مقاله

پیشرفت فناوری و ملاحظات طراحی در توربین‌های بخار

جعفر آقایاری*
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک، پژوهشگاه نیرو
jaghayari@nri.ac.ir

سید سعید اسدزاده
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک، پژوهشگاه نیرو
ssasadzade@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۲۰

چکیده

با توجه به تلاش‌های انجام‌شده برای کاهش وابستگی صنعت به سوخت‌های فسیلی به‌دلیل تجدیدناپذیری و کاهش قیمت برق تولیدی از یک‌سو و تولید کمتر دی اکسید کربن برای جلوگیری از گرم‌شدن کرهٔ زمین از سوی دیگر، افزایش بازدهی نیروگاه‌ها، خصوصاً نیروگاه‌های بخار، همواره یکی از روش‌های مؤثر به‌منظور نیل به این هدف بوده است. در این مقاله سعی شده است بحث جامعی پیرامون توربین بخار به‌عنوان قلب و المان اصلی نیروگاه‌های بخار، که منابع کمی در مورد آن موجود است، انجام شود. تکامل توربین بخار از بدو ورود به صنعت تاکنون براساس سه عامل مهم؛ یعنی افزایش فشار و دمای بخار، بهینه‌سازی سیکل و بهینه‌سازی مسیر بخار بوده است که در این مقاله تشریح می‌شوند. برای تکمیل بحث پیرامون توربین بخار، طراحی مکانیکی، ملاحظات طراحی و موارد حائز اهمیت در این حوزه همچون بارهای اعمالی به یک توربین بخار، فناوری مواد مورد استفاده و همچنین فناوری جوش در ادامه بررسی شده‌اند. در انتها نیز آینده‌پژوهی فناوری توربین بخار در قالب برنامه‌های توسعهٔ کشورهای پیشتاز تولیدکنندهٔ این نوع توربین‌ها مطرح می‌شود.

واژگان کلیدی: طراحی توربین بخار، زیربحرانی، فوق‌بحرانی، توربین بخار نیروگاهی

۱. مقدمه

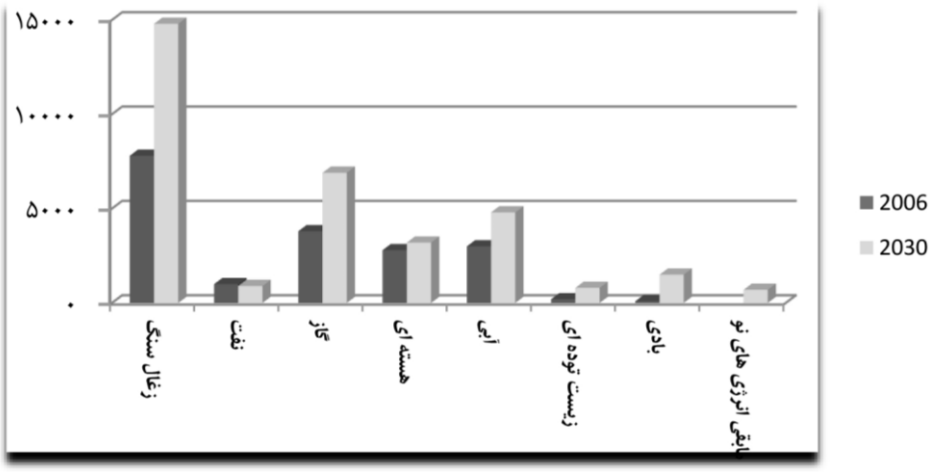
با افزایش همه‌روزهٔ جمعیت کرهٔ زمین و همچنین نیاز به مصرف برق در مجامع توسعه‌یافته و در حال توسعه، از آغاز قرن بیستم توربین‌های بخار نقش مهمی در تولید الکتریسیته ایفا کرده‌اند. امروزه بیش از ۷۰ درصد برق تولیدی از طریق نیروگاه‌هایی تأمین می‌شود که در مرحلهٔ آخر برای تولید توان الکتریکی از توربین بخار استفاده می‌کنند [۱]. از جمله دلائل آن نیز سازگاری این نیروگاه‌ها با انواع سوخت‌ها از قبیل زغال سنگ، زغال قهوه‌ای[۱]، گاز طبیعی، شکافت هسته‌ای، زیست توده‌ای و حتی انرژی خورشیدی است. همچنین تولید برق توسط بخار از ایمنی و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است. در شکل ۱ وابستگی تولید الکتریسیته در جهان را در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۳۰ م نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که باوجود رشد سهم انرژی‌های نو همچنان سوخت‌های فسیلی

به‌دلیل ارزانی زغال سنگ و در نتیجه توربین بخار به‌عنوان واحد اصلی تولید برق سهم قابل توجهی در تولید الکتریسیته در جهان خواهند داشت. با توجه به سهم بزرگ سوخت‌های فسیلی در تولید الکتریسیته، در آینده به توربین‌های بخار همچنان نیاز خواهد بود. اما الزامات فنی تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد کرد. جلوگیری از گرم‌شدن کرهٔ زمین ایجاب می‌کند که تولید دی اکسید کربن کاهش یابد. از جمله روش‌های مؤثر برای نیل به این هدف همواره افزایش بازدهی نیروگاه‌ها و از جمله نیروگاه‌های بخار بوده است که این امر طی سالیان عمر نیروگاه بخار انگیزهٔ تلاش‌هایی برای طراحی بهینهٔ اجزای نیروگاهی شده است. همچنین افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی نیز به اهمیت این مهم افزوده است. به‌طور کلی برای طراحی و ساخت مناسب و همچنین افزایش بازدهی یک نیروگاه حرارتی بخاری سه رویکرد وجود دارد: افزایش پارامترهای بخار (شامل دما و فشار بخار)، طراحی بهینهٔ سیکل (مانند استفاده از بازگرم) و نهایتاً طراحی ائرودینامیکی اجزا (مانند پروفیل‌های مناسب پره‌ها، طراحی سیل‌های مناسب و جز این‌ها). مشاهده می‌شود موارد سه‌گانهٔ فوق همگی در جزء جدایی‌ناپذیر یک نیروگاه بخار؛ یعنی توربین بخار، بسیار حائز اهمیت می‌باشند. در این مقاله به مطالعهٔ سیر تحول و آیندهٔ توربین‌های بخار نیروگاهی پرداخته می‌شود. مطالعهٔ بویلر و کندانسور و دیگر اجزای نیروگاه خارج از بحث این مقاله است.

