مهندسی صنایع و مدیریت شریف
دوره‌ی ۱ - ۲۶، شماره‌ی ۲، ص. ۷۱-۸۷

یک مدل دینامیک سیستم برای تجزیه و تحلیل سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران

سعید پورمعصومی (کارشناس ارشد)
سیدنادر شتاب بوشهری (استادیار)
بهروز ارباب‌شیرانی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان
علینقی مشایخی (استاد)
دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف

این نوشتار برمبنای مدل پویای مشایخی که در سال ۱۹۷۸ برای بررسی سیستم اقتصادی - اجتماعی ایران ساخته شده بود، به ایجاد یک مدل سیستم دینامیک اقتصاد - انرژی می‌پردازد. بخش انرژی در مدل حاضر شامل هشت زیربخش است که تعاملات آن‌ها با زیربخش‌های مدل مشایخی یک سیستم بازخور قدرتمند برای تجزیه و تحلیل کل سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران ارایه می‌کند. نتایج نوشتار نشان می‌دهد که ایجاد بهبود در رفتار سیستم، نیازمند اجرای همزمان این سیاست‌ها است : ۱) تخصیص سهم بیش‌تری از گاز تولید شده در داخل برای تزریق به چاه‌های نفت، ۲) صرفه‌جویی در مصرف داخلی انرژی و محدود کردن واردات آن، ۳)افزایش سرمایه‌گذاری در زمینه‌ی توزیع و مصرف گاز طبیعی به‌منظور افزایش سهم بازار داخلی آن نسبت به حامل‌های دیگر انرژی، ۴) تلاش در جهت بهبود روابط سیاسی بین‌المللی ایران.

spour@live.com
shetab@cc.iut.ac.ir
ashirani@cc.iut.ac.ir
mashayekhi@gmail.com

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، سیستم دینامیک، مدل اقتصاد ـ انرژی.

۱. مقدمه

انرژی چنان نقش تعیین‌کننده‌یی در زندگی موجودات زنده دارد که آن را «گوهر حیات» نامیده‌اند. انرژی ازجمله نیازهای اصلی فرایند توسعه‌ی کشورهاست. تا چند دهه‌ی گذشته، علم اقتصاد در بخش تولید فقط بر دو عامل تولید ـ کار و سرمایه ـ تأکید داشت. با ظهور انقلاب صنعتی و تغییر فرایند تولید، مواد اولیه نیز به جرگه‌ی عوامل تولید افزوده شد. از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی، بعد از افزایش قیمت نفت خام و ظهور بحران در اقتصاد جهانی، مسئله‌ی انرژی و کم‌یابی آن مطرح شد و به‌شدت مورد توجه پژوهش‌گران، به‌ویژه اقتصاددانان کشورهای صنعتی، قرار گرفت.[۱]

بعضی ازکشورهای در حال توسعه همچون ایران، که دارای منابع انرژی تجدیدناپذیر نفت‌وگاز هستند، می‌توانند منابع انرژی خود را با کالاها و خدماتی که برای توسعه‌ی اقتصادی آن‌ها لازم است مبادله کنند. اما رشد اقتصادی سریع براساس صادرات منابع انرژی، اولاً ممکن است سبب وابستگی فزاینده‌ی اقتصاد به این منابع تجدیدناپذیر شود و با اتمام آن‌ها، کشور با بحران اقتصادی شدید مواجه شود؛[۲] ثانیاً نیازمند برنامه‌ریزی دقیق در بخش انرژی به‌منظور پاسخ‌گویی صحیح به نیازهای توسعه‌ی کشور است. به‌عنوان نمونه، ایران تا سال ۱۴۰۰ هجری خورشیدی برای حفظ ظرفیت تولید خود در بخش انرژی نیازمند ۱۴۶ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری است؛ که اگر نتواند این مقدار سرمایه‌گذاری را در بخش انرژی جذب کند، قطعاً از ظرفیت تولیدی کشور کاسته خواهد شد.[۳] افزون بر این، بحران‌های انرژی تنها بر اقتصاد کشورهای واردکننده‌ی انرژی اثر نگذاشته، بلکه آثار این بحران‌ها همواره گریبان‌گیر کشورهای صادرکننده‌ی انرژی نیز بوده است. تحقیقات اقتصادی نشان داده است که افزایش درآمدهای حاصل از صادرات نفت در ایران به تضعیف بخش قابل مبادله ـ مانند کشاورزی و صنعت ـ می‌انجامد اگرچه بخش‌های غیر قابل مبادله نظیر بخش ساختمان را تقویت می‌کند. افزایش هزینه‌های تولید و به‌تبع آن، افزایش سطح عمومی قیمت‌ها، کاهش قدرت رقابت کالاهای داخلی در مقابل کالاهای مشابه خارجی، افزایش واردات و کاهش صادرات غیرنفتی، نمونه‌های دیگری از آثار شوک‌های نفتی در اقتصاد ایران است.[۴]

از مطالب گفته‌شده می‌توان نتیجه گرفت که تعاملات موجود میان بخش انرژی و بخش‌های دیگر اقتصاد در کشورهایی همچون ایران، به ایجاد حلقه‌های بازخوری منجر می‌شود که باعث پیچیدگی رفتار سیستم اقتصاد ـ انرژی شده و تصمیم‌گیری در جهت بهبود عملکرد سیستم مزبور را با دشواری مواجه می‌کند. بنابراین، ضروری است تا مدیران و تصمیم‌گیران مسائل اقتصاد ـ انرژی این کشورها، مدل‌هایی در اختیار داشته باشند تا با استفاده از آن‌ها بتوانند رفتار سیستم یادشده را بهتر درک کرده و تصمیمات مناسب‌تری اتخاذ کنند.

«سیستم دینامیک» که در سال ۱۹۶۱ توسط پروفسور جی فارستر[۱] در کتاب مشهور دینامیک صنعتی[۲] معرفی و ارائه شد،[۵] یکی از روش‌های تحلیل سیستم

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۷/۲۹، داوری ۱۳۸۹/۱/۲۵، پذیرش ۱۳۸۹/۴/۱۴.

است که با استفاده از آن می‌توان به مدل‌سازی سیستم‌های اقتصادی ـ اجتماعی پیچیده پرداخت. این روش در سال‌های بعد توسعه یافت[۶] و در زمینه‌های مختلف برای سیاست‌گذاری در سطوح جهانی،[۷] ملی،[۸-۱۰] بخشی،[۱۱و۱۲] و سازمانی[۱۳] به کار گرفته شد. مدل‌های سیستم دینامیک این قابلیت را دارند که حلقه‌های بازخور موجود در سیستم اقتصاد ـ انرژی را به تصویر بکشند و رفتار الگوهای مختلف سیستم را در طول زمان مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دهند.

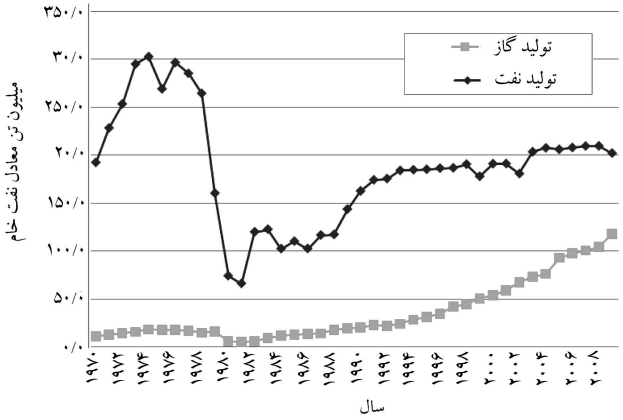
در این نوشتار با استعلام از یک مدل دینامیکی، سیاست‌های انرژی در ایران تجزیه و تحلیل می‌شود. در بخش دوم این نوشتار مسائل انرژی در ایران مطرح می‌شود و بخش سوم به مروری بر مدل‌های انرژی اختصاص دارد. در بخش چهارم، ساختار مدل اقتصاد ـ انرژی ایران که مبتنی بر مدل پویایی‌شناسی دینامیکی است تشریح می‌شود. بخش پنجم این مقاله به تحلیل حساسیت و تحلیل سیاست مدل اختصاص یافته و در بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها خواهیم پرداخت.

۲. بیان مسئله

ایران یکی از اعضای سازمان کشورهای صادرکننده‌ی نفت (اوپک)، و جزو سه کشور دارنده‌ی عظیم‌ترین ذخایر نفت‌وگاز کشف‌شده‌ی جهان است. ایران دومین صادرکننده‌ی بزرگ اوپک پس از عربستان صعودی و چهارمین صادرکننده‌ی بزرگ نفت خام جهان، پس از عربستان صعودی، روسیه، و نروژ است. به‌نقل از مجله‌ی نفت و گاز، تا اول ژانویه‌ی ۲۰۰۷، ایران ۱۳۶ میلیارد بشکه ذخیره‌ی نفت کشف‌شده، یعنی تقریباً ۱۰٪ کل ذخایر نفتی جهان را در اختیار دارد.[۱۴] این در حالی است که شرکت بریتیش پترولیوم ذخایر کشف‌شده‌ی گاز ایران تا پایان سال ۲۰۰۷ را معادل ۲۷٫۸ تریلیون متر مکعب، و سهم ایران از ذخایر گاز جهان را ۱۵٫۷٪ گزارش کرده است. بریتیش پترولیوم همچنین مصرف انرژی ایران در سال ۲۰۰۷ را معادل ۱۸۲٫۹ میلیون تن نفت خام عنوان کرده که این مقدار، ۱٫۶٪ از کل مصرف انرژی در جهان را تشکیل می‌دهد.[۱۵]

اگرچه ایران ذخایر عظیم انرژی فسیلی را در اختیار دارد، عملکرد سیستم انرژی در بعد از انقلاب، چندان که باید مطلوب نبوده است. شکل ۱ تولید نفت و گاز کشور را از سال ۱۹۷۰ تا کنون به تصویر می‌کشد.

مشاهده می‌شود که پس از گذشت ۳۰ سال از انقلاب اسلامی هنوز صنعت نفت کشور نتوانسته به حجم تولید دهه‌ی ۱۹۷۰ دست یابد. شیب نمودار مربوطه



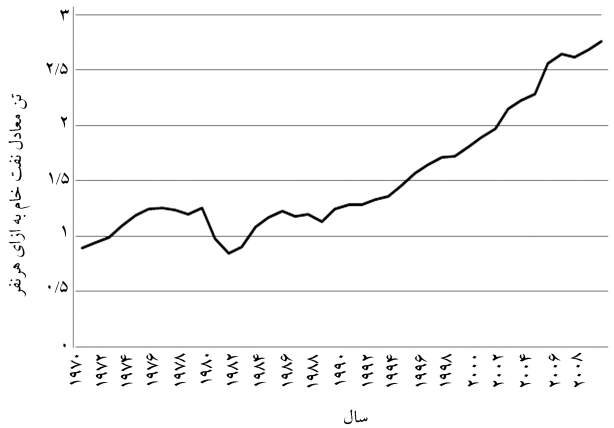
شکل ۱. تولید نفت و گاز ایران.[۱۵]

نیز نشان می‌دهد که این ظرفیت تولید برای ایران تکرارنشدنی خواهد بود. به‌علاوه، روند افزایش تولید گاز نیز به‌نحوی نبوده است که بتواند عقب‌ماندگی تولید نفت را جبران کند.

این در حالی است که مصرف انرژی در کشور به‌طرز چشمگیری در حال افزایش است. شکل ۲ مصرف سرانه‌ی انرژی را طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مصرف سرانه‌ی انرژی در سال‌های اخیر بی‌وقفه در حال افزایش بوده است. شاید افزایش مصرف انرژی را بتوان به‌عنوان یکی از الزامات رشد اقتصادی توجیه کرد اما مقدار بالای شدت انرژی در کشور این توجیه را بی‌اثر و غیر قابل قبول می‌گرداند.

شدت انرژی عبارت است از انرژی مورد نیاز برای تولید مقدار معینی از کالاها و خدمات. شدت انرژی برحسب عرضه‌ی انرژی اولیه یا مصرف نهایی انرژی محاسبه می‌شود. این شاخص نشان‌گر درجه‌ی بهینگی استفاده از انرژی در یک کشور است.[۱۶] جدول ۱ شدت انرژی ایران را در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۵ با برخی از کشورهای منتخب جهان مقایسه می‌کند. چنان که مشاهده می‌شود، شدت انرژی در مقایسه با سایر کشورهای جهان از شرایط نامطلوبی برخوردار است. به‌عنوان مثال، شدت انرژی ایران در سال ۲۰۰۵ بیش از پنج برابر شدت انرژی ایالات متحده‌ی آمریکا است؛ به‌عبارت دیگر، کارآیی انرژی ایران بیش از پنج برابر پایین‌تر از کشور نامبرده است.

به‌رغم تمامی مسائل ذکرشده، در حال حاضر مهم‌ترین زمینه‌ی مباحثات اقتصادی در بخش انرژی کشور، به نحوه‌ی استفاده‌ی بهینه از ذخایر نفت‌وگاز مربوط است. دیدگاه‌های متفاوتی در این زمینه میان کارشناسان صاحب‌نظر وجود دارد که در ادامه به‌اختصار توضیح داده می‌شود.



شکل ۲. مصرف سرانه‌ی انرژی در ایران.[۱۵]

جدول ۱. شدت انرژی در کشورهای منتخب (منبع: ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۵)[۱۶].

کشور	شدت انرژی (تن معادل نفت خام به هزار دلار آمریکا به قیمت ثابت سال ۲۰۰۰)	
	سال ۱۹۹۰	سال ۲۰۰۵
ایران	۰٫۹۸	۱٫۲۳
ایالات متحده‌ی آمریکا	۰٫۲۷	۰٫۲۱
برزیل	۰٫۲۹	۰٫۳۱
آلمان	۰٫۲۳	۰٫۱۸
عربستان سعودی	۰٫۴۳	۰٫۶۱
نیجریه	۲٫۰۳	۱٫۷۲

دیدگاه اول: رابطه‌ی نفت و توسعه

دیدگاه عموم کارشناسان و برنامه‌ریزان اقتصادی- سیاسی ایران این است که نفت و گاز باید به‌مثابه یک ثروت و سرمایه‌ی ملی تلقی شود. براین مبنا، تبدیل سرمایه‌ی زیرزمینی به ثروت روی زمین با ارزش افزوده‌ی بیش‌تر، منطقی‌ترین راه بهره‌برداری از منابع است.[۱۷]

دیدگاه دوم: توسعه با تکیه بر منابع گازی

پیروان این دیدگاه معتقدند همان‌گونه که قرن نوزدهم قرن ذغال سنگ و قرن بیستم قرن نفت بوده، قرن حاضر قرن گاز است. بنابراین آنان پیشنهاد می‌کنند راهکار توسعه در کشور باید مبتنی بر استفاده‌ی هرچه بیش‌تر از گاز در صنایع داخلی و افزایش سهم آن در سبد انرژی باشد، زیرا: اولاً هزینه‌ی استخراج گاز کم و هزینه‌ی انتقال آن بالا است و لذا باید در داخل مصرف شود؛ به‌عکس، نفت که از قابلیت انتقال بالا و کم‌هزینه برخوردار است باید صادر شود. ثانیاً منابع عظیم گازی به‌عنوان مزیت نسبی اقتصادی باید در صنایع انرژی‌بر مورد استفاده قرارگیرد.[۱۷]

دیدگاه سوم: اصلاحات ساختاری در اقتصاد

پیروان این دیدگاه مشکلات موجود در سیاست‌های انرژی، به‌ویژه سوخت، را فراتر از موضوع نفت و گاز می‌دانند و معتقدند حل مسائل توسعه‌ی صنعتی ایران و نیز توسعه‌ی صنعت نفت و گاز، در گرو اصلاحات ساختاری در اقتصاد، سیاست‌ها، قوانین و مقررات کشور است.[۱۷]

