

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



PROPOSAL  
پروپوزال

مركز آموزش  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



مركز آموزش  
روش تحقیق و مقاله نویسی علوم انسانی

کارگاه آنلاین  
روش تحقیق و مقاله نویسی علوم انسانی



مركز آموزش  
آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترکیه های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترکیه های جستجو

# بررسی دینامیکی سیستم تهویه توربین بادی ۲ مگاواتی

مرتضی فیض بخشی، عباس الهی، حمیدرضا لاری، عباس بحری

مرکز توسعه توربین های بادی

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

mfeizbakhshi@nri.ac.ir, aelahi@nri.ac.ir

در این مقاله سعی بر این است که طراحی سیستم خنک کاری توربین بادی ۲ مگاواتی طراحی شده توسط پژوهشگاه نیرو به اجمال تشریح شده و سپس به مدل سازی دینامیکی سیستم حرارتی و بالانس حرارتی ناسل در یک روز گرم سال در منطقه شرحه واقع در استان زنجان پرداخته شود.

## ۲. سیستم تهویه ناسل

سیستم تهویه ناسل به منظور خنک کاری اجزاء مکانیکی و الکتریکی درون ناسل می باشد. به منظور طراحی سیستم تهویه مناسب برای ناسل توربین بادی باید ابتدا بارهای حرارتی وارد به ناسل توربین بادی تعیین گردد. علاوه بر این شرایط دمایی کاری توربین نیز حائز اهمیت می باشد. سیستم تهویه مورد نظر برای یک توربین بادی ساحلی<sup>۱</sup> با توان نامی ۲ مگاوات می باشد که برای شرایط استاندارد محیطی طراحی شده است. بر طبق استاندارد GL شرایط استاندارد کاری برای توربین های بادی از ۱۰- تا ۴۰ درجه سانتیگراد می باشد. در این استاندارد دمایی تحمل اجزاء مقدار ۲۰- تا ۴۰ درجه سانتیگراد ذکر شده است [۱]. ناسل توربین مورد بررسی به صورت یک مکعب مستطیل با ابعاد ۴/۵\*۴/۵\*۴/۵ فرض گردیده است.

## ۳. محاسبه بار حرارتی درون ناسل

به منظور محاسبه بار حرارتی ناسل ابتدا باید اجزاء درون ناسل و عملکرد هر یک از آنها تعیین گردد. اجزاء اصلی درون ناسل که بار حرارتی بر ناسل وارد می کنند شامل ژنراتور، گیربکس و مبدل فرکانسی می باشد. علاوه بر بار حرارتی این اجزاء مقدار بار حرارتی تابشی نیز بر ناسل وارد

چکیده — در این مقاله ابتدا به طراحی سیستم تهویه ناسل توربین بادی مگاواتی طراحی شده در پژوهشگاه نیرو پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا بارهای حرارتی درون ناسل محاسبه شده و سپس دبی فن لازم برای تهویه ناسل تعیین شده است. پس از تعیین دبی فن تهویه و پارامترهای سیستم های خنک کننده درون ناسل، مدل دینامیکی سیستم تهویه درون ناسل در نرم افزار Matlab ایجاد شده است. در نهایت، نشان داده شده است که سیستم کنترلی بصورت کامل می تواند دما را در محدوده مجاز در گرم ترین روز سال نگه دارد.

واژه های کلیدی — توربین بادی، تهویه، Simulink, Matlab، ناسل

## ۱. مقدمه

توربین بادی به عنوان یک واحد نیروگاهی کوچک دارای تجهیزات مکانیکی و الکتریکی مختلفی می باشد. کارکرد این مجموعه تجهیزات وابسته به فراهم آمدن شرایط کاری مناسب شامل دما و رطوبت می باشد. به این ترتیب در توربین های بادی نیز همانند دیگر واحدهای صنعتی سیستم خنک کاری و تهویه جایگاه ویژه ای دارد که حائز اهمیت است.

سیستم خنک کاری توربین های بادی به خصوص در توربین های با ظرفیت های بالاتر اهمیت ویژه ای پیدا می کنند. در این توربین ها به دلیل ظرفیت بالای اجزاء به کار رفته در آن، بارهای حرارتی اعمالی به توربین بالاتر می رود. علاوه بر این بسیاری از این تجهیزات مکانیکی و الکتریکی با افزایش دما دچار افت بازده می شوند. در نتیجه طراحی بهینه سیستم تهویه و کنترل دمای اجزاء توربین موجب بهره برداری هر چه بهتر از تجهیزات و پتانسیل انرژی باد می شود.