۲. سیر پیشرفت فناوری توربین بخار

نیروگاه‌های بخار را برحسب فشار و دمای کاری می‌توان به چهار دستهٔ کلی نیروگاه‌های زیربحرانی[۲]، فوق‌بحرانی[۳]، ماوراءبحرانی[۴] و ماوراءبحرانی پیشرفته[۵] تقسیم کرد (جدول ۱). نیروگاه‌های زیربحرانی اغلب نیروگاه‌هایی هستند که در آن حداکثر فشار در سیکل بخار زیر فشار بحرانی آب است. این فشار برابر ۲۲/۱ مگاپاسکال است. در فشارهای بالاتر از آن تفاوتی بین حالت بخار و مایع در سیال وجود ندارد. بنابراین سیستم چرخش طبیعی، که بر اساس تفاوت چگالی بین بخار و مایع می‌باشد و سبب جدایی بخار از مایع می‌شود، وجود ندارد. در این حالت از بویلرهای یکبارگذر[۶] که فاقد درام هستند استفاده می‌شود. علاوه بر این در بویلرهای فوق‌بحرانی به‌دلیل افزایش فشار و دما، ضخامت و جنس مواد نیز تغییر خواهد کرد. در شکل‌های ۲ و ۳ سیر تغییرات فشار، دما، بازدهی، توان و تغییرات جنس مواد از فناوری‌های زیربحرانی به‌سمت نیروگاه‌های پیشرفته در طی عمر این نوع توربین‌ها نمایش داده شده است.

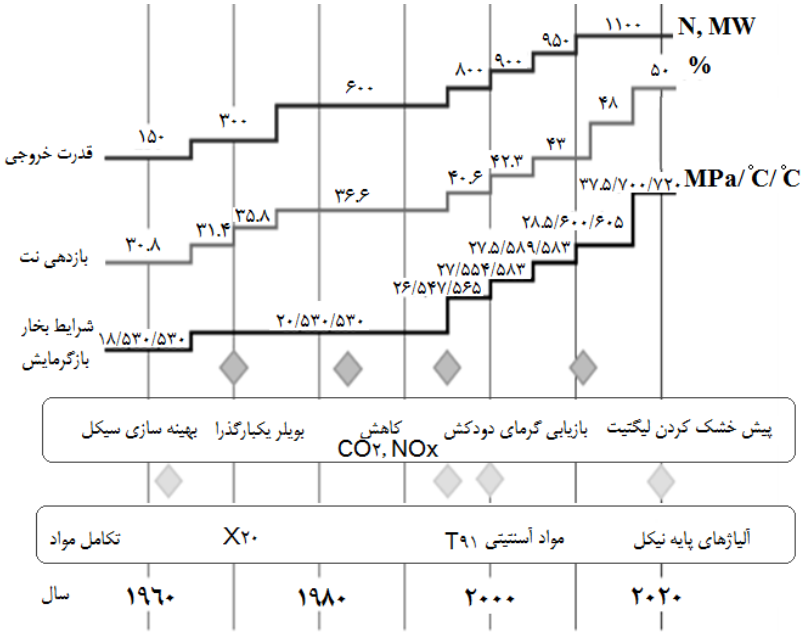
تولید برق در جهان برحسب تراوات ساعت



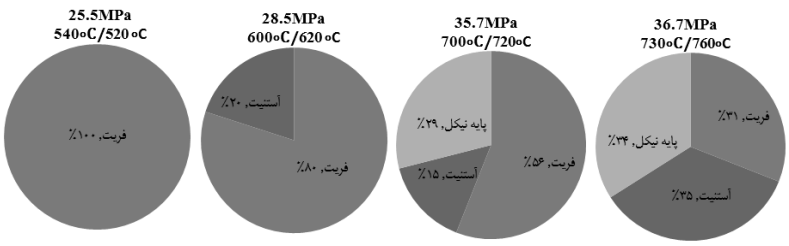
شکل ۱. وابستگی تولید برق در جهان در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۳۰ م [۲]

جدول ۱. انواع نیروگاه‌های بخار

	زیربحرانی	فوق‌بحرانی	ماوراءبحرانی	ماوراءبحرانی پیشرفته
دمای فوق‌گرم (سانتی‌گراد)	۵۴۱	۵۸۲	۶۰۴	۶۸۰
فشار فوق‌گرم (بار)	۱۷۹	۲۶۲	۲۷۶	۳۵۲
دمای بازگرم (سانتی‌گراد)	۵۴۱	۵۸۲	۶۰۴	۷۰۰
فشار بازگرم (بار)	۳۵/۹	۵۷/۹	۶۵/۵	۷۳/۵



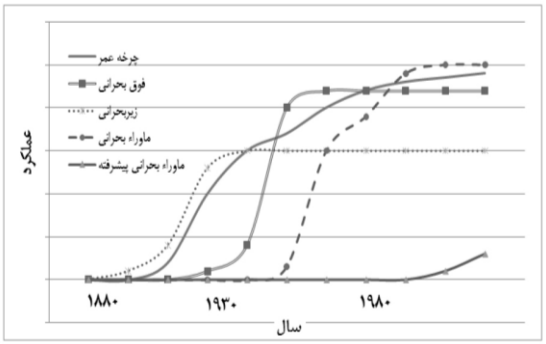
شکل ۱. سیر تکامل پارامترهای توربین بخار [۳]



شکل ۳. خواص متفاوت مورد نیاز توربین بخار برای شرایط مختلف [۳]

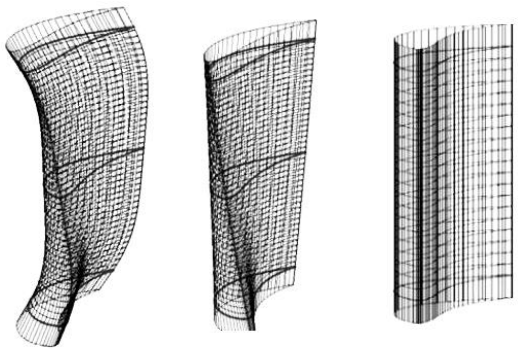
نخستین توربین بخار در سال ۱۸۸۳ م توسط دلاوال[۷] ارائه شد که به‌صورت ضربه‌ای بود. در سال ۱۸۸۴ م نیز اولین توربین عکس‌العملی ارائه شد. اولین توربین صنعتی شرکت جنرال الکتریک با توان ۵۰۰ کیلووات نیز در سال ۱۹۰۱ م تولید شد [۴]. در دهۀ ۱۹۵۰ م، رشد زیادی در اندازۀ نیروگاه‌ها رخ افتاد و توربین‌هایی با شرایط فوق‌بحرانی گسترش یافتند. با توجه به شکل ۲ و مطالعات روند تولید محصولات شرکت‌های مختلف توربین بخار در جهان، چرخۀ عمر انواع مختلف توربین بخار در شکل ۴ نمایش داده شده است. طبق چرخۀ عمر توربین بخار به‌جز فناوری

