Archive of SID

مدل مارکال در مدلسازی سیستم‌های انرژی

ابوالفضل آقاسی[1]، لیلا وفاجو[2*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۹

پیام نگار: **vafajoo@azad.ac.ir**

چکیده

کمبود عرضه انرژی اولیه، امنیت انرژی، حفاظت از محیط زیست و اثرگذاری بر تغییرات اقلیم، چالش‌های پیش روی آینده انرژی جهان خواهند بود که در جهت پاسخ به تقاضای انرژی، چگونگی مهار انتشار کربن، بیش از هر چیز اهمیت دارد. در همین راستا، از مدلسازی سیستم‌های انرژی به منظور پیش‌بینی روند جاری سیستم‌های انرژی و بررسی آثار بلندمدت اعمال سیاست‌های مختلف بر هر سیستم استفاده می‌شود. درمیان مدل‌های ارائه شده، مارکال یک مدل سیستم انرژی برای ارزیابی سیاستگذاری‌های این بخش است که می‌تواند در سطح ملی، ایالتی یا محلی اعمال شود. این مدل که در این تحقیق بررسی شده است، این قابلیت را دارد که روابط پیچیده یک سیستم انرژی و حالت رقابتی بین منابع و فناوریهای بخش‌های تبدیل و مصرف را با در نظر گرفتن آثار زیست محیطی آنها به خوبی در خود جای دهد.

کلیدواژه‌ها: مدلسازی سیستم انرژی، برنامه‌ریزی انرژی، مدل مارکال، مدیریت محیط زیست

۱- مقدمه

انرژی، یکی از ورودیهای اولیه برای توسعه اقتصادی و اجتماعی هر منطقه به شمار می‌آید که فعالیت‌های مربوط به تولید، انتقال و مصرف آن نسبت به سایر فعالیت‌های بشر، بر محیط زیست تأثیر بیشتری می‌گذارد. امروزه، امور اقتصادی، مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به کنترل‌های زیست محیطی به یک موضوع اصلی در سیاست‌گذاری‌ها و وضع قوانین ملی و منطقه‌ای تبدیل شده است. اما در این میان، موضوعی که بیش از هرچیز توجه همگانی را به خود جلب کرده است، افزایش قیمت جهانی حامل‌های انرژی است. بنابر پیش‌بینی‌ها، بهای جهانی سوخت‌های فسیلی تا سال ۲۰۳۰ به دو برابر بهای فعلی آن افزایش یابد که این امر لزوم بهره‌گیری از ابزارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف را چند برابر می‌کند[۲و۱].

به علت رشد جمعیت، رشد اقتصادی، توسعه شهر نشینی و رونق حمل و نقل، مصرف انرژی در جهان، و در پی آن انتشار کربن، همچنان روند رو به رشد خود را حفظ خواهد کرد. براساس پیش‌بینی آژانس بین المللی انرژی[1]، تقاضای انرژی در جهان از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۳۵ در حدود ۳۶ درصد افزایش خواهد داشت، و تا سال ۲۰۵۰ تقریباً یک‌ونیم برابر می‌شود. طبق این پیش‌بینی‌ها، روند افزایش تقاضا چنان خواهد بود که مصرف انرژی در جهان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ سالانه ۱/۴ درصد و از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۵ سالانه ۰/۹ درصد افزایش خواهد یافت. فعالیت‌های انسان در جهت تبدیل انرژی، اغلب موجب انتشار کربن دی اکسید می‌شود؛ زیرا

* تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

1. International Energy Agency

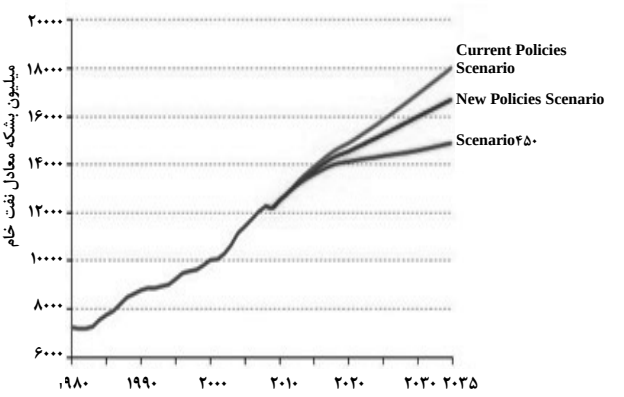
www.SID.ir

Archive of SID

حدود ۹۰ درصد انرژی پایه مورد نیاز فعالیت‌های انسان از سوزاندن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود و این سوخت‌ها بزرگترین عامل تولید کربن دی‌اکسید در سطح جهان به‌شمار می‌آیند. به‌دنبال افزایش تقاضا و مصرف انرژی در سال‌های آتی ، انتشار کربن دی اکسید طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۳۵ به میزان ۲۵ درصد رشد خواهد داشت. در شکل (۱) روند رو به رشد تقاضای انرژی تا سال ۲۰۳۵ را بر اساس راهبرد[1]های مختلف آژانس بین المللی انرژی ترسیم کرده‌ایم [۲].

راهبرد سیاست‌های جاری[2] بر اساس کلیه سیاست‌های مصوب و اتخاذ شدهٔ دولت‌ها که تا اواسط سال ۲۰۱۲ تصویب شده‌اند، طراحی شده است. مثلاً، می‌توان به دوازدهمین برنامه پنج ساله محیط زیست چین برای دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ و قوانین مربوط به تعرفه‌های انرژی تجدید پذیر در ژاپن اشاره کرد. هدف این راهبرد، پیش‌بینی بازارهای انرژی در سالهای آینده در صورت عدم تغییر الگوهای پیش‌بینی شده عرضه و تقاضای انرژی توسط دولت‌هاست. سناریوی سیاستهای جدید[3] بر پایه سیاست‌ها و خط مشی‌های موجود کشورها و تعهدات منطقه‌ای و بین‌المللی جدید طراحی شده است. این سناریو که به منظور ارائه معیاری برای ارزیابی دستاوردهای احتمالی سیاست‌های مدرن انرژی و محیط زیست تهیه‌شده، شامل مواردی از قبیل طرح‌هایی است که گروه G-۲۰ و APEC برای کاهش یارانه سوخت‌های فسیلی و برنامه‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تدوین کرده‌اند. این در حالی است که سناریوی ۴۵۰[4] شامل مجموعه قوانین و تعهدات زیست محیطی است که در صورت تحقق یافتن، در بلند مدت جهان را در مسیر کاهش دو درجه سلسیوسی از گرمایش زمین قرار می‌دهند. از پیمان نامه کیوتو[5] می‌توان به عنوان شناخته شده ترین پیمان به کار گرفته شده در طراحی این سناریو یاد کرد[۲].

