

# برآورد انباشت دی‌اکسید کربن در قالب مدل تعادلی رمزی پایدار در اقتصاد ایران

آزاده اختری<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۲۵

علی طیب نیا<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۱۰

## چکیده

در این مطالعه میزان حقیقی دی‌اکسید کربن موجود در جو، انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و انباشت سرانه مؤثر وضعیت پایدار این آلاینده در دوره ۴-۱۳۸۶: ۴-۱۳۷۰ به کمک رهیافت کالمن فیلتر<sup>۳</sup> و در قالب مدل تعادلی رمزی برای ایران برآورد شده است. از این رهگذر برآورد پارامترهایی همچون ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن، سهم منابع فسیلی در تولید، نرخ ترجیح زمانی و کشش تابع انتشار نسبت به فعالیت‌های کاهنده انتشار، امکان پذیر شد.

نتایج برآورد برای دوره مذکور با لحاظ ضرایب پاک‌سازی کمینه، تعادلی و بیشینه

۱. دانشیار دانشکده اقتصاد، دانشگاه تهران، Email: Taiebnia@ut.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تهران، (نویسنده مسئول)، Email: azadeh\_akhtary@yahoo.com

3. Kalman filtering

۴. کشش مصرف سوخت‌های فسیلی در تابع تولید

حاکی از آن است که در ایران سهم منابع فسیلی در تولید، ۰/۴۴۷۵، نرخ ترجیح زمانی، ۰/۰۱۲، کشش تابع انتشار نسبت به فعالیت‌های کاهنده، ۴/۴۵ و ضریب پاک‌سازی فصلی محیط برای آلاینده دی‌اکسید کربن، ۰/۰۲، است. انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و انباشت سرانه مؤثر وضعیت پایدار این آلاینده با ضریب پاک‌سازی فصلی ۰/۰۲، به ترتیب دارای میانگین‌های ۵۰/۴۵ و ۵۲/۹۷ متریک تن و بر حسب برابری قدرت خرید و ثابت سال ۲۰۰۵ است. مصرف سوخت‌های فسیلی و سرمایه سرانه مؤثر وضعیت پایدار نیز به ترتیب دارای میانگین‌های ۴/۴۶۸ کیلوگرم و ۶/۵۶ دلار و بر حسب برابری قدرت خرید و ثابت سال ۲۰۰۵ است. پیشی گرفتن میانگین مقادیر وضعیت پایدار انباشت دی‌اکسید کربن از میانگین انباشت آن، حاکی از روند صعودی مسیر حرکت انباشت این آلاینده در آینده خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** کالمن فیلتر، مدل فضا-حالت<sup>۱</sup>، الگوریتم ژنتیک، مدل رشد رمزی، بی‌نظمی و قانون اسمالدرز.

**JEL:** B13, C68, C88, E13, Q01, Q32

---

1. State space model

## ۱. مقدمه

با آغاز انقلاب صنعتی در اوایل قرن نوزدهم میلادی و رشد روز افزون تحولات بشری، نیاز بشر به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی نظیر ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی بیشتر شده است. افزایش جمعیت کره زمین نیز همراه با رشد میزان تقاضای حامل‌های انرژی، تغییر کاربری زمین و تخریب جنگل‌ها را در پی داشته است. یکی از دستاوردهای این تحولات افزایش روزافزون غلظت گازهای گلخانه‌ای<sup>۱</sup> موجود در جو است که به همراه هواویزه‌ها<sup>۲</sup> و تغییرات ضریب انعکاسی زمین<sup>۳</sup>، بر سرعت پدیده تغییر اقلیم تأثیر می‌گذارند و در این میان تأثیر و اهمیت گازهای گلخانه‌ای بسیار بیشتر و شناخته‌شده‌تر است<sup>۴</sup> (دفتر طرح ملی تغییر آب و هوا، ۱۳۸۱). از میان این گازها، دی‌اکسید کربن که به آلودگی فرامرزی معروف است، عامل اصلی گرمایش جهانی تشخیص داده شده است<sup>۵</sup>. منابع طبیعی تولید آن تنفس موجودات زنده، تجزیه بقایا و آتش‌سوزی‌های طبیعی است و به طور مصنوعی از طریق سوختن سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و تولید سیمان نیز ایجاد می‌شود. انتشار گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در حدود ۶۵ درصد دی‌اکسید کربن اضافی که اکنون در اتمسفر یافت می‌شود را به وجود می‌آورد و باقی‌مانده ۳۵ درصدی آن از نابودی جنگل‌ها و تبدیل آن‌ها به سیستم‌های کشاورزی ناشی می‌شود. این گاز دارای طول عمر اتمسفری ۵ الی ۲۰۰ سال در جو است و با رسیدن نسبت آن در

### 1. Green House Gases (GHG)

۲. هواویزه‌ها یا آترسول‌ها که اثری بر خلاف گازهای گلخانه‌ای دارند، به وسیله انعکاس پرتوهای مرئی، از ورود انرژی خورشیدی به جو زمین جلوگیری می‌کنند.

۳. تغییر در ضریب انعکاس زمین به علت استفاده بی‌رویه از جنگل‌ها، تبدیل چمنزارها به مزارع، اثرات سوء احشام در طبیعت، تبدیل روستاها به شهرها و حتی استفاده گسترده از کلکتورهای خورشیدی به وقوع می‌پیوندد که به تغییراتی در آب، هوا و خاک منطقه منتهی می‌شود.

۴. گازهای گلخانه‌ای با کاهش توانایی زمین برای خروج انعکاس خورشید به فضا و با جذب و بازتابیدن بخشی از تابش‌های فروسرخ به سطح زمین، تعادل انرژی زمین را مختل کرده، موجب باقی ماندن انرژی گرمایی بیشتری در داخل اتمسفر زمین می‌شوند که این امر به گرم شدن زمین و بروز سایر تغییرات در اقلیم منتهی می‌شود.

۵. این گاز علت ۵۵ درصد تغییر در شدت اثر گلخانه‌ای زمین است.

جو به آن چه که حد بحرانی نامیده شده، ممکن است تغییرات اقلیمی شدیدی در جو زمین به وقوع پیوندد.

پدیده تغییر اقلیم آثار سوئی را به دنبال دارد که پدیده‌هایی نظیر افزایش دما، افزایش سطح آب دریاها، خشکسالی، بروز توفان‌های قدرتمند، مهاجرت بافت‌های جمعیتی، کاهش محصولات کشاورزی و آسیب‌های اقتصادی ناشی از این موارد از آثار زیانبار مستقیم تغییرات اقلیمی است؛ به طوری که هزینه‌های اقتصادی سالیانه مرتبط با بلایای طبیعی در جهان در حدود ۵۰-۱۰۰ میلیارد دلار برآورده شده و حتی در بعضی سال‌ها میزان آسیب‌های اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی به بیش از ۴۵۰ میلیارد دلار رسیده است. بر اساس مطالعات هیئت بین دولتی تغییر اقلیم<sup>۱</sup>، آسیب‌های اقتصادی ناشی از افزایش<sup>۰</sup> ۲/۵C ای دمای متوسط کره زمین که در اثر دو برابر شدن غلظت گازهای گلخانه‌ای موجود در جو زمین به وقوع می‌پیوندد، سبب کاهش سالیانه ۱ تا ۱/۵ درصد تولید ناخالص داخلی کشورهای توسعه یافته و ۲ تا ۹ درصد تولید ناخالص داخلی کشورهای در حال توسعه می‌شود. از اثرات غیر مستقیم تغییر اقلیم نیز می‌توان به آسیب‌های اقتصادی ناشی از سیاست‌های کاهش انتشار و نیز اقدامات مقابله‌ای کشورهای عضو پروتکل کیوتو بر اقتصاد کشورهای صادرکننده نفت اشاره کرد (امیرفخری، ۱۳۸۹).

بروز تغییرات اقلیمی همچون بروز سیل، تغییر سطوح آب‌های دریای خزر و خلیج فارس، کاهش قابل توجه میزان تولید محصولات کشاورزی، وابستگی به واردات غلات، بروز بحران‌های اقتصادی-اجتماعی و ناکارآمدی مشهود سیاست‌های اجرایی کشور در مواجهه با این تغییرات، رهاورد وابستگی شدید ساختار اقتصادی کشور به درآمدهای نفتی، روند صعودی مصرف حامل‌های انرژی و روند فزاینده تولید دی‌اکسید کربن<sup>۲</sup> در کشور است که این مهم لزوم بررسی میزان انتشار این آلاینده را در کشور بیش از کشورهای دیگر جهان تقویت می‌کند؛ به طوری که آمارگویای تولید ۱۷۵ میلیون تن

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

۲. مصرف انرژی موجب بیش از ۸۰٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

دی‌اکسید کربن در سال ۱۳۶۹ در ایران است؛ در حالی که در سال ۱۳۸۶ این میزان به ۴۶۶ میلیون تن رسیده و در مجموع شاهد افزایش ۱۶۵/۸ درصدی بوده‌ایم (گزارش سالیانه آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷).

اما آن‌چه توجه بدان حائز اهمیت است آن‌که دی‌اکسید کربن آلاینده‌ای نیمه‌پایا با طول عمر ۵ تا ۲۰۰ سال در جو است؛ این گاز دارای قابلیت انباشت بوده<sup>۲</sup>، ارتباط مستقیم نیروی تابشی گازهای گلخانه‌ای با طول عمرشان موجب می‌شود تأثیر دی‌اکسید کربن بر پدیده تغییر اقلیم تنها محدود به زمان انتشار نباشد.

با توجه به آن‌چه گفته شد، در مطالعه حاضر برای دستیابی به میزان دقیق غلظت دی‌اکسید کربن موجود در جو و درک عمق آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از انباشت این آلاینده، برای اولین بار در قالب مدل تعادلی رمزی و به کمک رهیافت کالمن فیلتر، انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و انباشت سرانه مؤثر وضعیت پایدار این آلاینده در ایران برآورد شده است.

بخش‌های مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در ابتدا پس از تبیین اهمیت برآورد انباشت دی‌اکسید کربن در چارچوب مدل رشد رمزی، مسیرهای بهینه مصرف و فعالیت‌های کاهنده انتشار تعیین شده است. سپس با بهره‌گیری از مسیرهای بهینه و مسیر حرکت انباشت دی‌اکسید کربن و سرمایه، فرم خلاصه‌شده‌ای از سیستم معادلات ساختاری برای طراحی در قالب مدل فضا- حالت معرفی شده است. سپس چگونگی برآورد مدل در چارچوب رهیافت کالمن فیلتر بیان شده و پس از آن نتایج برآورد مدل گزارش و تجزیه و تحلیل شده است. بخش پایانی به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

1. IEA(2011)

۲. زیرا بخشی از دی‌اکسید کربن انتشار یافته در اتمسفر توسط پوشش گیاهی جذب و بخشی دیگر در آب اقیانوس‌ها حل می‌شود و حدود ۵۰٪ آن در اتمسفر باقی می‌ماند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که بازایی مقادیر بیشتر دی‌اکسید کربن ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد طول عمر موثری حدود ده‌ها هزار سال برای آن خواهد شد.

## ۲. مروری بر بخشی از مطالعات پیشین رشد پایدار<sup>۱</sup>

مدل‌های معرفی شده در این بخش با بهره‌گیری از فروض خاص خود به ارائه راهکارهایی می‌پردازند که به کمک آن‌ها بهبود در کیفیت زیست‌محیطی و رشد اقتصادی توانمند می‌شود. ادبیات مربوط به رشد پایدار با تلاش‌های گسترده در دهه ۷۰ به وسیله فورستر<sup>۲</sup> (۱۹۷۳)، سولو (۱۹۷۳) و براک<sup>۳</sup> (۱۹۷۷) آغاز شد. فورستر (۱۹۷۳) برای اولین بار در چارچوب مدلی نئو کلاسیکی، با فرض نرخ رشد جمعیت صفر و با فرض عدم وجود پیشرفت فنی در فعالیت‌های کاهنده انتشار و تولید آلودگی، به بررسی کنترل بهینه انتشار پرداخته است. نتایج مطالعه او نشان داد که هنگامی که جامعه برای کنترل انتشار، قسمتی از منابع خود را سرمایه‌گذاری می‌کند، مصرف و سرمایه‌ی سرانه وضعیت پایدار<sup>۴</sup> به علت کاهش بازگشت خالص سرمایه در نتیجه تخصیص بخشی از منابع به فعالیت‌های کنترل انتشار، کاهش می‌یابند.

استوکی<sup>۵</sup> (۱۹۹۸) با استفاده از مدل A-K به بررسی تقابل انتشار آلودگی و رشد پرداخت. مدل او بر نقش فعالیت‌های کاهنده بر بهبود کیفیت محیط‌زیست در طول مسیر رشد متوازن تمرکز دارد. مهم‌ترین ویژگی مدل استوکی وابستگی آن به فعالیت‌های کاهنده افزایشی و به کارگیری مقررات شدید در کاهش انتشار است. در این مدل افزایش در شدت فعالیت‌های کاهنده انتشار با اختصاص سهم بیشتری از محصول بالقوه به فعالیت‌های کاهنده، محدودیت بیشتری را بر رشد اقتصادی تحمیل خواهد کرد. این درحالی است که سهم محصول بالقوه اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده در نهایت به یک نزدیک شده و در نتیجه تخصیص همه منابع به فعالیت‌های کاهنده، رشد اقتصادی متوقف خواهد شد. از این رو استوکی بر اهمیت پیشرفت‌های فنی در فعالیت‌های کاهنده در دستیابی به توسعه پایدار تاکید دارد.

