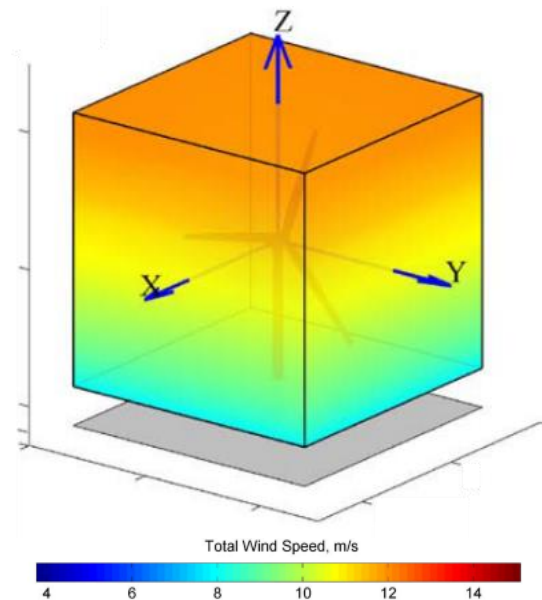


شکل ۱۱- مدل تیر یک سر گیردار به همراه ژيروسکوپ متصل به جرم متمرکز

که در آن P_{net} توان خالصی است که ژيروسکوپ دریافت می کند. از رابطه بالا این زمان کمتر از ۲۰۰ ثانیه بدست می آید و در این مدت کل توان تولیدی توربین صرف چرخاندن دیسک ژيروسکوپ می شود و پس از آن ژيروسکوپ توان لازم را از موتور دریافت خواهد کرد.

۳-۲- شبیه سازی باد

جهت اعمال باد به توربین و بررسی رفتار آن از شبیه ساز تصادفی بادهای متلاطم توربسیم^۱ استفاده شده است. کدهای فوق از مدل تصادفی بجای کدهای مبتنی بر مدل فیزیکی جهت شبیه سازی عددی وابسته به زمان در سه جهت مختصات استفاده می کند [۲۸]. شکل ۹ باد وارده به توربین در سه جهت را نشان می دهد. میانگین سرعت باد در جهت جلو-به-عقب، ۱۱/۵ متر بر ثانیه به همراه برش در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ باد اعمالی به توربین مورد مطالعه نشان داده شده است. خروجی این شبیه ساز باد به مدل آدامز مورد مطالعه اعمال شده و اثر ژيروسکوپ بر توربین بادی تحت تاثیر آن مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۹- باد شبیه سازی شده توسط کدهای توربسیم [۲۸]

^۱ Turbsim

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \rho A G_3 + (m + M) G_4^2 + I_t G_5^4, \\ \alpha_3 &= \frac{1}{4} I_t G_5^6, \\ \alpha_4 &= E I G_6 - \rho A g G_9 - (m + M) g G_4, \\ \alpha_5 &= 2 E I G_7, \alpha_6 = \frac{3}{4} E I G_8 \end{aligned} \quad (15)$$

ویهای تیر و Ω سرعت زاویه‌ای دیسک است. ضرایب G و α با روابط زیر مباحثات مشخصات تیر در رابطه ۱۴ مقادیر ثابت معادله حرکت سیستم، بصورت جدول ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶- مقادیر ثابت معادله حرکت سیستم بر حسب واحد متریک

G_1	G_2	G_3
۱۹/۸۶۴	۳۱/۸۳۲	0.315×10^{-2}
G_4	G_5	G_6
0.141×10^{-1}	0.179×10^{-1}	$4/528 \times 10^{-6}$
G_7	G_8	G_9
$3/640 \times 10^{-10}$	$5/852 \times 10^{-14}$	0.367

اتلاف انرژی سیستم، بصورت تابع D نشان داده شده است.

$$D = \frac{1}{2} c^* \dot{v}^2 + \frac{1}{2} c \dot{\theta}^2 \quad (16)$$

در رابطه فوق c^* ضریب میرایی تیر و c ضریب میرایی زیروسکوپ در نظر گرفته شده است. معادلات لاگرانژ بصورت زیر است که در آن f اغتشاش و $T_{Control}$ گشتاور کنترلی اعمالی به زیروسکوپ جهت کنترل ارتعاشات تیر است.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}} \right) - \frac{\partial T}{\partial v} + \frac{\partial D}{\partial \dot{v}} + \frac{\partial V}{\partial v} = f \quad (17-الف)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = T_{Control} \quad (17-ب)$$

بنابراین معادله حرکت سیستم بصورت زیر نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} & \{ \alpha_1 + \alpha_2 v^2 + \alpha_3 v^4 + (G_5 + \frac{1}{2} G_5^3 v^2)^2 [I_o(\cos\theta)^2 + I_p(\sin\theta)^2] \} \ddot{v} \\ & + \{ \alpha_2 + 2\alpha_3 v^2 + G_5^3 (G_5 + \frac{1}{2} G_5^3 v^2) [I_o(\cos\theta)^2 + I_p(\sin\theta)^2] \} v \dot{v}^2 + [\alpha_4 + \alpha_5 v^2 + \alpha_6 v^4] v - c^* \dot{v} \\ & + (G_5 + \frac{1}{2} G_5^3 v^2) \{ (I_p - I_o) \dot{v} (G_5 + \frac{1}{2} G_5^3 v^2) \dot{\theta} \sin 2\theta + I_p \Omega \dot{\theta} \cos \theta \} = 0 \end{aligned} \quad (الف-18)$$

تابع شکل مود $\psi(s)$ ، با رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$\psi(s) = (1 - \cos((2n - 1) \frac{\pi s}{2l})) \quad (11)$$

که در آن n شماره مد، s طول دلخواه از تیر به طول l است. نشان داده می‌شود، انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم مطابق روابط (۱۲-۱۳) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \rho A [G_1 \dot{v}^2 + G_3 (v \dot{v})^2] \\ &+ \frac{1}{2} M [\dot{v}^2 + G_4^2 (v \dot{v})^2] + \frac{1}{2} I_t [G_5 \dot{v} + \frac{1}{2} G_5^3 \dot{v} v^2]^2 \\ &+ \frac{1}{2} m [\dot{v}^2 + G_4 (v \dot{v})^2] + \frac{1}{2} I_o [\dot{\theta}^2 + (\dot{\phi} \cos \theta)^2] \\ &+ \frac{1}{2} I_p (\Omega + \dot{\phi} \sin \theta)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