از سوی دیگر، این روزها انتشار گازهای گلخانه‌ای[6] ناشی از فعالیت‌های انسانی، به یکی از بزرگترین معضلات زیست محیطی در سطح جهان تبدیل شده است. انتشار بی رویه این گازها موجب تغییرات اقلیمی و گرم شدن نامتعارف زمین می‌شود. مشکل گرمایش زمین[7] یک چالش فراگیر و جهانی است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از دولت ها، اتحادیه ها، سازمان‌های غیر دولتی و طرفداران محیط زیست را به خود جلب کرده است.



شکل ۱. روند رو به رشد تقاضای انرژی تا سال ۲۰۳۵ بر اساس سناریوهای مختلف (آژانس بین‌المللی انرژی) [۲].

بنابراین، می‌توان گفت که بی تردید آینده انرژی جهان با چالش‌هایی چون کمبود عرضه انرژی اولیه، امنیت انرژی، حفاظت از محیط زیست و تأثیرگذاری بر تغییرات آب و هوایی جهان مواجه خواهد بود که در راستای پاسخ به تقاضای انرژی آینده، چگونگی مهار انتشار کربن، بیش از هر چیز اهمیت دارد. تمام مسائل یاد شده بیانگر اهمیت برنامه‌ریزی برای بخش انرژی و محیط زیست است. روبه‌رو شدن با مسائلی چون افزایش تقاضا و امنیت انرژی، بدون برنامه‌ریزی و بدون در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی امری ناممکن به نظر می‌رسد. اهمیت این موضوع از اوسط قرن گذشته میلادی توجه بسیاری از دولت‌ها و سیاستگذاران منطقه‌ای و بین‌المللی انرژی را به خود جلب کرد و در همین راستا، از مدلسازی سیستم‌های انرژی به منظور پیش‌بینی روند جاری سیستم‌های انرژی و بررسی آثار بلند مدت اعمال سیاست‌های مختلف بر هر سیستم استفاده شد. به اعتبار تحقیقات دانشگاه‌ها و مؤسسات انرژی در سراسر جهان، مدل‌های متفاوتی در این زمینه تدوین و تنظیم شده‌اند که هریک با توجه به قابلیت‌ها و امکانات خود تا حدی مورد استقبال قرار گرفته است.

1. Scenario
2. Current Account Scenario
3. New Policies Scenario
4. Scenario
5. Kyoto Protocol
6. Greenhouse Gases
7. Global Warming

www.SID.ir

Archive of SID

۲- معرفی مدل مارکال

از مدلسازی سیستم‌های انرژی به منظور ارائه چشم اندازهای گزینه‌های تأمین انرژی در بلند مدت، ارزیابی فناوری‌ها و سیاست گذاری‌های کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی بهره می‌گیرند[۳]. در این میان، MARKAL[1] یک مدل جزء به کل[2] دینامیکی است که آژانس بین المللی انرژی آن را تدوین کرده است. به بیان صریح تر، مارکال مدلی برای ارزیابی سیاستگذاری‌های بخش انرژی است که می‌تواند در سطح ملی، استانی، یا محلی اعمال شود. این مدل از یک روش قطعه قطعه[3] گسترده برای مدلسازی سیستم‌ها بهره می‌گیرد که این قابلیت به مدل امکان می‌دهد که روابط پیچیدهٔ یک سیستم انرژی و حالت رقابتی بین منابع و فناوریهای انرژی در بخش‌های تبدیل و مصرف را به خوبی در خود بگنجاند و از قابلیت ارزیابی فنی- اقتصادی- زیست محیطی سیستم‌های انرژی برخوردار است. بخش اصلی مارکال، اطلاعات آن در خصوص فناوری‌های انرژی است که شاخصه‌های سرمایه‌گذاری، بازده، ضریب ظرفیت، هزینه‌های ثابت و متغیر نگهداری، سال آغاز بهره برداری، طول عمر و ضریب آلایندگی را دربر می‌گیرد که این پارامترها با استفاده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی بهینه می‌شوند[۴].

از دیدگاه روابط ریاضی، مارکال یک مدل جامع انرژی، زیست محیطی و اقتصادی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی پویاست که بر اساس یک سیستم انرژی مرجع الگو قرار می‌گیرد و هزینه کل انرژی را کمینه می‌کند. این هزینه ممکن است ناشی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های ثابت و متغیر بهره‌برداری، و حفاظت در هر دو سوی عرضه و تقاضای انرژی باشد. این مدل، طیف وسیعی از فرآیندهای سیستم انرژی، بهره برداری، تبدیل، انتقال، توزیع، و استفاده نهایی انرژی را در بر می‌گیرد. نیز، به واسطه این مدل می‌توان هزینه فناوریهای موجود را که ممکن است در آینده پدید آیند، بهینه‌سازی کرد[۵]. مدل مارکال امکاناتی به شرح زیر را برای ارزیابان انرژی فراهم می‌آورد:

- شناسایی کم هزینه‌ترین سیستم انرژی و روش بهینه برای محدود کردن آلاینده‌های زیست محیطی
- فراهم آوردن امکانات تجزیه و تحلیل بلند مدت بر اساس سناریوهای گوناگون
- ارزیابی فناوری‌های جدید و شناسایی اولویت‌های تحقیق و توسعه
- ارزیابی نتایج وضع قوانین، مالیات‌ها و یارانه‌های بخش انرژی
- ارزیابی پروژه‌های مرتبط با انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای
- شناسایی بهترین راهبردهای سرمایه گذاری در یک سیستم انرژی بهینه
- شناسایی بهترین پاسخ‌ها به راهبردهای محدود کننده آلاینده‌های زیست محیطی با در نظر گرفتن الزامات توسعه پایدار
- امکان بررسی‌های دراز مدت ترازنامه انرژی بر اساس اهداف چسم اندازهای موجود در قالب راهبردهای مختلف
- امکان بررسی آثار برنامه‌های مدیریت بخش تقاضای انرژی
- برآورد ارزش همکاری‌های منطقه ای[۶]

استفاده از این مدل در بیش از ۴۰ کشور و ۸۰ مؤسسه در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به نتایج بسیار مطلوبی منجر شده و این مدل را بین این کشورها محبوب کرده است. از دیگر قابلیت‌های مهم مارکال می‌توان به این موضوع اشاره کرد که این مدل متغیرهای تصمیم گیری در بخش‌های تولید، تبدیل و مصرف نهایی انرژی را در بر می‌گیرد و محدودیت‌هایی نظیر تعادل انرژی، محدودیت منابع و سیاست‌های مختلف را بیان می‌کند. در مدلسازی به روش مارکال، تقاضای انرژی بخش خدمات مشخص و منحنی‌های عرضه و تقاضا برای تمام حامل‌های انرژی تعریف می‌شوند و کمینه‌سازی هزینه تولید انرژی به عنوان تابع هدف تعیین می‌شود[۷]. در نتیجه، مارکال یک مدل پرکاربرد فناوری محور برای بهینه کردن هزینه‌های انرژی است که به صورت استاندارد، علاوه بر ارائه یک چارچوب نظام‌مند[4] برای بررسی سیستم‌های انرژی، هزینه نهایی آن سیستم را کمینه می‌کند. سایر مزایای این مدل نسبت به دیگر مدل‌های سیستم انرژی را می‌توان از این قرار برشمرد که مدل مارکال کل سیستم انرژی از منابع سوخت‌های فسیلی، واردات، استخراج، تبدیل به حامل‌های انرژی