دیدگاه چهارم: ترازگاز، صیانت از مخازن نفت، و نهایتاً صادرات

طرفداران این نظریه بر این باورند که تا زمانی که ترازگاز کشور (جدول عرضه و تقاضای گاز) مشخص و قطعی نشده، نباید تعهدی برای صادرات گاز ایجاد شود. آن‌ها معتقدند که از نظر فنی، بهترین شیوه برای افزایش ضریب بازیافت مخازن نفت کشور، تزریق گاز به آن‌هاست. لذا از نظر طرفداران این دیدگاه، با توجه به کمبود عظیم گاز برای تزریق به مخازن نفتی، جای هیچ‌گونه بحثی برای صادرات گاز در افق ۲۰ ساله باقی نمی‌ماند.[۱۷]

دیدگاه پنجم: گاز فراوان برای صادرات، تزریق و مصرف

در رویکرد کلان، پیروان این دیدگاه بر این باورند که گاز برای تمامی مصارف داخلی ـ خانگی، تجاری، صنعتی و تزریق، و صادرات ـ به حد کافی و به‌طور بالقوه موجود است، و در حال حاضر باید تمام تلاش خود را معطوف به تولید گاز کرد. این کار علاوه بر این که اشتغال‌زاست، مانع از استفاده و بهره‌برداری غیرقانونی همسایگان ایران از بخش عمده‌ی گازی که در مخازن مشترک قرار دارند، خواهد شد. از این منظر، چون هیچ قطعیت علمی وجود ندارد که برای همه‌ی مخازن نفت صرفاً از شیوه‌ی تزریق گاز استفاده شود، و نیز هزینه‌ی بالای تزریق گاز در بلندمدت نیازمند منابع مالی زیادی‌است، باید همزمان با افزایش تولید گاز و تزریق آن به مخازن نفت به جایگزینی آن در مصرف داخلی و صدور آن به خارج اقدام کرد.[۱۷]

علاوه بر این دیدگاه‌ها، دیدگاه دیگری مبنی بر نیاز روزافزون کشور به جذب سرمایه‌های خارجی برای حفظ ظرفیت تولیدی نفت وگازکشوروجود دارد. طرفداران این دیدگاه، گسترش ظرفیت‌های تولیدی نفت وگاز را نیازمند جلب اعتماد شرکت‌های بزرگ بین‌المللی به‌منظور سرمایه‌گذاری در بخش انرژی کشور می‌دانند. از این منظر، همکاری شرکت‌های بزرگ جهانی می‌تواند درخصوص انتقال فنّاوری نوین به صنعت انرژی کشور مفید واقع شود.[۳]

طرفداران هر یک از این دیدگاه‌ها با محاسباتی بعضاً سرانگشتی در پی اثبات نظریات خود هستند. اما باید توجه داشت که سیستم انرژی در مقیاس کلان ملی به‌طور تنگاتنگی با بخش‌های مختلف اقتصاد در تعامل است و اثرات بازخوردی[۳] آن‌ها بر یکدیگر گاهی می‌تواند آثار و پیامدهای غیرقابل انتظاری داشته باشد. تعاملات موجود میان بخش انرژی و بخش‌های دیگر اقتصاد، حلقه‌های بازخوری را ایجاد می‌کند که باعث پیچیدگی رفتار سیستم اقتصاد ـ انرژی شده و تصمیم‌گیری در این رابطه را با دشواری زیادی مواجه می‌کند.[۱۸] بنابراین، ضروری است مدیران و تصمیم‌گیران مسائل اقتصاد ـ انرژی، مدل‌هایی در اختیار داشته باشند تا با استفاده از آن‌ها بتوانند رفتار سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور را درک کرده و تصمیمات درستی اتخاذ کنند.

در این راستا، این نوشتار می‌کوشد تا یک مدل اقتصاد -انرژی برای ایران ارائه دهد. مدلی که قابلیت به تصویرکشیدن حلقه‌های بازخور موجود در سیستم اقتصاد ـ انرژی را داشته باشد و رفتار المان‌های مختلف این سیستم را در طول زمان مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. همچنین این مدل باید بتواند پرسش‌هایی را که توسط دیدگاه‌های مختلف موجود در بخش انرژی مطرح می‌شود پاسخ گوید. این پرسش‌ها که محور اساسی این مطالعه‌اند عبارت‌اند از:

۱. اولویت سرمایه‌گذاری در بخش انرژی با کدام حوزه است؟ نفت یا گاز؟
۲. مصرف گاز تولیدی کشور در چه زمینه‌یی اولویت دارد؟ تأمین تقاضای مصرفی داخلی، صادرات یا تزریق به چاه‌های نفت؟
۳. آیا محدود کردن واردات انرژی تأثیر مطلوبی بر سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور دارد؟
۴. آیا تغییر نسبت سهم بازار داخلی انرژی میان نفت و گاز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور دارد؟
۵. تعامل با کشورهای پیشرفته در زمینه‌ی صنایع انرژی و جلب اعتماد آن‌ها به‌منظور سرمایه‌گذاری در ایران تا چه اندازه می‌تواند عملکرد سیستم را بهبود بخشد؟

۳. مدل‌های انرژی

نسل نخست مدل‌های انرژی برای کشف راه‌های افزایش تولید انرژی به‌گونه‌یی ساخته شد که سطح قیمت‌ها ثابت بماند. با این که تعاملات میان عرضه و تقاضای انرژی در چنین مدل‌هایی با یکدیگر تفاوت دارند، تقریباً همه‌ی آن‌ها بخش انرژی را از بخش‌های دیگر اقتصاد، جدا در نظر گرفته‌اند. این ضعف در به حساب آوردن بازخورهای موجود میان بخش انرژی و اقتصاد کلان، نتایج مدل‌های عرضه‌ی انرژی را نامطمئن می‌سازد.[۱۰]

نسل دوم مدل‌های انرژی برای پرداختن به تعاملات میان اقتصاد و انرژی ایجاد شدند. مدل‌های اقتصاد ـ انرژی پیشنهاد می‌کنند که اقتصاد می‌تواند بدون کاهش شدید سطح استاندارد زندگی، خود را برای قیمت‌های بالاتر انرژی آماده کند. با این وجود، این مدل‌ها با فرض تنظیم لحظه‌یی اقتصاد ـ مانند این فرض که سرمایه‌گذاری در بخش انرژی بی‌درنگ به افزایش در قیمت‌ها واکنش نشان می‌دهد ـ اغلب مسیری را که اقتصاد برای رسیدن به تعادل طی می‌کند، نادیده می‌گیرند.[۱۰]

در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، گرم‌شدن زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل روز مطرح شد و بدین‌ترتیب، در بین مدل‌های انرژی به مدل‌سازی محیط ـ انرژی توجه ویژه‌یی شد. از دهه‌ی ۱۹۹۰ که توجه اقتصاددانان به توسعه‌ی پایدار جلب شده،

با رشد فزاینده‌ی تقاضای انرژی از جانب همه‌ی کشورها، انرژی نقش مهم‌تری در اقتصاد جهانی ایفا کرد، و توجه انتزاعی به مسئله‌ی انرژی جای خود را به زمینه‌های بسیار مهم‌تر دیگری داد. در این دوره مدل‌های انرژی عموماً مدل‌های انرژی ـ اقتصاد ـ محیط بودند، نظیر مدل موازنه‌ی عام محاسباتی (CGE)[۴]، مدل[۵] 3Es-Model، مدل جایگزین سیستم تأمین انرژی[۶] و مدل‌های انرژی پیوندی (مرکب) از قبیل سیستم مدل‌سازی انرژی ملی (NEMS)[۷] و مدل[۸] IIASA-WEC E3 .[۱۹]

درآمد ناخالص، ستانده‌ی ناخالص، سود، نسبت تولید ناخالص ملی به انرژی، فنّاوری، کارایی، و دسترسی به منابع، متغیرهایی هستند که عموماً به‌عنوان عوامل تأثیرگذار در ساخت مدل‌های انرژی به کار گرفته شده‌اند. همچنین مدل‌های انرژی ارائه‌شده غالباً از نوع مدل‌های بهینه‌سازی، رفتاری یا اقتصادسنجی، و مدل‌های آماری هستند که مشخصه‌های کلی عرضه و مصرف انرژی را منعکس کرده و پیش‌بینی‌محورند. با این وجود، بیشتر این مدل‌ها توانایی نشان‌دادن اثرات همزمان بخش‌های مختلف یک سیستم پیچیده و بزرگ را بر روی یکدیگر ندارند. این مدل‌ها همچنین در به تصویر کشیدن مسیر تعادلی دچار ضعف و کمبودند.[۱۰]

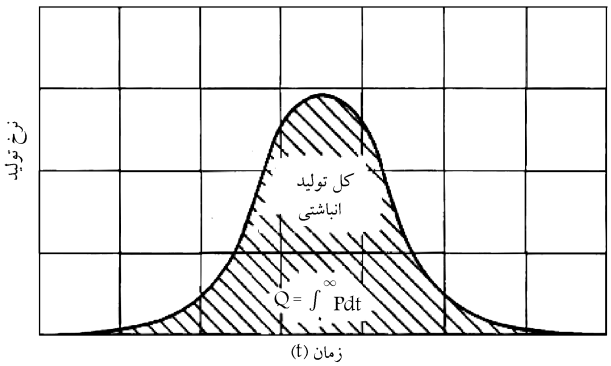
روش‌های اقتصادسنجی نمی‌توانند فنّاوری‌های انرژی را نشان دهند. به‌علاوه، برای ساخت و پرداخت آن‌ها وجود ثبات معقول در رفتار اقتصادی گذشته ضروری است. همچنین، برای به‌کارگیری مدل‌های اقتصادسنجی به داده‌های زیادی نیاز داریم. مشکل مدل‌های بهینه‌سازی این است که ساخت آن‌ها نیازمند دانش فراوان در زمینه‌ی ریاضیات است و تمام فرایندهای سیستم در آن‌ها باید به‌روش ریاضی و با فرض‌های ساده‌گرایانه برای ایجاد امکان حل ریاضی تعریف شوند.[۲۰]

از سیستم دینامیک می‌توان به‌عنوان یک روش مدل‌سازی مرکب بهره جست و تمامی زیرسیستم‌های مهم سیستم بزرگ اقتصاد ـ انرژی را یکپارچه ساخت. این روش به‌خوبی تعاملات میان تمام زیرسیستم‌ها را به‌طور همزمان به نمایش می‌گذارد و مسیر دست‌یابی سیستم به تعادل را به تصویر می‌کشد. توصیف ساده و گرافیکی روش مزبور موجب می‌شود علی‌رغم پیچیدگی‌های زیاد موجود در آن، کاربران مدل به‌راحتی ساختار و رفتار سیستم را درک کنند و به تصویر و بینش صحیحی از واقعیت دست یابند.[۲۱]

یکی از اولین مدل‌های سیستم دینامیک انرژی، مدل کشف و تولید گاز طبیعی بود که بر پایه‌ی نظریه‌ی چرخه‌ی عمر ام.کینگ هابرت[۹]، زمین‌شناس مشهور آمریکایی، طراحی و ارائه شد.[۲۱] از آن جا که در این نوشتار برای تخمین مقدار منابع قابل بازیابی نهایی نفت و گاز ایران از نظریه‌ی هابرت استفاده شده است، به توضیح این نظریه می‌پردازیم.

ام. کینگ هابرت در سال ۱۹۵۶، روشی برای تخمین ذخایر قابل بازیابی نهایی نفت جهان، و همچنین ایالات متحده‌ی آمریکا، به کار برد که به رویکرد چرخه‌ی عمر هابرت[۱۰] معروف است.[۲۲] عملکرد این روش چنان دقیق است که هنوز هم مبنای بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه‌ی تخمین منابع طبیعی پایان‌پذیر، ازجمله ذخایر انرژی‌های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال‌سنگ است.

طبق نظریه‌ی هابرت، نمودار زمانی تولید نفت یا گاز (چه در سطح جهانی و چه در سطح محلی) مانند شکل ۳ باید نمایی کوهانی داشته باشد، به‌طوری که مساحت زیر منحنی تولید، مقدار تولید تجمعی را به دست می‌دهد؛ و مقدار تجمعی نیز یک مقدار ثابت و محدود است. درحقیقت، به‌گفته‌ی هابرت، چرخه‌ی عمر اکتشاف و تولید نفت و گاز یک منحنی تولید زنگوله‌یی ایجاد می‌کند. این منحنی معرف دوره‌یی از قیمت‌های پایین منابع و رشد نمایی تولید است، و سپس تولید به بالاترین مقدار خود می‌رسد. زیرا بر اثر تهی‌شدن منابع، اکتشاف به‌ازای هر فوت حفاری کاهش



شکل ۳. منحنی چرخه‌ی کامل تولید منابع پایان‌پذیر.[۲۲]

می‌یابد و درنتیجه، قیمت منابع افزایش می‌یابد. در مرحله‌ی آخر، دوره‌یی قرار دارد که در آن شاهد افزایش هزینه‌ها و کاهش تولید بر اثر جایگزینی منابع انرژی فعلی با منابع جایگزین خواهیم بود.[۲۲]

هابرت در پژوهش خود، مقدار قابل بازیافت نهایی نفت را با سعی و خطا به دست آورده است، بدین‌صورت که داده‌ها را بر روی یک صفحه‌ی نیمه‌لگاریتمی رسم، و بهترین مقدار Q^{∞} (ذخایر قابل بازیافت نهایی) را که با داده‌ها انطباق بهتری دارد، فقط با قضاوت به‌وسیله‌ی چشم انتخاب کرده است.[۲۲]

استرمن و ریچاردسن که نظریه‌ی هابرت را مبنای پژوهش خود قرار داده‌اند، برای شبیه‌سازی روش هابرت پروتکلی تعریف کرده‌اند که در نوشتار حاضر، از آن برای تخمین مقدار منابع قابل بازیابی نهایی انرژی ایران استفاده شده است. پروتکل مزبور چنین تعریف شده است:[۲۳]

۱. اکتشافات اثبات‌شده‌ی تجمعی به‌صورت تولید تجمعی به‌علاوه‌ی ذخایر قابل بازیابی تعریف می‌شود.

۲. فرض می‌شود اکتشافات اثبات‌شده‌ی تجمعی در طول زمان، از یک مسیر منطقی مطابق رابطه‌ی ۱ پیروی می‌کنند:

$$Q_t = \frac{Q^{\infty}}{1 + a \times \exp[b(t - t_0)]} \qquad (1)$$

که در آن Q^{∞} منابع قابل بازیابی نهایی نفت؛ Q_t اکتشافات اثبات‌شده‌ی تجمعی در دوره‌ی t؛ a و b پارامترهایی که باید تخمین زده شوند؛ t_0 زمان آغازین اختیاری است.