<sup>1</sup> On-shore

جابه جایی بر روی سطح پوسته ناسل و در درون ناسل از روابط جابه جایی بر روی سطح تخت استفاده خواهیم نمود. [۲]. معادله (۱) و (۲) به این ترتیب خواهیم داشت:

$$Nu = 0.6 + 0.66 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (1) \quad Re \leq 500$$

$$Nu_{in} = 3 \quad (2)$$

در این روابط طول مشخصه مورد استفاده در محاسبه عدد رینولدز و ناسلت برابر طول ناسل ۱۴ متر می باشد. در نتیجه خواهیم داشت.

$$Re_{in} = 401063 \quad (3)$$

$$Nu_{in} = 75.8 \quad (4)$$

$$Nu_{out} = 4644$$

از مقادیر محاسبه شده در معادله (۳) و (۴) برای ناسل ضریب انتقال حرارت جابه جایی جریان هوا به دست می آید.

$$h_{in} = 0.73 (W/m^2.K) \quad (5)$$

$$h_{out} = 8.98 (W/m^2.K) \quad (6)$$

در نهایت با حل معادله انرژی (معادله (۷)) بر روی سطح پوسته ناسل، مقدار شار حرارتی  $(W/m^2)$   $63/2$  حرارت تابشی وارد فضای درون ناسل می گردد. که با در نظر گرفتن  $84(m^2)$  به عنوان مساحت مفید مقابل به آفتاب انرژی حرارتی تابشی  $5/3 (kW)$  محاسبه می گردد.

$$Q''_{Radiation} = h_{in}(T_s - T_{in}) + h_{out}(T_s - T_{out}) \quad (7)$$

## ۴. طراحی سیستم تهویه ناسل

سیستم تهویه درون ناسل تشکیل شده از سیستم خنک کاری ژنراتور، گیربکس و فن اصلی تهویه ناسل می باشد. سیستم خنک کاری ژنراتور و گیربکس به صورت هواخنک بوده و هر یک بطور جداگانه وظیفه دفع حرارت به بیرون را به عهده دارند. فن اصلی تهویه ناسل نیز با تعویض هوای درون ناسل به خنک کاری باقی مانده حرارت ناشی از مبدل فرکانسی، تابش و دیگر اجزاء درون توربین می پردازد.

برای محاسبه دبی حجمی فن اصلی ناسل از معادله انرژی (معادله (۸)) بهره خواهیم گرفت. به این صورت که میزان بار حرارتی گرمایی تولید شده در درون ناسل باید برابر با ظرفیت گرمایی هوایی باشد که در اثر جریان درون ناسل تعویض می گردد. [۳]

$$Q_{Thermal} = \rho_{air} C_p \dot{V} (T_{in} - T_{out}) \quad (8)$$

می شود. در ادامه به محاسبه بار حرارتی هر یک از این اجزاء خواهیم پرداخت.

- ژنراتور: ژنراتور توربین بادی ۲ مگاواتی دارای ظرفیت تولید توان ۲ مگاوات می باشد. به منظور محاسبه مقدار بار حرارتی ژنراتور از راندمان ژنراتور که برابر  $96/5\%$  است بهره می گیریم. به این ترتیب که فرض می شود مقدار  $3/5\%$  اتلاف انرژی ژنراتور به طور کامل به حرارت تبدیل می شود. در نتیجه برای بار حرارتی ژنراتور مقدار ۷۰ کیلووات را خواهیم داشت.
- گیربکس: گیربکس توربین بادی نیز همانند ژنراتور باید هم ظرفیت با کل توربین یعنی ۲ مگاوات باشد. با فرض راندمان  $97\%$  برای گیربکس و تبدیل شدن تمام اتلاف به انرژی گرمایی مقدار بار حرارتی ۶۰ کیلووات را برای گیربکس خواهیم داشت.

