

ارتقاء راندمان عملکردی فن‌های دمنده هوای بویلر نیروگاه شازند با رویکرد کاهش مصرف انرژی

پوریا عروجی^{1*}، غلامرضا بیاتی²، فتاح گنجی زاده²، علی محمد میرشمس²، سعید مقدم¹

¹شرکت مهندسی آسیاوات، pooria@asiawatt.com
²سازمان بهره‌وری انرژی ایران، Bayati@saba.org.ir

چکیده

کاهش توان مصرفی در تجهیزات داخلی سیکل نیروگاههای حرارتی یکی از مهم‌ترین راهکارهای افزایش راندمان خالص در آنها می‌باشد. فن‌های دمنده هوای بویلر پس از پمپهای آب تغذیه دارای بیشترین توان الکتریکی مصرفی می‌باشند که سهم آن به حدود 35 درصد از کل انرژی الکتریکی مصرفی در تجهیزات داخلی نیروگاه نیز می‌رسد. پایش پیوسته وضعیت کارکرد و بهره‌برداری در حداکثر راندمان عملکردی سبب تضمین مصرف انرژی بهینه در این تجهیزات خواهد بود. نیروگاه شازند دارای 4 واحد 325 مگاواتی می‌باشد که جهت تامین هوای مورد نیاز احتراق در بویلر هر واحد از دو فن دمنده سانتریفیوژ استفاده می‌گردد. مشخصه‌های مورد استفاده در طراحی این فن‌ها سبب شده است تا شرایط بهینه عملکرد فن‌ها از شرایط عملیاتی فاصله قابل توجهی داشته باشد که نتیجه آن کارکرد فن‌ها در راندمان‌های پایین می‌باشد. واحدهای نیروگاه به دلیل مشکلات بهره‌برداری در حداکثر ظرفیت، معمولاً در بارهای بین 300 تا 310 مگاوات بهره‌برداری می‌گردند که در نمونه پایش بعمل آمده از 4 واحد 4 نیروگاه راندمان کل فن‌ها در شرایط مشخص بهره‌برداری در بار 300 مگاوات برابر با 51 درصد و متوسط توان مصرفی الکتروموتور هر یک از فن‌ها در حدود 3712 کیلووات بوده است. در این مطالعه، راهکارهای ارتقاء راندمان عملکردی فنهای دمنده هوای بویلر نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته است که پس از بررسی‌های فنی و اقتصادی، طرح تعویض ایمپلر فنهای واحد 4 نیروگاه جهت اجرا انتخاب شده است. نتایج حاکی از آنست که بتوان با اجرای این طرح، توان مصرفی الکتروموتور هر فن را به میزان 1300 کیلووات کاهش و راندمان کل عملیاتی هر فن را به 75 درصد افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه شازند، فن دمنده هوای بویلر، بهبود راندمان، کاهش توان مصرفی

1- مقدمه

در نیروگاه‌های حرارتی از فن‌ها استفاده‌های مختلفی مانند تامین هوای مورد نیاز احتراق بویلر¹، خروج گازهای احتراق از بویلر²، انتقال مجدد بخشی از گازهای احتراق خروجی به داخل کوره³ و ... می‌شود که به منظور اطمینان از عملکرد بهینه آنها می‌بایست شرایط بهره‌برداری این تجهیزات از لحاظ راندمان و توان مصرفی در شرایط کارکرد نیروگاه مورد بررسی واقع گردد تا در صورت کارکرد در نقطه کار نامطلوب، راهکار فنی و اقتصادی مناسب مشخص و پیاده سازی گردد[2]. در صورتی که در مرحله طراحی، فن برای تامین فشار و جریان هوای مورد نیاز به صورت صحیح انتخاب نگردد و ظرفیت آن بیشتر از مقدار مورد نیاز باشد⁴ یا راندمان پایینی داشته باشد، اولین پیشنهاد تعویض فن

در حدود 8 درصد از انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاههای بخار به مصرف تجهیزات داخلی آن می‌رسد که در این میان فن‌های دمنده هوای بویلر و پمپ‌های آب تغذیه بیشترین سهم مصرف را به خود اختصاص می‌دهند. مجموعه عوامل تاثیر گذار در بروز درصد مصارف داخلی بالای نیروگاهها را می‌توان در دو عامل، طراحی نامناسب اولیه و بهره‌برداری غیر بهینه خلاصه نمود که عدم تناسب مشخصه‌های طراحی با ظرفیت کارکرد فن‌های دمنده هوای بویلر در نیروگاه شازند سبب شده است که این فن‌ها دارای راندمان عملکردی پایین و در نتیجه توان مصرفی الکتریکی بالایی باشند[1].

¹ Forced Draft Fan

² Induced Draft Fan

³ Gas Recirculation Fan

⁴ Oversize

$$h_t = \frac{P_t Q}{BHP} \quad (1)$$

در رابطه بالا P_t فشار کل، Q مقدار جریان هوای عبوری از فن، BHP توان مکانیکی محور فن و h_t راندمان فن می‌باشد. فشار کل نیز مجموع فشار استاتیکی و دینامیکی جریان هوا در خروجی فن می‌باشد.

$$P_t = P_s + P_d \quad (2)$$

در رابطه بالا P_s فشار استاتیکی و P_d فشار دینامیکی می‌باشد. فشار استاتیکی تامین شده توسط فن از تلاقی منحنی سیستم با منحنی عملکرد فن حاصل می‌شود که از همین رو جهت محاسبه آن می‌بایست مجموع افت فشارهای استاتیکی سیستم که ناشی از تجهیزات موجود در شبکه توزیع شامل داکت، دمپر، فیلتر، مبدلها و ... می‌باشد را مورد محاسبه قرار داد. فشار دینامیکی جریان هوا نیز وابسته به سرعت هوا در دهانه خروجی فن می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

در این رابطه ρ چگالی هوا در دهانه خروجی فن و v سرعت جریان هوا می‌باشد.