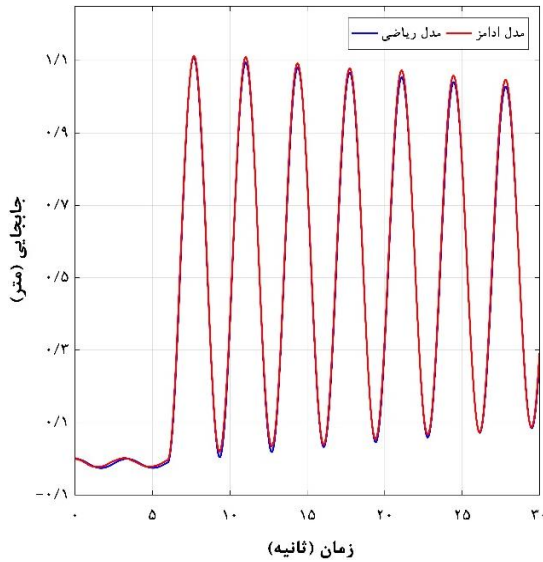
$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} E I [G_6 v^2 + G_7 v^4 + \frac{1}{2} G_8 v^6] - \frac{1}{2} G_9 \rho A g \\ &- \frac{1}{2} G_4 M g v^2 + \frac{1}{2} k \theta^2 - c G_4 m g v^2 \end{aligned} \quad (13)$$

در روابط فوق v و \dot{v} به ترتیب جابجایی و سرعت خطی هر نقطه دلخواه از تیر، θ و $\dot{\theta}$ به ترتیب جابجایی زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای زیروسکوپ (مطابق شکل ۵)، ϕ جابجایی زا مشخص شده $\int_0^l (\psi'(s))^2 ds$ است.

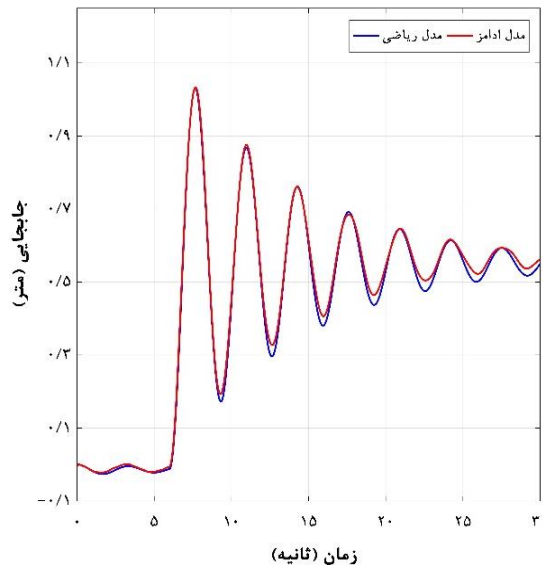
$$\begin{aligned} G_1 &= \int_0^l (\psi(s))^2 ds, G_2 = \int_0^l \psi(s) ds \\ G_3 &= \int_0^l \left(\int_0^s (\psi'(\Gamma))^2 d\Gamma \right)^2 ds, \\ G_4 &= \int_0^l (\psi'(s))^2 ds \\ G_5 &= \psi'(l), G_6 = \int_0^l (\psi''(s))^2 ds, \\ G_7 &= \int_0^l (\psi'(s) \psi''(s))^2 ds, \\ G_8 &= \int_0^l (s)^4 \psi''(s)^2 ds \\ G_9 &= \int_0^l \left(\int_0^s (\psi'(\Gamma))^2 d\Gamma \right) ds \psi'(s) \quad (14) \\ \alpha_1 &= \rho A G_1 + m + M + I_t G_5^2, \end{aligned}$$

$$\ddot{\theta} - \frac{1}{2}(I_p - I_o)(G_5 \dot{v} + \frac{1}{2}G_5^3 v^2 \dot{v})^2 \sin 2\theta - I_p \Omega (G_5 \dot{v} + \frac{1}{2}G_5^3 v^2 \dot{v}) \cos \theta + c\dot{\theta} + k\theta = T_{Control} \quad (18-b)$$

باشند. رابطه (۲۰) نمایشی از سیستم فضای حالت با معادلات غیرخطی است.



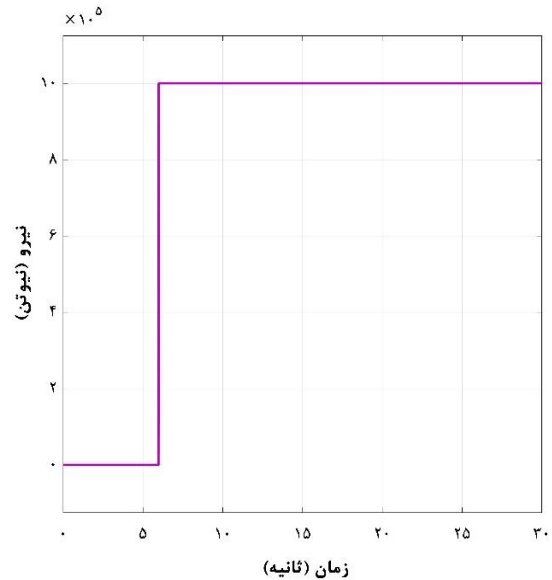
شکل ۱۳- مقایسه مدل آدامز و مدل ریاضی در حالت ژيروسکوپ خاموش



شکل ۱۴- مقایسه مدل آدامز و مدل ریاضی در حالت چرخش دیسک ژيروسکوپ با سرعت زاویه‌ای ثابت ۱۰۰ رادیان بر ثانیه

اگر $x_1 = v$, $x_2 = \dot{\theta}$, $x_3 = \theta$ و $x_4 = \theta$ حالت‌های سیستم در نظر گرفته شوند، معادلات سیستم در فضای حالت به شکل رابطه (۱۹) بازنویسی می‌شوند.

جهت مقایسه معادلات فوق با مدل آدامز، توربین تحت تاثیر یک نیروی ۱ مگا نیوتونی بصورت شکل ۱۲ به انتهای برج توربین اعمال شد. شکل ۱۳ ارتعاش نوک توربین در حالتی نشان می‌دهد که ژيروسکوپ خاموش است. در شکل ۱۴ دیسک ژيروسکوپ با سرعت زاویه‌ای ثابت ۱۰۰ رادیان بر ثانیه در حال چرخش است.



