



دانشکده مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

با عنوان:

آنالیز یک بعدی جریان سیال درون توربین بخار

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر علی کشاورزولیان

نگارش:

داود قاسمی

زمستان ۹۰



تقدیم به

همسر، پدر و مادر

مهربانانی که مایه دلگرمی و آرامش بودند



تاسیس ۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیأت داوران

شماره:

تاریخ:

هیأت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان :

آنالیز یک بعدی جریان سیال درون توربین بخار

توسط آقای **داود قاسمی**، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی در تاریخ / / ۱۳ مورد تأیید قرار می دهند.

امضاء

جناب آقای دکتر علی کشاورزولیان

۱- استاد راهنمای اول

امضاء

جناب آقای / سرکار خانم دکتر

۲- استاد راهنمای دوم

امضاء

جناب آقای / سرکار خانم دکتر

۳- استاد مشاور

امضاء

جناب آقای دکتر مهرزاد شمس

۴- ممتحن داخلی

امضاء

جناب آقای دکتر حامدی

۵- ممتحن داخلی

امضاء

جناب آقای دکتر مهرزاد شمس

۶- نماینده تحصیلات
تکمیلی دانشکده

اظهارنامه دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب **داود قاسمی** دانشجوی **کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی **خواجه نصیرالدین طوسی** گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

آنالیز یک بعدی جریان سیال درون توربین بخار

با راهنمایی استاد محترم **جناب آقای دکتر علی کشاورزولیان**، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصاله مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع ، مجاز نمی باشد.

تقدیر و تشکر

اکنون که با یاری خداوند توفیق اتمام پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود را به دست آوردم، لازم می‌دانم از استاد مهربان و بزرگ‌منش جناب آقای دکتر علی کشاورزولیان نهایت سپاسگذاری و امتنان را داشته باشم. که اگر همراهی و کمک این استاد بزرگ نبود شاید این پایان‌نامه به سرانجام نمی‌رسید. امیدوارم در ادامه زندگی و مراتب بعدی کسب علم و دانش از آموزه های علمی و اخلاقی این استاد بهره‌مند شوم.

از تمامی دوستان عزیز و گرام که در تمامی مراحل انجام این پروژه یاری‌گر من بودند و من را راهنمایی کردند کمال قدردانی را دارم و برای آنها از پروردگار متعال آرزوی موفقیت در تمامی مراحل زندگی دارم.

چکیده

استفاده از میکروتوربین‌های جریان شعاعی در سیکل بخار گام جدیدی در مقوله تولید انرژی است. در فشارهای پایین استفاده از بخار آب به عنوان سیال عامل در سیکل بخار رانکین امکان‌پذیر نیست و سیالات ارگانیک مثل مبردها و ترکیبات هیدروکربنی به علت داشتن فشار و دمای بحرانی پایین به عنوان سیال عامل در این سیکل‌ها استفاده می‌شوند. در این پایان‌نامه طراحی هندسی کلی توربین جریان شعاعی به همراه تحلیل جریان سیال عبوری از آن به روش یک بعدی انجام می‌شود. ورودی‌های مسئله شامل فشار و دمای کل، دبی جرمی، نسبت فشار و سرعت مخصوص است و خروجی‌های مسئله شامل کار خروجی، راندمان اکسرژی، ابعاد هندسی توربین و غیره می‌باشد. برای حل معادلات مربوط به آنالیز جریان و ابعاد هندسی توربین از نرم‌افزار *EES(Engineering Equation Solve)* استفاده شده است. روش حل مسئله یک‌بعدی در حالت جریان دائم است. توربین مورد نظر برای استفاده در سیکلی با کار خروجی ۲۰ کیلو وات و فشار ورودی ۱۰ بار مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا در خروجی روتور، دیفیوزر در نظر گرفته نشده است و حل پارامترهای جریان و تعیین ابعاد هندسی توربین برای ۱۰ سیال انجام شده است. سیال‌های بوتان و سایکلوپان به دلیل تامین کار خروجی مورد نیاز، راندمان اکسرژی بالا و اندازه روتور کوچکتر سیالات مناسبی برای استفاده در سیکل بخار رانکین هستند. در شرایطی که فشار ورودی خیلی پایین باشد می‌توان از سایکلوپان به دلیل خشک بودن آن، به عنوان سیال عامل در سیکل رانکین استفاده نمود.

