نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال ششم/ شماره ۱۹/ تابستان ۱۳۹۹/ صفحات ۱۱۳ - ۸۵

ارزیابی انتشار آلاینده‌ها در یک نیروگاه سیکل ترکیبی: الگوی پویایی سیستمی

مهدی کلانتر هرمزی
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه ایوان‌کی
mehdi.kalantar@eyc.ac.ir
علی‌محمد احمدوند
استاد و عضو هیئت علمی دانشگاه ایوان‌کی (نویسنده مسئول)
am.ahmadvand@eyc.ac.ir
حبیب‌اله اعلمی
دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه ایوان‌کی
ha.aelami@eyc.ac.ir

محیط زیست و لزوم صیانت و مراقبت از آن، یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های توسعه صنعتی در جامعه امروزی قلمداد می‌شود و آلودگی هوا از جمله بارزترین و ملموس‌ترین عوامل مخرب آن است. رشد روزافزون صنعت موجب تولید و انتشار آلاینده‌های گازی به هوا گردیده است که در این میان نیروگاه‌های حرارتی یکی از مهم‌ترین منابع انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای می‌باشند. این پژوهش با استفاده از ابزار مدل‌سازی پویا و به‌کارگیری نرم‌افزار Vensim و همچنین بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط واقعی، اجزاء و فرآیندهای تأثیرگذار بر میزان و چگونگی انتشار آلاینده‌ها در هوا را از طریق یک نیروگاه سیکل ترکیبی شبیه‌سازی نموده و با بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف، نوع فرآیند، سوخت مطلوب و حداکثر میزان امکان ارتقاء توان تولیدی واحدهای نیروگاه سیکل ترکیبی را با درنظر گرفتن حداکثر میزان مجاز انتشار آلاینده‌ها در جو و با به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف افزایش راندمان، پیش‌بینی نموده است. بطور کلی، مُدهای بهره‌برداری از توربین گاز (پریمیکس و دیفیوژن)، نوع سوخت مصرفی در توربین گاز (گاز طبیعی یا گازوئیل)، به‌کارگیری یا عدم استفاده از سیستم پاشش آب در هوای ورودی به توربین گاز و همچنین تزریق آب یا بخار در مشعل توربین گاز به عنوان اصلی‌ترین عوامل و متغیرهای تأثیرگذار بر میزان انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه سیکل ترکیبی شناسایی شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی پویا، انتشار آلاینده‌ها، بهینه‌سازی بهره‌برداری، نیروگاه سیکل ترکیبی .

تاریخ دریافت: ۱۸/ ۸ / ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۶/ ۱۲/ ۱۳۹۸

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۱. مقدمه

نیروگاه‌ها به عنوان مهمترین بخش صنعت برق، از مهمترین آلوده‌کننده‌های محیط زیست به شمار می‌روند که طیف گسترده‌ای از آلودگی‌های محیطی از جمله هوا، آب، خاک و صوت را شامل می‌شود. در این میان آلودگی هوای ناشی از نیروگاه‌ها، نسبت به سایر آلاینده‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. استفاده از منابع انرژی از قبیل سوخت‌های فسیلی علی‌رغم تسهیلات فراوانی که برای جوامع بشری به ارمغان آورده است، با معضلاتی از قبیل تغییر شرایط اقلیمی، آلایندگی هوا، اثرات گلخانه‌ای، گرمایش جهانی، بارش باران‌های اسیدی و ایجاد مواد سرطان‌زا همراه شده است. بخش‌های عمده مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی عبارتند از صنایع یا کارخانجات، صنایع گرمایشی خانگی و تجاری، وسایل نقلیه موتوری و نیروگاه‌ها که در این میان تأسیسات نیروگاهی بیشترین سهم مصرف سوخت‌های فسیلی را به خود اختصاص داده‌اند (علی‌پور و حسینی، ۱۳۹۵). نیروگاه‌ها بدلیل مصرف سوخت‌های فسیلی، تولید بخار بسیار زیاد، انتشار ذرات، گازها و حرارت به محیط، ایجاد تغییرات آب و هوایی، تولید پسماندهای جامد و سر و صدا؛ می‌توانند تأثیر زیان‌بار بسیار زیادی بر روی محیط زیست داشته باشند. علت اصلی آلودگی هوا را می‌توان در ناخالصی یا احتراق ناقص سوخت جستجو نمود که طی آن بر اثر عدم سوخت‌رسانی کامل یا نسبت ترکیب نامناسب هوا و سوخت در فرآیند احتراق، آلاینده‌های مختلف به جو راه می‌یابند. بزرگترین اثرات استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، انتشار و ایجاد آلودگی‌های هوایی علی‌الخصوص انتشار گازهای SO_X، NO_X، CO، CO_2 و هیدروکربن‌ها می‌باشد. همگام با پیشرفت صنایع در کشورهای در حال توسعه، آلودگی هوا تهدیدی جدی برای سلامت عمومی جامعه قلمداد شده و از این‌رو در زمره اهم مسائل زیست محیطی قرار گرفته است. گازهای سمی و آلاینده‌ها که به‌صورت روزانه به‌وسیله کارخانجات، نیروگاه‌ها و سایر تأسیسات صنعتی نظیر پالایشگاه و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

پتروشیمی و همچنین خودروهای شخصی و عمومی در محیط منتشر می‌شوند، جوامع بشری را با چالش زیست‌محیطی مهمی روبرو ساخته است (الماسی و همکاران، ۱۳۹۲).

جهت بررسی و ارائه راهکار مناسب به منظور فائق آمدن بر مشکلات مذکور، تاکنون تحقیقات و پژوهش‌های متعددی در این خصوص صورت پذیرفته است که هریک از دیدگاه مشخص و منحصر به فردی به موضوع پرداخته است. در برخی تحقیقات، با استفاده از مدل‌سازی سیستم داینامیک، به بررسی پارامترهای مؤثر بر آلودگی هوای شهری و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر و یا تحلیل سناریوهای مختلف به منظور بررسی رشد تولید ناخالص داخلی بر انتشار آلاینده‌ها و یا توسعه نیروگاه‌های خورشیدی براساس سیاست‌های کنترل آلودگی هوا پرداختند (احمدوند و همکاران، ۱۳۹۸؛ وفاآرانی و همکاران،۱۳۹۲؛ اشمید و همکاران، ۲۰۱۹؛ مائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ و گو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین باتوجه به نقش اساسی تأسیسات صنعتی بر افزایش آلایندگی‌های محیط‌زیست، پژوهش‌های متعددی درخصوص پایش و بهینه‌سازی آلاینده‌های محیط‌زیست با استفاده از تکنیک‌های مختلفی نظیر منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و... در صنایع مختلف از جمله سیمان (زارع‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ و الماسی و همکاران، ۱۳۹۲)، نیروگاهی (علی‌پور و حسینی، ۱۳۹۵؛ اسماعیل‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ سنو و کومار، ۲۰۱۸؛ مأموریان و همکاران، ۱۳۹۲؛ تیواری و همکاران، ۲۰۱۹؛ و چِنگ و همکاران، ۲۰۱۹) و پالایشگاهی (نیک اقبالی و همکاران، ۹۳) انجام شده است. پژوهش‌های متعددی نیز در خصوص بهینه‌سازی مصرف سوخت و آلاینده‌های موتورهای دیزل با استفاده از شبکه عصبی و قاعده مورچگان (زارع‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵) و یا روش سطح پاسخ (اردبیلی و همکاران، ۱۳۹۶) انجام شده است. تحقیقاتی نیز در خصوص استفاده از سوخت‌های جایگزین و یا تغییر در هندسه موتورهای احتراق داخلی، به منظور کاهش آلایندگی صورت پذیرفته است (اشرفی و سالاری، ۱۳۹۵؛ نجفی و همکاران، ۱۳۹۰).

براساس توضیحات فوق و همچنین تحلیل‌های انجام شده بر روی مطالعات قبلی که اغلب به میزان و نحوه انتشار آلاینده‌ها پرداخته‌اند، مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، به‌کارگیری رویکرد

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

مدل‌سازی پویا در نشان دادن تأثیر المان‌های اصلی یک نیروگاه سیکل ترکیبی بر میزان انتشار آلاینده‌ها، با توجه به میزان برق تولیدی در شرایط مختلفِ کاری می‌باشد؛ به نحوی که به مقدار بهینه از توان تولیدی برحسب میزان انتشار آلاینده‌ها دست یابد. لذا در ادامه و در بخش دوم پژوهش، به مرور ادبیات تحقیق پرداخته می‌شود و ضمن معرفی یک بلوک نیروگاه سیکل ترکیبی و اجزاء آن، به نحوه عملکرد، نوع و میزان انتشار آلاینده‌ها و نحوه بهره‌برداری از آن می‌پردازد. در بخش سوم، مدل پویای آلاینده‌های یک نیروگاه سیکل ترکیبی به همراه داده‌ها و فرضیات مورد استفاده در تحقیق معرفی شده است. بخش چهارم نیز به انجام اعتبار سنجی مدل و ارائه نتایج شبیه‌سازی پرداخته و در نهایت در بخش ۵، نتایج حاصل از پژوهش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱-۱. مرور ادبیات

باتوجه به موضوع پژوهش، در این بخش به معرفی و تشریح اجزاء و فرآیندهای یک واحد نیروگاه سیکل ترکیبی و نحوه انتشار آلاینده‌ها در آن پرداخته می‌شود.

۱-۲. نیروگاه سیکل ترکیبی در یک نگاه

هر واحد نیروگاهی سیکل ترکیبی (شکل ۱)، بطور کلی از دو توربین گاز (بخش گاز)، دو بویلر، یک توربین بخار و سیستم خنک‌کننده مربوط به آن (بخش بخار)، تشکیل می‌شود. در این نیروگاه‌ها بازده به دلیل استفاده از انرژی حرارتی گازهای خروجی توربین گازی (سیکل برایتون)، بالاتر از بازده نیروگاه‌های گازی و بخار به تنهایی است. سوخت نیروگاه گازی نیز معمولاً گاز طبیعی می‌باشد که در موارد لزوم و معمولاً در فصل زمستان، از گازوئیل به عنوان سوخت جایگزین استفاده می‌شود.

