

آنالیز حساسیت سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی به معادله‌های حالت ترمودینامیکی

کاوه قربانیان

عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی هوا-فضا، دانشگاه صنعتی شریف

ghorbanian@sharif.edu

پارسا تمدن‌فر

محقق پسا دکترا، دانشکده مهندسی هوا-فضا، دانشگاه صنعتی شریف

tamadonfar@ae.sharif.edu

چکیده

در طول ۱۰ سال گذشته، سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی توجه بسیاری از محققان و صنعتگران حوزه‌ی انرژی در سراسر دنیا را به خود جلب کرده است. در طول این سالین، تحقیقات بسیار گسترده‌ای در مورد خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن در محدوده‌ی وسیعی از دما و فشار انجام شده است. حال آنکه خواص ترمودینامیکی این سیال در مجاورت نقطه‌ی بحرانی و همچنین تأثیر معادله‌های حالت متفاوت بر روی خواص ترمودینامیکی این سیال به خوبی مورد واکاوی قرار نگرفته است. این تحقیق بنا دارد که رفتار معادله‌های حالت متفاوت را بر روی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن بصورت جامع مورد بررسی قرار دهد.

از نرم‌افزار اسپن هایسیس^۱ برای حل معادله‌های حالت پنگ و رایبسون^۲ و لی-کسلر-پلوکر^۳ استفاده شده است. نتایج بدست آمده از حل این معادله‌های حالت با نتایج حاصل از بانک اطلاعاتی مرجع خواص ترمودینامیکی و ویژگی‌های فیزیکی سیال که توسط موسسه ملی تکنولوژی و استاندارد-های آمریکا^۴ توسعه پیدا کرده است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انحراف نسبی مربع میانگین ریشه^۵ در محاسبه‌ی میزان چگالی برای معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر از معادله‌های حالت پنگ و رایبسون در محدوده‌ی دمایی و فشاری مورد بررسی کمتر می‌باشد. حال آنکه این میزان در محاسبه‌ی میزان آنتالپی و انتروپی بیشتر می‌باشد. کلمات کلیدی: معادله‌های حالت، دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی، پنگ و رایبسون، لی-کسلر-پلوکر

مقدمه

استفاده از روش‌های نوین برای تولید برق یکی از چالش‌های پیش‌روی محققان این حوزه می‌باشد. یکی از روش‌های اقتصادی برای تولید برق، استفاده از سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی در سیکل‌های تولید توان می‌باشد [۱]. باید به این نکته توجه داشت که پیشنهاد استفاده از این سیال در سیکل‌های تولید توان، روش نوینی برای تولید برق محسوب نمی‌شود و تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی در سیکل‌های تولید توان به دهه‌ی ۶۰ میلادی بازمی‌گردد [۲]. به عنوان مثال، فِجر [۳] نشان داد که سیکل‌های تولید توان برایتون بر پایه‌ی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی مزایای بسیاری من‌الجملة بازدهی گرمایی بالا، چگالی توان بالا و همچنین سیستم توربوماشینری ساده‌تری دارند. مهم‌ترین مزیت سیال عامل دی‌اکسیدکربن در مقایسه با سیال‌های عامل دیگر بر این

نکته استوار است که دمای بحرانی آن در حدود ۳۰۴ کلوین است، که این امر باعث می‌شود بتوان در دمایی نزدیک به دمای محیط، سیال عاملی با ویژگی‌های فوق بحرانی داشت. سیال عامل دی‌اکسیدکربن در مجاورت ناحیه‌ی بحرانی شبیه گاز ایده‌آل رفتار نمی‌کند و ویژگی‌هایی همچون چگالی و ضریب انتقال حرارت آن در نزدیکی نقطه‌ی بحرانی بشدت تغییر می‌کند [۴]. در مجاورت نقطه‌ی بحرانی میزان کار کمپرسور کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش میزان چگالی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی باعث کاهش ساینز توربین انبساطی مورد استفاده در سیکل تولید توان و کاهش هزینه‌های ساخت آن می‌شود.