شکل ۱۲- ورودی پله به نوک برج

۴- طراحی کنترل کننده

در این تحقیق از کنترل کننده خطی PID جهت کنترل ارتعاش توربین بادی استفاده شده است. در معادلات حرکت سیستم بدست آمده، عوامل غیرخطی متعددی وجود دارد. در این تحقیق از بسط سری تیلور جهت خطی سازی معادلات حول نقطه کار یا همان نقطه تعادل سیستم استفاده شده است. از آنجایی که در این روش از جملات مرتبه بالا صرف نظر می‌شود، این جملات باید به اندازه کافی کوچک

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\{\alpha_2 + 2\alpha_3 x_1^2 + G_5^3(G_5 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2)[I_o(\cos x_3)^2 + I_p(\sin x_3)^2]\}x_1 x_2^2 \\ &\quad - [\alpha_4 + \alpha_5 x_1^2 + \alpha_6 x_1^4]v - c^* x_2 - (G_5 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2)\{(I_p - I_o)x_2(G_5 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2)\theta \sin 2x_3 \\ &\quad + I_p \Omega \dot{\theta} \cos x_3\} / \{\alpha_1 + \alpha_2 x_1^2 + \alpha_3 x_1^4 + (G_5 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2)^2 [I_o(\cos x_3)^2 + I_p(\sin x_3)^2]\} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \{-\frac{1}{2}(I_p - I_o)(G_5 x_2 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2 x_2)^2 \sin 2x_3 - I_p \Omega (G_5 x_2 + \frac{1}{2}G_5^3 x_1^2 x_2) \cos x_3 + c x_4 \\ &\quad + k x_3 + T_{Control}\} / I_o \end{aligned} \quad (۱۹)$$

$$B = \left[\frac{\partial F}{\partial u} \right]_{x^*, u^*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \end{bmatrix}$$

$$C = \left[\frac{\partial h}{\partial X} \right]_{x^*, u^*} = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \cdots \frac{\partial h}{\partial x_n}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \right]$$

$$D = \left[\frac{\partial h}{\partial u} \right]_{x^*, u^*} \quad (۲۴)$$

اگر حالت‌های سیستم بصورت $x_4 = \dot{\theta}$, $x_3 = \theta$, $x_2 = v$ و نقطه تعادل سیستم $X^* = [0, 0, 0, 0]^T$ با ورودی $u^* = 0$ در نظر گرفته شود، با اعمال ماتریس‌های ژاکوبی بر معادلات حرکت حاکم بر سیستم، ماتریس‌های حالت به شکل (۲۵) در می‌آیند.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha_4}{G_5^2 I_o + \alpha_1} & \frac{c^*}{G_5^2 I_o + \alpha_1} & 0 & -\frac{G_5 I_p \Omega}{G_5^2 I_o + \alpha_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{G_5 I_p \Omega}{I_o} & -\frac{k}{I_o} & \frac{c}{I_o} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{G_5^2 I_o + \alpha_1} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = 0 \quad (۲۵)$$

جهت مقایسه مدل خطی و غیرخطی، از ورودی سینوسی $200 \times 10^3 \sin(2t)$ استفاده شده است که دارای فرکانسی برابر با فرکانس سازه توربین دارد. شکل ۱۵ میزان اختلاف بین مدل خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n, u) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, \dots, x_n, u) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n, u) \\ y &= h(x_1, \dots, x_n, u) \end{aligned} \quad (۲۰)$$

که در آن بردار حالت سیستم، $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ورودی کنترلی و y خروجی سیستم است. نمایش ماتریسی رابطه (۱۸) بصورت رابطه (۲۱) است.

$$F(X, u) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n, u) \\ f_2(x_1, \dots, x_n, u) \\ \vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n, u) \end{bmatrix} \quad (۲۱)$$

بنابراین می‌توان نشان داد:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= F(X, u) \\ y &= h(X, u) \end{aligned} \quad (۲۲)$$

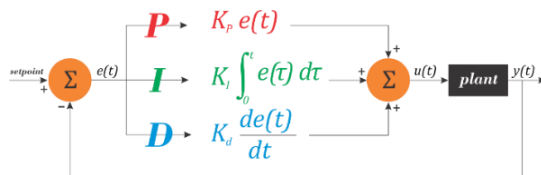
فرم استاندارد فضای حالت در حالت خطی به شکل (۲۳) است.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX + Du \end{aligned} \quad (۲۳)$$

اگر نقطه تعادل سیستم $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ با ورودی u^* در نظر گرفته شود، ماتریس‌های حالت A , B , C و D به کمک ماتریس‌های ژاکوبی مطابق زیر بدست می‌آیند.

$$A = \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]_{x^*, u^*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \cdots \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \cdots \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(x_1^*, \dots, x_n^*, u^*) \end{bmatrix}$$

آنقدر افزایش پیدا می‌کند که خروجی حلقه رفتار نوسانی پیدا کند [۳۰]. به این مقدار بهره نهایی K_{iu} و به دوره تناوب نوسان آن T_{iu} گفته می‌شود. پس از تعیین مقادیر فوق، طبق جدول ۷ بهره‌های کنترل کننده بدست می‌آیند. مقدار بهره نهایی، دوره تناوب نوسان و ضرایب کنترل کننده PID این تحقیق در جدول ۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- نمودار بلوکی کنترل کننده PID

جدول ۴- تعیین ضرایب کنترل کننده PID به روش زیگلر - نیکولز [۳۰]

Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.50K_u$	-	-
I	$0.45K_u$	$\frac{0.54K_u}{T_u}$	-
D	$0.60K_u$	$\frac{1.20K_u}{T_u}$	$\frac{3K_u T_u}{40}$

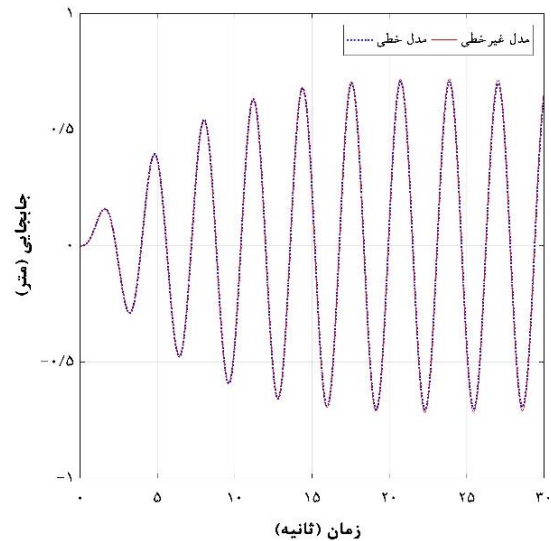
جدول ۵- ضرایب کنترل کننده PID سیستم

K_u	T_u	K_p	K_i	K_d
۱۲۸۸۹۹۵	۳/۲	۷۷۳۳۹۷	۵۸۰۰۴۷/۷۵	۲۰۱۰۷۵

۵- نتایج

با توجه به معادلات مذکور و محاسبه پارامترهای کنترلی، کنترل کننده فوق روی مدل ادامه حاصل از اجرای کدهای فست اعمال گردیده است. شکل ۱۷ ژيروسکوپ بصورت غیرفعال روی توربین بادی قرار گرفته است. در شکل ۱۸ ژيروسکوپ بصورت فعال به کنترل ارتعاش سازه توربین پرداخته است. شکل ۱۹ به مقایسه کنترل ارتعاش سازه توربین در حالت غیرفعال و فعال ژيروسکوپ پرداخته است.

