

دانشگاه مهندسی انرژی

دانشگاه صنعتی شریف

عنوان:

تحلیل ریسک در مدل عرضه انرژی

استاد:

آقای دکتر عباس رجبی قهنویه

نگارنده :

محمد شریفیان

تابستان ۱۴۰۱



## چکیده

مدل سیستم عرضه انرژی به عنوان ابزاری تحلیلی برای سیاستگذاری و بهینه‌سازی تخصیص منابع انرژی، انتخاب مناسب ترکیب حامل‌ها و فناوری‌های انرژی و همچنین تعیین سرمایه‌گذاری‌های لازم برای توسعه و بهره‌برداری از سیستم عرضه انرژی به کار گرفته می‌شود. مجموعه کاسیتی‌های روشی‌های متداول برای پوشش عدم قطعیت پارامترهای ورودی در مدل‌های انرژی، سبب شده است عدم قطعیت‌ها در مدل‌های انرژی منعکس نشود، محاسبه همزمان حالات قابل وقوع برای پارامترهای دارای عدم قطعیت امکان‌پذیر نباشد، ریسک موجود در نتایج لحاظ نگردد و عدم پایداری در نتایج پدیدار شود. در این پژوهش ابتدا با بهره‌گیری از فرایندهای تصادفی، روشی جدید برای مدلسازی یکپارچه پارامترهای دارای عدم قطعیت توسط شبکه‌های احتمالی گرسسته به کار گرفته شد که امکان پوشش به هم پیوسته عدم قطعیت در مدل سیستم انرژی را فراهم می‌نماید. از آنجایی که منابع عدم قطعیت شناسایی شده در مدل انرژی به تدریج در طول زمان ظاهر می‌گردند، در گام بعدی، مدل عرضه انرژی تصادفی چند مرحله‌ای برای پوشش همزمان عدم قطعیت توسعه داده شد. اجرای مدل انرژی تصادفی توسعه داده شده و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل انرژی قطعی موجود، ضمن اعتبارسنجی، مزیت‌های مدل تصادفی را از حیث سیاست‌گذاری بهینه و ارائه دورنمای پایدارتر برای سیستم انرژی نتیجه داد. این نتایج چگونگی زمانبندی بهینه در توسعه سیستم انرژی و نفوذ فناوری‌های نوین مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر را آشکار نمود.

این مدل تصادفی، از لحاظ نحوه پوشش عدم قطعیت‌های ریسک خنثی می‌باشد. لذا برای پوشش ریسک مجموعه متنوع عدم قطعیت‌ها در مدل تصادفی انرژی، با معرفی روشی جدید مبتنی بر اضافه نمودن توابع ریسک ساختار یافته در تابع هدف، مدل عرضه انرژی ریسک گریز توسعه داده شد که در آن ضمن کمینه شدن ریسک، حل‌پذیری و پایداری مدل برنامه‌ریزی تضمین می‌کند. کاربرد مدل ریسک‌گریز برای یک سیستم عرضه انرژی مبتنی بر اطلاعات واقعی و مقایسه آن با نتایج مدل ریسک خنثی، چگونگی تنوع بخشی در پورتفولیوی بهینه فناوری‌ها و حامل‌های انرژی را نمایان نموده و ضمن ایجاد ساختاری پایدارتر، منجر به افزایش امنیت عرضه انرژی می‌گردد.

## **کلید واژه:**

مدل عرضه سیستم انرژی، عدم قطعیت تصادفی، شبکه احتمالی گسسته، برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی ریسک گریز، توابع ریسک ساختاریافته، سیاستگذاری پایدار

# فهرست مطالب

ج	چکیده
۱	فصل ۱- مقدمه
۳	فصل ۲- عدم قطعیت در سیستم عرضه انرژی
۳	مدل سیستم عرضه انرژی.....-۱-۲
۵	منابع عدم قطعیت در مدل عرضه انرژی.....-۲-۲
۶	عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی.....-۱-۲-۲
۸	عدم قطعیت در تقاضای انرژی.....-۲-۲-۲
۹	عدم قطعیت در توسعه فناوری‌های انرژی.....-۳-۲-۲
۹	عدم قطعیت در منابع و ذخایر انرژی.....-۴-۲-۲
۱۰	عدم قطعیت در پارامترهای زیست‌محیطی.....-۵-۲-۲
۱۱	سایر عدم قطعیت‌ها.....-۶-۲-۲
۱۱	اهداف کلی پژوهش.....-۳-۲
۱۲	فصل ۳- انواع روش‌های مدلسازی ریسک‌پذیر
۱۲	روش تحلیل حساسیت.....-۱-۳
۱۳	روش سناریوسازی.....-۲-۳
۱۷	عدم قطعیت‌های تصادفی.....-۳-۳
۱۷	متغیرهای تصادفی.....-۱-۳-۳
۱۸	فرایندهای تصادفی.....-۲-۳-۳
۲۴	فصل ۴- مدلسازی ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی
۲۶	روش Minmax .....-۱-۴
۲۷	روش Mean-risk .....-۲-۴
۳۰	توابع ریسک ساختاریافته .....-۳-۴
۳۳	فصل ۵- توسعه مدل عرضه انرژی با رویکرد مدیریت ریسک
۲۳	توسعه مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز.....-۱-۵
۳۶	مدلسازی توابع ریسک در مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز.....-۲-۵
۴۰	فصل ۶- کاربرد مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز
۴۰	سیستم عرضه انرژی (استان مازندران).....-۱-۶
۴۱	مدلسازی منابع عدم قطعیت و توابع ریسک .....-۲-۶
۴۱	مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای قیمت حامل‌های انرژی.....-۱-۲-۶
۴۳	مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای ویژگی فناوری‌ها.....-۲-۲-۶

۴۴	مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای تقاضای انرژی مفید.....	-۳-۲-۶
۴۶	اجرای مدل انرژی ریسک خنثی.....	-۳-۶
۴۷	اجرای مدل انرژی ریسک گریز.....	-۴-۶
۴۷	نتایج اجرای مدل انرژی ریسک گریز در شرایط عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی.....	-۱-۴-۶
۵۰	نتایج اجرای مدل انرژی ریسک گریز در شرایط عدم قطعیت تقاضای انرژی مفید.....	-۲-۴-۶
۵۱	نتایج اجرای مدل انرژی ریسک گریز در شرایط عدم قطعیت فناوری‌های انرژی.....	-۳-۴-۶
۵۴	نتایج اجرای مدل انرژی ریسک گریز در شرایط عدم قطعیت تؤام پارامترهای ورودی.....	-۴-۴-۶
۵۵		فصل ۷- جمع‌بندی
۵۶	بحث و نتیجه‌گیری.....	-۱-۷
۶۲		فصل ۸- منابع و مراجع

# فهرست شکل‌ها

..... ۶	شکل ۱-۲: تغییرات کوتاه مدت قیمت نفت خام و گاز طبیعی (بازارهای <b>Henry hub</b> و <b>wti</b> )
..... ۷	شکل ۲-۱: روند بلند مدت تغییرات قیمت نفت خام از سال ۱۹۴۷ تا ۲۰۰۸
..... ۷	شکل ۲-۲: روند بلند مدت قیمت حامل‌های انرژی در سطح بین‌المللی
..... ۸	شکل ۲-۳: روند تغییرات تقاضای حامل انرژی در جهان
..... ۱۵	..... <b>MARKAL</b>
..... ۱۶	..... شکل ۳-۱: مدل مفهومی استفاده شده برای سناریوسازی در مدل <b>CS</b>
..... ۱۷	..... شکل ۳-۲: سناریوهای برونزای تدوین شده برای شاخص محیط زیستی <b>Times-Tiam</b>
..... ۱۹	..... شکل ۳-۳: نتایج اجرای مدل <b>GBM</b> برای تک تک سناریوهای <b>GBM</b> و به ازای مقدار متفاوت ضرایب مشخصه
..... ۲۰	..... شکل ۳-۴: مجموعه سناریوهای محتمل تولید شده مربوط به یک مدل <b>GBM</b>
..... ۲۲	..... شکل ۳-۵: نوسانات قیمت نفت خام برنت، قابل توضیح توسط مدل <b>MRM</b>
..... ۲۲	..... شکل ۳-۶: سناریوهای تولید شده برای یک فرایнд <b>MRM</b>
..... ۲۹	..... شکل ۴-۱: تابع ریسک <b>value at risk</b>
..... ۳۲	..... شکل ۴-۲: توابع ریسک <b>Value at Risk</b> و <b>Conditional Value at Risk</b>
..... ۳۲	..... شکل ۴-۳: مقایسه تحدب توابع <b>Var</b> و <b>Cvar</b>
..... ۳۶	..... شکل ۵-۱: ساختار کلی فرایندهای توسعه داده شده برای مدل انرژی تصادفی ریسک گریز
..... ۴۰	..... شکل ۵-۲: نقشه استان مازندران
..... ۴۱	..... شکل ۵-۳: نمودار مرجع انرژی استان مازندران
..... ۴۳	..... شکل ۵-۴: تولید سناریوهای احتمالی قیمت نفت خام بر اساس فرایند تصادفی <b>FMR</b>
..... ۴۵	..... شکل ۵-۵: مقایسه ترکیب بخش‌های مختلف بدست آمده از مدل تقاضای انرژی
..... ۴۶	..... شکل ۵-۶: نتایج مدل ریسک‌خنثی برای ترکیب بهینه عرضه انرژی اولیه
..... ۴۶	..... شکل ۵-۷: نتایج مدل ریسک‌خنثی برای ترکیب بهینه عرضه انرژی نهایی
..... ۴۷	..... شکل ۵-۸: نتایج مدل ریسک‌گریز برای ترکیب بهینه عرضه انرژی اولیه
..... ۴۸	..... شکل ۶-۱: ویژگی‌های تشکیل دهنده <b>Diversification</b>
..... ۴۹	..... شکل ۶-۲: بررسی میزان <b>Diversification</b> در نتایج مدل ریسک‌گریز نسبت به تغییرات ضریب ریسک گریزی
..... ۵۰	..... شکل ۶-۳: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی نهایی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی
..... ۵۰	..... شکل ۶-۴: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی مفید (حرارت) در بخش خانگی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی
..... ۵۱	..... شکل ۶-۵: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی مفید (آب گرم) در بخش خانگی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی
..... ۵۲	..... شکل ۶-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش ریسک هزینه فناوری توربین باد
..... ۵۲	..... شکل ۶-۷: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش ریسک هزینه فناوری فتوولتایک

