

جنگل‌کاری و جذب دی‌اکسید کربن و تأثیرات آن‌ها بر توسعه‌ی سیستم انرژی

عطیه حمیدی‌نژاد

کارشناس گروه مدیریت انرژی، مؤسسه‌ی مطالعات بین‌المللی انرژی a_hamidi@iies.net

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۸/۳۰

چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، پدیده‌ی گرمایش جهانی به‌عنوان نگرانی مهم زیست‌محیطی مطرح شده است. منشأ اصلی پخش و انباشت CO_2 در اتمسفر زمین، مصرف فزاینده‌ی سوخت‌های فسیلی است، که سهم بالایی را در ترکیب انرژی مصرفی دارد. لذا کنترل پخش و انباشت CO_2 بر توسعه‌ی بخش انرژی اثر دارد و می‌تواند مجموعه‌ی نقاط موجه توسعه‌ی سیستم را تغییر دهد، بنابراین به‌منظور کنترل پخش CO_2 ، روش‌های مختلفی مانند اعمال سیاست‌های کاهش نشر، وضع مالیات و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی پی‌گیری شده و ارزیابی اقدامات مزبور در مدل‌های انرژی مورد توجه قرار گرفته است.

در مدل‌های انرژی موجود، مسئله‌ی سالم‌سازی محیط‌زیست و رقابت این روش با سایر سیاست‌های کنترل آلودگی، در نظر گرفته نشده است. لذا در این مقاله مکانیسم کاهش غلظت گاز CO_2 از طریق سالم‌سازی محیط‌زیست در مدل سیستم انرژی منظور شده و در این رابطه، جنگل‌کاری با توجه به موازنه‌ی جرم CO_2 و سایر محدودیت‌های هزینه‌ای توسعه یافته است.

مدل با توجه به محدودیت‌ها و معیار تابع هدف (حداقل کردن هزینه‌ی سیستم)، بهترین نقطه را مشخص می‌کند. با اعمال روش طراحی شده، ابزار مناسبی برای ارزیابی اثر سالم‌سازی در کنترل نشر و انباشت CO_2 فراهم شده و مدل امکان محاسبه‌ی پتانسیل کاهش نشر گاز CO_2 و مقایسه‌ی خالص ارزش کنونی از مصارف مختلف زمین مانند کشاورزی، مراتع با جنگل‌کاری و احیای جنگل را نیز فراهم می‌کند.

طبقه‌بندی JEL: H23, Q54, P28, C6, Q26, Q23

کلید واژه: جنگل‌کاری، احیای جنگل، مدل‌سازی انرژی- محیط زیست، سیستم انرژی،

گرمایش جهانی، هزینه‌ی خارجی.

۱- مقدمه

استخراج، فرآورش، انتقال و تبدیل سوخت‌های فسیلی به انرژی، اثرات محیطی بسیاری را ایجاد می‌کند. تعداد زیادی از محققان معتقدند که دی‌اکسیدکربن (CO_2) و دیگر گازهایی که از سوختن سوخت‌های فسیلی رها می‌شوند، اثرات به‌سزایی را در تشکیل "گازهای گلخانه‌ای" دارند، که ممکن است منجر به تغییرات آب و هوایی گردد (مک کنی^۱، ۲۰۰۴).

امروزه پدیده‌ی گرمایش جهانی ناشی از نشر گازهای گلخانه‌ای توسط انسان، به عنوان نگرانی مهم زیست محیطی که رفاه آینده را به مخاطره می‌اندازد، ملاحظه می‌شود. آخرین پیشگویی‌ها از هیأت بین‌الدول تغییر آب و هوا IPCC^۲ به افزایش دمای سطحی میانگین هوا در سطح جهان به میزان $1/4 - 5/8$ °C و میانگین سطح آب دریا بین ۸ تا ۸۸ سانتی‌متر تا سال ۲۱۰۰، اشاره دارد، که اختلالات مهمی را در زیستگاه انسان و اکوسیستم‌های طبیعی به وجود می‌آورد (بنیتز^۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶).

به‌طور کلی روش‌های کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای در دو گروه طبقه‌بندی شده است: ۱- کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی و پروسه‌های صنعتی ۲- افزایش چاهک‌های کربن (الکساندروف^۴، ۱۹۹۹ و یاماگاتا^۵، ۲۰۰۱).

در پاسخ به تهدیدات تغییرات آب و هوایی و افزایش چاهک‌های کربن، افزایش تجمع کربن در درختان، و استفاده از بیومس درخت برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی به منظور حداقل کردن افزایش در غلظت کربن اتمسفر، مورد توجه قرار گرفته است. با بررسی مدل‌های مختلف انرژی مانند مدل مارکال^۶ (لولو^۷، ۲۰۰۴)، تایمز^۸ (لولو، ۲۰۰۵)، سیستم انرژی^۹ (سبوچی^{۱۰}، ۲۰۰۴)، گریت^{۱۱} (رودریگوئز^{۱۲}، ۲۰۰۲)، سیستم

1 - McKenney.

2 - Intergovernmental Panel on Climate Change.

3 - Benitez.

4 - Alexandrov.

5 - Yamagata.

6 - Markal.

7 - Loulou.

8 - Times.

9 - Energy System Model.

10- Saboohi.

11- Greenhouse Gases, Regulated Emission, and Energy Use in Transportation (GREET).

12- Rodriguez.

مدل‌سازی انرژی ملی^۱ (EIA, 2003)، ارزیابی اثرات جهانی و منطقه‌ای از سیاست‌های کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای^۲ (مانه^۳، ۲۰۰۴)، ملاحظه می‌شود که این مدل‌ها تنها در قالب نکات زیر به مسایل محیط زیست توجه دارند:

- ۱- ارزیابی سیاست‌های انرژی پاک در کاهش نشر CO_2
- ۲- اعمال ابزارهای قیمت انرژی مانند مالیات‌ها، مجوزهای کربن و ...
- ۳- محاسبه‌ی هزینه‌های خارجی ناشی از نشر CO_2 و می‌نیمم کردن هزینه‌ها
- ۴- اعمال محدودیت در نشر این گاز برای هر منطقه
- ۵- محاسبه‌ی میزان نشر آلاینده‌ها و غلظت آن‌ها در جو و میزان تغییر دما یا تغییر در سطح آب دریاها

بنابراین در این مدل‌ها، موضوع سالم‌سازی محیط زیست به منظور دفع CO_2 منظور نشده است. یکی از روش‌های مهم سالم‌سازی محیط‌زیست جنگل‌کاری است، که در کاهش میزان کربن موجود در اتمسفر اثر به‌سزایی دارد. لذا در این مقاله، به منظور برطرف کردن نقص مدل‌های انرژی، به توسعه‌ی جنگل‌کاری در مدل سیستم انرژی ESM پرداخته شده و به این صورت اثر توسعه‌ی جنگل‌ها در کاهش نشر گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده از بخش انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

به همین منظور در بخش دوم مقاله‌ی حاضر، ابتدا ساختار مدل سیستم انرژی شرح داده خواهد شد. در بخش سوم، نقش درخت در کاهش گاز دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار می‌گیرد، در بخش چهارم، روش توسعه‌ی جنگل‌کاری در مدل سیستم انرژی ارائه و در بخش پنجم روش توسعه یافته در یک مطالعه‌ی موردی به‌کار گرفته شده است. در دو بخش پایانی نیز به ترتیب نتایج تجربی و نتیجه‌گیری، ارائه شده‌اند.

1- National Energy Modeling System (NEMS).

2- A Model for Evaluating the Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies (MERGE).

3-Manne.

۲- ساختار مدل سیستم انرژی

مدل سیستم انرژی توسط سبوحی (۱۳۸۳)، در پژوهشکده‌ی انرژی شریف توسعه داده شده است، که اصولاً برای تخمین دینامیک انرژی یک کشور، منطقه یا گروهی از مناطق به کار می‌رود. هدف مدل، تعیین ساختار بهینه‌ی خدمات عرضه‌ی انرژی آینده در راستای حداقل کردن هزینه‌ی کل سیستم شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، عملیاتی و تعمیر و نگهداری است که از روش بهینه‌سازی یا برنامه‌ریزی خطی برای محاسبه‌ی تعادل جزئی استفاده می‌کند. برای حل معادلات خطی در این مدل از الگوریتم‌های موجود در برنامه‌ریزی ریاضی مانند سیمپلکس، نیوتن و... استفاده شده است. سه مفهوم اساسی که در توسعه‌ی این مدل اتخاذ شده‌اند عبارتند از:

۱- سیستم انرژی مرجع

مدل سیستم انرژی ابزاری تحلیلی است که به منظور تسهیل در بررسی جریان انرژی و مواد از نمودار سیستم انرژی مرجع استفاده می‌کند. این نمودار براساس قانون بقای جرم و انرژی است و جریان انرژی در سطوح مختلف انرژی از استخراج و فرآورش تا مصرف کننده‌ی نهایی را بررسی می‌کند. با استفاده از این نمودار، مدل سیستم انرژی به موازنه‌ی جرم و انرژی در تمام سطوح می‌پردازد.

۲- مفهوم انتقال

این مفهوم به منظور توسعه‌ی مدل شبکه‌ی انتقال انرژی (که عنصر اصلی سیستم عرضه‌ی انرژی است)، به‌عنوان مرحله‌ی میانی به کار می‌رود. این مفهوم نقش مراحل میانی از قبیل ذخایر را شرح می‌دهد.

۳- نظریه‌ی اقتصاد خرد در تابع تولید

بر طبق این نظریه، عرضه‌کننده به صورت یک بنگاه سازماندهی شده و در بازار انرژی همانند تولید کننده‌ای از یک حامل انرژی در نظر گرفته می‌شود. رفتار عرضه‌کننده براساس نظریه‌ی اقتصاد خرد شرح داده می‌شود و فعالیت آن برای ارضای

تقاضا از لحاظ اقتصادی، فنی و ... ، با هزینه‌ی می‌نیمم یا سود ماکزیمم به تولید منجر می‌شود.

معادلات و قوانین حاکم بر مدل سیستم انرژی

معادلات و قوانین حاکم بر مدل را می‌توان به عناصر ذیل تقسیم کرد:

بیان تقاضا

یکی از ویژگی‌های مهم مدل، موازنه‌ی بین عرضه و تقاضاست. بر این اساس تقاضای کل از یک انرژی معین در هر بخش مصرف کننده‌ی انرژی، از کل تولید این نوع انرژی، کوچک‌تر یا مساوی است.

موازنه‌ی مواد و انرژی

این مدل بر اساس سیستم انرژی مرجع (RES)^۱ استوار است. سیستم انرژی مرجع، ساختار سیستم عرضه‌ی انرژی را به صورت مجموعه‌ای از تکنولوژی‌های پیوسته که به وسیله‌ی جریان انرژی و مواد مرتبط شده‌اند، منعکس می‌کند. جریان مواد براساس موازنه‌ی جرم و جریان انرژی بین دو تکنولوژی متوالی، به وسیله‌ی قوانین پایستگی انرژی، بیان شده‌اند.

موازنه‌ی منابع

در مورد منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی، قابلیت دسترسی منابع، مصرف منابع را محدود کرده، که این قبیل محدودیت‌ها در مدل سیستم انرژی منظور شده است.

موازنه‌ی نشر آلاینده‌ها

آلودگی محیط‌زیست نتیجه‌ای از استخراج، فرآورش، تبدیل، حمل و نقل، انتقال و مصرف انرژی است. از آن‌جا که قیود و هزینه‌های خارجی اثرات مهیبه‌ی را روی نقاط موجه سیستم عرضه‌ی انرژی دارند، لذا تحلیل اثر آلودگی و هزینه‌های خارجی بر

1- Reference Energy System.

توسعه‌ی سیستم عرضه‌ی انرژی، یکی از عناصر مهم مطالعه‌ی بهره‌وری انرژی است. نشر آلاینده‌ها در هر مرحله از سیستم انرژی تابعی از سطح فعالیت تکنولوژی، است که در مدل سیستم انرژی با رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود، لذا با وارد کردن ضرایب پخش و هزینه‌های خارجی ناشی از نشر یک واحد از آلاینده‌های مختلف مانند CO_2 ، امکان محاسبه‌ی هزینه‌های خارجی ناشی از نشر هر آلاینده وجود دارد، که در راستای هدف مدل این هزینه‌ها حداقل می‌شوند. در این مدل امکان اعمال محدودیت در نشر آلاینده‌ها برای هر منطقه نیز وجود دارد (سبوحی، ۲۰۰۴).

$$P_{xrt} = \sum_s p_{xsrt} * X_{srt} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

که در آن P_{xrt} ، میزان نشر آلاینده‌ی x در حجم کنترل s در منطقه‌ی r در نقطه‌ی زمانی t ، p_{xsrt} ، ضریب پخش آلاینده‌ی x و X_{srt} متغیر حالت از حجم کنترل s ، یعنی سطح فعالیت تکنولوژی s در منطقه‌ی r و نقطه‌ی زمانی t است.

محاسبه‌ی هزینه

هدف مدل، تعیین ساختار بهینه‌ی خدمات عرضه‌ی انرژی آینده در راستای حداقل کردن هزینه‌ی کل سیستم شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، عملیاتی و تعمیر و نگهداری و... است، رابطه‌ی (۲) هزینه‌ی کل سیستم را نشان می‌دهد که در راستای هدف مدل باید حداقل شود.

$$Z=K+M+C+R+E \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که در آن Z ، K ، M ، C ، R و E به ترتیب ارزش کنونی کل هزینه‌های سیستم عرضه‌ی انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌ی منابع و هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها هستند.

قیدها

قیدها، به‌منظور حاصل شدن حل، تحت مفاهیم فیزیکی در مدل، در نظر گرفته می‌شوند.

۳- نقش درخت در کاهش گاز دی‌اکسید کربن

روش مهم به‌منظور کاهش نشر کربن، احیای جنگل و جنگل‌کاری است که تجمع کربن در رویش درختان، بیومس و ... را نتیجه می‌دهد. جداسازی کربن به وسیله‌ی درختان از اتمسفر، تابعی از زمین مصرف شده، زمان رشد و پیشرفت تکنولوژیکی بوده و لحظه‌ای است، بدین معنا که با تکامل درختان، آهنگ جداسازی کاهش می‌یابد. باید در نظر داشت که چون جنگل‌ها مستعد آتش‌سوزی و خطرات طبیعی هستند، بنابراین استراتژی‌های جداسازی کربن در درختان مملو از ریسک نشستی کربن نیز هست.

درختان، CO_2 موجود در اتمسفر را طی فرآیند فتوسنتز می‌گیرد و آن را در بیومس موجود (بخش‌های چوبی و غیر چوبی) ذخیره می‌کند. بخشی از بیومس جنگل بعد از برداشت به محصولات چوبی تبدیل می‌شوند، که این محصولات دارای عمر بلند یا کوتاه‌اند. سرانجام محصولات چوبی واپاشی شده و CO_2 را به اتمسفر رها می‌کنند. بخشی از بیومس به عنوان حامل انرژی به پلنت تبدیل انتقال می‌یابد و یا در بخش خانگی به عنوان انرژی نهایی استفاده می‌شود. شایان ذکر است که با مصرف بیوانرژی، CO_2 به میزان CO_2 ذخیره شده در بیومس به اتمسفر رها می‌شود و به همین دلیل حامل انرژی بیومس را با نام خنثایی کربن نیز می‌شناسند. بخشی از زائدات چوبی و غیر چوبی مرده در هر برداشت نیز به وسیله‌ی میکروارگانیزم‌ها به CO_2 تجزیه می‌شوند. بر طبق این چرخه حوض‌های مختلف اکوسیستم خاکی عبارتند از:

حوض کربن بیومس

حوض‌های بیومس به کربن ذخیره شده در گیاهان زنده اشاره دارند که شامل بخش‌های مختلف یک درخت مانند تنه، شاخه‌ها، برگ‌ها و ریشه‌ها هستند. در گزارشات IPCC، دو روش برای برآورد میزان انباشت کربن در بیومس و به دنبال آن محاسبه‌ی مزایای کربن وجود دارد.

۱- روش تغییر انباشت

این روش تغییرات خالص در تجمعات کربن در یک پریود زمانی معین را برآورد می‌کند و هنگامی قابل اجراست که جنگل‌ها تنها برای مقاصد جداسازی کربن کاشته شده و هرگز برداشت نمی‌شوند.

۲- روش ذخیره‌ی میانگین

این روش هنگامی قابل اجراست که جنگل‌ها کاشت، برداشت و دوباره کاشته می‌شوند، بنابراین انباشت کربن در بیومس درخت تا لحظه‌ی برداشت مثلاً ۲۰ سال، افزایش یافته و بعد از برداشت، بیومس کربن صفر می‌شود. بعد از آن درختان دوباره کاشته شده و روند فوق ادامه می‌یابد.

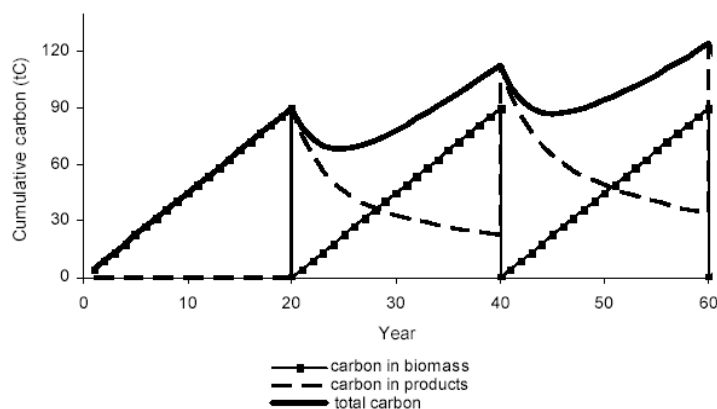
حوض کربن محصولات

بعد از هر پریود برداشت، کربن از حوض بیومس رها شده و در حوض محصولات ذخیره می‌شود. این ذخیره‌سازی بعد از برداشت در محدوده‌ی وسیعی از محصولات که در دو گروه طبقه‌بندی شده‌اند، رخ می‌دهد:

۱- محصولات با عمر طولانی شبیه مبلمان، مواد ساختمانی و شاخه‌های کلفت و ضخیم

۲- محصولات با عمر کوتاه و ضایعات چوبی مانند کاغذ، برگ‌ها، شاخه‌های نازک و ضایعات ایجاد شده در طول برداشت، برش چوب، پردازش و ساخت محصول.

انباشت کربن در محصولات جنگل بعد از برداشت اول، شروع می‌شود. سپس محصولات واپاشی شده و کربن در محصولات به صورت نمایی کاهش می‌یابد. هنگام برداشت دوم، یک تجمع جدید وارد حوض محصولات می‌شود، که به تجمع باقیمانده از برداشت اول اضافه می‌شود. شکل (۱)، پروفیل زمانی جداسازی کربن در بیومس به روش ذخیره‌ی میانگین و محصولات جنگل را برای یک رویش نشان می‌دهد. در این شکل، تجمع کل کربن برابر با جمع کربن در بیومس و محصولات است و بازه‌ی دوره‌ای ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- انباشت کربن در بیومس و محصولات جنگل (بنیتز- پونس، ۲۰۰۵ و بنیتز، ۲۰۰۳)

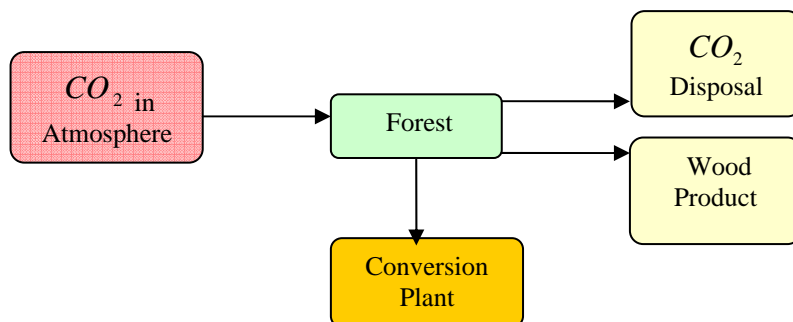
حوض کربن بیوانرژی

سوخت‌های بیومس برخلاف سوخت‌های فسیلی، به عنوان خنثایی- کربن شناخته شده‌اند، زیرا با مصرف بیوانرژی، CO_2 به میزان CO_2 ذخیره شده در بیومس به اتمسفر رها می‌شود.

۴- توسعه‌ی جنگل کاری در مدل سیستم انرژی

به منظور توسعه‌ی جنگل کاری در مدل سیستم انرژی، جنگل به صورت مخزنی در نظر گرفته می‌شود و چرخه‌ی کربن مذکور در بخش ۳، به صورت شکل (۲) به نمودار مرجع انرژی اضافه می‌شود. معادلات و قوانین جنگل کاری را می‌توان به عناصر زیر تقسیم کرد:

- خالص ارزش کنونی احداث جنگل
- جداسازی کربن در اکوسیستم خاکی
- محدودیت حاکم بر جنگل کاری
- موازنه‌ی جرم دی‌اکسید کربن



شکل ۲- چرخه‌ی کربن اعمال شده در مدل سیستم انرژی (بارال^۱، ۲۰۰۴ و دی آنجلس^۲، ۲۰۰۵)

خالص ارزش کنونی احداث جنگل

به منظور برآورد هزینه‌ها، یک شبکه‌ی جغرافیایی همگن که به سلول‌هایی با اندازه‌ی معین تقسیم شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و بعد از آن هزینه‌های جداسازی کربن برای هر سلول از شبکه براساس برآوردهایی برای سوددهی اولیه‌ی خالص، هزینه‌های کاشت، هزینه‌های موردانتظار زمین و چوب و ذخیره‌سازی کربن در محصولات ارزیابی می‌شود. بر این اساس خالص ارزش کنونی احداث جنگل برای هر بازه‌ی دوره‌ای و برای یک سلول مانند i که با f_i نمایش داده می‌شود، شامل هزینه‌های کاشت در سلول i (cp_i)، ارزش کنونی الوار و ارزش کنونی مزایای کربن در سلول i (B_i) است که با روابط (۳) و (۴) معادل است (حمیدی‌نژاد (۱۳۸۵) و بنیتز، ۲۰۰۶).

$$f_i = -cp_i + pw_i \cdot V_i \cdot (1+r)^{-R_i} + B_i \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

$$f_i = -cp_i + (pw_i - Chi) \cdot V_i \cdot (1+r)^{-R_i} + B_i \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

عبارت دوم در روابط فوق بیانگر ارزش کنونی الوار در سلول i است که در آن r نرخ تنزیل، pw_i قیمت الوار قبل از قطع درخت، R_i مدت دوره، V_i حجم الوار و Chi هزینه‌ی برداشت به ازای هر واحد الوار در سلول i است.

1 - Baral.

2 - De Angelis.

به‌منظور برآورد ارزش کنونی مزایای کربن، مزایای کربن در بیومس و مزایای کربن در محصولات مدنظر و با رابطه‌ی (۵) متناسب است (بنیتیز، ۲۰۰۶):

$$B = pc \sum_{t=1}^R \omega(1+r)^{-t} - pc \cdot \omega \cdot R(1+r)^{-R} + pc \cdot \theta \cdot \omega \cdot R(1+r)^{-R} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این مطالعه، جذب کربن به صورت یک اثر خارجی مثبت و مزایای آن به عنوان تابعی از آهنگ تغییرات بیومس یا حجم الوار سراسر زمان در نظر گرفته شده است. اگر رشد درختان با یک تابع خطی بیان شود و ω جذب سالیانه کربن باشد، ارزش کنونی از مزایای جذب کربن تحت یک دوره با عبارت اول رابطه‌ی فوق معادل است، که pc قیمت کربن یا مقدار هزینه‌ی خارجی مطلق از کربن می‌باشد و از سویی کربن که در طول برداشت رها می‌شود، دارای یک اثر خارجی منفی است و هزینه‌های آن تابعی از مقدار بیومس یا حجم الوار بازیافتی از جنگل هستند. کربن ذخیره شده در انتهای دوره‌ی $\omega \cdot R$ است که در هنگام رهایی آنی کربن، یعنی وقتی جنگل در سایت می‌سوزد، $\omega \cdot R$ تن از کربن به اتمسفر رها می‌شود. در این حالت، عبارت دوم رابطه‌ی فوق هزینه‌های کربن در طول برداشت را بیان می‌کند.

در عمل همه‌ی کربن دفع شده از جنگل، بلافاصله به اتمسفر رها نمی‌شود، بلکه بخشی از آن، (θ) ، برای پریود طولانی خارج از اتمسفر ذخیره می‌شود. این ذخیره‌سازی می‌تواند بعد از برداشت در بازه‌ی وسیعی از محصولات که در دو گروه محصولات با عمر طولانی و محصولات با عمر کوتاه طبقه‌بندی شده‌اند، رخ دهد، که عبارت سوم ارزش کنونی مزایای کربن ناشی از ذخیره‌ی آن در محصولات بلندعمر و کوتاه‌عمر است. بنابراین پارامتر θ در رابطه‌ی فوق به صورت تابعی از آهنگ واپاشی محصولات جنگلی k_1 و k_2 به ترتیب بلندمدت و کوتاه مدت به شکل زیر در نظر گرفته شده است (بنیتیز، ۲۰۰۶).

$$\theta = 1 - \frac{k_1}{k_1 + r} \phi - \frac{k_2}{k_2 + r} (1 - \phi) \quad \text{رابطه (۶)}$$

آهنگ واپاشی نیز براساس نیمه‌ی عمر محصولات الوار، $t_{1/2}$ ، به صورت زیر قابل تعریف است (بنیتیز، ۲۰۰۶).

$$k = \ln(2) / t_{1/2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه‌ی (۶)، ϕ به عنوان کسری از بیومس که در محصولات بلندعمر ذخیره شده است، در نظر گرفته می‌شود. به منظور حداقل کردن خالص ارزش کنونی جنگل‌کاری، معادله‌ی (۳) یا (۴) به تابع هدف در مدل سیستم انرژی اضافه می‌شود.

جداسازی کربن در اکوسیستم خاکی، یعنی جنگل

با توجه به نکات ذکر شده در بخش ۳، جداسازی کربن در جنگل دارای دو مؤلفه‌ی زیر است:

- جداسازی کربن در بیومس و

- جداسازی کربن در محصولات

و از سویی برآورد میزان کربن ذخیره شده مستلزم کسر کردن سطح کربن در حالت پایه پروژه است، که برای نمایش کربن ذخیره شده در حالت پایه در جنگل از کسر b_i استفاده می‌شود که b_i بیانگر نسبت کربن ذخیره شده در جنگل در حالت پایه به کل کربن ذخیره شده در جنگل است. هم‌چنین از آن جا که جداسازی تنها در سلول‌هایی رخ می‌دهد که حداقل قیمت کربن آن‌ها (pc_i) از قیمت بازار (pc^*) کم‌تر است، بنابراین میزان کربن جدا شده در هر زمان معین در تمام سلول‌های قابل دسترس، در صورتی که قیمت کربن در بازار یک مقدار مشخص (pc^*)، را دارا باشد، با رابطه‌ی (۸)، بیان می‌شود (بنیتز، ۲۰۰۶).

$$C_{T=} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K A_{i,k} (1-b_i) (C_{i,k,T}^b + C_{i,k,T}^p) \quad \forall i | pc_i < pc^* \quad (8) \text{ رابطه‌ی (۸)}$$

که در آن $A_{i,k}$ ، بیانگر مساحت متعلق به رویش نوع k در سلول i است.

رابطه‌ی (۹)، بیانگر انباشت کربن در بیومس می‌باشد (بنیتز، ۲۰۰۶):

$$C_{i,k,T}^b = \omega_i (T - tp_{i,k}) - h_{i,k,T} \cdot \omega_i \cdot R_i \quad (9) \text{ رابطه‌ی (۹)}$$

ترم اول معادله‌ی فوق جذب کربن در طول فاز رشد و ترم دوم، رهایی کربن در طول برداشت را نشان می‌دهد و $h_{i,k,T}$ تعداد پرپوده‌های برداشت است که در زمان T برای رویش معین k رخ داده و عدد صحیح می‌باشد و $tp_{i,k}$ بیانگر زمانی است که رویش k از سلول i کاشته شده است.

انباشت کربن در محصولات نیز جمعی از کربن ذخیره شده در محصولات با عمر کوتاه و بلند برای یک رویش معین از دوره‌های مختلف است که با رابطه‌ی (۱۰)، نشان داده می‌شود (بنیتز، ۲۰۰۶):

$$C_{i,k,T}^P = \sum_{s=1}^{h_{i,k,T}} \{ \varphi_i \cdot \omega_i \cdot R_i \cdot e^{-k_1(T-s,R_i)} + (1-\varphi_i) \cdot \omega_i \cdot R_i \cdot e^{-k_2(T-s,R_i)} \} \quad (10) \text{ رابطه‌ی}$$

که در آن، s تعداد دفعات برداشت در مدت زمان معین T است.

قید

قید برای تولید جنگل به اندازه‌ی نیاز یا به عبارتی به منظور جلوگیری کردن از تولید اضافی جنگل مطابق رابطه‌ی (۱۱) باید اعمال شود.

$$m_1 - \alpha \geq 0 \quad (11) \text{ رابطه‌ی}$$

در رابطه‌ی فوق m_1 مقدار CO_2 ورودی به جنگل و α بیانگر آن مقدار CO_2 است که توسط جنگل جذب می‌شود. در این رابطه علامت مساوی بیان می‌کند که تمام CO_2 ورودی به جنگل توسط جنگل جذب شده است، به عبارت دیگر جنگل، ظرفیت جداسازی تمام CO_2 ورودی را دارد.

موازنه‌ی جرم کربن

در چرخه‌ی کربن شکل (۲)، منظور کردن موازنه‌ی جرم دی‌اکسیدکربن تحت رابطه‌ی (۱۲) لازم است:

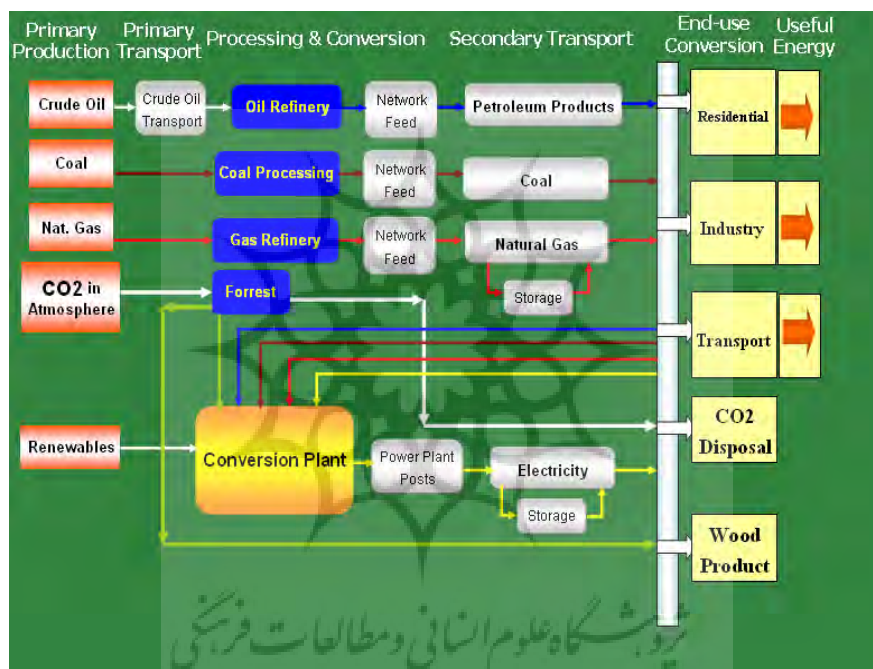
$$m_1 = m_2 + C_T \quad (12) \text{ رابطه‌ی}$$

m_2 ، بیانگر CO_2 خروجی از جنگل تحت عمل تنفس و واپاشی و C_T با رابطه‌ی (۸) معادل است.

۵- به کارگیری مدل فوق در یک مطالعه‌ی موردی

برای تست روش فوق، چرخه‌ی کربن مذکور به ساختار سیستم انرژی، اضافه و ساختار کلی در شکل (۳) در نظر گرفته شده است. این ساختار نمونه، جریان انرژی را از سطح تولید اولیه یا منابع تحت سطوح انتقال اولیه، فرآورش و تبدیل شبکه، انتقال و ارسال ثانویه و توزیع به مصرف‌کننده‌ی نهایی نمایش می‌دهد. در هر سطح از دیاگرام

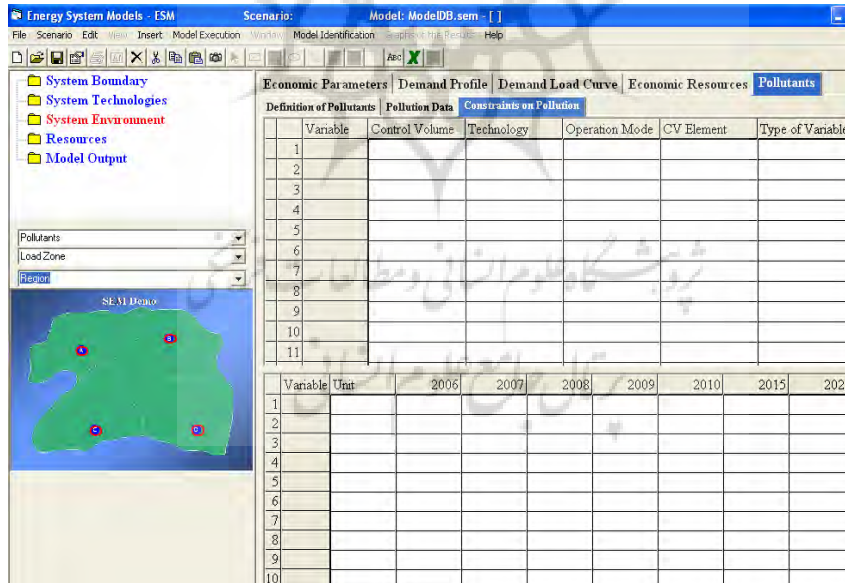
جریان انرژی، از مفهوم حجم کنترل استفاده شده است، که می‌توان برای هر حجم کنترل تکنولوژی‌های متفاوتی را تعریف کرد. جریان انرژی در سطوح مختلف دیاگرام با نشر آلاینده‌های زیست محیطی مانند CO_2 همراه است. با پیاده‌سازی فرمولاسیون چرخه‌ی کربن در مدل سیستم انرژی همانند آن‌چه که در بخش قبل شرح داده شد، می‌توان بخش بزرگی از CO_2 موجود در اتمسفر ناشی از بخش انرژی را جذب و روش طراحی شده را ارزیابی کرد.



شکل ۳- ساختار سیستم انرژی با در نظر گرفتن چرخه‌ی کربن

به منظور ارزیابی روش فوق، در نرم‌افزار، یک نمونه‌ی فرضی مطالعاتی برای ۴ منطقه‌ی جغرافیایی در نظر گرفته شده است، در گام اول، داده‌های فنی و هزینه‌ای هر کدام از تکنولوژی‌های انرژی با توجه به فرمول‌بندی مسئله وارد می‌شود. از آن‌جا که نشر آلاینده‌ها در سیستم عرضه‌ی انرژی در مراحل مختلف دیاگرام جریان انرژی رخ می‌دهد، لذا در سناریوی اول ضرایب انتشار آلاینده‌ها به ازای یک واحد فعالیت هر

تکنولوژی، برگرفته از مرجع وزارت نیرو (۱۳۸۶)، تعریف می‌شود، تا به این صورت میزان انتشار آلاینده‌های مختلف در سیستم انرژی مشخص شود، آن‌گاه مدل اجرا می‌شود. با توجه به آن‌که اعمال قیدها و هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها، اثر مهمی بر روی مجموعه‌ی نقاط موجه سیستم عرضه انرژی دارد، بنابراین تحلیل اثر آلاینده‌ها و هزینه‌های خارجی مربوط به آن‌ها در توسعه‌ی سیستم عرضه انرژی، عنصر مهمی از مطالعه‌ی یوتیلیتی انرژی است، لذا در گام بعدی یا سناریوی دوم داده‌های مربوط به هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها در مدل وارد می‌شود. هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده‌ها بر اساس مطالعات بانک جهانی از مرجع وزارت نیرو (۱۳۸۶)، استنتاج شده‌اند. به این صورت هزینه‌ی خارجی آلاینده‌ها نیز به تابع هدف اضافه می‌شود و بنابراین با توجه به منطق توضیح داده شده، این مدل می‌تواند ساختار بهینه‌ی خدمات عرضه‌ی انرژی را در راستای حداقل کردن هزینه‌ی کل سیستم بیابد و میزان نشر گازهای آلاینده مانند CO_2 را در ساختار نمونه و در مناطق مفروض پیدا کند. شکل (۴)، منوهای مربوط به نحوه‌ی تعریف کردن ضرایب پخش و هزینه‌های خارجی آلاینده‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- منوی مربوط به وارد کردن ضرایب پخش و هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها

مرحله‌ی آخر یا سناریوی سوم، مربوط به وارد کردن داده‌های چرخه‌ی کربن در مدل است. در این مرحله ابتدا تکنولوژی‌های مختلف در چرخه‌ی کربن و جریان ورودی و خروجی آن تعریف می‌شود و سپس داده‌های فنی و هزینه‌ای مربوط به این تکنولوژی‌ها اعمال می‌شود.

هزینه‌ی عملیاتی دربرگیرنده‌ی مزایای الوار، منهای هزینه‌ی برداشت الوار است، که یا به محصولات با طول عمر بلند و کوتاه تبدیل و یا در بخش انرژی و خانگی به عنوان بیوانرژی استفاده شده‌اند، این هزینه با منهای مقدار ترم دوم در رابطه‌ی (۴)، معادل و برابر با ۵۰۰ دلار بر هکتار بر سال است (بنیتر، ۲۰۰۶).

با منفی گرفتن ضریب انتشار در توسعه‌ی جنگل برابر با ۲- گرم بر وات سال، مزایای حاصل از جذب کربن در رشد جنگل در تابع هدف منظور می‌شود و با مثبت گرفتن ضریب انتشار CO_2 در جذب CO_2 برابر با ۱ گرم بر وات سال، هزینه‌های حاصل از انتشار CO_2 در هنگام برداشت نیز در بخش هزینه‌ی خارجی تابع هدف مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

برای کسر میزان CO_2 جدا شده از اتمسفر توسط جنگل نیز مقدار ضریب پخش CO_2 در توسعه‌ی جنگل مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین میزان CO_2 جذب شده توسط جنگل از مقدار CO_2 موجود در جو کسر و آن‌گاه مدل اجرا می‌شود. در مجموع نرم‌افزار با توجه به تابع هدف و محدودیت‌های حاکم بر آن، بهترین نقطه را انتخاب می‌کند و به این ترتیب بهترین ساختار عرضه‌ی انرژی حاصل می‌شود.

داده‌های مربوط به میزان کربن ورودی یا میزان کربنی که جنگل از اتمسفر می‌گیرد با علامت منفی و میزان خروجی از سیکل جنگل به اتمسفر، با علامت مثبت در نظر گرفته شده است. هم‌چنین داده‌های مربوط به مزایای جذب CO_2 ، با علامت منفی و هزینه‌های انتشار CO_2 با علامت مثبت در تابع هدف وارد می‌شوند.

۶- نتایج به‌دست آمده از سناریوهای مختلف

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، در این مثال سه سناریو در نظر گرفته شده است. جدول (۱)، مشخصات مدل در سناریوهای اول و دوم را نشان می‌دهد. هزینه‌های بهینه‌ی حاصل از مدل در دو سناریوی اول و دوم نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۳)، حامل‌های انرژی اولیه‌ی گاز طبیعی و واردات نفت کوره و گازوئیل را برحسب گیگاوات سال در سال‌های مختلف در سناریوهای اول و دوم نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مدل در دو سناریوی اول و دوم

نوع	تکرارها	محدودیت‌ها	متغیرها	هزینه (Mrd.\$)
تعداد در سناریوی ۱	۳۶۲۸۳	۲۴۳۹۱	۲۸۱۴۳	۹۰/۸۳
تعداد در سناریوی ۲	۲۳۴۹	۲۴۳۹۱	۲۸۱۴۳	۹۷/۰۴

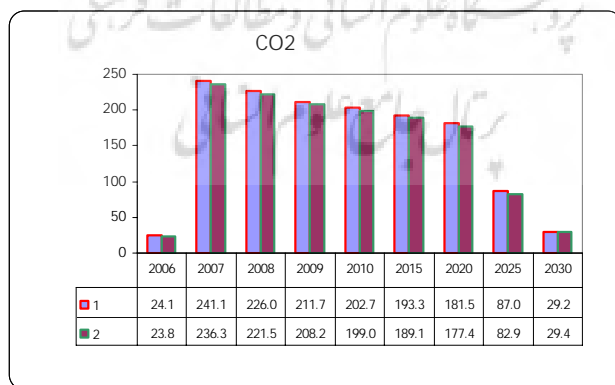
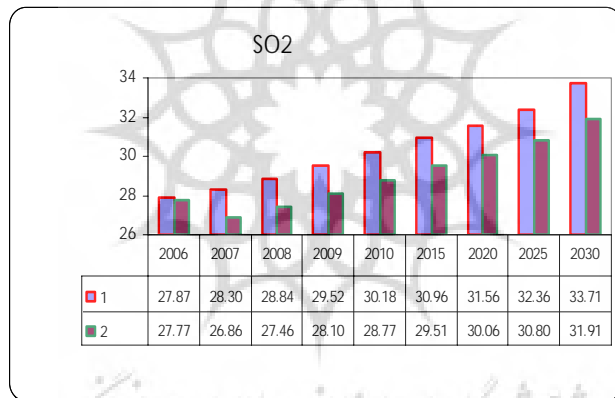
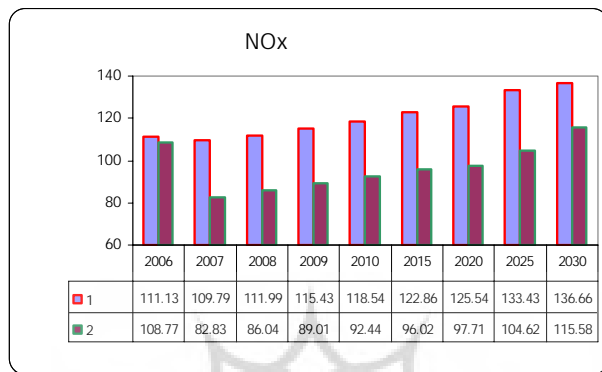
جدول ۲- هزینه‌های بهینه‌ی حاصل از اجرای مدل

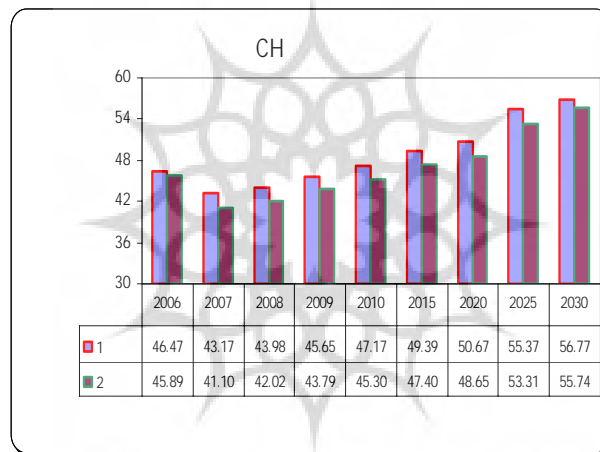
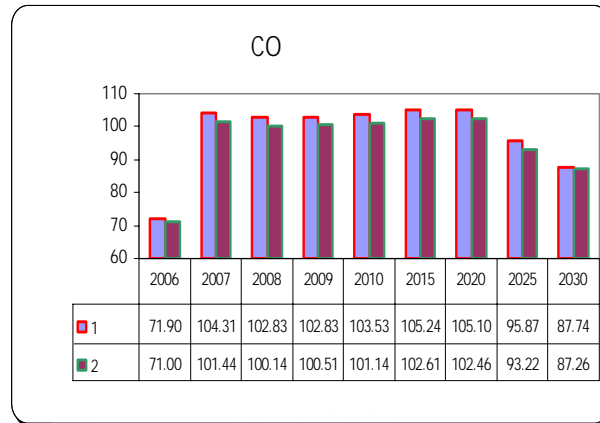
نوع هزینه	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری	هزینه‌ی جاری	هزینه‌ی منابع	هزینه‌ی آلاینده‌ها	هزینه‌ی واحد
واحد	میلیارد دلار	میلیارد دلار	میلیارد دلار	میلیارد دلار	دلار بر وات سال
سناریوی ۱	۹/۸۲	۱/۳۵	۲۷/۱۴	۰	۱/۷۲
سناریوی ۲	۹/۹	۱/۴۳	۲۷/۱۱	۲/۱۷۲	۱/۸۲

جدول ۳- حامل‌های انرژی اولیه‌ی گاز طبیعی و واردات (گیگاوات سال)

نفت گاز		نفت کوره		گاز طبیعی A-		گاز طبیعی D-		
سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۱	سناریوی ۲	
۸/۴۵	۸/۳۴	۴/۹۶	۴/۸۰	۳/۷۵	۴/۰۷	۴	۴/۰	۲۰۰۶
۶/۰۲	۵/۷۹	۴/۸۲	۲/۲۶	۱/۶۶	۴/۰۲	۴/۴۱	۵/۰	۲۰۰۷
۶/۲۰	۵/۹۸	۴/۹۵	۲/۴۹	۱/۸۷	۴/۰۷	۴/۵۱	۵/۱۲	۲۰۰۸
۶/۶۰	۶/۴۲	۵/۰۹	۲/۵۷	۱/۹۳	۴/۰۷	۴/۶۳	۵/۳۱	۲۰۰۹
۶/۹۶	۶/۷۷	۵/۲۲	۲/۷۳	۲/۰۲	۴/۰۸	۴/۷۲	۵/۴۶	۲۰۱۰
۷/۵	۷/۲۸	۵/۳۹	۲/۸۳	۲/۰۳	۴/۱۵	۴/۸۰	۵/۵۹	۲۰۱۵
۷/۸	۷/۵۹	۵/۵	۲/۸۴	۲/۰۲	۴/۱۹	۴/۹۶	۵/۸۰	۲۰۲۰
۹/۷۹	۹/۵۸	۵/۹۷	۳/۲۳	۱/۳۳	۲/۴۷	۵/۷۲	۷/۶۷	۲۰۲۵
۱۱/۰۶	۱۱/۰۶	۶/۴۵	۵/۴۵	۲/۰۱	۲/۷۹	۷/۰۶	۷/۵۹	۲۰۳۰

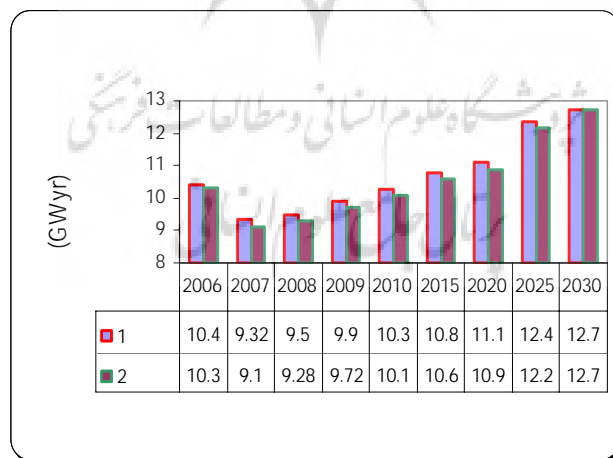
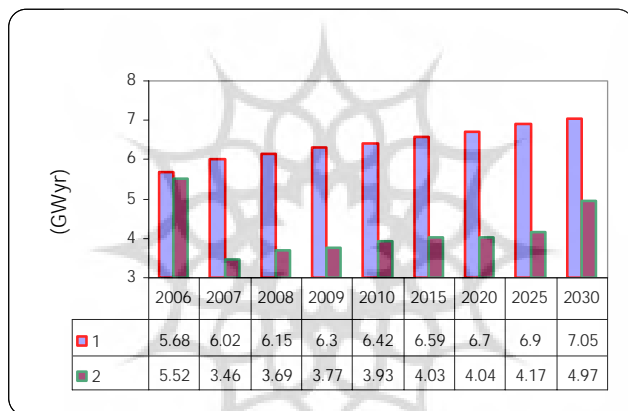
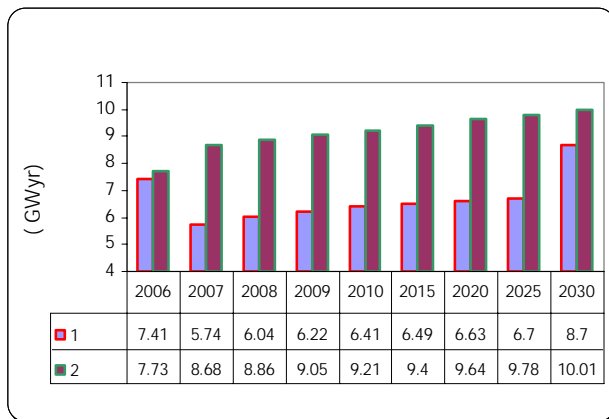
نمودارهای شکل (۵)، میزان نشر آلاینده‌های مختلف را در دو سناریوی (۱) و (۲) نشان می‌دهد.





شکل ۵- نشر آلاینده‌های مختلف برحسب هزار تن برای هر آلاینده

نمودارهای جمع انرژی ورودی به بخش مصرف‌کننده‌ی نهایی و نیروگاه‌های مربوط به دو سناریوی (۱) و (۲)، در شکل (۶) ارائه شده‌اند.



شکل ۶- انرژی ورودی به مصرف‌کننده‌ی نهایی و نیروگاه‌ها

جدول (۴)، درصد کاهش نشر آلاینده‌ها در سناریوی (۲) نسبت به سناریوی (۱) را نشان می‌دهد.

جدول ۴- درصد تغییرات انواع گازهای گلخانه‌ای در سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱

CH	CO	CO _۲	SO _۲	NO _x	گاز گلخانه‌ای
۳/۶	۲/۲	۲/۵۵	۴/۴	۱۹/۵۳	مقدار میانگین کاهش نشر

در این بخش نتایج حاصل از جنگل کاری ارائه شده است. جدول (۵) و (۶)، به ترتیب میزان نشر CO_۲ را بر حسب هزار تن و میزان CO_۲ جذب شده توسط جنگل را بر حسب تن در سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵- میزان نشر گاز گلخانه‌ای CO_۲ بر حسب هزار تن در سال

سال	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰
مقدار دقیق در سناریو ۲	۲۳/۷۷۲۷۶	۲۳۶/۳۱۲۳	۲۲۱/۵۰۴۱	۱۹۹/۰۴۷۵	۱۸۹/۰۶۸۵	۱۷۷/۳۵۳۶	۸۲/۸۶۳۴۳	۸۷/۳۹۹۹۷
مقدار در سناریو ۳ (جنگل کاری)	۲۳/۷۷۲۴۱	۲۳۶/۳۱۰۳	۲۲۱/۵۰۲۱	۱۹۹/۰۱۹۲	۱۸۹/۰۴۰۱	۱۷۷/۳۲۵۳	۸۲/۸۵۲۷۷	۸۷/۳۹۹۹۵

جدول ۶- میزان CO_۲ جدا شده توسط جنگل بر حسب تن در سال

سال	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰	۲۰۲۵	۲۰۳۰
مقدار	۰/۳۵	۲	۲	۲۸/۳	۲۸/۴	۲۸/۳	۱۰/۶۶	۰/۰۲

۷- نتیجه‌گیری

بنابر آن‌چه تاکنون بیان شد، مدل، یکی از نقاط بهینه را با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها برمی‌گزیند. با مقایسه‌ی دو سناریوی (۱) و (۲)، مشاهده می‌شود که با وارد کردن هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها، مقدار تابع یوتیلیتی به‌اندازه‌ی ۶/۲۲ میلیارد دلار افزایش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در سناریوی (۲) نسبت به سناریوی (۱)، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، جاری یا تعمیر و نگهداری و عملیاتی و هزینه‌های اجتماعی

افزایش می‌یابد، لیکن هزینه‌ی منابع با کاهش روبروست. البته این کاهش نسبت به افزایش هزینه‌های دیگر جزئی‌تر است. افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، جاری یا تعمیر و نگهداری و عملیاتی به علت جایگزینی حامل‌های انرژی است، زیرا همان‌طور که ملاحظه می‌شود واردات نفت کوره و گازوئیل کاهش می‌یابد و انرژی اولیه‌ی گازطبیعی جایگزین آن می‌شود.

موضوع مهم دیگر کاهش نشر آلاینده‌ها در سناریوی (۲) نسبت به سناریوی (۱) است، که این مهم به دلیل اعمال هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها در سناریوی (۲) و جایگزینی حامل انرژی گازطبیعی با سایر حامل‌های انرژی رخ می‌دهد. (جدول ۴) با توجه به محاسبه‌ی میزان نشر آلاینده‌ها برای تکنولوژی‌های مصرف‌نهایی و نیروگاه‌ها که مقدار آن با انرژی ورودی در این تکنولوژی‌ها برابر است، لذا کاهش نشر آلاینده‌ها، به تغییر ساختار انرژی ورودی به این بخش‌ها بستگی دارد، بنابراین ملاحظه می‌شود، ورودی نفت‌گاز و نفت‌کوره که ضرایب پخش بزرگی دارند، در سناریوی ۲ نسبت به سناریوی ۱ کم و گازطبیعی با ضریب پخش کم‌تر جایگزین آن‌ها می‌شود. تغییرات انرژی ورودی نیز به علت هزینه‌ی خارجی ناشی از آلاینده ایجاد می‌شود، که بر نقطه‌ی بهینه‌ی سیستم اثر می‌گذارد و تکنولوژی با هزینه‌ی کم‌تر را برمی‌گزیند. از آن‌جا که مصرف نفت‌گاز در سال ۲۰۰۷ دارای مقدار حداقل است و چون بزرگ‌ترین ضریب پخش NO_x و SO_2 را داراست، نمودار نشر آلاینده‌ی NO_x ، SO_2 در سال ۲۰۰۷، یک مقدار حداقل را نشان می‌دهد.

در آخر نیز مشاهده می‌شود که با انجام عملیات جنگل‌کاری در سناریوی ۳، میزان نشر گاز CO_2 در این سناریو نسبت به سناریوی ۲ کم‌تر می‌شود، که اختلاف بین این دو حالت به عنوان انباشت و تجمع CO_2 در جنگل بیان شده است. با توجه به مجموع آن‌چه در شرح روش‌شناسی مسئله و فرمولاسیون آن در چارچوب مدل سیستم انرژی بیان شد، مهم‌ترین ویژگی‌های به کار گرفته شده در این تحقیق عبارتند از:

۱. ارائه‌ی روش سالم‌سازی محیطی بر مبنای برنامه‌ریزی ریاضی.
۲. توسعه‌ی جنگل‌کاری در مدل‌های انرژی.
۳. امکان ارزیابی رقابت روش سالم‌سازی محیطی با روش‌های دیگر کاهش.
۴. ارزیابی پتانسیل کاهش نشر.

۵. اعمال محدودیت‌های فنی و هزینه‌ای در فرمولاسیون.
۶. عملیاتی کردن روش سالم‌سازی محیطی به صورت یک نرم‌افزار بهینه‌سازی.
۷. امکان مقایسه‌ی خالص ارزش کنونی از مصارف مختلف زمین مانند کشاورزی، مراتع با جنگل کاری و احیای جنگل.

فهرست منابع

حمیدی‌نژاد، عطیه (دی ۱۳۸۵)، ارزیابی سیستم‌های کنترل آلودگی محیط‌زیست و تأثیرات آن‌ها بر توسعه‌ی سیستم انرژی و مطالعه‌ی موردی: جنگل کاری و جذب دی‌اکسید کربن، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف.

وزارت نیرو، معاونت امور انرژی، زمستان ۱۳۸۶، ترازنامه‌ی انرژی سال ۱۳۸۵، انرژی و محیط زیست.

Alexandrov G. A, Yamagata Y, Oikawa T, 1 June 1999. Towards a model for projecting Net Ecosystem Production of the world forests; Ecological Modelling 123.183-191.

Baral Anil, Guha Gauri S, 2004. Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit; Biomass and Bioenergy 27, 41-55.

Benitez P.C., Obersteiner M., June 2003. The Economics of Including Carbon Sinks in Climate Change Policy, Evaluating the carbon supply curve through afforestation in Latin America.

Benitez Pablo, McCallum Ian, Obersteiner Michael and Yamagata Yoshiki, 2004 . Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost afforestation Sites Under Country Risk Considerations.

Benitez-Ponce Pablo Cesar, 2005. Essays on the Economics of Forestry-Based Carbon Mitigation.

Benitez Pablo C., Obersteiner Micheal, 2006. Site identification for carbon sequestration in Latin America: A grid-based economic approach; Forest Policy and Economics 8, 636-651.

De Angelis Paolo, Grego Stefano, 2005. Responses of soil biological processes to elevated atmospheric [CO₂] and nitrogen addition in a poplar plantatin.

Energy Information Administration (March 2003), The National Energy Modeling System: An Overview 2003, Washington.

Loulou Richard, Goldstein Gary, Noble Ken ,October 2004, Documentation for the Markal Family of models: Standard Markal, <http://www.etsap.org/documentation.asp>

Loulou Richard, Remne Uwe, Kanudia Amit, Lehtila Antti, Goldstein Gary, April 2005, Documentation for the Times Model, <http://www.etsap.org/documentation.asp>

Manne Alan S., Richels Richard G. (June 2004), MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change.

McKenney Daniel W, Yemshanov Denys, Fox Glenn, Ramlal Elizabeth, 2004. Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada; Forest Policy and Economics 6, 345-358.

Rodriguez Sandra I., Roman Matthew S., Sturhahn Samantha C. & Terry Elizabeth H. (April 2002), Sustainability Assessment and Reporting for the University of Michigan's Ann Arbor Campus, A report of the Center for Sustainable Systems, Report No. CSS02-04

Saboohi Y, Energy System Model, ESM, Sharif Energy Research Institute, February 2004.

Yamagata Yoshiki, Georgii, A. Alexandrov, 2001. Would forestation alleviate the burden of emission reduction? An assessment of the future carbon sink from ARD activities; Climate Policy 1, 27- 40.