2-2- قوانین تشابه

دو فن با مشخصه‌های متفاوت را مشابه می‌نامند در صورتی که دارای شرایط زیر باشند:

1. هر دو فن دارای تعداد پره‌های برابر باشند.
2. زاویه پره‌ها و هر زاویه دیگری در ساختار هر دو فن متناظراً برابر باشند.
3. اگر اندازه قطرهای دو فن D_1 ، D_2 و نسبت اندازه قطرها D_2 / D_1 باشد، نسبت تمام اجزای متناظر فن نیز باید برابر با همین مقدار باشد.

بین شرایط کارکرد فن های مشابه قوانینی وجود دارد که به عنوان قوانین تشابه⁸ شناخته می‌شوند. در صورتی که دو فن مشابه بوده و سرعت آن ها با هم متفاوت باشد بین دبی، فشار و توان آن ها روابط زیر برقرار است [7]:

است. فن جدید باید متناسب با فشار و دبی مورد نیاز سیستم طراحی شده و راندمان بالایی داشته باشد [3]. راهکارهای موثر دیگر در این بخش تغییر سرعت فن با استفاده از درایوهای دور متغیر⁵ [4]، کوپلینگ هیدرولیکی [5] و یا تعویض الکتروموتور می‌باشد. از همین رو در این تحقیق، شرایط بهره‌برداری کنونی و پتانسیل افزایش راندمان در فن‌های دمنده هوای بویلر واحد شماره 4 نیروگاه شازند با استفاده از راهکارهای پیشنهادی مورد بررسی واقع شده است.

نیروگاه شازند اراک یکی از نیروگاه‌های بخار کشور است که در سال 1381 مورد بهره‌برداری واقع شده و دارای 4 واحد به ظرفیت 325 مگاوات می‌باشد. در هر واحد به منظور تامین هوای مورد نیاز بویلر از دو فن سانتریفیوژ با انحنای پره رو به جلو⁶ استفاده شده است. هر فن دارای یک الکتروموتور مجزا به ظرفیت 5 مگاوات می‌باشد و کنترل مقدار هوای ورودی به چشمه فن از طریق دمپر نصب شده در ورودی آن انجام می‌پذیرد. مطابق با نتایج نمونه پایش صورت گرفته در بار 300 مگاوات واحد و بهنگام کارکرد بویلر با سوخت گاز، مقدار 983808 مترمکعب در ساعت هوا توسط هر فن تامین می‌شده است که فشار استاتیکی نسبی جریان هوا در خروجی فن برابر با 6300 پاسکال بوده است. در این شرایط متوسط توان مصرفی الکتروموتور هر فن برابر 3712 کیلووات و راندمان کل سیستم تامین هوا (الکتروموتور همراه با فن) برابر با 51 درصد محاسبه شده است [6]. با توجه به پایین بودن این راندمان و توان مصرفی بالای فن‌ها، در این مقاله طرح ارتقاء راندمان عملکردی فن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از همین رو پس از بررسی نتایج اثر بخشی راهکارهای مختلف، ابعاد فنی و اقتصادی آنها مورد بررسی قرار گرفته و طرح نهایی جهت پیاده سازی معرفی شده است.

2- روابط حاکم بر فن‌ها

2-1- محاسبه راندمان

با توجه به اصول آیرودینامیک، تنها بخشی از انرژی مکانیکی ایمپلر فن⁷ به جریان هوا انتقال می‌یابد و سبب افزایش سرعت و فشار در جریان هوا می‌گردد. راندمان فن بیانگر شاخص انتقال انرژی در این فرآیند می‌باشد که با استفاده از رابطه (1) می‌توان آن را محاسبه نمود [7].

⁵ Variable Speed Drive

⁶ Forward Curved

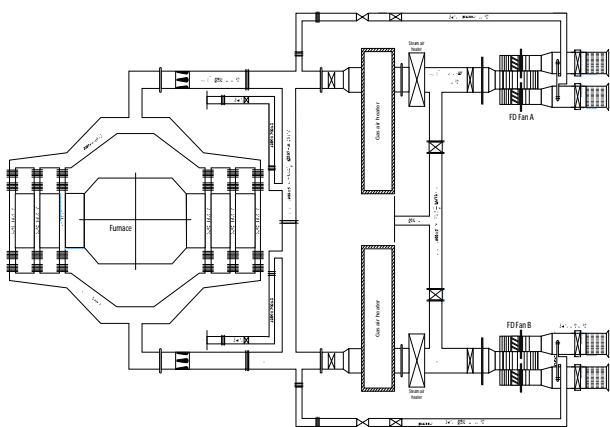
⁷ Impeller

⁸ Affinity Law



شکل (1): نمایی از داکتهای ورودی و ایملر فن دمنده هوای بویلر

همانطور که اشاره شد مطابق با نقشه‌های طراحی، در سیستم تامین هوای بویلر دو فن دمنده در نظر گرفته شده است که هر فن دارای دو داکت هوای ورودی مجهز به صدا گیر، گرمکن بخار، دمپر و یک داکت خروجی می‌باشد. در شکل (2) شبکه توزیع هوای بویلر نشان داده شده است.