شکل ۲۰ به مقایسه جابجایی نوک توربین در هر سه حالت ذکر شده پرداخته است.



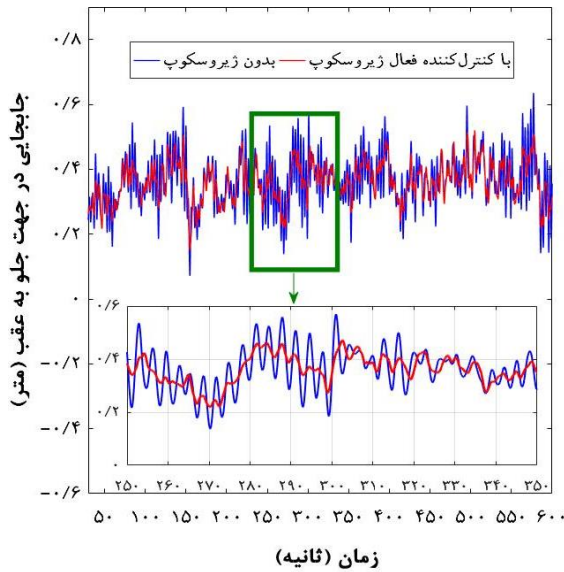
شکل ۱۵- مقایسه معادلات خطی و غیرخطی تحت ورودی با فرکانس تشدید

پس از خطی ساز معادلات حرکت، می‌توان به طراحی کنترل کننده‌های خطی پرداخت. در این تحقیق از کنترل کننده PID جهت تولید کشتاور به عنوان ورودی کنترلی به ژيروسکوپ و کنترل ارتعاش توربین بادی استفاده شده است. کنترل کننده PID از سه بخش مجزای تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر تشکیل شده است. هر کدام از این سه بخش، بصورت مجزا سیگنال خطا را دریافت کرده و با توجه به ویژگی‌هایی که دارند، خروجی مخصوص به خود را می‌دهند. در نهایت این خروجی‌ها با هم جمع شده و به عنوان سیگنال کنترلی به سیستم اعمال می‌شود. شکل استاندارد این نوع کنترل کننده در رابطه ۲۶ ارائه شده است. تابع تبدیل کنترل کننده با رابطه ۲۷ بیان می‌شود. در شکل ۱۶ نمایی از نحوه عملکرد این نوع کنترل کننده نشان داده شده است.

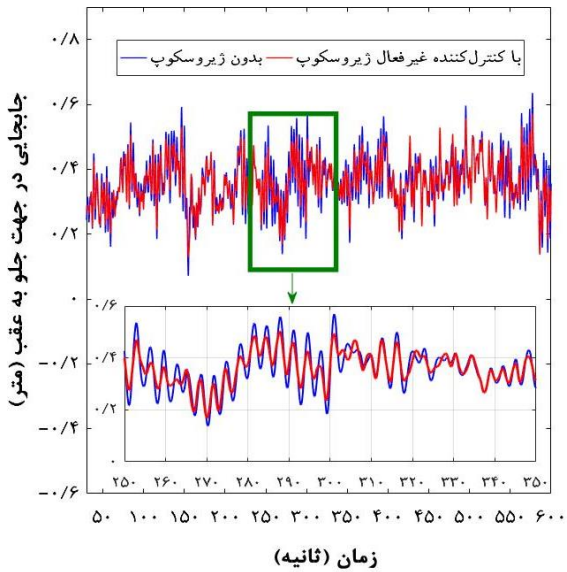
$$Output = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt}] \quad (26)$$

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (27)$$

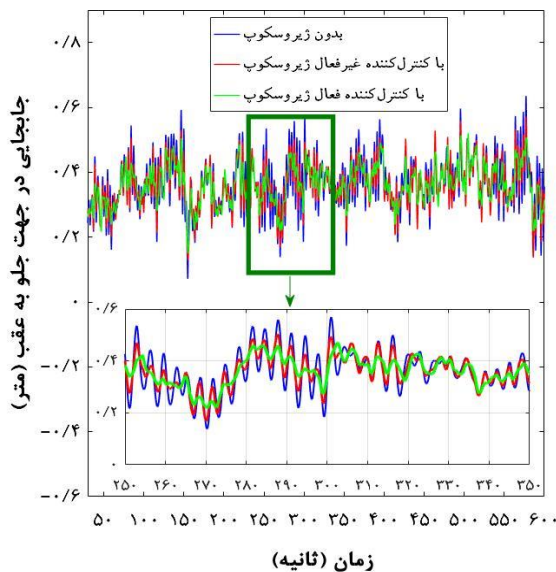
روش‌های متنوعی جهت تنظیم ضرایب کنترل کننده PID وجود دارد. یکی از این روش‌ها، تعیین ضرایب به شیوه زیگلر-نیکولز است. بدین منظور، ابتدا کلیه ضرایب بجز ضریب تناسبی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. این بهره



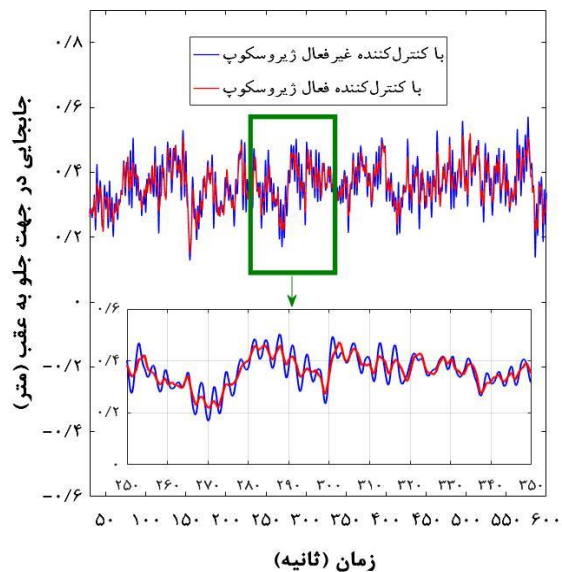
شکل ۱۸- مقایسه جابجایی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ



شکل ۱۷- مقایسه جابجایی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده غیرفعال ژيروسکوپ



شکل ۲۰- مقایسه جابجایی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده، با کنترل کننده غیر فعال ژيروسکوپ و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ



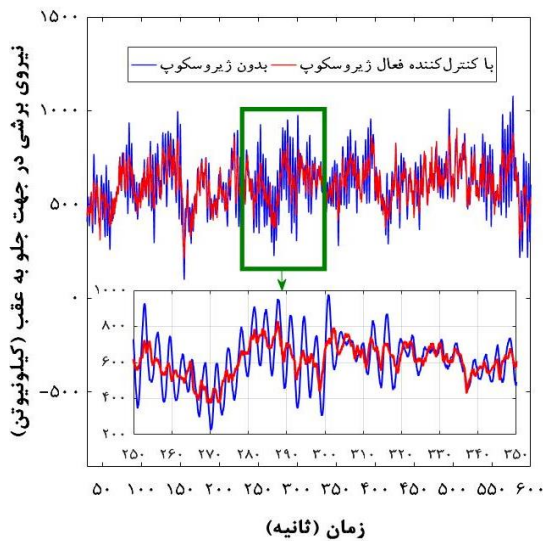
شکل ۱۹- مقایسه عملکرد ژيروسکوپ در کنترل جابجایی در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال

شده است. شکل ۲۱ به نمایش این شاخص جهت مقایسه جابجایی در جهت جلو به عقب پرداخته است. شکل ۲۲ اثر ژيروسکوپ در حالت غیرفعال روی نیروی برشی بوجود آمده بر پایه توربین بادی نشان داده شده است. در شکل ۲۳ ژيروسکوپ بصورت فعال روی توربین قرار گرفته

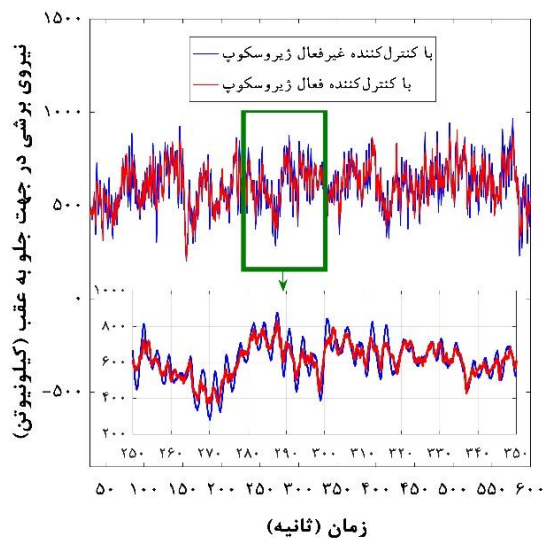
جهت بررسی دقیق تر اثر ژيروسکوپ بر ارتعاش توربین بادی از شاخص جذر متوسط مربع^۱ یا مقدار موثر استفاده

^۱ Root Mean Square

شکل ۲۷ اثر ژيروسکوپ در حالت غیرفعال روی ممان برشی بوجود آمده بر پایه توربین بادی نشان داده شده است. در شکل ۲۸ ژيروسکوپ بصورت فعال روی توربین قرار گرفته است. شکل ۲۹ به مقایسه ممان پایه توربین در حالت غیرفعال و فعال ژيروسکوپ پرداخته است. شکل ۳۰ به مقایسه جابجایی نوک توربین در هر سه حالت ذکر شده پرداخته است.



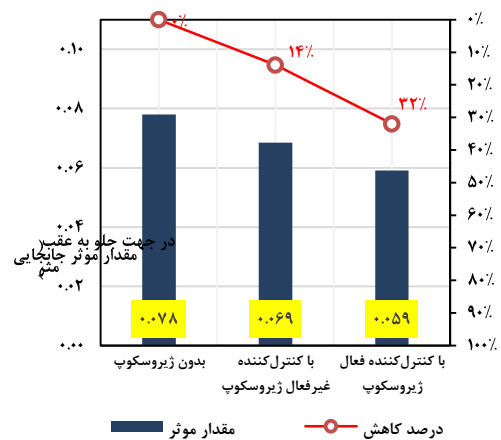
شکل ۲۳- مقایسه نیروی برشی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ



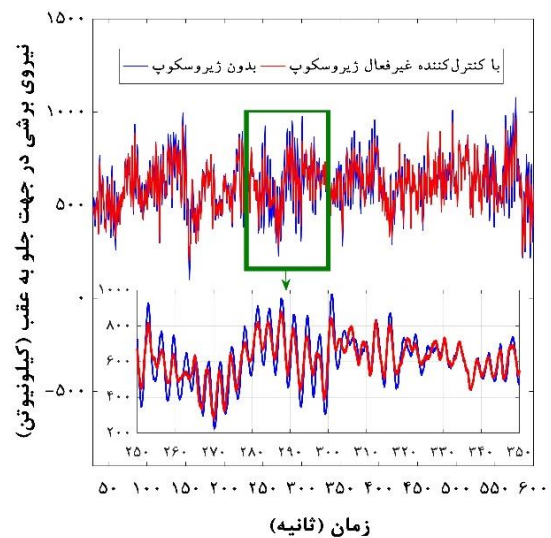
شکل ۲۴- مقایسه عملکرد ژيروسکوپ در کنترل نیروی برشی در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال

است. شکل ۲۴ به مقایسه نیروی برشی در حالت غیرفعال و فعال ژيروسکوپ پرداخته است.

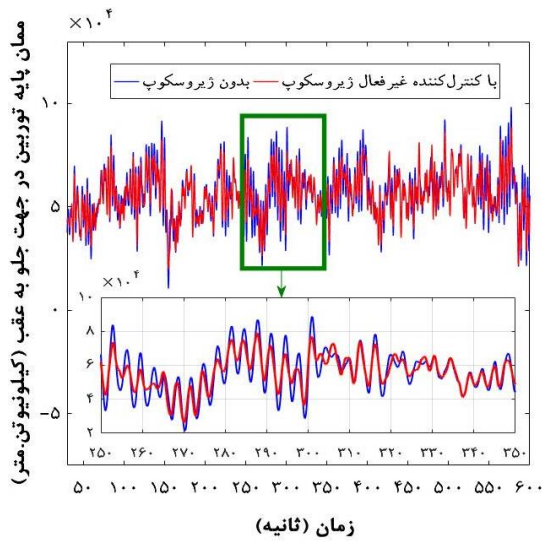
شکل ۲۵ به مقایسه نیروی برشی در جهت جلو به عقب توربین در هر سه حالت ذکر شده پرداخته است. جهت بررسی دقیق تر اثر ژيروسکوپ بر نیروی برشی بوجود آمده در فونداسیون توربین بادی از شاخص جذر متوسط مربع یا مقدار موثر استفاده شده است. شکل ۲۶ به نمایش این شاخص جهت مقایسه نیروی برشی در جهت جلو به عقب پرداخته است.