کلمات کلیدی: توربین جریان شعاعی، راندمان اکسرژی، *ORC*، *CCHP*

| فهرست مطالب | شماره صفحه |
|---|------------|
| فصل اول: مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه میکروتوربینها..... | ۱ |
| ۱-۱- تاریخچه..... | ۲ |
| ۱-۲- خصوصیات توربین جریان شعاعی و جریان محوری..... | ۴ |
| ۱-۳- مزایا و معایب میکروتوربینها و سیستمهای ترکیبی توان و گرما (CHP)..... | ۶ |
| ۱-۴- کاربردهای صنعتی CHP..... | ۷ |
| فصل دوم معادلات حاکم و سیستم مختصات:..... | ۹ |
| ۲-۱- قانون اول و دوم ترمودینامیک..... | ۱۰ |
| ۲-۲- معادله حالت سیال..... | ۱۲ |
| ۲-۳- معادله حالت سیال واقعی..... | ۱۲ |
| ۲-۴- جریان در سیستم مختصات چرخشی..... | ۱۵ |
| ۲-۵- سیال عامل..... | ۱۹ |
| فصل سوم: تحلیل جریان و طراحی توربین..... | ۲۳ |
| ۳-۱- هندسه توربین جریان شعاعی..... | ۲۴ |
| ۳-۲- طراحی روتور..... | ۲۵ |
| ۳-۳- تعیین ابعاد نوک روتور..... | ۲۸ |
| ۳-۴- مشخصات مورد نیاز طراحی روتور..... | ۲۹ |
| ۳-۵- درجه عکس العمل..... | ۳۳ |
| ۳-۶- هندسه پره استاتور..... | ۳۳ |
| ۳-۷- اندازه گذاری هندسه استاتور..... | ۳۶ |
| ۳-۸- طراحی محفظه ماریچ..... | ۳۹ |
| ۳-۹- کار خروجی و راندمان اکسرژی..... | ۴۲ |
| فصل چهارم: افتهای توربین جریان شعاعی..... | ۴۳ |
| ۴-۱- ضریب افت نازل..... | ۴۴ |
| ۴-۲- ضرائب افت روتور..... | ۴۴ |
| ۴-۳- افت ناشی از برخورد..... | ۴۵ |
| ۴-۳-۱- زاویه برخورد..... | ۴۵ |
| ۴-۴- افت ناشی از عبور جریان از مجرای روتور..... | ۴۶ |
| ۴-۵- افت ناشی از لقی..... | ۴۷ |

- ۴۸-۴-۶- افت ناشی از اصطکاک دیسک روتور..... ۴۸
- ۴۸-۴-۷- افت ناشی از سرعت جریان در خروجی روتور..... ۴۸
- ۴۹-۴-۸- ضرائب درگ و لیفت..... ۴۹
- ۵۱-۴-۹- آنالیز لایه مرزی..... ۵۱
- ۵۳-۴-۱۰- ضریب افت لایه مرزی..... ۵۳
- ۵۵- فصل پنجم: نتایج مدلسازی..... ۵۵
- ۵۶-۵-۱- مقدمه..... ۵۶
- ۵۷-۵-۲- بررسی تاثیر پارامترها بر شاخصهای طراحی توربین..... ۵۷
- ۵۸-۵-۲-۱- تاثیر فشار ورودی..... ۵۸
- ۶۲-۵-۲-۲- تاثیر دمای ورودی..... ۶۲
- ۶۴-۵-۲-۳- تاثیر نسبت فشار..... ۶۴
- ۶۶-۵-۲-۴- تاثیر دبی جرمی..... ۶۶
- ۶۸-۵-۳- افتها..... ۶۸
- ۶۸-۵-۳-۱- تاثیر فشار..... ۶۸
- ۷۰-۵-۳-۲- تاثیر نسبت فشار..... ۷۰
- ۷۲-۵-۴- هندسه استاتور..... ۷۲
- ۷۳-۵-۴-۱- تاثیر فشار..... ۷۳
- ۷۵-۵-۴-۲- تاثیر دما..... ۷۵
- ۷۷-۵-۴-۳- تاثیر نسبت فشار..... ۷۷
- ۷۹-۵-۴-۴- تاثیر دبی جرمی..... ۷۹
- ۸۱- فصل ششم نتیجه گیری:..... ۸۱
- ۸۲-۶-۱- نتیجه گیری..... ۸۲
- ۸۴-۶-۲- پیشنهادات..... ۸۴