شکل (2): شبکه تامین و توزیع هوا در بویلر نیروگاه سازند

همانطور که در شکل (2) مشاهده می‌گردد، هر فن هوای مورد نیاز 12 مشعل را تامین می‌نماید که به منظور افزایش دمای هوای ورودی محفظه احتراق، در هر مسیر یک گرمکن بخار و یک گرمکن هوای دوار در نظر گرفته شده است. فن‌ها ساخت شرکت شنیانگ¹¹ می‌باشند. مشخصات طراحی این فن‌ها که در حال حاضر در نیروگاه سازند نصب می‌باشند در جدول (1) ارائه شده است:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{Power_2}{Power_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \quad (6)$$

در معادلات بالا N سرعت فن می‌باشد. در صورتی که دو فن مشابه بوده و قطر ایملر آن‌ها با هم متفاوت باشد بین دبی، فشار و توان آن‌ها روابط زیر برقرار است [7]:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \quad (7)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{Power_2}{Power_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \quad (9)$$

3- سیستم تامین هوای احتراق بویلر در نیروگاه سازند

نیروگاه سازند دارای 4 واحد بخار به ظرفیت 325 مگاوات می‌باشد که هر واحد جهت تامین هوای مورد نیاز احتراق بویلر دارای دو فن دمنده می‌باشد. بویلرهای نیروگاه سازند از نوع درام‌دار گردش طبیعی می‌باشند که حداکثر ظرفیت پیوسته تولید بخار سوپرهیت آن برابر با 1065 تن بر ساعت با فشار 172 بار و دمای 540 درجه سانتیگراد می‌باشد. هر بویلر دارای 24 مشعل بوده که در دو دسته 12 تایی در دیواره‌های جانبی و روبروی یکدیگر واقع شده‌اند. هوای مورد نیاز احتراق توسط دو عدد فن سانتریفیوژ با انحناء پره رو به جلو⁹ تامین می‌گردد که هر کدام دارای دو ورودی¹⁰ می‌باشند. در شکل (1) نمایی از فن‌های دمنده هوای بویلر نیروگاه و نوع ایملر آنها نشان داده شده است.

⁹ Foeward Curved Centrifugal Fan

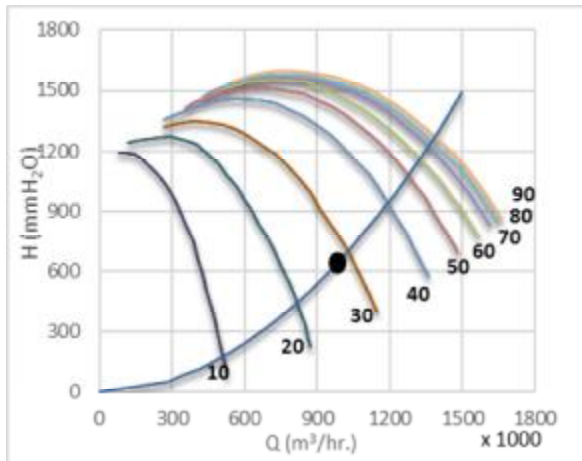
¹⁰ Double Inlet

¹¹ Shenyang

جدول (1): مشخصات طراحی فن دمنده هوای بویلر نیروگاه شازند

مقدار	واحد	مشخصه طراحی
2,55	<i>m</i>	قطر پروانه
820483	<i>m³/hr.</i>	دبی
15203	<i>Pa</i>	اختلاف فشار استاتیکی
990	<i>rpm</i>	دور فن
4535	<i>KW</i>	توان مکانیکی محور
78	%	بیشینه راندمان استاتیکی فن
96,5	%	راندمان الکتروموتور

و نقطه کارکرد فن در شکل (3) نمایش داده شده است. در این شکل مقدار فشار استاتیکی جریان هوا و مقدار آن در زوایای مختلف بازشدگی دمپر نمایش داده شده است. همانگونه که مشخص می‌باشد در شرایط کارکرد کنونی منحنی سیستم، منحنی عملکرد فن را در زاویه دمپر 28 درجه قطع می‌نماید.



شکل (3): منحنی عملکرد فن و سیستم

نقطه کارکرد فن و زاویه بازشدگی دمپر نشانگر آنست که فن برای ظرفیت‌هایی بیش از مقدار مورد نیاز طراحی شده است. مطابق با مشخصات فنی ارائه شده در جدول (1)، فشار استاتیکی در نظر گرفته شده در طراحی فن‌های موجود 15203 پاسکال است که به دلیل نیاز به فشار استاتیکی 6300 پاسکال در شبکه توزیع، فن‌ها در راندمان‌های پایین در حال کار بوده و دارای توان الکتریکی مصرفی بالایی می‌باشند.