باید به این نکته اشاره کرد که علی‌رغم مزیت‌های فراوانی که استفاده از سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی در سیکل‌های تولید توان دارا می‌باشد، نبود تجربه‌ی کافی در حوزه‌ی سامانه‌های احتراقی و توربوماشین‌هایی که بر پایه‌ی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی کار می‌کنند، استفاده از این سیال عامل در سیکل‌های تولید توان، هنوز بصورت عملیاتی در نیامده است و محققان این حوزه هنوز در مرحله‌ی تولید دانش و توسعه‌ی فناوری‌های مرتبط با این دانش می‌باشند.

خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن در مجاورت ناحیه‌ی بحرانی بصورت کامل شناخته شده نمی‌باشد و برای رسیدن به بیشترین میزان از بازدهی برای سیکل تولید توان، باید تجهیزات مورد استفاده در سیکل در نزدیکی نقطه‌ی بحرانی کار کنند [۲]. بنابراین شناخت دقیق خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی یکی از ملزومات برای ادامه‌ی تحقیقات در این حوزه می‌باشد. برای اینکه بتوان خواص ترمودینامیکی این سیال را در مجاورت نقطه‌ی بحرانی بدست آورد، باید معادله‌های حالتی را که ویژگی‌های این سیال را در این نواحی با دقت بالا پیش‌بینی می‌کنند برگزید.

مِچری و مولک [۲] از هفت روش متفاوت برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی استفاده کردند و با بررسی نتایج حاصل از داده‌های چگالی و ظرفیت گرمایی به این نتیجه رسیدند که از بین روش‌هایی که مورد بررسی قرار دادند، معادله‌های حالت پنگ و رایبسون و لی-کسلر-پلوکر بیشترین دقت را در پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن دارا می‌باشند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل لی-کسلر-پلوکر در دما و فشار بالا، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. بنابراین مِچری و مولک [۲] برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن از معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر استفاده کردند.

1. ASPEN HYSYS.

2. PENG and ROBINSON (PENG-ROB).

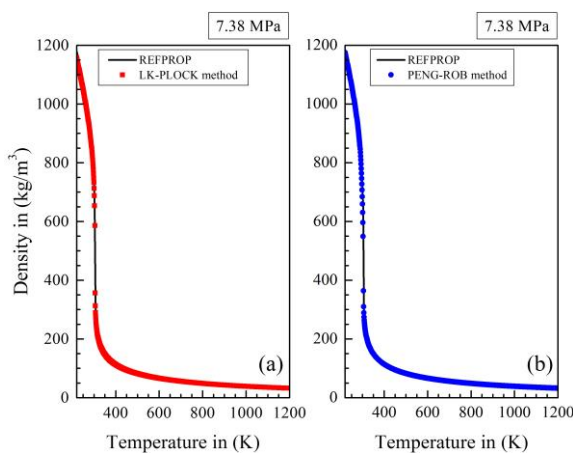
3. LEE-KESLER-PLÖCKER (LK-PLOCK).

4. NIST REFPROP.

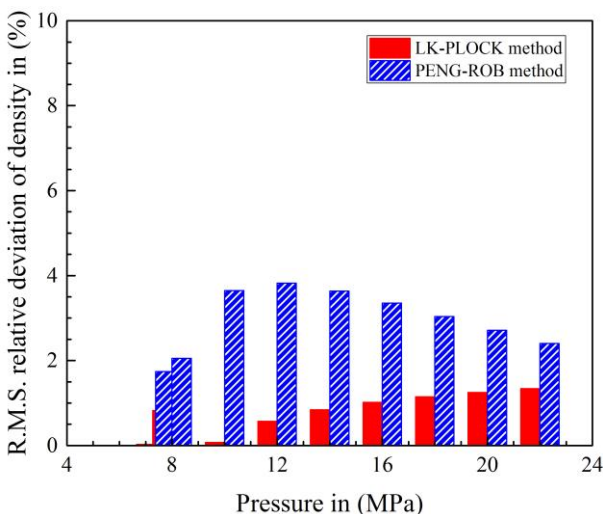
5. ROOT-MEAN-SQUARE RELATIVE DEVIATION.