- جدول (۲-۱) - فاکتور آسنتریک سیالات استفاده شده در تحلیل..... ۱۳
- جدول (۲-۲) - سیالات ارگانیک و نوع آنها..... ۲۲
- جدول (۵-۱) - مقایسه نتایج کد با نتایج ناسا و آنگیر..... ۵۷
- جدول (۵-۲) - نتایج به دست آمده برای ابعاد هندسی، کار خروجی و راندمان اکسرژی برای سیالات مختلف با فشار، نسبت فشار و دبی ورودی یکسان..... ۵۸
- جدول (۵-۳) - افتهای دیسک محور، لقی، ضربه و جریان خروجی برای ۱۰ سیال عامل مختلف..... ۷۰
- جدول (۵-۴) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر فشار ورودی با سیال عامل سایکلوهگزان..... ۷۳
- جدول (۵-۵) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر فشار ورودی با سیال عامل بوتان..... ۷۳
- جدول (۵-۶) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر فشار ورودی با سیال عامل *RI23*..... ۷۴
- جدول (۵-۷) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر فشار ورودی با سیال عامل *RI34a*..... ۷۴
- جدول (۵-۸) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دمای ورودی با سیال عامل سایکلوهگزان..... ۷۵
- جدول (۵-۹) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دمای ورودی با سیال عامل بوتان..... ۷۵
- جدول (۵-۱۰) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دمای ورودی با سیال عامل *RI23*..... ۷۶
- جدول (۵-۱۱) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دمای ورودی با سیال عامل *RI34a*..... ۷۶
- جدول (۵-۱۲) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر نسبت فشار با سیال عامل سایکلوهگزان..... ۷۷
- جدول (۵-۱۳) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دمای ورودی با سیال عامل بوتان..... ۷۷
- جدول (۵-۱۴) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر نسبت فشار با سیال عامل *RI23*..... ۷۸
- جدول (۵-۱۵) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر نسبت فشار با سیال عامل *RI34a*..... ۷۸
- جدول (۵-۱۶) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دبی جرمی با سیال عامل سایکلوهگزان..... ۷۹
- جدول (۵-۱۷) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دبی جرمی با سیال عامل بوتان..... ۷۹

جدول (۵-۱۸) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دبی جرمی با سیال عامل *R123* ۸۰

جدول (۵-۱۹) - تغییرات پارامترهای هندسی پره نازل با تغییر دبی جرمی با سیال عامل *R134a* ۸۰

