فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی
سال هجدهم، شماره ۷۰، پاییز ۱۳۹۷، صفحات ۵۲-۲۳

برآورد هزینه آسیب‌های سلامتی ناشی از تولید برق در ایران

محمدباقر اسدی*، حسین صادقی سقدل**، بهرام سحابی*** و علیرضا ناصری****

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۷

چکیده

برق با تامین انرژی موردنیاز برای بسیاری از فعالیت‌های بشر، یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه صنعتی به شمار می‌رود. صنعت برق خود به واسطه احتراق سوخت‌های فسیلی، یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گازهای آلاینده به‌شمار می‌رود. این امر موجب بروز نگرانی‌های جدی درخصوص پیامدهای جانبی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در فرآیندهای تولید برق شده است. در این راستا، این مقاله به مدل‌سازی و برآورد اثرات و هزینه‌های سلامتی تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی در ایران براساس رویکرد مسیر اثرگذاری و با استفاده از نرم‌افزار سیمپکتس[1] می‌پردازد. بر این اساس هزینه‌های سلامتی تولید برق در ایران در سال ۱۳۹۳ بیش از ۱۱۰ هزار میلیارد ریال برآورد شده است که حدود یک درصد از تولید ناخالص داخلی در این سال را شامل می‌شود. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌دهد نیروگاه‌های چرخه ترکیبی و گازی به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین هزینه‌ها و پیامدهای سلامتی را به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق به جامعه تحمیل می‌کنند. در نهایت با اصلاح ترکیب سوخت و استفاده از گاز طبیعی به عنوان تنها سوخت نیروگاهی، هزینه‌های سلامتی تولید برق بیش از ۵۳ درصد کاهش خواهد یافت.

طبقه‌بندی JEL: *Q530، Q400، Q420، I190.*

کلیدواژها: *پیامدهای جانبی تولید برق، هزینه‌های سلامتی، انتشار آلاینده، رویکرد مسیر اثرگذاری، اصلاح ترکیب سوخت.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

---

* دانشجوی دکتری اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: assadi.mohammad@gmail.com
** دانشیار دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس،پست الکترونیکی: sadeghih@modares.ac.ir
*** استادیار دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس، پست الکترونیکی: sahabi_b@modares.ac.ir
**** استادیار دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس. پست الکترونیکی: nasseri@modares.ac.ir

1- Sim Pacts

۱- مقدمه

انرژی به عنوان موتور محرک اقتصاد با به حرکت انداختن موتورهای تولید صنایع مختلف، سبب تولید کالاها و خدماتی می‌شود که انسان از مصرف آن‌ها مطلوبیت کسب می‌کند. در کنار این مزایا، مصرف انرژی دارای پیامدهای جانبی منفی است به نحوی که افزایش مصرف انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی به واسطه انتشار آلاینده‌ها، ضمن ایجاد تغییرات برگشت‌ناپذیر در جهان، سبب بروز مشکلات جدی مرتبط با سلامت انسان‌ها و تحمیل هزینه‌های قابل توجهی بر جامعه انسانی و کل حیات در کره زمین می‌شود (اسدی و دیگران، ۱۳۹۶).

آلاینده‌هایی که در فرآیند تولید انرژی به محیط اطراف منتشر می‌شوند، بیش‌تر بر افرادی تاثیر می‌گذارند که نقشی در آن ندارند، از این رو، از آن‌ها تحت عنوان پیامدهای جانبی یاد می‌شود.

به طور کلی، پیامدهای جانبی زمانی شکل می‌گیرد که اقدام و تصمیم یک عامل اقتصادی به تولید یا مصرف بر مطلوبیت یک یا چند عامل اقتصادی دیگر (تولیدکننده یا مصرف کننده) اثر گذارد و کسی که پیامد خارجی را ایجاد کرده است، ضرر و زیان وارده به سایر گروه‌ها را جبران نکند (خوش اخلاق و دیگران، ۱۳۹۱ و گودلند و پولاسکی، ۲۰۱۳). با وجود این‌که این تاثیرات جانبی می‌توانند مثبت یا منفی باشند، عموما این پیامدهای جانبی منفی است که از اهمیت بالایی برخوردار هستند (توپیل و پوریس، ۲۰۱۵). از این رو، در اکثر موارد، منظور از پیامدهای جانبی همان پیامدهای جانبی منفی است. اتخاذ سازوکارهای‌های مناسب جهت بهینه‌سازی تولید و مصرف انرژی نیازمند برآورد دقیق اثرات جانبی آن است. با وجود گستردگی این اثرات، پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهند هزینه‌های مرتبط با سلامتی انسان، بیش از ۸۰ درصد از کل هزینه‌های ناشی از انتشار این آلاینده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد (هالند و کرویت، ۱۹۹۶؛ AEA، ۲۰۰۰؛ رحیمی و دیگران ۱۳۹۱). تولید برق از منابع سوخت‌های فسیلی با انتشار آلاینده‌های مختلفی چون اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، دی اکسید و مونواکسید کربن، ذرات معلق و متان یکی از منابع اصلی انتشار آلاینده‌های مختلف است (رنتیزلاس و گئورگاکلوس، ۲۰۱۴). در سال ۱۳۹۳، بخش نیروگاهی با سهم ۴۲ و ۳۰ درصدی به ترتیب بزرگ‌ترین انتشاردهنده SO_2 و CO_2 در ایران بوده است. این بخش

همچنین با سهم ۳۳ درصدی، پس از بخش حمل‌ونقل بزرگ‌ترین منتشرکننده NO_X در کشور بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳). با توجه سهم قابل توجه بخش برق از انتشار آلاینده‌های مختلف در اقتصاد ایران، این مقاله به دنبال برآورد پیامدهای سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها (شامل دی اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق) در انواع نیروگاه‌های حرارتی در کشور است.

ساختار مقاله در ادامه به این صورت خواهد بود که در بخش دوم سوابق تحقیق ارائه می‌شود. در بخش سوم مدل مورداستفاده برای تخمین پیامدهای سلامتی انتشار آلاینده‌ها تشریح می‌شود. در بخش چهارم از مدل ارائه شده برای تخمین اثرات سلامتی نیروگاه‌ها در ایران استفاده می‌شود. بخش پنجم به ارائه نتایج و خروجی‌های مدل اختصاص داده شده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه گیری و پیشنهادات مورد نظر ارائه می‌شود.

۲- سوابق تحقیق

همانگونه که بیان شد، تولید برق از منابع سوخت‌های فسیلی به واسطه انتشار آلاینده‌های مختلف ناشی از احتراق این سوخت‌ها سبب بروز عوارض و پیامدهایی بر سلامتی انسان‌های ساکن در اطراف می‌شود. این پیامدهای جانبی تولید برق از دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ مورد توجه اقتصاددانان قرار گرفته و تاکنون مطالعات متعددی درخصوص آن انجام شده است. با این وجود، در مطالعات صورت گرفته، بررسی پیامدهای سلامتی ناشی از تولید برق در مقایسه با مطالعات مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است (تریر و دیگران، ۲۰۱۴). در این بخش برخی از مطالعات داخلی و خارجی صورت گرفته مرتبط با این پیامدها مرور می‌شوند.

صادقی و ترکی (۱۳۸۷) با استفاده از نرم‌افزار SCREEN هزینه‌های خارجی واحد بخاری نیروگاه شهید رجایی را محاسبه کرده‌اند. بر این اساس، هزینه‌های خارجی مرتبط با انتشار دی اکسید گوگرد و دی اکسید نیتروژن در این واحد به ترتیب برابر با ٤٤٤/۲۳ و ۲۷٦/۰۷ریال به ازای هر کیلو واتساعت محاسبه شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد به دلیل بالا بودن مصرف سوخت مازوت در دو فصل پاییز و زمستان، هزینه خارجی انتشار دی اکسید گوگرد در این دو فصل بیش از بهار و تابستان است.

رحیمی و دیگران (۱۳۹۱) در مقاله‌ای به برآورد هزینه‌های اجتماعی مربوط به انتشار SO_2 ، NO_X و CO_2 به ازای هر کیلوواتساعت برق تولیدی می‌پردازند که در آن براساس سناریوهای مختلف هزینه‌های سلامت ۷۵ تا ۹۰ درصد از کل هزینه‌های اجتماعی را به خود اختصاص می‌دهد. آن‌ها در این تحقیق ابتدا هزینه‌های اجتماعی انتشار آلاینده‌های مربوط به پنج نیروگاه مختلف در کشور را برآورد کرده و در مرحله دوم و با توجه به شاخص‌های جمعیتی، اقتصادی و... نتایج تحقیق خود را به کل کشور تعمیم می‌دهند.

خالصی دوست و نور اسماعیلی (۱۳۸۸) در مقاله خود به به تشریح آلودگی‌های SO_X وNO_X ناشی از احتراق نیروگاهای حرارتی کشور مانند منتظر قائم، بعثت، اسلام آباد، شهید منتظری، شهید سلیمی، تبریز و... پرداخته و با استفاده از محاسبات خود میزان کل انتشار اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق و دی اکسید کربن منتشر شده از کل نیروگاه‌های کشور را در سال برآورد کرده‌اند.

ماچول و ریزک (۲۰۱۳) در مقاله خود به برآورد ارزش اقتصادی اثرات سلامتی تولید برق از منابع فسیلی در آمریکا می‌پردازند. اثرات سلامتی شامل پیامدهای جانبی ناشی از انتشار NO_x و SO_2 و نیز ذارات $PM_{2.5}$ به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق اندازه‌گیری شده است. بر این اساس، ارزش اقتصادی حاصل از بهبود سلامت انسانی در نتیجه عدم انتشار این آلاینده‌ها از برق حاصل از منابع فسیلی در ایالات متحده از دامنه ۰/۰۰۵-۰/۰۱۳ دلار به ازای هر کیلوواتساعت برق در کالیفرنیا تا دامنه ۰/۴۱-۱/۰۱ دلار به ازای هر کیلوواتساعت در ایالت مریلند متفاوت است. آن‌ها همچنین ارزش اقتصادی اثرات سلامتی ناشی از هر کیلووات ساعت تولید برق را بر اساس تکنولوژی‌های مختلف تولید برق و نیز متوسط آن را محاسبه کرده اند. نتایج نشان می‌دهد ارزش اقتصادی اثرات سلامتی ناشی از تولید برق از منابع سوخت‌های فسیلی در ایالات متحده بین ۳۶۱/۷ تا ۸۸۶/۵ میلیارد دلار متغیر است که به ترتیب معادل ۲/۵ تا ۶/۰ درصد از کل تولید ناخالص داخلی این کشور است.