همان‌طور که مشاهده می‌شود سیال عامل دی‌اکسیدکربن دارای دمای بحرانی برابر با ۳۰۴ کلوین و فشار بحرانی برابر با ۷,۳۸ مگاپاسکال است. به ناحیه‌ای که فشار و دمای آن بالاتر از فشار و دمای بحرانی باشد، ناحیه‌ی فوق بحرانی می‌گویند.

از نرم‌افزار اسپن‌هایسیس برای حل معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر در این تحقیق استفاده شده است. شکل ۲ تغییرات چگالی سیال عامل دی‌اکسیدکربن را که توسط معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر و بانک اطلاعاتی مرجع در بازه‌ی دمایی ۲۲۰ تا ۱۲۰۰ کلوین و در فشار ۷,۳۸ مگاپاسکال بدست آمده است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار چگالی دارای تغییرات بسیار شدیدی در نزدیکی دمای بحرانی است و مقدار آن در مجاورت این دما بشدت کاهش پیدا می‌کند، و با افزایش دمای سیال عامل، آهنگ کاهش میزان چگالی بسیار کند می‌شود. معادله‌های حالت بکار رفته در این تحقیق قابلیت پیش‌بینی میزان چگالی را در این فشار در بازه‌ی وسیعی از دما دارا می‌باشند.



شکل ۲: نمودار تغییرات چگالی بر حسب دما برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن در فشاری برابر با ۷,۳۸ مگاپاسکال. شکل سمت چپ، داده‌های چگالی بدست آمده از معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر را در کنار داده‌های چگالی بدست آمده از بانک اطلاعاتی مرجع نشان می‌دهد. شکل سمت راست، داده‌های چگالی بدست آمده از معادله‌های حالت پنگ و رابینسون را در کنار داده‌های چگالی بدست آمده از بانک اطلاعاتی مرجع نشان می‌دهد.

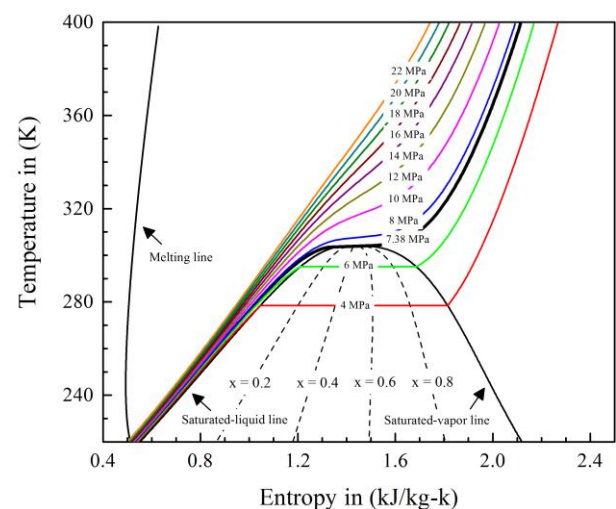


شکل ۳: نمودار تغییرات انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای چگالی بر حسب فشار برای معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر.