- شکل (۵-۱) - تغییرات قطر ورودی روتور با تغییرات فشار ورودی به توربین..... ۶۰
- شکل (۵-۲) - تغییرات توان خروجی توربین با تغییرات فشار ورودی..... ۶۰
- شکل (۵-۳) - تغییرات راندمان اکسرژی با تغییرات فشار ورودی به توربین..... ۶۱
- شکل (۵-۴) - تغییرات توان خروجی از توربین با افزایش دمای ورودی، با فشار ورودی ثابت $10bar$ ۶۲
- شکل (۵-۵) - تغییرات راندمان اکسرژی با افزایش دمای ورودی، با فشار ورودی ثابت $10bar$ ۶۳
- شکل (۵-۶) - تغییرات شعاع ورودی روتور با نسبت فشار..... ۶۵
- شکل (۵-۷) - تغییرات کار خروجی از توربین بر حسب نسبت فشار..... ۶۵
- شکل (۵-۸) - تغییرات راندمان اکسرژی بر حسب نسبت فشار..... ۶۶
- شکل (۵-۹) - تغییرات شعاع روتور با دبی جرمی..... ۶۷
- شکل (۵-۱۰) - تغییرات توان خروجی از توربین بر حسب دبی جرمی ورودی..... ۶۷
- شکل (۵-۱۱) - تغییرات افت دیسک محور توربین با تغییرات نسبت فشار..... ۷۰
- شکل (۵-۱۲) - تغییرات افت ناشی از جریان خروجی از روتور با تغییرات نسبت فشار..... ۷۱

- شکل (۱-۱) - مقایسه بین راندهاهاى توربین جریان شعاعى و جریان محورى..... ۵
- شکل (۲-۱) - مثلث سرعت در روتور..... ۱۶
- شکل (۲-۲) - نماى شماتیک سطح جریان..... ۱۷
- شکل (۲-۳) - سیستم مختصات طبیعى..... ۱۸
- شکل (۲-۳) - نمودار سیالات با شیب بخار اشباع مختلف..... ۲۱
- شکل (۳-۱) - شمای کلی توربین جریان شعاعى (سانتریفیوژ)..... ۲۲
- شکل (۳-۲) - نقاط مورد نیاز طراحی..... ۲۳
- شکل (۳-۳) - نمودار عمومى راندهاها بر حسب سرعت مخصوص..... ۲۷
- شکل (۳-۴) - شماتیک پره استاتور و مشخصات آن..... ۳۴
- شکل (۳-۵) - شماتیک ایرفویل پره استاتور..... ۳۵
- شکل (۳-۶) - هندسه پره نازل..... ۳۸
- شکل (۳-۷) - محفظه مارپیچ نوع خارجى خارجى..... ۳۹
- شکل (۳-۸) - محفظه مارپیچ نوع داخلى..... ۴۰
- شکل (۵-۱۳) - نماى شماتیک هندسه پره نازل..... ۷۲
- شکل (۵-۱۴) - شکل شماتیک یک پره ساده و بی انحنای نازل..... ۷۲

علایم

| | |
|-----------|------------------------------------|
| A | نقطه حداکثر انحناء، ثابت |
| A | ابعاد هندسی محفظه مارپیچ، سطح مقطع |
| AR | نسبت شکل در محفظه مارپیچ |
| B | عرض مجرا، ثابت |
| B | ابعاد هندسی محفظه مارپیچ |
| C | وتر پره |
| c_p | ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت |
| c_v | ضریب گرمای ویژه در حجم ثابت |
| d | نقطه حداکثر ضخامت |
| D | قطر |
| C | ضریب افت |
| E | اکسرژی |
| F_D | نیروی درگ |
| h | هاب روتور، آنتالپی استاتیکی |
| H | آنتالپی کل، ضریب شکل |
| i | زاویه برخورد ایده‌آل |
| K_b | فاکتور انسداد |
| L | افت، طول خط جریان |
| \dot{m} | دبی جرمی |
| n | ثابت، مولفه سیستم مختصات |
| n_s | سرعت مخصوص |
| N_R | تعداد پره‌های روتور |
| N_N | تعداد پره‌های نازل |
| P | فشار |
| q | گرما، افت بی بعد آنتالپی |
| Q | دبی حجمی |
| r | شعاع |
| R | درجه عکس‌العمل، ثابت گازها |
| s | آنتروپی، گام پره |
| t | ضخامت پره |
| T | دما |
| u | انرژی داخلی، سرعت جریان |
| U | سرعت پره |
| V | سرعت مطلق |
| v | نسبت سرعت |
| w | کار |

| | |
|------------|--------------------------------|
| W | سرعت نسبی، کار خروجی از توربین |
| x | مختصات هندسی در جهت افقی |
| y | مختصات هندسی در جهت عمودی |
| Y_p | ضریب افت پروفیل لایه مرزی |
| z | فاکتور تراکم پذیری |
| Δz | طول محوری توربین |