ماوراءبحرانی پیشرفته سایر فناوری‌ها به بلوغ رسیده‌اند. مرحلهٔ گذرای نمودار معرف دورهٔ عمر فناوری است که دوره‌های جنینی، رشد، بلوغ و زوال را طی می‌کند. امروزه توربین‌های سیکل‌های ساده نیروگاهی در محدودهٔ فشار فوق‌بحرانی قرار دارند و توربین‌های زیربحرانی عمدتاً به‌صورت سیکل ترکیبی، صنعتی، مخصوص انرژی‌های نو و هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۴. چرخهٔ عمر فناوری توربین بخار [۵]

توربین بخار همواره به‌عنوان سیستم اصلی تولید برق در جهان مطرح بوده و شرکت‌های متعددی در تولید و گسترش فناوری‌های آن حضور داشته‌اند. شرکت‌های بزرگی چون آلستوم، جنرال الکتریک[۸]، زیمنس[۹]، میتسوبیشی[۱۰]، ال. ام. زد.[۱۱] و دوسان[۱۲] در صنعت توربین بخار حضور دارند. شرکت‌هایی چون شانگهای و مپنا در ایران تحت لیسانس یکی از شرکت‌های بزرگ توربین بخار تولید می‌کنند. این تجهیزات دسته‌بندی‌های متنوعی دارند. یک دسته‌بندی بر اساس فشار و دمای بخار اصلی است. دستهٔ دیگر بر اساس تقطیری یا پشت فشاری بودن است. خود توربین طی مراحل انبساط نیز به چند بخش تقسیم می‌شود که در حالت معمول دارای طبقات فشار قوی[۱۳]، فشار متوسط[۱۴] و فشار ضعیف[۱۵] است. معمولاً با افزایش فشار بخار اصلی و با ثابت‌ماندن فشار کندانسور، انبساط بزرگی انجام شده و به تعداد طبقات فشار ضعیف بیشتری نیاز خواهد بود. با تولید پره‌های بلند برای ردیف آخر توربین امکان تجمیع طبقات آخر و کوچک‌کردن هرچه بیشتر روتور فراهم شده است [۴، ۶]. در ردیف‌های اولیهٔ توربین بخار برای کاهش نیروی تراست از پره‌های ضربه‌ای استفاده می‌شود و در مراحل میانی به بعد از پره‌های عمدتاً عکس‌العملی که موارد اخیر جهت کارکرد در بارهای میانی مناسب‌ترند. با پیشرفت فناوری پره‌های سه‌بعدی برای بخش فشار قوی و میانی توسعه یافته‌اند که ضریب عکس‌العملی متغیر در طول روتور و ارتفاع پره دارند.



شکل ۲. نمایی از الف) پرهٔ استوانه‌ای معمولی
ب) پرهٔ گردابه‌ای، ج) پرهٔ سه‌بعدی [۷]

۲-۱. فشار و دما در توربین‌های بخار

در گذر از فناوری زیربحرانی به فناوری فوق‌بحرانی فشار از مقدار بحرانی آب افزایش خواهد یافت و جهت افزایش بازدهی علاوه بر فشار لازم است دما نیز افزایش یابد. افزایش این دو پارامتر اجزای اصلی نیروگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از جمله قسمت‌هایی که بسیار تحت تأثیر این دو پارامتر هستند بویلر و توربین می‌باشند. معمولاً با افزایش فشار طراحی اجزای میانی و انتهایی در توربین تغییر چندانی نمی‌کند و اغلب طراحی باید برای اجزای فشار بالای توربین انجام پذیرد که نیازمند ضخامت بیشتر اجزاء می‌باشند. با این‌حال افزایش فشار سبب افزایش تلفات می‌شود که در طراحی آب‌بندها می‌بایست مد نظر قرار گیرد. افزایش دما در سیکل نیروگاهی مطابق سیکل رانکین بیشترین تأثیر را روی بازدهی دارد و سازندگان سعی بر آن دارند تا بتوانند تا حد ممکن دمای سیکل را بالا ببرند. برای

سازگاری با دماهای بالاتر اجزای اصلی توربین باید از آلیاژهای جدید با مقاومت خزشی بالاتر ساخته شوند.

۲-۲. بهینه‌سازی سیکل بخار

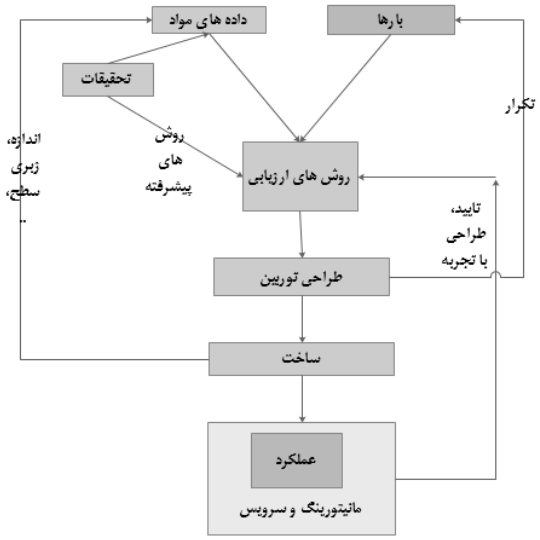
افزایش فشار و دما در توربین‌های بخار مخصوصاً در توربین‌های فوق‌بحرانی سبب افزایش بازدهی سیکل بخار می‌شود، البته مشکلاتی نیز به‌همراه دارد. با افزایش فشار در یک سیکل ساده، کیفیت بخار در مراحل آخر توربین کاهش می‌یابد و سبب ایجاد سایش در پره‌های ردیف آخر می‌شود. همچنین برای افزایش بازدهی لازم است تا بخار در مراحل میانی بازگرمایش شود تا با اکسرژی بالاتری وارد مراحل بعدی شود و قابلیت انجام کار و در نتیجه بازدهی آن افزایش یابد. همچنین در یک نیروگاه بخار برای پیش‌گرمایش بخار و یا کاربردهای دیگر لازم است مقداری از بخار در مراحل میانی از توربین خارج شود که این کار نیز به نوبهٔ خود سبب بالارفتن بازدهی نیروگاه و همچنین کاهش اندازهٔ توربین در مراحل پایانی کم‌فشار توربین خواهد شد. در بررسی تأثیر تعداد بازگرمایش‌ها و زیرکش‌ها و جز این‌ها در سیکل نیروگاه پیووارسکی به بررسی این پارامترها پرداخته است [۸]. محاسبات وی نشان می‌دهد استفاده از دو سیستم بازگرمایش بخار می‌تواند بازدهی نیروگاه بخار را به ۵۱ درصد برساند. همچنین استفاده از دو بار بازگرمایش بخار تا دمای حدود ۷۰۰ درجه، بازدهی سیکل حدود ۱/۵ درصد نسبت به سیکل با یک بازگرمایش و حدود ۹ درصد نسبت به سیکل ساده رانکین - کلازیوس افزایش می‌یابد. البته افزایش تعداد مبدل‌ها و بازگرمایش هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و شاید توجیه اقتصادی نداشته باشد، مثلاً در توربین‌های با فشار خط اصلی متوسط یا پایین بازگرمایش بخار توجیه اقتصادی ندارد [۹].