عاملی و دیگران [۵] تأثیر مدل‌های گوناگون گاز واقعی را بر روی عملکرد توربین انبساطی بر پایه‌ی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که تفاوت مدل‌های مورد بررسی بر روی عملکرد توربین انبساطی بسیار ناچیز است، حال آنکه آنها معتقدند که مدل اسپن و وگنر [۶] از عملکرد بهتری نسبت به بقیه‌ی مدل‌ها برخوردار است. در این تحقیق از معادله‌های پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر که در [۲] به عنوان معادله‌های حالت ایده‌آل برای پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی برگزیده شدند، برای محاسبه‌ی چگالی، ظرفیت گرمایی، آنتالپی و انتروپی در بازه‌ی فشاری بین ۷.۳۸ تا ۲۲ مگاپاسکال و بازه‌ی دمایی بین ۳۰۴ تا ۱۲۰۰ کلوین استفاده شده است. روابطی که این معادله‌های حالت برای بدست آوردن خواص ترمودینامیکی از آنها استفاده می‌کند در [۹-۷] موجود است. نتایج حاصل از این بررسی با نتایج بدست آمده از بانک اطلاعاتی مرجع خواص ترمودینامیکی و ویژگی‌های فیزیکی سیال که توسط موسسه‌ی ملی تکنولوژی و استانداردهای آمریکا توسعه پیدا کرده است، و در این تحقیق به عنوان مرجع انتخاب شده است، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این مرجع، خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن توسط روشی که اسپن و وگنر [۶] بر پایه‌ی روابط انرژی هلمهولتز پایه‌گذاری کردند، بدست می‌آید. نتایج تحقیق پیش‌رو نشان می‌دهد که انحراف نسبی مربع میانگین ریشه در محاسبه‌ی چگالی که توسط مدل لی-کسلر-پلوکر محاسبه می‌گردد از مدل پنگ و رابینسون کمتر است. این مدل در پیش‌بینی مقادیر ظرفیت گرمایی در دماهای نزدیک به دمای بحرانی دقت بالایی دارد، حال آنکه مقادیر ظرفیت گرمایی بدست آمده توسط مدل پنگ و رابینسون در دماهای بالا میزان انحراف کمتری نسبت به نتایج مدل مرجع دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل پنگ و رابینسون مقادیر آنتالپی و انتروپی را با دقت بیشتری نسبت به مدل لی-کسلر-پلوکر محاسبه می‌کند.

یافته‌ها

نمودار تغییرات دما بر حسب انتروپی برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن در فشارهای متفاوت در شکل ۱ نشان داده شده است.

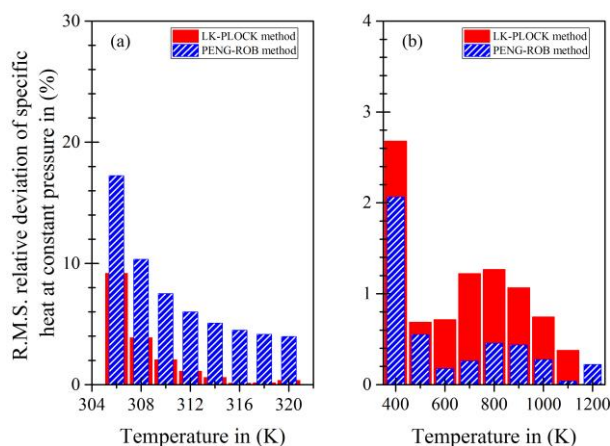


شکل ۱: نمودار تغییرات دما بر حسب انتروپی برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن در فشارهای متفاوت. از داده‌های بانک اطلاعاتی مرجع برای رسم این نمودار استفاده شده است.

بصورت مجزا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در نزدیکی فشار و دمای بحرانی، مقدار ظرفیت گرمایی دارای تغییرات بسیار شدیدی است. از این داده‌ها می‌توان استنباط کرد که برای هر دمایی نزدیک به دمای بحرانی سیال عامل، فشار مؤثری وجود دارد که در آن فشار مقدار ظرفیت گرمایی دارای تغییرات شدیدی می‌باشد.

با افزایش مقدار دمای سیال عامل، شکل ۵، تغییرات ظرفیت گرمایی نسبت به فشار بسیار اندک می‌باشد. همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است، معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر روند تغییرات ظرفیت گرمایی بر حسب فشار را بصورت دقیقی نشان می‌دهند. هر دوی این معادله‌های حالت توانایی پیش‌بینی مقدار ظرفیت گرمایی را در نزدیکی نقطه‌ی بحرانی دارا نمی‌باشند.