1. MARKet Allocation
2. Bottom-Up
3. Modular
4. Systematic

www.SID.ir

Archive of SID

مانند برق، گرما و هیدروژن، و مصارف نهایی را به تصویر می‌کشد؛ این مدل همچنین از قابلیت اعمال طیف وسیعی از سناریوها و محدودیتها برخوردار است، و می‌توان شاخص‌هایی اقتصادی نظیر اجرای مالیات‌ها، یارانه‌ها و نرخ بازگشت سرمایه را در چارچوب سناریوهای مختلف به مدل اعمال کرد[۸].

همانطور که بیان شد، از نقاط قوت مدل مارکال این است که جریان و مسیر حامل‌های انرژی را از انرژی اولیه تا مصرف نهایی آن نشان می‌دهد[۹]. مانند اکثر مدلهای انرژی، در مارکال نیز حامل‌های انرژی رابطهٔ بین نقاط تبدیل و مصرف انرژی را برقرار می‌کنند. در واقع، این شبکه که توسط کابر برای مدل تعریف می‌شود شامل تمام حامل‌های انرژی موجود در منابع اولیه (استخراج معادن، استخراج نفت و ...)، تبدیل و پردازش(نیروگاه ها، پالایشگاه‌ها و ...) و مصرف نهایی را دربر می‌گیرد. این مدل که بر هر دو سوی عرضه و تقاضا تمرکز می‌کند، به سیاستگذاران و برنامه‌ریزان انرژی در بخش‌های عمومی و خصوصی اطلاعات گسترده‌ای را در خصوص فناوری‌های تولید و مصرف انرژی ارائه می‌دهد و درک صحیحی را نیز در خصوص رابطه بین اقتصاد کلان و مصرف انرژی به‌دست می‌دهد.[۱]. در این مدل، علاوه بر فناوری‌های تبدیل، فناوریهای مصرف کننده انرژی نیز تعریف شده اند و مدل ترکیبی از فناوری‌ها را انتخاب می‌کند که به آن وسیله هزینه کل سیستم انرژی را کمینه می‌کند. تقاضای انرژی را می‌توان برای هر بخش درنظر گرفت (مانند تقاضای انرژی در بخش خدمات، صنعت، مسکونی، کشاورزی، حمل و نقل و...) و یا این که بر اساس نوع انرژی تقسیم بندی صورت گیرد(مانند تقاضای انرژی برای سیستم حرارت مرکزی، آب گرم، سرمایش و...)[۶].

علت محبوبیت و توسعه روز افزون این مدل را در انعطاف پذیری، قابل درک و اثبات شدن، و پویایی[1] آن برای کمک به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در بخش انرژی دانست که از آن مدلی تقاضا محور بر اساس پیش‌بینی‌های کاربر از تقاضای نهایی مواد و انرژی در همه چارچوب‌های زمانی می‌سازد. این پیش‌بینی‌ها معمولاً خروجی سایر مدل‌ها به‌شمار می‌آید یا از منابع معتبر دیگری استخراج می‌شوند. البته این سطح تقاضا احتمالا بر اساس قیمت تغییر خواهد کرد که این موضوع با استفاده از مدل‌های ترکیبی که دربارهٔ آن بحث خواهد شد، قابل تحقیق و بررسی است[۱].

1. Dynamic

۳- مدلسازی ریاضی به روش مارکال

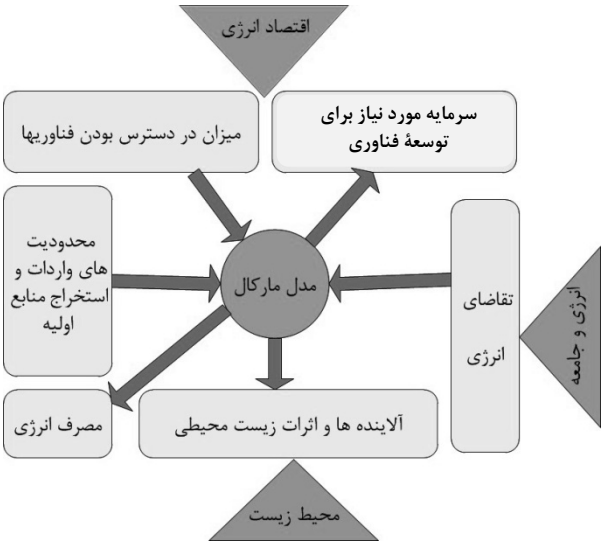
نخستین گام برای مدلسازی به روش مارکال، تهیه یک چشم انداز دقیق از سیستم انرژی مرجع (RES)[2] است. RES به عنوان شبکه‌ای از منابع و تقاضاهای انرژی تعریف می‌شود که یک طرح گرافیکی بیانگر یک مدل و عناصر و پیچیدگی‌های آن‌ها است. این RES جریان انرژی را از منابع اولیه، تبدیلات آن با فناوری‌های موجود در سیستم تا مصرف نهایی نشان می‌دهد[۶]. از آنجا که مارکال می‌تواند برای تعیین اثر یک تغییر بر هزینه کل سیستم انرژی مفید باشد، تغییر در شدت انرژی، سیستم تولید، سطوح آلایندگی، قیمت حامل‌های انرژی با توجه به تقاضا و سایر شاخصه‌های سیستم انرژی از جمله به کارگیری فنآوری‌های جدید مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، با استفاده از این مدل بخوبی قابل ارزیابی است، زیرا این مدل بهترین جریان یا خط ارتباطی بین منابع اولیه و تقاضای نهایی در یک بازه زمانی مشخص را با کمترین هزینه ممکن و با توجه به محدودیت‌ها پیدا می‌کند[۱].