4- راهکارهای پیشنهادی جهت ارتقاء راندمان

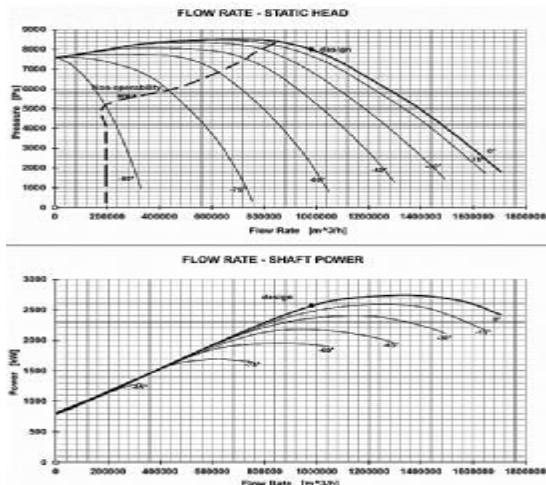
عملکردی فن‌ها

باتوجه به این‌که راندمان فن‌های نیروگاه شازند در بیشینه ظرفیت کارکرد کنونی به حدود 51 درصد می‌رسد، برای افزایش راندمان و کاهش توان مصرفی الکتروموتور آنها چهار راهکار مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از:

1. استفاده از فن جدید منطبق با شرایط کارکرد کنونی
2. کاهش دور موتور فن با استفاده از درایو دور متغیر
3. کاهش دور موتور فن با استفاده از کولپینگ هیدرولیکی

هر فن دارای یک الکتروموتور مجزا به توان 5 مگاوات می‌باشد. به منظور مشخص نمودن وضعیت عملکرد فن‌ها، اندازه‌گیری‌های لازم انجام و پس از جمع‌آوری اطلاعات شرایط کارکرد آنها، تحلیل کارایی فن‌ها صورت پذیرفته است. در زمان اندازه‌گیری بار واحد 4 نیروگاه 301 مگاوات و بویلر نیروگاه در حال کار با سوخت گاز بوده است. مطابق با اطلاعات سیستم مانیتورینگ، درصد بازشدگی دمپر ورودی فن‌ها 28 درصد، متوسط فشار استاتیکی جریان هوای خروجی از هر فن برابر با 6300 پاسکال و مقدار هوای تامین شده توسط هر فن در ورودی ویندباکس برابر با 224 مترمکعب در ثانیه (806400 مترمکعب در ساعت) می‌باشد. میزان نشت هوا به مسیر دود در ژانگستروم در حالت طراحی برابر با 8 درصد پیش‌بینی شده است که در شرایط کنونی مطابق با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقدار نشت هوا به جریان گازهای احتراق در ژانگستروم برابر با 22 درصد می‌باشد که در این صورت مقدار هوای واقعی تامین شده توسط هر فن برابر با 983808 متر مکعب در ساعت می‌گردد. در محل اندازه‌گیری فشار استاتیکی، سرعت جریان هوا برابر با 29,2 متر در ثانیه، چگالی برابر با 0,92 کیلوگرم بر مترمکعب و فشار دینامیکی 392 پاسکال می‌باشد. مطابق با این اطلاعات و رابطه (1) راندمان فن در شرایط کارکرد کنونی 51% به دست می‌آید.

فن‌های در حال کار کنونی در سال 1384 جایگزین فن‌های اولیه نیروگاه شده‌اند. فن‌های اولیه به دلیل مسائل مکانیکی توسط شرکت شنیانگ با فن‌های موجود مورد تعویض واقع شده است. مطابق با اطلاعات طراحی فن‌های اولیه قطر ایمپلر این فن‌ها 2/6 متر بوده است. به دلیل عدم تحویل مدارک مهندسی، منحنی عملکرد این فن‌ها موجود نمی‌باشد از همین رو با استفاده از قوانین تشابه و روابط (7) و (8) منحنی عملکرد این فن‌ها ترسیم، و همراه با منحنی سیستم



شکل (4): منحنی عملکرد فنهای پیشنهادی جهت تعویض با فنهای موجود

مطابق با منحنی عملکرد ارائه شده، در صورت تعویض فنهای موجود با فنهای پیشنهادی، توان مصرفی الکتروموتور هر فن برای تامین دبی 983808 مترمکعب در ساعت و فشار استاتیکی 6300 پاسکال برابر با 2369 کیلووات خواهد بود که باتوجه به توان مصرفی کنونی به مقدار 3712 کیلووات، 1343 کیلووات صرفه جویی به ازاء هر فن حاصل خواهد گردید. در این شرایط راندمان کل مکانیکی فن مطابق با رابطه (1) برابر با 80 درصد است که با در نظر گرفتن راندمان الکتروموتور به مقدار 96,5 درصد، راندمان کل سیستم برابر با 77,2 درصد می گردد.

4-2- کاهش دور موتور به منظور بهبود راندمان فن موجود

سازندگان، فنها را بگونه ای طراحی می نمایند که ماکزیمم راندمان، بر اساس پارامترهای فرآیندی در نظر گرفته شده در طراحی آنها حاصل گردد. از همین رو در نیروگاه شازند حداکثر راندمان از فنهای موجود زمانی قابل دستیابی خواهد بود که دمپر ورودی در حداکثر زاویه بازشدگی قرارداشته باشد تا فن در نقطه طراحی خود کار نماید ولی از آنجا که نقطه کارکرد در نظر گرفته شده برای طراحی فن خیلی بیشتر از نیازهای سیستم می باشد لازم است تا در حداکثر زاویه باز شدگی دمپر؛ دور فن را به گونه ای کاهش داد تا ظرفیت کارکرد فن در بیشینه راندمان منطبق بر نیاز سیستم گردد. از همین رو در ادامه پس از معرفی روشهای کنترل ظرفیت کارکرد فن، راهکارهای مرتبط با این بخش مورد بررسی قرار گرفته اند. بطور کلی دو روش برای کنترل جریان ورودی به فن وجود دارد:

4. استفاده از الکتروموتور با دور پایین تر بجای الکتروموتور موجود

در ادامه تاثیر هریک از راهکارهای پیشنهاد شده در کاهش مصرف انرژی الکتریکی فنهای دمنده هوای بویلر واحد شماره 4 نیروگاه شازند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