توربین گاز یا توربین احتراقی (شکل ۲)، نوعی موتور احتراق داخلی است که از یک کمپرسور دوار بالادستی کوپل شده با یک توربین پایین دستی تشکیل شده است و یک محفظه احتراق نیز در بین آن‌ها قرار می‌گیرد. کارکرد اصلی توربین گاز بسیار شبیه به توربین بخار است

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

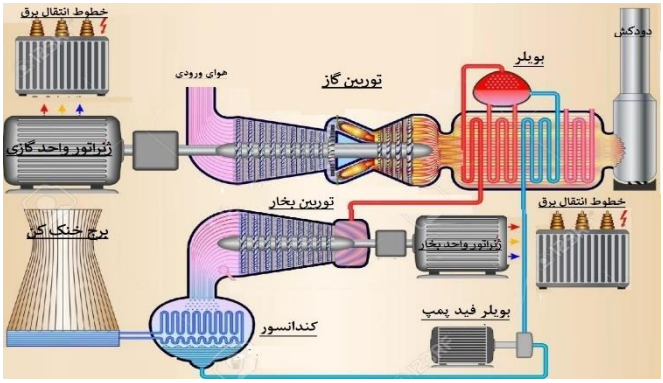
با این تفاوت که به‌جای بخار آب، هوا وارد آن می‌شود. هوای تازه اتمسفریک وارد کمپرسور شده و فشار آن افزایش می‌یابد؛ سپس با اسپری کردن سوخت به هوای فشرده شده و اشتعال آن، احتراق انجام می‌شود. انرژی حاصله، به هوا اضافه شده و در ادامه سیال تولیدی با دما و فشار بالا، وارد توربین شده و در آنجا تا فشار خروجی منبسط می‌گردد که در این فرآیند، کار خروجی شافت ایجاد می‌شود. کار شافت توربین برای چرخش ژنراتور الکتریکی کوپل شده با شافت، به‌کار می‌رود. انرژی استفاده نشده در توربین گاز نیز، در گازهای اگزوز با دمای ۵۴۵ درجه سانتی گراد خارج می‌گردد (بونزانی و همکاران، ۲۰۰۲).

گازهای خروجی از توربین گاز از طریق سیستم دایورتر به سمت بویلر بازیافت حرارتی[1] هدایت می‌شود. در بویلر (که به نوعی یک مبدل حرارتی می‌باشد)، انرژی حرارتی گازها طی چند مرحله، به آب موجود در لوله‌های فین‌دار (هارپ)، منتقل شده و نهایتاً موجب تولید بخار سوپرهیت با دمای تقریبی ۵۰۰ درجه و فشار حدود ۹۰ بار می‌گردد. در ادامه بخار تولید شده در هر دو بویلر، از طریق خطوط انتقال وارد توربین بخار شده و با استفاده از ژنراتور، تولید ۱۶۰ مگاوات برق را به همراه دارد.

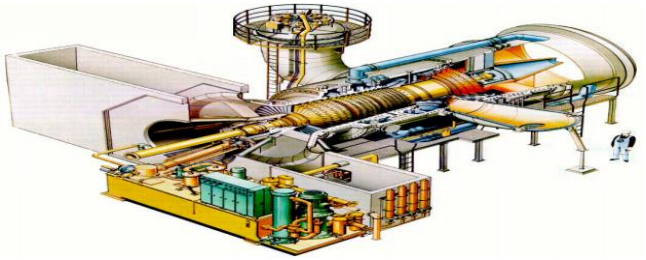
همچنین به منظور افزایش تولید برق بیشتر، در بویلرهای واحد بخار از مشعل استفاده می‌شود تا پیش از ورود گازهای داغ توربین گاز به بویلر، با افزایش حداکثری دمای گاز و تولید بیشتر بخار، امکان تولید بیشتر برق را فراهم نماید (کوهلر و همکاران، ۲۰۰۹).

1. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل۱. نمای شماتیک از یک نیروگاه سیکل ترکیبی (کوهلر و همکاران، ۲۰۰۹)



شکل۲. توربین گاز (بونزانی و همکاران، ۲۰۰۲)

۱-۳. آلاینده‌های نیروگاهی

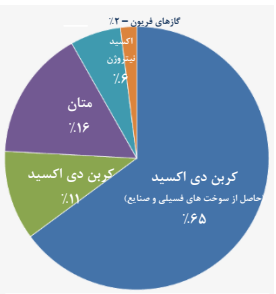
درصد انتشار سالیانه گازهای گلخانه‌ای در شکل ۳ و حدود مجاز انتشار آلاینده‌های هوا در صنعت نیروگاهی نیز در جدول شماره (۱) مشخص شده است. حدود مجاز آلاینده‌ها سالیانه و به پیشنهاد سازمان حفاظت محیط زیست به تصویب هیئت وزیران دولت می‌رسد. در این مقاله سعی شده است میزان تولید آلاینده‌های هوا در یک نیروگاه سیکل ترکیبی نیز با حدود مجاز انتشار آلاینده‌های هوا مقایسه و میزان تولید برق نیروگاه براساس حدود مجاز مشخص شده، بهینه‌سازی شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول۱. حد مجاز انتشار آلاینده‌های نیروگاهی

منبع آلاینده	آلاینده	واحد اندازه‌گیری	حد مجاز انتشار		توضیحات
			درجه ۱	درجه ۲	
دودکش‌ها و دستگاه‌های انتقال حرارت	NO_X	mg/Nm^3	۳۰۰	۴۰۰	با سوخت گاز
		mg/Nm^3	۲۰۰	۲۵۰	با سوخت مازوت
		mg/Nm^3	۲۰۰	۳۰۰	با سوخت گازوئیل
		mg/Nm^3	۵۰۰	۶۰۰	با سوخت فرآیندی
	SO_2	mg/Nm^3	۱۰۰	۲۰۰	با سوخت گاز
		mg/Nm^3	۱۲۰۰	۱۷۰۰	با سوخت مازوت
		mg/Nm^3	۳۰۰	۴۵۰	با سوخت گازوئیل
		mg/Nm^3	۳۰۰	۵۰۰	با سوخت فرآیندی
	ذرات	mg/Nm^3	۱۰۰	۱۵۰	
	CO	mg/Nm^3	۱۵۰	۲۰۰	

مأخذ: تصویب‌نامه هیئت وزیران به شماره ۸۴۴۱۱/ت ۵۵۱۸۱ هـ مورخ ۹۷/۰۶/۲۷



شکل۳. درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای (شاهزاد، ۲۰۱۵)

معمولاً نیروگاه‌ها با استفاده از گاز طبیعی استانداردهای زیست محیطی را دریافت می‌کنند؛ اما طبیعی است که در زمستان با در اولویت قرار گرفتن تأمین گاز شهری، مصرف سوخت‌های مایع در نیروگاه‌ها افزایش و به دنبال آن میزان آلایندگی نیروگاه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

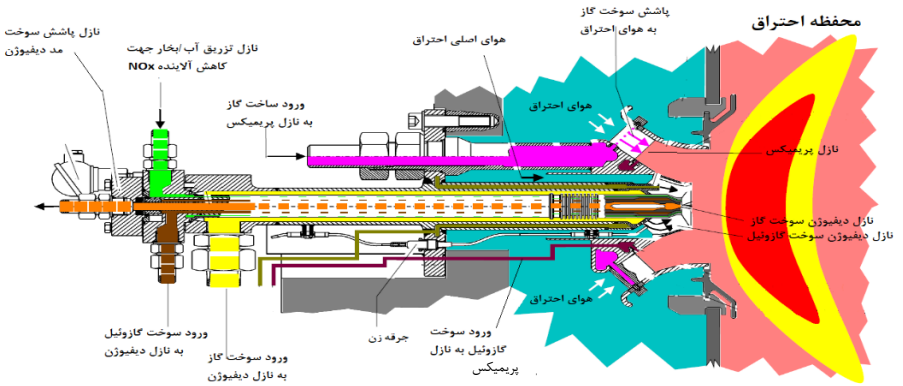
۱-٤. عوامل و اجزاء تأثیرگذار بر میزان انتشار آلاینده‌ها در یک نیروگاه سیکل ترکیبی

توربین گاز مدل V94.2 با ظرفیت نامی تولید ۱۵۰ مگاوات دارای دو محفظه احتراق می‌باشد که بر روی هر محفظه احتراق ۸ مشعل (از نوع هیبریدی) به منظور کمترین تولیدNO_X، قرار داده شده است. وظیفه‌ی مشعل‌ها تبدیل سوخت به ذرات ریز و پخش آن در هوای قابل احتراق می‌باشد. برای این منظور در هر مشعل دو نازل سوخت پریمیکس[1] و دیفیوژن[2] در نظر گرفته شده است. نازل‌های دیفیوژن معمولاً در توان‌های تولیدی پایین - بدلیل پایداری بیشتر شعله - به‌کار گرفته می‌شوند (در این مقاله توان تولیدی پایین، کمتر از ۶۰ مگاوات و براساس پیشنهاد سازنده توربین در نظر گرفته شده است) که آلودگی بیشتری نیز تولید می‌نماید؛ اما در توان‌های بالاتر، نازل‌های پری‌میکس که آلایندگی کمتری تولید می‌کنند، وظیفه ایجاد شعله را بر عهده دارند. در حالت دیفیوژن، سوخت از نازل‌ها در هوای فشرده پاشش شده و با ایجاد جرقه مشتعل می‌گردد؛ در حالی‌که در مُد پریمیکس، سوخت و هوا قبلاً با یکدیگر کاملاً مخلوط شده و سپس توسط مشعل پایلوت مشتعل می‌گردد (مهروان، ۲۰۱۱).

شکل شماره (۴) نمایی از اجزاء و نحوه کار یک مشعل توربین گاز مدل V94.2 را نشان می‌دهد که هم می‌تواند با سوخت گاز[3] و هم با سوخت گازوئیل[4] در دو مُد پریمیکس و دیفیوژن کار کند. همچنین جهت کاهش تولید NO_X در محصولات احتراق، یک نازل جهت تزریق آب و یا بخار[5] در این نوع مشعل پیش‌بینی شده است.