شکل ۱۵-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش همزمان ریسک هزینه فناوری توربین باد و فتوولتایک	۵۲
شکل ۱۶-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش ریسک راندمان فناوری توربین باد	۵۳
شکل ۱۷-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش ریسک راندمان فناوری فتوولتایک	۵۳
شکل ۱۸-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک خنثی در راستای پوشش همزمان ریسک راندمان فناوری توربین باد و فتوولتایک	۵۳
شکل ۱۹-۶: تغییر مقادیر تابع هدف مدل انرژی ریسک گریز نسبت به تغییرات ضریب ریسک	۵۴

# فهرست جداول

---

۴۲.....	جدول ۱-۶: ضرایب همبستگی قیمت نفت خام و دیگر حامل‌های انرژی
۴۲.....	جدول ۲-۶: ضرایب مدل FMR-۲ برای قیمت نفت خام
۴۳.....	جدول ۳-۶: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی
۴۴.....	جدول ۴-۶: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در هزینه و راندمان فناوری‌های انرژی
۴۵.....	جدول ۵-۶: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در تقاضای انرژی مفید خانگی

## فصل ۱ - مقدمه

مفهوم انرژی به عنوان یکی از عوامل اصلی تولید در کنار کار و سرمایه نقشی تعیین‌کننده در رشد اقتصادی هر کشور را بر عهده دارد. در این راستا، مدل‌های سیستم‌های انرژی به عنوان ابزاری تحلیلی برای سیاست‌گذاری و بهینه‌سازی تخصیص منابع در بخش انرژی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. بخش انرژی در کشور ایران به دلیل وجود ذخایر عظیم انرژی‌های فسیلی و دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر دارای گستردگی و تنوع زیادی بوده و همچنین با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی، استفاده از مدل‌های انرژی به منظور شناسایی گزینه‌های صیانتی و تخصیص بهینه این منابع و همچنین برنامه‌ریزی کلان جهت رسیدن به اهداف توسعه پایدار در کشور از اهمیت زیادی برخوردار بوده است.

روند توسعه مدل‌های انرژی به عنوان ابزارهای تصمیم‌گیری در بخش انرژی از دهه پنجاه میلادی و با تدوین انواع مدل‌های تک سوخت مربوط به حامل‌های نفت و الکتریسیته آغاز گردیده و طی زمان با گسترش و پیچیده‌تر شدن سیستم‌های انرژی همچنین پیشرفت ابزار تحلیلی و محاسباتی، انواع جدیدی از این مدل‌ها پدید آمده‌اند. اگرچه فرایندهای مدل‌سازی شده در این ابزارهای تحلیلی دارای ماهیتی معین می‌باشند ولی تحولات پیرامون بخش انرژی دارای وجودی نامعین و همراه با عدم قطعیت بوده و از این حیث کاربرد مدل‌های انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای پوشش عدم قطعیت پارامترهای ورودی به مدل‌های انرژی، سناریوسازی به عنوان روشی متداول به کار گرفته شده و از آن برای شناسایی گزینه‌های ارجح در نتایج مدل‌ها استفاده گردیده است. اما روش سناریوسازی دارای کاستی‌هایی ناشی از عدم مدل‌سازی مناسب عدم قطعیت‌ها در آن و همچنین عدم پوشش همزمان حالات قابل وقوع برای پارامترهای دارای عدم قطعیت می‌باشد. از این رو نگرشی جدید در برخورد با عدم قطعیت‌ها موجب شکل‌گیری مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی گردیده است. روش برنامه‌ریزی تصادفی امکان پوشش پارامترهای دارای عدم قطعیت را فراهم می‌نماید ولی پژوهش‌های انجام شده در حوزه انرژی با موضوعیت پوشش یکپارچه عدم قطعیت‌ها و توسعه مدل‌های عرضه انرژی تصادفی پایین به بالا<sup>۱</sup> بسیار محدود می‌باشد. لذا به کارگیری روشی جدید برای مدل‌سازی یکپارچه پارامترهای دارای قطعیت در سیستم انرژی پایین به بالا و درونی‌سازی آن در مدل انرژی ضروری می‌باشد. همچنین توسعه مدل انرژی تصادفی با استفاده از مدل انرژی قطعی موجود برای پوشش همزمان عدم-قطعیت مدنظر قرار می‌گیرد.

یکی از تأثیرات وجود عدم قطعیت در پارامترهای ورودی به مدل عرضه انرژی ایجاد ریسک در نتایج حاصل از مدل می‌باشد. به دلیل مقیاس بزرگ جریان‌های مالی و سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز در سیستم‌های انرژی، ریسک موجود در

---

Bottom-up'

نتایج مدل می‌تواند هزینه‌های قابل توجهی را به سیستم انرژی تحمیل نماید. با توجه به آنکه فعالیت‌های انجام شده در رابطه با مدل‌های عرضه انرژی، به ندرت به مدیریت ریسک‌های موجود در شرایط عدم قطعیت اشاره می‌نمایند لذا یکی دیگر از اهداف مهم، توسعه ابزار مناسب برای مدیریت یکپارچه ریسک در مدل عرضه انرژی و در شرایط عدم قطعیت می‌باشد.

در این راستا مسائل مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از:

❖ بکارگیری روش جدید بر مدلسازی یکپارچه عدم قطعیت در مدل انرژی

❖ توسعه مدل عرضه انرژی ریسک‌گریز با هدف پوشش ریسک ناشی از عدم قطعیت‌ها

در ادامه این مقدمه، مروری بر مبانی مدلسازی سیستم‌های عرضه انرژی ارائه گردیده است، سپس معرفی منابع عدم قطعیت در سیستم عرضه انرژی انجام می‌شود و نهایتاً بر اساس آن، اهداف پژوهشی این تحقیق تشریح می‌گردد. در فصل سوم انواع روش‌های مدلسازی ریسک‌پذیر تشریح می‌شود. فصل چهارم چگونگی توسعه مدل عرضه انرژی برای مدیریت ریسک و مدلسازی توابع ریسک را شرح می‌نماید. فصل پنجم کاربرد مدل انرژی ریسک‌گریز توسعه داده شده را به همراه تحلیل نتایج آن بررسی می‌نماید و نهایتاً در فصل ششم بحث و جمع‌بندی نتایج تحقیق ارائه می‌گردد.

## فصل ۲- عدم قطعیت در سیستم عرضه انرژی

### ۱-۲- مدل سیستم عرضه انرژی

مدلسازی سیستم انرژی ابزاری تحلیلی- ریاضی با هدف بررسی چگونگی رفتار اجزاء سیستم با توجه به اثر پارامترهای درونی و بیرونی آن و سپس پیش‌بینی، شبیه‌سازی و یافتن شرایط بهینه برای طراحی، بهره برداری و تخصیص منابع اقتصادی در بخش انرژی می‌باشد. انواع مدل‌های انرژی هم از لحاظ روش‌شناسی‌های گوناگون توسعه یافته‌اند و هم از حیث موضوع کاربردی‌شان طبقه‌بندی می‌گردند [۱].