- مبدل فرکانس: مقدار بار حرارتی مبدل فرکانسی توربین بادی مورد نظر بر اساس اطلاعات شرکت سازنده استخراج شده است. بر این اساس شرکت تولید کننده مبدل فرکانسی مقدار بار حرارتی ۳۶ کیلووات را برای آن اعلام کرده است.
- بار حرارتی تابشی: بر طبق استاندارد GL مقدار شار حرارتی تابشی  $1000 (W/m^2)$  برای محاسبات بار تابشی باید در نظر گرفته شود. [۱] به منظور محاسبه کامل بار حرارتی تابشی وارد بر ناسل باید پوسته ناسل به همراه انتقال حرارت جابه جایی درون و بیرون پوسته ناسل مدل شود تا سهمی از بار تابشی را که به درون ناسل اعمال می گردد محاسبه شود. در بخش بعدی به محاسبه این بار خواهیم پرداخت.

### ۱.۳. محاسبه بار حرارتی تابشی

فرضیات محاسبه بار حرارتی تابشی به گونه ای بوده که بدترین شرایط کاری و محیطی برای ناسل در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که مقدار سرعت باد جریان اطراف ناسل مقدار  $4 m/s$  (کمترین مقدار سرعت باد که توربین قادر به شروع تولید توان می باشد) و دمای هوای بیرون  $40$  درجه سانتیگراد و دمای درون ناسل با  $5$  درجه اختلاف  $45$  درجه سانتیگراد فرض شده است. همچنین در این محاسبات سرعت جریان درون ناسل مقدار  $0/5 m/s$  فرض شده است. به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت

• برای هوای درون ناسل یک درجه حرارت در نظر گرفته شده است. هوای داخل ناسل با گیربکس، ژنراتور و کانورتور از طریق سطوح خارجی آنها انتقال حرارت به روش جابجایی دارد. ضریب انتقال حرارت جابه جایی این سطوح برابر  $2(W/m^2K)$  فرض شده است.

• گیربکس شامل بدنه فلزی و روغن درون آن دارای یک دمای واحد است. گیربکس دارای سیستم خنک کاری جداگانه ای می باشد که ظرفیت این سیستم خنک کاری برابر بار حرارتی نامی گیربکس ( $60kW$ ) است. سیستم خنک کاری گیربکس به صورت دو واحد مجزا از هم با ظرفیت  $20$  و  $40$  کیلووات در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که با افزایش دما ابتدا واحد  $40$  کیلوواتی وارد مدار شده و با افزایش بیشتر دما، واحد  $20$  کیلوواتی نیز اضافه می گردد و در مجموع  $60$  کیلووات ظرفیت خنک کاری به کار گرفته می شود.

• ژنراتور توربین بادی نیز به صورت یک جسم با دمای مشخص در نظر گرفته شده است. ژنراتور دارای سیستم خنک کاری با ظرفیت نامی  $70$  کیلووات می باشد.

• مبدل فرکانسی به صورت واحدی جداگانه در درون ناسل مدل سازی شده است که بار حرارتی خود را مستقیم وارد هوای درون ناسل کرده و سیستم خنک کاری مستقلی ندارد.

• اثر بار حرارتی تابشی به صورت مقدار گرمای ثابتی به هوای درون ناسل اعمال می شود.

• فن اصلی ناسل که با افزایش دما از یک حد مجاز روشن شده و مقدار مشخصی از هوای گرم درون ناسل را به بیرون هدایت می کند.

• مجموع هوای ورودی به ناسل برابر با میزان هوای خارج شده از ناسل به وسیله فن های سیستم های خنک کننده و فن اصلی ناسل می باشد. در نتیجه با روشن یا خاموش شدن هر یک از این فن ها دبی جریان هوای ورودی به ناسل تغییر خواهد کرد.

• از فضای درون ناسل، بخشی به تجهیزات درون ناسل اختصاص داشته و مابقی فضا شامل هوای درون ناسل می باشد. هوای درون ناسل به همراه دیگر اجزاء سازه ای

برای محاسبه بار حرارتی وارد بر ناسل باید این نکته را مد نظر قرار داد که در گیربکس و ژنراتور به جهت وجود سیستم خنک کاری مجزا برای هر یک از این تجهیزات، بار حرارتی این اجزاء وارد فضای ناسل نمی شود. در نتیجه بار حرارتی ناسل شامل مبدل فرکانسی و حرارت تابشی می گردد. در نتیجه مجموع بارهای حرارتی مبدل فرکانس و تابشی برابر  $41/3 (kW)$  بدست می آید. با بکارگیری ضریب عدم قطعیت  $1/1$  در مقدار بارهای حرارتی این مقدار به  $45/4 (kW)$  تغییر می کند. در نتیجه با بهره گیری از معادله انرژی (معادله (۹)) برای محاسبه دبی حجمی مورد نیاز برای تهویه خواهیم داشت:

$$\dot{V} = \frac{Q_{Thermal}}{\rho_{air} C_p (T_{in} - T_{out})} = \frac{45400}{1.1186 \times 1007 (T_{in} - T_{out})} \quad (9)$$