مدل مارکال نیازمند سه دسته ورودی اصلی است که یکی از ورودی‌های کلیدی این مدل منحنی‌های عرضه انرژی اولیه است. ورودی مهم دیگر، هزینه انواع فناوری‌های موجود در سیستم است و ورودی کلیدی سوم شامل تصویر واضح و روشنی از زیرساخت‌های کالبدی، سیاست‌ها و محدودیت‌هاست. باید بر اساس پیش‌بینی‌های معتبر، تقاضای انرژی در آینده نیز به مدل وارد شوند[۸]. با بهره‌گیری از مدل مارکال می‌توان نیاز به عرضه انواع انرژی اولیه را با توجه به راهبردهای محتمل پیش‌بینی کرد. در واقع، در این زنجیرهٔ پیوسته، محدودیت‌های زیست محیطی بر نوع و میزان عرضه انرژی اولیه، میزان عرضه بر قیمت نهایی انرژی و قیمت انرژی بر میزان مصرف اثر می‌گذارند. با این حال، می‌توان اثر اعمال محدودیت‌های زیست محیطی را بر بهای نهایی انرژی بررسی کرد. کاهش آلایندگی تنها با افزایش بهره وری انرژی امکان‌پذیر نیست، بلکه گاه نیاز به تغییر ترکیب سوخت و پیشروی به سوی فناوری‌های تجدید پذیر خواهد داشت که به این منظور حرکت به سوی قیمت گذاری نهایی انرژی مسیری متفاوت را طی خواهد کرد[۵]. در شکل (۲) چارچوب مدل مارکال را مشاهده می‌کنید.

2. Reference Energy System

www.SID.ir

Archive of SID

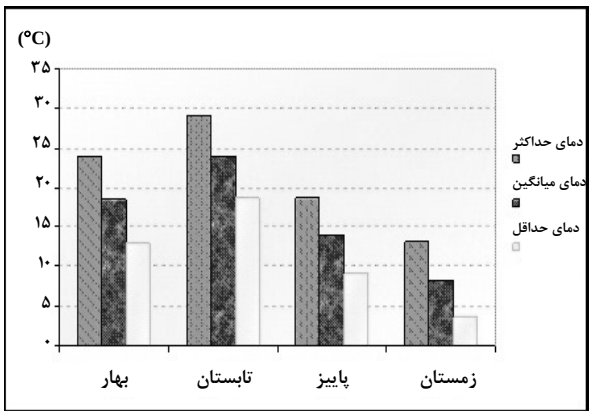


شکل۲. چارچوب مدل مارکال [۱].

همانطور که بیان شد، هدف مدل مارکال یافتن ارزش بهینه یک تابع هدف به ازای یک یا چند متغیر با در نظر گرفتن محدودیت‌هاست. محدودیت‌های موجود در سیستم شامل محدودیت‌های سیستماتیک (مانند توازن انرژی، تقاضا، شبکه و...)، سیاست‌گذاری‌ها و محدودیت‌های زیست محیطی، استانداردهای فناوری‌های موجود در سیستم، مالیات‌ها و یارانه‌ها می‌شود. در حالی که تابع هدف، هزینه کل انرژی یک سیستم انرژی در یک برنامه‌ریزی سالانه به شمار می‌آید. هزینه سالیانه شامل هزینه سرمایه گذاری، هزینه‌های ثابت نگهداری، هزینه‌های متغیر(شامل هزینه مواد و حامل‌های انرژی) و هزینه‌های زیست محیطی می‌شود. درآمدهای حاصل از فروش انرژی یا محصول از هزینه‌ها کسر می‌شوند که کاربر متعهد به وارد کردن تمام ورودی‌ها به مدل است[۶].

در مدلسازی، مشخص بودن محدوده زمانی برنامه‌ریزی مهم است و بر اساس این که برنامه‌ریزی کوتاه مدت، میان مدت یا بلند مدت در نظر باشد، یک مدل را می‌توان سال‌ها یا دهه‌های متمادی به کار گرفت؛ محدوده زمانی طولانی مدت برای بررسی راهکارهای توسعه سیستم انرژی در بلند مدت و محاسبه نحوه جبران سرمایه گذاری انجام شده روی فناوری‌ها، کاربرد خواهد داشت. هر دوره برنامه‌ریزی می‌تواند شامل چندسال و هر سال شامل چندین برش زمانی کوتاه مدت تر باشد. این کار به این دلیل انجام می‌شود که در برنامه نویسی فرض می‌شود عرضه و تقاضای انرژی در بازه زمانی تعادلی خواهد بود. مثلاً، در زمان بندی مدل مارکال در بخش برق و گرما، عموماً یک سال به شش بازه زمانی تقسیم می‌شود که برای معرفی آنها از دو شاخص بهره می‌گیرند. اول، یک سال از لحاظ دمایی به سه فصل تقسیم می‌شود که شامل فصول سرد، معتدل و گرم است. هر شبانه روز نیز به دو قسمت شب و روز تقسیم می‌شود. باید گفت که جریان‌های برق و گرما، برای این شش بازه زمانی متفاوت‌اند و به تبع آن عرضه و تقاضای سایر حامل‌های انرژی به خصوص انرژی‌های اولیه متفاوت خواهد بود.

برای درک بهتر علل تخصیص این برش‌های زمانی می‌توان از منحنی بار کمک گرفت. یکی از ورودی‌های کلیدی مدل مارکال، تقاضای انرژی بخش خدمات[1] است. اگر قرار باشد که این تقاضا با انرژی برق پاسخ داده شود، باید تقاضای برق برای این بخش برای هریک از فصول و هر زمان شبانه روز محاسبه شود. سپس عملکرد نیروگاه‌ها برای مواجه شدن با این تقاضا چنان تنظیم می‌شود که هزینه تولید برق بهینه شود. پس، از آنجا که در مدل مارکال استاندارد، یک سال به شش بازه زمانی تقسیم می‌شود، تقاضای انرژی بخش خدمات نیز در شش بازه زمانی بررسی می‌شود. در شکل (۳) می‌توان منحنی تغییرات دما را برای فصول مختلف در یک ناحیه برنامه‌ریزی مشاهده کرد که این تغییرات می‌تواند بیانگر تغییرات میزان و نوع مصرف انرژی باشد. همچنین، در شکل (۴) می‌توان منحنی بار روزانه در یک ناحیه برنامه‌ریزی را برای انواع مختلف تقاضا مشاهده کرد.

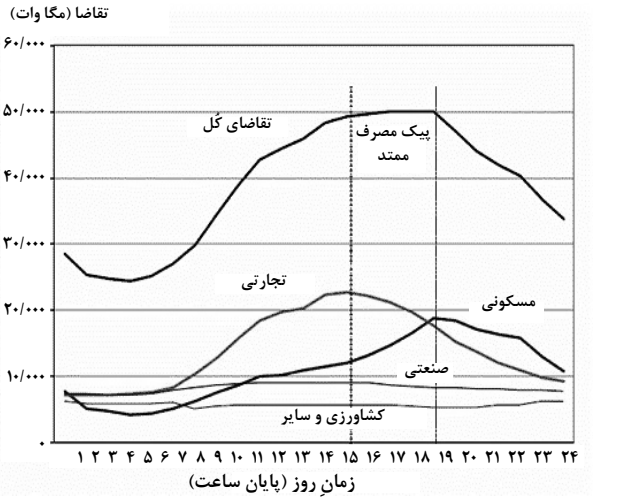


شکل ۳. تغییرات میانگین دما در طول سال در یک ناحیه برنامه‌ریزی[۱۰].