سیستم عرضه انرژی ترکیب به هم پیوسته از فناوری‌های مختلف می‌باشد که در سطوح مختلف بخش انرژی (استخراج و استحصال انرژی اولیه، فرآورش، تبدیل، انتقال، توزیع و تولید انرژی مفید) مورد استفاده قرار گرفته و به عنوان بخشی از چرخه اقتصاد- انرژی عمل می‌نماید. در سیستم عرضه انرژی، انتخاب ترکیب بهینه از فناوری‌ها در سطوح مختلف، تابعی از میزان دسترسی به هر یک از منابع انرژی اولیه می‌باشد که نقش عمداتی را در شکل‌گیری زنجیره عرضه انرژی بر عهده دارد. میزان دسترسی به منابع انرژی اولیه در یک مدل عرضه انرژی در ابعاد ملی علاوه بر منابع منطقه‌ای به واردات/ صادرات خارجی و بازارهای بین‌المللی انرژی نیز ارتباط پیدا می‌کند. از سوی دیگر، کیفیت و ویژگی‌های فنی- اقتصادی- زیست محیطی انواع فناوری‌های فراورش، تبدیل و انتقال حامل‌های مختلف انرژی بر توسعه ترکیب مشخص از فناوری‌ها و به کارگیری منابع انرژی اولیه، تاثیر می‌گذارد. لذا ارتباط همزمان و متقابل بین فناوری‌ها و دسترسی به منابع انرژی در ویژگی‌های مدل عرضه انرژی نمود پیدا می‌کند. در میان انواع مختلف مدل‌های سیستم‌های انرژی به دلیل ساختار و قدرت مدلسازی، برخی از آنها از جایگاه برجسته‌تری برخوردارند و روش‌شناسی موجود در آنها به عنوان پایه‌ای برای مدل‌های منطقه‌ای یا مدل‌های کشوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً اینگونه مدل‌ها از طرف سازمان‌ها، ارگان‌های استراتژیک و مراکز تحقیقاتی بین‌المللی پشتیبانی می‌گردند.

یکی از انواع مدل‌های عرضه انرژی، مدل انرژی مارکال<sup>۲</sup> [۲] است. که اولین نسخه آن در سال ۱۹۷۴ و با پشتیبانی سازمان همکاری اقتصادی و توسعه<sup>۳</sup> معرفی شد. در اوایل دهه ۸۰ میلادی مؤسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی<sup>۴</sup> به عنوان یکی از قطب‌های بین‌المللی مطالعات زیربنایی انرژی، نسخه اولیه مدل مسیح<sup>۵</sup> [۳] را ارائه نمود. این مدل یک مدل پویای خطی می‌باشد که تابع تجمعی هزینه عرضه انرژی را با فرض ایده‌آل رقابت کامل کمینه می‌نماید. در این مدل

<sup>2</sup> MARKAL

<sup>3</sup> OECD

<sup>4</sup> IIASA

<sup>5</sup> MESSAGE

ضرایب هزینه و همچنین میزان تقاضا (بدون در نظر گرفتن کشش قیمتی) به صورت برونا وارد می‌شوند. اگر چه رویکرد این مدل پایین به بالا بوده و برای حل تعادل جزئی در سیستم، مشخصات تکنولوژی‌های عرضه را برای بخش‌ها و همچنین نواحی مختلف جغرافیایی لحاظ می‌نموده ولی به مرور زمان با تلفیق همزمان آن با مدل‌هایی چون ماکرو<sup>6</sup> و مید<sup>7</sup> تلاش‌هایی برای محاسبه مسائل اقتصاد-انرژی در چارچوب تعادل عمومی نیز انجام گرفته است. شایان ذکر است که بسیاری از تحقیقات و برنامه‌ریزی‌های مربوط به سیستم‌های انرژی در اروپا در گذشته بر اساس این مدل انجام شده است. در دهه هشتاد میلادی مدل مسیج برای تحلیل توسعه سیستم انرژی در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار گرفت. سپس نسخه‌های منطقه‌ای از این مدل با توجه به رویکرد انتقال بین منطقه‌ای و همچنین لحاظ نمودن رفتار منابع انرژی اولیه خصوصاً نفت و گاز توسعه یافت. بر اساس پایان پذیری این منابع به صورت قیدهایی منطبق بر منحنی مشخصه میادین مدلسازی گردید. علاوه بر این مشخصه، مدل توسعه یافته به یک مدل برنامه‌ریزی پارامتری تبدیل شد که به دلیل کاهش سناریوهای مورد نیاز و تعداد پارامترهای سیستم به افزایش کارایی مدل منجر گردید. این نسخه توسعه یافته، مدل ای‌اس‌ام<sup>8</sup> نام‌گذاری گردید که از آن برای مطالعه سیستم عرضه انرژی در ایران استفاده گردید. مدل ای‌اس‌ام از نوع مدل پایین به بالا و با رویکرد اقتصاد خرد به ارتباط اقتصاد و بخش انرژی پرداخته و در آنها ویژگی‌های فنی و اقتصادی فناوری‌های بخش انرژی بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. بر این اساس نتایج آن به تحلیل تحولات فنی، ساختاری، روند سرمایه‌گذاری‌ها و هزینه‌های مربوط به استفاده و توسعه فناوری‌های انرژی پرداخته و دورنمایی از به کارگیری مناسب فناوری‌ها را نشان می‌دهد. در این مدل که یک مدل قطعی است به دلیل فرض رقابت کامل، بخش‌های مختلف عرضه انرژی قیمت پذیر بوده و دارای قدرت بازار نیستند لذا با درنظر گرفتن آنکه تابع تقاضا دارای کشش درونزای قیمتی نمی‌باشد، کمینه کردن هزینه به عنوان تابع هدف، سیستم عرضه انرژی را بهینه‌سازی می‌کند.

از لحاظ تعریف عمومی، عدم قطعیت عبارت است از عدم وجود اطلاعات کافی نسبت به کیفیت یا کمیت یک متغیر یا پارامتر، که می‌تواند ناشی از عدم دانش کافی نسبت به ماهیت آن موضوع، یا به دلیل ماهیت تصادفی و غیر قطعی آن پدیده باشد. از لحاظ بیان ریاضی عدم قطعیت را می‌توان مفهومی مربوط به تفاوت مقادیر یک کمیت پس از وقوع آن در مقایسه با مقادیر از قبل پیش‌بینی شده درنظر گرفت که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$U = E - A \quad (1)$$

<sup>6</sup> MACRO

<sup>7</sup> MEEDE

<sup>8</sup> ESM

$$E = \text{estimated value of some quantity (measured, predicted, calculated, ... )} \quad (2)$$

$$A = \text{actual value (unknown through or unknown nature)} \quad (3)$$

عدم قطعیت در  $E$  می‌تواند توسط توابع ریاضی مانند تابع توزیع احتمال  $U$  بیان گردد. در بررسی تاثیر عدم قطعیت در مدل‌های انرژی-اقتصاد، تأیید وجود پایداری<sup>۹</sup> و قابلیت اطمینان<sup>۱۰</sup> در نتایج مدلسازی، به عنوان فاکتورهای مهم برای سیاستگذاران و تصمیم‌گیران مطرح می‌باشد. بر اساس تحقیق پورتنی و همکاران [۴] برای مدل‌هایی که به تولید دورنمای آینده و ضعیت سیستم‌ها از طریق محاسبه مقادیر تنزیل یافته متغیرها می‌پردازند، نتایج مدل به طور محسوسی به عدم قطعیت پارامترهای ورودی به مدل وابسته می‌شود. در مدل‌های عرضه قطعی پارامترهای برونزای مدل به صورت روندهایی از قبل پیش‌بینی شده در مدل اعمال می‌گرددند و نتایج و تصمیم‌گیری‌های مدل نیز متعاقباً در فضایی قطعی بدست می‌آیند. اما زمانی که پارامترهای ورودی به سیستم دارای عدم قطعیت باشند، نتایج مدل انرژی قطعی به صورت مستقیم قادر به انعکاس اثر عدم قطعیت‌های ورودی به سیستم نمی‌باشد و با توجه به هزینه و جریان مالی قابل توجه در سیستم‌ها، فناوری‌های انرژی و همچنین بازگشت ناپذیر بودن سرمایه‌گذاری در بخش‌های انرژی (مانند پالایشگاه، نیروگاه، خطوط انتقال و توزیع) نتایج حاصل با ریسک قابل توجهی همراه بوده و از پایداری و قابلیت اطمینان برخوردار نخواهد بود[۵]. پیش از استفاده و توسعه روش‌هایی برای پوشش عدم قطعیت در مدل انرژی لازم است تا ابتدا پارامترها و منابع این عدم قطعیت‌ها شناسایی و معرفی گرددند.