۳. رابطه‌ی ۱ به‌صورت رابطه‌ی ۲ بازنویسی می‌شود:

$$\ln[(\frac{Q^{\infty}}{Q_t}) - 1] = \ln(a) + b(t - t_0) \qquad (2)$$

رابطه‌ی ۲ با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی (OLS)[۱۱] و با مقادیر مختلف Q^{∞} تخمین زده می‌شود. آن مقداری که بیشترین مقدار آماری R^2 را به دست دهد، به‌عنوان بهترین تخمین ذخایر قابل بازیابی نفت، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل گاز طبیعی راجر نیل ارائه‌دهنده‌ی سیستم گاز ایالات متحده در سطحی بسیار کلی بود. این مدل به‌منظور بررسی دوره‌ی انتقال انرژی در ایالات متحده ایجاد شده بود. این مدل نواحی مختلف، فنّاوری‌های گوناگون، و انواع گازها را به‌طور جزیی در نظر نمی‌گرفت؛ همچنین جایگزینی میان انواع سوخت‌ها و تغییرات فنّاوری را نشان نمی‌داد. بنابراین، اگرچه مدل یاد شده به مطالعه‌ی مسئله‌ی دوره‌ی انتقال انرژی

در ایالات متحده کمک می‌کرد، به‌تنهایی برای مطالعه‌ی این موضوع کافی نبود. مدلی جدید و گسترده‌تر مورد نیاز بود.[۲۱]

نیل در رساله‌ی دکتری‌اش مرزهای مدل خود را گسترش داد تا تمامی منابع اصلی انرژی ایالات متحده (عرضه‌ی انرژی) و همچنین تمامی مصارف انرژی ایالات متحده (تقاضای انرژی) را شامل شود. او مدل خود را COAL۱ (زغال سنگ ۱) نام نهاد؛ زیرا تحلیل او نشان داد که زغال سنگ بهترین منبع انرژی است که آمریکا می‌تواند در طول دوره‌ی انتقال به آن متکی باشد.[۲۴]

پس از اتمام دوره‌ی دکتری، نیل تلاش برای تکمیل و توسعه‌ی مدل COAL۱ را ادامه داد و نسخه‌ی توسعه‌یافته‌ی آن را COAL۲ نام نهاد. در ۱۹۷۵، اداره‌ی تحقیق و توسعه‌ی انرژی (که بعدها به دپارتمان انرژی ایالات متحده تبدیل شد) ارتقا و گسترش بیش‌تر مدل COAL۲ را به‌منظور استفاده در برنامه‌ریزی انرژی دولت، مورد حمایت قرار داد. مدل ارتقا یافته و گسترش‌پیداکرده‌ی مورد نظر «فسیل ۱» (FOSSIL۱) نام گرفت؛ چرا که به بررسی دوره‌ی انتقال از اقتصادی که از سوخت‌های فسیلی (یعنی نفت، گاز، و زغال سنگ) نیرو می‌گرفت، به اقتصاد مبتنی بر منابع انرژیِ جایگزین می‌پرداخت.[۲۱]

در واکنش به اولین بحران انرژی در آمریکا در سال ۱۹۷۷، دولت کارتر اولین برنامه‌ی انرژی ملی را پایه‌گذاری کرد. اندکی پس از آن، مجلس نمایندگان ایالات متحده خواستار ارزیابی این برنامه با استفاده از مدل FOSSIL۱ شد. پس از اتمام ارزیابیِ برنامه، راجر نیل هدایت دفتر خدمات تحلیلی در دپارتمان انرژی را بر عهده گرفت تا در کنار دیگر فعالیت‌هایش، طرح‌های انرژی را در حمایت از برنامه‌های انرژی ملی آینده آماده کند.[۲۱] بدین‌منظور، نیل مدل FOSSIL۱ را در دپارتمان انرژی پیاده کرده و سرپرستی گروهی را بر عهده گرفت تا وسیعاً به اصلاح مدل اهتمام کند؛ به‌طوری که موضوعات مربوط به سیاست انرژی ملی بتواند مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. مدل اصلاح‌شده را فسیل ۲ (FOSSIL۲) نامید.[۱۲] در سال‌های اخیر، بهبودهای گسترده‌یی در بخش‌های تجهیزات الکتریکی و حمل و نقل FOSSIL۲ ایجاد شده است. نسخه‌ی ارتقایافته‌ی FOSSIL۲، را (IDEAS)[۱۲] نام نهاده‌اند.[۲۱]

در سال ۱۹۷۸ یک مدل سیستم دینامیک توسط علینقی مشایخی برای نشان‌دادن بحران در وضعیت اقتصادی ایران در طی انتقال از اقتصاد وابسته به نفت به اقتصاد مستقل از آن ارائه شد.[۹] با استفاده از این مدل نسبت به ارزیابی و ارائه‌ی سیاست‌هایی برای کاهش بحران یادشده اقدام شد.

در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، در خلال پروژه‌ی اصلاح و گسترش مدل FOSSIL۱ به مدل FOSSIL۲ محققین دریافتند که خود مدل FOSSIL۲ نیز برخی از بازخورها و تعاملات مهم موجود میان بخش انرژی و کل اقتصاد را نادیده می‌گیرد. در همین راستا، یک مدل سیستم دینامیک ارائه شد که برای اولین‌بار تعاملات مهم اقتصاد ـ انرژی را نشان می‌داد.[۱۰و۲۵]

در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰، یک متخصص سیستم دینامیک با همکارانش مدلی برای ارزیابی کل ذخایر نفت جهان ایجاد کردند. چنان که پیش‌تر بیان شد پایه‌ی این مدل، مدل راجر نیل و نظریه‌ی ام.کینگ هابرت بود. این مدل همچنین تغییرات فنی و جانشینی سوخت‌های ترکیبی به جای نفت را در نظر می‌گرفت. نتیجه‌ی این پژوهش این بود که روش هابرت، در میان روش‌هایی که به‌منظور پیش‌بینی مقدار کل ذخایر قابل بازیابی نفت جهان مورد مطالعه قرارگرفته بودند، دقیق‌تر عمل می‌کرد.[۲۳]

پس از انجام این مطالعه، طراحان روش ارزیابی کل ذخایر نفت جهان از مدل خود برای تخمین مقدار کل ذخایر نفت قابل بازیابی ایالات متحده استفاده کردند. نتیجه‌ی این مطالعه نیز نشان می‌داد که روش هابرت برای پیش‌بینی مقدار کل ذخایر نفت قابل بازیابی ایالات متحده، نسبت به دیگر روش‌ها بسیار دقیق‌تر است. برخلاف تولید نفت در جهان که هنوز به مقدار بیشینه نرسیده، تولید نفت در ایالات متحده در ۱۹۷۰ به اوج خود رسید. باید توجه داشت که‌هابرت در ۱۹۵۶ پیش‌بینی کرده بود که تولید نفت در ایالات متحده در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۷۱ به اوج خود خواهد رسید. این پیش‌بینی در تاریخ پیش‌بینی‌های مربوط به مسائل انرژی، بی‌سابقه است.[۲۶]

در سال ۱۹۸۹ پژوهش‌گران یک مدل سیستم دینامیک برای بررسی مسائل اقتصاد متکی به نفت در اندونزی ارائه کردند. این مدل، انتخاب‌های مختلف استراتژی را به‌منظور رشد پایدار اقتصادی در طول یک برنامه‌ریزی ۵۰ ساله، که طی آن منابع انرژی تخلیه خواهند شد، تحلیل می‌کرد. این مدل بر اساس انتگرال‌گیری نظریه‌ی رشد در اقتصاد کلان و سازوکار شفاف‌سازی بازار در اقتصاد خرد، ایجاد شده است. مصرف منابع انرژی براثر توسعه‌ی اقتصادی نیز در مدل لحاظ شده است.[۸]

در سال ۱۹۹۰ پژوهشی پیرامون تولید نفت در کشورهای توسعه‌یافته انجام شد.[۲۷] این پژوهش که یک مطالعه‌ی موردی از بخش نفت مصر بود، بر پایه‌ی مدلی به‌نام مدل نفت مصر (EPM)[۱۳] قرار داشت. مدل EPM با درنظرگرفتن خصوصیات جغرافیایی و زمین‌شناختی بخش نفت کشور مصر، و ملحوظ داشتن تصمیم‌گیری‌های مربوط به اکتشاف و توسعه، تخمین‌های مربوط به تولید، تقاضا، قیمت، و صادرات نفت را محاسبه می‌کند.

در سال ۱۹۹۸ نیز یک مدل سیستم دینامیک برای تحلیل تعاملات اقتصاد و محیط زیست با نام (FREE)[۱۴] ارائه شد. این مدل نخستین مدل مبتنی بر سیستم دینامیک است که به موضوع تأثیر تغییرات آب و هوا بر سیستم اقتصاد و انرژی می‌پردازد.[۱۱]

در سال ۲۰۰۷ نیز با استفاده از روش سیستم دینامیک و بر پایه‌ی نظریه‌ی هابرت، مدلی ارائه شد که قادر است مقدار و زمان فرا رسیدن اوج میزان تولید نفت خام چین را محاسبه کند.[۲۸] این پژوهش پیش‌بینی می‌کند که قله‌ی هابرت برای چین در سال ۲۰۱۹ رخ خواهد داد؛ یعنی زمانی که مقدار تولید نفت این کشور به ۱۹۹٫۵ میلیون تن در سال خواهد رسید.

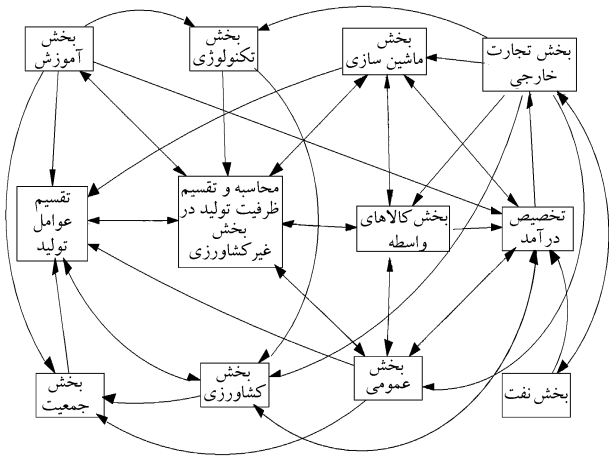
در سال ۲۰۰۸، یک مدل سیستم دینامیک طراحی شد که قادر است پویایی‌های صنعت گاز بریتانیا را شبیه‌سازی کند.[۲۹] یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت عرضه‌ی انرژی به‌تنهایی نمی‌تواند زمان رسیدن قله‌ی تولید، مصرف، و اکتشاف گاز را به تأخیر اندازد.

هیچ یک از مدل‌های یاد شده در بالا، مسئله‌ی کشوری با دو منبع نفت و گاز و چگونگی تولید این دو منبع را به‌لحاظ اقتصادی مورد بررسی قرار نداده است.

۴. روش تحقیق و تحلیل مسئله

روشی که در این نوشتار برای تحلیل مسائل سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران، و ارزیابی سیاست‌های مطروحه در بخش انرژی کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش سیستم دینامیک است.

چنان که در بخش قبل بیان شد در سال ۱۹۷۸، یک مدل پویایی‌شناسی طراحی شد که قادر بود اثرات توأم بخش انرژی و دیگر بخش‌های اقتصاد را بر یکدیگر نشان دهد. در این مدل ۱۲ بخش در نظرگرفته شده که به‌طور پویا با هم در تعامل‌اند. روابط کلی میان این بخش‌ها در شکل ۴ قابل مشاهده است.[۹]



شکل ۴. ساختار کلی مدل پویایی‌شناختی طراحی شده در سال ۱۹۷۸.

این مدل که قابلیت ترسیم مسیر رشد و توسعه‌ی متغیرهای کلان اقتصادی و اجتماعی را در طول زمان دارد، پیش‌بینی می‌کرد که در صورت استمرار سیاست‌ها و روندهای اقتصادی قبل از انقلاب، ذخایر شناخته‌شده‌ی نفت در آن زمان، در دهه‌ی ۱۹۹۰ تمام، و ایران دچار بحران شدید اقتصادی خواهد شد.

مسئله‌یی که در مطالعه‌ی مزبور مورد بررسی قرارگرفته، به‌طور خلاصه از این قرار است:[۲] ایران برای تسریع رشد اقتصادی، منابع تجدیدناپذیر خود را مبادله می‌کند. این موضوع ممکن است وابستگی فزاینده به این منابع را سبب شود. در صورت تداوم این وابستگی، با اتمام این منابع درآمد کشور به‌شدت کاهش خواهد یافت. طی انتقال از اقتصاد وابسته به نفت به اقتصاد مستقل از آن، ممکن است کشور با یک بحران و مسئله‌ی سهمگین اقتصادی مواجه شود، که در آن شاهد کاهش شدید و سنگین درآمد ملی، درآمد سرانه، مقدار سرانه‌ی مواد غذایی و همچنین به‌کارگیری ظرفیت تولیدی اقتصاد خواهیم بود. بنابراین، مسئله‌ی پیش رو عبارت است از کاهش وابستگی اقتصاد به منابع تجدیدناپذیر و در عین حال، پرهیز از مواجهه با بحران.

با این که این مدل از ساختار قدرت‌مندی برخوردار است، ساده‌سازی زیادی که در بخش انرژی آن صورت گرفته موجب عدم کاربری آن به‌عنوان یک مدل اقتصاد ـ انرژی ملی می‌شود. به‌عنوان مثال، بخش انرژی این مدل فقط شامل منابع نفت است. این مدل همچنین ذخایر انرژی ناشناخته (ذخایری که هنوز کشف نشده‌اند) را در نظر نمی‌گیرد؛ به‌عبارت دیگر، فرایند اکتشاف ذخایر انرژی در این مدل نادیده گرفته شده است. حوزه‌های بهبود دیگری نیز در این مدل به‌عنوان یک مدل اقتصاد ـ انرژی وجود دارد. مهم‌ترین این حوزه‌ها را می‌توان چنین خلاصه کرد:

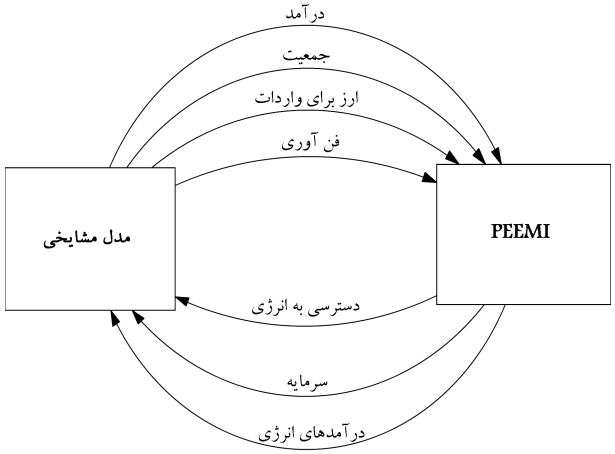
- در نظر نگرفتن ذخایر کشف‌نشده و فرایند اکتشاف؛
- در نظر نگرفتن منابع انرژی جایگزین، به‌ویژه گاز طبیعی؛
- در نظر نگرفتن سرمایه‌گذاری در بخش انرژی؛
- در نظر نگرفتن اثر فنّاوری بر تولید انرژی؛
- در نظر نگرفتن امکان واردات انرژی.

با این وجود، این مدل از انعطاف‌پذیری قابل قبولی برخوردار است و به‌عنوان پایه‌یی برای مدل‌سازی انرژی ملی در این نوشتار به کار می‌رود. در بخش بعدی، چگونگی اصلاح این محدودیت‌ها در قالب ساختار مدلی جدید به‌نام مدل مقدماتی اقتصاد ـ انرژی در ایران (PEEMI)[۱۵] توضیح داده می‌شود.

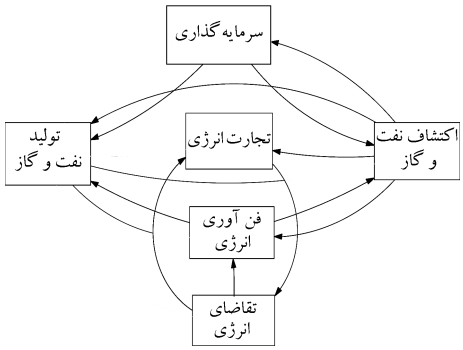
۵. ساختار مدل مقدماتی اقتصاد ـ انرژی در ایران (PEEMI)

مدل مقدماتی اقتصاد ـ انرژی در ایران (PEEMI) یک مدل الحاقی به مدل سیستم دینامیک سال ۱۹۷۸ است. این مدل، متغیرهای اساسی بخش انرژی را در برگرفته و به نوعی مدل پیشین را به‌منظور شبیه‌سازی سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران تکمیل می‌کند. PEEMI از ۸ زیربخش تشکیل شده است: اکتشاف نفت، تولید نفت، اکتشاف گاز، تولید گاز، تقاضای انرژی، سرمایه‌گذاری انرژی، فنّاوری انرژی، و تجارت انرژی. شکل ۵ چگونگی ارتباط PEEMI را با مدل قبلی پویایی‌شناسی، و شکل ۶ روابط درون‌بخشی PEEMI را نشان می‌دهد. باید یادآور شد که در الحاق PEEMI به مدل پویایی‌شناسی قبلی، بخش نفت مدل پیشین از مدل مزبور حذف شده است.