برای محاسبه حجم هوای تهویه، بدترین شرایط کاری توربین را در نظر خواهیم گرفت. به این معنی که دمای هوای بیرون را  $40$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته و دمای داخل ناسل را تا حداکثر با  $5$  درجه سانتیگراد افزایش درجه حرارت  $45$  درجه سانتیگراد در نظر خواهیم گرفت. با فرضیات فوق مقدار میزان حجم هوای تهویه برابر  $8/06 (m^3/s)$  بدست می آید. با در نظر گرفتن  $25\%$  به عنوان ضریب اطمینان مقدار حجم هوای تهویه  $10/075$  مترمکعب بر ثانیه بدست می آید. عدد بدست آمده بیانگر مقدار هوای تازه مورد نیاز برای خنک کاری ناسل است. فن های سیستم خنک کاری و فن اصلی ناسل باید معادل این مقدار حجم هوا از ناسل خارج کنند تا هوای تازه جایگزین آن گردد. بنابراین با فرض مقدار دبی حجمی  $4$  مترمکعب بر ثانیه برای سیستم خنک کاری ژنراتور و گیربکس خواهیم داشت.

$$\dot{V}_{fan} = \dot{V}_{ventilation} - \dot{V}_{Generator} - \dot{V}_{Gearbox} = 10.075 - 4 - 4 = 2.075 (m^3/s) \quad (10)$$

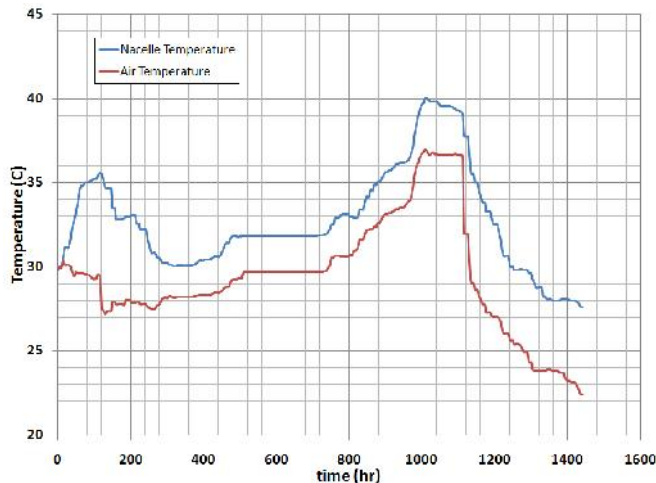
## ۵. مدل سازی دینامیکی تهویه درون ناسل

### ۱.۵. فرضیات مدل سازی

در این بخش به بررسی نحوه مدل سازی دینامیکی سیستم تهویه درون ناسل خواهیم پرداخت. همانطور که پیش از این نیز اشاره شد مدل سازی انجام شده در محیط Simulink صورت پذیرفته شده است. در ادامه به ارائه فرضیات این مدل سازی خواهیم پرداخت:

ناسل، نحوه عملکرد فن‌ها و خاموش روشن شدن هر یک از آن‌ها می‌باشد. علاوه بر پارامترهای ذکر شده، تغییرات بار حرارتی ایجاد شده در درون ناسل و سهم هر یک از سیستم‌های خنک‌کننده در دفع این گرما نیز بر حسب زمان ارائه می‌گردد.

نمودار تغییرات دمای هوای بیرون و هوای ناسل بر حسب زمان (ساعت) در یک روز گرم سال در شکل ۱ رسم شده است.



شکل ۱: نمودار تغییرات دمای ناسل و هوای محیط

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود دمای درون ناسل و دمای هوای بیرون در فاصله حدود ۵ درجه سانتیگراد از یکدیگر تغییرات دارند که مطابق با فرض انجام شده در بخش طراحی است. در زمان‌هایی که دمای هوای بیرون کاهش یافته، سیستم‌های خنک‌کننده درون ناسل خاموش شده و به این جهت اختلاف میان دو دما از ۵ درجه تجاوز کرده است.

درون ناسل که نقش تولید گرما ندارند هم‌دمای با هوای درون ناسل در نظر گرفته شده و در محاسبه ظرفیت گرمایی ناسل لحاظ شده‌اند.