4-1- استفاده از فنهای راندمان بالا با مشخصه های طراحی جدید

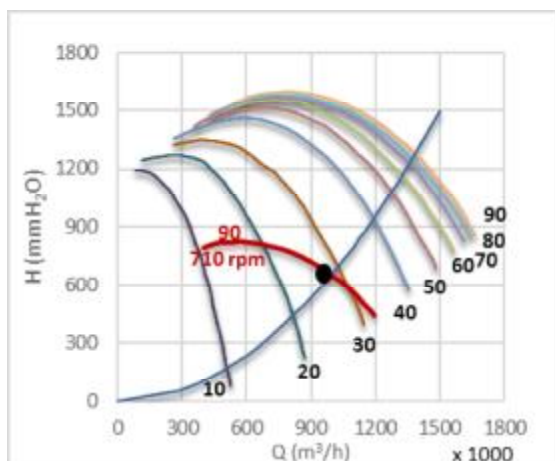
در این طرح استفاده از فنها با راندمان بالاتر بجای فنهای موجود، که منطبق بر نیازهای کنونی سیستم طراحی گردیده اند پیشنهاد شده است. فن پیشنهادی از نوع سانتریفیوژ با انحناء پره رو به عقب¹² می باشد. این نوع از فنها در نقطه کار بهینه¹³ دارای راندمان بالاتر نسبت به فنهای سانتریفیوژ نوع فرورارد می باشند. پارامترهای مورد استفاده طراحی این فنها منطبق با شرایط کارکرد کنونی نیروگاه می باشد و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب انتخاب گردیده اند، در جدول (2) نمایش داده شده است.

جدول (2): پارامترهای مورد استفاده در سایزینگ فنهای جدید

مقدار	واحد	مشخصه طراحی
983808	m ³ /hr.	دبی هوا
8000	Pa	اختلاف فشار استاتیکی

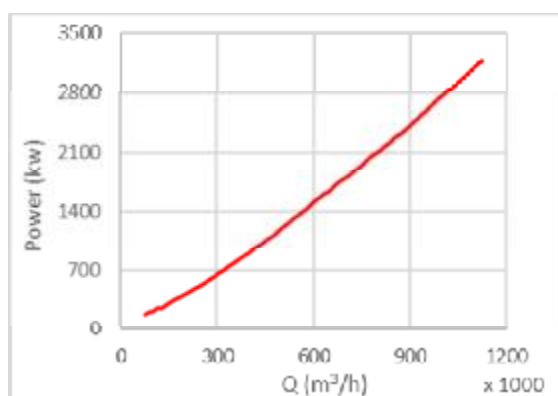
همانطور که در جدول (2) مشاهده می گردد، فشار استاتیکی تامین شده توسط هر فن بیشتر از نیاز سیستم می باشد که این امر سبب می گردد در صورت نیاز به دبیهای بالاتر و یا افزایش افت فشار در سیستم، فن جوابگوی نیاز بویلر باشد. منحنی عملکرد فن پیشنهادی در شکل (4) نمایش داده شده است.

¹² Backward Curved Centrifugal Fan
¹³ Best Efficiency Point



شکل (5): منحنی عملکرد فنهای موجود در سرعت چرخش 710 دور در دقیقه

با استفاده از قوانین تشابه و منحنی عملکرد فنهای اولیه توان الکتریکی مورد نیاز فنهای موجود در صورتیکه سرعت دوران آن 710 دور بر دقیقه باشد، برای تامین دبی هوای مورد نیاز سیستم به مقدار 983808 مترمکعب در ساعت و فشاراستاتیکی 6300 پاسکال، 2812 کیلووات به دست خواهد آمد. در محاسبه این مقدار رابطه توان مکانیکی مورد نیاز فن موجود به دبی عبوری از آن در سرعت 710 دور بر دقیقه مطابق شکل (6) بوده است.



شکل (6): منحنی توان فن موجود در سرعت 710 دور در دقیقه

راندمان کل مکانیکی فن در سرعت 710RPM نیز با احتساب توان مورد نیاز به مقدار 2812 کیلووات، برابر با 65 درصد خواهد بود که با در نظر گرفتن راندمان الکتروموتور و راندمان سیستم کاهش دور (90%)، مقدار صرفه جویی در توان مصرفی الکتروموتور هر فن برابر با 472 کیلووات خواهد گردید. رسیدن به این مقدار صرفه جویی تنها با استفاده از درایو دور متغیر امکان پذیر خواهد بود.

1. استفاده از تجهیزات کنترل کننده جریان مانند دمپر یا پره راهنما در ورودی و خروجی فن
2. تغییر سرعت فن

مطابق با نتایج تحقیقات و تئوری حاکم بر روشهای کنترل جریان، کنترل دبی هوای عبوری فن با استفاده از روشهای تغییر سرعت به مراتب کارآمدتر می باشد. برای تغییر سرعت فن می توان از درایو دور متغیر و یا کوپلینگ هیدرولیکی استفاده نمود. که در درایوها با تغییر فرکانس دور موتور تغییر می یابد و در کوپلینگ هیدرولیکی نیز سیال روغن، نیروی مکانیکی محور موتور را به محور فن انتقال داده و با تغییر مقدار دبی روغن می توان سرعت چرخش محور فن را تنظیم نمود.