هینون و دیگران (۲۰۱۰) نیز در مقاله‌ای به بررسی هزینه خسارت‌های سلامت ناشی از تولید برق در سوریه با استفاده از روش مسیر اثرگذاری می‌پردازند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد هزینه‌های جانبی، سهم قابل توجهی از هزینه‌های تولید برق را به خود اختصاص می‌دهند. بر اساس تخمین آن‌ها هزینه‌های پیامدهای جانبی تولید برق از منابع نفتی تا گازی

حدود ۲/۵ تا ۰/۰۷ سنت دلار به ازای هر کیلوواتساعت است. همچنین در این تحقیق نشان داده می‌شود هزینه‌های خارجی مربوط به انتشار سولفات‌های تولید شده از احتراق نفت کوره و گازوییل ۲۵ درصد از هزینه تولید برق را شامل می‌شود. بنابراین، در این تحقیق تولید برق حرارتی از منابع گاز طبیعی به عنوان یک منبع پاک تر توصیه می‌شود.

توپیل و پوریس (۲۰۱۵) بررسی اثرات زیست محیطی و سلامتی تولید برق از منابع غیرتجدیدپذیر در آفریقای جنوبی را مورد مطالعه قرار داده است. در این مطالعه برای ارزیابی اثرات از رویکرد مسیر اثرگذاری[1] (IPA) استفاده شده است. بر این اساس نتایج این مطالعه، مجموع هزینه‌های زیست محیطی و سلامتی ناشی از تولید برق از منابع غیرتجدیدپذیر بسته به نوع نیروگاه و سوخت مصرفی در بازه ۱/۳۱ تا ۷/۹۵ سنت دلار به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق قرار می‌گیرد و متوسط آن نیز برار با ۳/۰۲ سنت دلار خواهد بود. این به آن معنا است که هزینه‌های زیست محیطی و سلامتی تولید برق در این کشور در سال ۲۰۰۸ برابر با ۶۸ درصد متوسط قیمت برق در همان سال است.

ساکولنیومپارن و دیگران (۲۰۱۱) نیز به ارزیابی هزینه‌های خارجی مرتبط با سلامت انسان در نتیجه تولید برق از سوخت‌های فسیلی در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ در تایلند می‌پردازند. آن‌ها نیز برای این منظور از رویکرد IPA برای تحلیل‌ها استفاده کرده اند. در این مطالعه ابتدا از سیستم مدل سازی CALMET/CALPUFF برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی پراکنش آلاینده‌های اصلی (SO_2، NO_X و PM_{10}) و ثانویه (ذرات سولفات و نیترات) استفاده شده است. سپس به منظور کمی‌سازی خسارت‌ها بر سلامت عمومی از توابع پاسخ (F_{er}) استفاده شده است. سرانجام هزینه‌های این خسارت‌ها بر رفاه اقتصادی تخمین زده شده که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد ذرات اصلی مورد مطالعه باعث ایجاد خسارت معنی‌داری بر مرگ زودرس و مرگ‌ومیر شده‌اند. میانگین هزینه‌های خسارت در کل حدود ۶۰۰ میلیون دلار ایالات متحده براساس دلار سال ۲۰۰۵ بوده است. بر این اساس، هزینه‌های خارجی موردنظر بسته به نوع سوخت در بازه ۰/۰۵ تا ۴/۱۷ دلار به ازای هر کیلوواتساعت برآورد شده است.

1- Impact Pathway Approach

۳- مدلی برای برآورد پیامدهای جانبی (سلامتی) انتشار آلاینده‌ها

به منظور تخمین اثرات انتشار گازهای آلاینده مختلف بر سلامت انسان روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. تمامی این روش‌ها از مراحل تقریبا یکسانی تشکیل شده‌اند. این مراحل عبارتند از برآورد میزان انتشار گازهای آلاینده از منابع انتشار آن‌ها، مدل‌سازی پراکنش آلاینده‌های خروجی، تعیین توابع پاسخ[1] بدن انسان هنگام مواجهه با هر آلاینده (با استفاده از تابع واکنش می‌توان تعداد افراد مبتلا به یک عارضه یا بیماری در جمعیت در معرض خطر را محاسبه کرد) و برآورد مالی خسارات وارده بر سلامت انسان.

رویکرد مسیر اثرگذاری که در پروژه پیامدهای جانبی انرژی[2] (ExternE) مورد استفاده قرار گرفته، یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که در تعیین هزینه‌های جانبی تولید برق به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است (توپیل و پوریس، ۲۰۱۵). این روش نیز از چندین مرحله تشکیل شده است؛ گام‌های اساسی این روش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (استریمیکین و سسکین، ۲۰۱۴):

- انتشارات: تعیین آلاینده‌های منتشر شده توسط نیروگاه.
- پراکنش: محاسبه تغییرات تراکم آلاینده‌ها در مناطق تحت تاثیر با استفاده از مدل‌های پراکنش در اتمسفر.
- اثرات: محاسبات مربوط به قرار گیری در معرض افزایش تجمعی غلظت آلاینده‌ها و محاسبات اثرات (تخریب واحدهای فیزیکی) قرارگیری در معرض آلاینده با استفاده از توابع پاسخ.
- هزینه: ارزش گذاری این اثرات بر اساس مقادیر پولی.

۳-۱- الگوی پراکنش

به منظور تخمین اثرات انتشار آلاینده‌ها بر سلامت انسان، می‌توان از بخش ایرپکتس[3] از نرم‌افزار سیمپکتس استفاده کرد. روش مورد استفاده در این نرم‌افزار مبتنی بر رویکرد مسیر اثرگذاری است. در این رویکرد پس از مشخص شدن منبع آلایندگی در گام اول لازم است میزان انتشار آلاینده‌های مختلف از منبع انتشار تعیین شود. پس از جمع‌آوری

1- Response Function
2- Externalities of Energy
3- AirPacts

اطلاعات مربوط به گام اول، الگوی پراکنش آلاینده‌های منتشر شده، مدل‌سازی می‌شود. در نرم‌افزار ایرپکتس برای پیش‌بینی پراکنش محلی از مدل گاوسی[1] استفاده می‌شود. در این مدل با در نظر داشتن اثرات واکنشی سطح زمین، غلظت آلاینده براساس رابطه (۱) تعیین می‌شود (فولادی فرد و دیگران، ۲۰۱۶).

$$C_{(x,y,z)-local}=\left(\frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\right)^{\frac{-y^2}{e^2\sigma^2}}\left(e^{\frac{-(z-k_E)^2}{2\sigma_z^2}}+e^{\frac{-(z+k_E)^2}{2\sigma_z^2}}\right) \qquad (1)$$

در رابطه (۱)، می‌توان میزان غلظت آلاینده منتشر شده از یک منبع انتشار دارای نرخ ثابت انتشار Q را به صورت سه بعدی محاسبه کرد. در این رابطه، y فاصله افقی، z ارتفاع عمودی از سطح زمین، u سرعت متوسط باد در ارتفاع دودکش، h_E ارتفاع موثر دودکش و σ_y و σ_z پارامترهای پراکنش در جهت‌های افقی و عمودی هستند. برای تخمین غلظت منطقه‌ای آلاینده‌ها در فاصله r از منبع انتشار نیز از رابطه)(۲ استفاده می‌شود (فولادی فرد و دیگران، ۲۰۱۶).

$$C_{Regional}=\left(\frac{Q}{2\pi uh_{mix}}\right)\frac{1}{r}e^{\left(\frac{-k_{uni}}{uk_{mix}}\right)r} \qquad (2)$$

که در آن h_{mix} ارتفاع ترکیبی لایه در جو و k_{uni} نیز بیانگر متوسط سرعت تخریب آلاینده است.

۳-۲- تخمین اثرات سلامتی

مدل‌های مورد استفاده در ایرپکتس که مبتنی بر رویکرد مسیر اثرگذاری هستند به منظور تخمین اثرات سلامتی ناشی از آلاینده‌ها به دنبال تخمین رابطه (۳) هستند.

$$I=\int_{area}\rho(\vec{r})F_{er}\left(\vec{r},C(Q)\right)dA \qquad (3)$$

که در آن I اثرات سلامتی (تعداد ابتلا یا سال‌های از دست رفته زندگی) در جمعیت مورد مطالعه در صورت مواجهه با آلاینده گازی، $\rho(r)$ تراکم جمعیت، F_{er} تابع پاسخ مواجهه با آلاینده (وابسته به بردار موقعیت r و غلظت آلاینده در محیط)، C غلظت آلاینده در

1- Gaussian Model

هوای محیط ناشی از انتشار آلاینده از منبع انتشار با توان تولید Q، A مساحت منطقه تحت تاثیر و r بردار موقعیت است. به منظور ساده‌سازی و با فرض خطی و بدون حد آستانه بودن، تابع پاسخ مواجهه با آلاینده (F_{er}) را می‌توان به‌صورت معادله (۴) نوشت.

$$F_{er}\left(\vec{r},C\left(Q\right)\right)=f_{er}\left(\vec{r}\right)\times C\left(\vec{r},Q\right) \qquad (۴)$$

که در آن $f_{er}(r)$ شیب تابع پاسخ مواجهه با آلاینده و $C(r,Q)$ غلظت آلاینده است. حاصلضرب غلظت آلاینده $C(r,Q)$ و سرعت تخریب و میرایی آلاینده در محیط $k(r)$ یک پارامتر جدید به نام $M(r,Q)$ را برحسب میزان جرم آلاینده انتشار یافته از واحد سطح در واحد زمان ارائه می‌کند که در معادله (۵) مشاهده می‌شود.