1. Energy Service Demand

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. منحنی بار روزانه در یک ناحیه برنامه‌ریزی برای انواع مختلف تقاضای برق [۱۱].

البته بر اساس تعداد پیک مصرف در منحنی بار (که در هر کشور یا ناحیه‌ای فرق می‌کند) ممکن است هر یک سال به بازه‌های زمانی کمتر و یا معمولا بیشتری تقسیم شود که در این صورت از مدل مارکال توسعه یافته استفاده خواهد شد. مثلاً در مدل مارکال بریتانیا، یک سال به ۲۰ بازه زمانی تقسیم می‌شود که شامل پنج بازه در طول شبانه روز و چهار فصل دمایی مطابق جدول (۱) است. متفاوت بودن تقاضای انرژی بخش خدمات و نیز، تغییرات زیاد تولید برق با استفاده از منابع تجدید پذیر را می‌توان از مهم ترین علل تعدد بازه‌های زمانی در مدل مارکال بریتانیا برشمرد[۸].

جدول ۱. برش‌های زمانی منحنی بار بریتانیا[۸].

بازه‌های روزانه	بازه‌های فصول گرمایی
صبح (۶ تا ۹)	زمستان (دی، بهمن، اسفند)
طول روز (۹ تا ۱۶)	بهار (فروردین، اردیبهشت، خرداد)
اوج مصرف عصر (۱۶ تا ۲۰)	تابستان (تیر، مرداد، شهریور)
شب (۲۰ تا ۲۳)	پاییز (مهر، آبان، آذر)
ذخیره‌سازی شب (۲۳ تا ۶)	-

در مجموع، می‌توان گفت که تفاوت مقدار تقاضای برخی زیر بخش‌ها که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، و نیز تغییر در ترکیب فناوری‌های تولیدی، بر تعداد برش‌های زمانی اثر می‌گذارند. این زیر بخش‌ها عمدتاً شامل بخش‌های مسکونی، خدمات، حمل و نقل و صنعت می‌شوند:

الف. بخش مسکونی: انرژی مورد نیاز برای گرمایش فضای خانه و گرم کردن آب در طول روز متفاوت است، که این امر در غالب کشورهای توسعه یافته که برای تأمین گرمایش برق مصرف می‌کنند، بر منحنی تقاضای روزانه برق اثر می‌گذارد. همچنین، نیاز به انرژی گرمایی در فصول مختلف تفاوت می‌کند و برای تجهیزات سرمایشی و برخی وسایل متفرقه نیز همین وضعیت برقرار است.

ب. بخش خدمات: در بخش خدمات نیاز به سرمایش و گرمایش در فصول مربوط به خودش ظاهر می‌شوند. تقاضای برق برای روشنایی نیز با توجه به تغییر طول روز در هر فصل متفاوت است. مثلاً، در بهار و پاییز نسبتاً یکسان و در زمستان و تابستان متفاوت خواهد بود. در زمستان نیاز به روشنایی شب بیشتر است و از سوی دیگر در تابستان، برای اماکن تفریحی و تجهیزات برقی سرگرم‌کننده برق بیشتری تقاضا می‌شود.

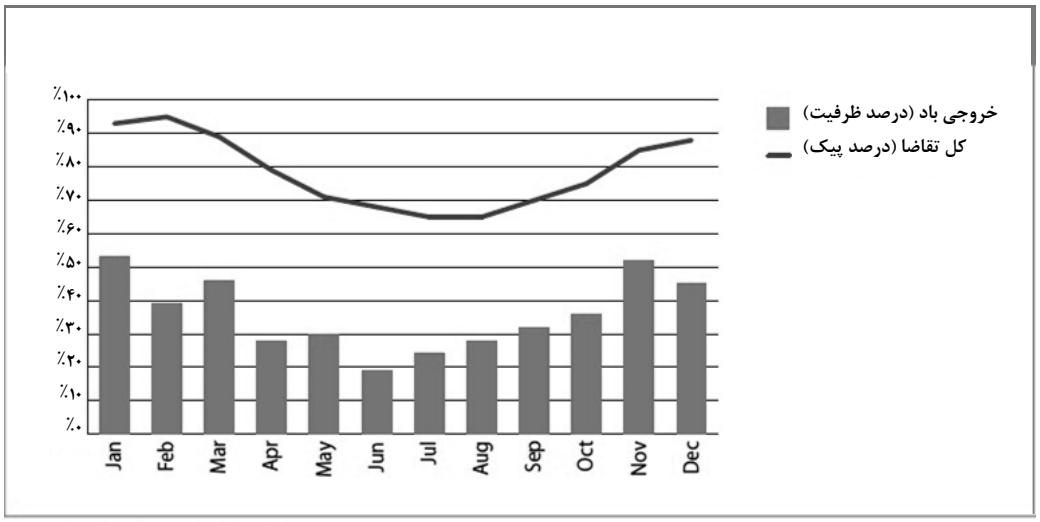
پ. بخش حمل و نقل و صنعت: ملیون‌ها وسیله نقلیه در بخش حمل و نقل و سایر بخش‌ها مشغول به فعالیت‌اند که البته جز تعداد معدودی خودروی برقی و ترکیبی[1] (دوگانه‌سوز)، سایر آنها تقاضای برق ندارند. با این حال، تغییر میزان مصرف سوخت آن‌ها بر بخش صنعت اثر می‌گذارد. در بخش صنعت، تقاضا در فصول مختلف نسبتاً ثابت است ولی در طول روز و طول شب کاملا متفاوت خواهد بود. بخصوص این که دفاتر اداری آنها در خارج از ساعات اداری تعطیل و تقاضای انرژی برق آنها به صفر نزدیک می‌شود.

علاوه بر موارد یاد شده، تغییرات ظرفیت تولید انرژی از منابع تجدید پذیر در فصول مختلف نیز از جمله موارد مهم در مدلسازی و در مدل مارکال توسعه یافته است. معمولاً، برای منظور کردن این مورد، مطالعات زیادی در خصوص تعیین ضریب دسترسی نیروی باد و انرژی خورشیدی در ماه‌های مختلف سال صورت می‌گیرد. از عامل میانگین ساعات تابش روزانه خورشید برای این منظور می‌توان بهره گرفت. شکل (۵)، تغییرات تولید انرژی برق از باد را در ماه‌های مختلف در یک ناحیه برنامه‌ریزی مشاهده می‌کنید.