- 
1. Sustainable Growth
  2. Forster
  3. Brock
  4. Steady State
  5. Stokey

مدل سبزی<sup>۱</sup> سولو که توسط براک و تیلور (۲۰۰۴) طراحی شده است، با بهره‌گیری از مدل سولو بسط یافته<sup>۲</sup> بیان می‌کند که رشد اقتصادی پایدار با فرض پیشرفت فنی برونزا در تولید و فعالیت‌های کاهنده انتشار امکان‌پذیر خواهد بود. در این مدل تک محصولی عامل ایجاد آلودگی میزان تولید است و کسری ثابت از نهاده‌های نیروی کار و سرمایه به فعالیت‌های کاهنده اختصاص می‌یابد. انباشت آلودگی معیاری برای بررسی میزان کیفیت زیست‌محیطی است و انتشار آلودگی برای تولید هر واحد از محصول با نرخ ثابتی کاهش می‌یابد. مدل آن‌ها بیان می‌کند که سرمایه‌گذاری برای بهبود کیفیت محیط‌زیست، تنها سطح مقادیر تعادلی متغیرها را تغییر می‌دهد و تأثیری بر نرخ‌های رشد نخواهد داشت. همچنین اعمال سیاست‌های زیست‌محیطی شدیدتر تنها موجب می‌شود مقادیر تعادلی تولید، سرمایه و مصرف سرانه در سطوح تعادلی پایین‌تری قرار گیرند. هم‌چنین بیان می‌شود حضور پیشرفت فنی در کاهش انتشار، در تضمین رشد مداوم و کنترل میزان هزینه‌های کاهش انتشار مؤثر است.

### ۳. معرفی مدل تعادلی

در این مطالعه تلاش می‌شود تا در قالب مدل تعادلی رشد رمزی، تقابل انباشت دی‌اکسید کربن با تولید و مصرف در مسیر رشد بررسی شود و پس از آن با بهره‌گیری از مسیرهای بهینه رشد مصرف و فعالیت‌های اختصاص یافته به کاهش انتشار و مسیرهای رشد سرمایه و انباشت آلاینده، متغیر غیر قابل مشاهده انباشت دی‌اکسید کربن برآورد شود. با توجه به آن که خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن بر مطلوبیت مصرف‌کننده و هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار بر درآمد قابل تصرف و لذا بر مصرف تأثیرگذار است در این مطالعه به منظور بررسی تقابل انباشت دی‌اکسید کربن<sup>۳</sup> با مصرف از مدل رشد رمزی بهره گرفته شده است و انباشت آلاینده

1. Augmented Solow model

۲. این مدل از انواع مدل‌های با رویکرد مصرف‌کننده است.

۳. لازم به ذکر است که انباشت دی‌اکسید کربن به جای ذخیره منابع فسیلی در تابع تولید لحاظ شده است.

مذکور به طور همزمان تولید و مطلوبیت خانوار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مدل با استفاده از دیدگاه اقتصاددانان بیوفیزیکی<sup>۱</sup> فرض شده است که مصرف سوخت‌های فسیلی به همراه سرمایه و نیروی کار مؤثر در فرایند تولید نقش دارند. تابع تولید کارافزا<sup>۲</sup> و دارای بازدهی ثابت نسبت به مقیاس است و پیشرفت فنی با نرخ رشد  $\pi$  و جمعیت با نرخ رشد  $n$  افزایش می‌یابد. اما بر خلاف مدل‌های پیشین، با استفاده از دیدگاه اسمالدرز<sup>۳</sup> و با تبدیل مولار<sup>۴</sup> انباشت دی‌اکسید کربن به عنوان نمادی از کاهش ذخایر فسیلی در تابع تولید وارد می‌شود. با توجه به آن که نرخ احیای منابع طبیعی تجدیدناپذیر صفر است و با فرض آن که ذخیره انرژی‌های فسیلی در هر کشور  $a$  و میزان استخراج سوخت‌های فسیلی در هر دوره  $en$  باشد، تغییر در ذخیره این منابع برابر با منفی میزان استخراج این منابع است.<sup>۵</sup>

بنابراین مجموع کاهش در منابع تجدیدناپذیر برابر با مجموع استخراج منابع در طول زمان خواهد بود:

$$\int_0^t \dot{a} = - \int_0^t en \Rightarrow s = \bar{a} - \sum_{i=1}^t en \quad (1)$$

در این مدل جای‌گزینی انباشت دی‌اکسید کربن با ذخایر فسیلی سوخت‌شده با استفاده از قانون بی‌نظمی<sup>۶</sup> اسمالدرز انجام یافته است که در آن ذخیره منابع تجدیدناپذیر با بی‌نظمی پایین  $t$ ،  $E_t$ ، از تفاضل ذخیره کل منابع تجدیدناپذیر سیستم  $\bar{E}$  و ذخیره پسماندها با بی‌نظمی بالا  $P_{pt}$ ، حاصل می‌شود<sup>۷</sup> (پیتل<sup>۸</sup>، ۲۰۰۴).

۱. لازم به ذکر است که در مدل منبع و پاک‌سازی براک و تیلور، انرژی به عنوان نهاده واسطه تعریف شده و تابع تولید دارای سه نهاده سرمایه، نیروی کار و انرژی است.

2. laborAugmenting

3. Smulders

۴. با استفاده از تبدیل مولار<sup>۴</sup> واحدهای حجمی نفت و مشتقات آپس از سوختن، به واحدهای حجمی آلاینده‌های حاصل از احتراق مانند دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند و تبدیل مولار<sup>۴</sup> به کمک تناسب بین اجرام مولکولی انجام می‌شود.

5.  $\dot{a} = -en$

۶. آنتروپی

۷. مجموع مقادیر منابع با آنتروپی پایین و بالا ثابت خواهند ماند. زیرا در فرآیند تبدیل، انرژی به هدر نخواهد رفت و فقط از آنتروپی پایین به آنتروپی بالا تبدیل خواهد شد.

8. Pittel, 2004

$$E_t = \bar{E} - P_{pt} \quad (۲)$$

که در آن ذخیره پسماندها با بی‌نظمی بالا  $P_{pt}^1$ ، با ضریب تعدیل  $K$ ، برابر با مجموع ذخایر فسیلی انتشار یافته است<sup>۲</sup>. اما وجود نقش پاک‌سازی طبیعت موجب می‌شود انباشت آلاینده‌های نیمه‌پایا با توجه به ضریب پاک‌سازی آلاینده و مجموع انتشار خالص در دوره مورد بررسی تعیین شود. بنابراین اگر  $P$  بیانگر انباشت دی‌اکسید کربن با سطح اولیه  $p_0 = 0$  و انتشار این آلاینده و  $s$  بیانگر ضریب پاک‌سازی محیط‌زیست برای این آلاینده<sup>۳</sup> باشد، آن‌گاه انباشت دی‌اکسید کربن توسط معادله تفاضلی روبه‌رو مشخص می‌شود:

$$p^0 = e - SP \quad P_0 = 0 \quad (۳)$$

بنابراین با توجه به روابط فوق‌الذکر،  $P_t$  ضریبی از  $P_{pt}$  و ضریب تعدیل بزرگتر از یک است<sup>۴</sup>. بدین‌سان ذخیره منابع فسیلی در هر دوره، تابعی از انباشت دی‌اکسید کربن خواهد بود:

$$S_t = \bar{a} - P_{pt} = \bar{a} - \kappa\varphi P_t \quad (۴)$$

و با فرض آن که مصرف منابع فسیلی در هر دوره ضریبی ثابت از ذخیره منابع فسیلی باشد، مصرف این منابع در هر دوره توسط رابطه روبه‌رو تصریح خواهد شد:

۱. مجموع انتشار آلاینده تا زمان  $t$

۲. با توجه به دیدگاه اسمالدرز انرژی‌های فسیلی در هنگام سوختن به طور کامل به مشتقات آن (دی‌اکسید کربن، متان، گاز طبیعی و...) تبدیل می‌شوند. می‌دانیم که دی‌اکسید کربن از اشتعال سوخت‌های فسیلی که یکی از نهاده‌های تولید است به وجود می‌آید. با توجه به آن که هدف مطالعه حاضر بررسی مسیر حرکت انباشت دی‌اکسید کربن است لذا به کمک ضریب تعدیل فرض شده است

که انتشار دی‌اکسید کربن در هر دوره ضریبی از مصرف انرژی‌های فسیلی همان دوره است.  $\sum_{t=1}^t en_t = \kappa P_{pt}$

۳.  $S$  معکوس طول عمر دی‌اکسید کربن در اتمسفر است. علت این رابطه آن است که اگر طول عمر دی‌اکسید کربن ۵۰ سال باشد، به طور متوسط سالانه  $\frac{1}{50}$  واحد از ۱ واحد دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود تا در پنجاهمین سال، یک واحد دی‌اکسید کربن به طور کامل توسط اتمسفر تجزیه شود.

$\varphi \cdot P_{pt} = \varphi P_t \quad \varphi > 1$

$$en_t = \frac{1}{k'} S_t = \frac{1}{k'} \varphi \kappa \left( \frac{\bar{a}}{\varphi \kappa} - p_t \right) \quad (5)$$

اکنون با استفاده از فروض فوق‌الذکر تولید تابعی از سرمایه، نیروی کار و انباشت دی‌اکسید کربن است که در آن  $A = \frac{\kappa \varphi}{k'}$  است:

$$F = A^h K^\alpha \left( \frac{\bar{a}}{\kappa \varphi} - P \right)^h (BL)^{1-\alpha-h} \quad (6)$$

مسیر بهینه متغیرهای سیستم نیز با حداکثرسازی ارزش حال مطلوبیت تنزیل یافته خانوار نماینده نسبت به سطح مصرف و انباشت دی‌اکسید کربن سرانه

$$\int_0^\infty U(C(t), P(t)) e^{-\rho t} dt \quad (7)$$

با توجه به قیود انباشت سرمایه و انباشت آلاینده برای افق نامحدود و سطوح اولیه  $P(0) = P_0, k(0) = k_0$  و با لحاظ شرایط تراگردی  $p(t)e^{-\rho t} \geq 0$  و  $k(t)e^{-\rho t} \geq 0$  تحقق می‌یابد و تابع مطلوبیت نسبت به مصرف مقعر ( $U_C > 0, U_{CC} < 0$ ) و نسبت به انباشت آلاینده محدب ( $U_P < 0, U_{PP} < 0$ ) است. تحدب تابع مطلوبیت نسبت به انباشت آلاینده بیانگر آن است که خسارت نهایی آلاینده بر محیط‌زیست با افزایش انباشت آلاینده به صورت فزاینده افزایش خواهد یافت. فرم تبعی تابع مطلوبیت این مدل همان تابع مدل وندر پلاک-ویتاگن است که در آن شرایط رفتار مطلوب توابع نئوکلاسیکی برآورده شده است.

$$U_t = \sigma \ln \bar{C}(t) - \zeta \bar{P}(t)^\theta \Rightarrow U_t = \sigma \ln CB - \zeta B^\theta P(t)^\theta \quad (8)$$

در این معادله  $\sigma$  و  $\zeta$  و وزن‌های مصرف و انباشت آلودگی در تابع مطلوبیت هستند

و  $\theta > 1$  نشان‌دهنده خسارت نهایی افزایشی است. سرمایه توسط معادله تفاضلی روبه‌رو انباشت می‌شود:

$$K_t^{\circ} = Y_t - C_t - X_t - \delta K_t \quad (9)$$

که در آن  $\delta > 0$  نرخ استهلاک سرمایه فیزیکی است و سرمایه‌گذاری خالص برابر است با تولید کل که از آن مخارج مصرفی،  $C_t$  و هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار  $X_t^1$  کسر شده است. تابع انتشار ضریبی از تولید کل بوده، شدت انتشار واحد محصول  $m_t$  به شدت انتشار پایه<sup>۲</sup> و به هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار وابسته است<sup>۳</sup> (اورداس، والنته و استنگاس، ۲۰۱۱).

$$E_t = m_t Y_t \quad (10)$$

$$m_t = \Omega(t) (1 - x(t))^{\varepsilon} \quad \text{و} \quad \varepsilon > 1 \quad (11)$$

$x = \frac{X}{Y}$  سهم اختصاص یافته از تولید به فعالیت‌های کاهنده انتشار است و تمایل به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های پاک را نشان می‌دهد (اورداس، والنته و استنگاس، ۲۰۱۱).  
با توجه به روابط فوق قید انباشت آلاینده به صورت روبه‌رو تعریف می‌شود:

$$\dot{P}_t = \Omega(t) (1 - x(t))^{\varepsilon} Y(t) - sp_t \quad (12)$$

با نرمال‌سازی همه متغیرها نسبت به نیروی کار مؤثر و با جایگذاری  $X(t) = x(t) Y(t)$  معادلات انباشت سرمایه و دی‌اکسید کربن به شکل روبه‌رو تصریح خواهند شد:

$$\begin{aligned} \dot{k}_t^{\circ} &= f(k(t), p(t))(1 - \chi(t)) - c(t) - (n + \pi + \delta)k(t) \\ P^{\circ}(t) &= \Omega(t)[1 - \chi(t)]^{\varepsilon} f(k(t), p(t)) - (n + \pi + s)p(t) \end{aligned} \quad (13)$$

۱. سرمایه‌گذاری در تکنولوژی پاک (ICT)

۲. در مدل براک و تیلور وجود رشد پایدار مستلزم آن است که شدت انتشار پایه با نرخ پیشرفت فنی در طول زمان کاهش یابد.