با توجه به این که نیروگاه سازند نیروگاه بار پایه می باشد و ظرفیت تولید هر واحد آن در بیشتر مواقع بین 280 تا 300 مگاوات متغیر است و کمتر در بارهای پایین کار می کند لذا هدف از بکارگیری ادوات کنترل دور، تنها کاهش دور فن به یک میزان مشخص است تا ماکزیمم راندمان عملکردی حاصل گردد. از همین رو یکی از راهکارهای دیگر در بهبود عملکرد فنها از طریق تعویض الکتروموتور موجود با یک الکتروموتور با تعداد قطب بالاتر و سرعت دوران کمتر می باشد.

4-2-1- محاسبه مقدار کاهش سرعت دوران فن به منظور رسیدن به راندمان بهینه در فنهای موجود

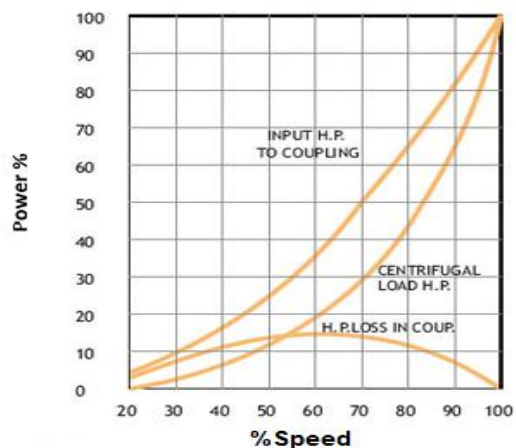
به منظور محاسبه مقدار کاهش سرعت جهت رسیدن به راندمان بهینه در فنهای موجود، با استفاده از قوانین تشابه منحنی عملکرد فنها در بازشدگی کامل دمپر، با تغییر سرعت و به روش سعی و خطا بر نقطه کار سیستم منطبق شده است. طبق این روش چنانچه سرعت چرخش فن از 990 به 710 دور بر دقیقه کاهش یابد منحنی سیستم، منحنی عملکرد فن را در بیشترین زاویه بازشدگی دمپر قطع نموده که علاوه بر تامین هوای مورد نیاز بویلر در بیشینه بار واحد، راندمان مطلوب و توان مصرفی بهینه حاصل خواهد شد.

همانطور که در شکل (7) نمایش داده شده است، کوپلینگ هیدرولیکی از یک طرف به محور الکتروموتور و از طرف دیگر به محور ایمپلر فن متصل است.



شکل (7): شماتیک کوپلینگ هیدرولیکی و محل قرار گیری آن

به هنگام نصب کوپلینگ هیدرولیکی، الکتروموتور همواره در دور نامی خود کار می نماید و با تغییر ظرفیت کارکرد فن، مقدار روغن موجود در محفظه کوپلینگ تغییر کرده و این امر سبب می گردد تا مقدار نیروی انتقال یافته از طریق پروانه پمپ کوپلینگ به پروانه توربین آن متفاوت گردد و سرعت چرخش فن که محور آن متصل به پروانه توربین کوپلینگ می باشد، تنظیم گردد. به دلیل اختلاف سرعت چرخش پروانه و پمپ ایمپلر، مقداری از توان مکانیکی فن در کوپلینگ هدر می رود که این مقدار اتلاف مطابق با نمودار شکل (8)، هنگامی که نسبت سرعت چرخش فن به سرعت چرخش الکتروموتور برابر با 0,667 می باشد، مقدار اتلافات مکانیکی در بیشینه مقدار خواهد بود.



شکل (8): تغییرات توان ورودی، خروجی و اتلافات در کوپلینگ هیدرولیکی نسبت به تغییرات سرعت

در طرح کاهش دور چرخش فن، نسبت دور فن به دور موتور برابر با 0,71 می باشد که در این حالت راندمان کوپلینگ برابر با 71,3 می باشد که با در نظر گرفتن راندمان فن (65%) و الکتروموتور (96,5%)، توان مصرفی

الکتروموتور هر فن برابر با 4089,6 کیلووات خواهد گردید که بیشتر از توان مصرفی کنونی فن می باشد و تاثیر دمپر نصب شده در ورودی فن در کاهش توان مصرفی بهتر از کوپلینگ هیدرولیکی می باشد.

4-2-2- محاسبه راندمان فن های موجود با تعویض الکتروموتور

همان طور که اشاره گردید نیروگاه شازند یک نیروگاه بار پایه است که در اکثر مواقع واحدهای مختلف آن در بارهای ثابت در حال کار بوده و تغییرات بار واحدها معمولاً بین 280 تا 310 مگاوات می باشد. این امر سبب می گردد که تغییرات مقدار هوای مورد نیاز احتراق بویلر کم و کاهش دور فن تنها به منظور بهبود راندمان فن انجام پذیرد و میزان کاهش دور مقدار ثابتی باشد.

یک راهکار دیگر به منظور کاهش سرعت دوران فن های موجود، جایگزینی موتور با دور پایین تر بجای الکتروموتورهای موجود می باشد. سرعت یک الکتروموتور AC بر اساس رابطه زیر به فرکانس تغذیه و تعداد قطب های موتور بستگی دارد [10]:

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \quad (10)$$

در این رابطه f فرکانس منبع تغذیه بر حسب هرتز و p تعداد قطب های موتور است (عدد صحیح و زوج). با توجه به فرکانس برق 50 هرتز در ایران، سرعت موتور با تعداد 8 قطب برابر با 750 می گردد که نزدیک به مقدار سرعت مورد نیاز، 710 دور در دقیقه می باشد. در سرعت دوران فن به مقدار 750 RPM نیز با استفاده از قوانین تشابه، راندمان فن مورد محاسبه قرار گرفته که برابر با 62 درصد بوده است. در این حالت مقدار توان مصرفی الکتروموتورهای جدید برابر 3057 کیلووات و مقدار کاهش توان مصرفی برابر با 655 کیلووات خواهد بود که لازمه آن استفاده از یک الکتروموتور به توان 3,2 مگاوات و دور 750 RPM برای هر فن می باشد.