۲-۳. طراحی بهینهٔ مسیر بخار

برای سالیان متمادی سازندگان توربین‌های بخار برای شناخت بیشتر سازوکارهای افت که سبب کاهش عملکرد بهینهٔ مراحل توربین بخار می‌شود تحقیقات گسترده‌ای انجام داده‌اند. با گسترش پردازشگرها قدرتمند و استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی[۱۶] مسیر جریان مدلسازی و تلاش شده است تا این افت‌ها چه در اجزای متحرک و چه در اجزای ثابت پیش‌بینی و در نهایت حداقل شوند. ویژگی‌های گوناگونی توسط سازنده‌های توربین بخار برای کاهش افت جریان در اجزای توربین پیشنهاد و اجرا شده است. این ویژگی‌ها شامل پره‌های پیچشی و گردابه‌ای و سه‌بعدی (شکل ۵)، آب‌بندهای پیشرفته، پره‌های بلند پیشرفتهٔ ردیف اخر، هودهای بهبودیافته مسیر خروج جریان و کنترل بهتر نشتی‌های بخار در مسیر جریان و جز این‌ها می‌شوند. استفاده از پره‌های سه‌بعدی به‌تنهایی می‌تواند تا ۲ درصد بازده مرحله به مرحلهٔ توربین را افزایش دهد [۱۰]. طراحی و ساخت آب‌بندهای پیشرفته همچون آب‌بندهای برسی و آب‌بندهای انقباضی تأثیر فراوانی در کاهش افت‌های نشتی داشته است [۴].

شکل ۶. افت‌های معمول در قسمت پرفشار توربین [۱۱]

شکل ۷ افت‌های معمول در اجزای توربین بخار را به‌صورت درصدی از افت کل توربین نشان می‌دهد. افت‌های پروفیل نازل و پره‌های متحرک، جریان ثانویه و نشتی حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد افت‌های توربین بخار را شامل می‌شوند.



شکل ۳. فلسفهٔ طراحی برای توربین‌های بخار [۱]

چهار مرحلهٔ اصلی طراحی بهینهٔ ائرودینامیکی مسیر در شرکت‌های سازندهٔ توربین بخار شامل مراحل زیر است:

۱. توسعهٔ بهتر برنامه‌های کامپیوتری مناسب دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی و بررسی بهتر رفتار پیچیدهٔ جریان
۲. توسعهٔ مفاهیم طراحی جدید برای بهبود بازدهی پایدار با استفاده از کدهای سی. اف. دی.
۳. انجام آزمایشات گسترده برای معتبرسازی نتایج شبیه‌سازی کدهای عددی
۴. توسعهٔ ابزار قوی و مناسب برای برای اجراکردن طراحی‌های سه‌بعدی پیشرفته

۳. سیر پیشرفت در طراحی مکانیکی توربین‌های بخار بزرگ

طی بیش از یکصد سال تجربهٔ توربین بخار، سازندگان فلسفه‌های طراحی مکانیکی را توسعه داده‌اند. این فلسفه بر اساس تجربه و تحقیقات بسیار به‌دست آمده است. با توجه به تقاضای مشتریان توربین بخار برای عمر بیشتر توربین، بازده و انعطاف‌پذیری بالاتر، دقت و صحت فلسفه‌های طراحی روزبه‌روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. بیشتر اجزای مورد استفاده در سیکل بخار نیروگاه‌های بزرگ مثل اجزای بویلر، مخازن تحت فشار و لوله‌ها دارای کدها و استانداردهای مختلف همچون استانداردهای انجمن مهندسان مکانیک امریکا هستند که اطلاعات جامعی همچون لیست مواد، اطلاعات طراحی مواد، تضمین کیفیت، روش‌های ساخت، قوانین طراحی و پایش در حین عملکرد را دربر می‌گیرند. برای اجزای توربین بخار چنین استانداردهایی وجود ندارد. یکی از دلائل مهم این است که تنها فشار پارامتر طراحی نمی‌باشد و طراحی توربین‌های بخار تحت تأثیر پارامترهای مهم دیگری نظیر بارهای پیچیده، سازوکارهای شکست چندگانه و اثر متقابل اجزای مختلف مانند روتور و پوسته است. البته علاوه بر کدها و استانداردها، روش‌های طراحی عمومی نیز وجود دارد. دستورالعمل انرژی بریتانیایی آر. ۵[۱۷] و آر. ۶[۱۸] یا راهنمای آلمانی اف. کا. ام.[۱۹] از این قبیل‌اند. طراحی توربین‌های بخار بر اساس این دستورالعمل‌ها نیز نمی‌تواند صورت گیرد؛ زیرا آنها همهٔ قوانین و اطلاعات ضروری برای طراحی ایمن توربین بخار را شامل نمی‌شوند. همهٔ این استانداردها و کدها ویژگی مشترکی دارند که برای بارهای خاصی طراحی شده‌اند [۱]. از اصول طراحی می‌توان به فلسفهٔ طراحی که در حال حاضر توسط شرکت زیمنس به‌کار گرفته می‌شود اشاره کرد. این فلسفه اجازهٔ استفادهٔ بهینه و اقتصادی‌تر از مواد را می‌دهد. فلسفهٔ طراحی توربین بخار در شکل ۷ آمده است. علاوه بر در نظر گرفتن استانداردها و کدها، این فلسفه بر اساس تست مواد، تحقیقات در زمینهٔ سازوکارهای شکست مواد و رفتار اجزای توربین می‌باشد که همواره در حال بهبود می‌باشد. دو ورودی اصلی این فرایند طراحی بارها و شرایط مرزی اجزاء و جنس مواد می‌باشند که در ادامه تشریح خواهند شد.