جدول ۲ مرز مدل PEEMI را مشخص می‌کند. باید توجه داشت که این جدول، تنها متغیرهای اساسی PEEMI را ارائه می‌کند و متغیرهای مدل پویایی‌شناسی اولیه را در بر نمی‌گیرد. چنان که اشاره شد، مدل سیستم دینامیک که در سال ۱۹۷۸ ارائه شد اکثر متغیرهای اصلی اقتصاد کلان ایران را در خود جای داده است. بنابراین ارتباط PEEMI با این مدل متضمن در نظرگرفتن تعاملات میان بخش انرژی با بخش‌های دیگر اقتصاد است. بدیهی است که متغیرهای درون‌زای جدول ۲ حلقه‌های بازخوری ایجاد می‌کنند که برای بررسی یک سیستم اقتصاد ـ انرژی در سطح کلان ملی ضروری است. برون‌زا فرض شدن برخی از متغیرها به‌لحاظ ساده‌سازی مدل است، و در نظر نگرفتن متغیرهای دیگر نیز به‌علت بی‌تأثیر بودن آن‌ها در نتایج اصلی



شکل ۵. چگونگی ارتباط PEEMI با مدل پویایی‌شناسی سال ۱۹۷۸.



شکل ۶. روابط درون‌بخشی PEEMI.

جدول ۲. مرز PEEMI.

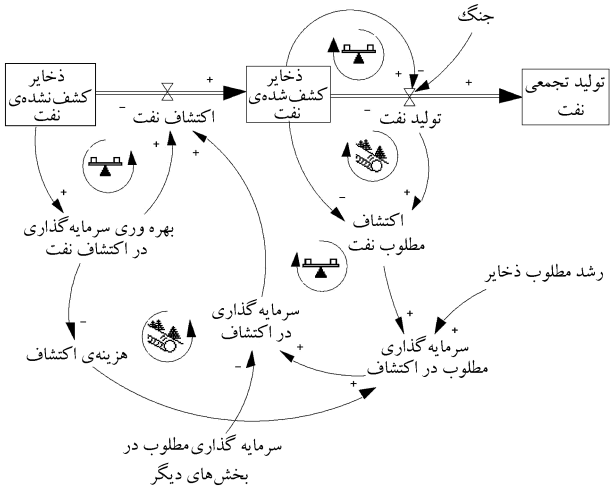
متغیرهای درون‌زا	متغیرهای برون‌زا
اکتشاف انرژی	نسبت شهرنشینی
تولید انرژی	قیمت‌های جهانی انرژی
تقاضای انرژی	روابط سیاسی
سرمایه گذاری انرژی	اثرات انقلاب و جنگ
فنّاوری انرژی	سیاست‌های تجاری
درآمدهای انرژی	
واردات انرژی	
صادرات انرژی	

این مطالعه است. در ادامه، فرضیه‌های اساسی هر یک از زیربخش‌ها توضیح داده خواهد شد. شکل ۷ نمودار علت و معلولی زیربخش اکتشاف نفت مدل را نشان می‌دهد.

متغیر ذخایرکشف‌شده (درجا)ی نفت از یک سو تحت فرایند اکتشاف افزایش یافته و از سوی دیگر بر اثر تولید نفت کاهش می‌یابد. این متغیر در مدل با یک متغیر سطح نشان داده شده است. هرچه ذخایرکشف‌نشده کاهش یابد هزینه‌ی اکتشاف افزایش می‌یابد و سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای اکتشاف بالاتر می‌رود.

مجموع مقادیر اولیه‌ی متغیرهای سطح نشان داده شده در شکل ۷ مقدار کل ذخایر نفت ایران را نشان می‌دهد. کل ذخایر نفت را به‌طور دقیق نمی‌توان محاسبه کرد. یک مخزن نفتی مملو از پیچیدگی، عدم‌قطعیت در شرایط و وضعیت، و سرشار از نادانسته‌ها است. بیشترین اطلاعات موجود در خصوص یک میدان نفتی یا گازی، از یک یا چند چاه با قطرهای کوچک به دست می‌آید که ابعاد آن‌ها نسبت به ابعاد مخزن، واقعاً ناچیز است. به‌همین دلیل، یافته‌های اولیه و استنتاج‌های مبتنی بر آن همواره توأم با خطا است.[۳۰] بنابراین تخمین این مقدار، یکی از اهداف ضمنی این نوشتار است. بدین منظور، از روش ام.کینگ هابرت برای تخمین مقدار مزبور استفاده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین مقداری که روش چرخه‌ی عمر هابرت

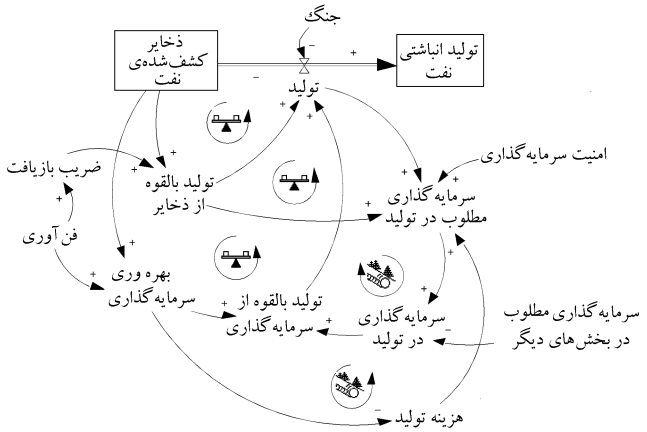


شکل ۷. نمودار علت و معلولی زیربخش اکتشاف نفت.

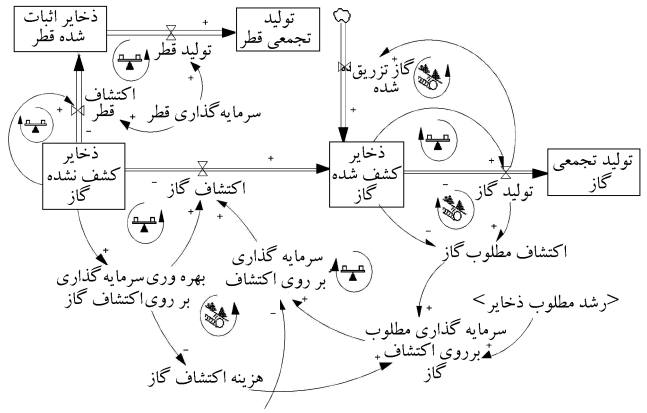
برای مقدار ذخایر قابل بازیابی نهایی نفت ایران محاسبه می‌کند، ۴۰۰ میلیارد بشکه است. از آنجا که تاکنون بیش از ۶۰ میلیارد بشکه از این ذخایر استخراج شده‌اند،[۱۵] بنابراین ۳۴۰ میلیارد بشکه نفت خام، بیشینه‌ی ذخایری است که ایران می‌تواند امید به تولید آن در آینده داشته باشد. دست‌یابی به این مقدارِ بیشینه، بستگی به سطح فنّاوری و رعایت استانداردهای استخراج و تولید دارد. باید توجه داشت که در ساختار PEEMI تغییرات فنی در نظرگرفته شده است؛ بنابراین، سطح دست‌یابی به ذخایر انرژی نیز در مدل متغیر خواهد بود.

شکل ۸ نمودار علت و معلولی زیربخش تولید نفت را نشان می‌دهد. دو محدودیت پیش روی تولید انرژی وجود دارد: ۱. ذخایر انرژی؛ ۲. حجم سرمایه‌گذاری. هرچه تولید بیش‌تر شود، صادرات بیش‌تر شده و درآمد افزایش می‌یابد. با افزایش درآمد، سرمایه‌گذاری بیش‌تر شده و تولید نفت افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، افزایش تولید نفت ذخایر آن را کاهش می‌دهد و درنتیجه، ظرفیت تولید بالقوه کاهش می‌یابد. تولید بالقوه‌ی نفت که توسط حجم ذخایر محدود شده است، حد بالایی توانایی کشور در تولید نفت و درنتیجه، مقدار هدف برای سرمایه‌گذاری در تولید نفت را تعیین می‌کند.

در شکل ۹ می‌توان نمودار علت و معلولی اکتشاف گاز را مشاهده کرد. همانند بخش نفت، اکتشاف بر مقدار ذخایر کشف‌شده می‌افزاید و تولید از آن می‌کاهد؛ اما اختلافی که این قسمت با اکتشاف نفت دارد، وجود گاز تزریق‌شده و در نظر گرفتن استخراج و تولید گاز توسط کشورهای همسایه از میادین مشترکی است که با



شکل ۸. نمودار علت و معلولی زیربخش تولید نفت.



شکل ۹. نمودار علت و معلولی زیربخش اکتشاف گاز.

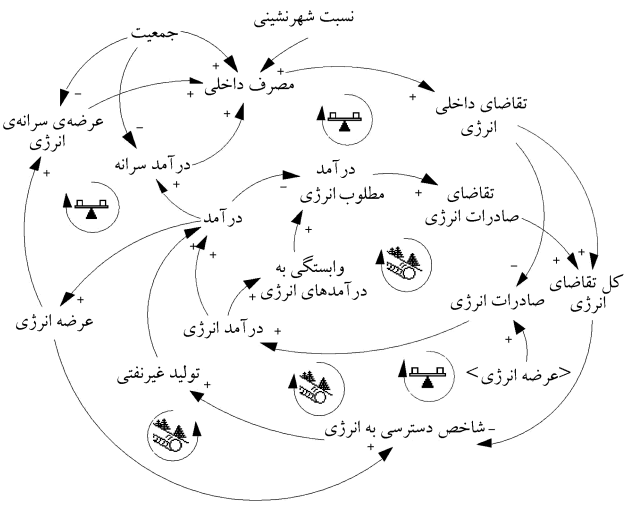
کشور ما دارند. قطر به‌عنوان کشوری که بیش‌ترین اشتراک ذخایر گاز را با ما دارد، به‌عنوان نماینده‌ی این کشورها انتخاب شده است. فرض شده که برای افزایش ضریب بازیافت نفت، مقداری از گاز تولیدی به ذخایر نفت تزریق می‌شود.

مقدار اولیه‌ی کل ذخایر گاز کشور، مشابه ذخایر نفت، از روش هابرت به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین مقداری که روش چرخه‌ی عمر هابرت برای مقدار ذخایر قابل بازیابی نهایی گاز ایران محاسبه می‌کند، جدا از ذخایر مشترک میان ایران و قطر، معادل ۲۲۵ میلیارد بشکه است. ساختار کلی زیربخش تولید گاز به جز مواردی جزیی، کاملاً مشابه زیربخش تولید نفت است. بنابراین از ذکر جزییات آن خودداری شده است.

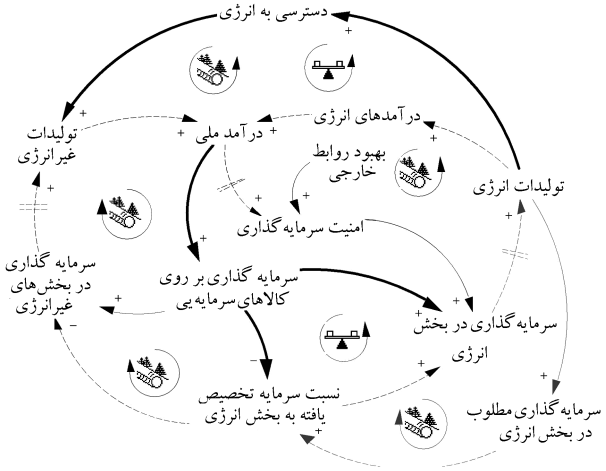
شکل ۱۰ نمودار علت و معلولی زیربخش تقاضای انرژی را نشان می‌دهد. فرض بر این است که تقاضای انرژی در دنیا همواره بی‌نهایت بوده و ایران به جز در دوره‌ی انقلاب و جنگ، همیشه با تمام توان خود اقدام به تولید انرژی کرده است و از این پس نیز خواهد کرد.[۳۱] اما در PEEMI یک تقاضای کمینه برای صادرات انرژی تعریف شده است. این تقاضای صادراتی انرژی تنها به این منظور محاسبه می‌شود که نیازهای درآمدی را در تقاضا برای صادرات انرژی، و درنتیجه برای محاسبه‌ی شاخص در دسترس بودن انرژی به حساب آورد.

در مدل PEEMI، مصرف انرژی در کشور با کمک یک رابطه‌ی اقتصادسنجی تخمین زده شده است. عوامل اصلی تأثیرگذار بر روند مصرف انرژی در کشور را رشد جمعیت و افزایش نسبت شهرنشینی دانسته‌اند.[۳۲] بنابراین در رابطه‌ی مذکور، نسبت شهرنشینی به‌عنوان یکی از متغیرهای اصلی تعریف شده است. متغیرهای تأثیرگذار دیگر این رابطه عبارت‌اند از: درآمد ملی سرانه، و عرضه‌ی انرژی سرانه. سهم بازار حامل‌های انرژی نیز در مدل به‌صورت برون‌زا تعیین می‌شود؛ اما این قابلیت برای کاربر قرار داده شده که بتواند پس از سال ۲۰۰۸، سناریوهای متفاوتی را در این باره بیازماید. در مدل، سهم گاز از بازار داخلی انرژی محاسبه شده و آنچه باقی می‌ماند، به‌عنوان سهم بازار نفت در نظر گرفته می‌شود.

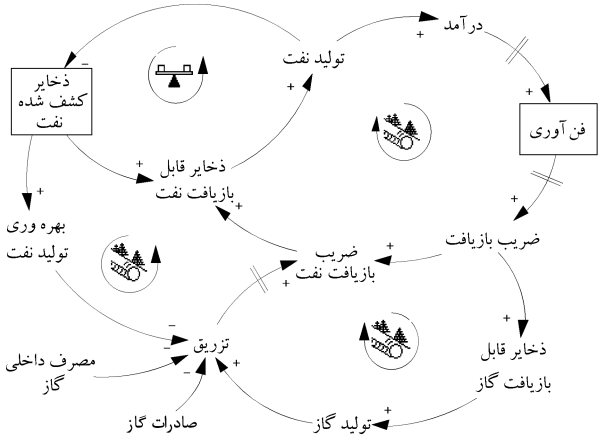
شکل ۱۱ تعاملات موجود در زیربخش سرمایه‌گذاری انرژی را به نمایش می‌گذارد. مهم‌ترین متغیرهایی که در این زیربخش تعیین می‌شوند، عبارت‌اند از: حجم سرمایه‌گذاری در بخش‌های انرژی، نسبت‌های سرمایه‌گذاری هر یک از بخش‌های انرژی، و امنیت سرمایه‌گذاری. در حقیقت، کل میزان اعتبارات کشور به این زیربخش وارد شده و میان زیربخش‌های دیگر مدل، بر اساس نیاز هر بخش تقسیم می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار علت و معلولی زیربخش تقاضای انرژی.



شکل ۱۱. نمودار علت و معلولی زیربخش سرمایه‌گذاری انرژی.



شکل ۱۲. نمودار علت و معلولی زیربخش فنّاوری انرژی.