زیرنویس‌ها

| | |
|-----------|--------------------------|
| 1,2,3,4,5 | نقاط طراحی |
| 0 | شرایط ترمودینامیکی محیطی |
| ave | متوسط |
| l | لیفت |
| c | لقی |
| cr | حالت بحرانی |
| d | خروجی |
| D | درگ |
| df | اصطکاک دیسک |
| ex | خروجی |
| f | اصطکاک |
| h | هاب روتور |
| i | ورودی |
| id | شرایط ایده‌آل |
| incid | ضربه |
| m | مولفه نصف‌النهاری |
| N | نازل |
| opt | حالت بهینه |
| out | خروجی |
| r | مولفه شعاعی، کاهیده |
| rev | حالت برگشت پذیر |
| ref | حالت مرجع |
| R | روتور |
| RP | مجرای روتور |
| s | شروود روتور، حالت ویژه |
| sp | افشانه |
| t | حالت کامل |
| v | حالت بخار |

| | |
|----------|-------------|
| w | دیوار |
| z | مولفه محوری |
| θ | مولفه مماسی |

نمادهای یونانی

| | |
|---------------|---|
| α | زاویه جریان نسبت به افق |
| β | زاویه پره نسبت به افق |
| ψ | ضریب سرعت |
| δ | ضخامت لایه مرزی |
| δ^* | ضخامت جابجایی لایه مرزی |
| θ | ضخامت مومنتوم لایه مرزی |
| ε | نسبت شعاع خروجی روتور به شعاع ورودی آن |
| λ | نسبت مولفه نصف النهاری سرعت خروجی روتور به سرعت ورودی روتور |
| ΔH | افت آنتالپی |
| ρ | چگالی |
| ω | سرعت دورانی، فاکتور اسنتریک |
| χ | زاویه لبه |
| φ_m | زاویه نقطه میانی وتر نازل |
| ϕ_{cam} | زاویه انحنای ایرفول |
| η | راندمان |
| τ | گشتاور |
| μ | لزجت |
| σ | فاکتور لغزش |

مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه میکرو توربین‌ها

۱-۱- تاریخچه

مینی و میکروتوربین‌ها در مقایسه با تکنولوژی‌های دیگر برای استفاده در واحدهای کوچک تولید قدرت به ویژه برای واحدهای تولید همزمان فواید زیادی دارند. با این وجود چندین مانع و مشکل تکنیکی و غیرتکنیکی برای پیاده کردن این تکنولوژی وجود دارد. هر چند این تکنولوژی را می‌توان برای تولید توان در صنعت، تجارت و بخش‌های مسکونی استفاده نمود اما هنوز تردیدهایی از نظر پتانسیل رقابت در بازار در مورد آن وجود دارد. اگر هزینه، راندمان، طول عمر، قابلیت اطمینان و مشکلات زیست محیطی طراحی موجود بهبود یابد، این پتانسیل می‌تواند به صورت قابل توجهی افزایش یابد.