## ۲-۲- منابع عدم قطعیت در مدل عرضه انرژی

منابع عدم قطعیت در یک سیستم انرژی می‌توانند به صورت پارامتریک<sup>۱۱</sup> یا ذاتی<sup>۱۲</sup> در سیستم وجود داشته باشند[۶]. عدم قطعیت‌های پارامتریک به ماهیت اطلاعات و دانش علمی نسبت به سازوکار و ارتباط بین اجزای سیستم‌ها مربوط می‌گردد که با سپری شدن زمان و به واسطه فرایند یادگیری<sup>۱۳</sup> تاثیر آن‌ها کاهش یافته و برای مدل‌های انرژی که در افق زمانی بلند مدت به کار برده می‌شوند لحاظ نمی‌گرددند[۷]. عدم قطعیت‌های ذاتی به واسطه تغییرات طبیعی و غیرقابل پیش‌بینی پارامترها به وجود آمده و حضور آن‌ها طی زمان پا بر جا می‌باشد. این گونه عدم قطعیت‌ها مبنای اصلی بررسی و

9 Robustness

10 Reliability

11 Parametric uncertainty

12 Natural Variability

13 Learning

مدلسازی قرار می‌گیرند. با توجه به میزان اهمیت عدم قطعیت‌های ذاتی، برای تحلیل نقش آن‌ها در سیستم انرژی، موارد زیر قابل توجه می‌باشند:

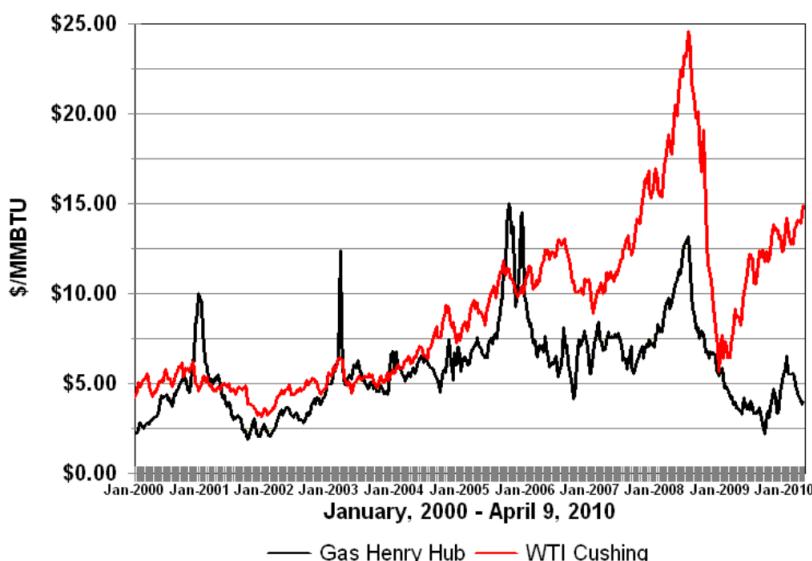
- میزان تأثیر تغییر در مقدار این پارامترها بر روی نتایج خروجی مدل.
- درجه تغییرپذیری و عدم قطعیت مقادیر این پارامترها.
- میزان ناشناخته بودن مقادیر و رفتار این پارامترها.

مهمازین منابع عدم قطعیت در مدل عرضه انرژی به شرح ذیل معرفی می‌گردند.

## ۲-۱-۲ - عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی

قیمت حامل‌های انرژی به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار بیرونی در حوزه سیستم‌های انرژی است که نتایج برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این میان تغییرات قیمت نفت خام تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قیمت سایر حامل‌ها به جای خواهد گذاشت [۸].

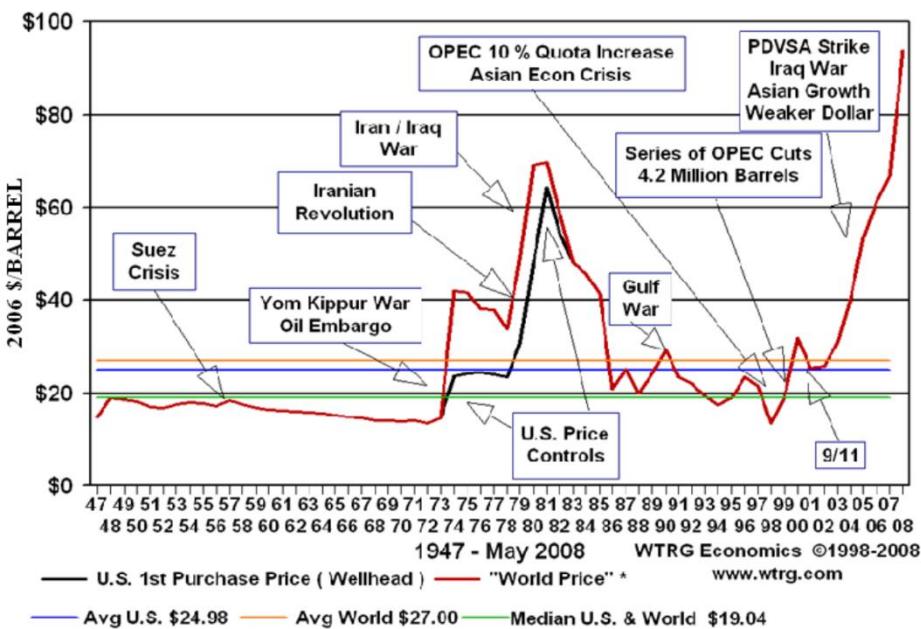
عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی را می‌توان هم در دوره‌های بلندمدت [۹] و هم در دوره‌های زمانی کوتاه مدت [۱۰] مورد توجه قرار داد. شکل ۲-۱ نمونه‌ای از تغییرات و نوسانات کوتاه مدت قیمت نفت و گاز طبیعی را بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد.



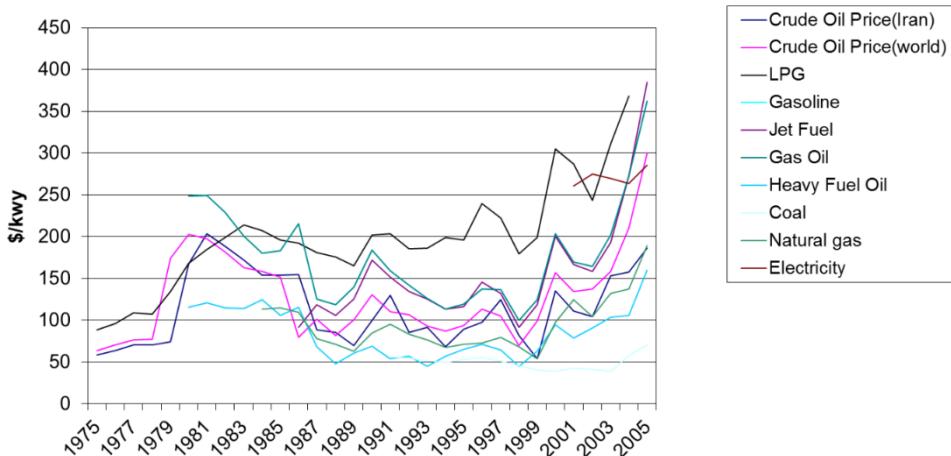
شکل ۱-۲: تغییرات کوتاه مدت قیمت نفت خام و گاز طبیعی (بازارهای wti و Henry hub)

شکل ۲-۲ روند تغییرات بلندمدت نفت خام را از سال ۱۹۴۷ تا سال ۲۰۰۸ نمایش می‌دهد. مطالعه روندهای کوتاه مدت قیمت حامل‌های انرژی در راستای سیاست‌گذاری‌های بهینه بهره‌برداری در کوتاه مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد

و در مقابل مطالعه روندهای بلند مدت علاوه بر سیاست‌های بهره‌برداری، منجر به تصمیم‌سازی استراتژیک برای توسعه بهینه سیستم عرضه انرژی و انتخاب ترکیب بهینه حامل‌ها و فناوری‌های مرتبط می‌گردد.