با بررسی میزان انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای ظرفیت گرمایی، شکل ۶، می‌توان مشاهده کرد که معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر در دمای نزدیک به دمای بحرانی، در مقایسه با معادله‌های حالت پنگ و رابینسون دقت بیشتری را دارا می‌باشد، اما کماکان میزان انحراف این مدل نسبت به مدل مرجع به مراتب زیاد است. در صورتی که معادله‌های حالت پنگ و رابینسون در دماهای بالا میزان ظرفیت گرمایی را با دقت بالایی تخمین می‌زنند.



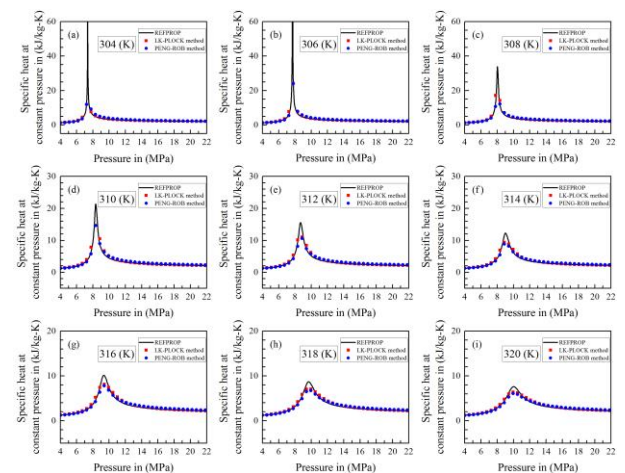
شکل ۶: نمودار تغییرات انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای ظرفیت گرمایی بر حسب دما. باید به این نکته اشاره کرد که محاسبه‌ی مربع میانگین ریشه برای بانک اطلاعاتی مرجع در دمای ۳۰۴ کلوین امکان‌پذیر نمی‌باشد و شکل سمت چپ از دمای ۳۰۶ کلوین شروع شده است.

مقادیر آنتالپی (انترپی) بدست آمده از نرم‌افزار آسپن هایسیس از مقدار آنتالپی (انترپی) در یک دما و فشار معین کسر شده است تا بتوان این مدل‌ها را با هم مورد مقایسه قرار داد. تغییرات تفاضل آنتالپی (انترپی) در فشار ۱۵ مگاپاسکال در دمای بین ۳۰۴ تا ۱۲۰۰ کلوین برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن که توسط مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق بدست آمده است در شکل ۷ (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر و پنگ و رابینسون با دقت بالایی میزان آنتالپی و انترپی را تخمین می‌زنند.

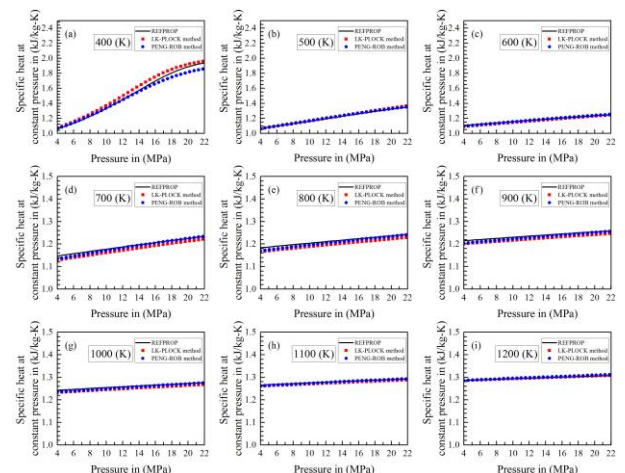
برای بدست آوردن میزان انحراف این مدل‌ها از مدل مرجع، انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای آنتالپی (انترپی) در سه فشار ۱۵، ۷، ۵ و ۲۰ مگاپاسکال در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان انحراف آنتالپی (انترپی) بدست آمده از معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر از مدل مرجع بسیار ناچیز است و معادله‌های حالت پنگ