امنیت سرمایه‌گذاری شاخصی است که از دو عامل رشد اقتصادی و سیاست خارجی کشور متأثر می‌شود. شاخص مزبور رابطه‌ی مستقیمی با سرمایه‌گذاری در بخش انرژی دارد.

حلقه‌های بازخور موجود در زیربخش فنّاوری انرژی در شکل ۱۲ قابل مشاهده‌اند. ضریب بازیافت، از میانگین دو جزء مختلف تشکیل می‌شود: ضریب بازیافت ناشی از فنّاوری، و ضریب بازیافت ناشی از تزریق گاز.

ضریب بازیافت ناشی از فنّاوری به‌طور مستقیم با متغیر فنّاوری در بخش صنعت در ارتباط است. فرض شده که فنّاوری انرژی از مقدار کمینه‌ی خود به سمت بیشینه‌اش افزایش می‌یابد؛ سرعت این افزایش به سرعت پیشرفت فنّاوری در بخش صنعت وابسته است. ضریب بازیافت ناشی از تزریق نیز به میزان برآورده‌شدن نیازهای تزریق گاز وابسته است. اگر این نیازها به‌طور کامل برآورده شود ضریب بازیافت ناشی از تزریق، بیشینه خواهد بود و گرنه این نسبت کاهش خواهد یافت. همچنین اگر نسبت تزریق به میزان مطلوب آن به صفر نزدیک شود، ضریب بازیافت نیز به کمینه‌ی خود میل می‌کند.

برای درک بهتر چگونگی عملکرد PEEMI باید اضافه کرد که در مدل، نفت قابل بازیافت از نفت کشف‌شده متمایز شده است. نفت کشف‌شده با یک متغیر سطح در نظر گرفته شده است و در نتیجه‌ی فرایند تولید از میزان آن کاسته شده و به متغیر سطح دیگری که تولید تجمعی نام دارد ریخته می‌شود. اگر ذخایر کشف‌شده

را X، تولید تجمعی را Y و ضریب بازیافت را a بنامیم، مقدار نفت قابل بازیافت (Z) مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$Z = [(X + Y) \times a] - Y \qquad (۳)$$

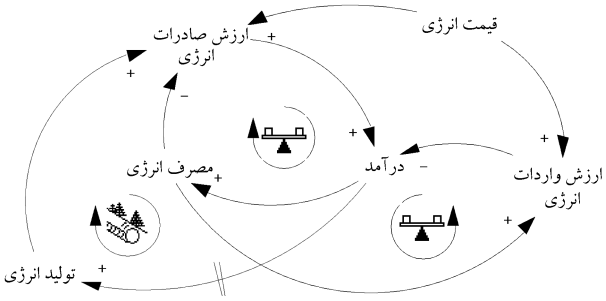
این رابطه تضمین می‌کند که با کاهش ضریب بازیافت، آن مقدار نفتی که از دست می‌رود دیگر قابل دسترس نیست.

شکل ۱۳ حلقه‌های بازخور زیربخش تجارت انرژی را نشان می‌دهد. کل تولیدات انرژی به این زیربخش وارد شده و درآمدهای انرژی در آن محاسبه می‌شود. در این زیربخش همچنین مقدار واردات و صادرات انرژی تعیین می‌شود. واردات انرژی براساس مازاد تقاضا صورت می‌گیرد. اگر تقاضا بیش از تولید باشد، به‌ناچار انرژی مورد نیاز وارد خواهد شد. این سناریویی است که در حالت پایه اجرا می‌شود. سناریوی دیگری نیز مبنی بر محدود کردن واردات انرژی از سوی دولت مطرح است که در مبحث تحلیل سیاست مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قیمت انرژی در مدل به‌صورت برون‌زا تعیین می‌شود. روشن است که سیاست‌های ایران سهم ناچیزی در تعیین بهای جهانی انرژی دارد. بنابراین، منطقی است که برای سیستم اقتصادی ـ اجتماعی ایران، این متغیر یک متغیر برون‌زا باشد. از این رو، از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۰۶ داده‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته و از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۳۰، از پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی استفاده شده است.[۳۳]

۶. اعتبارسنجی و تحلیل سیاست

در سرتاسر این بخش واحد اندازه‌گیری متغیرها مطابق جدول ۳ است.



شکل ۱۳. نمودار علت و معلولی زیربخش تجارت انرژی.

جدول ۳. واحد اندازه‌گیری متغیرهای اساسی مدل.

متغیر	واحد اندازه‌گیری
تولید ناخالص ملی	میلیون ریال
تولید نفت	میلیون بشکه
تولید گاز	میلیون بشکه معادل نفت خام
مصرف انرژی	میلیون بشکه معادل نفت خام
مصرف نفت	میلیون بشکه
مصرف گاز	میلیون بشکه معادل نفت خام
جمعیت	نفر
ارزش حال تولیدات انرژی	میلیون ریال
تولیدات غیرنفتی سرانه	ریال بر نفر
شدت انرژی	بشکه معادل نفت خام بر میلیون ریال
درآمد سرانه	ریال بر نفر

۱.۶. اعتبارسنجی

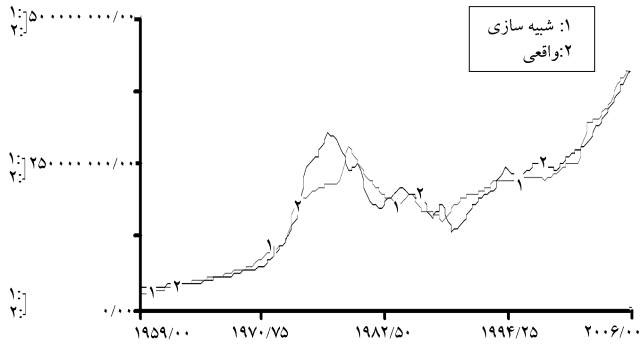
استرمن ۱۲ آزمون را برای سنجش اعتبار مدل معرفی می‌کند.[۱۶] تمامی این آزمون‌ها بر روی PEEMI انجام شده و نتایج آن‌ها برای یک بازه زمانی حدود ۳۰ سال (تا سال ۲۰۰۶) رضایت‌بخش بوده است. اما ارائه‌ی کامل این نتایج از حوصله‌ی نوشتار حاضر خارج است. بنابراین، در اینجا بازسازی رفتار گذشته به‌عنوان نمونه‌یی از این ۱۲ آزمون ارائه شده است. نمودارهای مربوط به این آزمون را در شکل‌های ۱۴ تا ۲۱ ملاحظه می‌کنید. در تمامی شکل‌های یادشده، منحنی شبیه‌سازی‌شده (روند شماره‌ی ۱)، و واقعی (روند شماره‌ی ۲) با هم مقایسه شده‌اند.

۲.۶. تحلیل سیاست

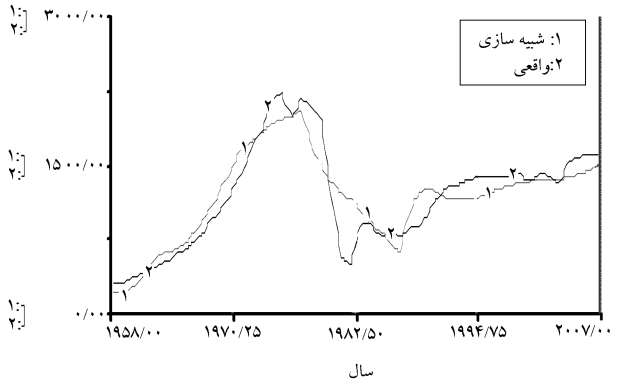
افق زمانی این مطالعه ۲۲ سال، یعنی تا سال ۲۰۳۰ میلادی است. تمامی سیاست‌ها نیز از سال ۲۰۰۸ به بعد اعمال می‌شوند. برای تحلیل سیاست از چهار شاخص استفاده شده است: ۱. ارزش حال تولیدات انرژی؛ ۲. تولیدات غیرنفتی سرانه؛ ۳. شدت انرژی[۱۷]؛ ۴. درآمد قابل تصرف سرانه. اکنون برای تحلیل سیاست و نتیجه‌گیری، لازم است پرسش‌های اساسی پژوهش مطرح، و نحوه‌ی پاسخ‌گویی به آن‌ها با استفاده از مدل ساخته شده روشن شود. پرسش‌های اساسی این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. آیا افزایش سهم گاز در سرمایه‌گذاری بخش انرژی می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد؟

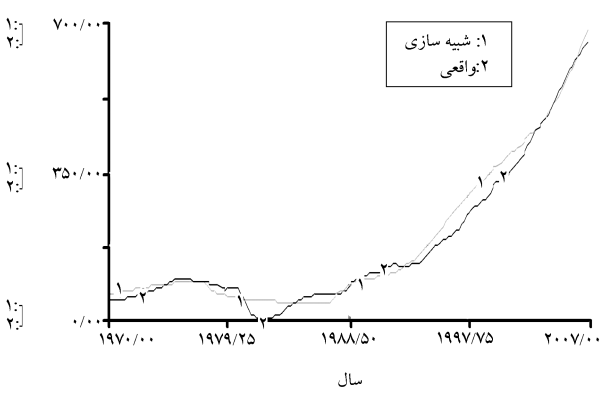
۲. آیا اولویت دادن مصرف گاز تولیدی کشور در جهت تزریق به ذخایر نفت، در



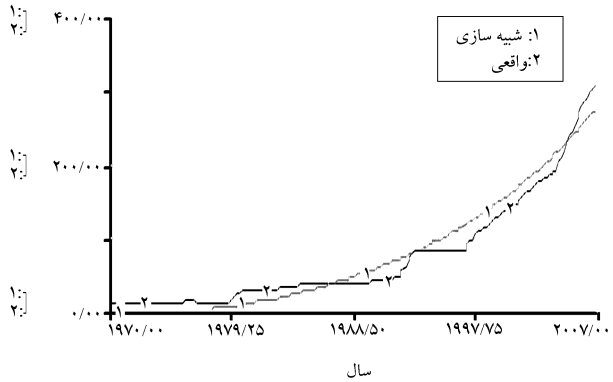
شکل ۱۴. تکرار رفتار گذشته (تولید ناخالص ملی).



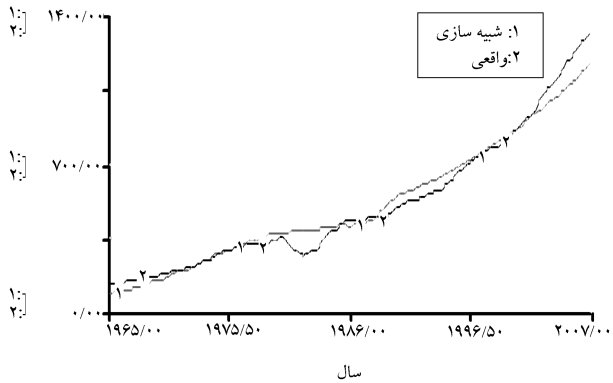
شکل ۱۵. تکرار رفتار گذشته (تولید نفت).



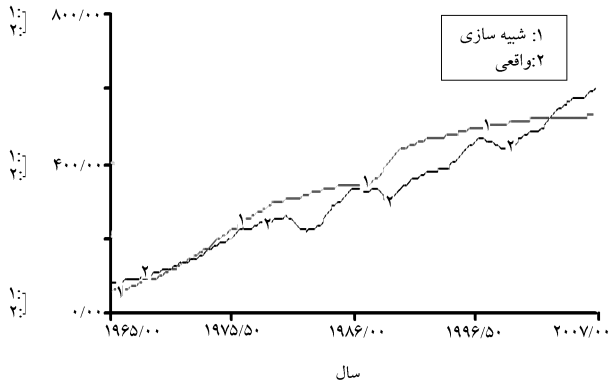
شکل ۱۶. تکرار رفتار گذشته (تولید گاز).



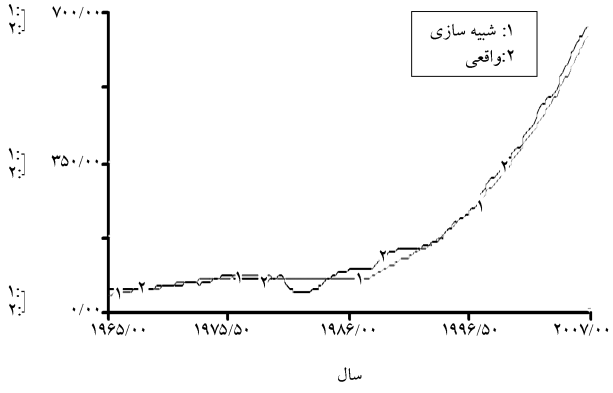
شکل ۱۷. تکرار رفتار گذشته (تولید گاز قطر).



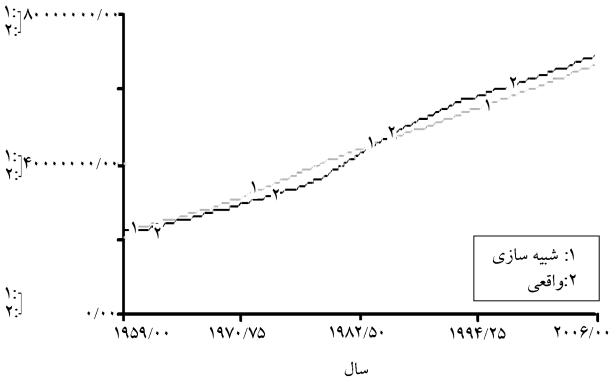
شکل ۱۸. تکرار رفتار گذشته (مصرف انرژی).



شکل ۱۹. تکرار رفتار گذشته (مصرف نفت).



شکل ۲۰. تکرار رفتار گذشته (مصرف گاز).



شکل ۲۱. تکرار رفتار گذشته (جمعیت).

مقایسه با سیاست فعلی که اولویت را به مصرف داخلی و سپس به صادرات می‌دهد، می‌تواند در بلندمدت منافع کشور را افزایش دهد؟

۳. آیا محدود کردن واردات انرژی در بلندمدت به‌صلاح کشور است؟

۴. آیا تغییر سهم مطلوب بازار حامل‌های انرژی می‌تواند موجب بهبود عملکرد سیستم شود؟

۵. آیا تلاش در جهت برقراری روابط دوستانه با کشورهای صاحب صنایع وابسته به انرژی، از جمله ایالات متحده‌ی آمریکا و بریتانیا، می‌تواند موجب بهبود شرایط سیستم شود؟

برای پاسخ‌گویی به پرسش‌های فوق، سیاست‌هایی طراحی شده و اثر آن بر روی رفتار سیستم مشاهده می‌شود.

۱.۲.۶. افزایش نسبت سرمایه‌گذاری در بخش تولید گاز (سیاست سرمایه‌گذاری)

سیاستی که برای پاسخ‌گویی به پرسش نخست انتخاب می‌شود عبارت است از: افزایش نسبت سرمایه‌گذاری در بخش تولید گاز. چنان که در تشریح ساختار مدل عنوان شد، سرمایه‌گذاری در بخش انرژی شامل دو جزء است: سرمایه‌گذاری در اکتشاف و سرمایه‌گذاری در تولید. در اعمال سیاست مورد بحث، سرمایه‌گذاری در اکتشاف تغییر نکرده و به‌همان صورتی که در حالت پایه تعیین می‌شود باقی می‌ماند، و فقط سرمایه‌گذاری در تولید دست‌خوش تغییر می‌شود. اجرای این سیاست با استفاده از کاهش سهم سرمایه‌گذاری بر روی تولید نفت صورت می‌گیرد. باید توجه داشت که منظور از کاهش یا افزایش نسبت‌های سرمایه‌گذاری، صرفاً تغییر نسبی سهم مورد نظر است.