5- تحلیل اقتصادی راهکارهای پیشنهادی

در بخش قبل نتایج راهکارهای پیشنهادی در کاهش توان مصرفی فن های دمنده هوای احتراق بویلر واحد شماره 4 نیروگاه شازند، بواسطه ارتقاء راندمان عملکرد فن ها مورد بررسی واقع شد. به منظور تصمیم گیری در خصوص انتخاب راهکار بهینه لازم است، هزینه های سرمایه گذاری هر یک

جدول (3): نتایج تحلیل اقتصادی راهکار تعویض فن موجود با فن راندمان بالای منطبق بر مشخصه‌های کارکرد سیستم

قیمت برق Rial/kwh		واحد	پارامتر
2000	1250		
3712	3712	KW	توان مصرفی فن کنونی
51	51	%	راندمان کل فن موجود
2369	2369	KW	توان مصرفی فن جدید
80	80	%	راندمان کل فن جدید
1343	1343	KW	توان الکتریکی صرفه جویی شده
10233	10233	Mwh/yr.	انرژی الکتریکی صرفه جویی شده
20467	12792	mRial/yr.	درآمد طرح
24500	24500	mRial	هزینه اجرای راهکار
1,2	1,9	Years	مدت بازگشت سرمایه

5-2- تحلیل اقتصادی راهکار نصب درایو بر روی الکتروموتور فن

همانطور که در بند (4-2-2) اشاره گردید، با نصب درایو بر روی الکتروموتور موجود می‌توان سرعت چرخش فن کنونی را از 990 به 710 دور در دقیقه کاهش داد و سبب بهبود راندمان عملکردی فن گردید. در جدول (4) تاثیر بکارگیری این راهکار جمع‌بندی شده است. مطابق با نتایج بدست آمده و براساس قیمت جهانی و صادراتی برق، زمان بازگشت سرمایه اجرای این راهکار به ترتیب برابر با 5,07 و 8,1 سال می‌باشد.

جدول (4): نتایج تحلیل اقتصادی راهکار نصب درایو بر روی الکتروموتور فن

قیمت برق Rial/kwh		واحد	پارامتر
2000	1250		
3712	3712	KW	توان مصرفی فن کنونی
51	51	%	راندمان کل فن موجود
2975	2975	KW	توان مصرفی فن با نصب درایو
65	65	%	راندمان کل فن با نصب درایو
90	90	%	راندمان سیستم کنترل دور
472	472	KW	توان الکتریکی صرفه جویی شده
3596	3596	Mwh/yr.	انرژی الکتریکی صرفه جویی شده
7193	4496	mRial/yr.	درآمد طرح
36500	36500	mRial	هزینه اجرای راهکار
5,07	8,1	years	مدت بازگشت سرمایه

از راهکارها نیز مشخص شود و با در نظر گرفتن نتایج تحلیل اقتصادی، میزان صرفه‌جویی و محدودیت‌های فنی هر یک از راهکارها، طرح نهایی جهت اجرا انتخاب گردد.

در تحلیل اقتصادی هر یک از راهکارها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری هر طرح، مطابق با آخرین قیمت استعلام شده از سازندگان تجهیز لحاظ گردیده است. همچنین به منظور محاسبه درآمد ناشی از صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی، دو مقدار برای قیمت برق به ازای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است: (1) قیمت جهانی مبادلات برق (2000 Rial/kwh) (2) قیمت صادراتی برق ایران (1250 Rial/kwh).

در محاسبه صرفه‌جویی انرژی الکتریکی سالیانه ناشی از پیاده‌سازی راهکارهای پیشنهادی، مطابق با آمار تولید واحد 4 نیروگاه در سال 93، ساعت کارکرد سیستم برابر با 7620 ساعت در نظر گرفته شده است که در اکثر مواقع بار واحد بین 280 تا 300 مگاوات متغیر بوده است.

در خصوص هزینه‌های پیاده‌سازی هر یک از راهکارها، کلیه هزینه‌های مهندسی، تامین تجهیزات، نصب، تست و راه اندازی مورد استعلام واقع شده و در تحلیل‌های اقتصادی لحاظ گردیده است.

5-1- تحلیل اقتصادی راهکار تعویض فن‌های کنونی با فن‌های راندمان بالای منطبق بر مشخصه‌های کارکرد سیستم

مطابق با نتایج تحلیل اثر بخشی راهکار در بخش (4-1)، راندمان فن پیشنهادی جدید برای تامین دبی هوا به مقدار 983808 متر مکعب در ساعت و تامین فشار استاتیکی به مقدار 6300 پاسکال برابر با 80 درصد می‌باشد که با در نظر گرفتن راندمان موتور به مقدار 96,5 درصد، 1343 کیلووات صرفه جویی در توان مصرفی الکتروموتور فن را در پی خواهد داشت. در جدول (3) نتایج پیاده‌سازی این راهکار بر روی هر فن دمنده هوای بویلر نیروگاه شازند مورد جمع‌بندی واقع شده است. مطابق با نتایج بدست آمده و بر اساس قیمت جهانی و صادراتی برق، زمان بازگشت سرمایه اجرای این راهکار به ترتیب برابر با 1,2 و 1,9 سال خواهد بود.