۳-۱. بارهای اعمالی به توربین

بارهای اعمالی به یک توربین بخار علاوه بر آثار ساخت و نصب مانند تنش‌های پسماند و شرایط اعمالی توسط اتصال پیچ‌ها و شرینک‌فیت‌ها، از شرایط دما و فشار بخار ناشی

می‌شود. برخی از این آثار طبیعت پایا دارند، برخی نیز دارای طبیعت کم‌چرخه‌اند مانند انبساط‌های گرمایی که در حین راه‌اندازی توربین دارای اهمیت هستند و همچنین برخی از این آثار نیز دارای ماهیت با چرخهٔ بالا مانند تنش‌های خمشی اعمال‌شده در شفت‌ها و پره‌های در حال دوران‌اند. علاوه بر آن آثاری که به محیط کاری نیز مربوطند از جمله اکسیداسیون، خوردگی و فرسایش نیز باید مورد توجه قرار گیرند. تمامی آثار ذکرشده باید برای طراحی، تحلیل و انتخاب مواد یک توربین بخار مد نظر قرار گیرند. خلاصه‌ای از شرایط بارهای اصلی به شرح زیر است:

الف) دمای فلزات مورد استفاده:

۱. در ورودی‌های فشاربالا و فشارپایین بسیار بالا (در توربین بخارهای امروزی حدود ۶۲۰ درجه)
۲. در راه‌اندازی‌ها و قسمت‌های فشارپایین توربین پایین (موجب سطح خیس در این بخش‌ها می‌شود)

ب) بارهای استاتیک:

۱. نوع اولیه: فشار بخار داخل و خارج، نیروهای گریز از مرکز، گشتاور اعمالی به‌دلیل بار، نیروهای ناشی از جریان
۲. نوع ثانویه: اتصالات (پیچ‌ها و شرینک‌فیت‌ها)، و انبساط‌های گرمایی

ج) بارهای دینامیکی که سبب تنش و کرنش در تعداد مشخص سیکل کاری می‌شوند:

۱. چرخهٔ پایین: انبساط‌های گرمایی در طول راه‌اندازی، تغییر بار و خاموش‌کردن توربین
۲. چرخهٔ بالا: تنش‌های خمشی متناوب شفت‌ها به‌دلیل وزن، نامیزانی، نیروهای دینامیکی جریان، ارتعاشات خودتحریک
۳. بارهای ضربه‌ای: تغییرات ناگهانی در شرایط بخار، اتصال کوتاه، حوادث طبیعی مانند زلزله

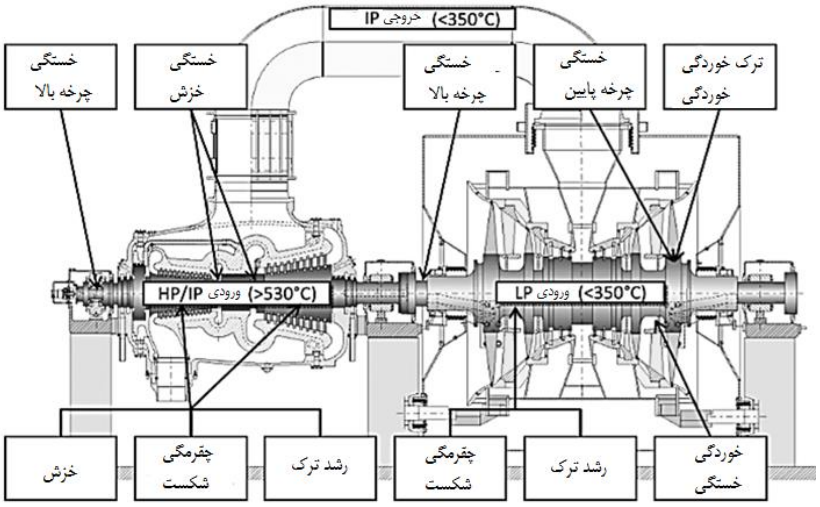
د) آثار محیطی: اکسیداسیون، خوردگی، فرسایش

در دماهای بالای ۴۰۰ درجه فلزات در معرض خزش قرار می‌گیرند که این رفتار به زمان کاری آنها بستگی دارد؛ به‌همین دلیل در زمان طراحی نیز به‌عنوان یک پارامتر بار برای دماهای بالا باید مورد توجه قرار گیرد. در اجزای توربین بخار ممکن است چندین شرایط باری که در بالا ذکر شد رخ دهد. بسته به اجزاء و محل قرارگیری آنها، بارهای مختلف منجر به شکست‌های مختلف اجزاء می‌شود. تلفیق این بارها از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا اثر متقابل بارهای مختلف مانند خزش و خستگی رشد آسیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان نمونه توزیع بارها و سازوکارهای شکست احتمالی برای یک توربین ۳۰۰ مگاواتی در شکل ۸ آورده شده است. در پره‌های بلند ردیف آخر، خستگی کم‌چرخه و خوردگی از عوامل اصلی شکست هستند.

۳-۲. مواد مورد استفاده در توربین بخار

پیشرفت در فناوری توربین بخار همانند سایر فناوری‌ها بسیار متأثر از پیشرفت در فناوری مواد است. با توجه به اجزاء و بارهای اعمالی به آن، رفتار و خواص متفاوت برای اجزاء نیاز است. جدول ۲ خواص ضروری برای اجزای اصلی توربین بخار را نشان می‌دهد.

امروزه خزش، یکی از مهمترین و بحرانی‌ترین بحث‌های توربین بخار است؛ زیرا چرخهٔ عمر طراحی این محصولات طبق تقاضای مشتری از ۱۰۰ هزار ساعت به ۲۰۰ هزار ساعت افزایش پیدا کرده است. بنابراین تست‌های طولانی و روش‌های برون‌یابی دقیقی باید توسعه یابند و مورد اعتبارسنجی قرار گیرند. طی دهه‌های اخیر، آلیاژهای فولادی با تحمل خزش در دماهای بالا (فولادهای ۱۲-۹ کرومو) توسعه یافته‌اند و با موفقیت در بازار توربین بخار عرضه شده‌اند. با استفاده از این فولادها، در مقایسه با فولاد آلیاژی ۱ کرومو، حدود ۵۰ تا ۷۰ درجه کلوین افزایش دمای بخار بدون اینکه طراحی تغییر قابل ملاحظه‌ای کند ممکن است. مواد مورد استفاده در توربین‌ها تا دمای حدود ۵۶۶ درجه تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کنند. در دماهای بالاتر به موادی با استحکام بالاتر نیاز است.