استفاده از توربین‌های بخار در سیستم‌های *CCHP* کوچک به دلیل نیاز به کار در فشار و دمای پایین کمتر مورد توجه بوده است. تحقیقات کمی در زمینه استفاده از توربین‌های جریان شعاعی در سیکل‌های رانکین ارگانیک^۱ کوچک انجام شده است. شرکت *carrier* [۱] سازنده میکروتوربین‌های جریان خارجی شعاعی است که از بخار فشار بالا برای تولید توان استفاده می‌کند. این توربین‌ها بر روی یک گیربکس کاهنده‌ای که خودش بر روی یک موتور الکتریکی القایی قرار دارد، نصب می‌شوند. توربین شرکت *Energent* [۲] در زمینه تولید میکروتوربین‌های جریان شعاعی کوچک از نوع جریان خارجی^۲ که توانی در حدود ۲۷۵ کیلووات تولید می‌کند فعالیت می‌کند. میکروتوربین‌های نامبرده به ازای نسبت فشار ۱:۵/۲ دارای حداکثر راندمان ۸۰ درصد و به ازای نسبت فشار ۱:۵ دارای حداکثر راندمان ۷۰ درصد می‌باشد. در این توربین حداکثر فشار ورودی ۱۳/۶۲ بار و حداقل فشار خروجی نیز ۰/۱۳ بار می‌باشد و با دبی جرمی در حدود ۰/۵ تا ۲/۵ کیلوگرم بر ثانیه کار می‌کند. شرکت *QNP* [۳] نیز سازنده توربین‌هایی است که فشار و دمای آن بسته به نیاز مصرف کننده قابل تنظیم است و می‌تواند با حداقل فشار خروجی توربین^۳ کار

¹ -Organic Rankin Cycle (ORC)

² -Radial Outflow Turbine

³ -Back Pressure

کند. شرکت *Globalsource* [۴] سازنده توربین‌های یک مرحله‌ای بخار با اسم تجاری لولوتنگ^۱ است که می‌تواند بین ۱۵ تا ۲۵۰۰ کیلو وات توان تولید کند. فشار ورودی به آن می‌تواند از ۶ تا ۴۵ بار متغیر باشد و دمای ورودی به آن نیز بین ۲۸۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس تعریف شده است. آقای ایپینگ دای و دوستانش در مقاله خود تاثیرات پارامترهای مختلف را بر روی سیکل رانکین ارگانیک به هنگام استفاده از ۱۰ سیال مختلف بررسی نموده است [۸][۵]. حاجیلویی مشخصات جریان و عملکرد را برای یک توربین جریان شعاعی با دو ورودی^۲ به صورت عددی و تجربی بررسی نموده است [۲۰][۶]. حاجیلویی در این مقاله نشان داد پایین‌ترین راندمان مربوط به شرایط ورودی حداکثر^۳ است. گلاسمن کد کامپیوتری برای آنالیز جریان و طراحی هندسی توربین جریان شعاع ارائه نمود [۷]. او در این کد به ازای توان خروجی مشخص از توربین جریان شعاعی، ابعاد هندسی توربین را به دست آورد و جریان عبوری از آن را هم به صورت یک بعدی تحلیل نمود. گلاسمن در این کد پنج نوع افت را بررسی نمود. او در سال ۱۹۹۵ همان کد را با اصلاحاتی دوباره عرضه نمود [۸]. او در کد جدید عبارات مربوط به محاسبه افتها را بهینه سازی نمود. پیلاواچی به بررسی استفاده از مینی و مایکروتوربین‌ها در سیستم‌های *CHP* پرداخت و در آن مزایا و معایب آنها را از لحاظ فنی و غیر فنی مورد بررسی قرار داد [۹]. الجوندی تحلیل انرژی و اکسرژی را برای یک نیروگاه بخار در اردن انجام داد [۱۰]. او تاثیر محیط را بر اکسرژی هر کدام از اجزا نیروگاه بررسی نمود و در آن نشان داد حدود ۱۳ درصد از افت اکسرژی در توربین اتفاق می‌افتد. بنسون نیز روش‌هایی برای بررسی ضرایب افت را در توربین‌های جریان شعاعی بررسی نمود [۱۱]. او نشان داد با آنالیز یک بعدی جریان می‌توان نتایج قابل قبولی در بررسی افتها به دست آورد. ابراهیمی و همکاران [۱۲] سیکل *CCHP* کوچکی طراحی نمودند که در آن از یک مینی توربین بخار استفاده شد.

¹ *Lulutong*

² *Twin entry*

³ *Extreme condition*