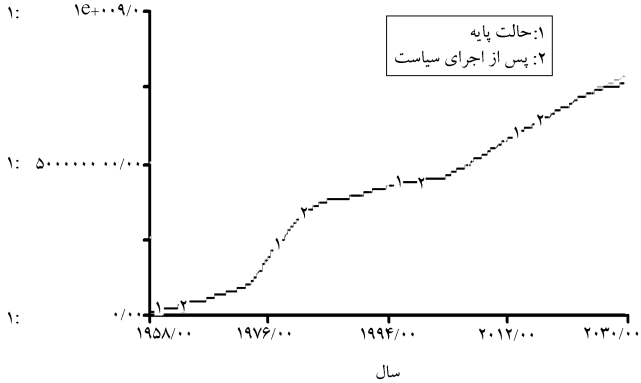
به‌منظور اعمال این سیاست، فرض می‌شود که ۵۰٪ از سهم سرمایه‌گذاری در تولید نفت کاهش یابد. از آن جا که قرار بر این است که سهم سرمایه‌گذاری در بخش اکتشاف دست‌نخورده باقی بماند، بنابراین، این ۵۰٪ که از سهم سرمایه‌گذاری در بخش تولید نفت کاسته می‌شود، به بخش تولید گاز تخصیص می‌یابد. در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ تأثیر این سیاست را بر روی شاخص‌های مدل ملاحظه می‌کنید.

در تمامی شکل‌های این بخش، روندی که با شماره‌ی ۱ نشانه‌گذاری شده است، نتیجه‌ی اجرای پایه و روندهایی که با شماره‌های ۲، ۳، ۴، و... نشانه‌گذاری شده است، نتیجه‌ی اجرای سیاست‌های مورد نظر را به تصویر می‌کشد.

چنان که ملاحظه می‌شود، در اثر اجرای سیاست افزایش سهم سرمایه‌گذاری بر روی تولید گاز، نه‌تنها هیچ یک از شاخص‌های مدل بهبود نیافته، بلکه شدت انرژی افزایش و درآمد سرانه، و تولیدات غیرنفتی سرانه به‌طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند.

با افزایش سهم سرمایه‌گذاری بر روی تولید گاز، پیداست که سرمایه‌گذاری نسبی بر روی تولید نفت کاهش یافته و درنتیجه تولید آن به‌طور نسبی کاهش می‌یابد. با کاهش تولید نفت، صادرات آن و در نتیجه درآمدهای نفتی نیز کم شده و درآمد ملی کاهش می‌یابد. کاهش درآمد ملی موجب می‌شود که سرمایه‌گذاری بر روی تولید گاز نیز، علی‌رغم افزایش نسبی، به‌طور مطلق کاهش یافته و درنتیجه تولید گاز به‌طور مطلق کاهش یابد و درآمد ملی باز هم کم‌تر شود. به دنبال افت نسبی درآمد ملی، کاهش وسیع سرمایه‌گذاری درکشور موجب رکود صنایع شده و تولیدات غیرنفتی را به‌شدت کاهش می‌دهد و درنتیجه، درآمد سرانه کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

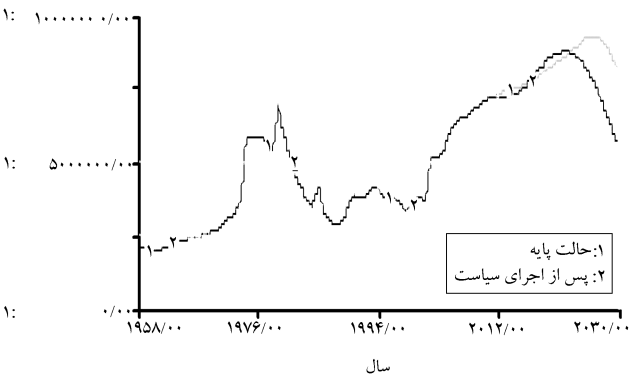
چنان که اشاره شد، پس از اعمال سیاست مورد بحث، رشد درآمد ملی کندتر می‌شود. این در حالی است که مصرف انرژی با شیب تندتری نسبت به درآمد در حال افزایش است (شکل ۲۶ مصرف انرژی را برحسب میلیون بشکه در سال، و



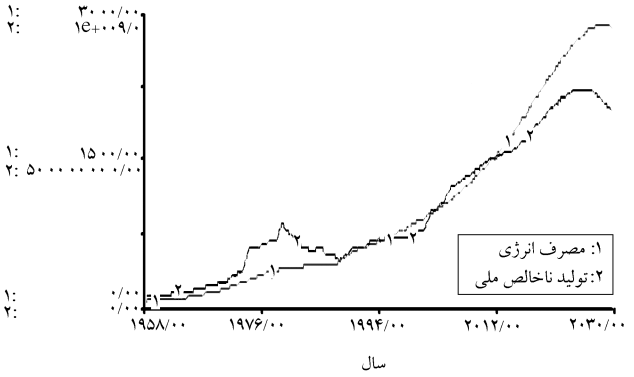
شکل ۲۲. ارزش حال تولیدات انرژی (سیاست سرمایه‌گذاری).

شکل ۲۳. تولیدات غیرنفتی سرانه (سیاست سرمایه‌گذاری).

شکل ۲۴. شدت انرژی (سیاست سرمایه‌گذاری).



شکل ۲۵. درآمد سرانه (سیاست سرمایه‌گذاری).



شکل ۲۶. مصرف انرژی (روند ۱) و GNP (روند ۲).

درآمد ملی را برحسب میلیون ریال در سال نشان می‌دهد). این بدان سبب است که روند شهرنشینی که یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر مصرف انرژی است، علی‌رغم کاهش درآمدهای نفتی به روند رو به رشد خود ادامه می‌دهد. بنابراین شدت انرژی نیز در مقایسه با حالت پایه رو به افزایش بیش‌تری می‌گذارد. افزایش شدت انرژی که نشان از کاهش بهره‌وری انرژی دارد، به‌علاوه‌ی افزایش وابستگی رفاه عمومی به درآمدهای نفتی، نامطلوب بودن این سیاست را تأیید می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع، سیاست افزایش سرمایه‌گذاری بر روی صنعت گاز کشور، در افق برنامه‌ریزی این مطالعه نمی‌تواند آثار مثبتی به همراه داشته باشد.

۲.۲.۶. اولویت دادن به تزریق گاز (سیاست تزریق)

برای پاسخ‌گویی به پرسش دوم باید سیاستی تدوین شود تا اولویت مصارف گاز کشور را تغییر دهد. در حالت پایه، گاز تولیدی در داخل کشور ابتدا مصرف داخل را به‌طور

کامل تأمین می‌کند؛ سپس اگر چیزی از این مقدار تولیدشده باقی بماند، نسبتی از آن به تزریق به ذخایر نفت تخصیص می‌یابد و مابقی صادر می‌شود. سیاستی که می‌توان در جهت تغییر شرایط فعلی اتخاذ کرد این است که اولویت مصرف گاز را تغییر داده و به تزریق اختصاص دهیم، سپس مابقی را به مصرف داخلی برسانیم. نتیجه‌ی این سیاست در شکل‌های ۲۷ تا ۳۰ آمده است.

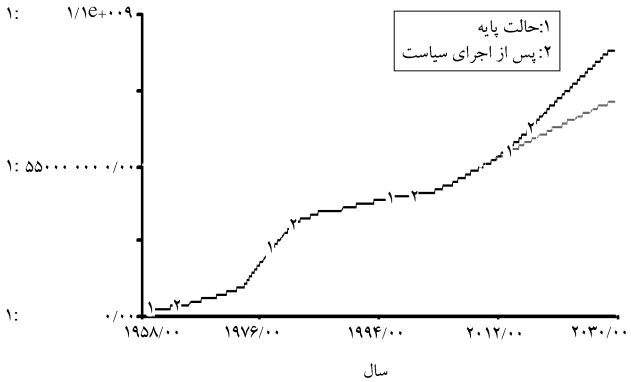
تحت شرایط جدید، تزریق بیش‌تر گاز به ذخایر نفت موجب افزایش بازدهی تولید نفت شده و درنتیجه تولید نفت به نسبت سابق افزایش می‌یابد. این امر موجب افزایش صادرات نفت و به‌تبع آن افزایش درآمد ملی می‌شود. از طرف دیگر، گاز تزریق‌شده به مخازن نفت در آینده با قیمت‌های بالاتری می‌تواند به فروش برسد. بنابراین، ارزش فعلیِ عوایدِ حاصل از تولیدات انرژی نسبت به حالت پایه افزایش زیادی پیدا کرده است.

علت روند ابتدا افزایشی و سپس کاهشی تولیدات غیرنفتی را می‌توان در روند تولید نفت جست‌وجو کرد. سیاست اخیر موجب شده که تولیدات نفتی افزایش یابد. این پدیده درکوتاه‌مدت به‌دلیل افزایش عواید نفت و درنتیجه افزایش سرمایه‌گذاری، موجب بهبود تولیدات غیرنفتی می‌شود اما در ادامه، وابستگی بیش‌تر به این عواید موجب توقف روند صعودی این تولیدات می‌شود. با این حال باید اذعان کرد که با تغییر اولویت مصرف گاز تولیدی، عملکرد سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور به‌گونه‌یی چشمگیر بهبود یافته است. علت این پدیده را باید افزایش ظرفیت تولید نفت دانست. با تخصیص بیش‌تر گاز تولیدی به تزریق، کشور با کاهش عرضه‌ی گاز طبیعی برای مصرف داخلی مواجه خواهد شد؛ لذا دولت ناچار است مازاد تقاضا را از خارج وارد کند. اما از آنجا که واردات، به‌طور طبیعی با محدودیت‌هایی مانند ظرفیت محدود بنادر برای پهلوگرفتن کشتی‌ها یا هزینه‌بر و زمان‌بر بودن احداث خطوط لوله‌ی انتقال گاز روبه‌رو بوده و درنتیجه با تأخیر همراه است، رشد مصرف گاز طبیعی نسبت به حالت پایه به‌اجبار کاهش می‌یابد.

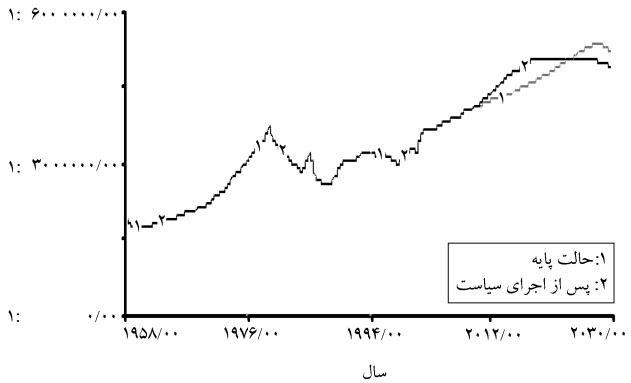
چنان که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود این کاهش نرخ رشد مصرف موجب کاهش شدید شدت انرژی می‌شود. این کاهش شدید در شدت انرژی از آن رو امکان‌پذیر است که اتلاف انرژی در ایران به‌طور گسترده وجود دارد. به باور برخی از محققین، ایران می‌تواند به توان بالایی از صرفه‌جویی و نگه‌داری منابع انرژی دست یابد.[۳۲] به‌عنوان مثال، حتی اگر شدت انرژی تا سطح سال ۱۹۷۶ پایین آورده شود، هنوز می‌توان تا دو سوم از مصرف جاری منابع انرژی را بدون این که از مصرف انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان کم شود، کاهش داد. بدین ترتیب، ایران می‌تواند مصرف انرژی خود را به یک‌ششم تا یک‌هشتم مصرف فعلی خود برساند.[۳۲] البته باید توجه داشت که این کاهش یکباره‌ی عرضه‌ی انرژی می‌تواند تبعات سویی در جامعه داشته باشد. طبیعی است مردمی که سال‌ها به اتلاف انرژی خو گرفته‌اند نمی‌توانند در مدت کوتاهی عادات مصرفی خود را تغییر دهند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که دولت به‌جای اعمال ضربتی سیاست مورد نظر، آن را به‌تدریج اجرا کند. در انتهای این بخش، اجرای نرم سیاست‌ها به‌همراه نمودارها و نتایج آن آمده تا ذهن خواننده را نسبت به موضوع روشن‌تر کند. در مجموع می‌توان اظهار داشت که تخصیص مقدار بیش‌تری از گاز تولیدی به تزریق، می‌تواند به‌عنوان یک سیاست بسیار مؤثر، تأثیر بسیار اثربخشی بر عملکرد سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور داشته باشد.

۳.۲.۶. محدود کردن واردات انرژی (سیاست واردات)

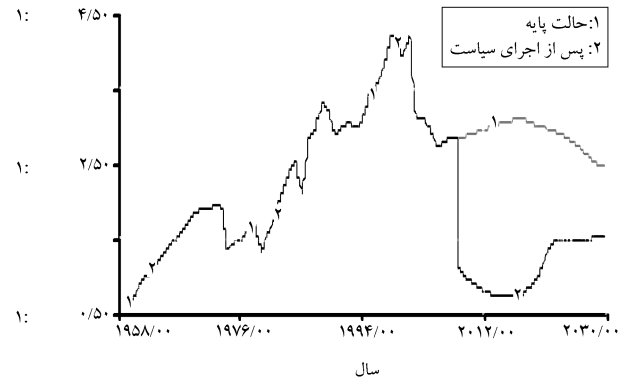
برای نشان‌دادن محدودیت بر روی واردات، سه سناریوی مختلف در نظرگرفته شد: واردات ۷۰ درصدی، ۳۰ درصدی و صفر. بدین مفهوم که در سناریوی نخست، واردات به مقدار ۷۰٪ واردات مطلوب صورت می‌گیرد؛ در سناریوی دوم ۳۰٪ و در



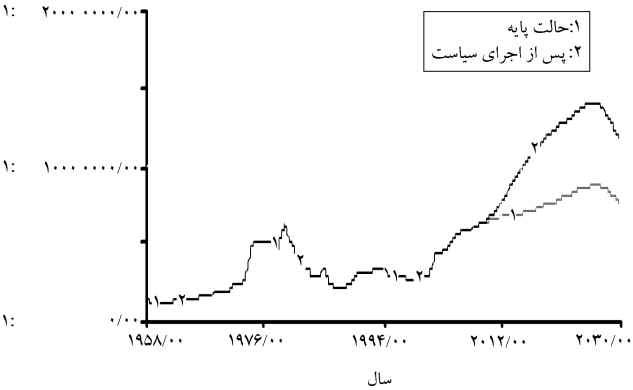
شکل ۲۷. ارزش حال تولیدات انرژی (سیاست تزریق).



شکل ۲۸. تولیدات غیر نفتی سرانه (سیاست تزریق).



شکل ۲۹. شدت انرژی (سیاست تزریق).



شکل ۳۰. درآمد سرانه (سیاست تزریق).