5-3- تحلیل اقتصادی راهکار تعویض الکتروموتور

فن

همانطور که اشاره گردید با تعویض الکتروموتورهای موجود و استفاده از موتور با تعداد قطب بالاتر می‌توان سرعت چرخش فن را به 750 RPM کاهش داد که نتیجه آن افزایش راندمان کل فن به حدود 62 درصد و کاهش توان مصرفی به مقدار 655 کیلووات به ازاء هر فن می‌باشد. جدول (5) نتایج تحلیل اقتصادی راهکار تعویض الکتروموتور را نشان می‌دهد که بر اساس قیمت جهانی و صادراتی برق، زمان بازگشت سرمایه اجرای این راهکار به ترتیب برابر با 1,1 و 1,8 سال می‌باشد.

جدول (5): نتایج تحلیل اقتصادی راهکار تعویض الکتروموتور

پارامتر	واحد	قیمت برق Rial/kwh	
		2000	1250
توان مصرفی فن کنونی	KW	3712	3712
راندمان کل فن موجود	%	51	51
توان مصرفی فن با موتور جدید	KW	3057	3957
راندمان کل فن	%	62	62
توان الکتریکی صرفه جویی شده	KW	655	655
انرژی الکتریکی صرفه جویی شده	Mwh/yr.	4991	4991
درآمد طرح	mRial/yr.	9982	6238
هزینه اجرای راهکار	mRial	11000	11000
مدت بازگشت سرمایه	years	1,1	1,8

6- نتیجه‌گیری

هر بویلر نیروگاه شازند دارای دو فن دمنده هوا می‌باشد که در شرایط کارکرد کنونی و مطابق با پایش بعمل آمده، راندمان هر یک از آنها در حدود 51 درصد و متوسط توان الکتریکی مصرفی الکتروموتور هر فن در حدود 3712 کیلووات می‌باشد. در این مطالعه برای افزایش راندمان فن‌ها و کاهش توان مصرفی چهار راهکار مورد بررسی قرار گرفت. در راهکار اول تعویض فن‌های موجود با فن‌هایی با راندمان بالاتر مورد بررسی قرار گرفت که با اجرای این راهکار، راندمان 80 درصد و توان مصرفی 2369 کیلووات برای فن‌های نیروگاه امکان پذیر است. در ادامه تاثیر کاهش سرعت چرخش فن از 990 به 710 دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه این تغییر سرعت، افزایش راندمان فن به 65 درصد می‌باشد، که در صورت بکارگیری درایو دور متغیر جهت کاهش سرعت، مقدار کاهش توان مصرفی الکتروموتور فن برابر با 472 کیلووات گردید و

بکارگیری کوپلینگ هیدرولیکی به دلیل راندمان پایین، باعث افزایش توان مصرفی الکتروموتور فن خواهد شد. در راهکار چهارم نیز، تعویض الکتروموتور موجود با الکتروموتوری با دور 750 دور در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن افزایش راندمان فن به 62 درصد و کاهش توان مصرفی به 3057 کیلووات می‌باشد. مطابق با نتایج تحلیل‌های فنی و اقتصادی، محدودیت‌های فنی شناسایی شده در هنگام اجرا، موارد تعمیراتی و بهره‌برداری مطرح شده از سوی کارشناسان نیروگاه در خصوص راهکارهای پیشنهادی، در نهایت راهکار استفاده از فن راندمان بالا که بر اساس شرایط کنونی سیستم طراحی شده است، جهت اجرا پیشنهاد گردیده است.

7- سپاسگزاری

بدینوسیله از شرکت مدیریت تولید برق شازند اراک که در تهیه و جمع‌آوری اطلاعات و بازدید از نیروگاه همکاری و مساعدت نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

8- مراجع

[1] Bruno. E. (1973) *Fans, Design and Operation of Centrifugal, Axial-flow, and Cross-Flow Fans*, Pergamon Press, Oxford, NY.

[2] AMCA (2007). *Improving Fan System Performance: a sourcebook for industry*, U.S. Department of Energy.

[3] Cermak, J., Murphy, J. (2011). "Select fans using fan total pressure to save energy." *ASHRAE Journal* 53(7).

[4] "Energy efficiency assessment: Improving fan system efficiency using Variable Speed Drives." ABB AG, Power Systems Division. www.abb.com/powergeneration.

[5] "Getting the Speed Right. Voith Variable Speed Fluid Couplings." Voith Turbo GmbH & Co. KG. www.voith.com/vsd.

[6] شرکت مهندسی آسیاوات، طرح تعویض فن دمنده هوای بویلر نیروگاه شازند، 1394.

[7] Traver, D. G. (1971) "System Effects on Centrifugal Fan Performance." *ASHRAE Symposium Bulletin Fan Application Testing and Selection*.

[8] Hatch, C & Associates. "A Guidebook to Electrical Energy Savings at Lumber Dry Kilns through Fan Speed Reduction." Bonneville Power Administration Portland, OR.

[9] "Market Baseline Evaluation Report: Fan Speed Reduction in Pneumatic Conveying Systems in the Secondary Wood Products Industry." (1999). SBW Consulting, Northwest Energy Efficiency Alliance.

[10] "Motor Efficiency, Selection, and Management: A Guidebook for Industrial Efficiency Programs" (2013). CEE Motors and Motor Systems Committee.