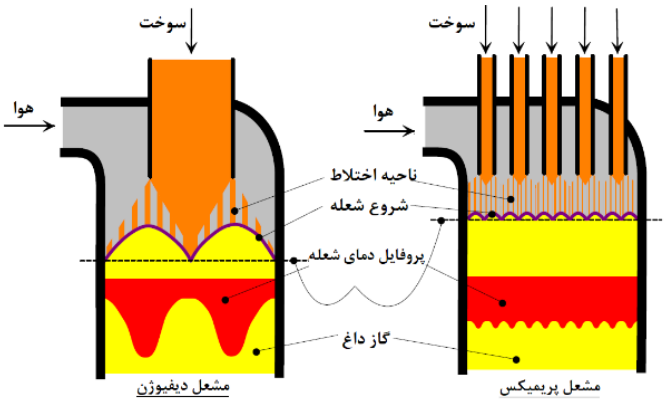
1. Premix
2. Diffusion
3. Fuel Gas
4. Fuel Oil
5. NOX Water

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل۴. مشعل توربین گاز مدل V94.2 (مهروان، ۲۰۱۱)

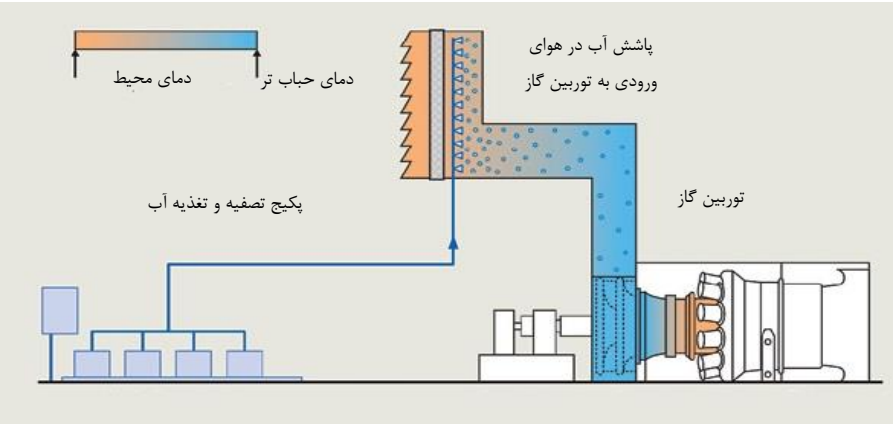
همان‌طور که در شکل شماره ۵ نیز مشاهده می‌گردد، در مشعل نوع پریمیکس، پروفایل دمای شعله نسبت به مشعل نوع دیفیوژن یکنواخت‌تر بوده که این موضوع سبب احتراق بهتر سوخت و ایجاد آلایندگی کمتر می‌گردد (مهروان، ۲۰۱۱).



شکل۵. مقایسه پروفایل دمای شعله در مشعل‌های نوع پریمیکس و دیفیوژن (مهروان، ۲۰۱۱)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

از جمله روش‌های مهم دیگر، جهت افزایش توان تولیدی توربین‌های گازی، پاشش آب در هوای ورودی به توربین می‌باشد[1]. اساس کار این روش مبتنی بر تبخیر آب و استفاده از گرمای نهان تبخیر حاصل از آن است که با پاشش آب با فشار زیاد توسط نازل‌ها در مسیر ورود هوا به توربین گاز و بالتبع آن کاهش چند درجه‌ای دمای هوا، افزایش دبی جرمی هوای عبوری از توربین و در نتیجه افزایش توان تولیدی را به همراه خواهد داشت (شکل ۶). در این شیوه با کاهش دمای شعله در مشعل‌ها، میزان تولید NOx در مشعل کم خواهد شد. در این مقاله، زمان استفاده از سیستم پاشش آب، توان ۱۳۰ مگاوات در نظر گرفته شده است و با افزایش میزان پاشش، توان تولید واحد گازی به ۱۵۰ مگاوات افزایش خواهد یافت. از جمله معایب این سیستم، نیاز به حجم زیادی آب تصفیه شده است و همچنین آب پاشش شده در هوای ورودی به توربین گاز، نهایتاً وارد جو زمین شده که می‌تواند بر افزایش اثر گلخانه‌ای و گرمایش زمین تأثیرگذار باشد (ایلماز اوقلو، ۲۰۱۰).



شکل۶. نمای شماتیک از سیستم Fogging (باشام و همکاران، ۲۰۱۳)

1. Fogging System

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

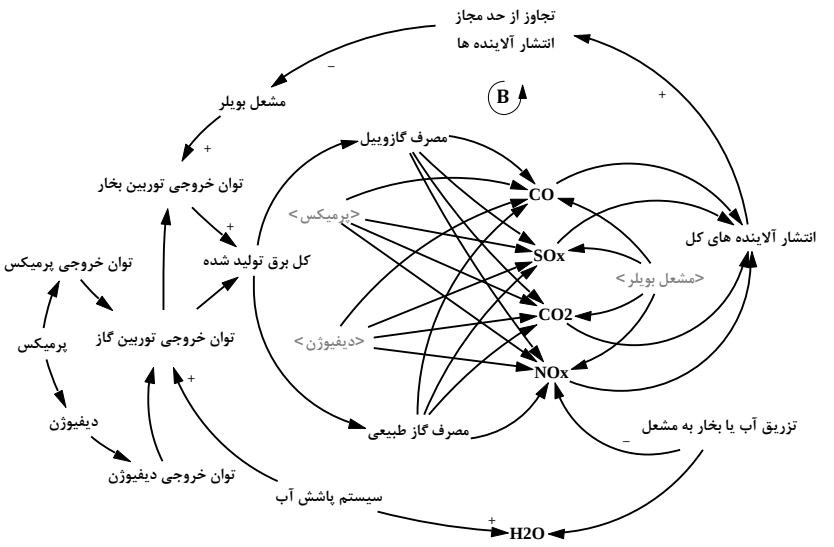
گازهای داغ خروجی از توربین گاز جهت بازیافت و استفاده از انرژی آن، به سمت بویلر هدایت می‌گردد و در این مرحله به کمک مشعل‌های بویلر که فقط با سوخت گاز کار می‌کنند، امکان افزایش دمای گاز و متعاقباً افزایش توان تولید واحد بخار فراهم می‌شود. براساس دستورالعمل‌های بهره‌برداری، زمانی‌که تولید مجموع هر دو واحد گازی به میزان ۱۰۵ مگاوات می‌رسد، واحد بخار در مدار قرار می‌گیرد که در این حالت توان تولید آن در حدود ۸۰ مگاوات خواهد بود. با افزایش توان تولیدیِ مجموع هر دو واحد گازی به حداکثر مقدار ۳۰۰ مگاوات، تولید واحد بخار به ۱۳۰ مگاوات خواهد رسید. پس از آن با در مدار قرار گرفتن مشعل‌های هر دو بویلر، امکان افزایش تولید برق واحد بخار به ۱۶۰ مگاوات وجود خواهد داشت که در این حالت، مجموع تولید برق یک واحد سیکل ترکیبی به مقدار حداکثری ۴۶۰ مگاوات خواهد رسید (مهروان، ۲۰۱۱).

تمامی عوامل ذکرشده، از جمله عوامل تأثیرگذار و اصلی در تولید آلاینده‌ها در یک نیروگاه سیکل ترکیبی هستند.

۲. مدل پویای آلاینده‌های نیروگاه سیکل ترکیبی

مدل دینامیکی مطرح شده در این بخش، بر این اصل استوار است که میزان انتشار آلاینده‌ها به‌صورت درون‌زا و به‌وسیله روابط بین میزان مگاوات تولید شده، نوع سوخت و شیوه بهره‌برداری تعیین می‌شود (شکل ۷). در اینجا از شیوه پویاشناسی سیستم استاندارد پیروی شده و ابتدا ساختار فرضیه پویا با استفاده از نمودار حلقه علّی مورد توجه قرار گرفته است و سپس مدل مربوطه براساس شرایط پویا و واقعی بهره‌برداری از نیروگاه، در نرم‌افزار Vensim مورد تحلیل قرار گرفته است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



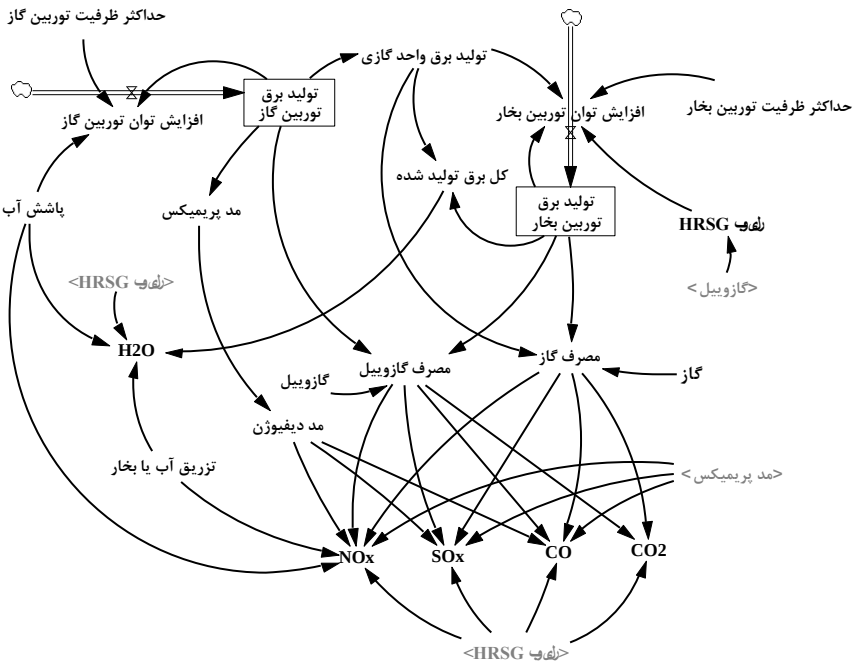
شکل۷. نمودار حلقه علی

دینامیک تولید آلاینده‌های یک نیروگاه سیکل ترکیبی به وسیله یک حلقه تعادلی (B) نشان داده می‌شود. افزایش مصرف سوخت (گاز یا گازوئیل) باعث افزایش تولید آلاینده‌های مختلف خواهد شد. در ادامه، افزایش تولید آلاینده‌ها موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها در جو می‌گردد که ادامه این روند، تجاوز از حد مجاز انتشار آلاینده‌ها را به همراه خواهد داشت. برای جلوگیری از بروز این تخلف، کاهش توان تولید از طریق خارج کردن ابزار تولید، از جمله مشعل بویلر ضروری به نظر می‌رسد.