- مکانیسم اصلی سیستم‌های خنک‌کننده ژنراتور و گیربکس بر اساس جابه‌جایی اجباری<sup>۲</sup> می‌باشد. به این ترتیب به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر این اجزاء درون ناسل مقدار ظرفیت حرارتی خنک‌کننده‌ها به صورت تابعی از اختلاف دمای تجهیز و هوای درون ناسل در نظر گرفته شده است. بطور مثال فرض شده که خنک‌کننده گیربکس در اختلاف دمای ۳۰ درجه مابین دمای گیربکس و هوای درون ناسل قادر به دفع ۶۰ کیلووات گرما می‌باشد. با افزایش و یا کاهش اختلاف دمای گیربکس و دمای درون ناسل ظرفیت حرارتی خنک‌کن گیربکس نیز به صورت خطی افزایش و یا کاهش می‌یابد.

- مدل‌سازی انجام شده سرعت باد را به عنوان ورودی به سیستم دریافت کرده و بر اساس نمودار سرعت-توان توربین بادی ۲ مگاواتی، توان تولیدی توربین را محاسبه می‌نماید. سپس بار حرارتی اجزایی مانند گیربکس، ژنراتور و مبدل فرکانسی تابعی خطی از توان توربین می‌باشند به این ترتیب که با افزایش توان توربین به ۲ مگاوات، این تجهیزات بار حرارتی نامی خود را تولید می‌کنند و با کاهش یافتن توان توربین به کمتر از توان نامی، بار حرارتی این اجزاء که به ناسل وارد می‌شود نیز کاهش می‌یابد.

## ۲.۵. مدل‌سازی دینامیکی

در نهایت پس از اعمال فرضیات ذکر شده، مدل Simulink بر اساس شکل ۲ بدست آمد. هر یک از بخش‌های مربوط به ژنراتور، گیربکس و یا مبدل فرکانسی نیز دارای زیر-سیستم‌های مربوط به خود می‌باشد که در این شکل نشان داده نشده است.