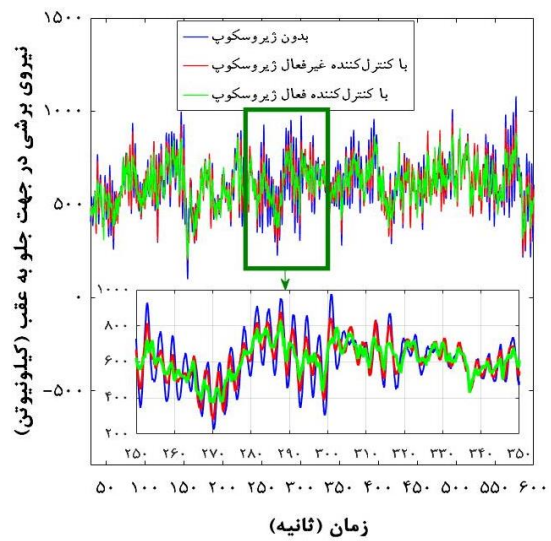
شکل ۲۱- مقایسه اثر ژيروسکوپ بر روی مقدار موثر جابجایی در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال



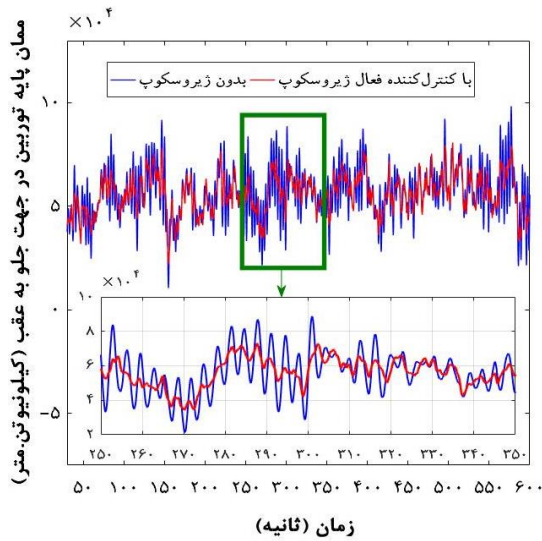
شکل ۲۲- مقایسه نیروی برشی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده غیرفعال ژيروسکوپ



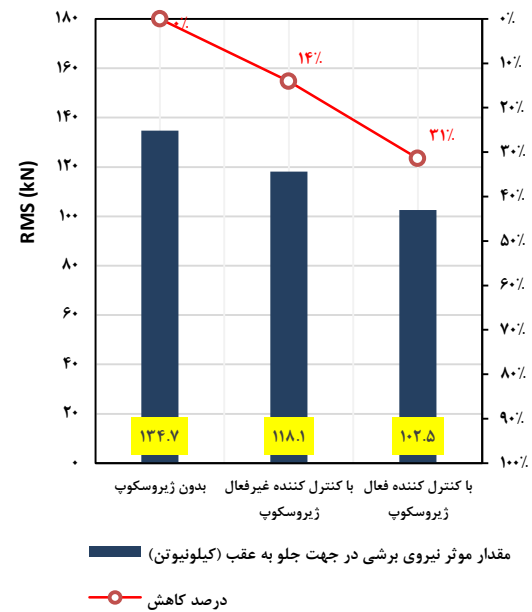
شکل ۲۷- مقایسه ممان پایه توربین در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده غیرفعال ژيروسکوپ



شکل ۲۵- مقایسه نیروی برشی در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده، با کنترل کننده غیرفعال ژيروسکوپ و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ



شکل ۲۸- مقایسه ممان پایه توربین در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ



شکل ۲۶- مقایسه اثر ژيروسکوپ بر روی مقدار موثر نیروی برشی در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال

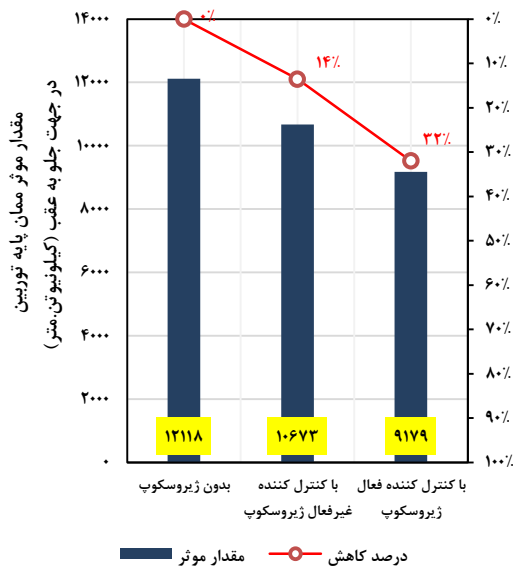
به ازای مقدار مساوی مساحت موثر نیز از ۶۳ متر به حدود ۵۸ متر کاهش یافت؛ در نتیجه حدود ۱۵ درصد مساحت فونداسیون کاهش می‌یابد.

هزینه نصب یک توربین بادی در سال ۲۰۱۹ بطور میانگین به ازای هر کیلووات برابر ۱۴۷۳ دلار بوده است [۳۱]. با توجه به اینکه حدود ۱۶ درصد از هزینه کل یک توربین مربوط به فونداسیون آن است؛ بنابراین می‌توان نتیجه

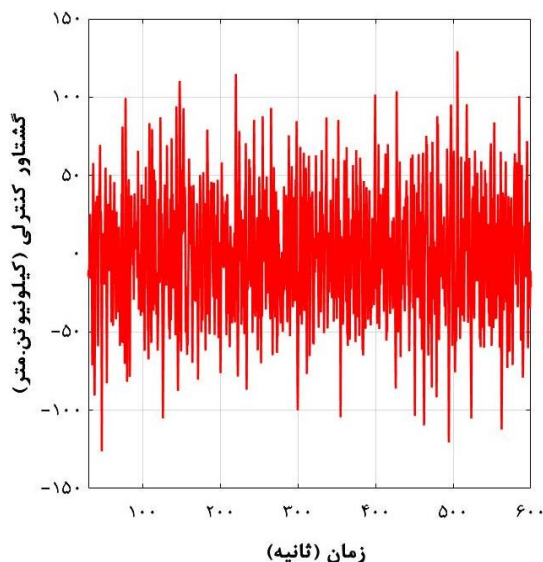
در شکل ۳۱ به مقایسه مقدار موثر ممان پایه توربین پرداخته است.