ـ مدل دینامیکی

شکل شماره (۸) نمودار جریان پارامترهای تأثیرگذار بر آلاینده‌های منتشر شونده از یک نیروگاه سیکل ترکیبی نمایش داده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل۸. نمودار جریان

آلاینده NO_X در مشعل توربین‌های گاز و مشعل‌های بویلر تشکیل می‌شود و استفاده از مشعل توربین گاز در مُد پریمیکس، تزریق آب (بخار) در مشعل توربین گاز، و استفاده از سیستم Fogging، عوامل کنترل کننده این آلاینده هستند. میزان تولید آلاینده SO_X به میزان گوگرد موجود در سوخت بستگی دارد که در سوخت گازوئیل نسبت به گاز بیشتر تولید می‌شود. آلاینده CO_2 نیز جزء محصولات احتراق بوده و با افزایش مصرف سوخت، میزان بیشتری تولید خواهد شد.

همچنین آلاینده CO نیز به دلیل احتراق ناقص در محفظه احتراق تولید می‌شود؛ که ابزاری برای کنترل میزان انتشار آن وجود نداشته و مقدار آن معمولاً به طراحی مشعل‌های به‌کار گرفته شده و میزان مصرف سوخت در توان‌های مختلف تولید برق وابسته است. بخار آب نیز جزئی از ترکیبات خروجی از دودکش نیروگاه سیکل ترکیبی می‌باشد که حاصل از فرآیند احتراق در مشعل‌ها و همچنین پاشش آب در سیستم Fogging و یا تزریق آب (بخار) در مشعل توربین گاز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

می‌باشد و به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای درکنار گاز CO_2 بر گرمایش زمین تأثیرگذار خواهد بود. با افزایش تولید برق در نیروگاه، میزان مصرف سوخت نیز افزایش خواهد یافت که افزایش آلاینده‌ها را به همراه خواهد داشت.

به منظور کمّی‌سازی مدل نیز از روابط زیر بهره گرفته شده است.

میزان توان کل تولیدی یک بلوک نیروگاه سیکل ترکیبی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$P_T = 2P_{GT} + P_{ST}$$

که در آن P_{GT} توان تولیدی توربین گاز و P_{ST} توان تولیدی توربین بخار می‌باشد.

تابع میزان انتشار آلاینده‌ها نیز از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$E = \sum_{i=1}^{n} 10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_T + \gamma_i P_T^2)\ Ton/hr$$

که در آن α_i، β_i و γ_i ضرایب آلودگی نیروگاه می‌باشند (کومار و همکاران، ۲۰۰۳).

همچنین

$$P_{ST} = \int \dot{P}_{ST}$$
$$P_{GT} = \int \dot{P}_{GT}$$
$$Max\ P_{GT} = 160\ \text{MW} \quad ; \quad Max\ P_{ST} = 160\ \text{MW}$$

که $\dot{P}_{GT}$ و $\dot{P}_{ST}$ بترتیب نرخ افزایش توان توربین‌های گاز و بخار می‌باشند.

در نمونه پژوهش‌های انجام شده دیگر، منابع تولید آلاینده‌ها در تأسیسات صنعتی مختلف نظیر پالایشگاه‌ها، مدل‌سازی مفهومی شده و با به‌کارگیری نرم‌افزارهایی نظیر Screen 3، میزان و نحوه آلاینده‌ها پیش‌بینی شده است (جمشیدی، ۱۳۹۷). همچنین در برخی تحقیقات، توزیع اقتصادی توان در نیروگاه‌ها با درنظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی و با استفاده از ابزارهایی نظیر الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه (شریفی و صادق، ۱۳۹۸) مورد بررسی قرار گرفته و یا توزیع غلظت آلاینده‌های نیروگاهی با استفاده از مدل ترکیبی WRF-CALPUFF پیش‌بینی شده است (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۸). در مجموع، هدف این پژوهش از مدل‌سازی فرآیند تولید

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

آلاینده‌ها در یک نیروگاه سیکل ترکیبی با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، بررسی موارد مشروحه ذیل می‌باشد.

شرایط استفاده از مشعل‌ها در بویلر، جهت افزایش تولید برق- باتوجه به تأثیر مستقیم آن بر افزایش میزان انتشار آلاینده‌ها - بررسی می‌گردد و امکان افزایش تعداد مشعل‌ها در یک بویلر بازیافت حرارتی نیز، براساس حدمجاز انتشار آلاینده‌ها، مشخص می‌گردد.

پاشش آب در هوای ورودی به توربین گاز (سیستم Fogging)، درکنار افزایش توان تولید برق، میزان انتشار آب در اتمسفر را افزایش خواهد داد که چگونگی استفاده از این سیستم براساس میزان بخار آب منتشر شده بررسی می‌گردد.

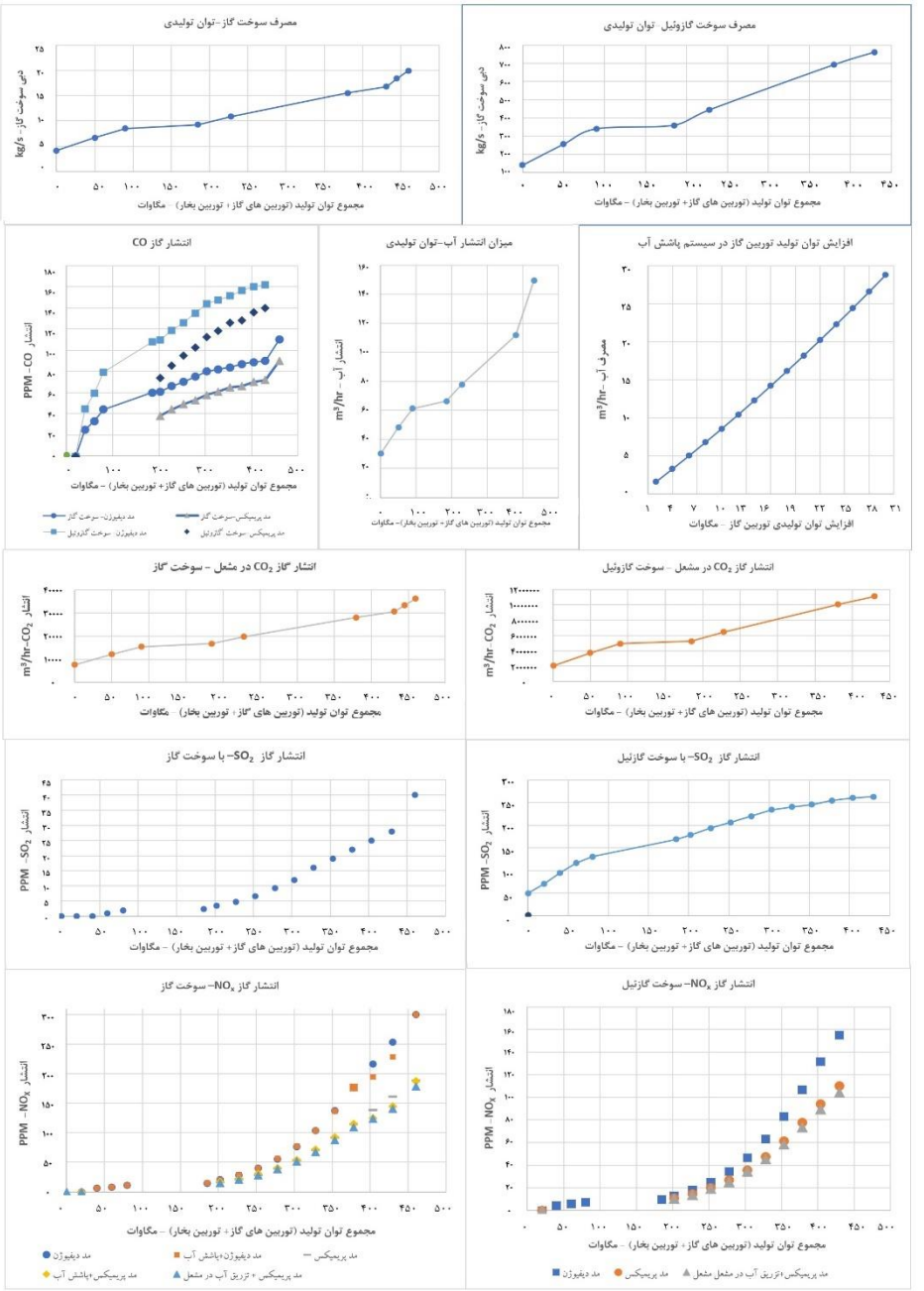
میزان تولید آلاینده‌ها در توان‌های مختلف تولید برق نیروگاه، براساس مُدهای مختلف کاری مشعل توربین گاز (پریمیکس و دیفیوژن) بررسی می‌گردد.

بیشترین میزان امکان تولید برق به ازاء مقدار بهینه مصرف سوخت و انتشار حداقلی آلاینده‌ها، در یک نیروگاه سیکل ترکیبی مشخص می‌گردد.

۳. روش پیشنهادی

برای مدل‌سازیِ مطالعه موردی این پژوهش، یعنی یک بلوک نیروگاه سیکل ترکیبی، از داده‌های حقیقی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ساخته شده توسط شرکت مپنا طی سال‌های ۱۳۹۳ لغایت ۱۳۹۸ (نیروگاه‌های سیکل ترکیبی دماوند، شیروان، یزد و ...) استفاده شده است (شکل ۹).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل۹. نمودارهای داده‌های ورودی مدل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

همچنین فرضیات در نظر گرفته شده در این پژوهش نیز مطابق با شرح ذیل می‌باشد.

- تولید برق در توربین‌های گازی از ۰ الی ۱۲۰ مگاوات (هر واحد ۶۰ مگاوات) در مُد دفیوژن انجام می‌پذیرد.
- تولید برق در توربین‌های گازی از ۱۲۰ مگاوات الی ۲۶۰ مگاوات (هر واحد ۱۳۰ مگاوات) در مُد پریمیکس انجام می‌گردد.
- افزایش تولید برق در توربین‌های گازی از ۲۶۰ مگاوات الی ۳۰۰ مگاوات توسط سیستم Fogging صورت می‌پذیرد.
- تولید برق در توربین بخار از ۸۰ مگاوات شروع می‌شود. (از فاصله زمانی بسیار اندک استارت توربین بخار تا رسیدن به توان ۸۰ مگاوات چشم‌پوشی شده است) در این زمان، تولید برق در مجموع هر دو توربین گازی ۱۰۵ مگاوات می‌باشد.
- میزان تولید برق در توربین بخار مستقیماً به میزان تولید توربین‌های گازی وابسته است که مقدار تولیدی آن نیز- بسته به تولید واحد گازی - تقریباً از رابطه $y=0.26x+51$ محاسبه شده است. (x مقدار مجموع تولید توربین‌های گاز و y مقدار تولید برق توربین بخار به مگاوات می‌باشد)
- افزایش توان تولید توربین بخار از ۱۳۰ مگاوات الی ۱۶۰ مگاوات از طریق مشعل‌های بویلر صورت می‌گیرد.
- سوخت مشعل بویلر فقط گاز است.
- زمانی که سوخت توربین‌های گازی، گازوئیل است از مشعل بویلر استفاده نمی‌شود. لذا حداکثر توان تولیدی واحد بخار ۱۳۰ و حداکثر توان تولیدی کل ۴۳۰ مگاوات خواهد شد.

ـ اعتبارسنجی

یکی از مراحل مهم مدل‌سازی، اعتبارسنجی مدل می‌باشد. اعتبارسنجی مدل‌های پویایی‌های سیستم، اساساً فرآیندی برای ایجاد اطمینان نسبت به درستی و سودمندی مدل به عنوان یک ابزار سیاست‌گذاری است. اعتبارسنجی در مدل‌های سیستم‌های پویا، نه تنها بر آزمون‌های تجدید (تولید مجدد) رفتار، بلکه همچنین بر فرضیات و ساختار مدل نیز تمرکز دارد (گو و همکاران، ۲۰۱۶).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

جدول شماره (۲)، به مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای اصلی مدل شامل مگاوات تولید شده و میزان مصرف گاز و گازوئیل، در یک بازه زمانی ۶۰ دقیقه‌ای (از زمان استارت واحد تا رسیدن به حداکثر توان تولیدی نیروگاه) پرداخته است.

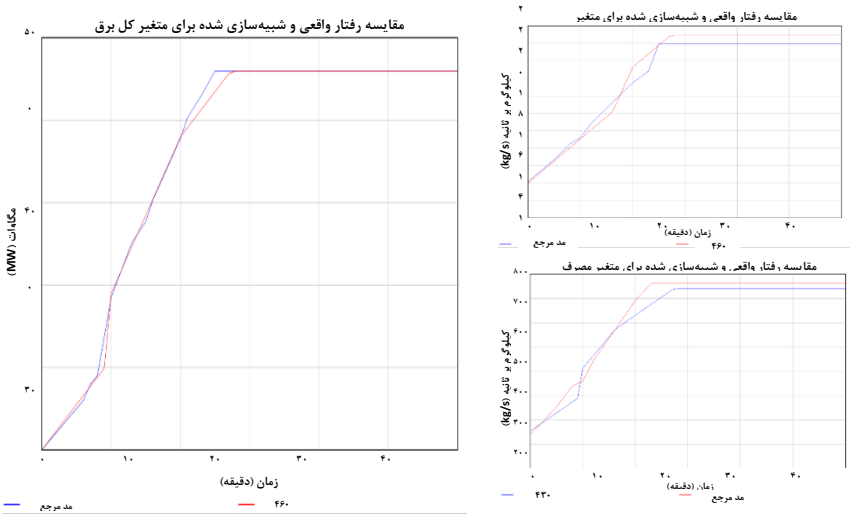
آزمون‌ها و تست‌های رفتاری یا تکرار، الگوی توانایی مدل برای تکرار رفتار گذشته را ارزیابی می‌کنند. بنابراین، شبیه‌سازی ظرفیت‌های ورودی و تولیدی، با مقادیر حقیقی مقایسه شده است (شکل ۱۰).

جدول۲. مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای اصلی مدل

مقایسه مقادیر واقعی و شبیه سازی شده برای متغیرهای اصلی مدل									
زمان	مصرف گازوئیل	شبیه سازی مصرف گازوئیل	خطا (درصد)	مصرف گاز	شبیه سازی مصرف گاز	خطا (درصد)	کل برق تولید شده	شبیه سازی	خطا (درصد)
۰	۱۴۰	۱۵۵	۱۰/۷۱	۴/۲۰	۴/۷۰	۱۱/۹۰	۰	۰	-
۲		۱۸۴/۹۲			۵/۵۸		۲۰	۲۲	۱۰/۰۰
۴		۲۱۴/۸۴			۶/۴۶		۴۰	۴۴	۱۰/۰۰
۶		۲۴۴/۷۶			۷/۳۴		۶۰	۶۶	۱۰/۰۰
۷		۲۵۹/۷۲			۷/۷۸		۸۰	۷۷	۳/۷۵
۸	۳۴۰	۲۷۴/۶۸	۱۹/۲۱	۸/۵۰	۸/۲۲	۳/۲۹	۹۰	۸۸	۲/۲۲
۱۰	۳۶۰	۴۱۳/۴	۱۴/۸۳	۹/۲۰	۹/۱۰	۱/۰۹	۱۸۵	۱۹۰/۰۰	۲/۷۰
۱۳		۴۹۰/۹۲			۱۰/۴۲		۲۵۲	۲۴۷	۱/۹۸
۱۵		۵۴۲/۶			۱۱/۳۰		۲۷۷	۲۸۵	۲/۸۹
۱۶		۵۶۸/۴۴			۱۱/۷۴		۳۰۳	۳۰۴	۰/۳۳
۲۰	۶۹۲	۶۳۱	۸/۸۲	۱۵/۵۰	۱۶/۰۰	۳/۲۰	۳۷۸	۳۸۰	۰/۵۳
۲۱		۶۴۵/۹۶			۱۶/۴۴		۴۰۳	۳۹۱	۲/۹۸
۲۳	۷۶۲	۶۷۵/۸۸	۱۱/۳۰	۱۶/۸۰	۱۷/۳۲	۳/۰۷	۴۳۰	۴۱۳	۳/۹۵
۲۴	۷۶۲	۶۹۰/۸۴	۹/۳۴	۱۸/۳۶	۱۷/۷۶	۳/۲۹	۴۴۵	۴۲۴	۴/۷۲
۲۵	۷۶۲	۷۰۵/۸	۷/۳۸	۱۹/۹۲	۱۸/۲۰		۴۶۰	۴۳۵	۵/۴۳
۳۰	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۳۵	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۴۰	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۵۰	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۵۵	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۵۹	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰
۶۰	۷۶۲	۷۳۹/۸	۲/۹۱	۱۹/۹۲	۱۹/۲۰	۳/۶۳	۴۶۰	۴۶۰	۰/۰۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]



شکل۱۰. نمودار مقایسه رفتار واقعی و شبیه‌سازی شده برای متغیرهای کل برق تولید شده، مصرف سوخت گاز و گازوئیل

آزمون‌های اعتبارسنجی ساختاری و رفتاری نشان می‌دهند که در مدل، قوانین حفظ و بقای انرژی و مواد دنبال می‌شوند و مدل رفتاری سازگار به معرض نمایش می‌گذارد.

٤. مطالعه موردی

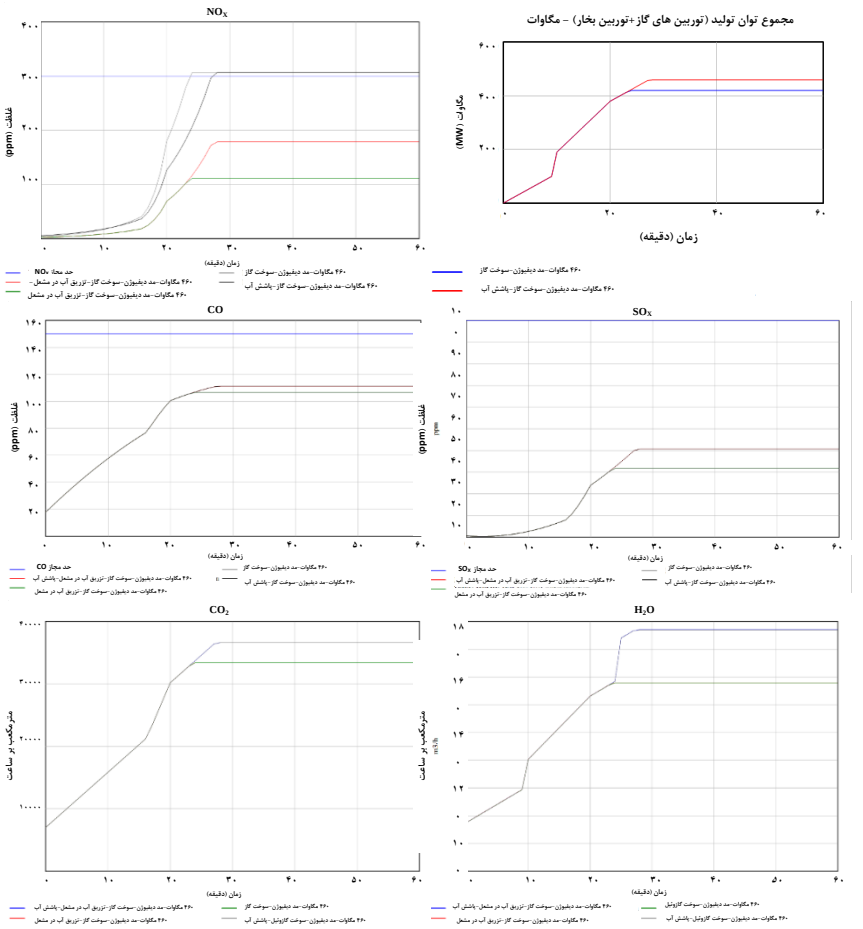
میزان تولید برق و انتشار آلاینده‌های ناشی از آن در یک نیروگاه سیکل ترکیبی، به نوع سوخت مصرفی، حالات احتراق، استفاده از سیستم پاشش آب و تزریق آب یا بخار در مشعل وابسته است که با استفاده از مدل سیستم دینامیک، فرآیند مربوط به آن شبیه‌سازی شده و حالت‌های مختلف آن به منظور ارزیابی میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت‌های مختلف بررسی می‌گردند.

٤-١. حالت اول. استفاده از سوخت گاز در مُد دیفیوژن با حداکثر ٤٦٠ مگاوات تولید برق

همان‌طور که در شکل شماره ۱۱ نشان داده شده است، دستیابی به ۴۶۰ مگاوات تولید بدون استفاده از سیستم پاشش آب امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ با به‌کارگیری این سیستم و افزایش میزان تولید تا ۴۶۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

مگاوات، انتشار آلاینده‌های SO_X، CO از حد مجاز فراتر نمی‌رود، اما انتشار NO_X به میزان ۳۰۷ppm خواهد بود که بیشتر از حد مجاز است. همچنین استفاده از سیستم پاشش آب و تزریق آب یا بخار در مشعل، میزان انتشار H_2O را تا ۱۷۴ مترمکعب در ساعت افزایش می‌دهد.

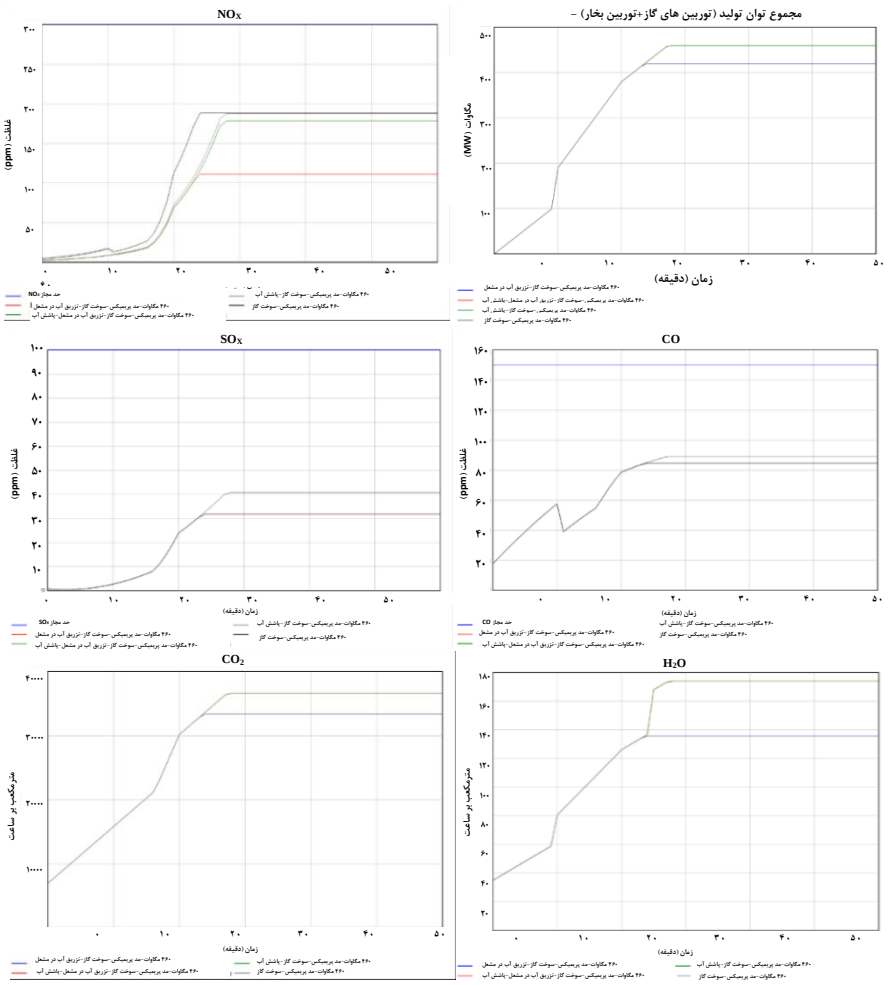


شکل ۱۱. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت اول (سوخت گاز، مُد دیفیوژن و ۴۶۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

٤-۲. حالت دوم. استفاده از سوخت گاز در مُد پریمیکس با حداکثر ٤٦٠ مگاوات تولید برق

همان‌طور که در شکل شماره ۱۲ نشان داده شده است، در این حالت افزایش توان خروجی به وسیله سیستم پاشش آب، موجب افزایش آلاینده‌های SO_X، CO و NO_X به فراتر از حدود مجاز نخواهد شد. همچنین، حداکثر میزان انتشار H_2O نیز ۱۷۴ مترمکعب خواهد بود.

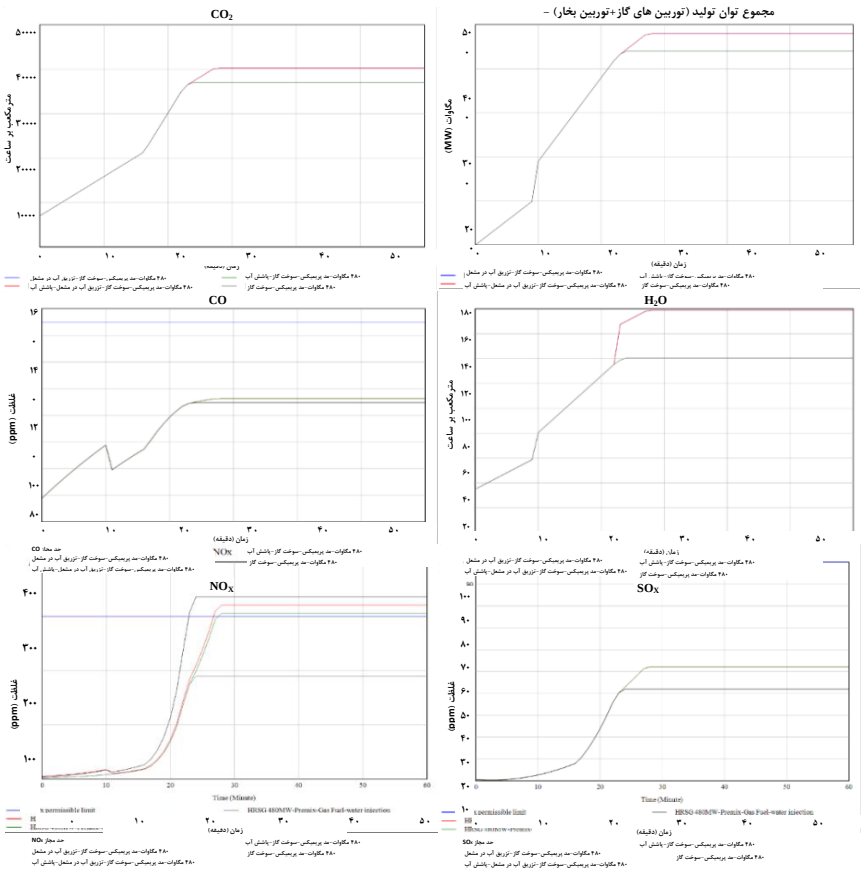


شکل۱۲. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت دوم (سوخت گاز، مُد پریمیکس و ۴۶۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

٤-۳. حالت سوم. استفاده از سوخت گاز در مُد پریمیکس با حداکثر ٤٨٠ مگاوات تولید برق

امکان استفاده از تعداد مشعل‌های بیشتر در بویلرها، ضمن در نظر گرفتن تدابیر مورد نیاز در توربین بخار جهت افزایش تولید برق به صورت تئوریک وجود دارد؛ اما براساس نمودارهای شکل شماره۱۳، افزایش ظرفیت تولید تا ۴۸۰ مگاوات، موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها خواهد شد، به گونه‌ای که میزان انتشار NO_X فراتر از حد مجاز خواهد رفت. مطابق با شبیه‌سازی انجام شده، حداکثر ظرفیت اسمی قابل دستیابی- با در نظر گرفتن حدود مجاز انتشار آلاینده‌ها - ۴۷۷ مگاوات می‌باشد.

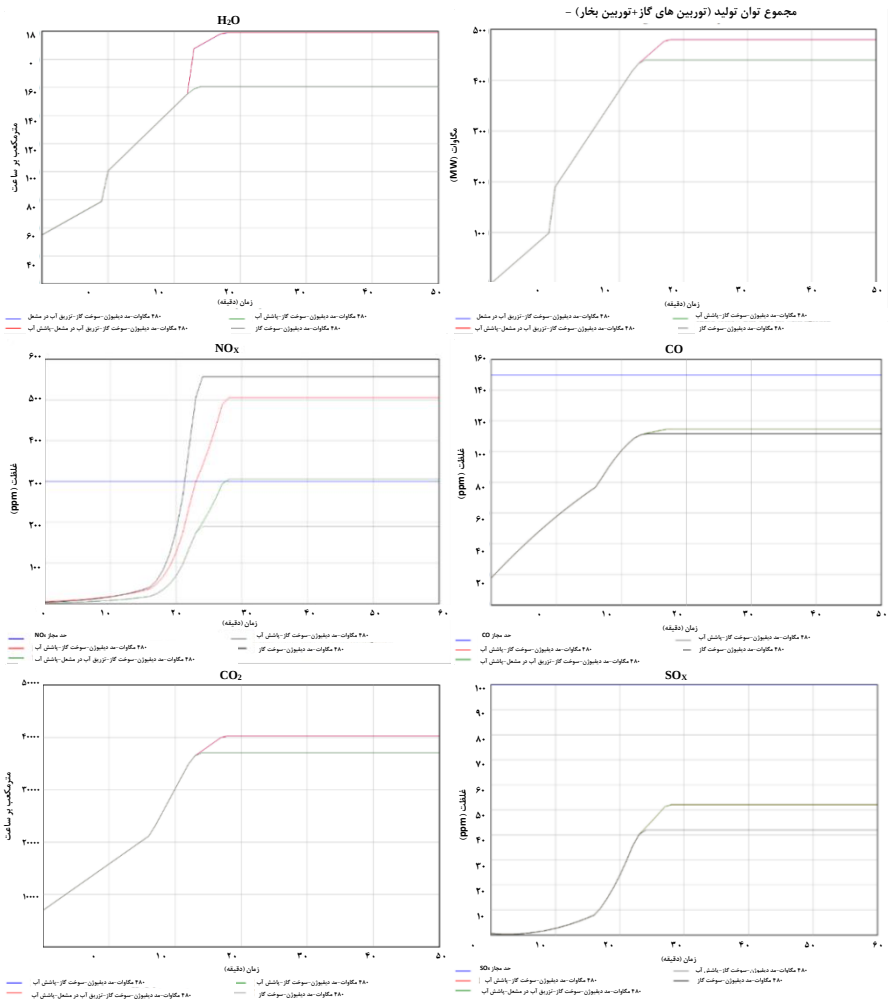


شکل۱۳. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت سوم (سوخت گاز، مُد پریمیکس و ۴۸۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

٤-٤. حالت چهارم. استفاده از سوخت گاز در مُد دیفیوژن با حداکثر ٤٨٠ مگاوات تولید برق

در اینجا نیز مانند حالت قبلی (استفاده از مُد پریمیکس)، میزان انتشار NO_X فراتر از حد مجاز خواهد رفت که مطابق با شبیه‌سازی انجام شده پیشنهاد می‌شود تولید برق تنها تا ۴۷۳ مگاوات افزایش یابد. نکته قابل توجه در این حالت، بالاتر بودن میزان انتشار آلاینده CO نسبت به حالات قبلی است.

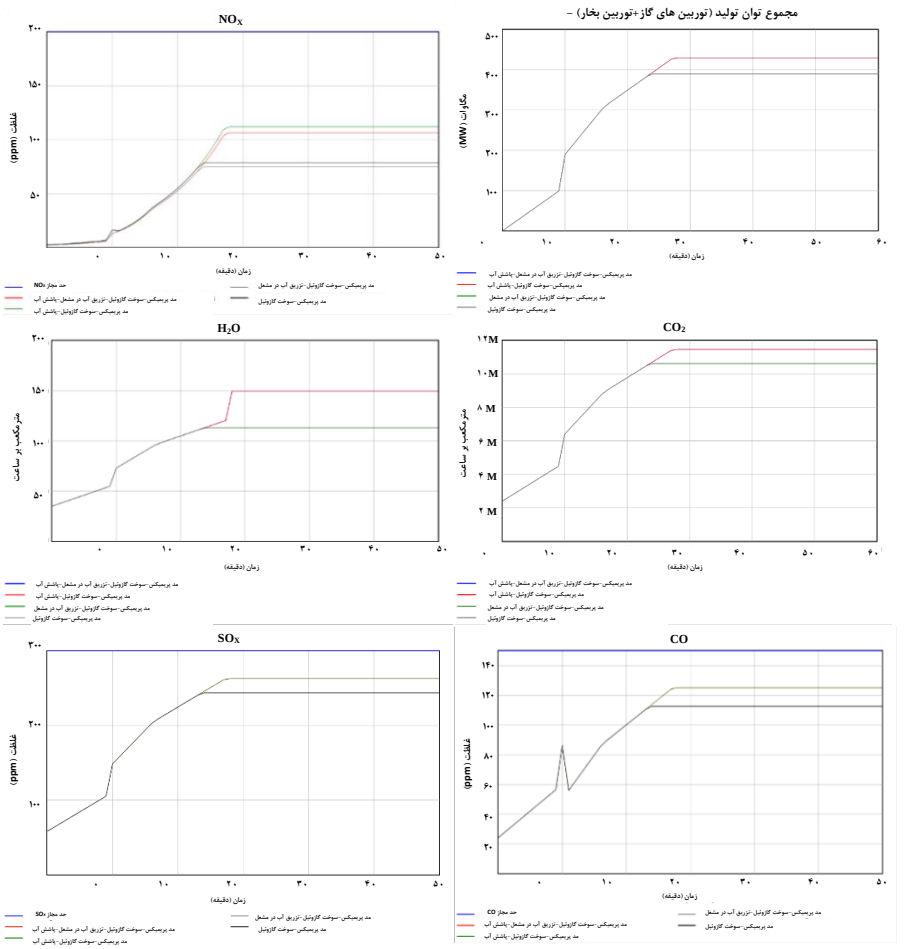


شکل۱۴. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت چهارم (سوخت گاز، مُد دیفیوژن و ۴۸۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

٤-٥. حالت پنجم. استفاده از سوخت گازوئیل در مُد پریمیکس با حداکثر ٤٣٠ مگاوات تولید برق

در این حالت به دلیل نوع سوخت مصرفی، از مشعل بویلر استفاده نمی‌شود و به همین جهت میزان تولید برق حداکثر به ۴۳۰ مگاوات خواهد رسید. با توجه به پایین بودن توان تولیدی، هیچ یک از آلاینده‌ها فراتر از حد مجاز نخواهند رفت؛ ضمن اینکه میزان انتشار آن‌ها در این حالت، بیشتر از مقدار مشابه آن با سوخت گاز است.

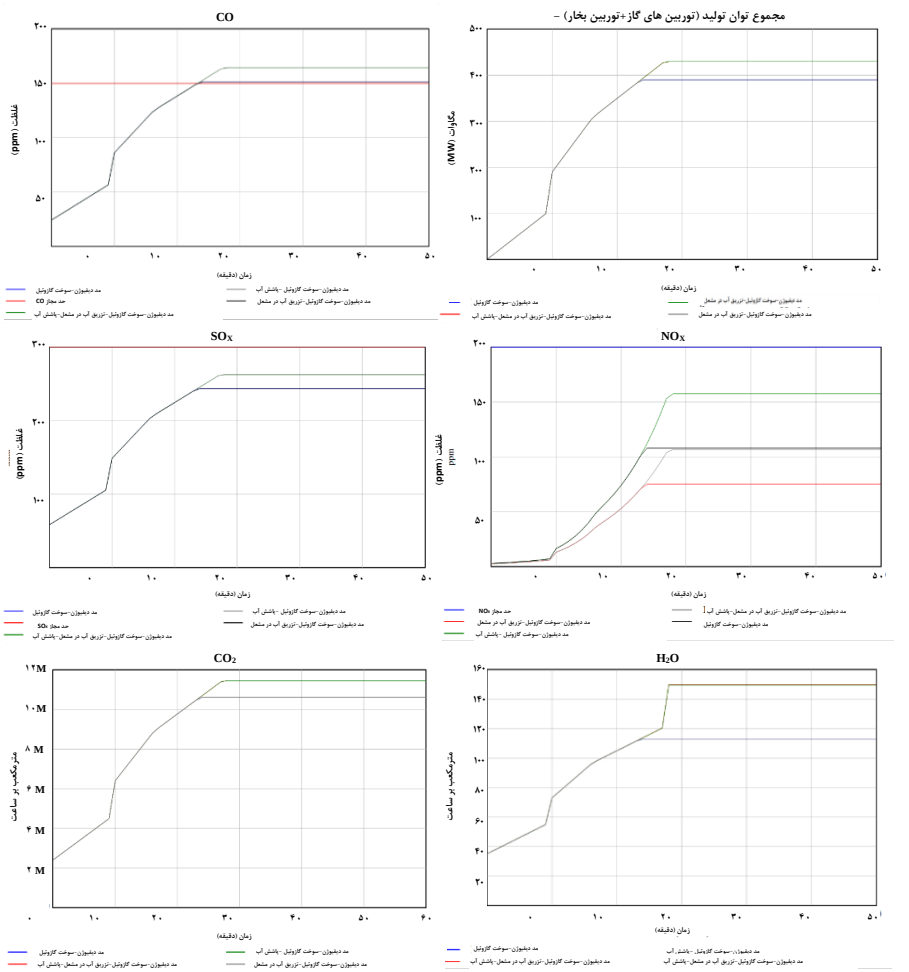


شکل۱۵. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت پنجم (سوخت گازوئیل، مُد پریمیکس و ۴۳۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

٤-٦. حالت ششم. استفاده از سوخت گازوئیل در مُد دیفیوژن با حداکثر ٤۳۰ مگاوات تولید برق

در اینجا فقط انتشار آلاینده CO به میزان ناچیزی بیشتر از حد مجاز خواهد بود و میزان انتشار سایر آلاینده‌ها کمتر از حد مجاز است. بطور کلی در این حالت، میزان انتشار آلاینده‌ها بیشتر از حالت پریمیکس است.



شکل۱۶. نمودار میزان انتشار آلاینده‌ها در حالت ششم (سوخت گازوئیل، مُد دیفیوژن و ۴۳۰ مگاوات تولید)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