سناریوی سوم واردات به‌طور کلی ممنوع است. ملاحظه شد که اعمال محدودیت بر روی واردات انرژی هیچ تأثیری بر سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور ندارد. علت واضح است: حجم واردات انرژی بسیار ناچیز است. البته باید توجه داشت که واردات انرژی در مدل از تفاضل تولید و مصرف داخلی انرژی به دست می‌آید؛ بدین مفهوم که ابتدا تقاضای داخلی توسط تولید داخل تأمین شده و آنچه که باقی می‌ماند صادر می‌شود. به‌عبارت دیگر، منظور از واردات انرژی، خالص واردات انرژی مثبت و منظور از صادرات انرژی، خالص صادرات انرژی مثبت است. به‌عنوان مثال، با این که ایران امروزه واردکننده‌ی برخی فراورده‌های نفتی است، اما چون صادرات نفت و فراورده‌های نفتی کشور بیش از واردات آن است، خالص صادرات مثبت است و درنتیجه خالص واردات که منفی است برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۴.۲.۶. تغییر سهم مطلوب بازار حامل‌های انرژی (سیاست سهم بازار)

سیاستی که در این قسمت اعمال می‌شود، تغییر سهم مطلوب بازار گاز طبیعی است. بازار انرژی ایران همچون بازار بسیاری از کالاهای دیگر در کشور، مبتنی بر قیمت نیست. هر ساله دولت قیمت انواع کالاها را اعلام می‌کند و تولیدکنندگان، فروشندگان، و خریداران مجبورند که براساس قیمت تحمیلی، فعالیت‌های خود را تنظیم کنند. براین اساس مصرف‌کنندگان انرژی، به تبع تصمیمات دولت رفتار مصرفی خود را تنظیم می‌کنند. پس از جنگ، دولت در جهت افزایش زیرساخت‌های مصرف گاز طبیعی اقدام کرد. گسترش شبکه‌های توزیع و مصرف گاز باعث شد تا به‌تدریج سهم آن از بازار انرژی کشور بالا رود. بنابراین، به‌درستی فرض شده که تغییر سهم حامل‌های انرژی از بازار تنها در دستان دولت قرار دارد. برای اعمال این سیاست، چند سناریو طراحی شده است. در سناریوی پایه، سهم مطلوب گاز از بازار برابر ۸۰٪ فرض شده است. سناریوهای دیگری که در این جا درمورد سهم مطلوب گاز آزمون می‌شوند عبارت‌اند از: ۱۰۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪، و ۵٪. اثر هریک از این سناریوها در شکل‌های ۳۱ تا ۳۴ به‌ترتیب با شماره‌های ۲، ۳، ۴، و ۵ و سناریوی پایه نیز با عدد ۱ مشخص شده‌اند.

با افزایش سهم بازار گاز، فرصت بیش‌تری برای صادرات نفت که گران‌تر از گاز است، فراهم شده و درآمدهای حاصله افزایش می‌یابد. با افزایش درآمدها سرمایه‌گذاری بیش‌تر شده و یک حلقه‌ی بازخور مثبت در جهت بهبود سیستم به کار می‌افتد. این حلقه‌ی بازخور مثبت باعث می‌شود درآمد ملی به‌نحو چشمگیری افزایش یابد. این افزایش درآمد از یک طرف درآمد سرانه را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر باعث کاهش شدت انرژی می‌شود. البته باید توجه داشت که این کاهش شدت انرژی نمی‌تواند نشانه‌ی بهبود کارآیی انرژی باشد، زیرا بخش عمده‌ی این افزایش درآمد را عواید نفت تشکیل می‌دهد. نمودار رسم شده در شکل ۳۲ نشان می‌دهد که تولیدات غیرنفتی تغییر محسوسی نداشته‌اند.

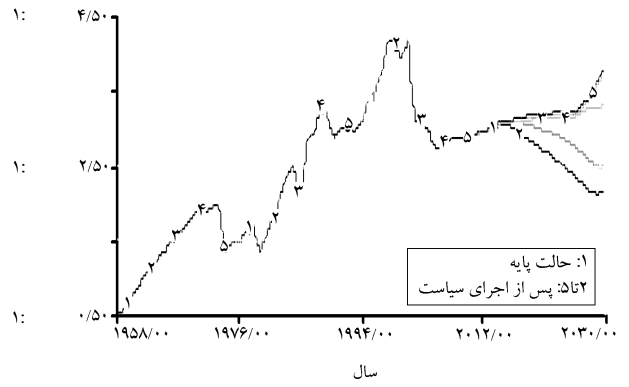
پرسشی که اینجا مطرح می‌شود این است که چرا با افزایش قابل ملاحظه‌ی درآمد ملی، ارزش حال تولیدات انرژی تغییر چندانی نکرده است؟ در پاسخ باید عنوان کرد که افزایش سهم گاز طبیعی از بازار مصرف داخلی در حالی صورت می‌گیرد که ظرفیت تولید گاز کشور جواب‌گوی تقاضای داخلی نبوده و درنتیجه واردات گاز افزایش خواهد یافت. این افزایش هزینه‌های واردات گاز موجب می‌شود تا ارزش فعلی عواید حاصل از تولید انرژی تا حد زیادی تعدیل شود.

۵.۲.۶. بهبود روابط سیاسی (سیاست بهبود روابط)

برای اجرای این سیاست، فرض کرده‌ایم ضریب تغییرات سیاسی که امنیت سرمایه‌گذاری را پس از انقلاب کاهش داده بود، به مقدار پیشین خود بازگردد. بالتبع اجرای این سیاست خارج از محدوده‌ی تصمیم‌گیری مدیران بخش انرژی کشور و در دست

شکل ۳۱. ارزش حال تولیدات انرژی (سیاست واردات).

شکل ۳۲. تولیدات غیرنفتی سرانه (سیاست واردات).



شکل ۳۳. شدت انرژی (سیاست واردات).

شکل ۳۴. درآمد سرانه (سیاست واردات).

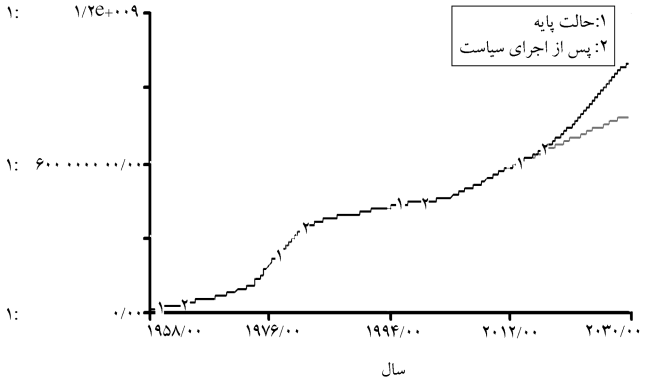
سیاست‌مداران و دیپلمات‌ها قرار دارد. اما اعمال آن در مدل می‌تواند بینش صحیحی از مسائل اساسی اقتصاد ـ انرژی کشور به دست دهد.

شکل‌های ۳۵ تا ۳۸ تأثیر سیاست اخیر را بر روی سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور نشان می‌دهد. بهبود روابط سیاسی منجر به افزایش امنیت سرمایه‌گذاری در کشور شده و با افزایش امنیت اقتصادی، حجم زیادی از سرمایه‌های خارجی به ایران وارد می‌شود و به‌طور ویژه موجب تسریع افزایش ظرفیت تولید در بخش انرژی می‌شود. این افزایش تولید در بخش انرژی موتور محرکه‌ی صنعت شده و درآمدهای حاصل از صادرات انرژی به سرمایه‌گذاری در بخش‌های دیگر اقتصاد نیز وارد می‌شود. حلقه‌ی بازخور مثبتی که در این میان به حرکت درمی‌آید، وضعیت اقتصادی کشور را به‌نحو قابل ملاحظه‌یی بهبود می‌بخشد. البته نباید این مسئله را از نظر دور داشت که این سیاست موجب تسریع روند استخراج منابع طبیعی کشور و کوتاه‌تر شدن عمر ذخایر می‌شود. این مسئله موجب خدشه‌دار شدن تولید صیانتی انرژی شده و نسل‌های آینده را از این ثروت ملی محروم می‌سازد.

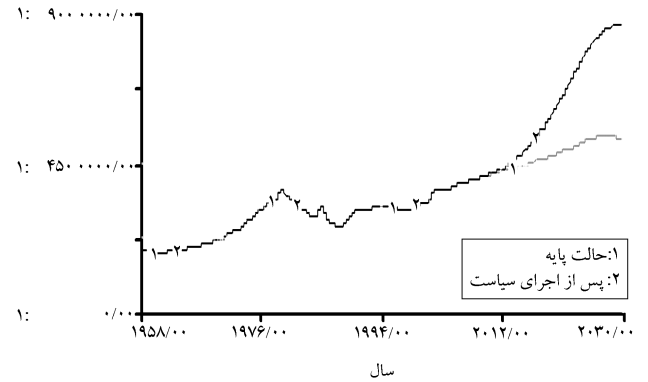
اکنون استفاده از سیاست‌های تلفیقی را مورد آزمایش قرار می‌دهیم، بدین ترتیب که دو یا چند سیاستی که گمان می‌رود در ترکیب با یکدیگر اثر مثبتی بر سیستم اقتصاد ـ انرژی دارند، با هم در نظرگرفته و اثرات‌شان را بر روی سیستم می‌سنجیم.

۶.۲.۶. اجرای نرم سیاست‌های تلفیقی (سیاست نرم)

طبیعی است که اجرای نرم سیاست‌ها، اثرات انقلابی اجرای ضربتی را در پی ندارد؛ بنابراین باید این واقعیت را پذیرفت و اجازه داد تا تغییر با آهنگی مناسب و موزون رقص خود را دنبال کند. در این مرحله، برخی از سیاست‌ها که به‌طور مجرد تأثیری بر عملکرد سیستم نداشتند، در تلفیق با سیاست‌های دیگر و به‌گونه‌یی نرم بر مدل اعمال شدند و نتایج مطلوبی از خود بروز دادند.



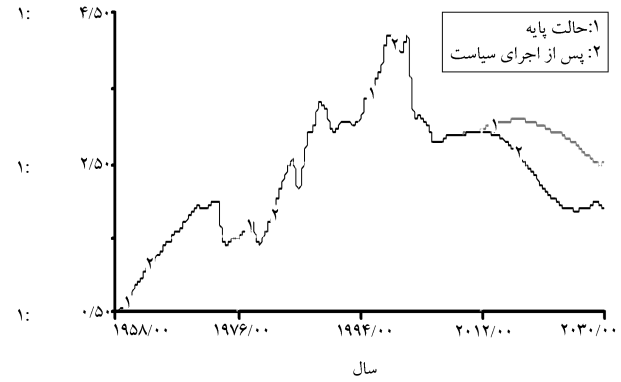
شکل ۳۵. ارزش حال تولیدات انرژی (سیاست بهبود روابط).



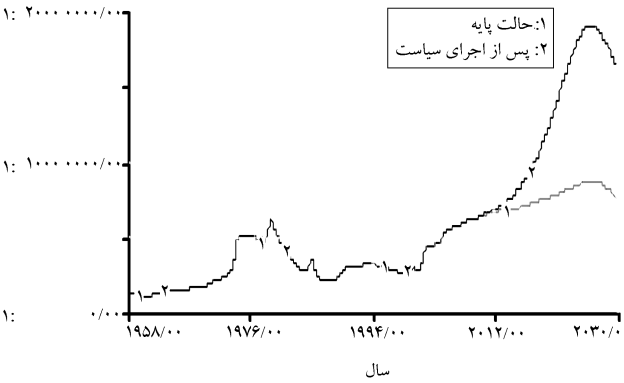
شکل ۳۶. تولیدات غیرنفتی سرانه (سیاست بهبود روابط).

شکل‌های ۳۹ تا ۴۲ اثرات بهترین حالتی که از تلفیق سیاست‌های مختلف به دست آمده است را به نمایش گذاشته است. در این ترکیب، چهار سیاست به‌طور همزمان اجرا شده‌اند: تزریق نسبت بیش‌تری از گاز تولیدی به ذخایر نفتی کشور، محدودکردن واردات، افزایش سهم بازارگاز طبیعی، و تلاش در جهت بهبود روابط سیاسی خارجی. همچنین در این سیاست، تغییر اولویت مصرف گاز و تعیین محدودیت بر واردات انرژی، به‌طور تدریجی (نرم)، ابتدا در طول یک دوره‌ی ۱۰ ساله و سپس در طول یک دوره‌ی ۲۰ ساله اعمال شده است.

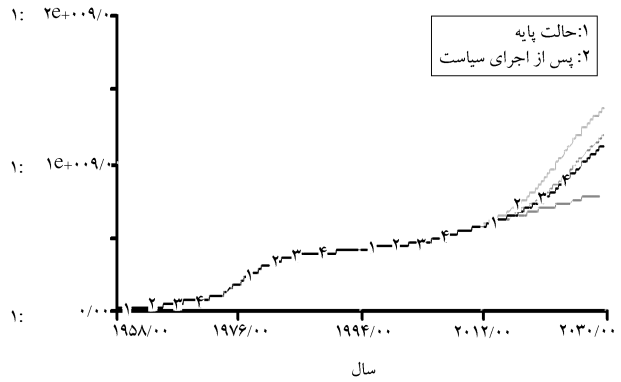
روند شماره‌ی ۱ اجرای پایه، روند شماره‌ی ۲ اجرای سیاست تلفیقی به صورت ضربه‌یی، روند شماره‌ی ۳ اجرای سیاست تلفیقی به‌صورت تدریجی (ظرف ۱۰ سال)، و روند شماره‌ی ۴ اجرای سیاست تلفیقی به‌صورت تدریجی (ظرف ۲۰ سال)



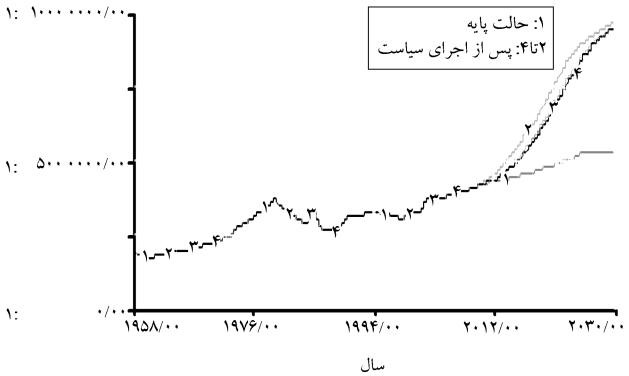
شکل ۳۷. شدت انرژی (سیاست بهبود روابط).



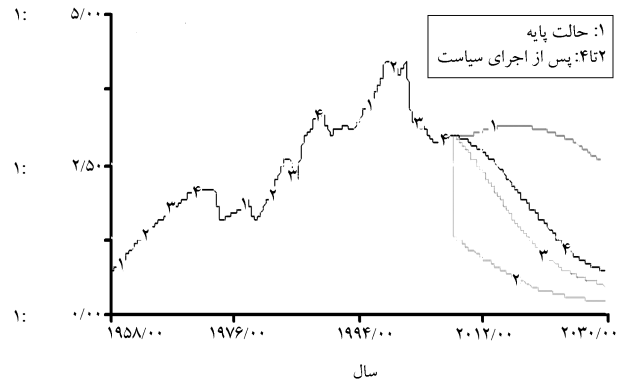
شکل ۳۸. درآمد سرانه (سیاست بهبود روابط).



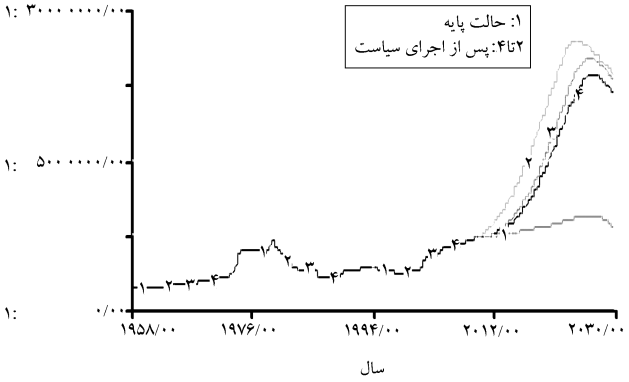
شکل ۳۹. ارزش حال تولیدات انرژی (سیاست نرم).



شکل ۴۰. تولیدات غیرنفتی سرانه (سیاست نرم).



شکل ۴۱. شدت انرژی (سیاست نرم).



شکل ۴۲. درآمد سرانه (سیاست نرم).