شکل ۲-۲: روند بلند مدت تغییرات قیمت نفت خام از سال ۱۹۴۷ تا ۲۰۰۸

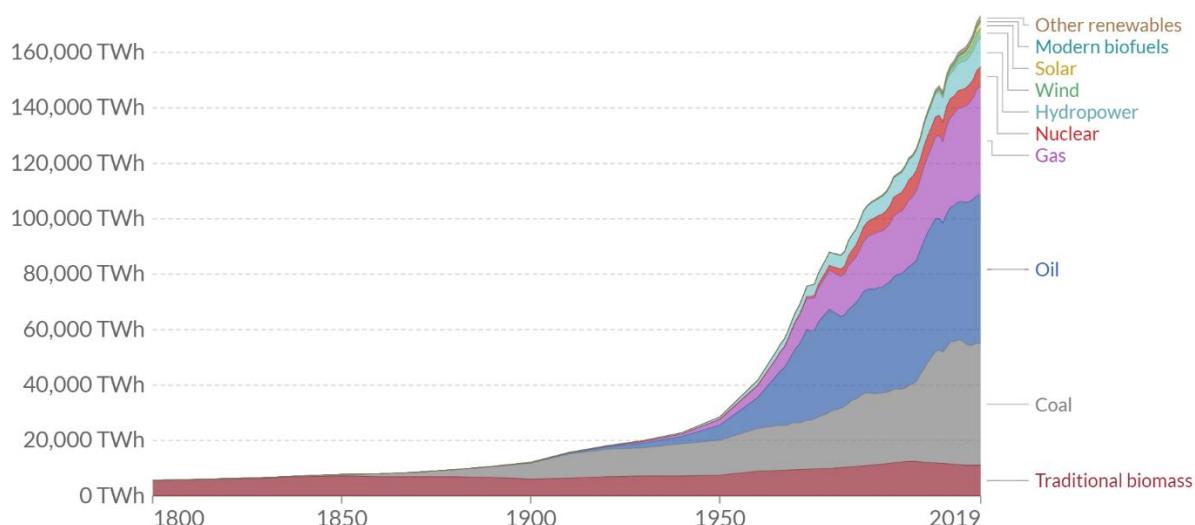


شکل ۳-۳: روند بلند مدت قیمت حامل‌های انرژی در سطح بین‌المللی

شکل ۳-۲ روند بلندمدت قیمت حامل‌های انرژی در سطح بین‌المللی و نسبت معنی‌دار آن با تغییرات قیمت نفت خام را با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مراجع رسمی نشان می‌دهد. همچنین عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی در ضرایب هزینه‌ای تابع هدف مدل عرضه انرژی منعکس می‌گردد.

## ۴-۲-۲- عدم قطعیت در تقاضای انرژی

تقاضای انرژی به عنوان یکی از پارامترهای بروزنزای مدل عرضه انرژی مطرح می‌باشد. مطالعات انجام شده توسط جونز و هانت [۱۱] نشان می‌دهند که تقاضای انرژی دارای عدم قطعیت بوده و عوامل اصلی که بر تغییرات آن مؤثر می‌باشند شامل شاخص‌های اقتصادی کلان از جمله نرخ رشد اقتصادی، دسترسی به منابع انرژی، تغییرات فنی و اقتصادی فناوری‌ها، تغییرات آب و هوایی، ملاحظات محیط زیست و شرایط سیاسی می‌باشند. علاوه بر این مواردی چون ساختار بازار و قیمت‌های انرژی، مصرف حامل‌های انرژی غیر تجاری و توزیع درآمدی آحاد جامعه بر تقاضای انرژی تأثیر می‌گذارند. در این رابطه، ظرفیت سیستم عرضه انرژی بر اساس برواردن از میزان تقاضای انرژی شکل گرفته و روند توسعه آن با توجه به انتظارات میزان تقاضا در زمان آینده تحقق می‌یابد. زمانی که میزان تقاضای انرژی در آینده دارای عدم قطعیت باشد، توسعه و بهره‌برداری از سیستم عرضه انرژی برای تامین تقاضای غیرقطعی با چالش مواجه می‌گردد. از این حیث عدم قطعیت در تقاضای انرژی، با قابلیت اطمینان سیستم عرضه انرژی و همچنین مقوله امنیت عرضه انرژی مرتبط می‌گردد. در ایران تأثیر همزمان مسائلی چون رشد اقتصادی و چگونگی توسعه بنگاه‌ها و شدت بالای مصرف انرژی، سیاست‌های اقتصادی کلان در زمینه مصرف مانند اعطای یارانه‌ها و یا تزریق نقدینگی به جامعه، عدم بهره‌برداری به موقع از پژوهه‌هایی مانند استحصال، انتقال و ذخیره‌سازی گاز طبیعی، نیاز بیشتر به تزریق گاز به میادین نفتی، سیاست‌های ناهمگون در سرمایه‌گذاری و توسعه بخش‌های سیستم انرژی، شرایط مقطعی در تحولات جوی و نزولات آسمانی همراه با تأثیرات غیر مستقیم عوامل بین‌المللی مانند تحریم، باعث می‌گردند تا تقاضای انرژی در بعد ملی کشور با عدم قطعیت همراه بوده و از این حیث سیاست‌گذاری و عملکرد بخش عرضه انرژی برای پوشش آن با تنگنا و چالش جدی مواجه گردد. عدم قطعیت تقاضای انرژی در ضرایب سمت راست قبود و محدودیت‌های مدل عرضه انرژی ظاهر می‌شوند.



شکل ۴-۲: روند تغییرات تقاضای حامل انرژی در جهان

### ۴-۲-۳- عدم قطعیت در توسعه فناوری‌های انرژی

فناوری‌های سیستم انرژی شامل فناوری‌های اکتشاف، استخراج، فراورش، تبدیل، انتقال، توزیع و مصرف انرژی همواره در حال پیشرفت و تحول می‌باشند. این تغییرات هم از بعد فنی، شامل افزایش راندمان و بهره‌وری و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی و هم از بعد اقتصادی با تغییر در هزینه تکنولوژی‌های جدید و قدیمی ضمن ایجاد پتانسیل‌های جدید برای استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، باعث می‌گرددند تا سبد عرضه و تقاضای انرژی با جهت‌گیری‌های جدید مواجه گردد. بر اساس توابع توابع یادگیری، با گذشت زمان، هزینه سرمایه‌گذاری و استفاده از فناوری‌ها خصوصاً فناوری‌های نوین کاهش می‌یابد.

مرور بر ادبیات انجام شده در رابطه با تغییرات ویژگی‌های فناوری‌ها و هزینه اقتصادی آنها توسط کلارسن و همکاران [۱۲] نشان می‌دهد که ویژگی‌های فناوری و توابع غیرخطی یادگیری دارای عدم قطعیت بوده و استفاده درونزا از آنها در مدل‌های انرژی بزرگ مقیاس که عمدتاً از روش برنامه‌ریزی ریاضی خطی استفاده می‌کنند، از لحاظ محاسباتی مقرن به صرفه نمی‌باشد. اگرچه برای درونزا نمودن این منحنی‌ها در مدل‌های انرژی تلاش‌هایی صورت گرفته ولی تاکنون پوشش‌دهی عدم قطعیت تکنولوژی‌ها غالباً با استفاده از سناریوسازی برونوza و حل مدل‌های قطعی به ازای هریک از این سناریوها صورت گرفته است.

عدم قطعیت‌های مربوط به توسعه و تحولات فناوری‌های انرژی هم می‌توانند در ضرایب تابع هدف مدل عرضه انرژی وجود داشته باشند و هم با اثرگذاری بر راندمان در ضرایب قیود مدل نمایش داده شوند.

### ۴-۲-۴- عدم قطعیت در منابع و ذخایر انرژی

منابع انرژی بعنوان نقطه آغاز جریان انرژی در سیستم عرضه انرژی مطرح بوده و مدلسازی آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در مدل عرضه انرژی، رفتار مشخصات منابع انرژی توسط منحنی عملکرد منابع، مدلسازی می‌گردد. برای ساده‌سازی این مدلسازی از خطی‌سازی منحنی عملکرد واقعی در طول دوره استحصال و بهره‌برداری استفاده شده است. نحوه مدلسازی منحنی عملکرد و تخمین ظرفیت و رفتار منبع وابسته به اطلاعات فیزیکی می‌باشد که حاصل اندازه‌گیری بوده و همواره دارای عدم قطعیت و درصد خطأ می‌باشند. گوئل و همکاران [۱۲] به بررسی برنامه‌ریزی برای سرمایه‌گذاری اکتشاف و استخراج مجموعه‌ای از میادین گازی پرداختند که در آن مقدار گاز قابل استخراج از مخزن دارای عدم قطعیت می‌باشد.