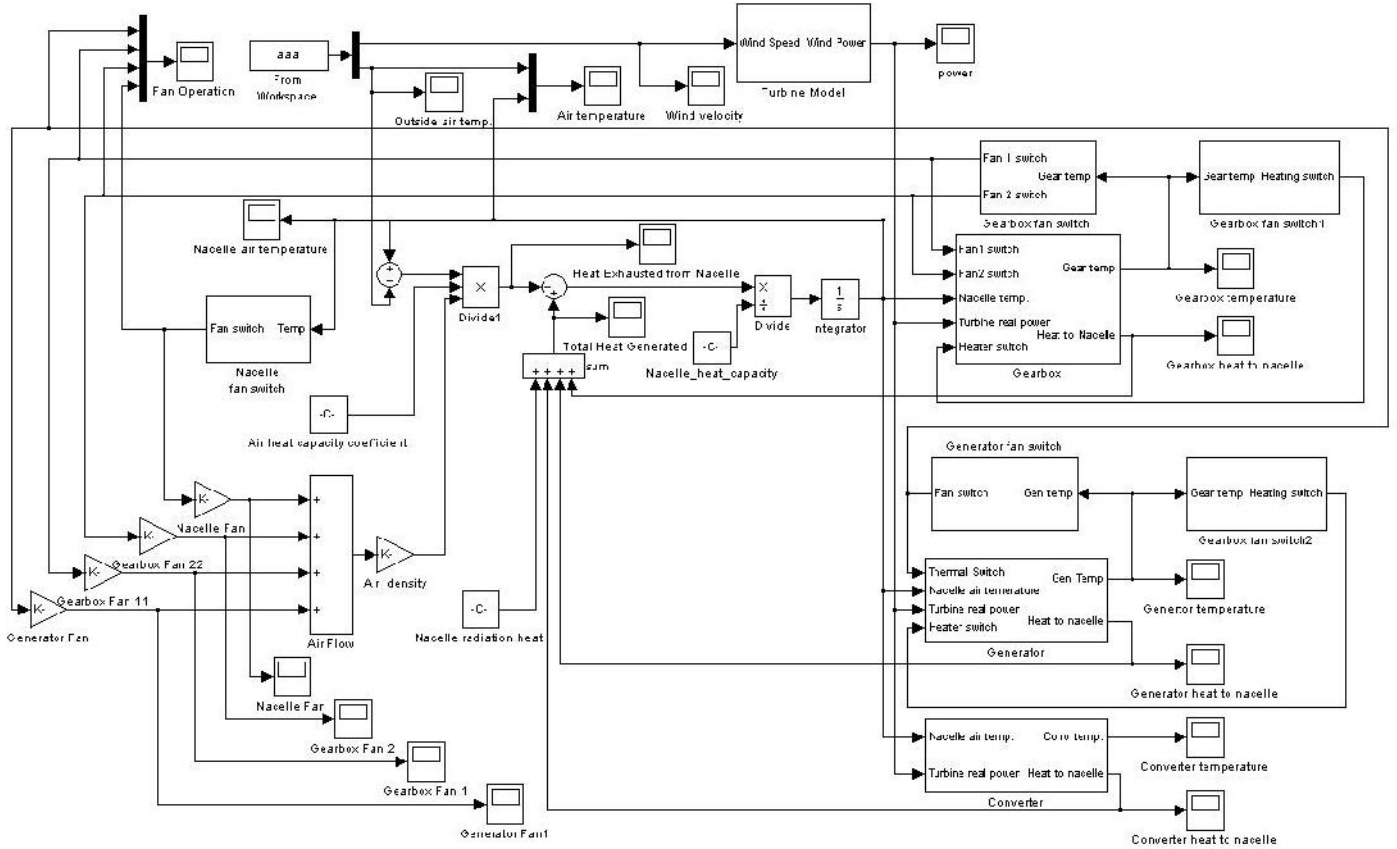
## ۶. نتایج

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی یک روز گرم خواهیم پرداخت. پارامترهای مورد بررسی در این قسمت شامل تغییرات دمای درون

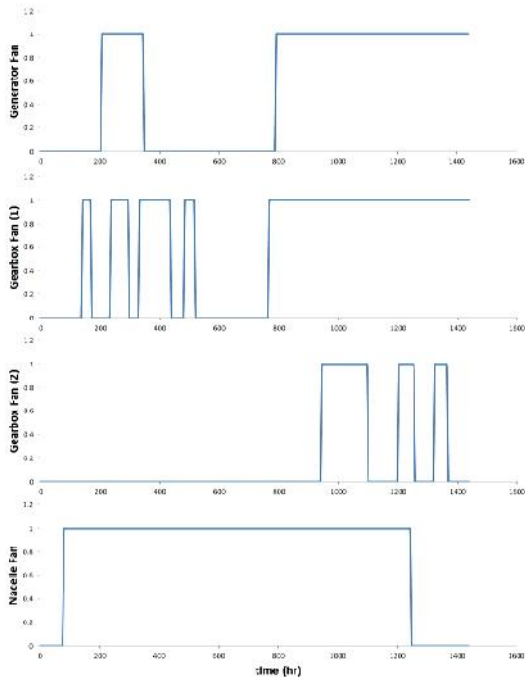
<sup>2</sup> Forced Convection

بررسی دینامیکی سیستم تهویه توربین بادی توسط نرم افزار Matlab

بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق - ۱۳۹۲ تهران، ایران



شکل ۲: دیاگرام مدل دینامیکی سیستم تهویه در نرم افزار Simulink



شکل ۳: سیگنال های کنترلی سیستم های خنک کننده

پارامتر بعدی که در این بحث گنجانده شده است عملکرد سیستم های خنک کن می باشد. عملکرد سیستم های خنک کن به صورت سیگنال های صفر و یک در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقدار عدد ۱ بیانگر روشن شدن سیستم خنک کننده و عدد صفر خاموش شدن سیستم خنک کن است.

همان گونه که پیش از این اشاره شد سیستم خنک کن گیربکس شامل دو بخش می باشد که عملکرد مستقل از یکدیگر دارند و بر اساس دمای گیربکس روشن و یا خاموش می شوند. در شکل ۳ با بالا رفتن دما خنک کن دوم گیربکس روشن شده و وارد مدار می شود. روشن شدن تمامی دستگاه های خنک کن موجب کاهش دمای درون ناسل و در نتیجه خاموش شدن فن اصلی ناسل می شود. دمای گیربکس نیز با تاخیر اندکی نسبت به دمای ناسل دچار افت دما شده و خنک کن دوم گیربکس نیز در انتها خاموش می شود.