شکل ۸. بارها و سازوکارهای شکست احتمالی در یک توربین [۱]

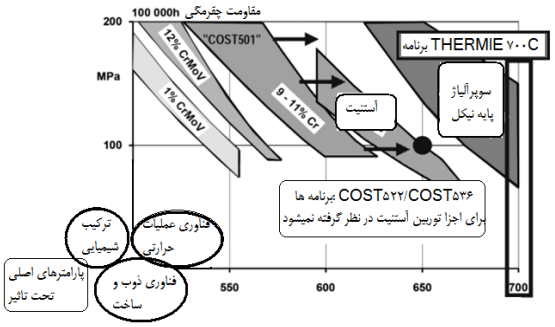
جدول ۲. الزام‌های مواد برای کاربرد در طراحی توربین بخار [۱]

Requirements	HP- & IP-Rotors	LP-Rotors, LP-Discs	HP- & IP-Casings	HP- & IP-Blades	LP-Blades	HP- & IP-Bolts
Static strength: tensile strength	●	●	●	●	●	●
Creep Rupture Strength: creep behaviour	●		●	●		●
Toughness: fracture toughness	●	●	●	●	●	●
Fatigue properties: Low cycle fatigue (LCF)	●	●	●	●	●	●
High cycle fatigue (HCF)	●	●		●	●	
Crack growth: static - Creep CG	●		●			●
alternating - Fatigue CG	●	●	●			●
Corrosion local corrosion		●		●	●	●
stress corrosion cracking		●			●	●
corrosion fatigue		●			●	
Erosion behaviour	●	●	●	●	●	
Oxidation behaviour	●		●	●		●

جدول ۳. مواد رایج در قسمت‌های مختلف فشار بالای توربین بخار [۱۲]

۵۶۶ درجه	۶۲۰ درجه	۷۰۰ درجه	۷۶۰ درجه	اجزاء
CrMoV(cast) 10CrMoVNb	9-10%Cr(W) 12CrW(Co) CrMoWVNbN	VF8C+ CCA617 Inconel 625 In &18	CCA617 Inconel 740	پوسته، جداره (شیرآلات، گلوگاه بخار، نازل باکس، سیلندر)
422 9-12%CrMoV Nimonic 80A IN718	9-12%CrMoV A286 IN718	Nimonic 263, 105, 115 Waspaloy IN718	U700 U710 U720 Nimonic 105, 115	اتصالات
1CrMoV 12CrMoVNbN 26NiCrMoV115	9-12%CrWCo 12CrMoWVNBN	CCA617 Inconel 625 Haynes 230 Inconel 740	CCA617 Inconel 740	روتورها، دیسک
422 10CrMoVNbN	9-12%CrWCo	فرج پایه نیکل	فرج پایه نیکل	پره‌ها
P22	P92	CCA617	Inconel 740	لوله‌ها

دسته‌بندی جنس مواد برای دماهای مختلف در اجزای فشار بالای توربین در جدول ۳ آمده است. در دماهای بالاتر از نیکل و آلیاژهای پایه نیکل جهت افزایش استحکام بیشتر استفاده می‌گردد. در دماهای بالاتر اجزای اصلی توربین بخار نمی‌توانند از آلیاژهای فولادی ساخته شوند؛ زیرا این آلیاژها در دماهای بالا دارای مقاومت گسیختگی خزشی کم (که موضوع مهمی در توربین بخار است) می‌باشند. لذا در برنامه‌های آینده برای ساخت مواد مقاوم‌تر در دماهای بالاتر آلیاژهای پایهٔ نیکل مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکل ۹).



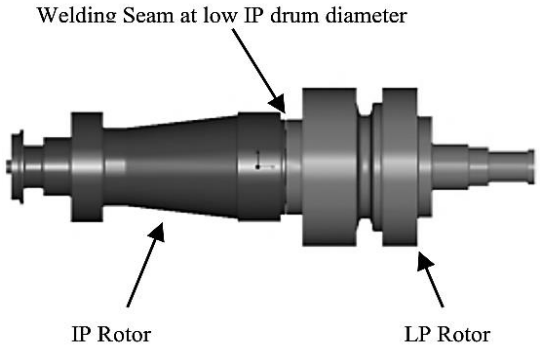
شکل ۹. مقاومت گسیختگی خزشی برای مواد مختلف [۱۳]

استفاده از این آلیاژها برای روتورهای بزرگ و پوسته‌های با ضخامت بالای توربین بخار چالش بزرگی محسوب می‌شود؛ زیرا روش ساخت این اجزاء بسیار متفاوت از اجزای محصولات دیگر مانند توربین گاز، که از این مواد بهره می‌برند، می‌باشد. به‌دلیل فشارهای بسیار بالا در توربین‌های بخار نسل آینده، که حدوداً ۱۵ برابر بیشتر از توربین گازی می‌باشند، اجزای توربین‌های بخار بسیار ضخیم‌تر و با سطح مقطع بزرگتر می‌باشند. لذا چالش اصلی فناوری مواد و روش ساخت آنها تولید اجزای بزرگ پایهٔ نیکل است. روتورهای توربین بخار معمولاً از روش فورج ساخته می‌شوند. فورج اجزای کوچک پایهٔ نیکل کار سخت و پیچیده‌ای نیست، در حالی‌که فورج اجزای بزرگ بسیار مشکل و پیچیده‌تر است. به‌همین دلیل امکان‌سنجی استفاده از این مواد در برنامه‌های کشورهای توسعه‌یافته مانند کشورهای اروپایی قرار دارد. اجزای ریخته‌گری بسیار بزرگ مانند پوسته و ولوهای توربین بخار نیز به‌دلیل پیچیدگی هندسی چالش دیگری در ساخت اجزای توربین بخار محسوب می‌شوند.