1. Hybrid

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵. تغییرات ظرفیت تولید برق از نیروی باد در ماه‌های سال[1] [۲].

از مزایای مهم برخورداری از یک مدل با تعدد برش‌های زمانی در یک سال، این است که می‌توان ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی را بررسی کرد. یکی از پتانسیل‌های ذخیره‌سازی برق در سمت عرضه، فناوری تلمبه ذخیره‌ای است که می‌توان از طریق مدل مارکال آن را زمان بندی و برنامه‌ریزی کرد. روش یا فناوری توسعه یافته‌تر ذخیره برق، استفاده از پیل‌های سوختی مبتنی بر هیدروژن است که به کمک آن‌ها در طول شب با تولید هیدروژن می‌توان انرژی برق را ذخیره کرد و در ساعات پیک مصرف از آن بهره گرفت. در سمت تقاضا نیز، ظرفیت‌های ذخیره‌سازی برق که قابل زمانبندی و برنامه‌ریزی با مدل مارکال‌اند، سیستم‌های ذخیره‌سازی برق و گرما در شب و خودروهای برقی و دوگانه‌سوز هستند[۳].

۴- بهینه‌سازی به روش مارکال

یکی از شاخصه‌های تعیین‌کننده هر فرآیند تصمیم‌گیری، بهینه‌سازی است که به عنوان انتخاب بهترین راه حل ممکن با توجه به معیارهای خاص آن فرآیند تعریف می‌شود. بهینه‌سازی،سیستم را برای رسیدن به نتایج مطلوب و انتخاب بهترین سناریو یاری می‌رساند. معیارهایی که در این نوع بهینه‌سازی به‌کار می‌روند، شامل اثر اقتصادی، اثر زیست محیطی و اثر اجتماعی‌اند که بسته به نوع تابع هدف ممکن است یکی از آن‌ها معیار اصلی قرار گیرد. در هنگام تدوین تابع هدف در مدل، از نظر ریاضی تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها ضروری خواهد بود. متغیرهای تصمیم‌گیری ابزارهایی برای رسیدن به هدف مورد نظرند و محدودیت‌ها، روابط منطقی و فیزیکی به‌شمار می‌آیند که در جهت رسیدن به هدف محدودیت ایجاد می‌کنند. طبیعی است که برای مدل‌هایی که متغیرهای زیادی دارند، از برنامه‌نویسی کامپیوتری استفاده می‌شود[۶].

تابع هدف مدل مارکال، بهای خالص عرضه (NVP)[2] تمام هزینه‌ها برای همه نواحی است. (NVP) به کمک معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$NPV = \sum_{r=1}^{R} \sum_{t=1}^{t=NPER} (1+d)^{NYRS\bullet(1-t)} + ANNCOST(r,t) + (1+(1+d)^{-1} + (1+d)^{-2} + \cdots + (1+d)^{1-NYRS)} \quad (1)$$

در این معادله، R تعداد نواحی، NPER تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی، NYRS تعداد سالهای هر دوره، ANNCOST هزینه سالانه در هر ناحیه r برای هر دوره زمانی t، و d نرخ بهره است.

هزینه سالانه در هر ناحیه، ANNCOST، بر اساس معادله (۲) تعیین می‌شود:

1. Source: CCC Calculations based on modeling by Pöyry, Nort (s): Based an Observed Patterns in 2006, 2007, 2008 and 2009 (averaged & for indicative 2030 wind deployment & demand

2. Net Present Value

www.SID.ir

Archive of SID

$$
\begin{aligned}
ANNCOST(r,t) = \sum_R \{ & Annualized_Invcost(r,t,k) * INV(r,t,k) \\
& + Fixom(r,t,k) * CAP(r,t,k) \\
& + Varom(r,t,k) * \sum_{s,s} ACT(r,t,k,s) \\
& + \sum_c [Delivcost(r,t,k,c) * Input(r,t,k,c) * \sum_s ACT(r,t,k,s)] \} \\
& + \sum_{c,s} \{ Miningcost(r,t,c,l) * Mining(r,t,c,t) \\
& + Tradecost(r,t,c) * TRADE(r,t,c,s,i/e) \\
& + Im portprice(r,t,c,l) * Im port(r,t,c,l) \\
& + Exportprice(r,t,c,l) * Export(r,t,c,l) \} \\
& + \sum_c \{ Tax(r,t,p) * ENV(r,t,p) \} \\
& + \sum_d \{ DemandLoss(r,t,d) \}
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

که در آن Annualized-Invcost معادل سالانه مجموع هزینه‌های سرمایه گذاری است که از طریق جایگزینی سرجمع هزینه‌ها با معادل پرداخت‌های سالانه در طول عمر مفید دستگاه‌ها برای هر فناوری تعیین می‌شود. Fixom و Varom، به ترتیب، هزینه ثابت و هزینه جاری نگهداری هر فناوری در ناحیه خاص و دوره مورد نظر است.Delivecost هزینه تحویل هر کالا به فناوری مورد نظر در ناحیه و دوره خاص است و Input، مقدار مورد نیاز هر کالا برای عمکرد یک فناوری در ناحیه و دوره مورد نظر، Miningcost هزینه کالاهای معدنی در سطح بهای مشخص در ناحیه و دوره مورد نظر است[۱۲].

روند بهینه‌سازی به این ترتیب است که از میان منابع، حامل‌های انرژی و فناوری‌های تبدیل مدل، بهترین‌ها را برای انتخاب کم هزینه ترین راه حل مسئله، با توجه به محدودیت‌ها برمی گزینند. هزینه فناوری ها، شاخصه‌های فنی مانند بازده هر فناوری و تقاضای انرژی توسط کاربر تعریف می‌شوند. در هر سیستم ممکن است دو فناوری موجود از لحاظ هزینه تفاوت بسیار اندکی باهم داشته باشند، اما در هنگام بهینه‌سازی سیستم، برنامه تمام ظرفیت یک فناوری را برگزیند و تمام ظرفیت دیگری را کنار بگذارد. این موضوع باعث کاهش هزینه‌ها در خروجی مارکال می‌شود[۱]. روال بهینه‌سازی در این مدل به این صورت است که مدل با بهره‌گیری از پیش‌بینی‌ها، بهترین ترکیب فناوری هارا با کمترین هزینه برمی‌گزیند که قادر به پاسخ دادن به تقاضای انرژی با توجه به محدودیت‌ها باشد، و این کار در مدت زمان برنامه‌ریزی صورت می‌پذیرد. پارامترها، فناوری‌ها و محدودیت‌های جدید تحت عنوان سناریو به مدل اعمال می‌شوند و ابزار مناسبی برای بررسی اثر سیاست گذاری‌ها را در اختیار کاربر قرار می‌دهند[۱۳].

۵- تدوین راهبردهای مختلف

فرآیند برنامه‌ریزی بخش انرژی همواره با عدم قطعیت‌ها و سیاست‌های پیش رو سروکار خواهد داشت. ترکیب مختلف عدم قطعیت‌ها و سیاست‌ها در غالب "سناریو" برای مدل تعریف می‌شوند و کاربر قادر خواهد بود رفتار سیستم انرژی را در آینده و در مواجهه با راهبردهای گوناگون بررسی کند. مدل مارکال این قابلیت را دارد که راهبردهای متفاوتی برای آن تعریف شود. از جمله این راهبردها که در امور برنامه‌ریزی کاربردهای زیادی دارند می‌توان به سناریوی مرجع (روند جاری سیستم انرژی)، سناریوی بهینه‌سازی (مدیریت تقاضا)، انرژی‌های تجدید پذیر و مالیات بر انتشار کربن اشاره کرد. سناریوی مرجع فناوری‌های موجود در سیستم را شامل می‌شود؛ اما در سایر سناریوها ممکن است فناوری‌های جدیدی به سیستم وارد شود یا ترکیب و سهم فناوری‌های موجود تغییر کند[۴]. عمده‌ترین عدم قطعیت‌ها در تصمیم گیری‌های بخش انرژی شامل تقاضای انرژی، قیمت منابع اولیه انرژی، و سیاستگذاریهای زیست محیطی می‌شوند:

الف.تقاضای انرژی: تقاضا در آینده به عواملی چون رشد اقتصادی و توسعه فناوریهای مصرف‌کنندهٔ انرژی بستگی خواهد داشت. بنابراین، محدوده‌ای از سطوح رشد مصرف برای آینده وجود خواهد داشت.

ب. بهای منابع اولیه انرژی: بهای نفت، گاز طبیعی، و زغال سنگ با تغییرات زیادی روبروست و با توجه به اینکه در دهه‌های اخیر تولید برق وابسته به سوخت‌های فسیلی به شدت افزایش یافته است، این عدم قطعیت‌ها بر بهای برق نیز تأثیر خواهد نهاد.

پ. سیاست‌های زیست محیطی: اعمال محدودیت‌های زیست محیطی در آینده از نقش سوخت‌های فسیلی آلاینده در تأمین تقاضای انرژی نهایی مصرف‌کنندگان خواهد کاست و همچنین بر بهای انرژی تأثیر خواهد نهاد. تصویب سیاست‌های ملی و پذیرش سیاست‌های زیست محیطی منطقه‌ای و بین المللی توسط کشورها از جمله عدم قطعیت‌های پیش رو به‌شمار می‌آیند[۷].

برابر آنچه گفته شد، علاوه بر عدم قطعیت ها، سیاست‌های پیش رو نیز در شکل دهی سناریوها نقش دارند. این سیاست‌ها برای هر

www.SID.ir

Archive of SID

منطقه، کشور و همچنین برای انواع برنامه‌ریزی‌ها، با توجه به هدف آن متفاوت خواهند بود. بر این اساس، می‌توان گفت که با توجه به متفاوت بودن عناصر کلیدی تشکیل دهنده یک سناریو، یعنی عدم قطعیت‌ها و سیاست‌های پیش رو، سناریوهای متفاوتی برای هر برنامه‌ریزی وجود خواهد داشت.

۶- مدل‌های هیبریدی (ترکیبی) مارکال

در مدلسازی سیستم‌های انرژی دو رویکرد کلی وجود دارد: جزء به کل و کل به جزء[1] Downp-op تفاوت این دو رویکرد در میزان اهمیت دادن آن‌ها به جزئیات فناوری‌های موجود در سیستم، در مقابل اهمیت دادن به شرایط بازار است. نقاط قوت و ضعف هریک از این رویکردها، به سیستم‌های انرژی باعث شکل‌گیری رویکردها و در نتیجه مدل‌های ترکیبی شده است. مثلاً، مدل ترکیبی MARKAL-MACRO که هم به جزئیات فناوری‌ها و هم به جنبه‌های اقصادی و اجتماعی می‌پردازد، امروزه برای کشورهایی چون ایالات متحده آمریکا، چین، سوئیس، ایتالیا و... تدوین شده است[۱۴]. از آنجا که در مدل مارکال هیچ بازخوردی از بهای نهایی انرژی به میزان تقاضای انرژی وجود ندارد، این خلأ توسط مدل ماکرو پر می‌شود. مدل MACRO یک مدل اقتصاد کلان است که در بلند مدت بسیار کاربردی است. با ترکیب این مدل و مدل مارکال، می‌توان در تعیین بهای نهایی انرژی، قدرت خرید مصرف‌کننده را نیز منظور کرد. در واقع، مدل MARKAL-MACRO دو بخش مجزا دارد: بخش MARKAL که برای بهینه کردن هزینه فناوری‌ها و سوخت مصرفی به کار می‌رود و بخش MACRO که با توجه به سطح اقتصادی مصرف‌کننده، روابط بین عرضه و تقاضا را با رویکرد اجتماعی بررسی می‌کند[۵]. در این نوع ترکیب مدل‌ها، اطلاعات مربوط به منابع انرژی، مشخصات فناوری‌های موجود و محدودیت‌ها و سیاست‌های زیست محیطی به عنوان ورودی مدل مارکال وارد می‌شود و در نهایت از این مدل می‌توان به ترکیب بهینه فناوری‌ها، ترکیب بهینه سوخت، منابع و سطوح آلایندگی‌ها، هزینه سوخت‌ها و آلاینده‌ها و اولویت‌بندی گزینه‌های کاهش انتشار دست یافت. درحالی که برای مدل اقتصاد کلان[2]، شاخصهای اساسی شامل سرمایه‌گذاری، وضعیت اشتغال و تولید ناخالص ملی‌اند که از ترکیب این مدل با مدل مارکال می‌توان روش‌های ارائه خدمات انرژی و پرداخت‌های مربوط به بخش انرژی را به صورت بهینه شبیه‌سازی کرد. مزایای این ترکیب را می‌توان از این قرار برشمرد:

الف. درصورت تغییر در بهای انرژی می‌توان از تغییر تقاضا بازخورد گرفت.

ب. در مواردی که برخی تقاضاهای انرژی از رشد اقتصادی مستقل شده‌اند، مدل‌های ترکیبی می‌توانند این تقاضاها را بر اساس راهبردهای موجود تجزیه و تحلیل کنند.

پ. امکان محاسبه صریح و روشن شاخص تولید ناخالص ملی و سایر متغیرهای کلان مانند مصرف و سرمایه گذاری وجود دارد.

ت. امکان بررسی سیستم انرژی از نظر فناوری در یک بازار رقابتی را فراهم می‌آورد.

در یک مدل ترکیبی (وقتی مارکال با یک مدل اقتصاد کلان ترکیب می‌شود) ورودی‌های اساسی مدل به صورت زیر تغییر می‌کنند: ۱. جزئیات تقاضای انرژی برای بخش خدمات؛ ۲. شاخصهای اقتصادی مانند نرخ بهره، نرخ رشد تولید ناخالص ملی و ...؛ ۳. منحنی‌های جهانی عرضه منابع انرژی؛ ۴. فناوری‌های آینده تأمین و مصرف انرژی[۱۴].

۷- نرم افزار مارکال

نرم افزار حل مدل مارکال[3]، نرم‌افزاری مبتنی بر ویندوز است که در غالب برنامه‌های تحلیل فناوری‌های سیستم انرژی (ETSAP)[4] آژانس بین‌المللی انرژی توسعه یافته است. نخستین نسخه این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۸ ارائه شد و پس از آن، به طور پیوسته نسخه‌های جدیدتر در اختیار کاربران قرار گرفت. بهینه‌سازی سیستم انرژی در این نرم افزار به گونه‌ای صورت می‌پذیرد که از میان منابع، حامل‌های انرژی و فناوری‌های تبدیلی، کم هزینه‌ترین راه تأمین تقاضای انرژی را با توجه به محدودیت‌های موجود بر می‌گزیند. برای تحقق این امر لازم است کاربر هزینه فناوری‌ها و شاخصه‌های فنی نظیر بازده هر فناوری را به نرم افزار وارد کند. از جمله قابلیت‌های مهم این نرم افزار می‌توان به در اختیار نهادن یک پایگاه داده[5] قدرتمند به منظور رفع نیاز کاربر در خصوص جزئیات فناوری‌ها اشاره کرد.

1. Top-Down
2. MACRO

3. ANSWER-MARKAL
4. Energy Technology System Analysis Program
5. Database

www.SID.ir

Archive of SID

در نرم افزار حل مدل مارکال، بخشی به عنوان بهینه‌سازی هزینه‌ها وجود دارد که با کمک برنامه خطی، ترکیب بهینه‌ای از فناوری‌ها را بر می‌گزینند. ممکن است تمامی یک فناوری توسط بخش بهینه ساز نرم افزار انتخاب و تمام دیگری کنار گذاشته شود. در واقع، این نرم افزار حل مدل مارکال است که بهترین سیستم انرژی مرجع را تعیین می‌کند تا هزینه‌های سیستم انرژی را در هر بازه زمانی و برای هر ناحیه برنامه‌ریزی بهینه کند[۱۵].

۸- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، ابتدا اهمیت برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی و مباحث زیست محیطی مرتبط بررسی شد. در ادامه، مدلسازی سیستم‌های انرژی به عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی و تصمیم گیری در حوزه انرژی و محیط زیست معرفی شد و مدل MARKAL به عنوان محبوب ترین و پرکاربردترین مدل سیستم انرژی به تفصیل تشریح شد. مشخصات مدل، ورودی و خروجی‌های آن (چارچوب مدل)، بازه و برش‌های زمانی مدل، فرمول‌بندی مدل و بهینه‌سازی، سناریوها و سرانجام ارتباط مدل مارکال با سایر مدل‌ها تحلیل شد.

خانواده مدل مارکال از اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی جایگاه ویژه‌ای در برنامه‌ریزی‌های مربوط به انرژی- محیط زیست – اقتصادی به خود اختصاص داد. درمیان تحقیقات صورت گرفته بر اساس مدل مارکال، اولویت موضوعات به این ترتیب است که بیشتر به مسائل زیست محیطی و به خصوص کنترل انتشار کربن دی اکسید پرداخته شده و مسائل اقتصادی و امنیت انرژی در مراتب بعدی قرار می‌گیرند. در حال حاضر نیز بسیاری از برنامه‌ریزی‌ها به منظور دست‌یابی به اهداف تعهدات بین‌المللی و قوانین داخلی در زمینه کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی بر مبنای مدل مارکال صورت می‌گیرند. به طوری که به نظر می‌رسد با توجه به رشد روزافزون تقاضای انرژی و نیز انتشار آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انرژی محور، مدلسازی سیستم‌های انرژی و به ویژه مدل مارکال نیز همگام و همسو با گسترش سیستم‌های انرژی توسعه یابند.

مراجع

[1] FarajiZonooz, M., Nopiah, Z. M., Mohd. Yusof, A., Sopian, K., "A Review of MARKAL Energy Modeling", European Journal of Scientific Research, Vol. 26, No. 3, pp.352-361 , (2009).

[2] International Energy Agency, "world energy outlook 2010", Part A, chapter 1 and 2, (2011).

[3] Kannan, R., "The development and application of a temporal MARKAL energy system model using flexible time slicing", Applied Energy 88, 2261–2272, (2011).

[4] Bozic, H., "Optimization of Energy Consumption and Energy Efficiency Measures with MARKAL Model", International Conference on Clean electrical power - Renewable Energy resources Impact, Capri, Italy, 21-23.5. (2007).

[5] Chen, W., Wu, Z., He, J., Gao, P., Xu, Sh., "Carbon emission control strategies for China: A comparative study with partial and general equilibrium versions of the China MARKAL model", Energy 32, 59–72, (2007).

[6] Krzemień, J., "Application of markal model generator in optimizing energy systems", Journal of Sustainable Mining, Vol. 12, No. 2, pp. 35–39 ((2013).

[7] Ming-Che Hu, A., Benjamin, F., "Analysis of multi-pollutant policies for the U.S. power sector under technology and policy uncertainty using MARKAL", Energy 35, 5430e5442(2010).

[8] Kannan, R., Strachan, N., "Modelling the UK residential energy sector under long-term decarbonisation scenarios: Comparison between energy systems and sectoralmodelling approaches", Applied Energy 86, 416–428(2009).

[9] Strachan, N., Balta-Ozkan, N., Joffe, J., McGeevor, K., Hughes, N., "Soft linking energy systems and GIS models to investigate spatial hydrogen infrastructure development in a low-carbon UK energy system", International Journal of hydrogen energy 34, 642 – 657 (2009).

[10] .http://www.irimo.ir

[11] .http://energy.gov

[12] Loulou, R., Goldstein, G., Noble, K., "Documentation for the MARKAL Family of Models", Energy Technology Systems Analysis Program Publications, 10 – 22 (2004).

[13] Levin, T. J., Thomas, V. M., Lee, A. J., "A MARKAL Model of State Electricity Generation", .Sustainable Systems and Technology (ISSST), IEEE, 1-5 (2010).

[14] Strachan, N., Kannan, K., "Hybrid modelling of long-term carbon reduction scenarios for the UK", Energy Economics 30, 2947–2963(2008).

[15] http://www.gams.com/presentation

www.SID.ir