در حالت فعال با کاهش ممان پایه توربین، محوریت حدود ۵ متر کاهش یافت و شعاع دایره محاطی فونداسیون

در شکل ۳۲ گشتار کنترلی مورد نیاز جهت کنترل فعال و در شکل ۳۳ توان مورد نیاز جهت تولید گشتاور کنترلی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳۴ مقدار موثر توان تولیدی توربین در حالت‌های بدون ژيروسکوپ و با ژيروسکوپ فعال آورده شده است که بهبود تقریبی ۰/۲ درصدی توان تولیدی را نشان داده است.

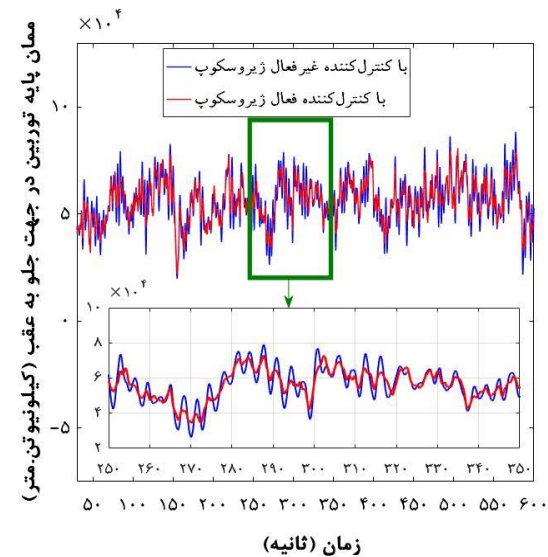


شکل ۳۱- مقایسه اثر ژيروسکوپ روی مقدار موثر ممان پایه توربین در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال

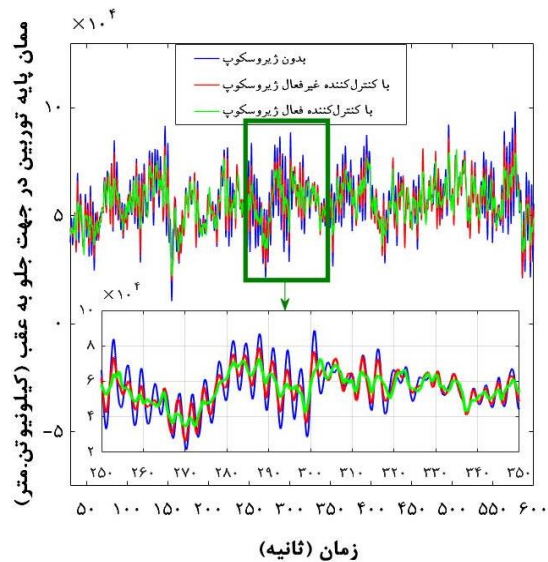


شکل ۳۲- ورودی کنترلی اعمالی به عملگر ژيروسکوپ

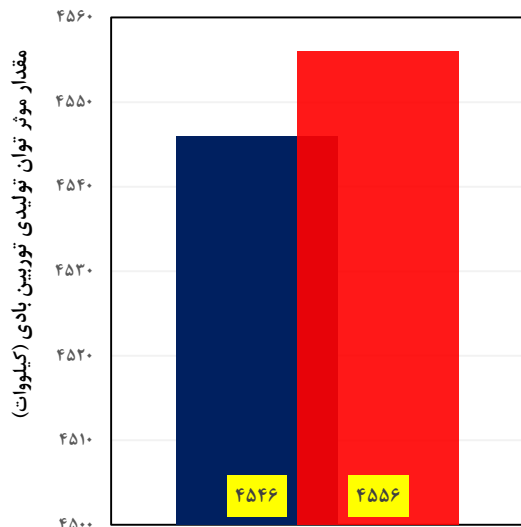
گرفت که به ازای هر کیلووات حدود ۲۳۶ دلار صرف فونداسیون توربین بادی می‌شود که با کمک کنترل فعال ژيروسکوپ این عدد به حدود ۲۰۰ دلار در هر کیلووات می‌رسد.



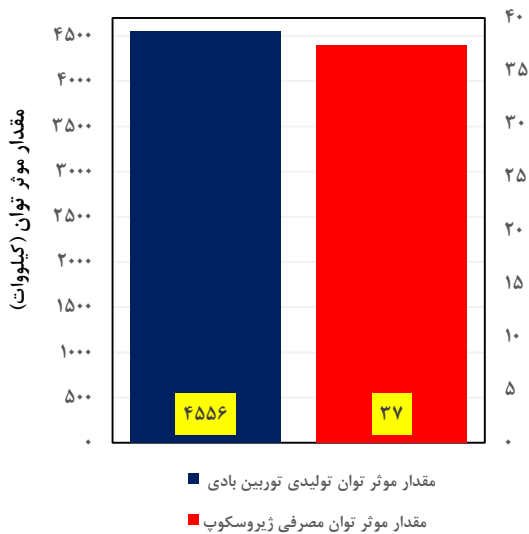
شکل ۲۹- مقایسه عملکرد ژيروسکوپ در کنترل ممان پایه توربین در جهت جلو به عقب در حالت فعال و غیرفعال



شکل ۳۰- مقایسه ممان پایه توربین در جهت جلو به عقب بدون کنترل کننده، با کنترل کننده غیرفعال ژيروسکوپ و با کنترل کننده فعال ژيروسکوپ

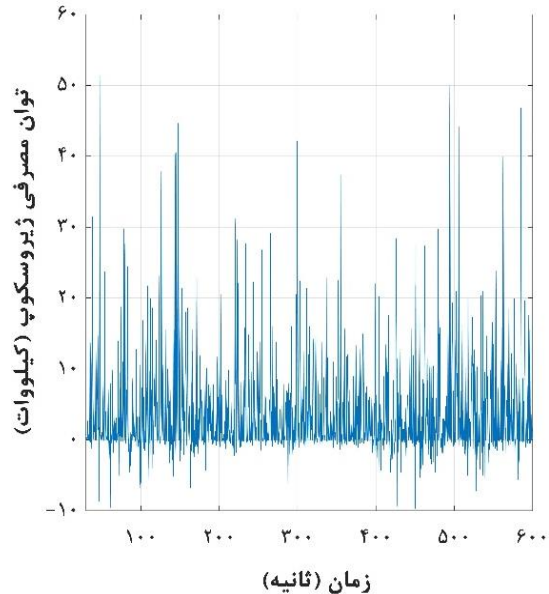


شکل ۳۴- مقایسه مقدار موثر توان تولیدی توربین بادی در حالت بدون ژيروسکوپ و با وجود ژيروسکوپ



شکل ۳۵- مقایسه مقدار موثر توان تولیدی توربین بادی و توان مصرفی ژيروسکوپ

کرد. با توجه به تنوع بالای توربین‌های تعریف شده در فست از جمله توربین‌های بادی با پایه شناور، می‌توان از روش‌های کنترلی مطرح شده در این تحقیق برای توربین‌ها فوق نیز استفاده کرد.