۳. فرم خاص تابع شدت انتشار واحد محصول، تابع مورد استفاده براک و تیلور است.

اکنون با حداکثرسازی ارزش حال مطلوبیت تنزیل یافته خانوار نسبت به قیود سرمایه و انباشت سرانه مؤثر<sup>۱</sup> و با توجه به شرایط انتقال متغیرهای وضعیت انباشت دی‌اکسید کربن و سرمایه:

$$H(p_t, k_t, c_t, x_t) = \sigma \ln c - sp^\theta + \lambda^k [f(k_t, p_t)(1 - x_t) - c_t - (n + \pi + \delta)k_t] + \lambda^p [\Omega_t(1 - x_t)^\varepsilon f(k_t, p_t) - (n + \pi + s)p_t]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda^k(t)k(t)e^{-\rho t} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda^p(t)p(t)e^{-\rho t} = 0$$

و با فرض وجود راه حل داخلی و با برقراری شرایط لازم بهینه‌گی متغیرهای کنترل و وضعیت سیستم:

$$\frac{\delta H}{\delta c} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\delta H}{\delta p} = \rho \lambda^p - \lambda^\theta p \quad \text{و} \quad \frac{\delta H}{\delta k} = \quad (۱۴)$$

$$\frac{\delta H}{\delta x} = 0 \quad \text{و} \quad \rho \lambda^k - \lambda^\theta k$$

مسیرهای رشد بهینه مصرف و فعالیت‌های ICT سرانه مؤثر به شکل روبه‌رو تصریح خواهند شد:

$$\frac{c^0}{c} = Aak^{\alpha-1} \left( \frac{a}{\kappa\varphi} - p \right)^h (1-x)(1-\varepsilon^{-1}) - (n + \pi + \delta + p)$$

$$\frac{x^0}{x} = \frac{-\Omega\sigma^{-1}\varepsilon c(1-x)^\varepsilon s\theta p^{\theta-1}}{(\varepsilon-1)x} + \frac{\Omega h A^h k^\alpha \left( \frac{a}{\kappa\varphi} - p \right)^{h-1} (1-x)^{\varepsilon+1}}{x} +$$

$$\frac{a A^h K^{\alpha-1} \left( \frac{a}{\kappa\varphi} - p \right)^h (1-x)^2 (1-\varepsilon^{-1})}{(\varepsilon-1)x} + \frac{(s-\pi-\delta)(1-x)}{(\varepsilon-1)x} \quad (۱۵)$$

۱. لازم به ذکر است که حل سیستم به برای دستیابی به مسیرهای بهینه رشد با جاگذاری رابطه ۶ با میزان تولید در روابط ۱۳ امکان‌پذیر می‌شود.

#### ۴. تصریح مدل تعادلی در قالب مدل فضا - حالت

برآورد متغیر غیرقابل مشاهده انباشت دی‌اکسید کربن با رهیافت کالمن فیلتر، تنها با طراحی سیستم در قالب مدل‌های فضا - حالت امکان‌پذیر است. انباشت دی‌اکسید کربن که متغیری غیرقابل مشاهده است متغیر حالت<sup>۱</sup> مدل می‌باشد و مسیر حرکت آن با جای‌گذاری رابطه (۱۱) در تابع انتشار، حاصل می‌شود. نرخ‌های رشد سرمایه، مصرف و هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار، معادلات انتقال سیستم را تشکیل می‌دهند:

$$p_{t+1} = \Omega(1-x)^{\varepsilon} A^h k^{\alpha} \left(\frac{a}{\kappa\varphi} - p_t\right)^h + (1 - (n + \pi + s))p_t \quad (16a)$$

$$\frac{\dot{k}}{k} = \frac{\alpha k^{\alpha} \left(\frac{a}{\kappa\varphi} - p\right)^h (1-x)}{k} - \frac{c}{k} - (n + \pi + \delta)s$$

$$\frac{c^0}{c} = Aak^{\alpha-1} \left(\frac{a}{\kappa\varphi} - p\right)^h (1-x)(1 - \varepsilon^{-1}) - (n + \pi + \delta + p) \quad (16b)$$

$$\begin{aligned} \frac{x^0}{x} &= \frac{-\Omega\sigma^{-1}\varepsilon c(1-x)^{\varepsilon}s\theta p^{\theta-1}}{(\varepsilon-1)_x} + \frac{\Omega h A^h k^{\alpha} \left(\frac{a}{\kappa\varphi} - p\right)^{h-1} (1-x)^{\varepsilon+1}}{x} \\ &+ \frac{a A^h K^{\alpha-1} \left(\frac{a}{\kappa\varphi} - p\right)^h (1-x)^2 (1 - \varepsilon^{-1})}{(\varepsilon-1)_x} + \frac{(s - \pi - \delta)(1-x)}{(\varepsilon-1)_x} \end{aligned}$$

با توجه به آن که استفاده از تکنیک کالمن فیلتر تنها در سیستم خطی امکان‌پذیر است، در ابتدا معادلات فضا-حالت غیر خطی سیستم فوق می‌بایست خطی شوند. این مهم با بهره‌گیری از بسط تیلور و حول نقطه تعادلی وضعیت پایدار انجام یافته است. نکته دیگری که توجه بدان حائز اهمیت است، ثبات یا تغییر نقاط تعادلی وضعیت پایدار است که برای

۱. متغیر وضعیت

سازگاری مدل مذکور با دنیای واقع<sup>۱</sup>، فرض شده است نقاط تعادلی وضعیت پایدار در طول زمان متغیر و دارای روندی مانا و از نوع  $AR(1)$  هستند که به سمت میانگین متغیر در دوره مورد بررسی همگرا هستند.

بدین ترتیب سیستم فضا- حالت خطی متناظر با معادلات فوق به شکل ذیل طراحی می‌شود:

معادلات انتقال:

$$\begin{aligned} dlk_{t+1} &\approx \int_{dk,a}(a_t - a_{sst}) + \int_{dk,k}(k_t - k_{sst}) + \int_{dk,x}(x_t - x_{sst}) \\ &\quad + \int_{dk,c}(c_t - c_{sst}) + \int_{dk,p}(p_t - p_{sst}) \\ dlc_{t+1} &\approx \int_{dc,a}(a_t - a_{sst}) + \int_{dc,k}(k_t - k_{sst}) + \int_{dc,x}(x_t - x_{sst}) + \\ &\quad \int_{dc,p}(p_t - p_{sst}) \\ dlx_{t+1} &\approx \int_{dx,a}(a_t - a_{sst}) + \int_{dx,k}(k_t - k_{sst}) + \int_{dx,x}(x_t - x_{sst}) \\ &\quad + \int_{dx,c}(c_t - c_{sst}) + \int_{dx,p}(p_t - p_{sst}) \quad (17a) \end{aligned}$$

معادلات حالت:

$$\begin{aligned} p_{t+1} &\approx \int_{p,a}(a_t - a_{sst}) + \int_{p,k}(k_t - k_{sst}) + \int_{p,x}(x_t - x_{sst}) + \int_{p,p}(p_t - p_{sst}) \\ &\quad + (1 - (n + \pi + s))p_t \end{aligned} \quad (b17)$$

که در این معادلات (a) ذخیره منابع فسیلی، (k) سرمایه، (x) هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار، (c) مصرف و (p) انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر است. اندیس ss نشان‌دهنده سطح وضعیت پایدار متغیرهای نام‌برده است. شایان ذکر است که داده‌ای برای ذخیره منابع فسیلی موجود نیست. بدین منظور از یکی از فروض مدل که در آن مصرف انرژی هر دوره برابر با درصدی از ذخیره منابع طبیعی موجود در همان دوره است، استفاده شده و این متغیر با عناصر تشکیل یافته خود جای‌گزین شده است.

۱. زیرا عوامل بنیادی ویژه اقتصاد همچون کنش سرمایه‌ای تابع تولید، تمایل به پس‌انداز، نرخ پیشرفت فنی و نرخ رشد جمعیت در طول زمان تغییر خواهند کرد و وابستگی سطح وضعیت پایدار متغیرهای مدل به این عوامل موجب می‌شود سطوح وضعیت پایدار متغیرهای مدل در طول زمان متفاوت باشد.

$$en_t = k'S \rightarrow en_t = k'(\bar{a} - ens_t)$$

با این فرض میزان ذخیره منابع فسیلی موجود در هر سال برابر با مجموع مصرف انرژی دوره‌های گذشته<sup>۱</sup>  $ens_t$  و  $\frac{1}{k'}$  مصرف انرژی هر دوره و  $k'$  ضریبی از ذخایر منابع فسیلی است که در هر دوره مصرف می‌شود.

$$\bar{a} = \frac{1}{k'}en_t + ens_t$$

نکته دیگر محدودیت زمانی متغیر هزینه اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده به ۱۷ دوره و تعداد پارامترهای بالای مدل نسبت به این دوره زمانی است که برای حل این مشکل و تصریح بهتر پارامترهای مدل از داده‌های فصلی استفاده شده است؛ این مهم با استفاده از روش کیوبیک<sup>۲</sup> که در آن از حل یک چندجمله‌ای، بهترین مقادیر هر فصل با توجه به داده‌های سالانه محاسبه می‌شود، محقق شده است. هم‌چنین برای برآورد دقیق‌تر مدل با استفاده از معادله (۱۱) در بخش متغیرهای توضیحی به جای هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده از ضریب انتشار استفاده شده است.<sup>۳</sup>

پس از اعمال این تغییرات، معادلات انتقال و وضعیت نهایی مدل به شکل ذیل تصریح خواهد شد:

معادلات انتقال:

$$\begin{aligned} dly_{t-4} = & \int_{dly,ens} (ens_{t-4} - ens_{sst-4}) + \int_{dly,k} (k_{t-4} - k_{sst-4}) \\ & + \int_{dly,m} (m_{t-4} - m_{sst-4}) + \int_{dly,c} (c_{t-4} - c_{sst-4}) \\ & + \int_{dly,en} (en_{t-4} - e_{sst-4}) + \int_{dly,p} (p_{t-4} - p_{sst-4}) \end{aligned} \quad (18a)$$

سیستم فوق بیانگر مسیر رشد سرمایه، مصرف و فعالیت‌های کاهنده انتشار است که در آن  $Y = [k_t, c_t, x_t]$  و نقطه تعادلی وضعیت پایدار متغیرهای سیستم با پیروی از مطالعات پیشین برابر با میانگین متغیر مذکور در طول دوره ۴-۱۳۸۶:۴-۱۳۷۰ است. شایان ذکر

1.  $ens_t = \sum_{i=1}^{t-1} en_i$

2. cubic

3.  $X_t = 1 - \left(\frac{m_t}{\Omega_t}\right)^{\frac{1}{\epsilon}}$

است که علت تصریح روابط رشد با ۴ دوره وقفه، حذف نوسانات فصلی از داده‌های مورد استفاده است.

$$X_t - X_t^{SS} = \hat{X}_t = B(L)\hat{X}_{t-1} + \varepsilon_{\hat{X},t} \quad (18) \text{ b}$$

معادلات انتقال دیگر مدل (۱۸b)، ارتباط بین شکاف متغیر ( $\hat{X}_t$ ) با وقفه‌های آن است که به صورت یک مدل خود رگرسیونی ارائه می‌شود که در آن  $X'_t = [k_t, c_t, en_t, ens_t, m_t]$  است. B(L) بیانگر اپراتورهای وقفه معادلات شکاف متغیرهای مرتبط است و تعداد وقفه‌های مناسب به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پسماندهای سیستم همگی نوفه سفید باشند. تعداد وقفه‌های مناسب شکاف متغیرها، برای متغیرهای سرمایه، ضریب انتشار، مصرف، مجموع انرژی هدررفته و مصرف انرژی پس از حصول پسماندهای نوفه سفید در معادلات انتقال (۱۸b)، سه وقفه تعیین شد. یکی دیگر از نکاتی که در برآورد روابط (۱۸b) بایستی در نظر گرفته شود لزوم مانایی روابط (۱۸b) است؛ به همین سبب پس از تعیین وقفه بهینه باید ضرایب فرایندهای اتورگرسیو مرتبه سوم در معادلات (۱۸b) به گونه‌ای مقید شوند که همه ریشه‌های معادله

$$1 - \varphi_1 L - \varphi_2 L^2 - \varphi_3 L^3 = 0$$

خارج دایره واحد قرار گیرند. برای تامین این شرط همانند کیم و نلسون<sup>۱</sup> (۱۹۹۹) قیودی برضرایب روابط (۱۸b) اعمال شده است.

معادلات حالت:

$$\begin{aligned} p_{t+1} = & \int_{p,ens} (ens_{t-3} - ens_{sst-3}) + \int_{p,k} (k_{t-3} - k_{sst-3}) \\ & + \int_{p,m} (m_{t-3} - m_{sst-3}) \\ & + \int_{p,en} (en_{t-3} - e_{sst-3}) + \int_{p,p} p_{t-3} + \int_{p,ps} p_{sst-3} \end{aligned} \quad (18c)$$

$$Z_{t+1}^{SS} = \mu_z^0 + \mu_z Z_t^{SS} + \varepsilon_{t+1,zss} \quad |\mu_z| < 1$$

$$Z' = [ens, k, m, p, c, en]$$

1. Kim&Nelson

(۱۸ d)

(۱۸c) بیانگر مسیر حرکت متغیر انباشت دی‌اکسید کربن و (۱۸d) بیانگر مسیر وضعیت پایدار متغیرهای سرمایه، ضریب انتشار، مصرف، مجموع انرژی هدررفته و مصرف انرژی است که همگی از فرایند مرتبه اول مارکوف (AR(1)) تبعیت می‌کنند و  $|\mu_z| < 1$  نشان‌دهنده مانایی مسیرهای وضعیت پایدار عناصر ماتریس Z است. نکته دیگر همگرایی<sup>۱</sup> انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر به سمت وضعیت پایدار خود است.

$$\begin{aligned} \Delta p_{t+1} &= \mu_p \Delta p_t + \mu_p^0 \Rightarrow p_{t+2} - p_{t+1} = \mu_p (p_{t+1} - p_t) + \mu_p^0 \\ &\Rightarrow p_{t+2}(1 + \mu_p)p_{t+1} - \mu_p p_t + \mu_p^0 \end{aligned} \quad (18 e)$$

برای برآورد این شرط معادله تفاضلی فوق می‌بایست مانا باشد که لازمه آن محدودیت  $\mu_p$  به بازه (۰ و -۱) است و علامت  $\mu_p^0$  با توجه به روند انتشار تعیین می‌شود. با توجه به روند انتشار دی‌اکسید کربن در ایران مشاهده شد که امکان کاهش در انباشت این آلاینده برخلاف کاهش در ضریب انتشار، غیرممکن است؛ از همین رو برای به منظور تصریح بهتر مدل، محدوده ضریب ثابت معادله تفاضلی برای ایران،  $\mu_p^0$ ، به بازه (۰ و ۱) محدود شد.

پس از رعایت نکات فوق‌الذکر می‌توان با ساده‌سازی ضرایب معادلات اندازه و وضعیت با استفاده از روابط تعادلی موجود در مسیر رشد متوازن سیستم<sup>۲</sup>، پارامترهای مهم اقتصادی-زیست‌محیطی<sup>۳</sup> همچون کشش مصرف سوخت‌های فسیلی تابع تولید، کشش هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده انتشار، ضریب پاک‌سازی محیط برای آلاینده دی‌اکسید کربن<sup>۴</sup> و نرخ ترجیح زمانی و مقادیر غیر قابل مشاهده انباشت

۱. با توجه به این که وجود مسیر رشد متوازن در نتیجه پایداری و یکنابایی مدل نظری، به اثبات رسیده است، همگرایی انباشت آلاینده تضمین می‌شود.

$$2. \frac{\dot{K}}{K} = \frac{\dot{C}}{C} = \frac{\dot{P}}{P} = \frac{\dot{X}}{X} = 0$$

۳. لازم به ذکر است که محدوده پارامترهای مذکور در پیوست ۲ بیان شده است.

۴. بر طبق گزارش سایت هیئت بین دولتی تغییر اقلیم، نرخ پاک‌سازی اتمسفر برای دی‌اکسید کربن (S)، دارای محدوده سالانه (0/005,0/2) است. از آنجا که نرخ پاک‌سازی محیط زیست ضریبی است که برای برآورد متغیر ذخیره به کار می‌رود، مقدار

دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و مقادیر تعادلی وضعیت پایدار سرانه مؤثر انباشت آلاینده مذکور، سرمایه و مصرف انرژی را بر اساس رهیافت کالمن فیلتر برآورد کرد.

## ۵. برآورد انباشت دی‌اکسید کربن در قالب مدل تعادلی رمزی

### ۵-۱. تبیین داده‌ها و روش‌های آماری

با توجه به آن که برای دستیابی به نقطه تعادلی و مسیر رشد متوازن باید فرم سرانه مؤثر متغیرها را محاسبه کرد، در این مطالعه در ابتدا سطح بهره‌وری محاسبه شده است. بدین منظور از تابع تولید کاب-داگلاس که دارای دو نهاد سرمایه و نیروی کار و از بازدهی ثابت نسبت به مقیاس برخوردار است، استفاده شده که در آن کشش سرمایه‌ای تابع تولید است.

$$Y = AK^\alpha L^\gamma \quad \alpha + \gamma = 1 \quad \Rightarrow \quad Y = AK^\alpha L^{1-\alpha} \quad (19)$$

داده‌های تولید و سرمایه سرانه که بر حسب برابری قدرت خرید و به قیمت‌های ثابت سال ۲۰۰۵ است<sup>۱</sup>، از سایت بانک جهانی<sup>۲</sup> و کشش سرمایه‌ای تابع تولید و سرانه نهاد نیروی کار که برابر با حاصل ضرب ساعت‌های کاری نیروی کار و شاخص کیفیت نیروی کار<sup>۳</sup> محاسبه شده است<sup>۴</sup>، از مقاله‌ای با عنوان «رشد بالقوه در دنیای اقتصاد»<sup>۵</sup> (نوشته یورگنسن و هوانگ در سال ۲۰۱۰)، استخراج شده‌اند.

داده‌های مصرف خانوار، مصرف انرژی‌های فسیلی، ضریب انتشار دی‌اکسید کربن،

فصلی آن از تقسیم نرخ سالانه بر ۴ به دست می‌آید. بنابراین نرخ پاک‌سازی فصلی دی‌اکسید کربن محدود به (۰/۰۵، ۰/۰۰۱۲۵) است.

1. Per capita output PPPS(2005)

2. work bank

۳. داده‌های این مطالعه بر حسب سال پایه ۲۰۰۵ است. با توجه به آن که کیفیت نیروی کار در مقاله یورگنسن بر حسب سال پایه ۲۰۰۰ بوده، در این مطالعه با تغییر سال پایه کیفیت نیروی کار بر حسب سال ۲۰۰۵ محاسبه شده است.

۴. یورگنسن، مقاله «رشد بالقوه در دنیای اقتصاد»، ۲۰۱۰.

5. Dale W. Jorgenson, and Vu M. Khuong, 2.10, Journal of Policy Modeling 32, 615-631

جمعیت و تمایل به پرداخت برای کاهش خسارت آلاینده<sup>۱</sup> از سایت شاخص‌های توسعه جهانی ۲۰۱۱<sup>۲</sup> جمع‌آوری شده‌اند. مصرف انرژی‌های فسیلی بر حسب کیلوگرم معادل نفت برای هر ۱۰۰۰ دلار GDP و داده‌های ضریب انتشار دی‌اکسید کربن بر حسب کیلوگرم برای یک دلار GDP است؛ هم چنین میزان مصرف برابر با مخارج نهایی مصرفی خانوار است که بر حسب برابری قدرت خرید<sup>۳</sup> و به قیمت ثابت سال ۲۰۰۵ است. میزان انرژی هدررفته نیز برابر با مجموع مصرف انرژی از سال ۱۹۸۰ تا دوره ماقبل هر دوره است.<sup>۴</sup> نرخ استهلاک سرمایه نیز در کشورمان ۱۰٪ فرض شده که مقدار فصلی آن برابر با ۲/۵٪ است (شاهمرادی، کاوند، ۱۳۸۸). نرخ رشد بهره‌وری و نرخ رشد جمعیت فصلی نیز توسط رابطه زیر محاسبه شده که در آن B سطح بهره‌وری، n جمعیت و  $g_{n,B}$  نمایان‌گر نرخ رشد جمعیت یا بهره‌وری است.

$$\frac{(1 + g_{n,B}^{seasonal})^4 X - X}{X} = g_{n,B}^{yearly} \Rightarrow (1 + g_{n,B}^{seasonal})^4 - 1 = g_{n,B}^{yearly} \Rightarrow$$

$$g_{n,B}^{seasonal} = \frac{1}{4} (1 + g_{n,B}^{yearly}) - 1 \quad (20)$$

نکته دیگر آن که بر اساس آمار منتشر شده در نوامبر ۲۰۱۰ در سایت‌های طرح کربن جهانی و علوم جغرافیای طبیعی و ترسیم تولید دی‌اکسید کربن<sup>۵</sup> در سال‌های (۲۰۰۰-۲۰۰۹)، ۲۶ درصد انتشار دی‌اکسید کربن به هنگام انتشار توسط دریا و اقیانوس و ۲۷ درصد انتشار کل نیز توسط زمین و پوشش گیاهی از جمله جنگل‌ها جذب شده است و تنها ۴۷٪ انتشار کل در هر دوره تجزیه نشده و به دوره بعد انتقال یافته است؛ از همین رو با توجه به هم‌خوانی محدوده تحقیق این مطالعه با آمار ارائه شده در این مطالعه میزان دی‌اکسید کربن

۱. به علت عدم دسترسی به داده‌های فعالیت‌های کاهنده انتشار، از تمایل به پرداخت برای کاهش خسارت آلودگی که به صورت درصدی از GDP تعریف می‌شود، استفاده شده است.

2. Word development indicators(2011)

3. PPP

4.  $ens = e_{i=1}^{t-1} en_t$

5. Graphic production: co2mow.org & Nature Geoscience Global Carbon project.org

تجزیه نشده در اتمسفر در انتهای هر دوره ۴۷ درصد انتشار کل دوره، در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که بازه زمانی مورد استفاده در این مقاله محدود به سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۰<sup>۱</sup> (دوره ۱۷) است که پس از فصلی‌سازی داده‌ها با نرم‌افزار ایویوز<sup>۲</sup> این بازه به ۶۵ دوره افزایش می‌یابد.

### ۵-۲. برآورد مدل

پس از تصریح کامل سیستم فوق به صورت مدل فضا-حالت فرم ماتریسی معادلات به صورت ذیل نمایش داده می‌شود:

$$y_t = z_t \alpha_t + d_t + \varepsilon_t \quad t = 1, \dots, T \quad \text{معادله انتقال}$$

$$d_t = A_t X_t \quad (21) \quad \text{و}$$

$$\alpha_t = T_t \alpha_{t-1} + C_t + R_t \eta_t \quad t =$$

$$t, \dots, T \quad \text{معادله حالت}$$

در معادله انتقال  $y_t$  برداری  $n \times 1$  از متغیرهای مشاهده شده،  $Z_t$  ماتریسی با ابعاد  $n \times m$  و  $d_t$  دارای ابعاد  $n \times 1$  است. جملات خطای معادلات انتقال  $\varepsilon_t$ ، نیز برداری  $n \times 1$  از اجزای اخلال با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس  $H_t$  است که به صورت سریالی ناهمبسته هستند.  $\alpha_t$  نماینده متغیر حالت است که توسط فرایند مرتبه اول مارکوف<sup>۳</sup> تولید می‌شود که هر دو بصورت نرمال توزیع شده‌اند.<sup>۴</sup>

$T_t$  ماتریسی  $m \times m$ ،  $C_t$  برداری  $m \times 1$  و  $R_t$  ماتریسی به ابعاد  $m \times g$  است و  $\eta_t$  برداری  $g \times 1$  از اجزای اخلال با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس  $Q_t$  است که به صورت سریالی

۱. زیرا داده‌های کشش سرمایه‌ای تابع تولید به سال‌های ۱۸۷-۱۳۶۹، تمایل به پرداخت برای کاهش خسارات انتشار به سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۶۹ و ضریب انتشار دی‌اکسید کربن برای هر واحد GDP به سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۶۹ محدود می‌شوند.

2. Eviews

3. Markov

۴. با این فرض امکان محاسبه توزیع بردار متغیر حالت  $\alpha_t$  در زمان حال با تکنیک کالمن فیلتر به صورت بازگشتی و بر پایه مجموعه اطلاعات زمان  $t$  فراهم می‌شود.

ناهمبسته هستند. با فرض آن که در سیستم فضا-حالت فوق،  $\alpha_{t|t-1}$  بیانگر پیش‌بینی بردار حالت  $\alpha_t$  بر اساس اطلاعات موجود تا زمان  $t-1$  باشد و  $a_{t-1}$  بهترین تخمین زن  $\alpha_{t-1}$  بر پایه مشاهدات از زمان 1 تا  $y_{t-1}$  و  $P_{t-1}$  ماتریس کوواریانس خطای تخمین با ابعاد  $m \times m$  و  $P_{t|t-1}$  پیش‌بینی ماتریس کوواریانس خطای تخمین در زمان  $t-1$  باشد.

$$P_{t-1} = E[(\alpha_{t-1} - a_{t-1})(\alpha_{t-1} - a_{t-1})'] \quad \text{الف (۲۲)}$$

$$P_{t|t-1} = T_t P_{t-1} T_t' + R_t a_t R_t' \quad \text{و } t = 1, \dots, T \quad \text{ب (۲۲)}$$

آن‌گاه پیش‌بینی بردار حالت  $\alpha_{t|t-1}$ :

$$\alpha_{t|t-1} = T_t a_{t-1} + C_t \quad \text{الف (۲۳)}$$

در زمان  $t$

$$\alpha_{t+1|t} = (T_{t+1} - k_t z_t) \alpha_t + k_t y_t + (C_{t+1} - k_t d_t) \quad \text{ب (۲۳)}$$

معادله فوق‌الذکر خواهد بود که با دسترسی به مشاهدات جدید  $y_t$  و به هنگام شدن تخمین  $\alpha_{t|t-1}$  و  $\alpha_t$  و با تفسیر این معادلات بر اساس معادلات ریکاتی به‌عنوان مجموعه‌ای بازگشتی از  $\alpha_{t-1}$  به  $\alpha_{t|t-1}$  که در آن ماتریس  $k_t$  برابر با:

$$k_t = T_t P_{t|t-1} z_t' F_t^{-1} \quad \text{و } t = 1, \dots, T$$

و ماتریس واریانس-کوواریانس خطای تخمین

$$P_{t+1|t} = T_{t+1} (P_{t|t-1} - P_{t|t-1} z_t' F_t^{-1} z_t P_{t|t-1}) T_{t+1}' + R_{t+1} Q_{t+1} R_{t+1}', \quad t = 1, \dots, T \quad \text{د (۲۳)}$$

رابطه بالا باشد، کالمن فیلتر می‌تواند بهترین تخمین زن بردار حالت را هر هنگام که مشاهدات جدید در دسترس باشند، به وجود آورد. هم‌چنین هنگامی که جزءهای اخلاص و بردار حالت اولیه به صورت نرمال توزیع شوند، این روش امکان تخمین پارامترهای مجهول

مدل را با محاسبه تابع درست‌نمایی<sup>۱</sup> به وسیله تجزیه خطاهای پیش‌بینی فراهم می‌آورد. تابع حداکثر راست‌نمایی در مدل گاسین با میانگین  $\tilde{y}_{t|t-1}$  و واریانس  $F_t$  به شکل ذیل است:

$$\log L = -\frac{NT}{2} \log 2\pi - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \log |F_t| - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T v_t' F_t^{-1} v_t \quad (24)$$

که در آن  $v_t$  تفاضل مشاهدات زمان  $t$  با میانگین شرطی مشاهدات در زمان  $t-1$  و  $F_t$  ماتریس واریانس-کوواریانس تابع حداکثر راست‌نمایی است.

$$v_t = y_t - \tilde{y}_{t|t-1} \quad t = 1, \dots, T$$

$$E_{t-1}(y_t) = \tilde{y}_{t|t-1} = Z_t a_{t|t-1} + d_t \quad (25)$$

$$F_t = z_t P_{t|t-1} z_t' + H_t \quad \text{و} \quad t = 1, \dots, T$$

در فرم ماتریسی مدل فضا-حالت این مطالعه در معادلات انتقال،  $Z_t$ ، یک ماتریس مربع و از مرتبه  $۸ \times ۳۶$ ،  $d_t$ ، یک بردار ستونی  $۸ \times ۱$  و در معادلات وضعیت،  $T_t$  یک ماتریس مربع  $۳۶ \times ۳۶$  و  $G_t$ ، یک بردار ستونی  $۳۶ \times ۱$  است.

بردار  $d_t$  شامل ماتریس  $A_t$  و بردار  $X_t$  است که در آن اجزای  $F_t'$  و  $X_t'$  توسط روابط ذیل مشخص شده‌اند.

$$X_t' = [F_{t-1}, F_{t-2}, F_{t-3}, F_{t-4}] \quad \text{و} \quad F_t' = [ens_t, k_t, m_t, c_t, en_t]$$

$c_t$  نیز شامل ماتریس  $B_t$  و بردار  $S_t$  است که

$$S_t' = [ens_{t-3}, k_{t-3}, m_{t-3}, en_{t-3}, I]$$

بردار  $I$  یک بردار واحد است که برای برآورد ضریب ثابت در مدل لحاظ می‌شود. برای برآورد مدل از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. با توجه به وابستگی

---

1. Likelihood

روش‌های بهینه‌یابی مبتنی بر روش‌های ریاضی بر نقطه‌ی شروع اولیه و احتمال دستیابی به نقطه‌ی بهینه‌ی محلی در این روش‌ها<sup>۱</sup>، پیچیدگی تابع هدف حداکثر راست‌نمایی مدل مورد مطالعه به علت وجود ۷۶ متغیر و احتمال وجود ناپیوستگی و عدم مشتق‌پذیری این تابع، در این مطالعه برای دستیابی به حداکثر تابع راست‌نمایی از الگوریتم ژنتیک، که یکی از الگوریتم‌های جست‌وجوی اتفاقی است و از چند نقطه، جست‌وجوی متقارب<sup>۲</sup> به جای یک نقطه‌ی جست‌جو استفاده می‌کند، بهره‌گرفته شده است. این الگوریتم با لحاظ مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب، در هر تکرار با رمزگشایی رشته‌های موجود در جمعیت رشته‌ها و نسبت‌دادن یک عدد برازندگی به مقدار تابع هدف، احتمال انتخاب را برای هر رشته تعیین می‌کند. سپس بر اساس این احتمال انتخاب، مجموعه‌ای از رشته‌ها انتخاب و با اعمال عملگرهای ژنتیکی روی رشته‌های انتخابی رشته‌های جدید جای‌گزین رشته‌هایی از جمعیت اولیه می‌شوند. با این روش کروموزوم‌ها در طی نسل‌های متوالی به نحوی تغییر می‌کنند که نسل‌های جدیدتر پاسخ بهتری برای مسئله‌ی بهینه‌یابی داشته باشند. این روند باعث می‌شود جست‌وجو به ناحیه‌هایی از فضا که متوسط آماری تابع هدف در آن‌ها زیاد و امکان وجود نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق در آن‌ها بیشتر است، سوق پیدا کند و این روند با دستیابی به شرط پایانی الگوریتم متوقف می‌شود.

با توجه به آن‌که متغیرهای تصمیم مدل مورد مطالعه، همچون ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن، سهم منابع فسیلی در تولید، نرخ ترجیح زمانی و کشش تابع انتشار نسبت به فعالیت‌های کاهنده‌ی انتشار مقید هستند، در این الگوریتم از ابزارهایی بهره‌گرفته شده است که قيود حاکم بر پارامترها را برآورده سازد. بدین منظور از تابع تولید امکان‌پذیر خطی<sup>۳</sup> برای ایجاد جمعیت اولیه، و برای ایجاد فرزندان جهش‌یافته از روش جهش

۱. وجود چند نقطه‌ی اوج در چند جهت موجب می‌شود با وجود دقت بسیار و استفاده از قوانین انتقال در حرکت از نقطه‌ی شروع به سمت نقطه‌ی بهینه، محل قرارگیری نقطه‌ی اوج، به اشتباه تعیین شود. لازم به ذکر است که برای اطمینان از صحت نتایج برآورده‌شده در هر سه حالت، الگوریتم ژنتیک با ۳۰ جمعیت اولیه تصادفی اجرا شد.

۲. بصورت مجموعه‌ای از افراد

3. linearfeasible

این تابع جمعیت اولیه‌ی تصادفی را با توزیعی مناسب به گونه‌ای ایجاد می‌کند که تمام مرزها و محدودیت‌های خطی برآورده شوند.

تعدیل یافته امکان‌پذیر<sup>۱</sup> که همه فرزندان جهش یافته را در فضای محصور به قیود برآورده می‌سازد، استفاده شده است. فرزندان پیوندی نیز به روش آریتمیک<sup>۲</sup> ایجاد شده‌اند که در آن فرزندان، میانگین وزنی ریتمیک والدین خود هستند و همواره در فضای محصور به قیود قرار دارند و تابع برازندگی متناسب با تابع هدف با توجه به کمینه‌یابی منفی لگاریتم تابع راست‌نمایی مقید به صورت مقابل پیشنهاد می‌شود  $f(B) = \frac{1}{a+S'(B)}$ .<sup>۳</sup> گزینش والدین در این الگوریتم توسط فرم تصادفی یکنواخت انجام شده است.

اما وابستگی کارایی<sup>۴</sup> الگوریتم ژنتیک به نوع طراحی عملگرهای آن مانند اندازه جمعیت، عملگر انتخاب<sup>۵</sup> و عملگرهای پیوند و جهش<sup>۶</sup> موجب می‌شود در فرایند دستیابی به بهینه مطلق، تابع حداکثر راستنمایی با جمعیت‌های اولیه، فرزندان نخبه و نرخ پیوندهای متفاوت آزمون شود. در این مطالعه تشخیص بهترین ابزارهای الگوریتم ژنتیک بر اساس خودهمبستگی ناچیز در باقی‌مانده‌های معادلات اندازه و حالت، واقع‌گرایی نتایج، رعایت قیود حاکم بر پارامترها و کوتاهی زمان تخمین صورت گرفته است. پس از برآوردهای گوناگون با جمعیت‌های اولیه، فرزندان نخبه و نرخ‌های پیوند متفاوت مشاهده شد که در این الگوریتم که هر کوروموم آن ۷۶ ژن دارد، اندازه جمعیت ۱۲۰ مناسب‌تر است. هم‌چنین تعداد فرزندان نخبه، ۲۰٪ جمعیت در نظر گرفته شد. نرخ پیوند نیز در حالتی که ضریب پاک‌سازی محیط‌زیست برای داده‌های فصلی ۰/۰۵ و ۰/۰۰۱۲۵ است، به ترتیب ۰/۹ و ۰/۹۵ و در حالتی که این ضریب متغیر باشد، ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. پس از

1. mutationadaptfeasible
2. arithmetic

۳. در این مدل از مقیاس برازندگی rank استفاده شده است که اثر پراکندگی رتبه‌های خام را بر طرف می‌کند که در آن به مقدار کمینه تابع هدف بیشترین مقدار برازندگی نسبت داده می‌شود.

۴. همگرایی

۵. عملگر انتخاب، مرتبط با تابع برازندگی است و به استفاده از بهترین پاسخ‌ها و کاوش در فضای جستجوی پارامترها تمایل نشان می‌دهد.

۶. پیوند و جهش به عنوان عملگرهای جست‌وجو دسته‌بندی می‌شوند. عملگر پیوند اجازه می‌دهد هم بهره‌برداری از بهترین پاسخ‌ها صورت گیرد و هم کاوش در فضای جست‌وجوی پارامترها ادامه یابد؛ در صورتی که عملگر جهش بر کاوش در فضای جست‌وجوی پارامترها تاکید دارد.

تشخیص مناسب‌ترین اندازه جمعیت و با توجه به آن که بردار جمعیت اولیه، برداری تصادفی و نتایج الگوریتم به انتخاب جمعیت اولیه وابسته است، هر الگوریتم آن قدر تکرار شد تا یک روند تکرارشونده در مقادیر برآوردی انباشت دی‌اکسید کربن، پارامترها و مقدار حداکثر تابع راست‌نمایی مشاهده شد. از میان نتایج برآوردشده، آن جمعیت اولیه‌ای به عنوان بهترین جمعیت انتخاب شد که بیشترین مقدار حداکثر راست‌نمایی و کم‌ترین مقدار خودهمبستگی را در باقی‌مانده‌های معادلات حالت و اندازه دارا بود.

در نهایت لازم به ذکر است که برای محاسبه ماتریس واریانس-کوواریانس مربوط به پارامترهای مدل، ابتدا ماتریس هشین برای لگاریتم تابع راست‌نمایی محاسبه شد و بر اساس آن، ماتریس اطلاعات به صورت  $I = -(H)^{-1}$  به دست آمد که در آن  $H$ ، بیانگر ماتریس هشین است و ماتریس واریانس-کوواریانس  $\frac{1}{T}$  ماتریس اطلاعات و  $T$  نشان‌دهنده تعداد مشاهدات است ( $Var - COV = \frac{1}{T} I$ ) که جذر عناصر روی قطر اصلی آن، همان انحراف معیار پارامترهای برآوردشده مدل به شمار می‌رود (شاهمرادی، کاوند ۱۳۸۹).

## ۶. نتایج برآورد مدل

در این بخش با اعمال قیودی که در بخش‌های ۴ و ۱-۵ بیان شده، انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و انباشت سرانه مؤثر وضعیت پایدار به کمک رهیافت کالمن فیلتر و با روش الگوریتم ژنتیک در دوره زمانی ۴: ۱۳۸۶-۴: ۱۳۷۰ در ابتدا با لحاظ ضریب پاک‌سازی<sup>۱</sup> در حکم پارامتر سیستم، برآورد می‌شود و پس از آن با هدف دست‌یابی به محدوده انباشت دی‌اکسید کربن، این برآورد با استفاده از دو کران بالا و پایین ضریب پاک‌سازی فصلی دی‌اکسید کربن (۰/۰۵، 0/00125) تکرار می‌شود. از این رهگذر امکان برآورد مقادیر تعادلی وضعیت پایدار مصرف سوخت‌های فسیلی، سرمایه و انتشار سرانه مؤثر و پارامترهایی همچون سهم منابع فسیلی در تولید، نرخ ترجیح زمانی و کشش تابع انتشار نسبت به فعالیت‌های کاهنده انتشار

۱. با توجه به تاثیر فعالیت‌های اقتصادی بر ضریب پاک‌سازی از دو کانال تخریب توازن طبیعت و کاهش حلالیت آب دریاها و اقیانوس‌ها در اثر پدیده گلخانه‌ای، این ضریب به عنوان یکی از متغیرهای مدل در سیستم لحاظ شده است.

فراهم خواهد شد.

جدول ۱. برآورد پارامترهای مدل با لحاظ مقادیر بیشینه، کمینه و برآوردی ضریب پاک‌سازی محیط

برای دی‌اکسید کربن

| نام متغیر                                     | ضریب پاک‌سازی فصلی بیشینه<br>S=۰,۰۵ |              | ضریب پاک‌سازی فصلی برآورد شده |              | ضریب پاک‌سازی فصلی کمینه<br>S=۰,۰۰۱۲۵ |              |
|---|-------------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|
|   | پارامتر برآوردی                     | انحراف معیار | پارامتر برآوردی               | انحراف معیار | پارامتر برآوردی                       | انحراف معیار |
| ضریب پاک‌سازی فصلی محیط (S)                   |                                     |              | ۰,۰۲                          | ۰,۰۰۰۱       |                                       |              |
| سهم منابع فسیلی در تولید (H)                  | 0.30                                | 1.20E-05     | 0.498                         | 0.0003       | 0.54                                  | 0.0003       |
| کشش تابع انتشار نسبت به فعالیت‌های کاهنده (ε) | ۳,۷۲                                | 4.00E-05     | ۲,۲۱                          | 0.0001       | ۸,۸۷                                  | 0.0003       |
| نرخ ترجیح زمانی (ρ)                           | 0.01                                | 1.10E-07     | ۰,۰۱۹                         | 0.0003       | 0.009                                 | 0.0003       |

بر اساس جدول ۱ مشاهده می‌شود که پارامترهای کشش منابع فسیلی در تابع تولید، نرخ ترجیح زمانی، کشش فعالیت‌های ICT در تابع انتشار و ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن در هر سه حالت در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار هستند و در حالتی که این ضریب به عنوان متغیر لحاظ شده است؛ مقدار برآورد شده آن برای داده‌های فصلی ۰/۰۲ و مقدار سالانه آن ۰/۰۸ است که به مقدار ۰/۱ که ضریب پاک‌سازی سالانه دی‌اکسید کربن در اکثر مطالعات این مقدار فرض می‌شود، بسیار نزدیک است. با توجه به استقلال کشش مصرف سوخت‌های فسیلی، کشش فعالیت‌های کاهنده در تابع انتشار، نرخ ترجیح زمانی، سطح سرمایه، مصرف، ضریب انتشار و ... از ضریب پاک‌سازی محیط، انتظار می‌رود که با تغییر این ضریب در سه حالت فوق نتایج برآوردهای مذکور ثابت باقی بمانند. با توجه به آن که نتایج برآورد مدل در سه حالت حاکی از تغییری کوچک در متغیرهای مذکور است، میانگین پارامترها در سه حالت برآوردی با استفاده از روش مرسوم الگوریتم ژنتیک به عنوان برآوردهای سازگار پارامترهای مدل برگزیده شدند.

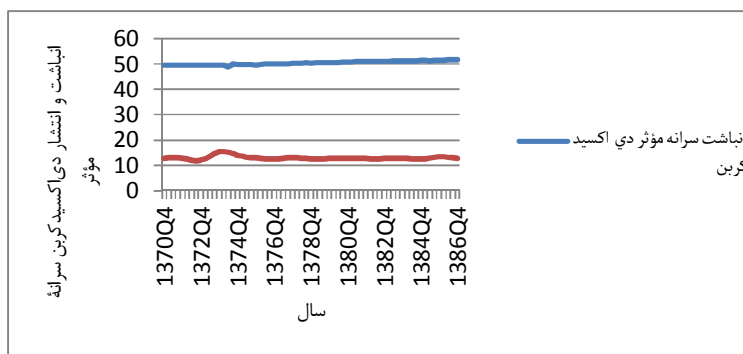
بدین سان برای ایران کشش مصرف سوخت‌های فسیلی در تابع تولید ۰/۴۴۷۵، نرخ ترجیح زمانی ۰/۰۱۲ و کشش هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده در تابع انتشار ۴/۴۵ است و با توجه به رابطه نرخ تنزیل و نرخ ترجیح زمانی ( $B = \frac{1}{1+\rho}$ ) میانگین نرخ تنزیل

۰/۹۸۷ است که با نتایج مطالعات پیشین سازگار است.

شکل ۱ نمودارهای مربوط به توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی پسماندها را به تصویر کشیده است. بر اساس نمودار توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی پسماندهای معادلات وضعیت و انتقال می‌توان به نوفه سفید بودن پسماندهای این معادلات تا حد زیادی اطمینان داشت. از آن‌جا که در این اشکال شواهدی مبنی بر وجود خودهمبستگی مشاهده نمی‌شود، نتایج حاکی از خوب بودن مدل برآورد شده است.

نتایج برآورد انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و سرانه مؤثر وضعیت پایدار این آلاینده با وجود ۳ ضریب پاک‌سازی متفاوت در جدول ۲ گزارش شده‌اند. مقادیر برآورد شده انباشت سرانه مؤثر و انباشت وضعیت پایدار این آلاینده بر حسب متریک تن هستند. نتایج جدول حاکی از آن است که انباشت دی‌اکسید کربن در هر سه حالت از روند صعودی برخوردار بوده و تنها در حالتی که ضریب پاک‌سازی متغیر است، در دوره ۱۵ کمی کاهش یافته است. میانگین انباشت این آلاینده با توجه به سه ضریب پاک‌سازی ۰/۰۱۲۵، ۰/۰۲، ۰/۰۵ به ترتیب ۵۶/۷۲، ۵۰/۴۵، ۴۴/۱۴ است که در هر سه حالت به سمت مقدار تعادلی وضعیت پایدار خود در حرکت است که همگرایی و توالی مقادیر برآورد شده انباشت با تغییر ضریب پاک‌سازی می‌تواند تاییدی بر درستی نتایج برآوردی باشد.

شکل ۱. انباشت و انتشار سرانه مؤثر دی‌اکسید کربن بر حسب واحدهای متریک



اختلاف چشم‌گیر مقادیر انباشت و انتشار سرانه مؤثر این آلاینده حاکی از آن است که شدت تاثیر این آلاینده بر پدیده تغییر اقلیم بسیار بیشتر از حد انتظار است که این مهم لزوم تجدیدنظر در افزایش شدت سیاست‌های کاهنده انتشار را می‌رساند. مقادیر وضعیت پایدار سرمایه و مصرف انرژی‌های فسیلی نیز در جدول ۳ گزارش شده‌اند.

نتایج برآورد حاکی از آن است که مصرف سوخت‌های فسیلی سرانه مؤثر وضعیت پایدار در دوره ۴-۱۳۸۶ تا ۴-۱۳۷۰ با سه ضریب ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۰۱۲۵ به ترتیب دارای میانگین ۴/۴۸، ۴/۴۵، ۴/۴۷ است. سرمایه سرانه مؤثر وضعیت پایدار نیز به ترتیب دارای میانگین‌های ۶/۵۷، ۶/۵۷، ۶/۵۴ است. بنابراین با استفاده از روش مرسوم الگوریتم ژنتیک میانگین برآوردهای مذکور در سه حالت فوق‌الذکر به عنوان مقادیر تعادلی مصرف سوخت‌های فسیلی و سرمایه سرانه مؤثر وضعیت پایدار در دوره ۴-۱۳۸۶ تا ۴-۱۳۷۰ برگزیده شدند. انباشت دی‌اکسید کربن وضعیت پایدار نیز در این سه حالت به ترتیب دارای میانگین‌های ۶۰/۲۹، ۵۲/۹۷، ۴۶/۲ است. با توجه به آن که مقادیر انباشت با گذشت زمان به مقادیر تعادلی وضعیت پایدار همگرا خواهد شد، پیشی گرفتن میانگین مقادیر وضعیت پایدار سه حالت مذکور از میانگین انباشت حاکی از آن است که مسیر حرکت انباشت روندی صعودی خواهد داشت.

مقادیر انتشار سرانه مؤثر وضعیت پایدار نیز با توجه به رابطه  $p^0 = e - sp$  و با توجه به آن که تغییرات انباشت سرانه مؤثر در وضعیت پایدار صفر است، از حاصل ضرب ضریب پاک‌سازی انباشت دی‌اکسید کربن و مقدار انباشت این آلاینده در وضعیت پایدار حاصل شده‌اند. مقادیر انتشار سرانه مؤثر وضعیت پایدار نیز در جدول ۳ گزارش شده و انتشار سرانه مؤثر وضعیت پایدار دارای میانگین ۴/۲۳۷ است.

## ۷. نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت انباشت دی‌اکسید کربن، تشخیص صحیح خسارت‌های وارد بر

محیط‌زیست<sup>۱</sup> و تصمیم‌گیری مناسب در مورد سیاست‌های کاهنده انتشار باید بر اساس مقادیر انباشت این آلاینده لحاظ شوند. بدین منظور در قالب مدل تعادلی رمزی و با استفاده از مسیرهای بهینه سرمایه، مصرف و فعالیت‌های کاهنده انتشار، فرم ساختاری مدل رشد پایدار طراحی شد و متغیر غیر قابل مشاهده انباشت دی‌اکسید کربن و مقادیر تعادلی غیر قابل مشاهده سرمایه، مصرف سوخت‌های فسیلی و انباشت این آلاینده در وضعیت پایدار با رهیافت کالمن فیلتر و با استفاده از تکنیک الگوریتم ژنتیک در دوره ۴-۱۳۸۶ تا ۴-۱۳۷۰ با لحاظ مقادیر کمینه، بیشینه و تعادلی ضریب پاک‌سازی، برای کشور ایران برآورد شد. از این رهگذر امکان برآورد پارامترهای مهم اقتصادی زیست‌محیطی کشش منابع فسیلی در تابع تولید، نرخ ترجیح زمانی، کشش فعالیت‌های ICT در تابع انتشار و ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن فراهم شد. تشخیص بهترین ابزارهای الگوریتم ژنتیک بر اساس خودهمبستگی ناچیز در باقی‌مانده‌های معادلات اندازه و حالت، واقع‌بینی نتایج، تأمین محدودیت‌های حاکم بر پارامترها و کوتاهی زمان تخمین به وقوع پیوست. هم‌چنین با توجه به وابستگی رهیافت کالمن فیلتر به مقادیر اولیه، از میان نتایج برآورد شده الگوریتم ژنتیک آن جمعیت اولیه‌ای به عنوان بهترین جمعیت انتخاب شد که بیش‌ترین مقدار حداکثر راست‌نمایی و کمترین مقدار خودهمبستگی را در باقی‌مانده‌های معادلات حالت و اندازه دارا بود.

نتایج برآورد نشان می‌دهد که کشش مصرف سوخت‌های فسیلی تابع تولید برای کشور ایران ۰/۴۴۷۵، نرخ ترجیح زمانی ۰/۰۱۲ و کشش هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده ۴/۴۵ و ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن ۰/۰۲ است. نتایج برآورد انباشت دی‌اکسید کربن با لحاظ مقادیر متفاوت ضریب پاک‌سازی حاکی از آن است که این متغیر از روند صعودی برخوردار بوده، تنها در حالتی که ضریب پاک‌سازی ۰/۰۲ است، در دوره پانزدهم کمی کاهش یافته است. میانگین انباشت این آلاینده نیز با توجه به سه ضریب پاک‌سازی ۰/۰۱۲۵، ۰/۰۲، ۰/۰۵، در دوره ۴-۱۳۷۰ تا ۴-۱۳۸۶ به ترتیب ۵۶/۷۲،

۱. پدیده گرمایش جهانی - اثر گلخانه‌ای افزوده و کاهش محصولات کشاورزی

۵۰/۴۵، ۴۴/۱۴ است.

لازم به ذکر است که همگرایی برآوردهای انباشت دی‌اکسید کربن، کشتش مصرف سوخت‌های فسیلی در تابع تولید، نرخ ترجیح زمانی و کشتش فعالیت‌های کاهنده در تابع انتشار با لحاظ مقادیر متفاوت ضریب پاک‌سازی می‌تواند تاییدی برای درستی برآوردهای متغیرهای مذکور برای اقتصاد ایران باشد<sup>۱</sup>.

با توجه به آن که کشور ایران دارای ذخایر عظیم انرژی‌های فسیلی می‌باشد و بخش عظیمی از تولیدات ایران وابسته به فرآورده‌های نفتی است، به نظر می‌رسد برآورد ۴۴۷۵/۰۴۴۷۵ برای کشتش انرژی‌های فسیلی تابع تولید بر ساختار اقتصاد ایران منطبق باشد. هم‌چنین با توجه به این که در سال‌های اخیر، ایران در خصوص میزان انتشار دی‌اکسید کربن در رده‌بندی جهانی جز ۱۰ کشور اول جهان است و با توجه به ناکارآمدی آشکار سیاست‌ها و راهکارهای دولت در پاک‌سازی انتشار و مبارزه با تغییرات اقلیمی، فرسودگی صنایع مصرف‌کننده حامل‌های انرژی و موقعیت جغرافیایی شهرهای صنعتی کشور عزیزمان ایران که قابلیت انباشت را تقویت می‌کند، در بخش انرژی می‌توان با استفاده از تدابیری میزان انباشت را کاهش داد؛ که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

بهره‌گیری از سیاست‌های اصلی مبتنی بر تولید برق، استفاده از فناوری‌های پاک و پر بهره و نیز پالایشگاه‌های دوستدار محیط زیست، بهینه‌سازی فناوری وسایل نقلیه و ناوگان حمل‌ونقل عمومی، استفاده از لوازم برقی و ساختمان‌هایی با بهره‌وری بیشتر و فعالیت‌های کاهنده انتشار فعالی همانند کنترل انتشار دی‌اکسید کربن انتهای لوله.

در بخش غیرانرژی استراتژی‌های کاهش، شامل مدیریت مزارع و ترویج دامداری مدرن، حفاظت از جنگل‌ها و سایر منابع طبیعی، کنترل مضاعف و تصفیه پساب‌ها، مدیریت مواد زائد و بازیافت آنها.

هم‌چنین استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی بادی و خورشیدی، زمین‌گرمایی، انرژی امواج و جزرومد، انرژی هیدروژنی و نیروی آب در فرایند تولید در

۱. زیرا با تغییر یکی از متغیرهای مدل، تغییر چندانی نداشته‌اند.

کشور ضروری است. اما با توجه به آن که در حال حاضر، سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید برق پایین و هزینه برق تولیدی از آنها بسیار بالاست، عمده سیاست‌های کاهش بایستی بر جایگزینی سوخت‌های سنگین با گاز طبیعی، برق آبی، سیکل ترکیبی و تولید همزمان گرما و برق متمرکز شود (مهدی‌زاده، ۱۳۸۹).

## منابع و مآخذ

- امیر فخری، جواد. (۱۳۸۹)، ضرورت کاهش انتشار متان به عنوان یکی از عمده‌ترین گازهای گلخانه‌ای، مجموعه مقالات سومین همایش سراسری مدیران و متخصصان HSE، امور HSEQ شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، وزارت نفت، اردیبهشت، ۱۳۸۹.
- بخشی دستجردی، رسول و خاکی نجف‌آبادی، ناهید. (۱۳۹۰)، بررسی تأثیر جمعیت بر رشد اقتصادی در چارچوب الگوی رشد بهینه در اقتصاد ایران (۱۳۵۰-۱۳۸۶) کاربردی از الگوریتم ژنتیک، مجله تحقیقات اقتصادی، دوره ۴۵، شماره ۹۴، صص ۲۳-۰۱.
- بهروزی ایزدموسی، وحید. (۱۳۸۸)؛ محاسبه بازده بدون ریسک بازارهای مالی ایران به روش فیلترکالمن؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد: دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران.
- دفتر حفاظت لایه ازن. (۱۳۸۶)، اثرات گازهای گلخانه‌ای و تخریب لایه ازن بر محیط زیست، تهران، انتشارات دفتر حفاظت لایه ازن.
- رومر، دیوید. (۱۳۸۳)، اقتصاد کلان پیشرفته نظریه رشد (جلد اول)، مهدی تقوی، تهران: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران. (۱۳۸۳)، ۲۵۵.
- سازمان حفاظت محیط‌زیست (<http://www.epo.ir>)
- شاد، روزبه و عبادی، حمید و سعدی مسگری، محمد و وفائی نژاد، علیرضا. (۱۳۸۳)، طراحی و اجرای GIS کاربردی جهت مکان‌یابی شهرک‌های صنعتی با استفاده از مدل‌های فازی، وزن‌های نشان‌گر و ژنتیک، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۴، صص ۳۱۷-۴۲۹.
- شاهمرادی، اصغر و کاوند، حسین و ندری، کامران (۱۳۸۹)، برآورد نرخ بهره تعادلی در اقتصاد ایران (۱۳۶۸:۴-۱۳۸۶:۴) در قالب یک مدل تعادل عمومی، مجله تحقیقات اقتصادی، شماره ۹۰، صص ۴۱-۱۹.
- عباسی نژاد، حسین، کاوند، حسین و شاهمرادی، اصغر (۱۳۸۸)، برآورد یک مدل ادوار تجاری واقعی برای اقتصاد ایران با استفاده از رهیافت کالمن فیلتر و حد اکثر راستمنایی، مجله تحقیقات اقتصادی، شماره ۸۹، صص ۲۱۴-۱۸۵.

- قاسمی، محمدرضا و آزادی، اکبر (۱۳۸۷)، بهینه سازی قاب‌های فولادی با استفاده از الگوریتم وراثتی اصلاح شده هوشمند، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۴، صص ۴۶۵-۴۷۶.
- مهدی‌زاده، محمود (۱۳۸۹)، ماهنامه پیام پتروشیمی، شماره ۳۴.
- مکانیزم توسعه پاک سازمان ملل (<http://cdm.unfccc.int>)
- Ashworth, Robert, Nahle, Nasif & Schreuder, Hans. (2011), **Greenhouse Gases in the Atmosphere Cool the Earth**.
- Brock, A.W, Taylor, M.S (2004), *Economic Growth and the Enviroment: a Review of Theory and Empirics*, NBER Working Paper, No.10854.
- Brock, A. W, Taylor, M.S (2004), *The Green Solow Model*, NBER Working Paper, No.10557.
- Graphic production: co<sub>2</sub> mow.org & Nature Geo science Global Carbon project.org
- Harvey, Andrew C. (2003), **Forecasting , Structural Time Series Models and the Kalman Filter**, British: Cambridge University Press, 554 .
- IEA, 2011.
- Jorgenson, Dale W. and Vu, Khuong M. (2010), *Potential Growth of the World Economy*, Journal of Policy Modeling, No 32, 615-631.
- Kalaitzidakis, Pantelis, P. Mamuneas, Theofanis and Stengos, Thanasis (2007), *The Contribution of Greenhouse Pollution to Productivity Growth*, Working Papers from University of Guelph, Department of Economics, No 802, Desember, 2008.
- L. Ingber , B. E. Rosen (1992), *Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing*, Mathematical and Computer Modeling, No 16, November, 87-100.
- Ordás Criado, C., Valente, S., T. Stengos (2010), *Growth and Pollution Convergence: Theory and Evidence*, Journal of Enviromental and Economics and Management, Volume 62, Issue 2, September, 2011, 199-214.
- Pittel, Karen. (2004), **Sustainabiliy and Endogenous Growth**, Germany: Department of Economics Chemnitz University of Technology.
- S. Garcia; (1999), *Experimental Design Optimization and Thermophysical Parameter Estimation of Composite Materials Using Genetic Algorithms*; Ph.D. Thesis; Virginia: Polytechnic Institute and State University.
- World Development Indicators, 2011.

جدول ۲. مقادیر برآوردشده انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر و انباشت سرانه مؤثر این آلاینده در وضعیت پایدار بر حسب واحدهای متریک با لحاظ مقادیر بیشینه، کمینه و تعادلی ضریب پاک‌سازی محیط برای دی‌اکسید کربن

| s      | ایران                           |         |        |  |         |         |
|--------|---------------------------------|---------|--------|--|---------|---------|
|        | انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر |         |        | انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر وضعیت پایدار |         |         |
|        | ۰,۰۰۱۲۵                         | ۰,۰۰۲   | ۰,۰۰۵  | ۰,۰۰۱۲۵                                      | ۰,۰۰۲   | ۰,۰۰۵   |
| 1370-4 | 56.921                          | 49.608  | 43.521 | 60.930                                       | 53.023  | 46.205  |
| 1371-1 | 56.995                          | 49.599  | 43.529 | 61.0487                                      | 53.0308 | 46.204  |
| 1371-2 | 56.234                          | 49.575  | 43.276 | 59.852                                       | 52.981  | 46.210  |
| 1371-3 | 57.307                          | 49.575  | 43.605 | 61.604                                       | 53.0590 | 46.206  |
| 1371-4 | 57.230                          | 49.486  | 43.567 | 61.303                                       | 53.024  | 46.203  |
| 1372-1 | 56.982                          | 49.545  | 43.502 | 60.947                                       | 52.989  | 46.201  |
| 1372-2 | 56.073                          | 49.495  | 43.306 | 60.0282                                      | 52.987  | 46.199  |
| 1372-3 | 57.0541                         | 49.605  | 43.530 | 60.856                                       | 52.959  | 46.186  |
| 1372-4 | 57.048                          | 49.653  | 43.445 | 60.580                                       | 52.953  | 46.214  |
| 1373-1 | 56.763                          | 49.665  | 43.408 | 60.427                                       | 53.203  | 46.206  |
| 1373-2 | 55.900                          | 49.662  | 43.251 | 59.819                                       | 53.017  | 46.207  |
| 1373-3 | 56.813                          | 49.638  | 43.353 | 60.492                                       | 53.016  | 46.223  |
| 1373-4 | 56.889                          | 49.675  | 43.623 | 60.295                                       | 53.037  | 46.159  |
| 1374-1 | 56.604                          | 49.674  | 43.500 | 60.139                                       | 53.0642 | 46.191  |
| 1374-2 | 55.745                          | 48.995  | 43.412 | 59.635                                       | 53.185  | 46.199  |
| 1374-3 | 56.683                          | 50.075  | 43.593 | 60.216                                       | 52.983  | 46.204  |
| 1374-4 | 56.806                          | 49.816  | 43.612 | 60.101                                       | 53.0311 | 46.223  |
| 1375-1 | 56.538                          | 49.838  | 43.619 | 60.002                                       | 53.032  | 46.211  |
| 1375-2 | 55.715                          | 49.786  | 43.538 | 59.628                                       | 53.010  | 46.210  |
| 1375-3 | 56.687                          | 49.768  | 43.715 | 60.145                                       | 52.944  | 46.207  |
| 1375-4 | 56.811                          | 49.577  | 43.787 | 60.043                                       | 53.383  | 46.207  |
| 1376-1 | 56.572                          | 49.910  | 43.766 | 59.978                                       | 53      | 46.199  |
| 1376-2 | 55.753                          | 50.034  | 43.659 | 59.634                                       | 52.946  | 46.196  |
| 1376-3 | 56.761                          | 50.02   | 43.801 | 60.005                                       | 52.908  | 46.188  |
| 1376-4 | 56.777                          | 50.019  | 43.948 | 59.854                                       | 52.875  | 46.162  |
| 1377-1 | 56.582                          | 50.0983 | 43.524 | 59.831                                       | 52.836  | 46.251  |
| 1377-2 | 55.771                          | 50.080  | 43.645 | 59.552                                       | 52.840  | 46.212  |
| 1377-3 | 56.699                          | 50.155  | 43.803 | 59.861                                       | 52.819  | 46.204  |
| 1377-4 | 56.772                          | 50.210  | 43.858 | 59.756                                       | 52.812  | 46.206  |
| 1378-1 | 56.565                          | 50.264  | 43.974 | 59.710                                       | 52.809  | 46.0921 |
| 1378-2 | 55.757                          | 50.265  | 43.823 | 59.483                                       | 52.805  | 46.187  |
| 1378-3 | 56.672                          | 50.501  | 43.949 | 59.758                                       | 52.962  | 46.193  |
| 1378-4 | 56.765                          | 50.390  | 44.025 | 59.721                                       | 52.875  | 46.194  |
| 1379-1 | 56.549                          | 50.445  | 44.213 | 59.705                                       | 52.874  | 46.152  |
| 1379-2 | 55.771                          | 50.494  | 43.876 | 59.570                                       | 52.873  | 46.223  |
| 1379-3 | 56.711                          | 50.528  | 44.053 | 59.849                                       | 52.869  | 46.213  |
| 1379-4 | 56.824                          | 50.554  | 44.126 | 59.837                                       | 52.870  | 46.212  |
| 1380-1 | 56.614                          | 50.629  | 44.105 | 59.822                                       | 52.854  | 46.218  |
| 1380-2 | 55.842                          | 50.670  | 44.139 | 59.682                                       | 52.856  | 46.181  |
| 1380-3 | 56.768                          | 50.720  | 44.232 | 59.889                                       | 52.859  | 46.194  |
| 1380-4 | 56.868                          | 50.772  | 44.283 | 59.875                                       | 52.864  | 46.196  |

|        |         |         |         |        |         |        |
|--------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| 1381-1 | 56.697  | 50.816  | 44.320  | 59.933 | 52.859  | 46.191 |
| 1381-2 | 55.948  | 50.950  | 44.007  | 59.876 | 52.942  | 46.289 |
| 1381-3 | 56.871  | 50.915  | 44.366  | 60.099 | 52.897  | 46.214 |
| 1381-4 | 57.006  | 50.940  | 44.457  | 60.148 | 52.896  | 46.211 |
| 1382-1 | 56.802  | 50.985  | 44.439  | 60.139 | 52.908  | 46.213 |
| 1382-2 | 56.0725 | 51.025  | 44.352  | 60.088 | 52.926  | 46.235 |
| 1382-3 | 57.008  | 51.0176 | 44.573  | 60.277 | 52.960  | 46.203 |
| 1382-4 | 57.116  | 51.109  | 44.611  | 60.281 | 52.957  | 46.207 |
| 1383-1 | 56.953  | 51.143  | 44.634  | 60.342 | 52.967  | 46.207 |
| 1383-2 | 56.217  | 51.191  | 44.626  | 60.296 | 52.969  | 46.205 |
| 1383-3 | 57.112  | 51.225  | 44.759  | 60.441 | 52.967  | 46.204 |
| 1383-4 | 57.204  | 51.244  | 44.836  | 60.459 | 52.973  | 46.203 |
| 1384-1 | 57.0610 | 51.304  | 44.869  | 60.541 | 52.925  | 46.206 |
| 1384-2 | 56.360  | 51.337  | 44.835  | 60.060 | 52.970  | 46.216 |
| 1384-3 | 57.269  | 51.376  | 45.243  | 60.746 | 52.997  | 46.125 |
| 1384-4 | 57.393  | 51.399  | 45.0871 | 60.839 | 53.0242 | 46.2   |
| 1385-1 | 57.242  | 51.417  | 45.093  | 60.918 | 53.050  | 46.206 |
| 1385-2 | 56.554  | 51.267  | 45.0981 | 60.958 | 53.120  | 46.208 |
| 1385-3 | 57.462  | 51.544  | 45.253  | 61.139 | 53.0610 | 46.198 |
| 1385-4 | 57.608  | 51.534  | 45.315  | 61.249 | 53.0811 | 46.214 |
| 1386-1 | 57.452  | 51.572  | 45.353  | 61.331 | 53.097  | 46.214 |
| 1386-2 | 56.785  | 51.630  | 45.356  | 61.389 | 53.115  | 46.220 |
| 1386-3 | 57.697  | 51.661  | 45.414  | 61.569 | 53.149  | 46.247 |
| 1386-4 | 57.855  | 51.703  | 45.730  | 61.687 | 53.047  | 46.168 |

مأخذ: محاسبات محقق

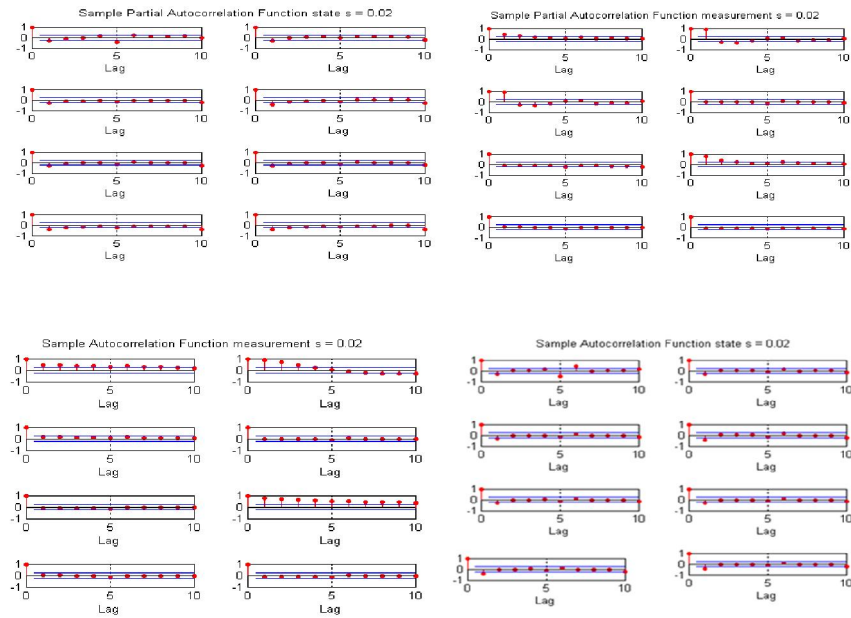
جدول ۳. مقادیر برآوردشده سرمایه، مصرف سوخت‌های فسیلی، انتشار دی‌اکسیدکربن سرانه مؤثر وضعیت پایدار

|        | ایران                          |                                  |   |
|--------|--------------------------------|----------------------------------|---|
|        | سرمایه سرانه مؤثر وضعیت پایدار | مصرف سوخت‌های فسیلی وضعیت پایدار | انتشار دی‌اکسیدکربن سرانه مؤثر وضعیت پایدار |
| 1370-4 | 6.568                          | 4.498                            | 4.242                                       |
| 1371-1 | 6.560                          | 4.494                            | 4.242                                       |
| 1371-2 | 6.589                          | 4.527                            | 4.238                                       |
| 1371-3 | 6.667                          | 4.482                            | 4.245                                       |
| 1371-4 | 6.605                          | 4.481                            | 4.242                                       |
| 1372-1 | 6.599                          | 4.459                            | 4.239                                       |
| 1372-2 | 6.596                          | 4.439                            | 4.239                                       |
| 1372-3 | 6.579                          | 4.399                            | 4.237                                       |
| 1372-4 | 6.617                          | 4.521                            | 4.236                                       |
| 1373-1 | 6.587                          | 4.141                            | 4.256                                       |
| 1373-2 | 6.580                          | 4.426                            | 4.241                                       |
| 1373-3 | 6.601                          | 4.480                            | 4.241                                       |
| 1373-4 | 6.470                          | 4.313                            | 4.243                                       |
| 1374-1 | 6.528                          | 4.376                            | 4.245                                       |
| 1374-2 | 6.542                          | 4.270                            | 4.255                                       |
| 1374-3 | 6.553                          | 4.591                            | 4.239                                       |
| 1374-4 | 6.584                          | 4.574                            | 4.242                                       |
| 1375-1 | 6.561                          | 4.540                            | 4.242                                       |
| 1375-2 | 6.556                          | 4.554                            | 4.241                                       |
| 1375-3 | 6.550                          | 4.606                            | 4.235                                       |
| 1375-4 | 6.544                          | 3.941                            | 4.271                                       |
| 1376-1 | 6.535                          | 4.422                            | 4.240                                       |
| 1376-2 | 6.533                          | 4.443                            | 4.236                                       |
| 1376-3 | 6.525                          | 4.432                            | 4.233                                       |
| 1376-4 | 6.481                          | 4.370                            | 4.230                                       |
| 1377-1 | 6.638                          | 4.630                            | 4.227                                       |
| 1377-2 | 6.563                          | 4.499                            | 4.227                                       |
| 1377-3 | 6.543                          | 4.498                            | 4.225                                       |
| 1377-4 | 6.541                          | 4.511                            | 4.225                                       |
| 1378-1 | 6.335                          | 4.215                            | 4.225                                       |
| 1378-2 | 6.505                          | 4.476                            | 4.224                                       |
| 1378-3 | 6.515                          | 4.284                            | 4.237                                       |
| 1378-4 | 6.516                          | 4.416                            | 4.230                                       |
| 1379-1 | 6.438                          | 4.321                            | 4.230                                       |
| 1379-2 | 6.562                          | 4.522                            | 4.230                                       |
| 1379-3 | 6.543                          | 4.510                            | 4.229                                       |
| 1379-4 | 6.540                          | 4.505                            | 4.230                                       |
| 1380-1 | 6.559                          | 4.552                            | 4.228                                       |
| 1380-2 | 6.502                          | 4.453                            | 4.228                                       |
| 1380-3 | 6.535                          | 4.485                            | 4.229                                       |
| 1380-4 | 6.543                          | 4.489                            | 4.229                                       |
| 1381-1 | 6.535                          | 4.490                            | 4.229                                       |
| 1381-2 | 6.7                            | 4.631                            | 4.235                                       |
| 1381-3 | 6.557                          | 4.504                            | 4.232                                       |
| 1381-4 | 6.545                          | 4.506                            | 4.232                                       |
| 1382-1 | 6.548                          | 4.514                            | 4.233                                       |
| 1382-2 | 6.596                          | 4.572                            | 4.234                                       |
| 1382-3 | 6.554                          | 4.469                            | 4.237                                       |
| 1382-4 | 6.575                          | 4.518                            | 4.236                                       |
| 1383-1 | 6.585                          | 4.517                            | 4.237                                       |
| 1383-2 | 6.585                          | 4.516                            | 4.237                                       |

|        |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|
| 1383-3 | 6.581 | 4.513 | 4.237 |
| 1383-4 | 6.576 | 4.497 | 4.238 |
| 1384-1 | 6.576 | 4.577 | 4.234 |
| 1384-2 | 6.590 | 4.548 | 4.238 |
| 1384-3 | 6.426 | 4.292 | 4.240 |
| 1384-4 | 6.560 | 4.477 | 4.242 |
| 1385-1 | 6.574 | 4.487 | 4.244 |
| 1385-2 | 6.581 | 4.416 | 4.250 |
| 1385-3 | 6.572 | 4.515 | 4.245 |
| 1385-4 | 6.604 | 4.550 | 4.246 |
| 1386-1 | 6.607 | 4.547 | 4.248 |
| 1386-2 | 6.616 | 4.550 | 4.249 |
| 1386-3 | 6.660 | 4.583 | 4.252 |
| 1386-4 | 6.517 | 4.533 | 4.244 |

مأخذ: محاسبات محقق

شکل ۲. خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) پسماندهای معادلات اندازه و وضعیت



پیوست ۱. محاسبه ضرایب مدل فضا-حالت در برآورد انباشت دی‌اکسید کربن سرانه مؤثر

$$\int_{dlk,ens} = \frac{k'h\left(\frac{c_{ss}}{k_{ss}} + (n + \pi + \delta)\right)}{en_{ss}} \quad \int_{dlk,k} = (\alpha - 1)\left(\frac{c_{ss}}{k_{ss}} + \frac{n + \pi + \delta}{k_{ss}}\right) + \frac{c_{ss}}{k_{ss}^2}$$

$$\int_{dlk,m} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\frac{c_{ss}}{k_{ss}} + (n + \pi + \delta)}{m_{ss}} \right) \quad \int_{dlk,c} = -\frac{1}{k_{ss}}$$

$$\int_{dlc,ens} = \frac{\int_{dlk,ens}}{k'} \quad \int_{dlc,p} = -(\int_{dlk,ens})\varphi$$

$$\int_{dlc,ens} = \frac{k'h(n + \pi + \delta + \rho)}{en_{ss}} \quad \int_{dlc,k} = \frac{(\alpha - 1)(n + \pi + \delta + \rho)}{k_{ss}}$$

$$\int_{dlc,m} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{(n + \pi + \delta + \rho)}{m_{ss}} \right) \quad \int_{dlc,en} = \frac{\int_{dlc,ens}}{k'}$$

$$\int_{dlc,p} = -(\int_{dlc,ens})\varphi$$

$$\int_{dlx,ens} = \frac{1}{\varepsilon - 1} \left( \frac{(1 - X_{ss})\int_{dlk,ens}}{\left(\frac{c_{ss}}{k_{ss}} + n + \pi + \delta\right)X_{ss}} \right) ((-h - 1)(n + \pi + s))$$

$$\int_{dlx,k} = \frac{1}{(\varepsilon - 1)} \left( \frac{(1 - X_{ss})}{X_{ss}k_{ss}} \right) \left( \frac{-(n + \pi)ah}{enf_{ss}} - \frac{\alpha sh}{enf_{ss}} + (n + \pi + \delta)(\alpha - 1) + (\alpha - 1)\rho \right)$$

$$\int_{dlx,m} = \frac{1}{(\varepsilon - 1)x_{ss}} \left[ (1 - x_{ss})^{1-\varepsilon} \left( -h \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) \left( \frac{n + \pi + s}{enf_{ss}} \right) + \frac{1}{\varepsilon} ((2n + \pi + \delta) + 2\rho + s + 2(1 - x_{ss})) \right) \right] + \frac{1}{(\varepsilon - 1)x_{ss}} \left( \frac{\int_{dlx,c} c_{ss}}{\mu_{ss}} - \frac{(n + \pi + s)h(1 - x_{ss})(\varepsilon - 1)}{enf_{ss}\mu_{ss}} \right)$$

$$\int_{dlx,c} = \frac{1}{(\varepsilon - 1)x_{ss}} \left( -\sigma^{-1} \delta \varepsilon \theta \mu_{ss} p_{ss}^{\theta-1} \right) \quad \int_{dlx,en} = \frac{\int_{dlx,ens}}{k'}$$

$$\int_{dlx,p} = \varphi \left( \frac{\int_{dlx,c} (\theta - 1) c_{ss}}{p_{ss}} + \frac{1}{(\varepsilon - 1)x_{ss}} \left( \frac{\int_{dlx,ens} (n + \pi + s)(h - 1)(1 - x_{ss})}{n + \pi + \delta + \frac{c_{ss}}{k_{ss}}} - \int_{dlc,ens} (1 - x_{ss}) \right) \right)$$

$$\int_{p,p} = 1 - ((n + \pi + s) \left( 1 + \varphi h k' \frac{p_{ss}}{enf_{ss}} (0/47) \right)) \int_{p,ens} = 0/47 h k' \frac{p_{ss}}{enf_{ss}} (n + \pi + s)$$

$$\int_{p,k} = - \frac{\alpha(n + \pi + s)p_{ss}}{k_{ss}} (0/47) \quad \int_{p,m} = \frac{(n + \pi + s)p_{ss}}{m_{ss}}$$

$$\int_{p,en} = \frac{\int_{p,ens}}{k'}$$

### پیوست ۲. محدوده مهم‌ترین پارامترهای موجود در مدل

محدوده مهم‌ترین پارامترهای مدل به شرح ذیل است: با توجه به این که تابع تولید دارای بازدهی ثابت نسبت به مقیاس است، کشش مصرف سوخت‌های فسیلی تابع تولید (h) به صفر و تفاضل عدد یک و کشش سرمایه‌ای کشور مورد نظر محدود می‌شود. ضریب میزان مصرف ذخایر طبیعی در هر دوره ( $k'$ ) به بازه (۰/۰۰۱ و ۰) محدود می‌شود. کشش هزینه‌های اختصاص یافته به فعالیت‌های کاهنده در تابع انتشار ( $\varepsilon$ ) محدود به (۱۰ و ۱) است. نرخ ترجیح زمانی ( $\rho$ ) که مقدار فصلی آن محدود به (۰/۰۲ و ۰/۰۴) است. با توجه به آن که در اکثر مطالعات به جای نرخ ترجیح زمانی، نرخ تنزیل محاسبه می‌شود، برای تعیین محدوده این متغیر از رابطه آن با نرخ تنزیل استفاده شده است ( $B = \frac{1}{1+\rho}$ ) که محدوده نرخ تنزیل فصلی،  $0/98 < B < 0/996$  است.