عدم قطعیت منابع انرژی از جهتی دیگر نیز قابل بررسی می باشد که همان ظهور منابع جدید را دربرمی گیرد. این مورد را می توان در ظهور مجموعه فناوری های فتوولتاییک [۱۳] کشف منابع نفت و گازرسی و توجیه پذیری فرایند استخراج آنها و یا میزان دسترسی به منابع انرژی های تجدیدپذیر مانند میزان تابش خورشید برای انرژی خورشیدی، میزان ورش باد در انرژی باد و میزان بارش در انرژی های آبی مشاهده نمود. عدم قطعیت های مربوط به منابع انرژی هم می توانند در ضرایب هزینه ای و قیمتی تابع هدف مدل عرضه انرژی و هم در ضرایب ظرفیتی مربوط به استحصال از منابع در قیدهای مدل وجود داشته باشند.

## ۲-۵- عدم قطعیت در پارامترهای زیست محیطی

با افزایش روزافزون جمعیت، مصرف حامل های انرژی و سوخت های فسیلی و همچنین توسعه بکارگیری از فناوری های مختلف، تخریب محیط زیست شتاب فراوانی گرفته است. از اینرو مقوله محیط زیست بعنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار مورد توجه قرار می گیرد. در این راستا مطالعات متعددی جهت کاهش تخریب و نشر آلاینده های زیست محیطی در ارتباط با مدلسازی سیستم های انرژی صورت گرفته است. اعمال مالیات بر نشر آلاینده های زیست محیطی و درنظر گرفتن هزینه های اجتماعی / خارجی<sup>۱۴</sup> یکی از راه های مقابله و کنترل اثرات زیست محیطی می باشد.

نوبل و همکاران [۱۴] اثرات استفاده از هزینه های خارجی نشر آلاینده های زیست محیطی در شرایط عدم قطعیت را مطالعه نمودند. نتایج پژوهش ایشان استفاده از سناریوهای قیمتی در شرایط عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی را بطور نسبی مناسب تر از روش خرید و فروش اعتبار کربن شناسایی می نماید. مقادیر این پارامترها به عنوان ضرایب هزینه ای تابع هدف مدل انرژی قابل مدلسازی بوده و به عنوان پنالتی نشر آلاینده ها مطرح می باشید. در مطالعات یانگ و همکاران [۱۵] بررسی عدم قطعیت نشر کرben، تأثیر آن بر جهت گیری سرمایه گذاری ها در بخش تولید برق بررسی گردید و نتیجه گرفته شد که هر چه سیاست های دولتی در زمینه قیمت کرben بلند مدت تر باشد، ریسک کمتری در سرمایه گذاری ها را به دنبال خواهد داشت. بر این اساس اهداف زیست محیطی علاوه بر قیمت گذاری بر نشر آلاینده ها، از طریق اعمال محدودیت های نشر در قیود مدل نیز قابل پوشش می باشد. استفاده از فناوری های پاک و انرژی های تجدیدپذیر یکی دیگر از مهمترین اقدامات برای کاهش آلاینده های زیست محیطی در بخش انرژی می باشد.

<sup>14</sup> Social/ external cost

## ۶-۲-۲- سایر عدم قطعیت‌ها

علاوه بر منابع عدم قطعیت ذکر شده در بالا که همگی دارای ویژگی کمیت‌پذیری و قابل اندازه‌گیری می‌باشند، برخی دیگر از منابع عدم قطعیت دارای ماهیت کیفی بوده و بیان کمی آنها به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشند. عدم قطعیت‌های قابل اندازه‌گیری می‌توانند توسط مقادیر ریاضی بطور مستقیم در پارامترهای مدل انرژی مدلسازی گردند ولی عدم قطعیت‌های غیر قابل اندازه‌گیری مانند عدم قطعیت‌های مسائل سیاسی، ژئوپلیتیک یا جنگ‌ها بطور مستقیم در پارامترهای مدل قابل کمیت‌پذیری نبوده و عموماً از طریق اثرات آنها بر دیگر پارامترهای مدل و به وسیله روش سناریوسازی لحاظ می‌گردد.

## ۳-۲- اهداف کلی پژوهش

با عنایت به مرور بر ادبیات مبانی مدل عرضه انرژی و همچنین بررسی و معرفی منابع عدم قطعیت در سیستم عرضه انرژی، به منظور توسعه کاربرد مدل عرضه انرژی قطعی موجود و پوشش به هم پیوسته عدم قطعیت‌ها در آن و همچنین امکان مدیریت ریسک ناشی از وجود عدم قطعیت‌ها در نتایج مدل برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری عرضه انرژی، اهداف پژوهشی این تحقیق شامل موارد زیر است:

(۱) مدلسازی یکپارچه منابع عدم  $\Sigma$  عیت برای ورود به مدل عرضه انرژی

(۲) توسعه مدل عرضه انرژی در شرایط عدم قطعیت.

(۳) مدلسازی توابع ریسک در مدل عرضه انرژی در شرایط عدم قطعیت و توسعه مدل ریسک‌گریز.

در این راستا مباحث زیر مورد توجه قرار می‌گیرند:

(۱) چگونگی مدلسازی به هم پیوسته منابع عدم قطعیت در مدل عرضه انرژی.

(۲) ارزیابی و اعتباربخشی نتایج مدل انرژی توسعه یافته در مقایسه با نتایج مدل قطعی در مواجهه با عدم قطعیت‌ها، شامل زمان‌بندی بهینه و چگونگی توسعه بهینه فناوری‌های انرژی، سرمایه‌گذاری‌های مرتبط و ترکیب بهینه عرضه حامل‌های انرژی در شرایط عدم قطعیت.

(۳) چگونگی توسعه مدل عرضه انرژی برای پوشش و مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت‌ها در سیستم عرضه انرژی.

(۴) ارزیابی و اعتباربخشی نتایج مدل عرضه انرژی با رویکرد اجتناب از ریسک

## فصل ۳- انواع روش‌های مدلسازی ریسک‌پذیر

در راستای شناسایی ماهیت عدم قطعیت‌ها در سیستم انرژی، موس و اشنایدر<sup>[۱۶]</sup> موارد ذیل را به عنوان منشأ عدم

قطعیت‌ها جمع‌بندی کردند:

- نقصان اطلاعات در دسترس یا عدم طبقه‌بندی مناسب اطلاعات.
- عدم وجود دانش کافی نسبت به مسائل و در روابط علی معلولی در آنها.
- کیفی و توصیفی بودن مسائلی که کمی کردن و مدل کردن آنها به راحتی امکان پذیر نیست.
- خاصیت تصادفی بودن پدیده‌ها.

برای درنظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و پوشش اثرات آنها روش‌های متفاوتی قابل استفاده می‌باشند که در ادامه به تشریح آن‌ها می‌پردازیم.

### ۱-۳- روش تحلیل حساسیت<sup>۱۵</sup>

کان<sup>[۱۷]</sup> روش تحلیل حساسیت را به عنوان ابتدایی‌ترین روش در برخورد با عدم قطعیت‌ها در مسائل تصمیم‌گیری، معرفی می‌کند که در آن میزان حساسیت متغیرهای خروجی مدل نسبت به تغییرات در متغیرهای ورودی نمایان می‌گردد و معمولاً در جهت شناسایی پارامترهایی که عدم قطعیت آنها بیشترین تأثیر را در نتایج مدل به جا می‌گذارد، استفاده می‌گردد. بر این اساس، تحلیل حساسیت از طریق تغییر مقدار پارامترهای قطعی و ثابت نگه داشتن مقادیر بقیه پارامترها بدست می‌آید. در این صورت اگر حالات قابل وقوع همراه با توزیع احتمالی باشد این تحلیل حساسیت منجر به تشکیل مجموعه‌ای از خروجی‌های محتمل همراه با امیدهای ریاضی و واریانس توزیع می‌گردد. در کنار مزیت‌های روش تحلیل حساسیت، از جمله سهولت کاربرد آن، فری و همکاران<sup>[۱۸]</sup> برخی از کمبودهای این روش را به صورت زیر بیان می‌کنند:

- ❖ در صورت غیر خطی بودن رفتار سیستم مورد بررسی، مجموعه حالات متغیرهای خروجی به ازای مجموعه حالات درنظر گرفته شده برای متغیرهای ورودی، می‌تواند تحلیل ناکافی از رفتار سیستم را نمایان سازد.
- ❖ در صورت تحلیل حساسیت اثرات بیش از یک منبع عدم قطعیت، امکان تفکیک نتایج و تحلیل اثر جدایانه هر یک از عدم قطعیت‌ها دشوار می‌باشد.
- ❖ استفاده از روش تحلیل حساسیت بیشتر کاربردی موضعی داشته و به ندرت می‌توان روندهای بلندمدت را توسط این روش بررسی نمود.