۳-۳. فناوری جوش در اجزای توربین بخار

با افزایش فشار و دما به‌نظر می‌رسد که فقط اجزای در معرض دما و فشاربالا مانند ورودی قسمت فشاربالای توربین یا ورودی قسمت فشار میانی توربین که جریان آن بازگرمایش شده است، لازم است از آلیاژهای مقاوم‌تر مانند پایهٔ نیکل ساخته شوند. لذا با این روش نیاز است اجزای توربین چندتکه ساخته و در نهایت به‌هم جوش داده شوند که فناوری‌های جوش این مواد به یکدیگر نیز یکی از موارد چالش‌برانگیز توسعهٔ صنعت توربین بخار در جهان محسوب می‌شود. همچنین برای مواد جوش و همچنین مواد پایه انجام تست‌های غیرمخرب مانند تست اولتراسونیک نیز باید امکان‌پذیر باشد. به‌علت ساختار دانه‌ای آلیاژهای پایهٔ نیکل و پژواک‌های تداخلی در جوش‌ها، تست فراصوت نیز یکی از چالش‌های بزرگ در زمینهٔ تحقیقات استفاده از آلیاژهای پایهٔ نیکل شده است. آلیاژهای پایهٔ نیکل نسبت به فولادهای کروم‌دار در دماهای بالا رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. بنابراین فلسفهٔ طراحی توربین‌های بخار کنونی برای بررسی مقاومت مکانیکی که بدون تست مستقیم برای آلیاژهای پایهٔ نیکل می‌باشد، به‌راحتی قابل تعمیم نیستند. فلسفهٔ طراحی توربین‌های گازی نیز در این مورد کمکی نخواهند کرد؛ زیرا فشار بالای بخار توربین‌های بخار نیازمند طراحی متفاوت از توربین‌های گازی است. اندازه و جرم‌های اجزا مورد نیاز بسیار بزرگتر از آنها در توربین گازی می‌باشند [۱۳]. با این‌حال شرکت‌های سازندهٔ توربین بخار سعی در استفاده از این فناوری داشته و با استفاده از تست و مطالعات در این زمینه توانسته‌اند از این فناوری استفاده کنند. به‌عنوان نمونه در توربین سری K شرکت زیمنس طراحی به‌صورتی است که در آن پوستهٔ خارجی اصلاً در معرض جریان دمابالا قرار نمی‌گیرد و

جریان دمابالا با استفاده از گایدها و حلقه‌های L شکل مستقیماً به‌درون پوستهٔ داخلی و پره‌های HP و IP هدایت می‌شود. بنابراین، مواد مورد استفاده در پوسته‌های خارجی می‌تواند چدن کروی[۲۰] باشد که سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های ساخت توربین می‌شود. استفاده از روتورهای جوشکاری شده نیز می‌تواند سبب صرفه‌جویی در مصرف مواد سوپرآلیاژ شود. برای مثال در توربین سری E زیمنس خواص مواد لازم برای قسمت داغ IP با پره‌های کوچک و قسمت‌های سرد LP با پره‌های بلند کاملاً از هم متفاوتند. ترکیب مواد مختلف برای روتور خواص مکانیکی بهینه‌ای را برای محدودهٔ دمایی وسیع بازگرم می‌دهد. تا دمای ۵۶۵ درجه فولاد ۲د رصد کروم برای قسمت‌های IP و پوستهٔ داخلی استفاده می‌شود. در دمای ۶۰۰ درجه مواد روتور و پوستهٔ داخلی با فولاد ۱۰ درصد کروم جایگزین می‌شوند. قسمت‌های LP نیز از فولاد با ۳/۵ درصد نیکل ساخته می‌شوند. در شکل ۱۰ روتور این نوع توربین نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. روتور جوشکاری‌شده برای توربین سری E زیمنس [۷]

۳-۴. توربین‌های ماژولار

در گذار از فناوری زیربحرانی به فرابحرانی، معمولاً هر دو پارامتر فشار و دما افزایش می‌یابند. تأثیر افزایش دما در افزایش بازدهی بیشتر از تأثیر افزایش فشار است. لذا یکی از روش‌های مناسب برای رسیدن به بازدهی‌های بالاتر استفاده از توربین‌های زیربحرانی با دمای سیال بالاتر از ۵۶۶ درجه است که مورد توجه سازندگان بزرگ توربین از جمله شرکت زیمنس می‌باشد. نمونه‌ای از آن توربین‌ها سری K زیمنس است که در چهار اندازه ساخته می‌شوند و محدودهٔ کاری ۱۰۰ تا ۷۰۰ مگاوات را پوشش می‌دهند و در همهٔ این چهار مدل به‌منظور استفاده از ویژگی‌های طراحی یکسان، از یک فلسفهٔ طراحی با توجه به مفهوم مقیاس‌گذاری استفاده شده است [۷]. باید توجه داشت در این موارد با افزایش دما در قسمت‌های اصلی توربین تنها جنس مواد تغییر خواهد کرد و طراحی توربین‌ها یکسان است. یکی از دلائل اقبال شرکت‌ها به مدل‌های ماژولار کاهش تنوع توربین‌های زیربحرانی به‌منظور کاهش هزینه‌هاست که در مواردی چون سیکل ترکیبی، خورشیدی، بایومس و سیکل ساده استفاده می‌شوند.

۴. آینده‌پژوهشی

در برنامه‌های آیندهٔ کشورهای سازندهٔ توربین بخار، ساخت و به‌کارگیری توربین‌های ماوراءبحرانی پیشرفته طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ م مشاهده می‌شود. در این میان امریکا با هدف رسیدن به دمای ۷۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد سعی در افزایش بازدهی و کاهش حدود ۲۰ درصدی مقادیر دی اکسید کربن را دارد. اروپا، ژاپن و چین دمای بخار ۷۲۰ درجه را هدف برنامه‌های خود قرار داده‌اند. خلاصه‌ای از برنامه‌های این کشورها در جدول ۴ ارائه شده است.

افزایش بازدهی تا ۵۵ درصد، افزایش طول پره‌های ردیف آخر با استفاده از تیتانیوم و مواد با استحکام بالا جهت افزایش سطح جریان و کاهش طول روتور و کاهش وزن و هزینه‌ها، ارائهٔ طراحی‌های پیشرفته سه‌بعدی با اتلاف کمتر برای پره‌های ثابت و متحرک، توسعهٔ واحدهای بزرگ بالای ۱۰۰۰ مگاوات به‌طور سری و موازی جهت کاهش هزینهٔ تولید برق، گسترش فناوری IGCC یا گازی‌سازی زغال سنگ جهت کاربرد واحدهای گازی به‌همراه بخاری، توسعه و تحقیق پیرامون آب‌بندهای بهینه‌تر و پیشرفته‌تر، تحقیق پیرامون بهینه‌سازی جهت استارت سریع توربین بخار و حداقل‌سازی تنش‌های حرارتی پسماند مواردی

هستند که در پژوهش‌های آینده توربین بخار مورد توجه سازندگان می‌باشد [۵].