شکل ۳۳- توان مورد نیاز جهت تولید گشتاور کنترلی

مقدار موثر توان مصرفی ژيروسکوپ در حدود ۰/۸ درصد توان تولیدی توربین بادی است که در شکل ۳۵ نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اولین بار از عملگر ژيروسکوپ جهت کنترل ارتعاش سازه توربین و کاهش نیروی برشی و گشتاور خمشی پایه توربین بادی استفاده شد. جهت بررسی دقیق‌تر روی یک مدل با اعتبار بالا، از کدهای فست استفاده شد. به کمک کدهای فوق مدل ادامه توربین بادی ۵ مگاواتی محور افقی در جهت باد با پایه مستقر در خشکی شامل سه پره شبیه‌سازی گردید، جهت تحریک توربین به کمک نرم افزار توربسیم، باد با میانگین سرعت ۱۱/۵ متربرثانیه مدل گردید. ژيروسکوپ به دو حالت کلی روی ناسل توربین نصب گردید. حالت اول ژيروسکوپ بدون کنترل کننده و حالت دوم ژيروسکوپ با کنترل کننده فعال. در هر دو حالت نشان داده شد که عملگر فوق توانایی لازم جهت کنترل اهداف ذکر شده را دارا است. به کمک کنترل فعال ارتعاشات سازه همچنین نیروی برشی و گشتاور خمشی پایه توربین بادی به میزان بیش از ۳۰ درصد در راستای جلو-به-عقب کاهش پیدا

- ۷- مراجع
- [16] Si Y, Karimi HR, Gao H (2014) Modelling and optimization of a passive structural control design for a spar-type floating wind turbine. *Adv Earthq Engn* 69: 168-182.
- [17] Caterino N (2015) Semi-active control of a wind turbine via magnetorheological dampers. *J Sound Vib* 345: 1-17.
- [18] Zuo H, Bi K, Hao H (2017) Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards. *Eng Struct* 141: 303-315.
- [19] Jahangiri V, Sun C (2019) Integrated bi-directional vibration control and energy harvesting of monopile offshore wind turbines. *Ocean Eng* 178: 260-269.
- [20] Guntur S, et al. (2017) A validation and code-to-code verification of FAST for a megawatt-scale wind turbine with aeroelastically tailored blades. *Wind Energy Sci* 2(2): 443-468.
- [21] Guntur S, et al. (2016) Fast v8 verification and validation using experiments from aeroelastically tailored megawatt-scale wind turbine blades. *National Renewable Energy Laboratory Report: 7-17*, Available at: www.nrel.gov/docs.
- [22] Jonkman JM (2007) Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. *National Renewable Energy Report: 51-71*, Available at: www.nrel.gov/docs.
- [23] Jonkman J, et al. (2009) Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. *National Renewable Energy Lab Report: 6-11*, Available at: www.nrel.gov/docs.
- [24] Svensson H (2010) Design of foundations for wind turbines. *Eng Struct: 10-13*, ISSN 0281-6679.
- [25] Söndgen S, Predki W (2013) Power loss and axial load carrying capacity of radial cylindrical roller bearings. *Power Transm Eng* 42-47.
- [26] Nelias D, et al. (1994) Power loss prediction in high-speed roller bearings. *Tribology S* 27: 465-478.
- [27] American Roller Bearings Company (2013) Heavy duty bearings catalog 201223. 1350 4th St Dr NW Hickory, NC 28601.
- [28] Jonkman BJ, Buhl Jr ML (2006) TurbSim user's guide. *National Renewable Energy Lab Report: 5-17*. Available at: www.wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbSim.
- [29] Ünker F, Çuvalcı O (2015) Seismic motion control of a column using a gyroscope. *Procedia Soc Behav Sci* 195: 2316-2325.
- [1] International Energy Agency (2019) Global energy and CO₂ status report: 3-23, Available at: www.iea.org.
- [2] Environmental Protection Agency (2017) Inventory of U.S. Greenhouse gas emissions and sinks report: 522-525, Available at: www.epa.gov.
- [3] Energy Information Agency (2019) U.S. Energy-related carbon dioxide emissions report: 4-14, Available at: www.eia.gov.
- [4] World Wide Energy Association (2021) Global wind installation in 2020 report:1-2, Available at: www.wwea.org.
- [5] Stephy T, et al. (2020) 2018 Cost of wind energy review. *National Renewable Energy Lab (NREL)*.
- [6] Fitzgerald B, et al. (2020) Vibration control of wind turbines: Recent advances and emerging trends *Int J Sustain Struct Mater-Sys* 4(2-4): 347-472.
- [7] Sayigh A, Milborrow D (Eds.) (2019) The age of wind energy: Progress and future directions from a global perspective. Springer Nature, Switzerland. 313-314.
- [8] Taylor M (2012) Renewable energy technologies: Cost analysis series, wind power. *Renew Energ* 1(5): 1-64.
- [9] Bossanyi EA (2003) Individual blade pitch control for load reduction. *Wind Energy* 6(2): 119-128.
- [10] Argyriadis K, Hille N. (2004). Determination of fatigue loading on a wind turbine with oil damping device. *Proc 2004 EWEC: (1-6)*.
- [11] Murtagh P, et al. (2008) Passive control of wind turbine vibrations including blade/tower interaction and rotationally sampled turbulence. *Wind Energy* 11(4): 305-317.
- [12] Colwell S, Basu B (2009) Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control. *Adv Earthq Engn* 31(2): 358-368.
- [13] Karimi HR, Zapateiro M, Luo N (2010) Semiactive vibration control of offshore wind turbine towers with tuned liquid column dampers using H_{∞} output feedback control. *IEEE Intl Conf Contr* 2245-2249.
- [14] Lackner MA, Rotea MA (2011) Passive structural control of offshore wind turbines. *Wind Energy* 14(3): 373-388.
- [15] Jie L, Zili Z, Jianbing C (2012) Experimental study on vibration control of offshore wind turbines using a ball vibration absorber. *Energy Power Eng* 4(3):153-157.

[31] IRENA (2020) Renewable Power generation costs in 2019 report: 25-30. Available at: www.irena.org/publications.

[30] Ziegler JG, Nichols NB (1993) Optimum settings for automatic controllers. ASME J Dyn Syst Meas Contr 115(2(B)): 220-222.