<sup>۱۵</sup> Sensitivity Analysis

## ۲-۳- روش سناریوسازی<sup>۱۶</sup>

سناریوسازی روشی جامع‌تر از تحلیل حساسیت می‌باشد که در آن به جای درنظرگرفتن یک نوع عدم قطعیت می‌توان از چند عدم قطعیت همزمان<sup>۱۷</sup> استفاده نمود<sup>[۱۹]</sup>. سناریوسازی به عنوان روشی کلاسیک دربرخورد با عدم قطعیت‌ها مطرح بوده و استفاده از آن به صورت تعیین پذیر و برونزآ از کاربرد زیادی در مسائل و مدل‌های تصمیم‌گیری برخوردار می‌باشد. از لحاظ تاریخی سناریوسازی برای اولین بار در قرن نوزدهم و برای مسائل نظامی مورد استفاده قرار گرفت، ولی اولین کاربرد آن در حوزه انرژی به بحران نفتی سال ۱۹۷۳ برمی‌گردد که در آن کمپانی شل با استفاده از این ابزار به تدوین استراتژی مناسب برای کنترل ریسک ایجاد شده در بازار انرژی پرداخت. بر اساس تعریف لغت‌نامه آکسفورد، سناریو عبارت است از مجموعه‌ای از حالات قابل وقوع برای آینده. بیش‌آپ [۲۰] در مروی بر روش‌های سناریوسازی بیان می‌دارد که امروزه بر اساس کاربرد، تعاریف متفاوتی از سناریوسازی مطرح می‌باشد. بنا بر تعریف برومی [۲۱] در راستای توسعه استراتژی‌های پایدار سیستم، سناریوسازی عبارت است از درنظرگرفتن حالات امکان پذیر و قابل وقوع آتی برای یک سیستم غیرقطعی به منظور بسط شناخت نسبت به آینده آن. همچنین باید توجه داشت که سناریوسازی به معنای پیش‌بینی رفتار مدل در آینده نیست بلکه ابزاری برای تحلیل رفتار سیستم در آینده خواهد بود. کریشان مزیت‌های [۲۲] استفاده از روش سناریوسازی را به صورت زیر جمع‌بندی می‌نماید:

سناریوسازی امکان مشاهده دورنمایهای جایگزین<sup>۱۸</sup> از رفتار سیستم را فراهم کرده و به عنوان ابزاری برای

تصمیم‌گیری استراتژیک قابل استفاده می‌باشد.

سناریوسازی به بررسی تأثیر هر یک از این مسیرهای ممکن بر رفتار سیستم و درک بهتر عدم قطعیت‌های تعیین کننده در سیستم کمک می‌کند.

با استفاده از سناریوهای مطلوب مبتنی بر متغیرهای قابل کنترل می‌توان سیستم را به سمت نقاط هدف هدایت نمود.

سناریوسازی در برخی موارد، قابلیت اتخاذ تصمیم‌های مانع انعطاف‌پذیر برای سیستم‌هایی که دارای رفتار غیرقابل کنترل می‌باشند را فراهم می‌سازد.

کاه [۲۳] در راستای مبحث سناریوسازی در حوزه انرژی، مراحل اجرای روش‌شناسی سناریوسازی را به شرح ذیل ارائه می‌دهد:

<sup>۱۶</sup> Scenario Making

<sup>۱۷</sup> Joint sensitivity analysis

<sup>۱۸</sup> Alternative perspectives

- ۱) تعیین سؤال اساسی و موضوع مرکزی مورد توجه در راب ۵ با رفتار سیستم<sup>۱۹</sup>
  - ۲) شناسایی فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر موضوع هدف شامل پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل درونی و بیرونی که از تحلیل حساسیت در بخش قبل حاصل میگردد<sup>۲۰</sup>
  - ۳) شناسایی پارامترهای اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و تکنولوژیکی اثرگذار بر فاکتورهای اصلی<sup>۲۱</sup>
  - ۴) شناسایی آن دسته از پارامترهای محیطی که دارای بالاترین درجه عدم قطعیت بوده و بیشترین تأثیر را در رفتار سیستم دارند که از تحلیل حساسیت سیستم بدست می آید<sup>۲۲</sup>
  - ۵) تبیین حالات و سناریوهای جایگزین<sup>۲۳</sup> که منطقاً از میان عدم قطعیتهای موجود قابل وقوع هستند<sup>۲۴</sup>.
  - ۶) محدودسازی تعداد سناریوهای جایگزین و توسعه ۳ یا ۴ سناریو اصلی<sup>۲۵</sup>
  - ۷) بررسی سازگاری سناریوها با فروض در نظر گرفته شده و آزمون معقول بودن دینامیزم سناریوها<sup>۲۶</sup>
  - ۸) غربال سازی و ارزیابی خط مشی های حاکم بر مسئله بر اساس سناریوهای تبیین شده<sup>۲۷</sup>
- در حوزه مدلسازی انرژی، لولو و توستائو [۲۴] سناریوسازی را شامل مراحل زیر بیان می کنند:

- شناسایی و ارزیابی سیستم انرژی<sup>۲۸</sup>
- بیان رفتار سیستم انرژی توسط یک مدل انرژی
- شناسایی و انتخاب پارامترهای برون زای (قابل کنترل و غیرقابل کنترل) سیستم
- انتخاب ترکیب حالات مؤثر
- گردآوری سناریوهای اکتشافی<sup>۲۹</sup>
- گردآوری سناریوهای سیاستگذاری<sup>۳۰</sup>

<sup>19</sup> Focal issue

<sup>20</sup> Key factors

<sup>21</sup> Environmental factors

<sup>22</sup> Critical uncertainties

<sup>23</sup> Alternative paths

<sup>24</sup> Scenario logics

<sup>25</sup> Scenario development

<sup>26</sup> Testing scenarios

<sup>27</sup> Policy screening

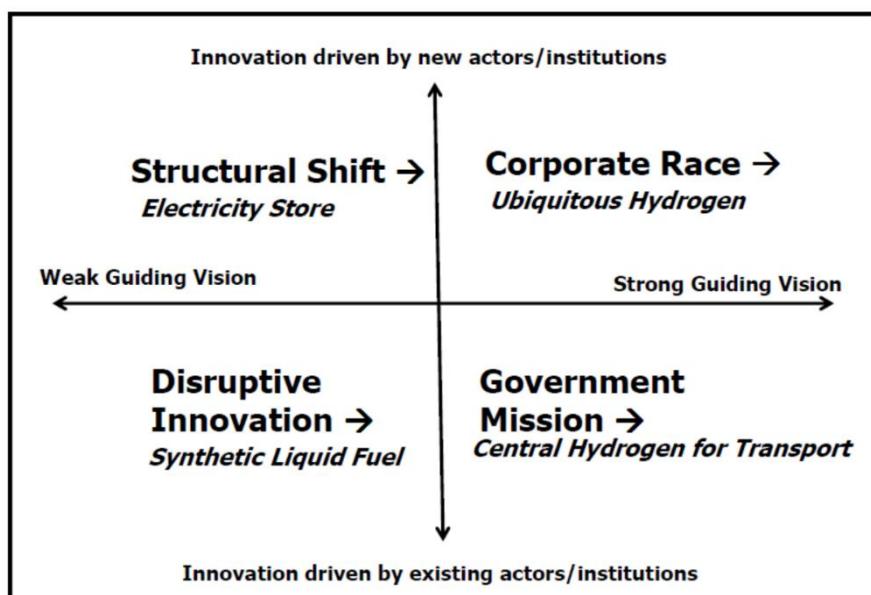
<sup>28</sup> Identification & Quantification

<sup>29</sup> Exploratory scenarios

<sup>30</sup> Policy scenarios

در رابطه با کاربرد سناریوسازی در مدل‌های انرژی، سازمان محافظت از محیط زیست آمریکا (EPA) در سال ۲۰۰۶ با استفاده از مدل MARKAL به بررسی تأثیرات عدم قطعیت موجود در فناوری‌های سیستم عرضه انرژی و قیمت حامل‌های انرژی مورد استفاده در آنها بر روی انتشار آلودگی‌های محیط‌زیستی پرداخت. در این پژوهش عدم قطعیت‌های ورودی به مدل توسط سناریوهایی تصادفی انتخاب و نتایج اجرای مدل برای هریک از آنها بدست می‌آید. سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونتکارلوی نحوه اثرگذاری هر یک بر روی نتایج مدل و میزان انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی ارزیابی گردید. در این مطالعه تأثیر همزمان عدم قطعیت‌ها مشاهده نمی‌شود.

بالتا و همکاران [۲۵] با استفاده از مدل MARKAL به بررسی توسعه و نفوذ حامل انرژی هیدروژن و فناوری‌های مرتبط در کشور انگلستان در افق زمانی ۲۰۵۰ میلادی پرداختند. در آن پژوهش از روش سناریوسازی برای ترسیم مسیرهای محتمل برای استفاده از هیدروژن استفاده شده است. این سناریوها مطابق با شکل ۳-۱ بر اساس دو محور اصلی شامل پیشرفت‌های از قبل برنامه‌ریزی شده و پیشرفت‌های مبتنی بر نوع‌آوری‌های جدید تدوین گردیده‌اند.

