

# تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر انتشار دی‌اکسید کربن بخش نیروگاهی ایران (۱۳۷۸-۱۳۸۶)

محمد حسن فطرس<sup>۱</sup>

جواد براتی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت ۱۳۸۹/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۱۹

## چکیده

بخش نیروگاهی با سهم ۲۸/۲ درصدی از کل انتشار دی‌اکسید کربن، بزرگ‌ترین بخش منتشرکننده گاز گلخانه‌ای در کشور است. این مطالعه از تکنیک تجزیه‌ی شاخص دیویژیا میانگین لگاریتمی (LMDI)<sup>۳</sup> استفاده می‌کند تا تأثیر پنج عامل رشد اقتصادی، شدت سوخت، شدت انرژی برق، ساختار تولید و کیفیت سوخت را در اثرگذاری بر تغییر انتشار دی‌اکسید کربن بخش نیروگاهی برای دوره‌ی ۱۳۷۸-۱۳۸۶ تبیین کند. اثر بازده حرارتی و اثر ساختار (ترکیب) سوختی نیز برای تعیین عوامل مؤثر بر تغییر شاخص انتشار دی‌اکسید کربن تحلیل می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد در کل دوره، رشد اقتصادی بیشترین اثر را بر افزایش انتشار بخش نیروگاهی داشته است. پس از آن، به ترتیب اثر کیفیت سوخت، اثر شدت سوخت و اثر ساختار تولید عوامل مؤثر بر رشد انتشار دی‌اکسید کربن است. تغییر در ساختار (ترکیب) سوختی بیشترین اثر را بر افزایش شاخص انتشار دی‌اکسید کربن، به‌طور خاص برای دوره‌ی ۸۷-۱۳۸۳، داشته است. بررسی شاخص انتشار نشان می‌دهد که نیروگاه سیکل ترکیبی کم‌ترین شاخص انتشار را در میان انواع نیروگاه‌های حرارتی دارد و از نظر زیست‌محیطی مناسب‌ترین نیروگاه حرارتی برای تولید برق است.

**JEL:** Q43, Q58, C43, L94.

**واژه‌گان کلیدی:** تجزیه شاخص دیویژیا میانگین لگاریتمی (LMDI)، نیروگاه حرارتی، شاخص انتشار، مصرف سوخت.

۱- دانشیار گروه اقتصاد دانشگاه همدان (fotros@basu.ac.ir)

۲- کارشناس ارشد برنامه ریزی و توسعه اقتصادی دانشگاه بوعلی سینا، (j\_baraty@yahoo.com)

## ۱. مقدمه

شواهد علمی در حال گسترشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر وجود دارد که آن را مرتبط با افزایش دمای جهانی و تغییرات در الگوهای اقلیمی می‌داند. منابع اولیه‌ی افزایش در غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر، افزایش در مصرف سوخت سنگواره‌ای لازم برای فعالیت‌های تولیدی انسان است (فطرس، ۱۳۸۸). برآورد کرده‌اند که از سال ۱۷۵۰ تاکنون، حدود دوسوم بخش  $CO_2$  ناشی از مصرف سوخت‌های سنگواره‌ای بوده و در سال‌های اخیر این انتشار افزایش داشته‌است (مالا، ۲۰۰۹).

برق مهم‌ترین منبع تأمین انرژی در زندگی امروزی است که تولید از محل‌های مهم مصرف سوخت‌های سنگواره‌ای است. سادگی تبدیل برق به دیگر انرژی‌ها و سهولت انتقال سریع آن به نقاط مختلف بر اهمیت استفاده از آن می‌افزاید. در سال ۱۳۸۷، بخش نیروگاهی ایران با سهمی حدود ۲۸/۲ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن، بیشترین سهم انتشار دی‌اکسید کربن کشور را داشته است. پس از آن، بخش خانگی، تجاری و عمومی با ۲۵/۸ درصد و بخش صنعت با ۲۳/۲۶ درصد قرار دارد. انتشار  $CO_2$  از بخش نیروگاهی ایران در دهه‌ی گذشته میانگین رشدی برابر با ۹/۳ درصد داشته‌است. این رشد برای سال ۱۳۸۷، ۲۰/۷۹ درصد بوده است. پس، لازم است به اقدامات و سیاست‌ها برای کاهش انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی توجه کرد.

نیروگاه‌های حرارتی از سوخت سنگواره‌ای استفاده می‌کنند. در دهه‌ی گذشته، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی به ترتیب با ۲۳/۴۰ و ۱۴/۳۲ درصد بیشترین رشد را در انتشار  $CO_2$  داشته‌اند. این دو نوع نیروگاه از سوخت‌های نفت گاز و گاز طبیعی استفاده می‌کنند؛ رشد انتشار  $CO_2$  ی ناشی از مصرف نفت گاز در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به تنهایی ۶۲/۲ درصد بوده‌است.

ایران، در سال ۲۰۱۰، از نظر شاخص عملکرد محیط‌زیست<sup>۱</sup> با امتیاز ۶۰، در رتبه‌ی ۷۸ جهان قرار داشت (استی و همکاران، ۲۰۱۰)؛ در حالی که در سال ۲۰۰۸، با امتیاز ۷۶/۹ در رتبه‌ی ۶۷ (استی و همکاران، ۲۰۰۸) و در سال ۲۰۰۶، با امتیاز ۷۰ رتبه‌ی ۵۳ (استی و همکاران، ۲۰۰۶) را داشته‌است. نزول رتبه‌ی ایران در شاخص عملکرد محیط‌زیست، اهمیت توجه به این مقوله را بیشتر می‌کند. امروزه، مطالعات زیست‌محیطی بستر تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی در امور عمده‌ای مانند سیاست، فرهنگ، اقتصاد و طبیعت شده‌است (سهراب و همکاران، ۱۳۸۴).

با توجه به فزونی انتشار  $CO_2$  ی ناشی از سوخت‌های سنگواره‌ای در بخش نیروگاهی و روند فزاینده استفاده از این سوخت‌ها در تولید برق کشور، این مقاله به تحلیل عوامل مؤثر بر تغییرات انتشار  $CO_2$  ی ناشی از سوخت‌های سنگواره‌ای استفاده شده در بخش نیروگاهی کشور می‌پردازد. عوامل بالقوه‌ی تغییر در انتشار

CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی، عبارت‌است از: تغییر در نیاز به تولید برق، تغییر در ساختار تولید نیرو (تغییر در سهم انواع منابع سوخت برای تولید نیرو)، شدت سوخت تولید نیرو (سهم سوخت مصرفی نسبت به برق تولیدی) و کیفیت سوخت (مقدار کربن منتشر شده از هر نوع سوخت). افزایش در نیاز به تولید برق همبسته‌ی مستقیم رشد تقاضای برق است؛ خود این تقاضا متأثر از رشد اقتصادی و شدت انرژی برق (برق مصرف شده در واحد GDP) است.

سازمان‌دهی مقاله چنین است که پس از مقدمه، در بخش دوم پیشینه‌ی تحقیق، در بخش سوم مبانی نظری الگو بیان می‌شود؛ سپس، در بخش چهارم روش تحقیق و در بخش پنجم تجزیه و تحلیل اطلاعات می‌آید. در پایان، نتیجه‌گیری تحقیق گفته می‌شود.

## ۲. پیشینه‌ی تحقیق

بخش نیروگاهی با حدود ۴۶ درصد بیشترین سهم در انتشار دی‌اکسید کربن جهان را دارد. با این حال، مطالعات معدودی در زمینه‌ی تجزیه عوامل تأثیرگذار بر تغییر در شدت انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی برای کشورهای مختلف انجام شده‌است. شریستا و همکاران (۲۰۰۹) با تکنیک تجزیه‌ی شاخص دیویژیا میانگین لگاریتمی (LMDI)<sup>۱</sup>، عوامل کلیدی مؤثر بر رشد انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی را برای ۱۵ کشور منتخب آسیایی و اقیانوس آرام مطالعه کردند. این عوامل شامل تغییرات در محصول اقتصادی، شدت انرژی برق، شدت سوخت و ساختار تولید نیرو بوده‌است. مطالعه‌ی ایشان نشان داد که رشد اقتصادی تأثیر غالبی در افزایش انتشار CO<sub>2</sub> در ده کشور منتخب (استرالیا، چین، هند، ژاپن، مالزی، پاکستان، کره جنوبی، سنگاپور، تایلند و ویتنام) داشته‌است. در حالی که اثر شدت انرژی برق<sup>۲</sup> تولیدی، عامل اصلی افزایش CO<sub>2</sub> برای سه کشور بنگلادش، اندونزی و فیلیپین بوده‌است. در سریلانکا و نیوزیلند، تغییرات ساختاری تولید نیرو سهمی مهم در رشد انتشار CO<sub>2</sub> داشته‌است.

استینهاف (۲۰۰۷) انتشار CO<sub>2</sub> از بخش برق چین را تجزیه و تغییرات در انتشار را با توجه به سناریوهای مختلف تا افق سال ۲۰۲۰، تحلیل کرده‌است. وی با توجه به تأکید مقاله بر مصرف برق، عوامل مؤثر بر تقاضای برق، برق تولیدی، منابع انرژی استفاده شده برای تولید و عوامل مؤثر بر انتقال و توزیع برق را بررسی کرد. نتایج وی نشان داد که کارایی تولید مهم‌ترین عامل مؤثر بر تغییرات شدت انتشار از تولید برق بوده‌است. این درحالی است که انتظار می‌رود در سال‌های آینده انتقالی به سمت افزایش استفاده از گاز طبیعی و تولید هسته‌ای بیشتر در چین شتاب بیش‌تری به خود گیرد.

1- Logarithmic Mean Divisia Index

2 - The Effects Of Changes In Electricity Intensity

مالا (۲۰۰۹) با استفاده از روش شاخص دی‌ویژیا میانگین لگاریتمی (LMDI) تأثیر سه عامل تولید برق، ساختار تولید برق و شدت انرژی برق تولیدی را در تأثیرگذاری بر انتشار  $CO_2$  از تولید برق در هفت کشور عمده‌ی منتشرکننده‌ی  $CO_2$  ارزیابی کرد. نتایج مقاله‌ی وی نشان داد که رشد اقتصادی عامل اصلی در افزایش انتشار  $CO_2$  در دوره‌ی ۱۹۹۰-۲۰۰۵ بوده است. اثر ساختار تولید با نسبتی کم‌تر بر رشد انتشار  $CO_2$  مؤثر بوده است. اثر شدت انرژی تأثیری کاهشی بر انتشار  $CO_2$  در این دوره داشته است. پیش‌بینی‌های گفته شده در آن مقاله حاکی است که در دوره‌ی ۲۰۳۰-۲۰۰۵، رشد اقتصادی مهم‌ترین عامل در افزایش انتشار  $CO_2$  در بخش نیروگاهی باقی می‌ماند در حالی که از اثر ساختار تولید کاسته می‌شود.

شرستا و تیملسینا (۱۹۹۸) تغییر در ترکیب فناوری، ترکیب سوختی و شدت انرژی را برای تحلیل شدت انتشار  $NO_x$  از بخش نیروگاهی تایلند و کره جنوبی تحلیل کردند. آن‌ها با استفاده از تکنیک تجزیه دی‌ویژیا به این نتیجه رسیدند که اثر شدت انرژی، عامل اصلی کاهش شدت انتشار  $NO_x$  در دوره‌ی ۱۹۸۵-۱۹۹۵ در تایلند بوده است. افزون بر این، اثر ترکیب سوختی و اثر ترکیب فناوری تأثیری معنی‌دار در کاهش انتشار  $NO_x$  داشته‌اند. تغییر در اثر ترکیب سوخت به علت جانشینی گاز با سوخت‌های نفتی و کاهش شدت انتشار  $NO_x$  در کره جنوبی نیز به طور عمده به علت اثر ترکیب سوخت بوده که از جانشینی ذغال‌سنگ و LNG با سوخت‌های نفتی در دوره‌ی ۱۹۸۷-۱۹۹۲ نامیده می‌شود.

صادقی و همکاران (۱۳۸۶) با هدف بررسی راهکارهای افزایش بازده نیروگاه و آثار زیست‌محیطی و اقتصادی آن، به بررسی بازده نیروگاه‌های گازی، سیکل ترکیبی و بخاری پرداختند. همچنین، هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها و اثرات آن‌ها بر سلامت انسان و محیط زیست را مطالعه کردند. محاسبات آن‌ها نشان داد که در نتیجه‌ی افزایش بازده، میزان آلاینده‌های تولیدی و هزینه‌های اجتماعی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و این کاهش نیز بیشتر در نیروگاه‌های بخاری رخ خواهد می‌دهد؛ بنابراین، ارجحیت افزایش بازده را در نیروگاه‌های بخاری دانسته‌اند.

مرزبان و همکاران (۱۳۸۴) در مقاله‌ای به تحلیل تقاضا برای انواع سوخت (گازوئیل، نفت کوره و گاز طبیعی) و جایگزینی بین آن‌ها در نیروگاه‌های حرارتی پرداختند. آن‌ها با استفاده از یک تابع هزینه‌ی کوتاه‌مدت غیرهموتیک ترانسلوگ به این نتیجه رسیدند که "ضریب بار" متغیری اثرگذار بر تقاضای سوخت است و سهم سوخت‌ها نسبت به تغییرات ضریب بار با ککش است. رابطه‌ی میان سوخت‌ها به‌صورت جانشینی است؛ اما، این جانشینی بسیار ضعیف است و تقاضای انواع سوخت نسبت به تغییرات قیمت آن‌ها بی‌ککش است. تغییرات فنی برای استفاده از گاز طبیعی و کاهش مصرف گازوئیل و نفت کوره بوده در حالی که شدت مصرف گازوئیل و

نفت کوره افزایش و شدت مصرف گاز طبیعی کاهش یافته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سطح محصول، بهره‌وری جزئی متوسط گازوئیل و نفت کوره کاهش یافته؛ اما، بهره‌وری جزئی متوسط گاز طبیعی افزایش می‌یابد.

حیدری (۱۳۸۴) در مطالعه‌ای با استفاده از روش تجزیه، به پیش‌بینی تقاضای انرژی در اقتصاد ایران پرداخته است. برای این منظور، تنها از سه حامل انرژی (برق، گاز طبیعی و فراورده‌های نفتی) استفاده کرد تا تأثیر عوامل مؤثر (اثر ساختاری، اثر ارزش افزوده و اثر شدت انرژی) بر مصرف انرژی را برای بخش‌های صنعت، کشاورزی، خدمات و حمل‌ونقل بررسی کند. نتایج مطالعه وی حاکی از صرفه‌جویی قابل ملاحظه در مصرف فراورده‌های نفتی ناشی از کاهش شدت انرژی در میزان‌های رشد اقتصادی بالا و پایین بود.

شریفی و همکاران (۱۳۸۷) نیز با استفاده از تکنیک تجزیه‌ی فیشر و ضرب‌پذیری، شدت انرژی در صنایع نه‌گانه‌ی ایران را تجزیه کردند. نتایج تجزیه آن‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر صنایع نه‌گانه، اثر ساختاری سهم اندکی در تغییرات اثر کل شدت انرژی داشته و اثر شدتی (شدت انرژی) سهمی بیشتر در تغییرات اثر کل داشته است. در بیشتر صنایع در سال‌های مختلف اثر شدتی در جهت کاهش شدت انرژی حرکت کرده و اثر ساختاری سهم ضعیفی در کاهش شدت انرژی داشته است. آن‌ها بر اساس نتایج مطالعه‌ی خود پیشنهاد دادند که عوامل مؤثر بر اثر شدتی مانند پیشرفت فناوری، قیمت حامل‌های انرژی، جانشینی حامل‌های انرژی، تغییر در کارایی انرژی و مدیریت تقاضای انرژی در نظر گرفته شود تا با کاهش اثر شدتی (اثر شدت انرژی) بتوان شدت مصرف انرژی در این صنایع را کاهش داد و در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.

در این مطالعه، عواملی که به تدریج انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی را افزایش می‌دهد، تحلیل می‌شود. از ویژگی‌های این تحقیق، تمرکز آن بر انواع نیروگاه‌های حرارتی و تحلیل شاخص انتشار  $CO_2$  است. مطالعاتی که در کشورهای دیگر انجام شده است، بر انواع سوخت مصرفی نیروگاه‌ها تمرکز دارد و شاخص انتشار را به عنوان معیاری مهم در تشخیص و کنترل تغییرات انتشار  $CO_2$  بررسی نکرده است. تمرکز این مطالعه بر انواع نیروگاه‌های حرارتی بوده و شاخص انتشار  $CO_2$  ی نیروگاه‌ها را بر اساس سوخت مصرفی آن‌ها که مهم‌ترین عامل در انتشار این بخش است، تجزیه و تحلیل می‌کند. به‌طور خاص، عواملی مانند مشارکت (سهم) نسبی رشد اقتصادی، تغییر در شدت انرژی برق، تغییر در ترکیب سوخت برای تولید نیرو، تغییر در کارایی فناوری تولید نیرو و تغییر در کیفیت سوخت سنگواره‌ای استفاده شده در بخش نیروگاهی در دوره ۱۳۷۸-۱۳۸۷ تحلیل می‌شود.

### ۳. مبانی نظری الگو

در ادبیات موضوع، روش‌هایی متعدد بر پایه‌ی تجزیه‌ی شاخص از قبیل لاسپیرز، دیویژیا میانگین حسابی، دیویژیا میانگین لگاریتمی، پاشه و مانند آن در دسترس است (ن.ک.ب. انگ و ژنگ (۲۰۰۰)).

لیو، انگک و آننگ (۱۹۹۲) برای تحلیل تقاضای انرژی، از روش‌شناسی تجزیه<sup>۱</sup> با رویکرد شاخص دیویژیا استفاده کردند. همچنین، روشی جدید به نام شاخص وزنی دیویژیا معرفی کردند. انگک (۱۹۹۴) و انگک و لی (۱۹۹۴) کارهای لیو، انگک و آننگ (۱۹۹۲) را بسط دادند و به ترتیب، چارچوبی برای تجزیه‌ی ضرب‌پذیر<sup>۲</sup> و تجزیه‌ی جمع‌پذیر<sup>۳</sup> ارائه کردند. در دهه‌ی ۱۹۹۰، به علت اهمیت تغییرات اقلیمی، تحلیل‌های تجزیه به سمت انتشار گاز گلخانه‌ای مرتبط با انرژی معطوف شد. مطالعات تجزیه‌ی انرژی و تجزیه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای روند آینده و تجزیه‌ی رشد اقتصادی مصرف انرژی و فروافت<sup>۴</sup> زیست‌محیطی را بررسی می‌کند (دیاکولاکی و دیگران، ۲۰۰۶).

روش‌شناسی شاخص دیویژای میانگین لگاریتمی (LMDI) از تابع وزنی میانگین لگاریتمی که تجزیه‌ی کامل تغییر در عوامل را بی‌هیچ پسماندی نشان می‌دهد، استفاده می‌کند (انگک و ژنگک، ۲۰۰۰ و انگک و لیو، ۲۰۰۱). در این پژوهش، برای تحلیل عوامل مؤثر بر تغییر انتشار CO<sub>2</sub> بخش نیروگاهی، از روش‌شناسی شاخص دیویژای میانگین لگاریتمی جمع‌پذیر استفاده می‌شود. انگک (۲۰۰۴) از میان انواع تکنیک‌های تجزیه‌ی شاخص، استفاده از روش شاخص دیویژای میانگین لگاریتمی را توصیه می‌کند؛ زیرا، این روش دارای چند مزیت است؛ از جمله می‌توان به استقلال زمانی، توانایی به کارگیری ارقام صفر در محاسبات و سازگاری کلی آن در مطالعات اشاره کرد.

#### ۴. روش تحقیق

داده‌های آماری مربوط به کل بخش نیروگاهی شامل نیروگاه‌های وزارت نیرو، صنایع بزرگ و بخش خصوصی است. با توجه به در دسترس نبودن داده‌های انتشار CO<sub>2</sub> برای بخش خصوصی و صنایع بزرگ به تفکیک نیروگاه برای سال‌های پیش از ۱۳۷۸ و همچنین، مجزا نبودن داده‌های مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> برای نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی برای آن دوره، سال ۱۳۷۸ برای شروع مطالعه انتخاب شد. چون ارزش افزوده‌ی صنعت برق برای سال ۱۳۸۷ منتشر نشده بود، محاسبات مربوط به تجزیه‌ی انتشار CO<sub>2</sub> و اثر رشد اقتصادی برای دوره‌ی ۸۶-۱۳۷۸ انجام شد. اما، چون در تجزیه‌ی شاخص انتشار CO<sub>2</sub> از متغیر ارزش افزوده استفاده نمی‌شود؛ بنابراین، محاسبات مربوط به آن تا سال ۱۳۸۷ انجام شده است. داده‌های ارزش افزوده‌ی صنعت برق از اداره‌ی حساب‌های اقتصادی بانک مرکزی تهیه شده‌اند. مجموعه‌ی داده‌های مصرف انرژی، ارزش حرارتی و تولید ناویژه‌ی برق از شرکت مادر تخصصی توانیر (وزارت نیرو) گردآوری شد.

1 - Decomposition Methodology

2 - Multiplicative

3 - Additive

4 - Degradation

داده‌های انتشار CO<sub>2</sub> ناشی از انواع سوخت و انواع نیروگاه‌ها از ترازنامه‌ی انرژی است. برای تحلیل و مقایسه‌ی دقیق‌تر، محاسبات به صورت تغییرات سالانه و تغییرات در کل دوره صورت پذیرفت. همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق از تکنیک LMDI جمع‌پذیر استفاده می‌شود که در بخش بعد (۱.۴ و ۲.۴) تشریح می‌شود.

یکی از شاخص‌های مهم استفاده شده در کشورهای اروپایی درباره‌ی ملاحظات زیست‌محیطی بخش نیروگاهی، میزان مصرف حامل‌های انرژی به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در نیروگاه‌های حرارتی است. در ایران نیز این شاخص با عنوان شاخص انتشار برای هر یک از آلاینده‌ها محاسبه و منتشر می‌شود (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۶).

با توجه به تغییر در میزان و سهم استفاده از هر یک از انواع سوخت در این نوع نیروگاه‌ها و نیز نظر به تفاوت‌های موجود در کارایی این سوخت‌ها در تولید برق، این شاخص تغییراتی قابل توجه می‌تواند داشته باشد. بنابراین، در کنار بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات انتشار CO<sub>2</sub> (تجزیه‌ی انتشار CO<sub>2</sub>)، عوامل مؤثر بر تغییرات در شاخص انتشار این گاز نیز بررسی می‌شود و نتایج آن با نتایج به دست آمده از تجزیه‌ی انتشار CO<sub>2</sub> مقایسه خواهد شد.

### تجزیه‌ی انتشار CO<sub>2</sub> از بخش نیروگاهی

انتشار CO<sub>2</sub> کل بخش نیروگاهی برابر با مجموع انتشارهای CO<sub>2</sub>ی نیروگاه‌های مختلف تولید برق است:

$$C_t = \sum_i C_{it} \quad (1-1-4)$$

که در آن:

$C_t$  انتشار کل دی‌اکسید کربن صنعت برق در سال  $t$ ،

$C_{it}$  انتشار دی‌اکسید کربن نیروگاه  $i$  در سال  $t$ ، است.

رابطه‌ی (۱-۱-۴) را می‌توان به صورت (۲-۱-۴) نوشت:

$$C_t = \sum_j \frac{C_{it}}{G_{it}} \frac{G_{it}}{G_t} \frac{G_t}{Y_t} Y_t \quad (2-1-4)$$

$G_{it}$  برق تولیدی نیروگاه  $i$  در سال  $t$ ،

$Y_t$  ارزش افزوده صنعت برق در سال  $t$ ،

$C_{it}/G_{it}$  شدت انتشار CO<sub>2</sub>ی تولید نیرو (که به عنوان انتشار CO<sub>2</sub> در واحد برق تولیدی تعریف می‌شود)،

$G_{it}/G_t$  سهم تولید برق نیروگاه  $i$  از کل تولید،

$G_t/Y_t$  شدت انرژی برق (تولید برق مورد نیاز در واحد GDP) در سال  $t$  است.

با توجه به این که سوخت‌های سنگواره‌ای (از این دیدگاه که تکنولوژی استفاده شده و منابع انتشار در کوتاه‌مدت کمابیش بدون تغییر می‌ماند) دارای ضرایب انتشار مشخص و ثابتی است و نیز، برای تولید برق در

هر نیروگاه (اندیس  $I$ ) از چندین سوخت مختلف استفاده می‌شود؛ بنابراین، میزان انتشار را می‌توان به دو عامل میزان مصرف سوخت سنگواره‌ای و ضریب انتشار مربوط به آن سوخت تفکیک کرد. با این اقدام، رابطه‌ی (۴-۱-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_t = \sum_i \alpha_{it} \frac{E_{it} G_{it} G_t}{G_{it} G_t Y_t} Y_t \quad (۳-۱-۴)$$

که با ساده نویسی، داریم:

$$C_t = \sum_i \alpha_{it} f_{it} g_{it} \epsilon_t Y_t \quad (۴-۱-۴)$$

و

$$C_t = \epsilon_t Y_t \sum_i \alpha_{it} f_{it} g_{it} \quad (۵-۱-۴)$$

$E_{it}$  سوخت مصرفی نیروگاه  $i$  در سال  $t$ ،

$TV_{jt}$  ارزش حرارتی ناشی از سوخت  $j$  در سال  $t$ ،

$G_t$  برق تولیدی کل بخش نیروگاهی در سال  $t$ ،

$TV_{jt}$  ارزش حرارتی کل سوخت مصرفی نیروگاه‌ها در سال  $t$ ،

$\alpha_{it}$  سهم دی‌اکسید کربن منتشر شده از انواع سوخت نیروگاه  $i$  در سال  $t$  است.

طبق مطالعه‌ی شرسا و همکاران (۲۰۰۹)، هر تغییری در انتشار  $CO_2$  ی تولید برق بین سال  $t$  و سال  $t-1$ ، به صورت لگاریتمی زیر تجزیه می‌شود:

$$(۶-۱-۴)$$

$$\ln \frac{C_t}{C_{t-1}} = \ln \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t-1}} + \ln \frac{Y_t}{Y_{t-1}} + \sum_i \tilde{W}_{it} \ln \frac{\alpha_{it}}{\alpha_{it-1}} + \sum_i \tilde{W}_{it} \ln \frac{f_{it}}{f_{it-1}} + \sum_i \tilde{W}_{it} \ln \frac{g_{it}}{g_{it-1}}$$

که در آن،  $\tilde{W}_{it}$  تابع وزنی نیروگاه  $i$  در سال  $t$  است و سهم نسبی نیروگاه را که در اثر تغییر کیفیت سوخت، شدت سوخت و اثر ساختار تولید به وجود می‌آورد، نشان می‌دهد. در رویکرد شاخص دیویژنای میانگین لگاریتمی،  $\tilde{W}_{it}$  به صورت زیر تعریف می‌شود (انگ و لیو، ۲۰۰۱):

$$\tilde{W}_{it} = \frac{L(W_{it}, W_{it-1})}{\sum_i L(W_{it}, W_{it-1})}, \quad (۷-۱-۴)$$

که در آن،  $L(W_{it}, W_{it-1}) = \frac{(W_{it-1} - W_{it})}{\log(\frac{W_{it-1}}{W_{it}})}$ ، و  $W_{it} = \frac{\alpha_{it} f_{it} g_{it}}{\sum_i \alpha_{it} f_{it} g_{it}}$  است.

رابطه‌ی (۶-۱-۴)، تجزیه‌ی دیویژنای تغییر کل انتشار  $CO_2$  را در سال  $t$  به صورت کلی نشان می‌دهد.

نخستین عبارت سمت راست رابطه‌ی (۶-۱-۴) اثر تغییری در شدت انرژی برق را نشان می‌دهد (از این به بعد اثر

شدت انرژی برق<sup>۱</sup> (EIE) نامیده می‌شود. عبارت دوم، اثر تغییر در رشد اقتصادی را بیان می‌کند (از این به بعد اثر رشد اقتصادی<sup>۲</sup> (EGE) نامیده می‌شود). عبارت سوم، اثر تغییرات در کیفیت سوختی را نشان می‌دهد و اثر کیفیت سوخت<sup>۳</sup> (FQE) نامیده می‌شود. عبارات چهارم و پنجم به ترتیب، اثرات تغییر در کارایی تولید نیروگاه‌های حرارتی (اثر شدت سوخت (FIE)) و تغییرات سهم انواع نیروگاه‌ها در تولید کل برق (اثر ساختار تولید<sup>۴</sup> (GSE)) را نشان می‌دهند. با تغییر در منبع عرضه سوخت، نوع و کیفیت سوخت‌ها ممکن است در طی زمان تغییر کند. چون این مطالعه‌ی (برخلاف مطالعه شرسا و تیملسینا (۱۹۹۶) و شرسا و همکاران (۲۰۰۹)) به انواع نیروگاه‌ها توجه دارد، فرض می‌شود که کیفیت سوخت در دوره‌ی بررسی شده متغیر است.

### تجزیه‌ی شاخص انتشار CO<sub>2</sub>

شاخص انتشار بخش نیروگاهی از نسبت میزان انتشار به برق تولیدی به دست می‌آید. تجزیه‌ی شاخص انتشار انواع سوخت بخش نیروگاهی بر اساس رابطه‌ی زیر انجام می‌پذیرد:

$$\frac{C_t}{G_t} = \sum_j \frac{C_{jt}}{TV_{jt}} \frac{TV_{jt}}{TV_t} \frac{TV_t}{G_t} \quad (۲-۴)$$

که در آن،  $TV_{jt}$  ارزش حرارتی<sup>۵</sup> به وجود آمده از سوخت  $j$  در سال  $t$ ،  $TV_t$  ارزش حرارتی کل به وجود آمده از انواع سوخت در سال  $t$  و  $C_{jt}$  دی‌اکسید کربن پخش شده از سوخت  $j$  در سال  $t$  است. با ثابت فرض کردن ضریب انتشار و ارزش حرارتی خالص برای هر سوخت (مالا، ۲۰۰۹)، رابطه‌ی (۲-۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{C_t}{G_t} = \sum_j \frac{TV_{jt}}{TV_t} \frac{TV_t}{G_t} = TEE_t \sum_j FME_{jt} \quad (۲-۴)$$

که در آن،  $FME_{jt}$  اثر ساختار سوختی (ترکیب سوختی<sup>۶</sup>) یا سهم ارزش حرارتی هر سوخت به ارزش حرارتی کل سوخت‌های مصرفی برای سال  $t$  و  $TEE_t$  اثر بازده حرارتی<sup>۷</sup> در سال  $T$  است. ارزش حرارتی با واحد کیلو کالری و بازده حرارتی با واحد کیلو کالری بر کیلووات ساعت محاسبه می‌شود.

در این مطالعه، مقادیر انواع سوخت مصرفی هر نیروگاه مجزا نیست بلکه از مقادیر کل سوخت مصرفی هر نیروگاه استفاده شده است. بنابراین، مشکل اعداد صفر پیش نمی‌آید. با توجه به لگاریتمی بودن روابط در

- 
- 1 - the electricity intensity effect
  - 2 - the economic growth effect
  - 3 - the fuel quality effect
  - 4 - generation-structure effect
  - 5 - Thermal Value
  - 6 - The Fuel Mix Effect
  - 7 - The Thermal Efficiency Effect

روش LMDI، وجود رقم صفر یا منفی در مجموعه‌ی اعداد مشکلاتی در تحقیق به وجود خواهد آورد. مطالعاتی در زمینه‌ی بیان راهکارهای رفع این مشکل انجام شده‌است که از آن جمله می‌توان چانگ و ری (۲۰۰۱)، لنزن (۲۰۰۶)، ری و چانگ (۲۰۰۶)، وود و لنزن (۲۰۰۶)، انگ و لیو (۲۰۰۷) و انگ و لیو (۲۰۰۷) (ب) را نام برد. با توجه به این که در این تحقیق مشکل وجود ارقام صفر وجود ندارد، از بیان روش‌های حل این مشکل پرهیز می‌شود.

## ۵. تجزیه و تحلیل اطلاعات

### شاخص انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی

شاخص انتشار گازهای آلاینده بخش نیروگاهی، معیاری مهم در مقایسه‌ی کارایی تولید برق از دید انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این شاخص در سال ۱۳۸۷، برای گاز CO<sub>2</sub> به‌طور متوسط برابر با ۶۷۷/۸۳ گرم بر کیلووات ساعت بوده، درحالی که برای دیگر گازها کم‌تر از ۳ گرم بر کیلووات ساعت بوده‌است. جدول (۱) روند تغییرات این شاخص را برای گاز CO<sub>2</sub> در انواع نیروگاه‌ها در دوره‌ی ۸۷-۱۳۷۸ نشان می‌دهد.

جدول ۱- شاخص انتشار CO<sub>2</sub> از نیروگاه‌های کشور (گرم بر کیلووات ساعت)

سال	برق آبی	دیزلی	سیکل ترکیبی	گازی	بخاری
۱۳۷۸	۶/۵۹۵	۸۶۷/۷۲۸	۲۱۳/۵۷۱	۸۹۳/۴۶۳	۶۲۳/۱۴۹
۱۳۷۹	۶/۵۹۵	۷۸۸/۳۸۵	۲۸۰/۰۱۴	۸۰۵/۴۸۲	۶۱۹/۸۷۰
۱۳۸۰	۶/۵۵۵	۸۰۴/۳۲۳	۳۴۳/۹۴۱	۷۹۳/۰۷۸	۶۰۷/۱۴۳
۱۳۸۱	۶/۵۹۵	۸۰۸/۶۵۱	۵۱۵/۷۳۸	۸۱۵/۹۳۰	۶۰۶/۰۳۰
۱۳۸۲	۶/۵۹۸	۷۸۴/۵۰۶	۴۷۲/۷۹۲	۷۹۳/۵۷۶	۵۸۶/۷۹۷
۱۳۸۳	۶/۵۹۵	۸۱۹/۷۳۹	۴۶۷/۰۷۶	۷۶۷/۰۱۷	۵۹۹/۴۰۶
۱۳۸۴	۶/۶۰۱	۷۷۸/۱۶۰	۴۷۲/۸۳۴	۷۱۰/۹۸۶	۵۹۶/۱۷۲
۱۳۸۵	۶/۶۳۰	۷۸۲/۳۶۴	۴۸۷/۷۶۶	۷۸۲/۰۹۴	۶۲۸/۳۴۶
۱۳۸۶	۷/۶۰۰	۸۲۴/۶۷۷	۵۲۶/۵۳۲	۷۹۳/۳۸۲	۶۵۴/۷۳۳
۱۳۸۷	۷۹/۹۵۲	۷۷۰/۷۰۱	۴۶۶/۹۰۶	۸۵۲/۱۳۱	۷۵۵/۷۸۴

مأخذ ارقام: ترازنامه‌ی انرژی و گزارش تفصیلی صنعت برق، سال‌های مختلف

به‌طور کلی، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نسبت به دیگر نیروگاه‌ها شاخص انتشار کم‌تری دارند. در حالی که نیروگاه‌های دیزلی و گازی بیشترین شاخص انتشار را به خود اختصاص داده‌اند. نیروگاه‌های بخاری نیز در مجموع نسبت به دو نیروگاه گازی و دیزلی شاخص انتشار کم‌تری داشته؛ اما، در مقایسه با نیروگاه سیکل ترکیبی، شاخص انتشار بالاتری داشته‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که ایجاد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به‌جای توسعه‌ی دیگر نیروگاه‌ها، از روند افزایشی انتشار  $CO_2$  می‌کاهد. با تولید هر کیلووات ساعت برق از نیروگاه سیکل ترکیبی، در مقایسه با برق تولیدی از دیگر نیروگاه‌های حرارتی، به‌طور متوسط بین ۲۰ تا ۴۵ درصد در انتشار  $CO_2$  صرفه‌جویی می‌شود.

علت افزایش تدریجی شاخص انتشار در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، افزایش استفاده از گازوئیل نسبت به گاز طبیعی بوده‌است. نیروگاه‌های بخاری از سه سوخت سنگواره‌ای نفت کوره، گازوئیل و گاز طبیعی استفاده می‌کنند؛ با توجه به ضریب انتشار بالای نفت کوره و گازوئیل، شاخص انتشار این نیروگاه‌ها نیز بالا است. تغییر در ترکیب سوختی برای نیروگاه سیکل ترکیبی در دوره‌ی بررسی شده، به زیان انتشار  $CO_2$  بوده‌است. به‌طوری که شاخص انتشار  $CO_2$  از این نیروگاه‌ها روندی صعودی داشته‌است. نیروگاه دیزلی تنها از سوخت نفت گاز استفاده می‌کند. به‌این علت، شاخص انتشار برای این نیروگاه نوسان‌های به نسبت ناچیزی داشته که مربوط به تغییر در کیفیت سوختی (ضریب انتشار) است. تغییرات در شاخص انتشار مربوط به دو نیروگاه حرارتی دیگر نیز به علت تغییر در ترکیب سوخت یا کیفیت سوختی است که در بخش (۵.۳) بررسی می‌شود.

شاخص انتشار نیروگاه‌های برق‌آبی نشان می‌دهد که به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی از این نوع نیروگاه‌ها، تنها ۶/۶ گرم  $CO_2$  منتشر می‌شود. (به‌استثنای سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) افزون بر شاخص انتشار بسیار پایین، این نیروگاه‌ها دارای مزیت‌هایی هستند؛ مانند: عمر طولانی (۱۰۰ سال و بالاتر؛ عمر نیروگاه‌های حرارتی حدود ۳۰ سال است)، راندمان نسبی بالاتر از نیروگاه‌های حرارتی، پایین بودن هزینه‌ی نگهداری، تجدیدپذیری منابع مصرفی آن، کنترل و مهار سیلاب‌های مخرب، کنترل فرکانس شبکه، بهره‌برداری چندمنظوره از منابع آبی، در دسترس بودن تکنولوژی‌های مربوط به آن و وجود پتانسیل‌های بسیار انرژی برق آبی در کشور. برق تولید این نیروگاه‌ها از ۴۹۴۳ میلیون کیلووات ساعت در سال ۱۳۷۸ به ۱۷۹۸۷ میلیون کیلووات ساعت در سال ۱۳۸۶ رسیده‌است. اما، به‌علت کاهش بارش باران در سال ۱۳۸۷، تنها ۴۷۵۳/۱۶ میلیون کیلووات ساعت برق به‌وسیله‌ی نیروگاه‌های آبی تولید شده‌است.

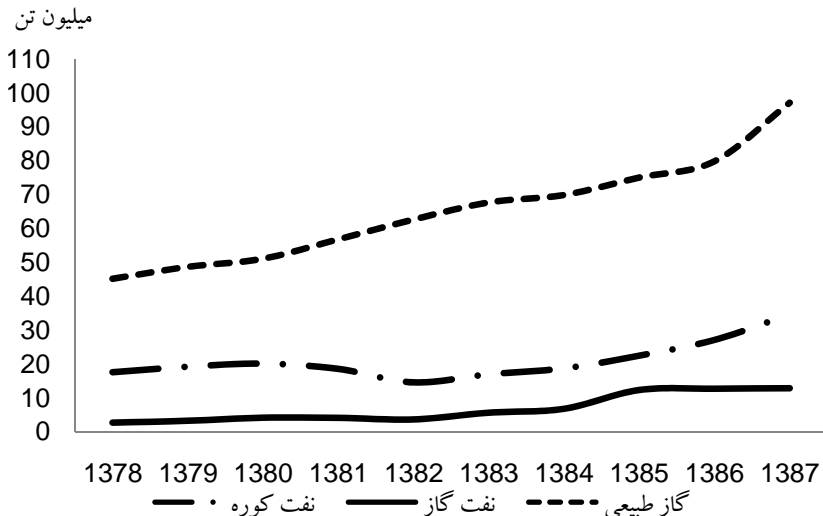
#### انتشار $CO_2$ ناشی از سوخت مصرفی نیروگاه‌ها

نمودار (۱) روند تغییر انتشار  $CO_2$  از سوخت مصرفی در بخش نیروگاهی را در دوره‌ی ۸۷-۱۳۷۸ نشان می‌دهد. انتشار  $CO_2$  از گاز طبیعی، نفت کوره و نفت گاز رشد متوسطی به ترتیب برابر با ۸/۹۷، ۸/۸۲ و

۲۱/۱۶ درصد در دوره‌ی بررسی شده داشته‌است. همان‌طور که از نمودار ۱ مشخص است، انتشار ناشی از گاز طبیعی همواره رو به رشد بوده، درحالی‌که انتشار مربوط به نفت گاز و نفت کوره در برخی سال‌ها روندی کاهشی داشته و دلیل آن مصرف کم‌تر این سوخت‌ها در بخش نیروگاهی است.

با توجه به تغییر در ضرایب انتشار تأیید شده‌ی سازمان حفاظت محیط‌زیست بر اساس دستورالعمل هیأت بین‌دولت تغییر آب و هوا در سال ۲۰۰۶ (IPCC)<sup>۱</sup>، بخشی از تغییرات در انتشار در دو سال ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ مربوط به این تغییر است. هریک از انواع نیروگاه‌های حرارتی می‌توانند با هر ترکیبی از سوخت‌های مصرفی خود، برق تولید کنند. برای نمونه، نیروگاه‌های بخاری که از هر سه نوع سوخت استفاده می‌کنند، می‌توانند برای تولید برق تنها از دو یا حتی یک نوع سوخت نیز استفاده کرده، به‌طوری‌که اگر از سه نوع سوخت استفاده کنند، به ازای هر مگاوات ساعت برق تولیدی این نیروگاه ۰/۴ لیتر گازوئیل، ۲۰۱ مترمکعب گاز طبیعی و ۵۸ لیتر نفت کوره مصرف خواهد شد. اگر از دو نوع سوخت استفاده کنند، به ازای هر مگاوات ساعت برق تولیدی ۲۰۲ مترمکعب گاز طبیعی و ۵۹ لیتر نفت کوره و در صورتی که تنها از گاز طبیعی استفاده کنند، حدود ۳۰۰ مترمکعب گاز طبیعی مصرف خواهند کرد. (صمدی، سهراب؛ ۱۳۸۶)

### نمودار ۱- روند انتشار CO<sub>2</sub> از سوخت‌های مصرفی بخش نیروگاهی



مأخذ: براساس داده‌های ترازنامه‌ی انرژی، سال‌های مختلف

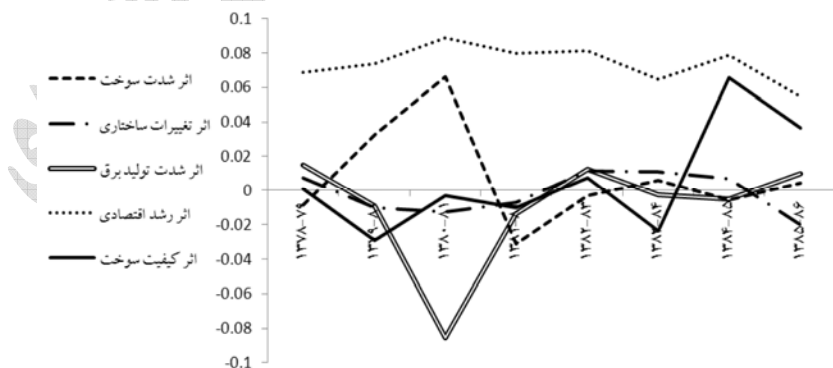
تجزیه‌ی انتشار و شاخص انتشار CO<sub>2</sub>

مقدار انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی از ۶۵/۸۴۹ میلیون تن در سال ۱۳۷۸ به ۱۴۷/۰۳۲ میلیون تن در سال ۱۳۸۷ افزایش یافته‌است. یعنی، رشد متوسطی معادل با ۹/۴۹ درصد در سال داشته‌است. جدول (۲) میزان تأثیر عوامل مختلف را بر تغییرات انتشار CO<sub>2</sub> در سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۶ به صورت سالانه نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده برای کل دوره نیز در جدول آمده‌است.

جدول ۲- تجزیه‌ی عوامل مؤثر بر رشد انتشار CO<sub>2</sub> از بخش نیروگاهی (واحد: تن CO<sub>2</sub>)

دوره	اثر FQE	اثر EGE	اثر EIE	اثر GSE	اثر FIE
۱۳۷۸-۷۹	۱	۱	۱	۱	۱
۱۳۷۹-۸۰	۰/۹۷۰	۱/۰۰۵	۰/۹۷۶	۰/۹۸۲	۱/۰۴۲
۱۳۸۰-۸۱	۰/۹۹۶	۱/۰۲۰	۰/۸۹۹	۰/۹۸۰	۱/۰۷۵
۱۳۸۱-۸۲	۰/۹۸۹	۱/۰۱۱	۰/۹۷۱	۰/۹۸۶	۰/۹۷۸
۱۳۸۲-۸۳	۱/۰۰۷	۱/۰۱۳	۰/۹۹۸	۱/۰۰۴	۱/۰۰۶
۱۳۸۳-۸۴	۰/۹۷۵	۰/۹۹۶	۰/۹۸۲	۱/۰۰۴	۱/۰۱۵
۱۳۸۴-۸۵	۱/۰۶۵	۱/۰۱۰	۰/۹۸۰	۰/۹۹۹	۱/۰۰۳
۱۳۸۵-۸۶	۱/۰۳۶	۰/۹۸۶	۰/۹۹۵	۰/۹۷۳	۱/۰۱۳
۱۳۷۸-۸۶	۱/۰۴۶	۱/۵۲۱	۰/۹۰۵	۱/۰۰۱	۱/۰۰۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نمودار (۲) میزان تأثیرگذاری عوامل مختلف در رشد انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی

مأخذ: یافته‌های تحقیق

محور عمودی میزان تغییرات در انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی را نشان می‌دهد (  $\ln(C_t/C_{t-1})$  ) که بدون واحد است، به طوری که تغییرات در انتشار به پنج اثر مختلف تفکیک شده است. محور افقی نیز دوره‌های سالانه را نشان می‌دهد.

برای مقایسه و تحلیل دقیق‌تر تغییرات انتشار، نتایج داده شده در جدول (۲) به شکل شاخص (سال  $1/0=1378$ ) بیان شده‌اند؛ در نمودار (۲) از ارقام واقعی استفاده شده‌است. همان‌طور که جدول (۲) نشان می‌دهد، رشد اقتصادی (EGE)، به‌جز دوره‌های ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۶-۱۳۸۵، همواره تأثیری مثبت بر افزایش انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی داشته‌است (EGE بزرگ‌تر از واحد است). این موضوع گواه آن است که رشد تولید برق با رشد GDP همبستگی مثبت دارد. با این که اثر رشد اقتصادی (EGE) برای هر سال به‌تنهایی چندان نیست؛ اما، برای کل دوره‌ی بررسی شده تأثیری به‌سزادر رشد انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی دارد.

شدت سوخت (FIE)، به‌جز دوره‌ی ۸۲-۱۳۸۱، در دیگر سال‌ها اثری مثبت بر انتشار  $CO_2$  داشته‌است؛ اما، میزان این اثر چه برای دوره‌های یک‌ساله و چه برای کل دوره‌ی بررسی، در خور توجه نبوده‌است. مقادیر کوچک‌تر از واحد اثر FIE نشان‌دهنده‌ی افزایش در کارایی تولید برق است. همان‌طور که از جدول مشخص است، به‌جز دوره‌ی ۸۲-۱۳۸۱، کارایی سوخت در تولید برق کاهش یافته‌است.

بررسی داده‌های این مطالعه بیان‌گر این است که تغییر در ترکیب سوخت نیروگاه‌ها تولید برق به‌ازای هر واحد سوخت مصرفی را کاهش می‌دهد. اثر شدت انرژی برق (EIE) برای کل سال‌های بعد از ۱۳۷۸ و همچنین، برای کل دوره‌ی بررسی شده، همواره اثری کاهشی بر رشد انتشار  $CO_2$  داشته‌است. مقادیر کوچک‌تر از واحد اثر EIE نشان‌دهنده‌ی بهبود کارایی تولید برق از سوخت‌های سنگواره‌ای است. به طوری که به‌ازای هر واحد برق تولیدی، ارزش افزوده‌ی بیشتری به‌وجود آمده‌است. این اثر در دوره ۸۱-۱۳۸۰ در خور توجه‌است.

اثر ساختار تولید (GSE)، همراه با نوسان‌هایی بوده، به طوری که برای دوره‌های ۸۴-۱۳۸۲ بزرگ‌تر از واحد و تأثیری فزاینده در رشد انتشار  $CO_2$  ی بخش نیروگاهی داشته‌است. اما، برای دوره‌های دیگر، تأثیری کاهشی بر انتشار  $CO_2$  گذاشته‌است. مقادیر نزدیک به واحد این اثر، نمایان‌گر تأثیر نه‌چندان زیاد آن بر تغییرات به‌وجود آمده در انتشار  $CO_2$  است. تغییر در ترکیب انواع سوخت، به‌خصوص به علت افزایش استفاده از نفت گاز و گاز طبیعی در نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی، به‌طور کلی توانسته از رشد انتشار  $CO_2$  به‌کاهد. بلکه، برای کل دوره‌ی مطالعه شده، تأثیری مثبت بر افزایش انتشار  $CO_2$  داشته‌است.

در دوره‌ی بررسی، مصرف نفت گاز و گاز طبیعی در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به‌ترتیب رشدی برابر با ۶۲/۲ و ۲۲/۶ درصد و برای نیروگاه‌های گازی به‌ترتیب رشدی معادل با ۱۹/۸ و ۱۱ درصد داشته‌است. همان‌طور که بیان شد، این تغییر در ترکیب سوخت، افزایش کارایی تولید را سبب نشده‌است بلکه انتشار  $CO_2$  ی کل دوره را افزایش داده‌است. یکی از دلایل افزایش انتشار  $CO_2$  در سال‌های اخیر، تغییر در کیفیت

سوخت (FQE) بوده‌است. با توجه به تغییرات در ضرایب انتشار تأیید شده از سوی سازمان حفاظت محیط‌زیست که بر اساس دستورالعمل هیأت بین دول تغییر آب‌وهوایی (IPCC) سال ۲۰۰۶ تدوین شده‌است، بخش اعظم افزایش در اثر FQE، از سال ۱۳۸۵ به بعد، مربوط به تغییرات در ضرایب انتشار است. برای کل دوره‌ی مورد بررسی شده، اثر رشد اقتصادی (EGE) بیشترین تأثیر را بر افزایش انتشار  $CO_2$  بخش نیروگاهی داشته (۱/۵۲۱) است. سپس، اثر کیفیت سوخت (FQE)، اثر شدت سوختی (FIE) و اثر ساختاری (GSE) تأثیری مثبت بر رشد انتشار  $CO_2$  از این بخش داشته‌است.

افزایش در رشد اقتصادی که یکی از اهداف سیاست‌گذاران اقتصادی است، همواره بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش انتشار در اقتصاد داشته‌است؛ اما، با این وجود اقداماتی برای کاهش این اثر در بسیاری از کشورها انجام گرفته‌است. مالیات کربن و مالیات انرژی از این قبیل اقدامات است. تغییر در ترکیب سوختی، به‌نحوی که بر کارایی تولید برق بیفزاید، باعث کاهش اثر FIE را کاهش داد.

نفت کوره و نفت‌گاز با این که ارزش حرارتی خالص بیشتری نسبت به گاز طبیعی دارند (ارزش حرارتی نفت کوره ۹۷۹۰ و ارزش حرارتی نفت‌گاز ۹۲۳۲ کالری در لیتر و ارزش حرارتی گاز طبیعی بین ۸۵۵۰ تا ۸۷۶۳ کالری در متر مکعب است)؛ اما، به علت ضریب بالای انتشار  $CO_2$ ، بیش‌ترین تأثیر را در رشد انتشار  $CO_2$  بخش نیروگاهی داشته‌است. بهترین اقدام برای کاهش انتشار از بخش نیروگاهی، توسعه‌ی نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر و برق آبی است که با وجود کارایی بالای تولید برق، شاخص انتشار  $CO_2$  ی بسیار پایینی دارند. همان‌طور که (بخش ۱.۵) بیان شد، از میان نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه سیکل ترکیبی کم‌ترین شاخص انتشار  $CO_2$  را دارد. پس، برای کاهش اثر GSE، راه‌اندازی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی (به‌جای دیگر نیروگاه‌های حرارتی) مفیدتر خواهد بود. با افزایش احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به نفع کاهش اثر ساختاری (GSE) در انتشار  $CO_2$ ، می‌توان اقدامی مثبت برای کاهش انتشار  $CO_2$  از بخش نیروگاهی انجام داد. برق تولیدی از سوخت هسته‌ای نیز به‌عنوان سوخت پاک و بدون انتشار گاز گلخانه‌ای، می‌تواند از انتشار سهم بزرگی از  $CO_2$  ی نیروگاهی به‌کاهد.

جدول (۳) نتایج به‌دست آمده از تجزیه‌ی شاخص انتشار دی‌اکسید کربن برای دو دوره‌ی پنج‌ساله (۸۲-۱۳۷۸ و ۸۷-۱۳۸۳) و برای کل دوره‌ی بررسی شده‌ی (۸۷-۱۳۷۸) را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اثر ساختار (ترکیب) سوختی (FME) در دوره‌ی ۸۲-۱۳۷۸ بسیار کوچک بوده‌است که دلیلی بر کاهش شاخص انتشار در این دوره به شمار می‌آید و در دوره‌ی پنج‌ساله‌ی دوم و در کل دوره‌ی بررسی شده اثر غالبی بر افزایش شاخص انتشار  $CO_2$  در بخش نیروگاهی داشته‌است.

### جدول ۳- تجزیه‌ی شاخص انتشار CO<sub>2</sub> از بخش نیروگاهی (تن بر کیلووات ساعت)

دوره	FME	TEE
۱۳۷۸-۸۲	۰/۵۹۸	۰/۹۵۶
۱۳۸۳-۸۷	۱/۴۹	۱/۲۸
۱۳۷۸-۸۷	۱/۵۳۴	۰/۹۸۶

مقادیر سال ۱۳۷۸ به عنوان شاخص برابر با واحد در نظر گرفته شده است.

اثر بازده حرارتی نیز در دوره‌ی ۱۳۷۸-۸۲ و در کل دوره‌ی بررسی شده کوچک‌تر از واحد بوده که نشان‌گر اثر کاهش‌ی آن بر شاخص انتشار CO<sub>2</sub> نسبت به سال پایه‌ی (۱۳۷۸) است. اثر بازده حرارتی (TEE) طی دوره‌ی پنج ساله‌ی دوم، شاخص انتشار را افزایش داده است. افزایش در بازده حرارتی به معنی افزایش حرارت (کیلوکالری) به وجود آمده به‌ازای یک واحد تولید برق است. فرمول استفاده شده برای بررسی راندمان هر نیروگاه به‌صورت زیر است:

$$(۵-۳-۱) \quad \frac{860}{\text{بازده حرارتی}} \times 100 = \text{راندمان (درصد)}$$

بنابراین، افزایش در بازده حرارتی به معنی کاهش در راندمان هر نیروگاه است. (آمار تفصیلی صنعت برق ایران)

### ۶. نتیجه‌گیری

نظربه اهمیت انتشار ناشی از سوخت‌های سنگواره‌ای در بخش نیروگاهی و روند فزاینده‌ی استفاده از این سوخت‌ها برای تأمین نیروی برق مورد نیاز کشور، این مطالعه به تحلیل عوامل مؤثر بر رشد انتشار CO<sub>2</sub> ناشی از سوخت‌های سنگواره‌ای استفاده شده در بخش نیروگاهی پرداخته است. عوامل بالقوه‌ای که انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی را تغییر می‌دهد؛ شامل تغییرات در تقاضای برق، ساختار تولید نیرو (تغییر در سهم انواع منابع سوخت برای تولید نیرو)، شدت سوخت تولید نیرو (تغییر در کارایی تولید برق) و کیفیت سوخت (مقدار کربن منتشر شده از هر نوع سوخت) است. افزایش در نیاز به تولید برق به‌طور مستقیم با رشد تقاضای برق همبسته بوده که در اصل متأثر از رشد اقتصادی و شدت انرژی برق است. (شرستا و همکاران، ۲۰۰۹)

در این مطالعه برای تجزیه‌ی تغییرات در انتشار CO<sub>2</sub> و همچنین، تجزیه‌ی شاخص انتشار CO<sub>2</sub> برای بخش نیروگاهی از تکنیک تجزیه‌ی شاخص دیویژیا میانگین لگاریتمی (LMDI) استفاده شد. نتایج تجزیه‌ی انتشار بخش نیروگاهی نشان داد که به‌جز اثر شدت انرژی برق، دیگر عوامل بررسی شده، در اکثر دوره‌ها، انتشار CO<sub>2</sub> ی این بخش را افزایش داده است. برای کل دوره‌ی بررسی شده، رشد اقتصادی بیش‌ترین تأثیر را در انتشار CO<sub>2</sub> دارد. اثر کیفیت سوخت، اثر شدت سوخت و اثر تغییرات ساختاری نیز تأثیری مثبت بر انتشار

CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی در کل دوره‌ی بررسی شده داشته‌است. نتایج تجزیه‌ی شاخص انتشار CO<sub>2</sub> نشان می‌دهد که اثر ساختار (ترکیب) سوختی به‌خصوص از سال ۱۳۸۳ به بعد، بیشترین تأثیر را در افزایش این شاخص دارد. با این‌که اثر بازده حرارتی نیز در این دوره بر رشد شاخص انتشار CO<sub>2</sub> ی بخش نیروگاهی مؤثر بوده؛ اما، در مجموع و در کل دوره‌ی بررسی تأثیری قابل توجه‌ای بر افزایش این شاخص نداشته‌است. راه کارهایی برای کاهش عوامل مؤثر بر افزایش انتشار CO<sub>2</sub> پیشنهاد شده‌است. مالیات کربن و مالیات انرژی از این قبیل اقدامات است. هرچند، در ایران تاکنون از این گونه اقدامات صورت نگرفته‌است؛ اما، به‌تازگی در ماده ۳۸ قانون مالیات بر ارزش افزوده برای واحدهای آلاینده محیط‌زیست یک درصد مالیات اضافی در نظر گرفته شده که شاید تأثیری مثبت در کاهش اثر EGE داشته باشد. ترویج و توسعه‌ی فناوری‌های بزرگ مقیاس تولید نیرو (با سوخت پاک) از جمله کارهایی است که دولت می‌تواند برای کاهش انتشار بخش نیروگاهی انجام دهد. برای اقدامات برای کاهش انتشار، توجه به اثرات GSE و FIE ضروری است. ترویج و توسعه‌ی فناوری‌های بزرگ مقیاس تولید نیرو (با سوخت پاک)، برقراری مالیات کربن و مالیات انرژی، توسعه‌ی نیروگاه‌های تجدیدپذیر و برق آبی و احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بجای دیگر نیروگاه‌های حرارتی از آن جمله است.

### منابع

- بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (سال‌های مختلف) حساب‌های ملی ایران، اداره حساب‌های اقتصادی. سهراب، تیکا؛ کرباسی، عبدالرضا و صمدی، رضا (۱۳۸۴)، بررسی وضعیت استقرار نیروگاه‌های حرارتی کشور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، پنجمین همایش ملی انرژی، کمیته‌ی ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو، تهران.
- حیدری، ابراهیم (۱۳۸۴)، پیش‌بینی تقاضای انرژی در اقتصاد ایران بر اساس روش تجزیه، مجله‌ی تحقیقات اقتصادی، شماره‌ی ۶۹، صفحات ۲۷-۵۶.
- شریفی، علی‌میراد؛ صادقی، مهدی؛ نفر، مهدی و دهقان شبانی، زهرا (۱۳۸۷)، تجزیه شدت انرژی در صنایع ایران، فصلنامه‌ی پژوهش‌های اقتصادی ایران، سال دهم، شماره‌ی ۳۵، صفحات ۷۹-۱۱۰.
- صادقی، مهدی؛ گل‌آور، لیلا و عابدی، زهرا (۱۳۸۶)، بررسی پیامدهای اقتصادی-زیست‌محیطی افزایش بازده نیروگاه‌های برق فسیلی، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره‌ی نهم، شماره‌ی چهارم، صفحات ۱۵-۳۰.
- صمدی، رضا و سهراب، تیکا (۱۳۸۶)، تهیه مدل محیط زیستی جهت استقرار نیروگاه‌های حرارتی در کشور، محیط‌شناسی، سال ۳۳، شماره‌ی ۴۴، صفحات ۷۳-۸۲.

فطرس، محمد حسن (۱۳۸۸)، مباحثی از اقتصاد محیط‌زیست: مجموعه مقالات، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، چ. ۲.

مرزبان، حسین اکبریان و محمدرضا قاسمی، علی (۱۳۸۴)، بررسی تقاضا برای انواع سوخت و جایگزینی بین آنها در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور (تابعه وزارت نیرو) (۱۳۵۳-۱۳۸۰)، فصلنامه‌ی پژوهشنامه‌ی اقتصادی، شماره‌ی ۱۶، صفحات ۵۱-۷۳.

وزارت نیرو (سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷)، آمار تفصیلی صنعت برق ایران، شرکت مادر تخصصی توانیر، تهران.

وزارت نیرو (سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷)، ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی معاونت امور انرژی، تهران.

Ang B.W. (1994); Decomposition of Industrial Energy Consumption: the Energy Intensity Approach, *Energy Economics*; 16(3), pp 163-74.

Ang, B.W. (2004); Decomposition Analysis for Policy Making in Energy: Which is the Preferred Method? *Energy Policy* 32, pp 1131-1139.

Ang BW; Lee SY (1994); Decomposition of Industrial Energy Consumption: Some Methodological and Application Issues, *Energy Economics*; 16(2), pp 83-92.

Ang, B.W.; Liu, F.L. (2001); A new Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation, *Energy* 26, pp 537-54.

Ang, B.W.; Liu, N. (2007a); Handling Zero Values in the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Approach, *Energy Policy* 35, pp 238-246.

Ang, B.W.; Liu, N. (2007b); Negative-Value Problems of the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Approach *Energy Policy* 35, pp 739-742.

Ang, B.W.; Zhang, F.Q. (2000); A Survey of Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies, *Energy* 25, pp 1149-1179.

Ang, B.W.; Zhang, F.Q.; Choi, K.H. (1998); Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators through Decomposition, *Energy* 23 (6), 489-495.

Chung, H.-S.; Rhee, H.C. (2001); A Residual-free Decomposition of the Sources of Carbon Dioxide Emissions: a Case of the Korean Industries, *Energy* 26, pp 15-30.

Diakoulaki, D.; Mavrotas, G.; & Orkopoulos, D. & Papayannakis, L. (2006); A Bottom-up Decomposition Analysis of Energy-related CO2 Emissions in Greece, *Energy* 31, pp 2638-2651.

Esty, D. C. Srebotnjak, T. Kim, H. Christine & Mara, V. & Sherbinin, A. D. & Levy, M. A. & Jaiteh, M. & Anderson, B. , Pilot (2006, 2008, 2010) Environmental Performance Index, New Haven. , Yale Center for Environmental

Law & Policy; Yale University; <http://epi.yale.edu> and Center for International Earth Science Information Network, Columbia University <http://ciesin.columbia.edu>.

Lenzen, M. (2006); Decomposition Analysis and the Mean-rate-of-change Index, *Applied Energy* 83, pp 185-198.

- Liu XQ; Ang BW; Ong HL (1992); The Application of the Divisia Index to the Decomposition of Changes in Industrial Energy Consumption, *The Energy Journal*; 13(4), pp 161–77.
- Malla, S. (2009); CO2 Emissions from Electricity Generation in Seven Asia-Pacific and North American Countries: A Decomposition Analysis, *Energy Policy*, 37, pp 1–9.
- Rhee, H.-C.; Chung, H.-S., (2006); Change in CO2 Emission and its Transmissions between Korea and Japan Using International Input–Output Analysis, *Ecological Economics* 58, pp 788–800.
- Shrestha, R.M.; Anandarajah, G.; Liyanage, M.H. (2009); Factors Affecting CO2 Emissions from the Power Sector of Selected Countries in Asia and the Pacific, *Energy Policy* 37, pp 2375–2384.
- Shrestha, R.M.; Timilsina, G.R., (1996); Factors Affecting CO2 Intensities of Power Sector in Asia: A Divisia Decomposition Analysis, *Energy Economics* 18, pp 283–293.
- Shrestha, R.M.; Timilsina, G.R., (1998); A Divisia Decomposition Analysis of NOx Emission Intensities for the Power Sector in Thailand and South Korea, *Energy* Vol 23, No 6, pp 433–438.
- Steenhof, P.A. (2007); Decomposition for Emission Baseline Setting in China's Electricity Sector, *Energy Policy*, 35, pp 280–294.
- Wood, R.; Lenzen, M. (2006); Zero-value Problems of the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Method, *Energy Policy* 34, pp 1326–1331.