$$M\left(\vec{r},Q\right)=k\left(\vec{r}\right)\times C\left(\vec{r},Q\right) \qquad (۵)$$

در مدل SUWM که یکی از مدل‌های ارائه شده در ایرپکتس است با فرض ثابت و یکنواخت بودن تعدادی از پارامترها (تراکم جمعیت، تابع پاسخ مواجهه با آلاینده و توان منبع انتشار)، معادله (۶) حاصل می‌شود که از این معادله می‌توان برای انجام محاسبات تخمین اثرات انتشار آلاینده‌ها بر سلامت انسان استفاده کرد.

$$I=\frac{\rho_{uni}\,f_{er}Q}{k_{uni}}\times R \qquad (۶)$$

که در آن R عامل تصحیح است و براساس پارامترهای دودکش تعیین می‌شود. R در مدل SUWM برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

یکی از مهم‌ترین مراحل تخمین اثرات سلامتی مرتبط با آلاینده‌های منتشر شده در فرآیند تولید برق، انتخاب توابع پاسخ مواجهه با آلاینده است. مطالعات سم‌شناسی و اپیدمیولوژیک متعدد بیانگر وجود رابطه میان افزایش غلظت آلاینده‌های هوا و اثرات منفی بر سلامت انسان است. در این مطالعات نشان داده شده است که قرارگیری در معرض مقادیر بحرانی آلاینده‌هایی چون دی اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق عامل مهمی در ریسک افزایش اثرات بر سلامت انسان به‌خصوص در مورد بیماری‌های ریوی است. علاوه بر این، دی اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن منتشر شده خود موجب تشکیل آلاینده‌های ثانویه نظیر سولفات‌ها و نیترات‌ها در هوا می‌شوند (اپستین و دیگران، ۲۰۱۱). در مطالعات پیشین عوارض مختلفی مانند مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت، مرگ‌ومیر بلندمدت، برونشیت مزمن، بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی و... به

عنوان عوارض ناشی از قرارگیری در معرض آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی گزارش شده اند (ساکولنیومپارن و دیگران، ۲۰۱۱).

از آنجا که در تحلیل‌های مربوطه، توابع پاسخ به صورت خطی و بدون حد آستانه فرض می‌شوند (معادله (۴)) برای تخمین این توابع تنها لازم است شیب تابع محاسبه شود. f_{er} که شیب تابع پاسخ است از معادله (۷) به‌دست می‌آید. در این معادله، IRR بیانگر تغییرات جزیی در ریسک نسبی (درصد بر μgm^{-3}) است و بیانگر افزایش ریسک سلامت انسان به واسطه تغییرات اندک در غلظت آلاینده‌ها است. نرخ‌های مرجع نیز نشان‌دهنده نرخ‌های نرمال وقوع بیماری‌های موردنظر است. F_{POP} نیز بیانگر تابع جمعیت در معرض ریسک بر اساس گروه‌های سنی است (ساکولنیومپارن و دیگران، ۲۰۱۱).

$$f_{er} = IRR \times \text{نرخ مرجع} \times F_{POP} \qquad (۷)$$

۳-۳- محاسبه هزینه‌ها

پس از تعیین تمام اثرات و عوارض ناشی از مواجهه با آلاینده‌ها، لازم است ارزش پولی این اثرات و عوارض تعیین شود. تابعی که برای ارزش‌گذاری هزینه‌های خارجی استفاده می‌شود به صورت تابعی از اثرات و ارزش‌گذاری اقتصادی تعریف می‌شود (معادله (۸)).

$$\text{ارزش تخریب} = \text{اثرات} \times \text{هزینه} \qquad (۸)$$

که در آن ارزش تخریب برابر با کل ارزش پولی هزینه‌های خارجی، اثرات بیان‌گر کل تعداد موارد به ازای پیامد خارجی و هزینه نشان‌دهنده ارزش پولی هر مورد از پیامدهای خارجی است (توپیل و پوریس، ۲۰۱۵).

با توجه به جنبه‌های غیرقابل لمس ارزش اثرات بر سلامت، ارزش‌های پولی این اثرات را نمی‌توان به صورت مستقیم برآورد کرد. در کل دو روش تمایل به پرداخت[1] (WTP) و هزینه‌های بیماری[2] (COI) اصلی ترین روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی هزینه‌های از دست رفتن سلامت هستند. در روش تمایل به پرداخت در حقیقت تمایل افراد برای پرهیز یا کاهش ریسک مرگ یا بیماری است. هزینه‌های بیماری ترکیبی از هزینه‌های درمان و

1- Willingness-to-pay
2- Costs of Illness

دستمزد از دست رفته در طی زمان درمان است. ارزش زندگی آماری[1] (VSL) روش دیگری برای ارزش‌گذاری مرگ‌ومیر است که خود معمولا بر مبنای روش تمایل به پرداخت است. در صورتی که مطالعات ملی در مورد ارزش پولی در دسترس نباشد، استفاده از شاخص انتقال منافع یکی از مفیدترین راه‌ها برای به‌کارگیری نتایج در دسترس در مورد کشورهای توسعه یافته است که از طریق معادله (۹) محاسبه می‌شود.

$$\frac{U_{V\,(\text{ایران})}}{U_{V\,(\text{کشور مرجع})}} = \left(\frac{PPP_{\,(\text{ایران})}}{PPP_{\,(\text{کشور مرجع})}}\right)^{\gamma} \qquad (۹)$$

که در آن PPP[2] بیانگر درآمد ناخالص داخلی سرانه تعدیل شده براساس شاخص برابری قدرت خرید است. γ نیز نشان‌دهنده کشش درآمدی است. نکته‌ای که باید در نظر داشت آن است که در اکثر مطالعات γ برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود (ساکولنیومپارن و دیگران، ۲۰۱۱ و توپیل و پوریس، ۲۰۱۵).

٤- پیامدهای سلامتی انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های ایران

در این بخش از مدل ارائه شده در بخش قبل، برای تعیین اثرات سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های حرارتی ایران استفاده می‌شود. در این راستا، ابتدا مشخصات نیروگاه‌ها تعیین می‌شود. سپس توابع پاسخ مشخص شده و هزینه‌های مربوط به پیامدهای سلامتی مختلف محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از داده‌های مکانی، چگونگی توزیع جمعیت تحت تاثیر در اطراف نیروگاه‌ها تعیین می‌شود.

٤-١- مشخصات نیروگاه‌ها و میزان انتشار

در این تحقیق از سه نوع نیروگاه حرارتی موجود در کشور شامل نیروگاه‌های بخاری، گازی ساده و چرخه ترکیبی و یک نوع نیروگاه چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید[3] به عنوان نیروگاه‌های معیار برای تعیین اثرات سلامت ناشی از انتشار آلاینده‌ها در فرآیند تولید برق

1- Value of Statistical Life

2- Power Purchase Parity

- تاکنون از این نوع نیروگاه در کشور احداث نشده است. انتظار می‌رود در سال‌های آتی و با انجام توافق با شرکت زیمنس، احداث این نوع نیروگاه در کشور عملی شود.

استفاده می‌شود. ظرفیت کلیه نیروگاه‌های معیار برابر با ۱۰۰۰ مگاوات فرض شده و سایر مشخصات این نیروگاه‌ها (مانند تولید برق، راندمان، انتشار آلاینده‌های مختلف و ...) براساس میانگین مشخصات نیروگاه‌های کشور در سال ۱۳۹۳ محاسبه و تعیین شده‌اند.

به منظور نشان دادن اثرات ناشی استفاده از سوخت‌های مایع در تولید برق، دو حالت برای سوخت نیروگاهی در نظر گرفته شده است (جدول‌های (۱) و (۲))؛ در حالت اول فرض بر این است که ترکیب سوخت مصرفی نیروگاه‌ها مطابق با ترکیب سوخت در سال ۱۳۹۳ (۷۲ درصد گاز طبیعی، ۱۵ درصد مازوت و ۱۳ درصد گازوییل) باشد و در حالت دوم میزان انتشار نیروگاه‌های مختلف را در حالتی نشان می‌دهد که گاز طبیعی تنها سوخت مصرفی نیروگاه‌های کشور باشد. بر این اساس، هرچه راندمان نیروگاه بالاتر باشد، میزان انتشار آلاینده‌ها به صورت قابل ملاحظه ای کمتر است. همچنین به دلیل پاک تر بودن گازطبیعی در مقایسه با سایر انواع سوخت‌های فسیلی، میزان انتشار آلاینده‌های نیروگاه‌ها در حالتی که تنها از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده می‌کنند، کاهش می‌یابد.

میزان واقعی انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های بخاری از اعداد مندرج در جدول (۱) بالاتر و میزان انتشار نیروگاه‌های گازی و چرخه ترکیبی تا حدودی از این مقادیر کمتر است. این امر بیشتر به دلیل ترکیب سوخت در نیروگاه‌های مختلف است. به طور کلی، در ایران نیروگاه‌های بخاری بیشتر از سوخت مازوت و گاز طبیعی و تا حدود کمتری گازوییل استفاده کرده و در نیروگاه‌های گازی و چرخه ترکیبی نیز از سوخت گاز طبیعی و در مرتبه بعدی از گازوییل استفاده می‌کنند. فرآیند تخصیص سوخت نیز به این‌گونه است تمامی نیروگاه‌های متصل به شبکه گاز کشور در صورتی که با محدودیت گاز طبیعی روبه‌رو نباشند (مانند فصل زمستان که مصارف گرمایشی به شدت افزایش می‌یابد) از این سوخت استفاده می‌کنند. در صورت کمبود گاز طبیعی، این نیروگاه‌ها اقدام به مصرف سوخت‌های مایع (گازوییل در نیروگاه‌های گازی و چرخه ترکیبی و مازوت در نیروگاه‌های بخاری) می‌کنند. به عبارت دیگر، تصمیم‌های مرکز کنترل (که خود برخاسته از محدودیت‌های شبکه‌های برق و گاز است) تعیین‌کننده ترکیب سوخت نیروگاه‌های مختلف است. از این رو، در این مقاله جهت مقایسه دقیق‌تر میزان انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های مختلف، سعی شده است که اثر تصمیمات مرکز کنترل در تخصیص سوخت به نیروگاه‌ها تا حد ممکن حذف شود. برای این منظور در حالت اول فرض شده است که

تمام نیروگاه‌ها از ترکیب سوخت یکسانی (۷۲ درصد گاز طبیعی، ۱۵ درصد مازوت و ۱۳ درصد گازوییل) استفاده می‌کنند. در حالت دوم نیز فرض شده است که تمام نیروگاه‌ها از سوخت گاز طبیعی استفاده کنند.

اطلاعات مندرج در دو جدول (۱) و (۲) براساس آمارهای مربوط به انتشار آلاینده‌های نیروگاهی در بخش زیست محیطی ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۳ و محاسبات محقق است. در محاسبات صورت گرفته فروض زیر در نظر گرفته شده است:

- با در اختیار بودن مجموع انتشار هریک از آلاینده‌ها در نیروگاه‌های کشور به ازای سوخت‌های مختلف (جدول ۲۵۷-۱ ترازنامه انرژی ۱۳۹۳) و میزان مصرف هر سوخت، مقدار انتشار هر آلاینده به ازای هر لیتر یا متر مکعب سوخت مصرفی مورد نظر محاسبه شده است.
- با استفاده از معادله (۱۰) میزان مصرف هر سوخت به ازای تولید یک کیلوواتساعت تولید برق در تمام انواع نیروگاه‌ها محاسبه شده است.

$$\text{مصرف سوخت به ازای هر کیلوواتساعت} = \frac{\text{ارزش حرارتی هر کیلوواتساعت برق}}{\text{ارزش حرارتی هر واحد سوخت مصرفی} \times \text{راندمان نیروگاه}} \quad (۱۰)$$

- با در اختیار داشتن ارزش حرارتی سوخت مصرفی به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق و میزان انتشار آلاینده‌های مختلف به ازای هر واحد سوخت، میزان انتشار آلاینده‌های مختلف به ازای هر واحد تولید برق در هر یک از انواع نیروگاه محاسبه شده است.

در محاسبات فوق، راندمان و میزان تولید سالیانه برق در نیروگاه‌های بخاری، گازی و چرخه ترکیبی برابر با میانگین راندمان و تولید برق این نوع نیروگاه‌ها در سال ۱۳۹۳ است (براساس اطلاعات مندرج در آمار تفصیلی صنعت برق در سال ۱۳۹۳). همچنین میزان انتشار در نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید براساس انتشارات نیروگاه‌های چرخه ترکیبی موجود است که براساس نسبت راندمان این دو نوع نیروگاه‌ها تعدیل شده است. تولید سالیانه برق این نوع نیروگاه نیز برابر با تولید سالیانه نیروگاه‌های چرخه ترکیبی موجود فرض شده است.

جدول (۱): مشخصات و میزان انتشار نیروگاه‌های معیار با فرض ترکیب فعلی سوخت

			بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
راندمان (درصد)			۳۵/۲	۳۰/۳	٤٤	۵۸
ظرفیت (MW)			۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
تولید برق سالیانه (GWh)			٥٤٢٧	۲۷۷۸	۵۲۳۷	۵۲۳۷
انتشار آلاینده‌ها	(تن در سال)	NO_x	۱٤۰۰۲/۹	۸۳۲۷/٤	۱۰۸۱۰/۷	۸۲۰۹/٤
		SO_2	۱۲۵۸۹	۷٤۸٦/٦	۹۷۱۹/۱	۷۳۸۰/۵
		PM_{10}	٦۷۷/٦	٤۰۲/۹	۵۲۳/۱	۳۹۷/۲
		CO_2	۳۷۸۰۱۰٤/۱	۲۲٤۷۹۹٦/۳	۲۹۱۸۳۵۳/۲	۲۲۱٦۱۳۷
	(گرم به ازای هر کیلووات ساعت)	NO_x	۲/۵۸	۳	Jun-۲	۱/۵۷
		SO_2	۲/۳۲	۲/٦۹	۱/۸٦	۱/٤۱
		PM_{10}	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۸
		CO_2	٦۹٦/۵	۸۰۹/۲	۵۵۷/۲	٤۲۲/۷

منبع: آمار تفصیلی صنعت برق ۱۳۹۳، ترازنامه انرژی ۱۳۹۳ و محاسبات محقق

جدول (۲): مشخصات و میزان انتشار نیروگاه‌های معیار با در نظر گرفتن گاز طبیعی به عنوان تنها سوخت نیروگاهی

			بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
راندمان (درصد)			۳۵/۲	۳۰/۳	٤٤	۵۸
ظرفیت (MW)			۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
تولید برق سالیانه (GWh)			٥٤٢٧	۲۷۷۸	۵۲۳۷	۵۲۳۷
انتشار آلاینده‌ها	(تن در سال)	NO_x	۱۲۰٤٤/٤	۷۱٦۲/۷	۹۲۹۸/٦	۷۰٦۱/۲
		SO_2	۰	۰	۰	۰
		PM_{10}	۳٦۳/۲٦	۲۱٦/۰۳	۲۸۰/٤۵	۲۱۲/۹۷
		CO_2	۳۲۸۷٤۰٤/۷	۱۹۵٤۹۹۲/۱	۲۵۳۷۹۷٤/٦	۱۹۲۷۲۸۵/٤
	(گرم به ازای هر کیلووات ساعت)	NO_x	۲/۲۲	۲/۵۸	۱/۷۸	۱/۳۵
		SO_2	۰	۰	۰	۰
		PM_{10}	۰/۰٦۷	۰/۰۷۸	۰/۰۵٤	۰/۰٤۱
		CO_2	٦۰۵/۷	۷۰۳/۷	٤۸٤/٦	۳٦۷/٦

منبع: آمار تفصیلی صنعت برق ۱۳۹۳، ترازنامه انرژی ۱۳۹۳ و محاسبات محقق

علاوه بر تعیین میزان و حجم انتشار گازهای آلاینده مختلف در نیروگاه، لازم است سرعت تخریب و میرایی این گازها نیز مشخص شود. تاکنون مطالعه دقیقی درخصوص سرعت تخریب این گازها در ایران صورت نگرفته است. با توجه به اینکه سرعت تخریب این گازها در شرایط اقلیمی مختلف با هم متفاوت است، لازم است از نتایج مطالعات صورت گرفته در کشورهای دارای اقلیم نزدیک به ایران استفاده کرد. در این مطالعه همانند فولادی‌فرد و دیگران (۲۰۱۶) از پارامترهای سرعت تخریب محاسبه شده برای کشور تونس مندرج در جدول (۳) استفاده شده است.

جدول (۳): سرعت تخریب آلاینده‌های مختلف در هوا

آلاینده	NO_x	SO_2	PM_{10}	نیترات	سولفات
سرعت تخریب (cm/s)	۱/۲۱	۷٤/۰	۷۲/۰	۸۳/۰	۵۷/۱

منبع: فولادی‌فرد و دیگران، ۲۰۱٦

٤-۲- توابع پاسخ و هزینه‌ها

به منظور بررسی اثرات انتشار آلاینده‌ها بر سلامت، لازم است آلاینده‌های موثر، توابع پاسخ مربوطه به هر یک از این پیامدها را مشخص کرد. در این تحقیق، مطابق با ساکولنیومپارن و دیگران (۲۰۱۱) و نیز با استفاده از راهنمای معرفی شده در ایرپکتس از پیامدها و توابع پاسخ مشخص شده در جدول (۴) استفاده شده است. در این تحلیل F_{pop} که مشخص‌کننده نسبت (درصد) جمعیت در معرض خطر برای هر عارضه است براساس هرم سنی جمعیت ایران در سرشماری سال ۱۳۹۵ تعیین شده است.

به منظور ارزش‌گذاری عوارض و پیامدهای ناشی از انتشار آلاینده‌ها در ایران، همانند سایر مطالعات در کشورهای در حال توسعه از نتایج مطالعات صورت گرفته در کشورهای توسعه یافته استفاده شده است. هزینه‌های مربوط به هر یک از این عوارض و پیامدها از مطالعه ساکولنیومپارن و دیگران (۲۰۱۱) و راهنمای ایرپکتس اخذ شده و براساس شاخص قیمت مصرف‌کننده (CPI) به دلار سال ۲۰۱۴ تبدیل شده‌اند. سپس این هزینه‌ها با استفاده از نرخ انتقال منافع (معادله (۹)) برای اقتصاد ایران تعدیل شده‌اند. در این معادله، تولید ناخالص داخلی سرانه در آمریکا در سال ۲۰۱۴ براساس شاخص PPP برابر با ۵۴۵۹۹ دلار و در ایران برابر با ۱۷۳۲۹ دلار امریکا در نظر گرفته شده است[1]. همچنین مطابق با سایر مطالعات ضریب γ برابر با ۱ فرض شده است. بر این اساس، نرخ انتقال منافع در تبدیل هزینه‌های عوارض برابر با ۰/۳۱۷ محاسبه شده است. در نهایت جدول (۵) هزینه‌های هر

- تولید ناخالص داخلی سرانه (بر اساس شاخص PPP) ایران و آمریکا از آمارهای وب سایت بانک جهانی اخذ شده است.

یک از پیامدهای مختلف ناشی از انشار آلاینده‌ها را نشان می‌دهد که در آن نرخ تسعیر دلار برابر با ۳۰ هزار ریال در سال ۱۳۹۳ در نظر گرفته شده است.

جدول (٤): نرخ‌های وقوع پیامدهای مختلف سلامتی

عارضه سلامتی	آلاینده	F_{pop}	شیب تابع پاسخ: مورد در هر سال در هر نفر به ازای هر میکروگرم بر مترمکعب
مرگ‌ومیر[1]			
کوتاه‌مدت (YOLL)	SO_2	۱۰۰	۵/۳٤×۱۰ ٦
	NO_x	۱۰۰	۱/۵٤×۱۰ ٦
بلندمدت (YOLL)	نیترات و PM_{10}	۱۰۰	۲/٦×۱۰ ٤
	سولفات	۱۰۰	٤/۳٤۲×۱۰ ٤
نوزادان (YOLL)	نیترات وPM_{10}	۱,۷	٤/۷۳×۱۰ ۷
	سولفات	۱,۷	۷/۸۹×۱۰ ۷
عوارض			
برونشیت مزمن (CB) در بزرگسالان (بزرگ‌تر از ۱۵ سال)	نیترات وPM_{10}	۷٦	۲/۵٤×۱۰ ۵
	سولفات	۷٦	۳/۹۰×۱۰ ۵
بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی (RHA)	SO_2	۱۰۰	۱/۲٦۲×۱۰ ۵
	NO_x	۱۰۰	۱/۱۷×۱۰ ٦
	نیترات وPM_{10}	۱۰۰	۱/۵۷×۱۰ ٤
	سولفات	۱۰۰	۲/٦×۱۰ ٤
بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی (CHA)	نیترات وPM_{10}	۱۰۰	٤/۷۱۷×۱۰ ۵
برونشیت حاد (AB) در کودکان (کمتر از ۲۵ سال)	PM_{10}	۳۹	٤/٤۰٦×۱۰ ۵
سرفه مزمن (CC) در کودکان (کمتر از ۱۵ سال)	نیترات وPM_{10}	۲٤	۲/۷×۱۰ ۳
	سولفات	۲٤	۳/٤٦×۱۰ ۳
روزهای با فعالیت محدود (RAD) در بزرگسالان (بزرگ‌تر از ۱۵ سال)	نیترات وPM_{10}	۷٦	۲/۵×۱۰ ۲
	سولفات	۷٦	٤/۲۰×۱۰ ۲

منبع: ساکولنیومپارن و دیگران (۲۰۱۱)، ربل (۲۰۰۱) ، راهنمای ایرپکتس و وب سایت مرکز آمار ایران

- مرگ و میر کوتاه‌مدت (حاد)، بلندمدت (مزمن) و نوزادان عمدتا بر اساس تعداد سال‌های از دست رفته زندگی (Years Of Lost Life) محاسبه می شود که به اختصار به صورت (YOLL) بیان می شود.

جدول (۵): هزینه‌های عوارض مختلف سلامتی

عارضه سلامتی	هزینه	
	دلار آمریکا (۲۰۱٤)	ریال (۱۳۹۳)
مرگ‌ومیر		
کوتاه‌مدت (YOLL)	۲۳۹۱۷٤/۲۲	۲۲۷۷۳٥٦٦٦۰
بلندمدت (YOLL)	۱۳۸۸۳۱/۰۱	۱۳۲۱۹۱۳۹۲۳
نوزادان (YOLL)	۲۳۹۱۷٤/۲۲	۲۲۷۷۳٥٦٦٦۰
عوارض		
برونشیت مزمن (CB) در بزرگسالان (بزرگ‌تر از ۱۵ سال)	۲٤٤۳۹۷/٥٦	۲۳۲۷۰۹۲۰۳٥
بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی (RHA)	٦۲٤۰/٥۲۲٦	٥۹٤۲۰٦۸٥
بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی (CHA)	٤۹۹۲/۱٥۲۱	٤۷٥۳٤۰۱٥
برونشیت حاد (AB) در کودکان (کمتر از ۲۵ سال)	۱۰۹/۸۰٥٥۳	۱۰٤٥٥٤۰/٦
سرفه مزمن(CC) در کودکان (کمتر از ۱۵ سال)	۳٤٦/۳۹۰۲٤	۳۲۹۸۲٤۰/۷
روزهای با فعالیت محدود (RAD) در بزرگسالان (بزرگ‌تر از ۱۵ سال)	۱٥۹/٤٤۹٤۸	۱٥۱۸۲۳۷/۸

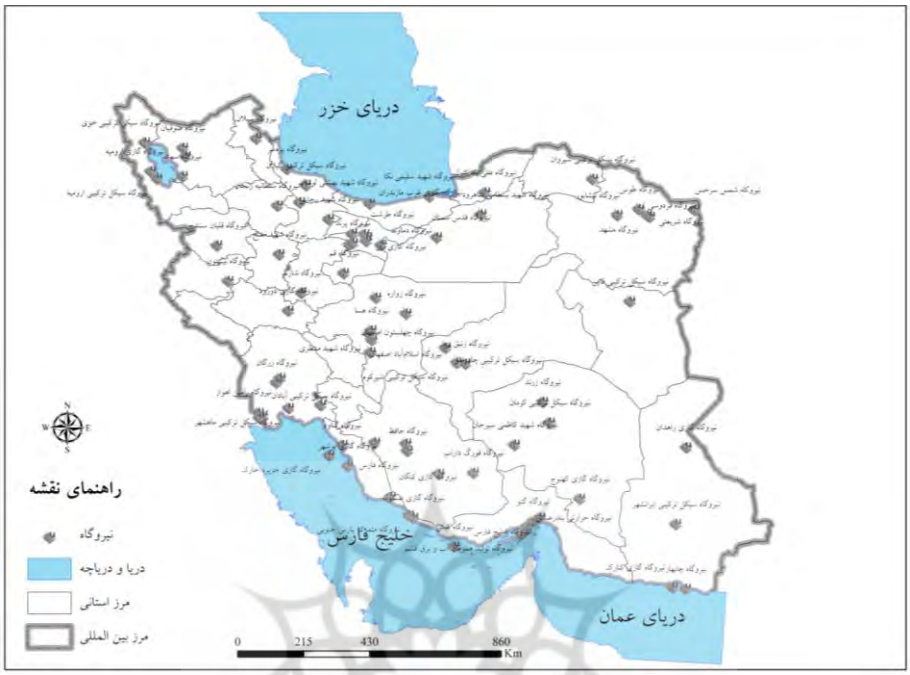
منبع: ساکولنیومپارن و دیگران (۲۰۱۱)، راهنمای ایرپکتس

٤-۳- تراکم جمعیت

به دلیل اینکه اثرات سلامتی آلاینده‌های منتشر شده در فرآیند تولید برق بر جمعیت انسانی ساکن در محیط اطراف منبع انتشار (نیروگاه) شکل می‌گیرد، لازم است برای محاسبه دقیق‌تر این اثرات تراکم جمعیت در اطراف نیروگاه مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور از متوسط توزیع جمعیت در اطراف نیروگاه‌های حرارتی ایران استفاده شده است. برای تعیین توزیع جمعیت پیرامون نیروگاه‌های حرارتی، ابتدا مختصات جغرافیایی نیروگاه‌های کشور از منابع مختلف استخراج شده و با استفاده از عکس‌های هوایی موجود از درست بودن مختصات نیروگاه‌ها اطمینان حاصل شد[1]. در شکل (۱) که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده، مکان این نیروگاه‌ها ترسیم شده است.

۱- به طور کلی مختصات ۷۹ نیروگاه حرارتی استخراج شد که بیش از ۸۰ درصد از نیروگاه های حرارتی را دربرمی‌گیرد. متاسفانه امکان دستیابی به مختصات نیروگاه های متعلق به صنایع بزرگ و برخی دیگر از نیروگاه ها فراهم نشد.

شکل (۱): موقعیت مکانی نیروگاه‌های مورد مطالعه



برای به‌دست آوردن تراکم جمعیتی (هزار نفر به کیلومتر مربع) در شعاع تاثیر هر یک از نیروگاه‌ها از تحلیل مکانی حائل گذاری[1] سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. در این تحلیل برای عارضه نیروگاه به عنوان یک نقطه، شعاع تاثیرهای مختلفی تعریف شده و در هر شعاع میزان تراکم جمعیتی به صورت عددی میانگین به‌دست می‌آید. در این صورت، ابتدا نیاز است تا اطلاعات جمعیتی منطقه مورد مطالعه گردآوری شود و سپس این اطلاعات به نقشه‌های تراکم جمعیتی تبدیل شود. برای تهیه نقشه‌های تراکم جمعیتی، اطلاعات جمعیتی بر مساحت محدوده شهری و روستایی تقسیم شده و نقشه تراکم هزار نفر در کیلومتر مربع منتج می‌شود. در این تحقیق، اطلاعات جمعیتی و نقشه تراکم جمعیت از وب سایت لنداسکن به عنوان یک مرجع استاندارد و بین‌المللی استخراج شد و با استفاده از تحلیل حائل گذاری، تراکم جمعیت در شعاع‌های ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۵۶ کیلومتری اطراف تمام نیروگاه‌ها محاسبه شد.

---

[1]- Buffering

جدول (۶) جمعیت و تراکم جمعیت در شعاع‌های مختلف در اطراف نیروگاه‌های حرارتی ایران را نشان می‌دهد. بر این اساس، میانگین تراکم جمعیت در شعاع ۵۰ کیلومتری اطراف نیروگاه‌های حرارتی کشور برابر با ۲۵۳/۳ نفر در هر کیلومتر مربع و واریانس آن نیز برابر با /۴۲۷۱ است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از نیروگاه و افزایش مساحت ناحیه اطراف نیروگاه، تراکم جمعیت کاهش می‌یابد. این به معنای آن است که نیروگاه‌های کشور بیشتر در مناطق شهری و یا با تراکم جمعیت بالا احداث شده اند. این موضوع خود می‌تواند یکی از شاخص‌های هشداردهنده درخصوص مکان‌یابی نادرست نیروگاه‌های حرارتی در کشور باشد.

جدول (٦): جمعیت و تراکم جمعیت در اطراف نیروگاه‌های حرارتی

	شعاع (کیلومتر)	۲۰	۳۰	۵۰	٥٦
جمعیت (نفر)	میانگین	۷۲۵۲۱۸/۲	۱۱۹۸۲۲۰	۱۹۸۹۰۹۸	۲۲۲۷۹۲۰
	انحراف معیار	١٦١٧٤٤٧	٢٢٠٠١٥٤	٣٣٥٤١٩١	٣٦٦٥٨٧١
تراکم جمعیت (نفر در کیلومتر مربع)	میانگین	۵۷۷/۱	٤٢٣/٨	۲۵۳/۳	۲۲٦/۱
	انحراف معیار	۱۲۸۷/۱	۷۷۸/۱	٤٢٧/١	۳۷۲/۱

منبع: نتایج تحقیق

بر اساس اطلاعات فوق، ناحیه محلی اطراف نیروگاه ناحیه‌ای با شعاع ۵۰ کیلومتر تعریف شده و تراکم جمعیت در این ناحیه محلی برابر با میانگین تراکم جمعیت در شعاع ۵۰ کیلومتری اطراف نیروگاه‌های کشور (۲۵۳/۳ نفر در هر کیلومتر مربع) در نظر گرفته شد[1]. در خصوص تراکم جمعیت منطقه ای (شعاع ۱۰۰۰ کیلومتری) نیز از تراکم جمعیت کشور در سال ۱۳۹۵ که معادل ۴۹/۱ نفر در هر کیلومتر مربع است، استفاده شده است.

۵- نتایج

در این مقاله با استفاده از بخش ایرپکتس از نرم‌افزار سیمپکتس اثرات سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌های مختلف در چهار نوع از نیروگاه‌های کشور مدل سازی شد. نتایج

- حداکثر شعاع محلی توصیه شده در راهنمای نرم‌افزار ۵۶ کیلومتر است و با انتخاب با شعاع‌های دیگری چون ۲۰، ۳۰ و ۵۶ کیلومتر تغییرات قابل توجهی در نتایج ایجاد نشد.

مدل‌سازی برای دو حالت ترکیب سوخت نیروگاهی ارائه شده است. در حالت اول، فرض شده است ترکیب سوخت نیروگاهی مشابه ترکیب سوخت سال ۱۳۹۳ (شامل ۷۲ درصد گازطبیعی، ۱۵ درصد مازوت و ۱۳ درصد گازوییل) بوده و در حالت دوم فرض می‌شود تمامی نیروگاه‌ها از سوخت گاز طبیعی استفاده کنند.

جدول‌های (۷) و (۸) عوارض سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌های مختلف را در دو حالت ترکیب سوخت فعلی و گاز طبیعی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های مایع آلاینده‌های به مراتب کمتری را منتشر می‌کند، میزان پیامدهای سلامتی در زمانی که نیروگاه‌ها فقط از این سوخت بهره می‌برند به میزان قابل توجهی پایین‌تر است. به عنوان مثال، گاز طبیعی عاری از گوگرد است، از این رو، احتراق این سوخت در نیروگاه‌ها منجر به انتشار دی اکسید گوگرد و تشکیل آلاینده‌های ثانویه متشکل از آن (سولفات‌ها) و بروز پیامدهای مترتب بر انتشار آن‌ها نخواهد شد (نجار، ۲۰۱۱).

همچنین در دو جدول (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که در تمامی موارد، نیروگاه‌های بخاری بیشترین اثرات سلامتی را نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارا هستند. با توجه به اینکه نیروگاه‌های بخاری دارای راندمان بالاتری نسبت به نیروگاه‌های گازی هستند، میزان بالاتر اثرات سلامتی در نیروگاه‌های بخاری، متناقض می‌نماید. باید توجه داشت هر چند نیروگاه‌های بخاری در مقایسه با نیروگاه‌های گازی میزان آلاینده کمتری به ازای هر کیلوواتساعت برق تولیدی خود منتشر می‌کنند، ضریب تولید بالاتر نیروگاه‌های بخاری موجب می‌شود که طی سال این نیروگاه‌ها در مجموع آلاینده‌های بیشتری وارد هوا کنند.

با استفاده از میزان عوارض و پیامدهای گزارش شده در دو جدول (۷) و (۸) و هزینه‌های مربوط به هر یک از این عوارض که در جدول (۵) ارائه شده است، می‌توان مجموع هزینه‌های مربوط به عوارض مختلف را محاسبه کرد.

جدول (۷): اثرات سالیانه انتشار آلاینده‌های مختلف در نیروگاه‌های معیار مختلف (ترکیب فعلی سوخت)

آلاینده	اثر	واحد	نیروگاه			
			بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
SO_2	مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۵۱/۵	۳۰/٦	۳۹/۸	۳۰/۲
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۱۲۱/۷	۷۲/٤	۹٤	۷۱/٤
NO_x	مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۱۵	۸/۹	۱۱/٦	۸/۸
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۱۱/۲	٦/۷	۸/۷	٦/٦
PM_{10}	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۱۳٦/۱	۸۰/۹	۱۰۵	۷۹/۷
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۱۰/۱	٦	۷/۸	۵/۹
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۸۲/۲	٤۸/۸	٦۳/٤	٤۸/۱
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی	مورد	۲٤/۷	۱٤/۷	۱۹	۱٤/۵
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۳۳۹/۱	۲۰۱/٦	۲٦۱/٦	۱۹۸/٦
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	۹۹٤۳	۵۹۱۰	۷٦۷۰	۵۸۲۲
	برونشیت حاد در کودکان	مورد	۹	۵/٤	٦/۹	۵/۳
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱
سولفات	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۵٤۱/۸	۳۲۲/۲	٤۱۸/۳	۳۱۷/۷
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۳۷	۲۲	۲۸/٦	۲۱/۷
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۳۲٤/٦	۱۹۳	۲۵۰/٦	۱۹۰/۳
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۱۰۳٦	٦۱٦/۳	۸۰۰	٦۰۷/۵
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	۳۹۸۵۰	۲۳۷۰۰	۳۰۷۷۰	۲۳۳٦۰
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۱	۰/٦	۰/۸	۰/٦
نیترات	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	٦۸۳	٤۰٦/۱	۵۲۷/۳	٤۰۰/٤
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۵۰/۷	۳۰/۲	۳۹/۱	۲۹/۷
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	٤۱۲/٤	۲٤۵/۲	۳۱۸/٤	۲٤۱/۸
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی	مورد	۱۲۳/۹	۷۳/۷	۹۵/۷	۷۲/٦
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۱۷۰۲	۱۰۱۲	۱۳۱٤	۹۹۷/۸
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	٤۹۹۱۰	۲۹٦۸۰	۳۸۵۳۰	۲۹۲٦۰
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۱/۲	۰/۷	۱	۰/۷

منبع: نتایج تحقیق

جدول (۸): اثرات سالیانه انتشار آلاینده‌های مختلف در نیروگاه‌های معیار مختلف (سوخت نیروگاهی گاز طبیعی)

آلاینده	اثر	واحد	نیروگاه			
			بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
SO_2	مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۰	۰	۰	۰
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۰	۰	۰	۰
NO_x	مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۱۲/۹	۷/۷	۹/۹	۷/۶
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۹/۷	۵/۷	۷/۵	۵/۷
PM_{10}	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۷۲/۹	۴۳/۴	۵۶/۲	۴۲/۸
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۵/۴	۳/۲	۴/۲	۳/۲
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۴۴	۲۶/۲	۳۳/۹	۲۵/۸
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی	مورد	۱۳/۲	۷/۹	۱۰/۲	۷/۸
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۱۸۱/۶	۱۰۸	۱۴۰/۱	۱۰۶/۵
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	۵۳۲۴	۳۱۶۸	۴۱۰۶	۳۱۲۴
	برونشیت حاد در کودکان	مورد	۴/۸	۲/۹	۳/۷	۲/۸
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
سولفات	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۰	۰	۰	۰
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۰	۰	۰	۰
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۰	۰	۰	۰
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۰	۰	۰	۰
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	۰	۰	۰	۰
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۰	۰	۰	۰
نیترات	مرگ‌ومیر بلندمدت	سال‌های از دست رفته زندگی	۵۸۷/۴	۳۴۹/۴	۴۵۳/۵	۳۴۴/۴
	برونشیت مزمن در بزرگسالان	مورد	۴۳/۶	۲۵/۹	۳۳/۷	۲۵/۶
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی	مورد	۳۵۴/۷	۲۱۱	۲۷۳/۹	۲۰۸
	بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی	مورد	۱۰۶/۶	۶۳/۴	۸۲/۳	۶۲/۵
	سرفه مزمن در کودکان	مورد	۱۴۶۴	۸۷۰/۷	۱۱۳۰	۸۵۸/۳
	روزهای با فعالیت محدود در بزرگسالان	روز	۴۲۹۳۰	۲۵۵۳۰	۳۳۱۴۰	۲۵۱۷۰
	مرگ‌ومیر نوزادان	سال‌های از دست رفته زندگی	۱/۱	۰/۶	۰/۸	۰/۶

منبع: نتایج تحقیق

جدول (۹): هزینه‌های سلامتی سالیانه به تفکیک عوارض مختلف در نیروگاه‌های معیار (ترکیب فعلی سوخت)

	بخاری (میلیون ریال)	گازی ساده (میلیون ریال)	چرخه ترکیبی (میلیون ریال)	چرخه ترکیبی جدید (میلیون ریال)
برونشیت حاد (AB) در کودکان	۰/۰۰۹	۰/۰۰٦	۰/۰۰۷	۰/۰۰٦
برونشیت مزمن (CB) در بزرگسالان	۲۲۷/٦۱	۱۳۵/۳۳	۱۷۵/٦۹	۱۳۳/٤۱
بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی (RHA)	۵۵/۹۱	۳۳/۲٤	٤۳/۱٦	۳۲/۷۸
بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی (CHA)	۷/۰٦	٤/۲	۵/٤۵	٤/۱٤
روزهای با فعالیت محدود (RAD) در بزرگسالان	۱۵۱/۳۷	۹۰/۰۱	۱۱٦/۸٦	۸۸/۷۳
سرفه مزمن(CC) در کودکان	۱۰/۱۵	٦/۰٤	۷/۸٤	۵/۹۵
مرگ‌ومیر بلندمدت	۱۷۹۸/۹	۱۰٦۹/۸	۱۳۸۸/۷	۱۰۵٤/۵
مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	۱۵۱/٤	۹۰/۰۳	۱۱٦/۸۸	۸۸/۷۵
مرگ‌ومیر نوزادان	۵/٦۲	۳/۳٤	٤/۳٤	۳/۲۹
جمع	۲٤۰۸/۰٤	۱٤۳۲	۱۸۵۸/۹۲	۱٤۱۱/۵٦

منبع: نتایج تحقیق

دو جدول (۹) و (۱۰)، هزینه‌های سلامتی مرتبط با عوارض مختلف ناشی از انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها را در دو حالت برای ترکیب سوخت نیروگاهی نشان می‌دهند. بر این اساس، نیروگاه‌های بخاری بیشترین و نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید کمترین هزینه‌های سلامتی سالیانه را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بیشترین هزینه‌های سلامتی مربوط به مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت و کمترین هزینه‌ها مربوط به برونشیت حاد در کودکان است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که با تغییر ترکیب سوخت نیروگاهی و استفاده از گاز طبیعی به عنوان تنها سوخت هزینه‌های سلامتی انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها به کمتر از نصف حالت قبل کاهش می‌یابد.

جدول (۱۰): هزینه‌های سلامتی سالیانه به تفکیک عوارض مختلف در نیروگاه‌های معیار(سوخت گاز طبیعی)

	بخاری (میلیون ریال)	گازی ساده (میلیون ریال)	چرخه ترکیبی قدیمی (میلیون ریال)	چرخه ترکیبی جدید (میلیون ریال)
برونشیت حاد (AB) در کودکان	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰٤	۰/۰۰۳
برونشیت مزمن (CB) در بزرگسالان	۱۱٤/۰۸	٦۷/۸٤	۸۸/۰۵	٦٦/۸۷
بستری شدن در بیمارستان به دلایل تنفسی (RHA)	۲۳/٦۹	۱٤/۱	۱۸/۲۹	۱۳/۸۹
بستری شدن در بیمارستان به دلایل قلبی و عروقی (CHA)	۵/٦۹	۳/۳۹	٤/٤	۳/۳٤
روزهای با فعالیت محدود (RAD) در بزرگسالان	۷۳/۲۵	٤۳/۵۷	۵٦/۵٦	٤۲/۹۵
سرفه مزمن(CC) در کودکان	۵/٤۳	۳/۲۳	٤/۱۹	۳/۱۸
مرگ‌ومیر بلندمدت	۸۷۲/۸	۵۱۹/۱	٦۷۳/۷۸	۵۱۱/۷۱
مرگ‌ومیر کوتاه‌مدت	۲۹/۳۳	۱۷/٤٤	۲۲/٦٤	۱۷/۱۹
مرگ‌ومیر نوزادان	۲/۷۲	۱/٦۲	۲/۱	۱/۵۹
جمع	۱۱۲۷	٦۷۰/۲۸	۸۷۰	٦٦۰/۷٤

منبع: نتایج تحقیق

دو جدول (۱۱) و (۱۲) هزینه‌های سالیانه سلامتی نیروگاه‌ها را به تفکیک آلاینده‌های مختلف نشان می‌دهد. بر این اساس، آلاینده‌های ثانویه ناشی از انتشار اکسیدهای نیتروژن که تحت عنوان نیترات‌ها شناخته می‌شوند، بیشترین هزینه‌های سلامتی را به دنبال خواهند داشت. با تغییر سوخت نیروگاهی به گاز طبیعی، انتشار دی اکسید گوگرد کاملا متوقف شده و این موضوع موجب عدم بروز عوارض و پیامدهای ناشی از انتشار دی اکسید گوگرد و آلاینده‌های ثانویه ناشی از آن (سولفات‌ها) خواهد شد. همچنین در این حالت انتشار سایر آلاینده‌ها نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته و اثرات ناشی از انتشار آن‌ها نیز با کاهش جدی مواجه می‌شود.

جدول (۱۱): هزینه‌های سلامتی سالیانه به تفکیک آلاینده‌های مختلف در نیروگاه‌های معیار (ترکیب فعلی سوخت)

	بخاری (میلیارد ریال)	گازی ساده (میلیارد ریال)	چرخه ترکیبی (میلیارد ریال)	چرخه ترکیبی جدید (میلیارد ریال)
SO_2	۱۲٤/٥	۷٤/۰٥	۹٦/۱۳	۷۳
NO_x	۳٤/۷۷	۲۰/٦۷	۲٦/۸٤	۲۰/۳۸
PM_{10}	۲۲٦/۲	۱۳٤/٥	۱۷٤/٥	۱۳۲/٥
نیترات	۱۱۳٥	٦۷٥/۲	۸۷٦/٦	٦٦٥/٦
سولفات	۸۸۷/۸	٥۲۸	٦۸٥/٤	٥۲۰/٥
جمع	۲٤۰۸/۲۷	۱٤۳۲/٤۲	۱۸٥۹/٤۷	۱٤۱۱/۹۸

منبع: نتایج تحقیق

جدول (۱۲): هزینه‌های سلامتی سالیانه به تفکیک آلاینده‌های مختلف در نیروگاه‌های معیار (سوخت گاز طبیعی)

	بخاری (میلیارد ریال)	گازی ساده (میلیارد ریال)	چرخه ترکیبی قدیمی (میلیارد ریال)	چرخه ترکیبی جدید (میلیارد ریال)
SO_2	۰	۰	۰	۰
NO_x	۲۹/۹	۱۷/۷۸	۲۳/۰۹	۱۷/٥۳
PM_{10}	۱۲۱/۱	۷۲/۰۷	۹۳/٤۲	۷۱/۰۷
نیترات	۹۷٦/٥	٥۸۰/۸	۷٥٤	٥۷۲/٥
سولفات	۰	۰	۰	۰
جمع	۱۱۲۷/٥	٦۷۰/٦٥	۸۷۰/٥۱	٦٦۱/۱

منبع: نتایج تحقیق

جدول‌های (۱۳) و (۱۴)، هزینه‌های سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در نیروگاه‌ها را به ازای هر واحد تولید برق و هر واحد مصرف سوخت نیروگاهی نشان می‌دهد. هزینه‌های سلامتی هر واحد برق تولیدی (مثلا هر کیلووات ساعت) شاخصی مناسب برای مقایسه هزینه‌های سلامت در نیروگاه‌های مختلف است، چراکه در این شاخص تاثیر ضریب تولید نیروگاه بر هزینه‌های انتشار حذف شده است. بر این اساس با فرض حفظ ترکیب سوخت نیروگاهی موجود، نیروگاه‌های گازی با هزینه سلامتی ۵۱۶ ریال به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق پرهزینه‌ترین نیروگاه از این لحاظ محسوب می‌شوند. نیروگاه‌های بخاری، چرخه

ترکیبی و چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید نیز به ترتیب با هزینه‌های ۴۴۴، ۳۵۵ و ۲۷۰ ریالی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. با مقایسه راندمان نیروگاه‌ها، نتایج فوق کاملا قابل انتظار است. هر چه راندمان یک راندمان نیروگاه‌ها بالاتر باشد، میزان مصرف سوخت و در نتیجه میزان انتشار آلاینده‌ها با ازای تولید هر کیلوواتساعت برق کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه‌های سلامتی مرتبط نیز کاهش می‌یابد.

با تغییر سوخت مصرفی نیروگاه‌ها به گاز طبیعی نیز ترتیبات فوق برای هزینه‌های سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها حفظ می‌شود؛ به این معنی که نیروگاه‌های گازی، بخاری، چرخه ترکیبی و چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید به ترتیب با هزینه سلامتی ۲۴۱، ۲۰۸، ۱۶۶ و ۱۲۶ ریال به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق به ترتیب بیشترین هزینه‌های سلامتی را به خود اختصاص می‌دهند. این هزینه‌ها اندکی کمتر از نصف هزینه‌های سلامتی در حالت حفظ ترکیب سوخت فعلی نیروگاه‌ها است؛ زیرا در صورتی که نیروگاه‌ها صرفا از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده کنند، میزان انتشار همه آلاینده‌ها کاهش یافته و انتشار دی اکسید گوگرد اساسا به صفر می‌رسد. این امر به معنی کاهش هزینه‌های سلامتی مرتبط با انتشار این آلاینده‌ها است.

همچنین می‌توان هزینه‌های سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها را برحسب هر واحد سوخت مصرفی تعیین کرد. بر این اساس در صورت حفظ ترکیب سوخت فعلی، هزینه‌های مترتب بر احتراق هر واحد سوخت (معادل یک متر مکعب گاز طبیعی که برابر با میزان سوختی است که ۸۷۶۰ کیلو کالری آزاد می‌کند) در تمام نیروگاه‌ها حدود ۱۵۹۰ ریال خواهد بود. در صورت اصلاح ترکیب سوخت و استفاده از گاز طبیعی نیز میزان هزینه‌های سلامتی مطابق انتظار به کمتر از نصف و به حدود ۷۴۵ ریال بر مترمکعب خواهد رسید.

در نهایت جدول (۱۵) برآورد مجموع هزینه‌های سلامتی سالیانه تولید برق در ایران در سال ۱۳۹۳ را نشان می‌دهد. بر این اساس، میزان هزینه‌های سلامتی تولید برق در ایران در سال ۱۳۹۳ بالغ بر ۱۱۰ هزار میلیارد ریال تخمین زده شده است. این رقم اندکی بیش از حدود یک درصد از تولید ناخالص داخلی در این سال را شامل می‌شود[1]. به دلیل آلایندگی کمتر گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های مایع، با تغییر سوخت و به‌کارگیری

۱- بر اساس آمارهای بانک مرکزی تولید ناخالص داخلی در سال ۱۳۹۳ معادل ۱۱۰۷۵۱۹۸ میلیارد ریال بوده است.

گاز طبیعی به عنوان تنها سوخت نیروگاهی، هزینه‌های سلامتی تولید برق در کشور بیش از ۵۳ درصد کاهش یافته و به حدود ۵۲ هزار میلیارد ریال می‌رسد.

جدول (۱۳): هزینه‌های سلامتی هر واحد تولید برق و هر واحد مصرف سوخت (ترکیب فعلی سوخت)

	واحد	نیروگاه			
		بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
مجموع هزینه سلامتی	میلیارد ریال	/۲۷ ۲۴۰۸	/۴۲ ۱۴۳۲	۱۸۵۹/۴۷	۱۴۱۱/۹۸
تولید برق سالیانه	گیگاوات ساعت	۵۴۲۷	۲۷۷۸	۵۲۳۷	۵۲۳۷
هزینه سلامتی هر واحد تولید برق	ریال بر کیلووات ساعت	۴۴۳/۸	۵۱۵/۶	۳۵۵/۱	۲۶۹/۶
مصرف سوخت سالیانه (معادل گاز طبیعی)	میلیون مترمکعب	/۶ ۱۵۱۳	۹۰۰/۱	۱۱۶۸/۵	۸۸۶/۵
هزینه سلامتی هر واحد مصرف سوخت	ریال بر متر مکعب	/۱ ۱۵۹۱	/۴ ۱۵۹۱	۱۵۹۱/۳	۱۵۹۲/۸

منبع: نتایج تحقیق

جدول (۱۴): هزینه‌های سلامتی هر واحد تولید برق و هر واحد مصرف سوخت (سوخت گاز طبیعی)

	واحد	نیروگاه			
		بخاری	گازی	چرخه ترکیبی	چرخه ترکیبی جدید
مجموع هزینه سلامتی	میلیارد ریال	۱۱۲۷/۵	۶۷۰/۶۵	۸۷۰/۵۱	۶۶۱/۱
تولید برق سالیانه	گیگاواتساعت	۵۴۲۷	۲۷۷۸	۵۲۳۷	۵۲۳۷
هزینه سلامتی هر واحد تولید برق	ریال بر کیلوواتساعت	۲۰۷/۸	۲۴۱/۴	۱۶۶/۲	۱۲۶/۲
مصرف سوخت سالیانه (گاز طبیعی)	میلیون مترمکعب	۱۵۱۳/۶	۹۰۰/۱	۱۱۶۸/۵	۸۸۶/۵
هزینه سلامتی هر واحد مصرف سوخت	ریال بر متر مکعب	۷۴۴/۹	۷۴۵/۱	۷۴۴/۹	۷۴۵/۸

منبع: نتایج تحقیق

جدول (۱۵): مجموع هزینه‌های سلامتی سالیانه تولید برق در ایران (سال ۱۳۹۳)

	مصرف سوخت سالیانه (میلیون متر مکعب معادل گاز طبیعی)	میانگین هزینه سلامتی هر واحد سوخت (ریال یر متر مکعب)	کل هزینه‌های سلامتی سالیانه (میلیارد ریال)
ترکیب فعلی سوخت	٦٩٦٧١/٣٥	١٥٩١/٦	١١٠٨٩٠/٣٥
سوخت گاز طبیعی	٦٩٦٧١/٣٥	٧٤٥/٢	٥١٩١٦/٩

منبع: ترازنامه انرژی ۱۳۹۳ و نتایج تحقیق

٦- بحث و جمع‌بندی

در این مقاله اثرات و هزینه‌های سلامتی ناشی از انتشار آلاینده‌ها در سال ۱۳۹۳ در ایران برآورد شد. بر این اساس، هزینه‌های سلامتی تولید برق حدود یک درصد از کل تولید ناخالص داخلی کشور در سال را شامل می‌شود. برآورد هزینه‌های سلامتی تولید برق در نیروگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که مطابق انتظار نیروگاه‌های گازی بیشترین پیامدها و هزینه‌های سلامتی را به ازای هر کیلوواتساعت تولید برق به دنبال خواهند داشت و نیروگاه‌های بخاری، چرخه ترکیبی در رتبه‌های بعدی قرار گرفته و نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید کمترین هزینه‌های سلامتی را دارا هستند. با توجه به هزینه‌های سلامتی پایین‌تر نیروگاه‌های چرخه ترکیبی، انتظار می‌رود به‌کارگیری هر چه بیشتر از این نوع نیروگاه به‌خصوص نیروگاه‌های با تکنولوژی جدید مورد توجه بیشتری قرار گیرد. همچنین می‌توان در کنار توسعه نیروگاه‌های چرخه ترکیبی با تکنولوژی جدید، امکان تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی که اساسا عاری از اثرات منفی بر سلامت انسان هستند را نیز مدنظر قرار داد.

نتایج مدل‌سازی صورت گرفته در این مقاله نشان داد که تغییر ترکیب سوخت نیروگاهی و استفاده از گاز طبیعی به عنوان تنها سوخت نیروگاهی، می‌تواند هزینه‌های سلامتی ناشی از انتشار نسبت به ترکیب سوخت فعلی را بیش از ۵۳ درصد کاهش دهد.

نتایج تحقیق حاضر به همراه این واقعیت که ایران دومین ذخایر گاز طبیعی در جهان را دارا است، لزوم تقویت شبکه گازرسانی به نیروگاه‌ها را بیش از پیش یادآور می‌شود. البته این امر نیز منوط به انجام بررسی‌های فنی و اقتصادی مرتبط است.

در نهایت بررسی تراکم جمعیت در اطراف نیروگاه‌های موجود در کشور نشان داد تراکم جمعیت در شعاع تاثیر نیروگاه‌های کشور بیش از میانگین تراکم جمعیت کشوری است. همچنین با افزایش فاصله از نیروگاه و افزایش مساحت ناحیه اطراف نیروگاه، تراکم جمعیت کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد نیروگاه‌های کشور بیشتر در مناطق شهری و یا مناطق با تراکم جمعیت بالا احداث شده‌اند. این نتایج می‌تواند شاخصی هشداردهنده درخصوص مکان‌یابی نادرست نیروگاه‌های حرارتی در کشور و افزایش هزینه‌های سلامتی مربوط به تولید برق از این نیروگاه‌ها باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

الف- فارسی

اسدی، محمدباقر، حسین صادقی‌سقدل، بهرام سحابی و علیرضا ناصری (۱۳۹۵)، «آثار اصلاح قیمت سوخت نیروگاهی در بازار برق ایران با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی عامل بنیان»، *پژوهشنامه اقتصادی*، شماره ۶۵، تابستان ۱۳۹۶، صفحات ۱۱۴ - ۸۱.

آمار تفصیلی صنعت برق ویژه تولید، (۱۳۹۳) توانیر.

ترازنامه انرژی، (۱۳۹۳)، وزارت نیرو.

خالصی دوست، عبدالله و بابک نور سماعیلی (۱۳۸۸)، «بررسی اثرات زیست محیطی SO_x و NO_x ناشی از احتراق در نیروگاه‌های حرارتی سوخت فسیلی ایران»، مجموعه مقالات اولین کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.

خوش اخلاق، رحمان، علیمراد شریفی و حامد پاروند (۱۳۹۱)، «ارائه الگویی جهت محاسبه هزینه اجتماعی نهایی کوتاه‌مدت تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی مطالعه موردی نیروگاه‌های شهید محمد منتظری و اسلام‌آباد اصفهان»، *فصلنامه تحقیقات مدلسازی اقتصادی*، شماره ۱۰.

رحیمی، نسترن، نرگس کارگری ، حسن صمدیار و محمد نیکخواه‌منفرد (۱۳۹۳)، «تعیین هزینه‌های اجتماعی (خارجی) انتشار SO_2، NO_X و CO_2 در بخش انرژی کشور (نیروگاه‌ها)»، *مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره ۱۶، شماره ۳.

صادقی، مهدی و معصومه ترکی (۱۳۸۷)، «بررسی هزینه‌های خارجی تولید برق در ایران (مطالعه موردی: نیروگاه برق شهید رجایی با تاکید بر آلاینده‌های SO_2 و NO_2)»، *مجله تحقیقات اقتصادی*، دوره ۴۳، شماره ۱.

ب- انگلیسی

AEA Technology, (1999), Cost-benefit Analysis for the Protocol to the abate Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in the Europe, Ministry of Housing. Spatial Planning and the Environment , The Hague, Netherlands, Publication, No. 133.

Andrew L., Goodkind and Stephen Polasky, (2013), Heath & Environmental Costs of Electricity Generation in Minnesota .

D. Streimikiene and I. Alisauskaite-Seskiene, (2014), External Costs of Electricity Generation Options in Lithuania , *Renewable Energy*, 64 215e224.

Epstein P. R., Buonocore J. J., Eckerle K., Hendryx M., Stout B. M., Heinberg R., Clapp R. W., May B., Reinhart N. L., Ahern M. M., Doshi S. K., and L. Glustrom, (2011), Full Cost Accounting for the Life Cycle of Coal , Ecological Economics Reviews, doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x

Fouladi Fard R., Naddafi K., Yunesian M., Nabizadeh Nodehi R., Dehghani M. H. and Hassanvand M. S., (2016), The Assessment of Health Impacts and External Costs of Natural Gas-fired Power Plant of Qom , *Environ Sci Pollut Res*, 23:20922˚20936.

Hainoun A, Almoustafa A. and Seif Aldin M., (2010), Estimating the Health Damage Costs of Syrian Electricity Generation System Using Impact Pathway Approach , *Energy*,35 628˚638.

Holland M. and Krewitt W., (1996), Benefits of and Acidification Strategy for the European Union, European Commission, DGXI, Brussels.

Najjar Y. S. H., (2011), Gaseous Pollutants Formation and Their Harmful Effects on Health and Environment , *Innovative Energy Policies*, Vol. 1, Article ID E101203, doi:10.4303/iep/E101203

Rabl, A. (2001) Reference Database of Concentration-Response Functions for Health Impacts of Air Pollution , Document Prepared for the International Atomic Energy Agency, Dec.

Rentizelas A and, Georgakellos D., (2014), Incorporating Life Cycle External Cost in Optimization of the Electricity Generation Mix , *Energy Policy*, 65, 134˚149.

Sakulniyomporn S., Kubaha K. and Chullabodhi C., (2011), External Costs of Fossil Electricity Generation: Health-based assessment in Thailand , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 3470˚3479

Thopil G. A., (2015), Anastassios Pouris, Aggregation and Internalisation of Electricity Externalities in South Africa , *Energy*, 82, 501e511.

Treyer K., Bauer C. and Simons A., (2014), Human Health Impacts in the Life Cycle of Future European Electricity Generation , *Energy Policy*, Vol. 74, Supplement 1, PPs S31-S44.