جدول ۴. مواد رایج در قسمت‌های مختلف فشاربالای توربین بخار [۳]

کشور	مرحله فناوری	اهداف	برنامه‌ها
اروپا	بیشتر از ۵۷ گیگاوات نیروگاه بخار زغال سنگی یا در حال ساخت (۲۰۰۴)	دما: ۷۰۰ تا ۷۲۰ درجه، فشار: ۳۵ تا ۳۹ مگاپاسکال، بازدهی بیشتر از ۵۰ درصدف توان: ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات، کاهش دی اکسید کربن	پروژهٔ FT7: NextGenPower.MACPLUS برنامهٔ AD700: COMTES+ENCIO.HWT II
امریکا	بیشتر از ۱۰۰ گیگاوات نیروگاه بخاری	دما: ۷۶۰ درجه، فشار: ۳۵ مگاپاسکال، بازدهی نت ۴۵ تا ۴۷ درصد، توان: ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاوات، کاهش دی اکسید کربن تا ۱۵ الی ۲۲ درصد	برنامهٔ نیروگاه ماوراء بحرانی پیشرفته. مجری DOE و OCDO
ژاپن	بیشتر از ۱۷ گیگاوات نیروگاه بخار ماوراءبحرانی زغال سنگی (۶۰۰ درجه و فشار ۲۵ مگاپاسکال)	دما: ۷۰۰ تا ۷۲۰ درجه، فشار: ۳۵ مگاپاسکال، بازدهی نت ۴۶ تا ۴۸ درصد، توان: ۱۰۰۰ مگاوات، کاهش دی اکسید کربن تا ۱۵ درصد	پروژهٔ توسعه فناوری ماوراءبحرانی پیشرفته مجری CEIETP
چین	بیشتر از ۷۰ گیگاوات نیروگاه بخار ماوراءبحرانی زغال سنگی، ۳۱۷ گیگاوات سفارش نیروگاه بخار ماوراءبحرانی	دما: ۷۰۰ تا ۷۲۰ درجه، فشار: ۳۵ مگاپاسکال، بازدهی بیشتر از ۵۰ درصد، کاهش دی اکسید کربن	برنامهٔ وزارت انرژی: نیروگاه بخاری ماوراءبحرانی ۷۰۰ درجه تولید لوله‌های بحرانی برای واحدهای ماوراءبحرانی پیشرفته: وزارت علم و فناوری پروژه‌های تحقیقاتی ملی

۵. نتیجه‌گیری

بیش از یک قرن از تولید توربین بخار می‌گذرد. به‌واسطهٔ نیاز به آن، نسل‌های مختلف توربین بخار به‌صورت زیربحرانی، فوق‌بحرانی و ماوراءبحرانی ارائه شده‌اند و تحقیقات روی نسل ماوراءبحرانی پیشرفته با بازدهی نزدیک ۵۵ درصد ادامه دارد. دما و فشار بخار دو پارامتر اصلی در سیر پیشرفت این فناوری است. عامل اصلی محدودکننده، دمای بخار اصلی است که با افزایش آن لازم است روش‌های ساخت اجزای ضخیم از آلیاژهای با استحکام بالای پایه نیکل توسعه یابد. ورود کامپیوتر و کدهای تحلیل مکانیکی امکان طراحی و ارائه پروفیل‌های پیشرفتهٔ سه‌بعدی و با حداقل تلفات را ممکن ساخته و پره‌های بلند ردیف آخر و میسرشدن جوشکاری روتورهای ترکیبی امکان تجمیع طبقات و کاهش هزینه‌ها را ممکن ساخته است.

۶. مآخذ

[1] Lueckemeyer, N., et al. "Mechanical Design Of Highly Loaded Large Steam Turbines." Proceedings of ASME Turbo Expo GT2011-45703, 2011, pp. 6-10.

[2] World Energy Outlook, Paris: International Energy Agency, 2008.

[3] Rogalev, Nikolay, et al. "A Survey of State-of-the-Art Development of Coal-Fired Steam Turbine Power Plant Based on Advanced Ultrasupercritical Steam Technology." *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 7, 2014, pp. 1807-1825.

[4] Leyzerovich, Alexander S. *Steam turbines for modern fossil-fuel power plants*, Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc., 2008.

[۵] آقایاری، جعفر، علی بیگ رضایی، سعید اسدزاده. *تدوین سند توسعه فناوری توربین‌های بخار نیروگاهی*، جلد ۲، تبیین ابعاد موضوع، محدودهٔ مطالعات و مشخصه‌های فناوری، تهران: پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۳.

[6] ReinKer, J. K. *Steam turbine for large power application (GER-3646D)*, General Electric Company.

[7] Pollak, Helmut. *Design And Materials For Modern Steam Turbines With Two Cylinder Design Up To 700 MW*, Siemens AG, Power Generation.

[8] Piwowarski, Marian. "Optimization Of Steam Cycles With Respect To Supercritical Parameters." *Polish Maritime Research* 16, 2009, pp. 45-51.

[9] Sanders, William P. *Turbine Steam Path Mechanical Design and Manufacture*, PennWell Corporation, 2004.

[10] Michael, W., Leo Rainer, Scholten Christof. *Steam Turbine Modernization Solutions Provide A Wide Spectrum Of Options To Improve Performance*, Siemens Power Generation (PG), 2005.

[11] Cofer, J. I., IV, J.K. Reinker, W.J. Sumner. *ADVANCES IN STEAM PATH*, GE Power Systems.

[12] Wright, I.G. Materials Issues For Turbines For Operation In Ultra-Supercritical Steam, U.S. Department of Energy.

[13] Lückemeyer, N., H. Kirchner, and H. Almstedt. "Challenges in advanced-USC steam turbine design for 1300 °F/700 °C." *American Society of Mechanical Engineers*, 2012. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition.

پی‌نوشت

۱. زغال قهوه‌ای، زغال سنگ قهوه‌ای (brown coal) یا لیگنیت (Lignite)، نوعی زغال سنگ قهوه‌ای‌رنگ مایل به سیاه است، که درجه زغال‌شدگی آن بین زغال نارس و زغال بیتومینه می‌باشد. قدرت حرارتی زغال قهوه‌ای کمتر از ۸۳۰۰ بی. تی. یو. است. معمولاً آثاری از ساخت اولیهٔ گیاهی نیز در آن پیداست [ویراستار].

2. sub-critical
3. supercritical
4. current USC
5. advanced-USC
6. once through
7. Karl Gustaf Patrik de Laval (845 - 1913)
8. General Electric (GE), http://www.ge.com (accessed October 01, 2015)
9. Siemens AG, http://www.siemens.com (accessed October 02, 2015)
10. Mitsubishi Group, http://www.mitsubishi.com (accessed November 01, 2015)
11. LMZ
12. Doosan Group, http://www.doosan.com (accessed October 02, 2015)
13. HP
14. IP
15 .LP
16. CFD
17. R5
18. R6
19. FKM
20. Globular cast iron