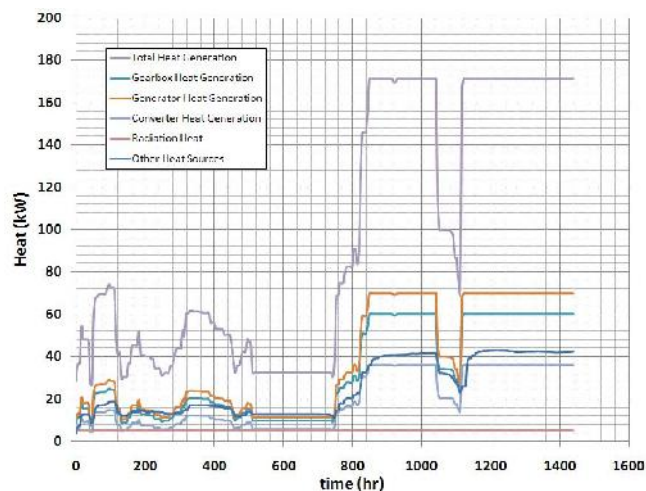
توان تولیدی توربین تبعیت نمی کنند. در این شکل همچنین می توان سهم هر یک از سیستم های خنک کننده را در کنترل دمای درون ناسل مشاهده نمود.

در این مقاله نشان داده شد که الگوریتم کنترلی مورد استفاده برای سیستم تهویه ناسل توربین بادی قادر به حفظ دمای اجزاء در محدوده مجاز تعیین شده توسط GL می باشد. همچنین مدل دینامیکی ارائه شده تاییدی بر نحوه طراحی سیستم تهویه و بالانس حرارتی کل مجموعه می باشد.

## منابع

- [1] Germanisher Lloyd, Guideline for the Certification of Wind Turbines, Edition 2010,
- [2] Holman, J.P., Heat Transfer, 7th ed., McGraw Hill Book Company, New York, 1990.
- [3] ASHRAE 1999 Fundamental Handbook , chapter30, nonresidential cooling and heating load calculation.

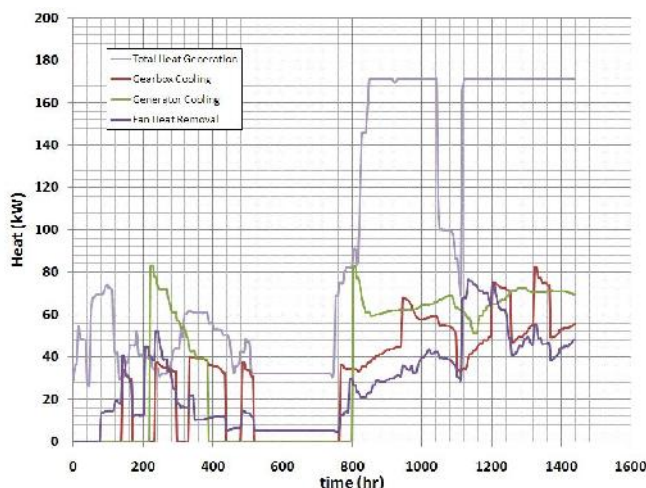
در ادامه نمودارهای بارهای حرارتی و سهم هر یک از اجزاء در تولید بار حرارتی در شکل ۴ رسم شده است.



شکل ۴: بارهای حرارتی تولیدی در ناسل

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود بارهای حرارتی روندی همسان را طی می کنند. دلیل اصلی این روند به خاطر متناسب بودن بارهای حرارتی اجزاء اصلی به کل توان تولیدی توربین می باشد. در این شکل همچنین می توان به سهم هر یک از پارامترها در گرم کردن ناسل پی برد.

پارامتر بعدی که در شکل ۵ نمایش داده شده است سهم هر یک از سیستم های خنک کاری در حذف بار حرارتی از درون ناسل به محیط بیرون می باشد.



شکل ۵: توان خنک کاری اجزاء مختلف درون ناسل

بر خلاف نمودار بارهای حرارتی تولیدی، مقدار بار حرارتی سیستم های خنک کننده وابسته به اختلاف دمای تجهیز و دمای درون ناسل می باشد و از

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



PROPOSAL  
پروپوزال

پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

دکتره تهرانی

کارگاه آنلاین  
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی



روش تحقیق و مقاله نویسی علوم انسانی

دکتره تهرانی

کارگاه آنلاین  
روش تحقیق و مقاله نویسی علوم انسانی



ISI  
Scopus

آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو