فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال اول/ شماره ۱/ زمستان ۹۴/ صفحات ۶۸-۳۹

توسعه کدهای بهینه‌ساز سیستم انرژی کشور با استفاده از زبان برنامه‌نویسی GNUMathprog

هادی اشراقی
کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی (نویسندهٔ مسئول)
Eshraghi.h@gmail.com
امیر حسین فاکهی
دکترای مهندسی سیستم‌های انرژی، مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی
fakehi@iies.net

مسئله برنامه‌ریزی جامع انرژی و محیط زیست، همواره جزو موضوعات بحث‌برانگیز در کشور بوده است. این مسئله در درجه اول به‌واسطه پیچیدگی تصمیم‌گیری در بخش انرژی است که به‌نوبه خود ناشی از وجود «انتخاب‌های فراوانِ غیرمستقل و به‌هم‌پیوسته» است، و در درجه دوم برآمده از نحوه مواجهه و یا حلِ «مسئله تصمیم» یادشده است. اینکه کدام مدل با کدام قالب مدل‌سازی مناسب کشور است همواره محل بحث بوده است. این مقاله با ترجیح رویکرد «بهینه‌سازیِ کد باز» در زمینه سیاست‌گذاری انرژی، ضمن اشاره به کاستی‌های نهفته در مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های کد بسته، مسیر و مدل جدیدی را پیش روی تصمیم‌گیرندگان در بخش انرژی کشور قرار می‌دهد. این مدل که کدهای آن در زبان برنامه‌نویسی GNU Mathprog نوشته شده‌اند، دربردارنده تمامی قابلیت‌های مدل‌های معروف بهینه‌سازی است و مضاف بر آن قادر است تنگناهای خاص بخش انرژی کشور را مانند برنامه‌ریزیِ ارتقای (توانبخشی) تکنولوژی‌های با عملکرد پایین‌تر به تکنولوژی‌های با عملکرد بالاتر یا پیر شدن میادین نفتی در مدل منعکس کند. همچنین مدلِ توسعه داده شده از نظر ساختار مدل‌سازی و محاسباتی در مقایسه با مدل OSeMOSYS که از آن برای اعتباربخشی استفاده شد، مزیت بیشتری دارد؛ به‌گونه‌ای که اجرا و حل یک مثال موردی به‌وسیله هر دو آنها نشان می‌دهد که فایل MPS ساخته شده به‌وسیله OSeMOSYS دارای ۸۰۸۵ سطر و ۸۸۲۰ ستون بوده و نتایج آن با گرفتن ۲۸/۴ مگابایت از حافظه به‌دست می‌آید، درحالی‌که فایل MPS در مدلِ توسعه داده شده دارای ۱۷۵۵ سطر و ۱۵۷۵ ستون است و نتایج را با گرفتن ۷/۷ مگابایت از حافظه به‌دست می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیاست‌گذاری انرژی، مدل‌سازی انرژی، بهینه‌سازی، کد باز، GNU Mathprog

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۶

۱. مقدمه

تصمیم‌گیری در بخش انرژی عموماً به کمک مدل‌های ریاضی صورت می‌گیرد. این مدل‌ها با توجه به مسئله‌ای که قرار است حل شود، دارای چارچوب‌های مختلف است ـ اعم از شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی که در این میان مدل‌های بهینه‌سازی برای تجویز سیاست‌های توسعه‌ای استفاده می‌شوند. ازجمله مطالعاتی که با استفاده از این قبیل مدل‌ها در کشور انجام شده است، می‌توان به دو منبع (سبوحی، ۱۳۷۳) و (رضوی و اشراقی، ۱۳۹۲) اشاره کرد. در همه این مدل‌ها کاربر با استفاده از «واسط کاربری»[1]، اقدام به طرح‌ریزی مدل ذهنی خود نموده باز از همان طریق، اطلاعات مد نظر را وارد کند. کار کردن مدل‌ساز با واسط کاربری به‌نوبه خود محاسن و معایبی دارد. از جمله محاسن مهم آن سهولت تعریف مدل و وارد کردن داده‌ها به آن است که باعث می‌شود کاربر بتواند ـ با هر سطح دانش مربوط به مدل‌سازی ـ با فراگیری دستورالعمل‌های نوشته شده برای کار با واسط کاربری اقدام به مدل‌سازی کند؛ لکن این امر که همان زدودن پیچیدگی‌ها به منظور عدم برخورد مستقیم با کد منبع[2] است سبب ایجاد کاستی‌ها و محدودیت‌های قابل توجهی در زمینه پیاده‌سازی ترجیحات مدل‌ساز می‌گردد و در واقع، مسیر حرکت مدل‌سازی را محدود به یک مسیر خاص و گاهی بدون انعطاف می‌کند (DeCarolis, et al., 2011). اگرچه در بعضی مدل‌های مشهور (مثلاً مدل MESSAGE) می‌توان براساس نیاز مدل‌ساز بر تکنولوژی‌ها، سرمایه و هزینه‌ها و نیز انتشار آلاینده‌ها قیدهایی قرار داد؛ ولی اولاً، در پاره‌ای از موارد به دلیل مشکلات مربوط به واسط کاربری این مدل‌ها (یا دست‌کم مشکلات مربوط به واسط کاربری آن نسخه‌ای از مدل‌ها که در کشور استفاده شده است[3]) امکان انجام این کار به درستی وجود نداشته است ثانیاً، قیدهای تعبیه شده، فرمت خاصی

1. Interface
2. Source Code
۳. تجربه کار نگارندگان با این مدل نشان‌دهنده مغایرت‌های بالا میان آنچه در فایل پشتیبان مدل آمده است و آنچه عملاً در واسطِ کاربری رخ می‌دهد است. نمونه‌ای از این مغایرت‌ها و اشتباهات در فرمولاسیون به قرار زیرند:

دارند، چنان‌که گویی مسائل مربوط به سیستم پیچیده انرژی ایران همان است که توسعه‌دهندگان این مدل‌ها می‌پنداشتند. بنابراین، شاید نتوان تمام آنچه را مد نظر است به زبان ریاضی تبدیل و در مدل پیاده کرد. مثال ساده مورد دوم در ارتباط با عدم دسترسی مدل‌ساز به متغیر عبارت است از: «مجموع ظرفیت‌های سالانه در دسترس از یک تکنولوژی در جایی غیر از قیدِ مجموع ظرفیت‌های سالانه» که باعث می‌شود نتوان قیدی که سهم مشخصی از بازار را در هر سال برای یک تکنولوژی خاص ایجاد می‌کند، در مدل پیاده کرد.[1] از دیگر معایب کار کردن با مدل‌های کد بسته، عدم امکان (یا حداقل دشواری بسیار بالای) گنجاندن تحلیل‌های عدم قطعیت است (DeCarolis and Hunter, 2013)، در ضمن دستیابی به نسخه‌های اصلی برخی از این مدل‌ها مستلزم صرف هزینه‌های بالا بوده و در پاره‌ای موارد مانند مدل MARKAL که از GAMS برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌کند، اساساً دسترسی به علت تحریم‌ها میسر نیست. از طرف دیگر، به علت تکیه بر سالورهای[2] رایگان مانند GLPK که قابلیت‌های بسیار محدودتری نسبت به انواع تجاری آن‌ها مانند cplex دارند، لازم است

در بخش Storage: معادلات ساخته شده، دارای کاستی‌های فراوان دارند و از فرمولاسیون داخل فایل پشتیبان تبعیت نمی‌کنند.

در بخش Resource: قیود مربوط به resource depletion ساخته نمی‌شوند (گرچه مکان وارد کردن دیتا در واسط کاربری برای آن تعبیه شده، معادلات مربوط فعال نمی‌شوند).

در بخش Constraints: تنها ۵ نوع قید (تیپ) وجود دارد و خارج از آن نمی‌توان قیدی لحاظ کرد. در همین شرایط نیز، قیدهایی که باید در ردیف‌های CAR1 و CAR2 ساخته شوند، اصلاً تشکیل نمی‌شوند.

در بخش Objective Function: ضرایب متغیرهای ظرفیت با فرمولاسیونی که در فایل پشتیبان ذکر شده است همخوانی ندارند، چراکه هزینه‌های ثابت تعمیرات و نگهداری سالانه به جای اینکه ضرب در تمامی ظرفیت‌های موجود آن تکنولوژی شوند، در ظرفیت‌های جدید سالانه ضرب می‌شوند.

موارد یادشده در بالا، غیر از باگ (bug)های نرم‌افزاری است که در واسط کاربری این مدل وجود دارند.

۱. برای مثال، نمی‌توان در نظر گرفت که نیروگاه‌های توربین گازی برای ظرفیت‌های ذخیره گردان در هر سال، ۲۵٪ از مجموع ظرفیت‌های الکتریکی را به خود اختصاص دهند.

2. Solver

ساختار مدل‌سازی تا حد امکان کارا باشد تا بدون کاستن از مزیت‌های نهفته در مدل‌های تجاری، با کمترین تعداد متغیرها و قیدها، ضعف سالور جبران گردد.

با توجه به موارد یادشده، هدف این مقاله استفاده از تجربه‌های پیشین کشور در زمینه مدل‌سازی انرژی و توسعه کدهای بهینه‌ساز سیستم انرژی کشور است با این ویژگی‌ها:

۱) قابلیت‌هایی در حد مدل‌های معروفِ شناخته شده برنامه‌ریزی انرژی داشته باشد.

۲) تمامی مسائل مورد ابتلای سیستم انرژی کشور را مد نظر قرار داده باشد.

۳) از نظر الگوریتم مدل‌سازی و محاسباتی، تا حد امکان، و در مقایسه با مدل‌های مشابه، کارا باشد.

۴) کدِ منبع آن برخلاف مدل‌های معروف بسته نباشد تا بتواند تمامی منویات مربوط به تصمیم‌گیری در بخش انرژی کشور را پوشش دهد.

این مهم با استفاده از زبان کدنویسی GNU MathProg صورت خواهد گرفت (Makhorin, 2010). این زبان، ازجمله زبان‌های برنامه‌نویسی قدرتمند است که برای ساخت مدل‌های بهینه‌سازی پیچیده و بزرگ معمولاً از آن بهره گرفته می‌شود (Howells et al., 2011).

۲. مرور ادبیات

ایده اصلی مدل‌سازی کد باز با استفاده از زبان مدل‌سازی GNUMathProg در مقاله مارک هاولز در سال ۲۰۰۹ به چاپ رسیده (Howells, 2009). در سال ۲۰۱۱ ایده اصلی کار یاد شده در مقاله «مدل OSeMOSYS[1]» در مجله EnergyPolicy در یک همکاری بین‌المللی، توسط همین نویسنده و همکارانش که از سازمان‌هایی چون آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، مؤسسه انرژی دانشگاه لندن، مؤسسه محیط زیست استکهلم، دانشگاه استنفورد، دانشگاه کارولینای شمالی، دانشگاه کیپ تاون، سازمان توسعه صنعتی ملل متحد و دپارتمان امور اقتصادی و اجتماعی ملل متحد بودند بسط داده شد (Howells et al., 2011). در این مقاله پس از برشمردن محسنات چنین رویکردی که خلاصه‌ای از آن در قسمت پیشین گفته شد، مدل‌سازی انرژی کد باز و فرمولاسیون مد نظر تشریح شد. ضمن

1. Open Source energy MOdelingSYStem (OSeMOSYS)

اینکه یک مثال موردی به نام UTOPIA با ارائه فرایند اضافه کردن ماژول Storage به آن حل شده و برای اعتبار بخشی، نتایج حاصل با خروجی‌ها حل شدند و با مدل MARKAL مقایسه شدند. ولی مسئله اصلی این است که در ساختار OSeMOSYS کمترین اهمیت به کارا بودن ساختار مدل از نظر زمان حل مسئله داده شده است، و همان‌طور که در ادامه نشان خواهیم داد، این مقاله با رویکردی کاملاً دگرگون شده و متفاوت، ترکیبی از روش‌های مدل‌سازی را که در MESSAGE و OSeMOSYS استفاده شده‌اند به‌کار می‌گیرد تا این نقایص مرتفع گردند.

مورد جدیدتر و قوی‌ترِ مدل‌سازی کد باز را دکتر هانتر، در قالب پروژه‌ای تحت عنوان TEMOA Project [1] راهبری کرده است. اولین خروجی‌های این پروژه در سال ۲۰۱۳ در مجله اقتصاد انرژی منتشر شد (Hunter et al., 2013). در این مقاله، ضمن برشمردن کاستی‌های مدل‌های دارای کد بسته ـ از جمله عدم شفافیت کافی در بیان و ارائه جزئیات فرایند مدل‌سازی [2] که منجر به سخت و دشوار شدن بررسی و تأیید نتایج آن توسط افراد دیگر می‌گردد، و خالی بودن جای تحلیل‌های عدم قطعیت در مدل‌های کلاسیکِ کدبسته ـ فرمولاسیون مدل را معرفی کردند و مثال UTOPIA را ـ هم به صورت کلاسیک و هم با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت‌های حامل‌های انرژی ـ در آن حل کرده و با نتایج حل UTOPIA در مدل MARKAL مقایسه کردند.

۳. فرمولاسیون ریاضی مدل

شکل (۱) سیستم مرجع انرژی فرضی را نشان می‌دهد که برای رسیدن به درک روشنی از تقسیم‌بندی‌ها و تمایزهایی که مدل میان حامل‌ها و تکنولوژی‌های مختلف در نظر می‌گیرد، طراحی شده است. با توجه به این شکل، سه نوع تکنولوژی را می‌توان شناسایی کرد که با شکل‌های مستطیل، لوزی و دایره نشان داده شده‌اند:

1 . Tools for Energy Model Optimization and Analysis
2. Documentation of Modeling Procedures

۱. گروه اول که با شکل مستطیل نشان داده شده‌اند، تکنولوژی‌هایی هستند که سوخت تولیدی توسط آنها، دارای ناحیه باری[1] نیست؛ مانند پالایشگاه نفت و موتور احتراق داخلی در شکل. برای توصیف سطح فعالیت این گروه، متغیر $AO^{t,m,y}$ در نظر گرفته می‌شود: سطح فعالیت سالیانه تکنولوژی t در حالت عملیاتی m در سال y.

۲. گروه دوم که با شکل لوزی نشان داده شده‌اند ـ مانند نیروگاه حرارتی و یا لامپ در شکل ـ معرف تکنولوژی‌هایی هستند که سوخت تولیدی آنها، ناحیه باری دارد و به تعداد نواحی باری تعریف شده در مدل، متغیر به شکل $O^{t,m,l,y}$ برایشان تعریف می‌گردد: سطح فعالیت تکنولوژی t در حالت عملیاتی m، در ناحیه باری l و در سال y.

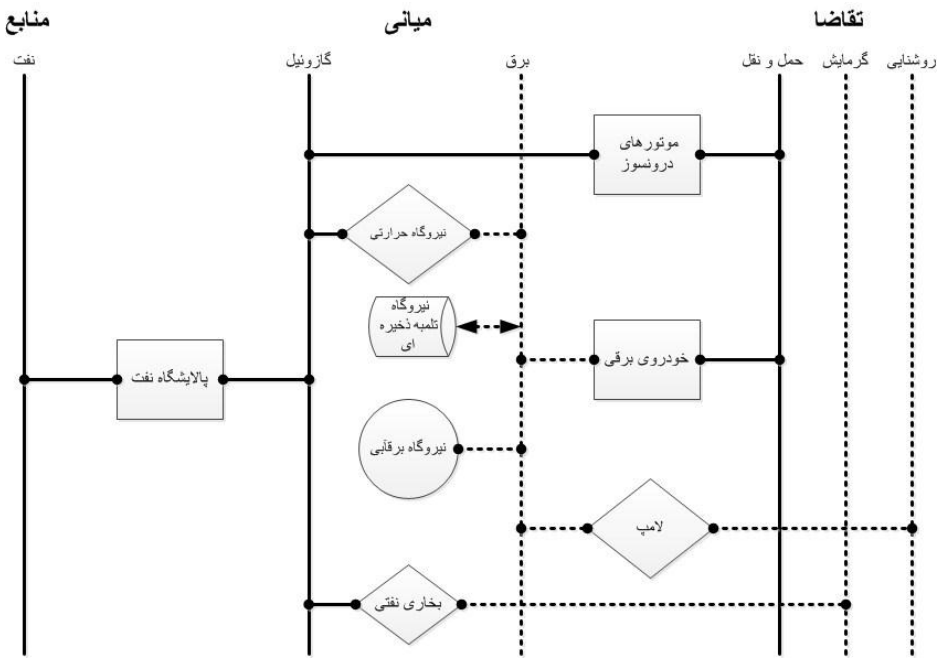
۳. گروه سوم، تکنولوژی‌هایی هستند که مانند دسته دوم سوختی را تولید می‌کنند که ناحیه باری دارد ولی الگوی تولیدی خاصی در هر ناحیه باری دارند که به آنها تحمیل می‌شود؛ مثل تکنولوژی‌های تجدیدپذیر ـ از جمله نیروگاه آبی در شکل که با دایره نشان داده شده است ـ که توزیع میزان تولیدات آنها در نواحی باری مختلف با استفاده از اطلاعات تاریخی قابل استخراج است. گرچه این تکنولوژی‌ها مانند دسته دوم سوخت دارای ناحیه باری تولید می‌کنند، همان‌طور که نشان داده خواهد شد، تعریف یک متغیر تولید سالانه ـ مانند تکنولوژی‌های دسته اول ـ از نظر ریاضی برایشان کفایت می‌کند که باعث کاهش قابل توجهی در میزان متغیرها می‌شود.

نوع مهم دیگری نیز از تکنولوژی‌ها با کارکرد ذخیره‌سازی وجود دارند (مانند سد که در شکل(۱) با بیضی نشان داده شده است) که جداگانه به آنها خواهیم پرداخت.

همچنین سوخت‌ها در سه دسته کلی تقاضا، میانی و منابع جای می‌گیرند و به فراخور اینکه نواحی باری دارند یا ندارند به صورت خط‌چین یا خطوط پر نشان داده شده‌اند. بنابراین در کل، پنج نوع سوخت مختلف وجود خواهد داشت: ۱- سوخت موجود در گروه تقاضا و دارای ناحیه باری (مانند حرارت و روشنایی در نمودار (۱) که به صورت خط‌چین نشان داده شدند)، ۲- سوخت

[1] . Load Region

موجود در گروه تقاضا و بدون ناحیه باری (مانند حمل و نقل در نمودار (۱) که به صورت خط پر نشان داده شده‌است)، ۳- سوخت موجود در گروه میانی و دارای ناحیه باری (مانند برق در نمودار ۱ که به صورت خط‌چین نشان داده شده‌است)، ۴- سوخت موجود در گروه میانی و بدون ناحیه باری (مانند گازوئیل در نمودار (۱) که به صورت خط پر نشان داده شده‌است)، و ۵- سوخت‌های موجود در گروه منابع (سوخت‌های این گروه بدون ناحیه باری در نظر گرفته می‌شوند).



نمودار ۱. سیستم مرجع فرضی برای توصیف فرضیات مربوط به تکنولوژی‌ها و حامل‌ها

با این توضیحات، فرمولاسیون با دسته‌بندی زیر بیان می‌شود. (متغیرهای درون‌زا به صورت **Bold** و پارامترهای برون‌زا به صورت *Italic* مشخص شده‌اند.)

۳-۱. قیدهای ظرفیت

این نوع قیدها کنترل‌کننده میزان سطح فعالیت تکنولوژی‌ها با توجه به ظرفیت در دسترس سالیانه آنهاست که برای سه نوع تکنولوژی معرفی شده، به صورت‌های زیر نوشته می‌شوند:

۱. تکنولوژی‌های نوع اول: برای هر سال y در افق برنامه‌ریزی رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\sum_{\mathbf{m}} \mathbf{AO}^{\mathbf{t,m,y}} \leq PF^{t,y} \times \left(RC^{t,y} + \sum_{\substack{\mathbf{if\ (y-br)<L^t \Rightarrow \psi=br} \\ \mathbf{if\ (y-br)\geq L^t \Rightarrow \psi=y-L^t}}}^{\mathbf{y}} M^{t,\psi} \times \mathbf{NC}^{\mathbf{t,\psi}} \right) \times 1 \qquad (۱)$$

عدد ۱ در سمت راست نامعادله واحد زمان (سال) را داشته و جهت یکسان کردن دیمانسیون دو طرف معادله (گیگاوات ـ سال) نوشته شده است.

۲. تکنولوژی‌های نوع دوم: برای هر ناحیه باری l در هر سال y رابطه ۲ نوشته می‌شود:

$$\sum_{\mathbf{m}} \mathbf{O}^{\mathbf{t,m,l,y}} \leq PF^{t,y} \times \left(RC^{t,y} + \sum_{\substack{\mathbf{if\ (y-br)<L^t \Rightarrow \psi=br} \\ \mathbf{if\ (y-br)\geq L^t \Rightarrow \psi=y-L^t}}}^{\mathbf{y}} M^{t,\psi} \times \mathbf{NC}^{\mathbf{t,\psi}} \right) \times LR^{l,y} \qquad (۲)$$

۳. تکنولوژی‌های نوع سوم: از آنجا که توزیع تولید مورد انتظار برای این تکنولوژی‌ها از پیش معلوم است، به تبع آن، ناحیه باری پیک برای این تکنولوژی‌ها آشکار است و فقط کافی است که قید ظرفیت برای همین ناحیه باری نوشته شود. ناحیه باری پیک برای این تکنولوژی‌ها مربوط به ناحیه‌ای است که کمیت $\frac{f^{t,l,y}}{LR^{l,y}}$ آن ناحیه، ماکزیمم گردد. بنابراین، رابطه (۳) در هر سال y نوشته می‌شود.

$$(\frac{f^{t,l,y}}{LR^{l,y}})_{MAX} \times \sum_{\mathbf{m}} \mathbf{AO^{t,m,y}} \leq PF^{t,y} \times \left(RC^{t,y} + \sum_{\substack{\mathbf{if\,(y-br)<L^t \Rightarrow \psi=br} \\ \mathbf{if\,(y-br)\geq L^t \Rightarrow \psi=y-L^t}}}^{\mathbf{y}} M^{t,\psi} \times \mathbf{NC^{t,\psi}} \right) \qquad (۳)$$

علائم به‌کار رفته در روابط فوق به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$AO^{t,m,y}$: سطح فعالیت سالیانه تکنولوژی t در حالت عملیاتی m در سال y

$O^{t,m,l,y}$: سطح فعالیت تکنولوژی t در حالت عملیاتی m، در ناحیه باری l در سال y

$NC^{t,\psi}$: متغیر مربوط به ظرفیت‌های جدید از تکنولوژی t که در سال ψ ساخته و وارد سیستم انرژی می‌شوند. (زمانی که از برنامه‌ریزی عدد صحیح برای ورود ظرفیت‌های متعارف از یک تکنولوژی استفاده شود، این متغیرْ ضریبی از ظرفیت متعارف آن تکنولوژی است)

$M^{t,\psi}$: ظرفیت متعارف از تکنولوژی t در سال ψ؛ مقدار پیش‌فرض آن برابر با ۱ است.

$RC^{t,y}$: ظرفیت‌های مانده از تکنولوژی t در سال y؛ (y مربوط به سال‌های برنامه‌ریزی است، نه ظرفیت‌های پیشین)

$PF^{t,y}$: ضریب ظرفیت تکنولوژی t در سال y

by: سال پایه

$LR^{l,y}$: طول ناحیه باری l بر حسب کسری از کل سال y

$f^{t,l,y}$: سهم ناحیه باری l و در سال y از تولیدات سالانه تکنولوژی t که دارای الگوی تولید مشخصی (تکنولوژی نوع سوم) است.

۳-۲. معادلات پایستگی انرژی

باید برای تمامی سوخت‌های تعریف شده در سیستم، معادلات پایستگی انرژی نوشته شود. با توجه به اینکه ۵ نوع سوخت مختلف در سیستم وجود دارد، بنابراین پنج تیپ معادله از جنس پایستگی انرژی وجود خواهد داشت:

۱. سوخت موجود در گروه تقاضا و بدون ناحیه باری: این سوخت‌ها فقط توسط تکنولوژی‌های نوع اول تولید می‌شوند که در سمت چپ رابطه (۴) جمع بسته می‌شوند و بایستی تقاضای سوخت f را در سال y ($AED^{f,y}$) تأمین کنند.

$$\sum_{\mathbf{t}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{AO^{t,m,y}}\times S^{t,m,f,y}=AED^{f,y} \qquad (۴)$$

۲. سوخت موجود در گروه تقاضا و دارای ناحیه باری: این سوخت‌ها توسط تکنولوژی‌های نوع دوم و سوم تولید می‌شوند و بایستی تقاضای سوخت f را در ناحیه باری l در سال y ($AUD^{f,y}\times DD^{l,f,y}$) تأمین کنند، رابطه (۵):

$$\sum_{\mathbf{t\in 2nd\,group}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{O^{t,m,l,y}}\times S^{t,m,f,y}+\sum_{\mathbf{t\in 3rd\,group}}\sum_{\mathbf{m}}f^{t,l,y}\times\mathbf{AO^{t,m,y}}\times S^{t,m,f,y}=AUD^{f,y}\times DD^{l,f,y} \qquad (۵)$$

۳. سوخت موجود در گروه میانی و بدون ناحیه باری: این سوخت‌ها را تکنولوژی‌های نوع اول تولید می‌کنند، ولی این امکان وجود دارد که هم‌زمان توسط هر سه نوع تکنولوژی تعریف شده مصرف شوند (مانند گازوئیل در شکل (۱) که هم توسط نیروگاه حرارتی (تکنولوژی نوع دوم) مصرف می‌شود و هم توسط موتور احتراق داخلی). بنابراین رابطه (۶) بالانس سالانه انرژی برای این سوخت‌ها را تضمین می‌کند:

$$\sum_{\mathbf{t}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{AO^{t,m,y}}\times S^{t,m,f,y}=\sum_{\mathbf{t\in 1st\,group}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{AO^{t,m,y}}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{\mathbf{t\in 2nd\,group}}\sum_{\mathbf{l}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{O^{t,m,l,y}}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{\mathbf{t\in 3rd\,group}}\sum_{\mathbf{m}}\mathbf{AO^{t,m,y}}\times FR^{t,m,f,y} \qquad (۶)$$

۴. سوخت موجود در گروه میانی و دارای ناحیه باری: این سوخت‌ها می‌توانند با سیستم‌های ذخیره روزانه نیز برهم‌کنش داشته باشند. همچنین اگرچه ممکن است با تکنولوژی‌های دوم و سوم تولید شوند، این امکان وجود دارد که توسط هر سه نوع تکنولوژی مصرف شوند (مانند برق در شکل (۱) که توسط نیروگاه حرارتی و نیروگاه آبی (به ترتیب تکنولوژی‌های نوع دوم و سوم) تولید

شده ولی هم‌زمان هم توسط لامپ (نوع دوم) و هم توسط ماشین برقی (نوع اول) به مصرف می‌رسد). بنابراین رابطه (۷) در هر ناحیه باری l در سال y، برای این سوخت‌ها نوشته خواهد شد:

$$\sum_{t\in 2nd\,group}\sum_{m}\mathbf{O}^{t,m,l,y}\times S^{t,m,f,y}+\sum_{t\in 3rd\,group}\sum_{m}f^{t,l,y}\times\mathbf{AO}^{t,m,y}\times S^{t,m,f,y}+\sum_{t}\sum_{k,k\neq l}\mathbf{SO}^{t,f,k,l,s,y}\times\varepsilon^{t,f,y}=$$
$$LR^{l,y}\times\sum_{t\in 1st\,group}\sum_{m}\mathbf{AO}^{t,m,y}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{t\in 2nd\,group}\sum_{m}\mathbf{O}^{t,m,l,y}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{t\in 3rd\,group}\sum_{m}f^{t,l,y}\times\mathbf{AO}^{t,m,y}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{t}\frac{\mathbf{SI}^{t,f,l,s,y}}{\eta^{t,f,y}} \quad (۷)$$

$LR^{l,y}$ و $f^{t,l,y}$ (با تعاریفی که در قسمت پیشین از آنان ارائه شد) در معادلات فوق، مقدار مصرف مناسبی از سوختی را که به صورت سالانه در دست است، به ناحیه باری l نسبت می‌دهند.

۵. سوخت موجود در گروه منابع: برای هر سوخت موجود در گروه منابع، یک متغیر سالانه تولید ($AE^{f,y}$) تعریف می‌شود. مانند سوخت‌های موجود در گروه میانی و بدون ناحیه باری، این نوع سوخت‌های قابلیت مصرف شدن توسط هر سه نوع تکنولوژی را دارند. بنابراین در هر سال y، رابطه (۸) برایشان معتبر خواهد بود:

$$\mathbf{AE}^{f,y}=\sum_{t\in 1st\,group}\sum_{m}\mathbf{AO}^{t,m,y}\times FR^{t,m,f,y}+\sum_{t\in 2nd\,group}\sum_{l}\sum_{m}\mathbf{O}^{t,m,l,y}\times FR^{t,m,f,y}+$$
$$\sum_{t\in 3rd\,group}\sum_{m}\mathbf{AO}^{t,m,y}\times FR^{t,m,f,y} \quad (۸)$$

در روابط (۴) تا (۸) از متغیرهای زیر استفاده شده است:

$AED^{f,y}$: تقاضای یکنواخت سوخت f (بدون ناحیه باری) در سال y.

$AUD^{f,y}$: تقاضای غیر یکنواخت سوخت f (دارای ناحیه باری) در سال y.

$DD^{l,f,y}$: سهم ناحیه باری l در تقاضای سوخت f در سال y.

$S^{t,m,f,y}$: سهم سوخت f از محتوای جریان خروجی تکنولوژی t در حالت عملیاتی m و در سال y.

$FR^{t,m,f,y}$: نیاز تکنولوژی t که در حالت عملیاتی m کار می‌کند، به سوخت f به ازای تولید یک واحد خروجی در سال y (هرچه این کمیت کوچک‌تر باشد، بازده تکنولوژی بیشتر است).

$SI^{t,f,l,s,y}$: میزان سوخت f که در ناحیه باری l و در سال y وارد سیستم ذخیره‌ساز t شده است (s مشخص‌کننده فصلی از سال است که ناحیه باری l در آن تعریف شده).

$SO^{t,f,l,k,s,y}$: میزان خروجی سوخت f از تکنولوژی ذخیره‌ساز t در ناحیه باری k و در سال y که در ناحیه باری l وارد تکنولوژی ذخیره‌ساز شده بود (s مشخص‌کننده فصلی از سال است که l و k در آن تعریف شده‌اند).

$\eta^{t,f,y}$: بازده در مسیر ورود سوخت f به تکنولوژی ذخیره‌ساز t در سال y.

$\varepsilon^{t,f,y}$: بازده در مسیر خروج سوخت f از تکنولوژی ذخیره‌ساز t در سال y.

$AE^{f,y}$: استخراج سوخت منبع f در سال y.

۳-۳. روابط تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز روزانه

این نوع تکنولوژی‌ها قادر به انتقال انرژی از نواحی کم‌بار در روز، به نواحی پربار هستند و با جلوگیری از ساخت و انباشت ظرفیت‌هایی که فقط در نواحی پرباری مورد نیازند، نقش مهمی در کارکرد اقتصادی سیستم عرضه دارند. معادلات مربوطه به به آن عبارت‌اند از:

۱. معادلات پایستگی انرژی:

$$\mathbf{SI^{t,f,l,s,y}} \geq \sum_{\mathbf{k,k\neq l}} \mathbf{SO^{t,f,l,k,s,y}} \qquad (۹)$$

۲. تلفات مربوط به انباره: این تلفات جدا از تلفات ورود و خروج است که در معادله (۷) بیان شد. در حقیقت، انرژی انباشته شده از ناحیه باری l به ناحیه باری k ممکن است در معرض تلفاتی باشد که از میزان موجودی کل انباره می‌کاهد؛ مانند تلفات تبخیر آبِ پشت سد. رابطه (۱۰) به این صورت است:

$$\xi^{t,l,k,s,y} \times \mathbf{SI^{t,f,l,s,y}} \geq \mathbf{SO^{t,f,l,k,s,y}} \qquad (۱۰)$$

۳. قیدهای ظرفیت ورود به تکنولوژی ذخیره‌ساز و خروج از آن: همانند قیدهای ظرفیت تکنولوژی‌های سه‌گانه. رابطه (۱۱) نیز سعی در محدود ساختن سطوح فعالیت تکنولوژی ذخیره‌ساز ($SI^{t,f,l,s,y}$ و $SO^{t,f,l,k,s,y}$) دارد:

$$\mathbf{SI}^{t,f,l,s,y} + \sum_{k,k\neq l} \mathbf{SO}^{t,f,k,l,s,y} \leq PF^{t,y} \times \left(RC^{t,y} + \sum_{\substack{y \\ \text{if } (y-br)<L^t \Rightarrow \psi=br \\ \text{if } (y-br)\geq L^t \Rightarrow \psi=y-L^t}} M^{t,\psi} \times \mathbf{NC}^{t,\psi} \right) \times LR^{l,y} \qquad (۱۱)$$

پارامتر جدیدی که در روابط (۹) تا (۱۱) وجود دارد، $\xi^{t,l,k,s,y}$ است که به صورت «تلفات موجود در سیستم ذخیره t از ناحیه باری l تا ناحیه باری k در فصل s و در سال y تعریف» می‌شود.

۳-٤. ارتقای درون‌زای تکنولوژی‌های موجود

این قید به برنامه‌ریزی در زمینه میزان و زمان ارتقا و بهبود عملکرد در تکنولوژی خاصی که با صرف هزینه به‌دست آمده، کمک می‌کند؛ مسئله‌ای که برای کشوری مثل ایران اهمیت فراوانی دارد. از جمله کارکردهای مهم این قید، مسائل مربوط به ارتقای عملکرد پالایشگاه‌های نفت کشور است. برای مثال، آیا لازم است پالایشگاه‌های کشور (مانند پالایشگاه اراک) به واحدهای پیشرفته شکست مولکولی مانند RFCC مجهز شوند؟ و اگر چنین است، زمان مناسب برای این کار چه زمانی است؟ مثال دیگر عبارت است از ارتقای نیروگاه‌های توربین گازی کشور به سیکل ترکیبی.

برای این کار، فرض می‌شود که تکنولوژی A ـ صرف‌نظر از اینکه متعلق به کدام دسته سه‌گانه از تکنولوژی‌هاست ـ مستعد ارتقا به تکنولوژی B است. در این حالت قیدهای ظرفیت تکنولوژی B مانند حالت عادی نوشته می‌شود، ولی قید ظرفیت تکنولوژی A به صورت رابطه (۱۲) اصلاح می‌گردد:

$$\sum_{m} \mathbf{AO_A}^{t,m,y} \leq PF_A^{t,y} \times \left(RC_A^{t,y} + \sum_{\substack{y \\ \text{if } (y-br)<L^A \Rightarrow \psi=br \\ \text{if } (y-br)\geq L^A \Rightarrow \psi=y-L^A}} M_A^{t,\psi} \times \mathbf{NC}_A^{t,\psi} - \sum_{\substack{y \\ \text{if } (y-br)<L^A \Rightarrow \psi=br \\ \text{if } (y-br)\geq L^A \Rightarrow \psi=y-L^A}} M_B^{t,\psi} \times \mathbf{NC}_B^{t,\psi} \right) \times 1 \qquad (۱۲)$$

هزینه سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده برای تکنولوژی B همان هزینه ارتقای A به B است. ملاحظه می‌شود که این قید توسعه تکنولوژی B را منوط به توسعه A می‌کند؛ بنابراین به دو صورت می‌تواند کار

کند: ۱) اگر تکنولوژی A به‌عنوان یک تیپ، قابلیت توسعه در آینده را داشته باشد (مانند تیپ نیروگاه‌های گازی)، نیاز به تغییر دیگری نیست.[۱] ۲) ولی اگر این تکنولوژی معرف یک واحد خاص باشد (مانند یک پالایشگاه خاص)، باید قیدهایی بر ساخت ظرفیت‌های جدید از آن تکنولوژی قرار داد. در این حالت، خروجی مدل خواهد بود از برنامه ارتقا یا بهبود عملکرد آن واحد.

۳-۵. قیدهای مربوط به منابع

نوع مرسومی از قیدهای منبع که تمامی مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی دارند، قید مربوط به عدم تجاوز رقم برداشت، از میزان در جایِ قابل برداشت از آن منبع است. رابطه (۱۳) این مسئله را بیان می‌کند:

$$\sum_{\psi=by}^{ey} \mathbf{AE}^{f,\psi} \leq R^{f} \qquad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳)، R^f، میزان موجودی قابل برداشت از سوخت منبع f از سال پایه (by) تا سال پایانی (ey) است.

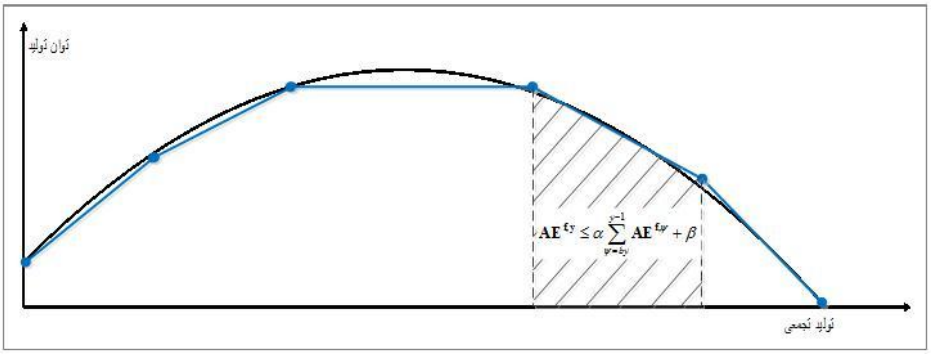
دومین قیدی که در این بخش معرفی می‌شود، معطوف به مدل‌سازی توان تولیدی از میادین نفتی است. این امر برای کشوری مانند ایران که بیشتر میادین بزرگ نفتی آن در نیمه دوم عمر خود قرار دارند (Abbaszadeh, et al., 2013)، بسیار حائز اهمیت است. برای این مهم، از مدل هوبرت که راجع به بحث‌های پیش‌بینی مسیر زمانی میزان تولیدات از مجموعه میادین نفتی است، استفاده می‌شود (Hubert, 1982). این تئوری قائل به این است که رابطه‌ای خطی میان تولیدات تجمعی از یک میدان و نسبت ماکزیمم توان تولید فعلی به تولیدات تجمعی بر اساس رابطه (۱۴) وجود دارد:

---

۱. این امر مستقل از توسعه و ساخت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به ص
مدل شناسانده می‌شود.

$$\frac{P_t}{\sum_{y=0}^{t-1} P_y} = \delta\,(1-\frac{\sum_{y=0}^{t-1} P_y}{U}) \qquad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، δ سطح اولیه نسبت ماکزیمم توان تولید به تولید تجمعی، و U مجموع ذخایر قابل استحصال است. مشاهده می‌شود که رابطه کلی میان توان تولید و تولید تجمعی در حالت کلی به صورت غیرخطی بوده قابل استفاده در مدل به شکل مزبور نیست. اما تقسیم کردن این منحنی به قطعات خطی مانند نمودار (۲) باعث می‌شود که بتوان متغیر برداشت سالانه از منبع ($AE^{f,y}$) را بر اساس نامعادله (۱۵)، در داخل سطح زیرین ایجاد شده توسط این قطعات تعریف کرد.



نمودار ۲. منحنی توان تولیدی میدان برحسب تولیدات تجمعی

$$\mathbf{AE}^{\mathbf{f,y}} \le \alpha \sum_{\psi=by}^{y-1} \mathbf{AE}^{\mathbf{f},\psi} + \beta \qquad (۱۵)$$

نامعادله (۱۵) برای منبع پایان‌پذیر f در هر سال y و به ازای هر خط، نوشته می‌شود. در این رابطه، α و β از مشخصه‌های میدان‌اند و برای هر خط مقادیر متفاوتی دارند.

۳-۶. قیدهای زیست‌محیطی

توسعه بخش انرژی همواره آثار زیست‌محیطی مانند انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای دارد. براساس داده‌های اداره اطلاعات انرژی آمریکا، ایران با انتشار ۵۲۴ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۱۱، میان کشورهای دارای بیشترین انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جهان در جایگاه هشتم بوده است (EIA webpage). گرچه ایران هم‌اکنون جزو کشورهای دارای تعهد انتشار نیست، آگاهی داشتن از وضع قید انتشار که در سال‌های آینده دور از ذهن نیست، ضروری است. این مسئله در نامعادله (۱۶) لحاظ شده است:

$$\sum_{t\in 1st\,group}\sum_{m}\mathbf{AO}^{t,m,y}\times\chi^{t,m,g,y}+\sum_{t\in 2nd\,group}\sum_{m}\sum_{l}\mathbf{O}^{t,m,l,y}\times\chi^{t,m,g,y}+\sum_{t\in 3rd\,group}\sum_{m}\mathbf{AO}^{t,m,y}\times\chi^{t,m,g,y}\le C^{g,y} \qquad (۱۶)$$

در رابطه فوق:

$\chi^{t,m,g,y}$: میزان انتشار گاز گلخانه‌ای g به ازای یک واحد کارکرد تکنولوژی t در حالت عملیاتی m در سال y.

$C^{g,y}$: سقف مجاز انتشار گاز گلخانه‌ای g در سال y.

در بخش‌های ۳-۱ تا ۳-۶، روابط و قیدهای کلیدی مدل تشریح شدند. باید گفت که قیدهایی که در برنامه‌ریزی انرژی به‌کار می‌روند الزاماً محدود به موارد فوق نبوده و قیدهای دیگری از قبیل محدودیت بر سطوح فعالیت، محدودیت‌های ظرفیت تکنولوژی‌های مختلف، سهم بازار از یک تکنولوژی مشخص، قیدهای دینامیک برای نفوذ تکنولوژی‌های نوظهور و ... نیز به فراخور ترجیحات مدل‌ساز و با توجه به قابلیت open source بودن مدل، ممکن است وارد کد اصلی مدل شوند.

۳-۷. تابع هدف مدل

تابع هدف در مدل‌های برنامه‌ریزی انرژی، دربردارنده تمامی هزینه‌های متصور مانند هزینه‌های تکنولوژی، هزینه‌های واردات و عواید ناشی از صادرات، هزینه‌های منابع و هزینه‌های خارجی[1] و ... بوده که همگی به سال پایه تنزیل داده می‌شوند و هدف مدل، یافتن مجموعه جوابی است که به ازای آن، این هزینه‌ها کمینه گردند. در روابط (۱۷) تا (۱۹) هزینه‌های اصلی مربوط به تکنولوژی‌ها، آورده شده‌اند:

$$\mathbf{Capex} = \sum_{\mathbf{t}} \left(\sum_{\psi=\mathbf{br}}^{\mathbf{ey}} \frac{IC^{t,\psi} \times M^{t,\psi} \times \mathbf{NC}^{\mathbf{t,\psi}}}{(1+dr)^{\psi-br}} - \sum_{\psi=\mathbf{ey-L^t+1}}^{\mathbf{ey}} \frac{IC^{t,\psi} \times M^{t,\psi} \times \mathbf{NC}^{\mathbf{t,\psi}} \times (1-\frac{(1+dr)^{ey-\psi+1}-1}{(1+dr)^{L^t}-1})}{(1+dr)^{ey-br}} \right) \quad (۱۷)$$

$$\mathbf{Opex^{fix}} = \sum_{\psi=\mathbf{by}}^{\mathbf{ey}} \frac{1}{(1+dr)^{\psi-by+0.5}} \left(\sum_{\mathbf{t}} FC^{t,\psi} \times (RC^{t,\psi} + \sum_{\substack{\mathbf{if\ (\psi-br)<L^t \Rightarrow \delta=br} \\ \mathbf{if\ (\psi-br)\geq L^t \Rightarrow \delta=\psi-L^t}}^{\psi} M^{t,\delta} \times \mathbf{NC}^{\mathbf{t,\delta}}) \right) \quad (۱۸)$$

$$\mathbf{Opex^{var}} = \sum_{\psi=\mathbf{by}}^{\mathbf{ey}} \frac{1}{(1+dr)^{\psi-by+0.5}} \left(\begin{array}{l} \sum_{\mathbf{t\in 1st\ and\ 3rd\ group}} \sum_{\mathbf{m}} VC^{t,m,\psi} \times \mathbf{AO}^{\mathbf{t,m,\psi}} + \sum_{\mathbf{t\in 2nd\ group}} \sum_{\mathbf{m}} VC^{t,m,\psi} \times (\sum_{\mathbf{l}} \mathbf{O}^{\mathbf{t,m,l,\psi}}) \\ + \sum_{\mathbf{t\in Storage\ Technologies}} \sum_{\mathbf{s}} \sum_{\mathbf{l\in s}} (VCSI^{t,y} \times \mathbf{SI}^{\mathbf{t,f,l,s,y}} - \sum_{\mathbf{k,k\neq l}} \mathbf{SO}^{\mathbf{t,f,k,l,s,y}} \times VCSO^{t,y}) \end{array} \right) \quad (۱۹)$$

رابطه (۱۷)، هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری تکنولوژی‌های جدید را محاسبه می‌کند. عبارت دوم در این رابطه ارزش تکنولوژی‌هایی است که در طول دوره برنامه‌ریزی احداث شده‌اند و پس از سال انتهایی دوره، یعنی ey، نیز همچنان عمر مفید دارند که با استفاده از روش fund depreciation ارزش حال آنان به‌دست آمده است.

روابط ۱۸ و ۱۹ هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تکنولوژی‌ها را فرموله می‌کنند که خود مشتمل بر دو قسم است: اولی که در رابطه ۱۸ آمده است، هزینه‌های ثابت تعمیرات و نگهداری که

1. Externality

صرف‌نظر از میزان فعالیت یک تکنولوژی، براساس موجودی ظرفیت از هر تکنولوژی در هر سال، هزینه‌های لازم برای آماده به‌کار بودن مجموعه تکنولوژی‌ها را محاسبه و به سال پایه تنزیل می‌دهد. اما هزینه‌های تعمیرات و نگهداری متغیر که در رابطه (۱۹) آمده است، بر اساس میزان فعالیت هر تکنولوژی محاسبات را انجام داده به سال پایه تنزیل می‌دهد. مشاهده می‌شود که متغیرهای به‌کار رفته در این رابطه همان متغیرهای فعالیت تکنولوژی‌های سه‌گانه به اضافه متغیرهای مربوط به ورودی و خروجی تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی است.

نهایتاً تابع هدف به شکل رابطه (۲۰) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Objective Function} = \text{Capex} + \text{Opex}^{\text{fix}} + \text{Opex}^{\text{var}} \qquad (۲۰)$$

تعاریف مربوط به علایم فوق به شکل زیر است:

ey: سال انتهایی برنامه‌ریزی.

$IC^{t,y}$: هزینه سرمایه‌گذاری برای یک واحد ظرفیت از تکنولوژی t در سال y.

$FC^{t,y}$: هزینه‌های سالانه تعمیرات و نگهداری سالیانه برای یک واحد ظرفیت از تکنولوژی t در سال y.

$VC^{t,m,y}$: هزینه‌های متغیر تعمیرات و نگهداری به ازای یک واحد فعالیت تکنولوژی t در حالت عملیاتی m در سال y.

$VCSI^{t,y}$: هزینه‌های متغیر تعمیرات و نگهداری به ازای یک واحد ورودی به سیستم ذخیره t در سال y.

$VCSO^{t,y}$: هزینه‌های متغیر تعمیرات و نگهداری به ازای یک واحد خروجی از سیستم ذخیره t در سال y.

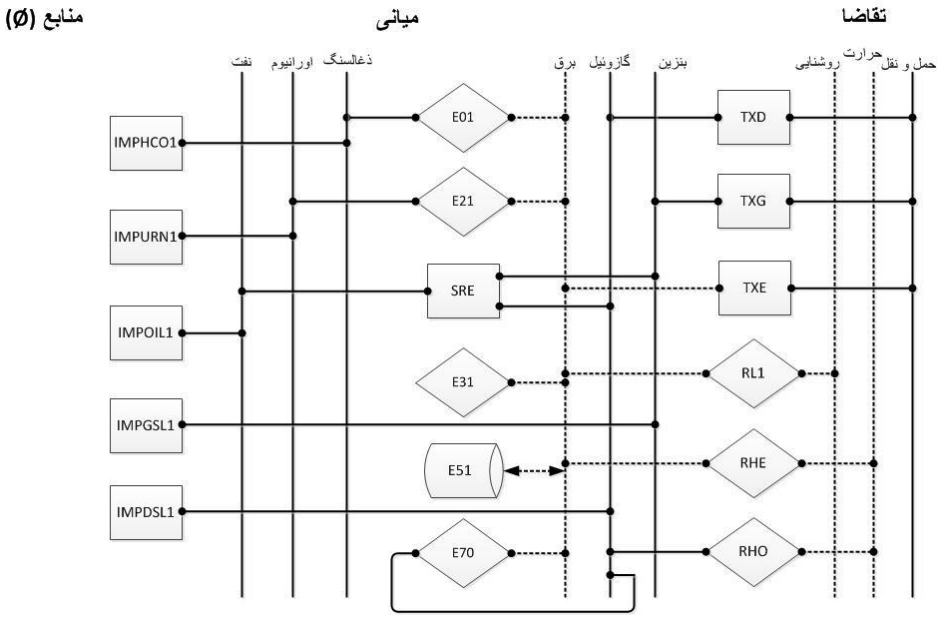
ازجمله هزینه‌های دیگری که کارکرد بخش انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، جریمه‌های انتشار آلاینده است که در حجم‌های مختلف انتشار از آن آلاینده متفاوت است و به صورت پلکانی افزایش می‌یابند. این حالت‌ها هم برحسب نیاز به مدل وارد می‌شوند، ولی به‌دلیل اینکه تجارت کربن در کشور هم‌اکنون جاری نیست، از وارد کردن آن‌ها در مدل در این مقطع خودداری شده است.

٤. اعتباربخشی

صحت خروجی‌ها و عملکرد مؤثر مدل تا زمانی که اعتباربخشی به آن صورت نگرفته باشد، قابل اعتنا نیستند. لذا مدل باید به طریقی اعتباربخشی شود.

اصولاً اعتبار بخشی به مدل‌های انرژی به دلیل ماهیت آینده‌نگر آنها ساده نیست (DeCarolis, et al., 2012). یکی از روش‌های اعتبار بخشی عبارت است از: مقایسه نتایج حاصل از حل یک نمونه واحد در مدل‌های مختلف، با یکدیگر. این همان روشی است که توسعه‌دهندگان OSeMOSYS برای صحت‌بخشی به مدل خود از آن بهره برده‌اند، جایی که یک مثال معروف به نام UTOPIA را به‌وسیله OSeMOSYS اجرا کرده نتایج حاصل را با نتایج حاصل از اجرای UTOPIA توسط MARKAL مقایسه کردند (Howells et al., 2011). این روش به دلیل دسترسی به اطلاعات مثال UTOPIA کاملاً عملی است.

در نمودار (۳) سیستم مرجع انرژی مثال UTOPIA، با توجه به کارکرد تکنولوژی‌ها و حامل‌های موجود در آن، با استفاده از علایم و شکل‌های تعریف شده در بخش‌های پیشین، ترسیم شده است.



نمودار ۳. سیستم مرجع انرژی مثال UTOPIA

مشاهده می‌شود که برای خدمات حمل‌ونقل (TX)، حرارت (RH) و روشنایی (RL) تقاضا وجود دارد. تقاضای حمل‌ونقل توسط خودروهای دیزلی (TXD)، خودروهای بنزینی (TXG) و خودروهای الکتریکی (TXE)، تقاضای حرارت توسط هیترهای برقی (RHE) و هیترهای دیزلی (RHO) و تقاضای روشنایی به‌وسیله تکنولوژی RL1 تأمین می‌گردند. برای دو حامل RL و RH تقاضای متغیر در سال وجود دارد و به همین دلیل این دو حامل به صورت خط‌چین نشان داده شده‌اند. بر همین اساس تکنولوژی‌هایی که این دو سوخت موجود در گروه تقاضا را تولید می‌کنند به شکل لوزی (نوع دوم) و مابقی به شکل مستطیل (نوع اول) نشان داده شده‌اند. سوخت دیگری که در سال تولیدات متغیر دارد و در گروه میانی قرار گرفته است، برق (ELC) است که به‌وسیله چهار تکنولوژی نوع دوم: نیروگاه زغالی (E01)، نیروگاه هسته‌ای (E21)، نیروگاه برق‌آبی (E31) و نیروگاه دیزلی (E70) تولید می‌گردد. همچنین این امکان وجود دارد که نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای E51

برق را در ساعت کم‌باری ذخیره کرده و در ساعات پرباری آزاد کند. دو سوخت میانی دیگر، یعنی گازوئیل (DSL) و بنزین (GSL)، را می‌توان به‌وسیله پالایشگاه نفت (SRE) تولید کرد یا از خارج وارد نمود (این کار با تعریف تکنولوژی‌های IMPDSL1 و IMPGSL1 صورت می‌گیرد). دیگر سوخت‌های میانیِ زغال سنگ (HCO)، اورانیوم (URN) و نفت خام (OIL) به‌ترتیب به‌وسیله تکنولوژی‌های IMPHCO1، IMPURN1 و IMPOIL1 به داخل مرزهای UTOPIA وارد می‌شوند.

همچنین چند قید بر حداکثر و حداقل ظرفیت‌های برخی از تکنولوژی‌ها وجود دارد: نیروگاه زغالسوز باید در تمام طول دوره برنامه‌ریزی دست‌کم دارای ظرفیت ۰/۱۳ گیگاوات داشته باشد. درعین حال، نمی‌تواند ظرفیتی بیش از ۰/۱۳ گیگاوات، ۰/۱۷ گیگاوات و ۰/۲۱ گیگاوات در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ داشته باشد. نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای نیز حداکثر می‌تواند ۳ گیگاوات ظرفیت در هر سال داشته باشد. دیگر تکنولوژی‌ای که قید حداکثر ظرفیت دارد، خودروی برقی است که سقف آن در سال‌های ذکر شده در بالا به ترتیب برابراست با ۰، ۴ و ۱۰ پتاژول بر سال. سایر اطلاعات فنی و اقتصادی UTOPIA در ضمیمه مقاله آورده شده‌اند.

کدِ مدل OSeMOSYS و فایلِ دیتای UTOPIA به‌ترتیب با نام‌های "OSeMOSYS_2013_05_10_short.txt" و "UTOPIA_2013_05_10.dat"، از وب‌سایت "www.osemosysmain.yolasite.com" دانلود شدند.[۱]

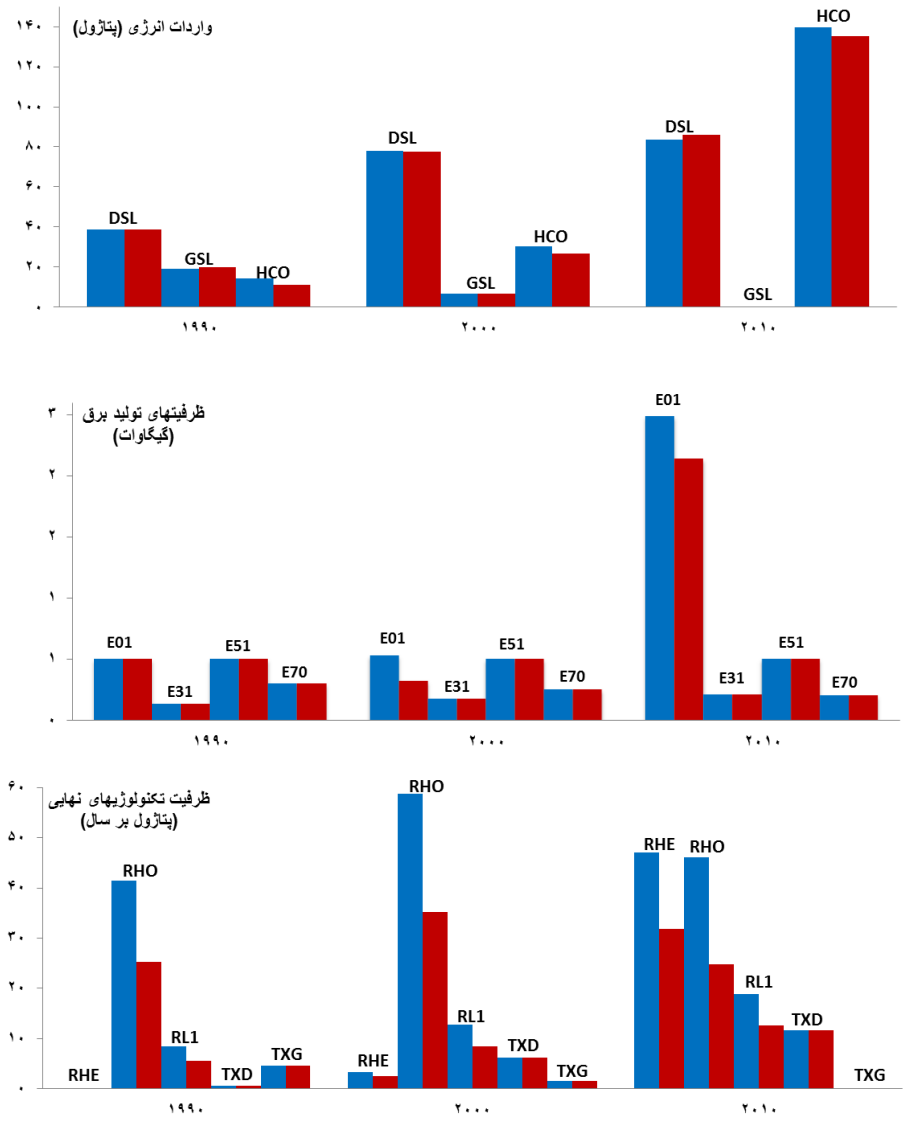
---

۱. گفتنی است که اطلاعاتی که در جدول (۱) از مقاله هاولز و همکاران (Howells et al., 2011) برای UTOPIA ذکر شده است، در موارد معدودی با دیتا فایلِ دانلود شده، مغایرت دارد که منجر به جواب‌های متفاوتی می‌شود. این مغایرت‌ها به همراه پارامترها و مقادیر آن در جدول زیر ذکر شده‌اند:

Parameter / Source	Residual capacity of TXG (PJ/year)	Input to activity ratio					Capital Cost of RL1	Variable Cost of E70
		TXG	TXE	RHO	TXD	E21		
UTOPIA data file	0	1	1	**1.43**	1	1	0	**0.4 M$/PJ**
[Howells et, al., 2011]	**(1990:4.6,2000:1.5,2010:0)**	**4.33**	**1.21**	1	**4.33**	**2.5**	**100 M$/GW**	0

اعتباربخشی به مدل با استفاده از ارقامی صورت گرفته است که به صورت **برجسته** آورده شده‌اند.

در نمودار (۴) نتایج حاصل از اجرای مثال UTOPIA در هر دو مدل نشان داده شده‌اند:



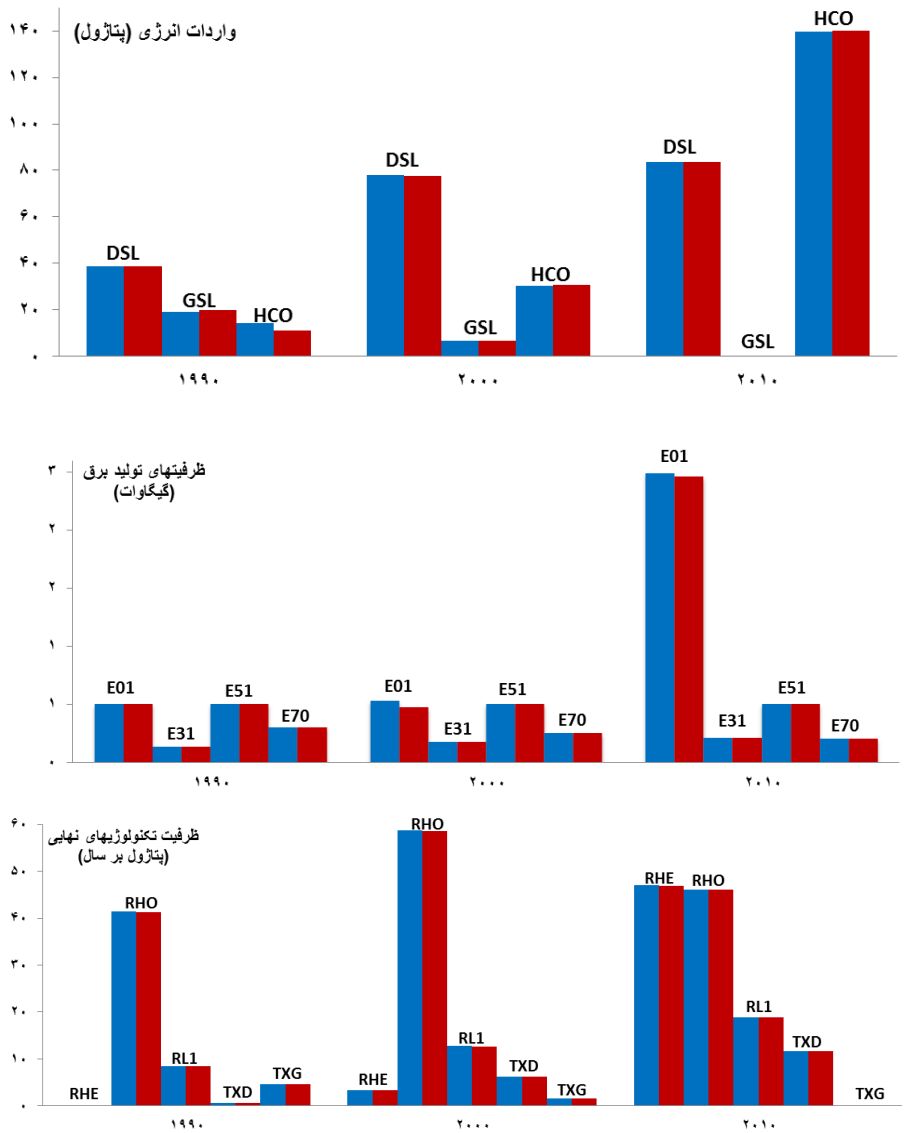
نمودار ۴. مقایسه نتایج اجرای UTOPIA در مدل (رنگ‌های آبی) با نتایج آن در OSeMOSYS (رنگ قرمز)

نتایج مدل با گرفتن ۷/۷ مگابایت از حافظه، درحالی‌که نتایج OSeMOSYS با گرفتن ۲۸/۴ مگابایت از حافظه به‌دست می‌آیند. همچنین فایل MPS در این مدل ۱۷۵۵ در ۱۵۷۵ بوده درحالی‌که این فایل برای OSeMOSYS۸۰۸۵ در ۸۸۲۰ است. ملاحظه می‌شود که رویکردی که در توسعه مدل به‌کار گرفته شد، به شدت از حجم متغیرها کاسته است و از نظر محاسباتی، برتری قابل‌ملاحظه‌ای دارد. این امر به این دلیل است که OSeMOSYS صرف‌نظر از نوع و کارکرد یک تکنولوژی، برای تمام آنان، به تعداد نواحیِ باریِ تعریف شده، متغیر فعالیت درنظر می‌گیرد. همچنین حالات عملیاتی تمامی تکنولوژی‌ها، برابر با حالت عملیاتی تکنولوژیِ با بیشترین حالت عملیاتی است. برای مثال، اگر ۳ ناحیه باری در مدل تعریف شده و حالت عملیاتی فقط یکی از تکنولوژی‌ها، ۴ باشد، OSeMOSYS برای هر تکنولوژی خواه ضروری باشد یا نباشد، ۱۲ متغیر فعالیت در نظر می‌گیرد. این مسئله باعث حجیم شدن فایل MPS مدل و در نتیجه صرف مقادیر بالایی از حافظه سیستم می‌گردد؛ موضوعی که در مدل‌های بزرگ منطقه‌ای کشوری، ممکن است به شدت مشکل‌ساز شود. در حقیقت، تمامی قراردادها و فرضیاتی که برای دسته‌بندی تکنولوژی به صورتی که در قسمت پیشین مقاله بدان‌ها اشاره شد، به‌کار رفتند موجب چنین تفاوتی در فرایند مدل‌سازی شدند.

اما، بازگشت به شکل (۴) نشان می‌دهد که روند تقریباً همسانی میان نتایج دو مدل وجود دارد. با این تفاوت که سرمایه‌گذاری‌های تکنولوژی‌های تقاضا در OSeMOSYS، کمتر از مقادیرِ متناظر آنها در مدل است. این مسئله فقط برای تکنولوژی‌های دارای ناحیه باری (RL1، RHO و RHE) وجود داشت و مابقی تکنولوژی‌های تقاضا، یعنی TXG و TXD، مقادیر یکسانی را در دو مدل گرفته‌اند. دلیل آن هم این است که OSeMOSYS دو نوع قید ظرفیت برای تکنولوژی‌ها می‌نویسد: نوع اول مربوط به تکنولوژی‌هایی است که باید نیازمندی‌های بار پیک را تأمین کنند، و نوع دوم مربوط به تکنولوژی‌هایی است که باید نیازمندی‌های سالانه را تأمین کنند. واضح است که تغییر نقش یک تکنولوژی از تأمین نیازهای سالانه به تأمین نیازهای ساعات روز، باعث افزایش ظرفیت انتخاب شده برای آن تکنولوژی در حل نهایی مدل خواهد شد. این موضوعی است که باعث بروز اختلاف در ظرفیت‌های سرمایه‌گذاری شده در دو مدل شده است. چراکه توسعه‌دهندگان

OSeMOSYS، در دیتا فایل مربوط به UTOPIA، تکنولوژی‌های لایه نهاییِ RL1، RHE و RHO را مجبور نکرده‌اند که نیازهای پیک روزانه را نیز تأمین کنند. اگر چنین بود، قیدهای ظرفیت برای این سه تکنولوژی، به جای قیدهای سالانه، در هر ناحیه باری نوشته می‌شد که دستِ آخر منجر به ظرفیت‌های بیشتری برای این تکنولوژی‌های می‌گشت. برای آزمایش این مسئله، این سه تکنولوژی را از حالت فوق در دیتا فایل UTOPIA خارج کرده مجدداً مدل را اجرا می‌کنیم[۱]. نمودار (۵) نتایج را نشان می‌دهد.

۱. این کار با تغییر عدد متناظر با تکنولوژی‌های RL1، RHE و RHO در پارامتر Tech With Capacity Needed To Meet Peak TS از صفر به یک امکان‌پذیر است.



نمودار ۵. نتایج مربوط به اجرای UTOPIA در مدل (ستون‌های آبی) و OSeMOSYS تغییریافته (ستون‌های قرمز)

مشاهده می‌شود که همخوانی نتایج در دو مدل بسیار بالاست.

۵. جمع‌بندی

مقاله درصدد باز کردن پنجره‌ای جدید به روی جامعه مدل‌سازی کشور در زمینه انرژی و محیط‌زیست است و تأکید آن بر ایجاد یک مدل بومی بهینه‌سازی برای بخش انرژی کشور است. تاکنون مطالعات برای یافتن مسیر بهینه جهت توسعه بخش انرژی کشور توسط مدل‌هایِ با کدِ بسته صورت می‌گرفته است. این مقاله برای اولین بار، به معرفی مدلی بهینه‌ساز و کد باز برای سیستم انرژی کشور پرداخت که کدهای آن در زبان مدل‌سازی GNU Mathprog نوشته شده‌اند. ایده اولیه روی آوردن به مدل‌سازی open source، در مدل معروف OSeMOSYS عرضه شد که توسعه‌دهندگان آن، آن را ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های انرژی و محیط‌زیست در کشورهای در حال توسعه معرفی کردند، و هم‌زمان، آنان را تشویق کرده‌اند که به‌جای اتکا به مدل‌های دارای حق مالکیت، با آموزش نیروی انسانی به سمت مدل‌سازی کد باز رفته و از مزیت‌های آن بهره‌مند گردند. مقاله پیش‌روی نیز اقدامی در همین راستا بوده است. بخش عمده مقاله به بیان قراردادها و تقسیم‌بندی‌های مدل در ارتباط با سوخت‌ها و تکنولوژی‌ها و پس از آن، فرمولاسیون مدل که مهم‌ترین فرایند در توسعه یک مدل است، اختصاص یافت و در آخر، با اجرای یک مثال شناخته شده به نام UTOPIA به‌وسیله آن و مقایسه نتایج حاصل، با نتایج OSeMOSYS اعتباربخشی صورت گرفت. مقایسه حجم فایل MPS در دو مدل، حاکی از کاهش چشمگیر حجم آن در مدلِ توسعه داده شده است که اثر خود را در زمان اجرای مدل تا رسیدن به جواب نهایی می‌گذارد. این مسئله به‌واسطه قراردادها و تقسیم‌بندی‌هایی بود که با توجه به ماهیت کارکرد اجزاء مدل در کدِ برنامه‌ریزی ریاضی صورت پذیرفت و باعث کم شدن حجم انبوهی از متغیرها شد که در مدل OSeMOSYS ساخته و پردازش می‌شوند.

منابع

- سبوحی، ی. (۱۳۷۳)، "*دورنمای توسعه بخش انرژی در جمهوری اسلامی ایران*"، نتایج مطالعه طرح جامع انرژی کشور، سازمان مدیریت و برنامه و بودجه.
- رضوی، س.م. و هـ. اشراقی (۱۳۹۲)، *مدل‌سازی سیستم عرضه انرژی کشور با استفاده از ابزار تحلیلی MESSAGEV*، انتشارات مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی.

- DeCarolis, JF.; Hunter, K. & S Sreepathi (2011), “The Case for Repeatable Analysis with Energy Economy Optimization Models”, *Energy Economics*, 34:1845–1853.
- DeCarolis, JF.; Hunter, K.(2013), “How to Value Future Uncertainty in Energy System Planning?”, *International Energy Workshop*, Paris, France, June pp.19-21.
- Makhorin, A. (2010), *“Modeling Language GNU MathProg. Access in August 2015”*, via:http://www3.nd.edu/~jeff/mathprog/glpk-4.47/doc/gmpl.pdf
- Howells, M. (2009), *“Contribution to the OSMOSYS Forum Open Source energy Modeling System Working Paper: Documentation for OSMOSYS Model”*, Accessible on: http://osmosys.yolasite.com/resources/OSMOSYS%202009_1_1.pdf
- Howells, M. et. Al. (2011), “OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System An Introduction to Its Ethos, Structure and Development”, *Energy Policy***,** Vol. 39, pp. 5850–5870.
- Hunter, K.; Sreepathi, S. & F. DeCarolis. J. (2013), “Modeling for Insight Using Tools for Energy Model Optimization and Analysis (TEMOA)”, *Energy Economics*, Vol. 40, pp. 339-349, ISSN 0140-9883.
- Abbaszadeh P.; Maleki, A.; Alipour M. & Y. Kanani (2013), "Iran’s oil Development Scenarios by 2025", *Energy Policy***,** Vol. 56, pp. 612–622.
- Hubbert, M. King (1982) *“Techniques of Prediction as Applied to the Production of Oil and Gas”* inSaul I. Gass, ed., Saul I. Gass, ed.
- http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=ir, (Access in August 2015)

جداول و ضمائم

علائم اختصاری سوخت‌ها و تکنولوژی‌های مثال UTOPIA

تکنولوژی‌ها		حامل‌های انرژی	
E01	نیروگاه زغالی	OIL	نفت خام
E21	نیروگاه هسته‌ای	URN	اورانیوم
E31	نیروگاه آبی	HCO	زغال سنگ
E51	نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای	ELC	برق
E70	نیروگاه گازی	DSL	گازوئیل
IMPDSL1	واردات گازوئیل	GSL	بنزین
IMPGSL1	واردات بنزین	RL	خدمات روشنایی
IMPHCO1	واردات زغال سنگ	RH	خدمات حرارت
IMPOIL1	واردات نفت خام	TX	خدمات حمل و نقل
IMPURN1	واردات اورانیوم		
RHE	هیتر برقی		
RHO	هیتر گازوئیلی		
RL1	لامپ		
SRE	پالایشگاه نفت		
TXD	خودروی دیزلی		
TXE	خودروی برقی		
TXG	خودروی بنزینی		