را به تصویر می‌کشند. در این رابطه باید به نقش سیاست تزریق گاز اشاره کرد که اجرای آن درآمدهای عظیم نفت و گاز به اقتصاد کشور تزریق می‌کند. از طرف دیگر، بهبود روابط سیاسی موجب شده تا سرمایه‌گذاری وسیعی در بخش انرژی صورت گیرد. این عامل نیز بر تولیدات انرژی و در نتیجه بر عواید حاصل از آن می‌افزاید. بنابراین ارزش حال ناشی از عواید نفت و گاز به‌طور قابل توجهی بالا می‌رود (شکل ۳۹).

یکی دیگر از آثار اجرای این سیاست، افزایش تولیدات غیرنفتی است. براثر اجرای این سیاست‌ها درآمدهای عظیم نفت و گاز به اقتصاد کشور تزریق شده و صنایع غیر انرژی نیز به‌تدریج رشد بیش‌تری پیدا می‌کنند. درنتیجه تولیدات غیرنفتی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴۰).

سیاست تزریق گاز و همراه شدن آن با سیاست‌های محدودیت واردات و افزایش سهم بازار گاز پیامدهای تأثیرگذاری بر سیستم داشته است. سیاست تزریق به‌تنهایی موجب می‌شود که منابع گاز کم‌تری برای مصرف داخلی فراهم باشد و بنابراین مایحتاج مردم از خارج وارد شود. این در شرایطی است که افزایش سهم بازار گاز موجب وابستگی روزافزون مصرف داخلی به گاز طبیعی می‌شود. حال که محدودیت واردات نیز اعمال شده، عرضه‌ی داخلی انرژی به‌شدت محدود می‌شود. این امر می‌تواند با سهمیه‌بندی انرژی یا اعطای تسهیلات به‌منظور صرفه‌جویی‌های گسترده عملی شود. ولی باید توجه داشت که اعمال ضربتی سیاست‌های تزریق گاز و محدودیت واردات، شوک بزرگی به منحنی شدت انرژی وارد می‌سازد و تبعات سیاسی ـ اجتماعی وخیمی به همراه خواهد داشت. اعمال سیاست‌های تزریق گاز و محدودیت واردات در این راستا می‌تواند گره‌گشا باشد (شکل ۴۱).

۷. نتیجه‌گیری

انرژی، بدون تردید مهم‌ترین ماده‌ی خام و عامل تولید در تمامی بخش‌های تولیدی و صنعتی است. بدون انرژی جهان از حرکت بازمی‌ایستد و زندگی متوقف می‌شود. به‌همین دلیل امروزه صنعت انرژی یکی از مهم‌ترین صنایع در جهان به‌شمار می‌رود. همین اهمیت باعث شده تا نفت را که هنوز اصلی‌ترین سوخت جهان محسوب می‌شود، طلای سیاه بنامند.

طبیعی است که این اهمیت به حوزه‌ی تصمیم‌گیری در مسائل کلان اقتصاد ـ انرژی منتقل می‌شود. اتخاذ تصمیمات راهبردی در مسائل اقتصاد ـ انرژی بسیار حیاتی است، چرا که اشتباه در تصمیم‌گیری احتمالاً بسیار گران تمام خواهد شد. به‌علاوه، آثار و پیامدهای چنین تصمیماتی معمولاً با تأخیرهایی نسبتاً طولانی بروز خواهند کرد. این مسائل باعث شد تا دانشمندان حوزه‌ی اقتصاد و انرژی به فکر ایجاد مدل‌هایی بیفتند تا با استفاده از آن بتوان نحوه‌ی رفتار سیستم‌های اقتصاد ـ انرژی را پیش‌بینی کرد. این مدل‌ها که با عنوان کلی مدل‌های انرژی شناخته می‌شوند، با استفاده از روش‌ها و ابزارهای مختلفی ایجاد می‌شوند. یکی از این روش‌ها، سیستم دینامیک است که در سال ۱۹۶۱ ابداع شد.[۵]

مدل‌های انرژی که با روش سیستم دینامیک ساخته شده‌اند قادرند با در نظر گرفتن همزمان تعاملات موجود میان بخش انرژی با بخش‌های دیگر اقتصاد، تأثیر اعمال سیاست‌های مختلف را بر کل سیستم اقتصاد ـ انرژی به‌طور پویا نشان دهند. از جمله خواص دیگر روش سیستم دینامیک این است که می‌تواند مسیر حرکت متغیرها را در شرایط متفاوت تعادلی و غیرتعادلی به تصویر بکشد.

مدل‌های انرژی زیادی با استفاده از روش سیستم دینامیک در نقاط مختلف جهان ساخته شده، اما هنوز یک مدل کامل اقتصاد ـ انرژی برای ایران تهیه نشده است. به‌همین دلیل در این نوشتار، تلاش شد تا یک مدل اقتصاد ـ انرژی مقدماتی، مبتنی بر مدل سیستم دینامیک، به‌عنوان اولین گام در راستای مدل‌سازی پویایی‌شناختی انرژی در ایران ایجاد شود.

مدل سیستم دینامیک، که در سال ۱۹۷۸ طراحی شد، تعاملات موجود میان بخش‌های مختلف سیستم اقتصادی ـ اجتماعی ایران را با استفاده از روش سیستم دینامیک نشان می‌دهد. این مدل از ساختاری پیچیده و دقیق برخوردار بوده و بر پایه‌ی رفتارهای اقتصادی خُرد ایجاد شده است.

پس از بررسی و مطالعه‌ی دقیق مدل سیستم دینامیک، مدل PEEMI در این نوشتار طراحی و به آن ملحق شد و رفتارهای متغیرهای اصلی سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران شبیه‌سازی شد. مهم‌ترین متغیرهای PEEMI عبارت‌اند از: تولید

نفت، تولید گاز، تولید گاز کشورهای همسایه، مصرف نفت، مصرف گاز، تزریق گاز، و صادرات و واردات انرژی. مدل PEEMI متغیرهای مهم دیگری را نیز مورد استفاده قرار می‌دهد که برجسته‌ترین آنها عبارت‌اند از: تولید ناخالص ملی، جمعیت، ارز مورد نیاز برای واردات انرژی، و سطح فنّاوری در بخش صنعت. از طرف دیگر مدل سیستم دینامیک نیز مهم‌ترین متغیرهای خود را از PEEMI دریافت می‌کند، نظیر: میزان دسترسی به انرژی، وجوه نقد باقی‌مانده برای سرمایه‌گذاری، و درآمدهای حاصله از صادرات انرژی.

شبیه‌سازی انجام شده و همچنین آزمون‌های آماری نشان می‌دهد که مدل توانایی بسیار بالایی در تکرار رفتار گذشته دارد. همچنین، تحلیل حساسیتی که در مورد پارامترهای مدل انجام گرفته نشان داد که رفتار مدل و همچنین سیاست‌های پیشنهادی، از استحکام قابل قبولی نسبت به تغییرات گسترده‌ی پارامترها برخوردارند. بنابراین، نتایجی که از این پژوهش به دست آمده، می‌تواند تا حد زیادی قابل اطمینان باشد.

نتیجه‌یی که از تحلیل سیاست‌های مختلف به دست آمد، نشان داد که ترکیبی از سیاست‌ها می‌تواند عملکرد سیستم اقتصاد ـ انرژی کشور را بهبود بخشد.

۸. پیشنهادات

با توجه به مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از بخش تحلیل سیاست، می‌توان پیشنهادهایی به‌منظور بهبود عملکرد سیستم اقتصاد ـ انرژی ایران ارائه کرد. در این راستا پیشنهاد می‌شود:

۱. گاز طبیعی تولیدشده درکشور ابتدا به تزریق گاز، سپس به مصرف داخلی و در آخر به صادرات تخصیص یابد. این کار باعث افزایش ضریب بازیافت نفت شده و در نتیجه تولید نفت افزایش می‌یابد. با افزایش تولید، صادرات نفت افزایش یافته و درآمدهای به دست آمده می‌تواند صرف توسعه‌ی صنعت انرژی شود.

۲. کمبود گاز برای مصرف داخلی که ممکن است درنتیجه‌ی تزریق گاز به وجود آید، با واردات جبران شود، اما این واردات باید محدود شود. این کار در حقیقت به‌مفهوم کاهش عرضه‌ی داخلی انرژی است. با توجه به این که با صرفه‌جویی می‌توان مصرف انرژی را به یک‌ششم تا یک‌هشتم مقدار فعلی کاهش داد، بنابراین، کاهش عرضه‌ی داخلی نمی‌تواند تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم داشته باشد.

۳. سرمایه‌گذاری در جهت افزایش سهم بازارگاز طبیعی افزایش یابد. کاهش سهم نفت از بازار مصرف داخلی، فرصت بیش‌تری برای صادرات این محصول فراهم کرده و با توجه به بهای بالاتر این حامل نسبت به گاز طبیعی، منافع بیش‌تری از صادرات آن حاصل می‌شود.

۴. تلاش گسترده‌یی در جهت بهبود روابط سیاسی خارجی انجام گیرد تا اعتماد شرکت‌های بزرگ خارجی به‌منظور سرمایه‌گذاری در بخش نفت و گازکشور جلب شود. در پرتو این سرمایه‌گذاری باید توجه ویژه‌یی به انتقال و جذب فنّاوری و دانش فنی روز صورت گیرد.

۵. سیاست‌های پیشنهادی به‌طور موازی و ترجیحاً به‌صورت تدریجی اعمال شده تا اولاً، اثر هم‌افزای آن‌ها موجب بهبود مضاعف سیستم شود، و ثانیاً شوک‌های ناشی از تغییر رویه‌ی سیستم، ملایم شود.

منابع

1. Shakibaee, A.R., *Energy Economy,* Kerman, Publication of Kerman Bahonar University (2002).
2. Machayekhi, A.N., *Overview of Iran's Future Economical Development Based on Oil,* Tehran, Publication of Tehran University, (1984).
3. Berkeshli, F., *Drawbacks of Energy Sector, Investigation of Energy- Economy,* Sixth edition, Tehran, Publication of Institute of energy international studies, pp. 7-15 (2006).
4. Khoshakhlagh, R. and Mousavi, M.R. "Oil shocks and the phenomenon of Netherlandian disease in Iran's economy, an compatable pattern for general equality", *Journal of economical Reaserches,* pp. 97-117 (2006).
5. Forrester, J.W., *Industrial Dynamics,* Waltham: Pegasus Communications (1961).
6. Sterman, J.D., *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World,* McGraw-Hill, Higher Education (2000).

پانوشت

1. J.W.Forrester
2. industrial dynamics
3. feedback effects
4. computational general equilibrium model
5. macroeconomic, energy and environment sub-model
6. the model for energy supply system alternative
7. the national energy modelling systems
8. the IIASA-WEC energy economic environment
9. M. King Hubbert
10. Hubbert life cycle
11. ordinary least squares (OLS)
12. integrated dynamic energy analysis simulation
13. Eqyption petroleum model
14. feedback-rich energy economy model
15. preliminary energy-economy model of Iran
16. برای آگاهی بیش‌تر در مورد این ۱۲ آزمون، رک.: مقاله‌ی استرمن با عنوان «آماره‌های توصیفی مناسب برای ارزیابی برازش تاریخی مدل‌های دینامیک سیستم».[۳۴] همچنین به کتاب «پویایی‌های کسب و کار» از همین نویسنده مراجعه کنید.[۱۶]
17. energy intensity

7. Meadows, D.L., *Dynamics of Growth in a Finite World,* Wright-Allen Press, Cambridge, Massachusetts (1974).
8. Arif, M.T. and Saeed, K. "Sustaining economic growth with a nonrenewable natural resource: The case of oil-dependent Indonesia", *System Dynamics Review,* **5**, pp. 17- 34 (1989).
9. Machayekhi, A.N., *Strategy of Economic Development in Iran: A Case of Development on Exhaustible Resources,* Cambridge: MIT, Sloan School of Management, Ph.D. Dissretattion (1978).
10. Sterman, J.D., *The Energy Transition and the Economy: A System Dynamics Approach,* Cambridge: MIT, Sloan School of Management, Ph.D. Dissertation, **1:2**, (1981).
11. Fiddaman, T.A. "Feedback-rich climate-economy model", Quebec, 16th International Conference of the System Dynamics Society (1998).
12. Naill, R.F. "A system dynamics model for national energy policy planning", *System Dynamics Review,* **8**, pp. 1-19 (Winter 1992).
13. Morecraft, J., *Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach,* Chichester: John Wiley & Sons (2007).
14. EIA Country Analysis Briefs. "Energy information administration: Official energy statistics from the U.S. government", Energy Information Administration (October 2007) (May 2008). http://www.eia.doe.gov/cabs/Iran/pdf.
15. BP Statistical Review of World Energy (2008) / British Petroleum, London, BP p.l.c. (2010).
16. Energy Balance of Iran (2006), Power and Energy Planning Department, Ministry of Energy, Tehran: Deputy for Power & Energy Affairs, Ministry of Energy (2008).
17. Iran's Vision. Approaches about oil and gas industry //Iran vision. pp.35-37 (2007).
18. Capros, P. "Integrated economy/energy/environment models" // International Symposium on Electricity, Health and the Environment: Comparative Assessment in Support of Decision Making.- Vienna, Austria: IAEA (1995).
19. Wei, Y.M. "Progress in energy complex system modelling and analysis" //*International Journal of Global Energy* Issues.- [s.l.]: Inderscience Enterprises Ltd., **25**, pp. 109-128 (2006).
20. Beeck, N.V. "Classification of energy models": Research Memorandum (777)/ Faculty of Economics and Business Administration; Tilburg University, Tilburg: [s.n.] (1999).
21. Radzicki, M.J., U.S. Department of Energy's Introduction to System Dynamics- A Systems Approach to Understanding Complex Policy Issues [Book].- [s.l.]: Sustainable Solutions Inc. in System Dynamics Society Resources (1997).
22. Hubbert, M.K. "Nuclear energy and the fossil fules", // *Drilling and Production Practice, Washington: American Petroleum Institute*, **95**, pp. 7-25 (1956).
23. Sterman, J.D. and Richardson, G.P. "An experiment to evaluate methods for estimating fossil fuel resources", *Journal of Forecasting,* **4**, pp. 197-226 (1985).
24. Naill, R., *The Discovery Life Cycle of a Finite Resource: A Case Study of U.S. Natural Gas,* Toward Global Equilibrium: Collected Papers/book auth. Meadows D.L., Cambridge: MIT Press (1973).
25. Sterman, J.D., *The Effect of Energy Depletion on Economic Growth,* Working Papers, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management, 1130-80A (1980).
26. Sterman, J.D.; Richardson, G.P. and Davidsen, P. "Modeling the estimation of petroleum resources in the United States", *Technological Forecasting and Social Change,* **33**, pp. 219-249 (1988).
27. Choucri, N.; Heye, C. and Lynch, M. "Analyzing oil production in developing countries: a case study of egypt", *The Energy Journal,* **11**, pp. 91-115 (1990).
28. Tao, Z. and Li, M. "System dynamics model of hubbert peak for China's oil" // Energy Policy.- [s.l.]: Elsevier Ltd., **35**, pp. 2281-2286 (2007).
29. Chi, K.C., Nuttall, W.J. and Reiner, D.M. "Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis" // *Technological Forecasting & Social Change.*- [s.l.]: doi:10.1016/j.techfore.2008.06.002 (2008).
30. Azin, R., Complexities of Oil and Gas Storage (inter linear) // Oil times. (2008). http://www.nafttimes.com/articles/1386/11/27/20/
31. Razagh, I., *Familiarity with Iran's Economy,* Ney Publications (1997).
32. Maserat, M. "Iran's policy in the field of energy: Challenges and substitutes", *Political Economical Information,* pp. 72-83 (2005).
33. IEA World Energy Outlook. Paris: Internation Energy Agency (IEA) (2006).
34. Sterman, J.D. "Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models", *DYNAMICA,* Part II, **10**, pp. 51-66 (Winter 1984).