۵. بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوا براساس میزان تولید واحدهای صنعتی، می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های محیط زیست، خصوصاً در پیش‌بینی وضعیت آلودگی هوا و میزان غلظت آلاینده‌ها تحت شرایط مختلف، به‌کارگرفته شود. در این پژوهش با رویکردی پویا، میزان انتشار آلاینده‌های یک نیروگاه سیکل ترکیبی براساس میزان مصرف انواع سوخت و همچنین توانِ تولیدی در مُدهای مختلف کاری توربین‌های گاز و بخار مورد بررسی قرار گرفته است. براساس یافته‌های تحقیق، استفاده از سوخت گاز، علاوه بر افزایش طول عمر تجهیزات نیروگاهی (خصوصاً بویلرها)، میزان انتشار آلاینده‌ها را نسبت به سوخت گازوئیل کاهش می‌دهد. همچنین استفاده کمتر از مُد دیفیوژن در زمان بهره‌برداری از توربین‌های گاز، موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها در قیاس با کاربرد مُد پریمیکس می‌باشد. لازم به ذکر است، استفاده از سیستم تزریق آب (یا بخار) در مشعل توربین گاز و یا به‌کارگیری سیستم پاشش آب در هوای ورودی به توربین (Fogging)، باعث کاهش تولید آلاینده NO_X می‌شود. اگرچه، استفاده از دو سیستم یاد شده به دلیل نیاز آن‌ها به حجم زیادی از آب تصفیه شده، موجب اتلاف منابع آب زیرزمینی و به موازات آن، افزایش انتشار بخار در جو زمین و افزایش اثر گلخانه‌ای می‌گردد. از آنجائیکه بالابردن راندمان واحدهای سیکل ترکیبی به عنوان یک کار تحقیقاتی در دستور کار بسیاری از شرکت‌های مدیریت تولید برق قرار دارد (نظیر استفاده از سیستم Fogging)، براساس یافته‌های این پژوهش و نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده، افزایش توان تولیدی یک بلوک نیروگاه سیکل ترکیبی به بالاتر از ظرفیت اسمی ۴۶۰ مگاوات، از طریق اضافه کردن تعداد مشعل‌های بویلر، مستقیماً بر افزایش انتشار آلاینده‌ها و تجاوز آن‌ها از حدود مجاز، تأثیرگذار است و حد نهایی این افزایش براساس یافته‌های پژوهش، ۴۷۷ مگاوات است. در پایان پیشنهاد می‌گردد تا در تحقیقات آتی، سایر اجزاء نیروگاه نیز که ممکن است به نحوی بر میزان و نحوه انتشار آلاینده‌ها مؤثر باشند بررسی گردند. همچنین چگونگی انتشار و تأثیرگذاری این آلاینده‌ها بر سایر تأسیسات موجود در نیروگاه و یا محیط‌زیست اطراف و راه‌های جلوگیری از اثرات مخرب آن با تغییر در طراحی و چیدمان اجزاء نیروگاه نیز می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

منابع

احمدوند، علی‌محمد؛ اقبالی، حسین؛ گائینی، احمد و اسداله احمدوند (۱۳۹۸)، "بررسی تأثیر آلودگی هوا بر میزان سلامت افراد با رویکرد پویایی‌شناسی (مطالعه موردی: شهر تهران)"، *دومین کنفرانس ملی انجمن ایرانی پویایی‌شناسی سیستم‌ها*، تهران، انجمن علمی پویایی‌شناسی سیستم‌ها.

اردبیلی، سیدمحمد صفی‌الدین؛ ذکی دیزجی، حسن و محمدجواد شیخ داودی، (۱۳۹۶)، "بهینه‌سازی متغیرهای عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با استفاده از سوخت دیزل- روغن الکل به کمک روش سطح پاسخ"، *نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق*، سال دهم، شماره ۳، صص ۱۰۴-۹۳.

اسماعیل‌زاده، محمد؛ بذرافشان، ادریس و مهناز نصرآبادی (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی انتشار گازهای SO_2 و NO_X خروجی از دودکش نیروگاه گازی توس مشهد"، *مجله سلامت و محیط*، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، دوره ششم، شماره ۱، صص ۹۰-۷۷.

اشرفی، حجت و محمود سالاری (۱۳۹۵)، "بررسی روش‌های مختلف کاهش آلایندگی در موتورهای احتراق داخلی"، *همایش بین‌المللی افق‌های نوین در علوم پایه و فنی و مهندسی*، تهران.

الماسی، علی؛ اسدی، فاطمه؛ محمدی، میترا؛ فرهادی، فروغ؛ عطافر، زهرا؛ خاموطیان، راضیه و احمد محمدی (۱۳۹۲)، "بررسی میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش کارخانه سیمان سامان کرمانشاه"، *فصل‌نامه بهداشت در عرصه، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی*، دوره یکم، شماره ۲، صص ۴۳-۳۶.

جمشیدی انگاس، محسن (۱۳۹۷)، "مدل‌سازی مفهومی منابع تولید آلاینده‌های هوا در پالایشگاه با رویکرد بررسی کیفیت هوای شهری به‌وسیله Screening مدل"، *مجله مدیریت محیط‌زیست و توسعه پایدار*، دوره سوم، شماره ۳، صص ۶-۱.

رشیدی، یوسف؛ رحیمیان، محسن و عبداله رشیدی مهرآبادی (۱۳۹۸)، "بررسی توزیع غلظت آلاینده NO_X، خروجی از دودکش نیروگاه منتظری اصفهان با استفاده از مدل ترکیبی WRF-CALPUFF"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، دوره پنجاه و یکم، شماره ۲، صص ۳۱۳-۲۹۷.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

زارع‌پور، غلامرضا؛ صیاد امین، جواد و محمد سمیع‌پور (۱۳۹۲)، "پایش، بهینه‌سازی و کنترل آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از صنعت سیمان با استفاده از منطق فازی، روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک"، *دومین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست، دانشگاه تهران.*

زارع‌نژاد اشکذری، عباس؛ حسین‌نژاد، علیرضا و سعید فراهت (۱۳۹۵)، "بهینه‌سازی مصرف سوخت و آلاینده‌ها در موتورهای دیزلی با استفاده از شبکه عصبی و قاعده مورچگان با رویکرد زمان متغیر دریچه ورودی و سامانه پاشش سوخت"، *فصل‌نامه علمی- پژوهشی تحقیقات موتور*، شماره ۴۳، صص ۳۰-۱۳.

شریفی، حسین و محمود اوکاتی صادق (۱۳۹۸)، "توزیع اقتصادی توان در نیروگاه‌ها با درنظر گرفتن آلاینده‌های زیست‌محیطی و شاخص‌های پایدار سیستم با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه"، *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال هفدهم، شماره ۱، صص ۴۱-۳۳.

علی‌پور، حمیده و سید محسن حسینی گلگو (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی آلودگی هوا تولیدی نیروگاه سیکل ترکیبی گیلان"، *کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط زیست در هزاره سوم، رشت.*

ماموریان، مجتبی؛ معروف، هادی؛ استیری، هانی و محمد مهدی اجتهادی (۱۳۹۲)، "بررسی مشعل‌های دوگانه‌سوز نیروگاه به منظور کاهش NOx و افزایش راندمان"، *همایش مشترک مهندسی کامپیوتر و مکانیک*، دانشگاه جامع علمی کاربردی، میاندوآب، ایران.

نجفی، بهمن؛ ترکیان، مهدی؛ حجازی، محمدامین و امیرعلی زمزمیان (۱۳۹۰)، "تأثیر بیودیزل تولید شده از میکرو جلبک بر متغیرهای عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل پاشش غیرمستقیم"، *نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق*، سال چهارم، شماره ۲، صص ۴۲-۲۹.

نیک اقبالی سی سخت، نادر؛ سخاوت‌جو، محمدصادق؛ روزبهانی، بهروز و علی دادالهی (۱۳۹۳)، "کاهش انتشار آلاینده‌های هوا در واحد کت کراکر جدید پالایشگاه آبادان توسط اسکرابر"، *فصل‌نامه تخصصی علمی ترویجی فرآیند نو*، شماره ۴۶، صص ۹۵-۷۹.

وفاآرانی، حامد؛ مؤذن، سعید؛ حیدری، جعفر؛ دشتی، حسین و سلمان جهانی (۱۳۹۲)، "رویکرد پویاشناسی سیستم برای مدل‌سازی مسئله آلودگی هوا: مطالعه موردی تهران"، *دهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، دانشگاه تهران.*

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]

Basham M., Shaahid S.M. and L. AL-Hadhrami (2013). "Impact of inlet Fogging and fuels on power and efficiency og Gas turbine Plants", *Thermal Science Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 1107-1117.

Bonzani F., Pollarolo G. and F. Rocca (2002). "Operating Experience of ANSALDO V94.2 K Gas Turbine FED by Steel Works Gas", *Proceedings of ASME Turbo Expo,* Amsterdam, pp. 1-6.

Cheng J., Liu J., Wang T., Sui Z., Zhang Y. and W-P. Pan (2019). "Reductions in Volatile Organic Compound Emissions from Coal-Fired Power Plants by Combining Air Pollution Control Devices and Modified Fly Ash", *Energy Fuels Journal*, Vol.33, No. 4, pp. 2926-2933.

Guo Xi., Niu D. and B. Xiao (2016). "Assessment of Air-Pollution Control Policy's Impact on China's PV Power: A System Dynamics Analysis", *Energies Journal*, Vol.9, No. 336, pp. 1-23.

Kelhlofer R., Rukes B., Frank Hannemann, F. and F. Stirnimann (2009). "*Gas Turbine Engineering Handbook*", 3th Edition, Chapter 4-Combined Cycle Plants for Cogeneration, pp. 147-169, Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Company.

Kumar A.S., Dhanushkodi K., Kumar J.J. and C.K.C. Paul (2003). "Particle Swarm Optimization Solution to Emission and Economic Dispatch Problem", *in Proc. IEEE Conf. on Convergent Technologies for the Asia Pacific Region, Bangalore, India, TENCON'03*, Vol. 1, pp. 435 439.

Mao G., Dai Xi., Wang Y., Guo J., Cheng Xi., Fang D., Song Xi., He Y. and P. Zhao (2013). "Reducing Carbon Emissions in China: Industrial Structural Upgrade based on System Dynamics", *Energy Strategy Reviews Journal*, Vol. 2, pp.199-204.

Meherwan P. Boyce (2011). "*Gas Turbine Engineering Handbook*", 4th Edition, Chapter 10-Combustors, pp. 427-490, U.K.: Butterworth-Heinemann.

Schmid D., Korkmaz P., Blesl M., Fahl U. and R. Friedrich (2019). "Analyzing Transformation Pathways to a Sustainable European Energy System—Internalization of health Damage Costs Caused by air Pollution", *Energy Strategy Reviews Journal*, Vol. 26, pp. 1-11.

Shahzad U. (2015). "Global Warming: Causes, Effects and Solutions", *Durreesamin journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 72-80.

Sonu K. and B. Kumar (2018). "Study and Analysis on Emissions of NOx and SOx in Thermal Power Plant", *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Vol. 6, No. 7, pp. 903-911.

Tiwari M.K., Bajpai S. and U.K. Dewangan (2019). "Environmental Issues in Thermal Power Plants – Review in Chhattisgarh Context", *Journal of Material and Environmental Sciences*, Vol. 10, No. 11, pp. 1123-1134.

Yilmazoˇglu M.Z. (2010). "Effects of a Fogging System on a Combined cycle Performance", *Power and Energy journal*, Vol. 224, pp. 1029-1038.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-10]