با بدست آوردن مربع میانگین ریشه برای خواص ترمودینامیکی که توسط معادله‌های حالت در بازه‌ی دمایی/فشاری مورد بررسی بدست می‌آید و مقایسه آن با مربع میانگین ریشه برای همان خاصیت ترمودینامیکی که توسط بانک اطلاعاتی مرجع بدست می‌آید، می‌توان بصورت کمی معین کرد که کدامیک از معادله‌های حالت مورد بررسی در این تحقیق توانایی تخمین دقیق‌تری برای خاصیت ترمودینامیکی مورد نظر دارد. شکل ۳ میزان انحراف نسبی مربع میانگین ریشه را برای چگالی بر حسب فشار نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای چگالی که توسط معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر محاسبه شده باشد برابر با ۱،۳٪ و برای معادله‌های حالت پنگ و رابینسون برابر با ۳،۸٪ می‌باشد. از این مشاهده می‌توان استنباط کرد که معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر نسبت به معادله‌های حالت پنگ و رابینسون توانایی بالاتری در پیش‌بینی میزان چگالی در محدوده‌ی دمایی/فشاری مورد بررسی در این تحقیق را دارا می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که برای محاسبه‌ی مربع میانگین ریشه، خاصیت ترمودینامیکی مورد نظر دارای دما و فشاری بالاتر از دما و فشار نقطه‌ی بحرانی آن می‌باشد.

شکل‌های ۴ و ۵ میزان تغییرات ظرفیت گرمایی سیال عامل دی‌اکسیدکربن را در فشارهای مختلف برای دماهای نزدیک به دمای بحرانی و دماهای بالاتر



شکل ۴: نمودار تغییرات ظرفیت گرمایی بر حسب فشار در دماهای نزدیک به دمای بحرانی.



شکل ۵: نمودار تغییرات ظرفیت گرمایی بر حسب فشار در بازه‌ی دمایی بین

و رابینسون برای محاسبه‌ی آنتالپی و انتروپی ارجحیت دارد.

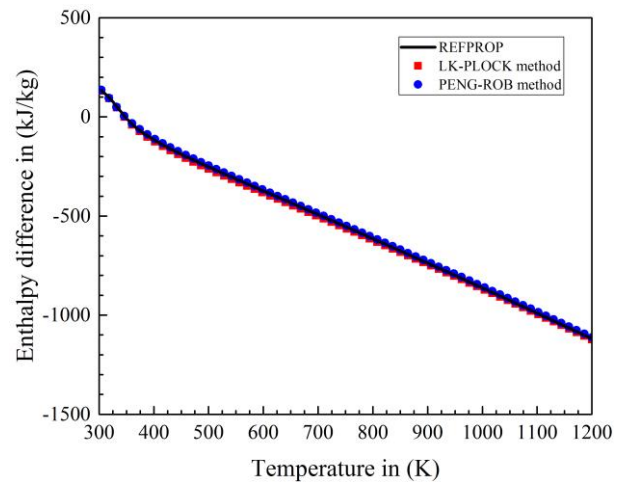
نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر معادله‌های حالت پنگ و رابینسون و لی-کسلر-پلوکر بر روی خواص ترمودینامیکی سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بدست آمده از این دو روش با نتایج بانک اطلاعاتی مرجع خواص ترمودینامیکی و ویژگی‌های فیزیکی سیال که توسط موسسه ملی تکنولوژی و استانداردهای آمریکا توسعه پیدا کرده است، مورد مقایسه قرار گرفته است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است:

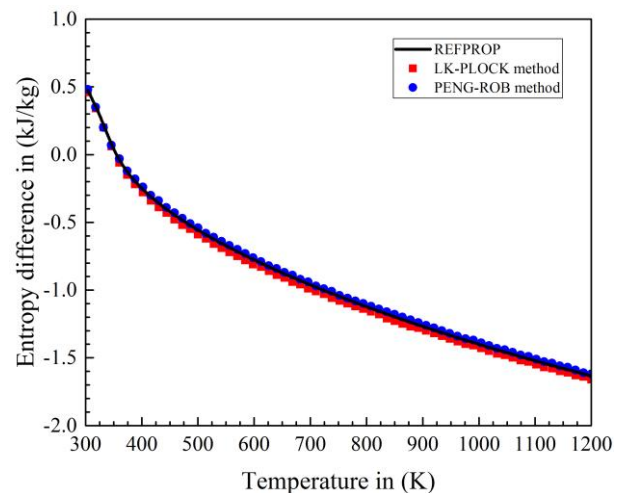
- معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر نسبت به معادله‌های حالت پنگ و رابینسون در محاسبه‌ی چگالی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.
- معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر نسبت به معادله‌های حالت پنگ و رابینسون در محاسبه‌ی ظرفیت گرمایی در دمایی نزدیک به دمای بحرانی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. حال آنکه این روند در دماهای بالا، بصورت عکس عمل می‌کند.
- در محاسبه‌ی آنتالپی و انتروپی، استفاده از معادله‌های حالت پنگ و رابینسون نسبت به معادله‌های حالت لی-کسلر-پلوکر ارجحیت دارد.

مراجع

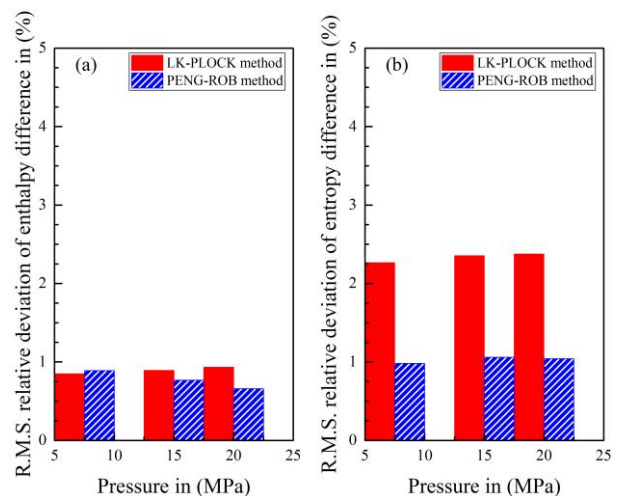
1. Dekhtiarov, V.L., 1962, "On designing a large, highly economical carbon dioxide power installation", *Electrtichenskie Stantskii*, Vol. 5, pp. 1-6.
2. Mecheri, M. and Le Moullec, Y., 2016, "Supercritical CO₂ brayton cycle for coal-fired power plants", *Energy*, Vol. 103, pp. 758-771.
3. Feher, E.G., 1968, "The supercritical thermodynamic power cycle", *Energy Conversion*, Vol. 8, pp. 85-90.
4. Dostal, V. 2004, "A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors", Ph.D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
5. Ameli, A., Uusitalo, A., Turunen-Saaresti, T. and Backman, J., 2017, "Numerical sensitivity analysis for supercritical CO₂ radial turbine performance and flow field", 4 International Seminar on ORC Power Systems, Milano, Italy.
6. Span, R. and Wagner, W., 1996, "A new equation of states for carbon dioxide covering the region from the triple-point temperature to 1100 K and pressure up to 800 MPa", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 25, pp. 1509-1596.
7. Peng, D.Y. and Robinson, D. B., 1976, "A new two-constant equation of state", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 15, pp. 59-64.
8. Lee, B.I. and Kesler, M.G., 1975, "A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states", *AIChE Journal*, Vol. 21, pp. 510-527.
9. Plöcker, U., Knapp, H. and Prausnitz, J. 1978, "Calculation of high-pressure vapor-liquid equilibria from a corresponding-states correlation with emphasis on asymmetric mixtures", *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 17, pp. 324-332.



شکل ۷: تغییرات تفاضل آنتالپی در فشار ۱۵ مگاپاسکال در دمای بین ۳۰۴ تا ۱۲۰۰ کلوین برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن.



شکل ۸: تغییرات تفاضل انتروپی در فشار ۱۵ مگاپاسکال در دمای بین ۳۰۴ تا ۱۲۰۰ کلوین برای سیال عامل دی‌اکسیدکربن.



شکل ۹: نمودار تغییرات انحراف نسبی مربع میانگین ریشه برای آنتالپی (سمت چپ) و انتروپی (سمت راست).