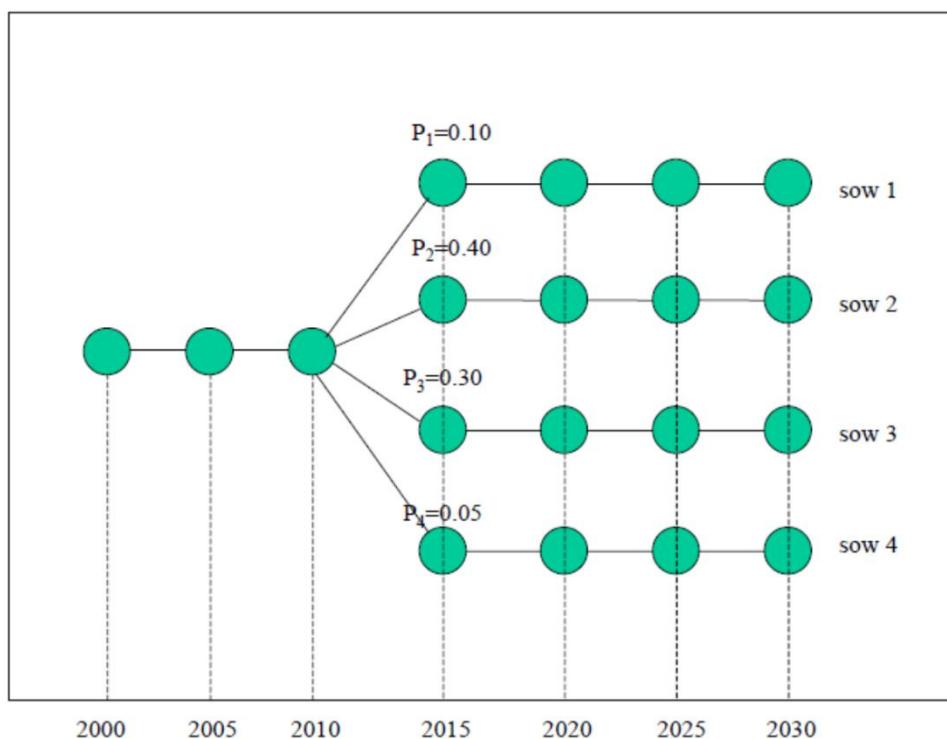


شکل ۱-۳: مدل مفهومی استفاده شده برای سناریوسازی در مدل MARKAL

همچنین در آن تحقیق هزینه فناوری‌های انرژی و حامل‌های انرژی دارای عدم قطعیت می‌باشد و این عدم قطعیت‌ها توسط آنالیز حساسیت، مدلسازی می‌گردند. پس از اجرای مدل به ازای سناریوهای مختلف و آنالیز حساسیت بر روی منابع عدم قطعیت، چگونگی توسعه فناوری‌های مربوط به هیدروژن برای پوشش تقاضای انرژی و همچنین پوشش دادن حدود مورد نظر برای تولید انتشار گازهای آلاینده محیط زیست بدست می‌آید، ولی با توجه به روش اتخاذ شده تأثیر توأم و همزمان، عدم قطعیت‌ها بررسی نگردیده است.

یکی دیگر از کاستی‌ها مهم روش سناریوسازی، عدم پوشش همزمان سناریوهای همراه با توزیع احتمالی می‌باشد.

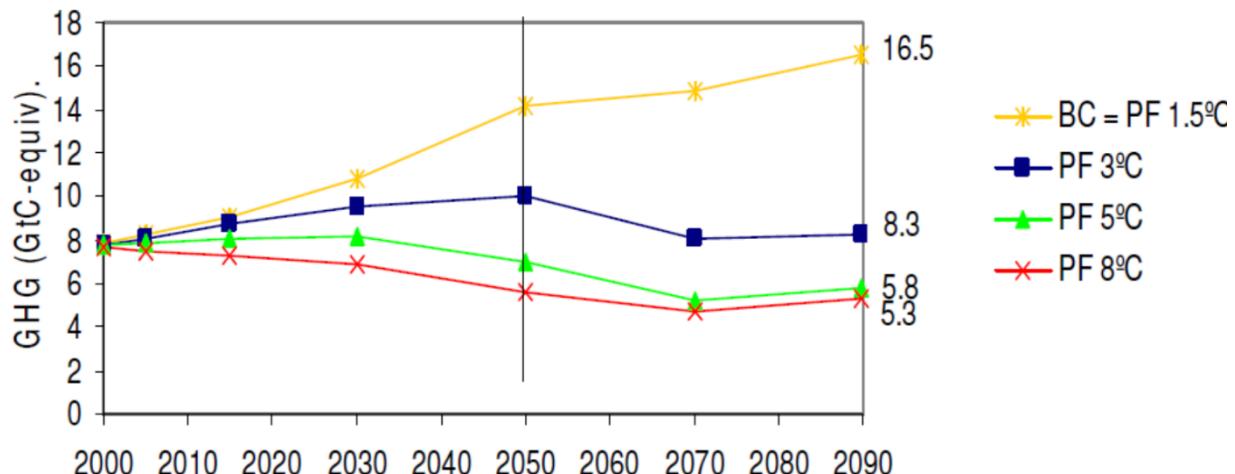
مطابق با مطالب ارائه شده توسط لابریه و همکاران [۲۶] و با استفاده از مدل‌های انرژی با هدف سیاست‌گذاری، زمانی که مدل انرژی به ازای سناریوهای مجرزا اجرا می‌گردد، به تعداد سناریوها، نتایج متفاوت حاصل می‌آید، ولی هریک از این نتایج که به عنوان یک برنامه سیاستی مطرح می‌باشد، صرفاً انعکاس یک حالت قابل وقوع برای سیستم را دربرمی‌گیرد. حال آنکه سیاست بهینه می‌بایست از حداقل پایداری نسبت به عدم قطعیت‌ها برخوردار باشد. برای این منظور استفاده از روش سناریوسازی به تنها یکی کفایت نکرده و پوشش همزمان عدم قطعیت‌ها لازم می‌گردد. نتایج پژوهش فوق برای زمانی که قید تغییرات دمای تعادلی سطح دریاهای (CS) که یکی از دو شاخص اصلی پایش وضعیت آب و هوایی کره زمین می‌باشد به عنوان یکی از اهداف توسعه سیستم انرژی مد نظر قرار می‌گیرد. مطابق با شکل ۲-۳، عدم قطعیت موجود در متغیر (CS) می‌تواند به صورت سناریوهای بروزنزای احتمالی بیان گردد. تغییرات آب و هوایی در اثر اعمال سیاست‌های انرژی در زمان حال، حداقل بعد از یک دهه ظهور می‌نمایند. براین اساس با فرض آنکه سال ۲۰۰۰ میلادی سال پایه باشد، چندشاخگی سناریوها در این شکل از سال ۲۰۱۵ آغاز می‌گردد.



شکل ۲-۳: سناریوهای بروزنزای تدوین شده برای شاخص محیط‌زیستی CS

نتایج مدل انرژی TIMES-TIAM برای سناریوهای مجرزا فوق، مسیرهای فوقی متفاوتی از توسعه سیستم را نمایش می‌دهد که هر یک به تنها یکی، دارای پایداری نسبت به تمامی طیف عدم قطعیت‌ها نبوده و می‌تواند منجر به ارائه مسیرهای نادقيق و بعضاً غیرواقعی از تحول متغیرهای سیستم گردد (شکل ۲-۳). لذا مجموعه کاستی‌های روشن سناریوسازی بروزنزا

نیاز به توسعه روش‌هایی برای پوشش همزمان عدم قطعیت‌ها و استفاده از درختواره‌های سناریویی<sup>۳۱</sup> احتمالی برای مدلسازی تصادفی درون‌زا را بیان می‌نماید.



شکل ۳-۳: نتایج اجرای مدل Times-Tiam برای تک تک سناریوها

در این رابطه مطالعه گلدنشتاین [۲۷] درباره کاربرد مدل انرژی MARKAL همراه با سناریوهای تدوین شده برای عدم قطعیت‌ها بیان می‌دارد که استفاده از سناریوهای مجزا، رویکرد واحدی از آینده سیستم را ایجاد نکرده و استفاده از ابزارهایی مانند برنامه‌ریزی تصادفی برای پوشش همزمان عدم قطعیت‌ها ضروری است.

### ۳-۳-۳- عدم قطعیت‌های تصادفی

مطالعات و تحقیقات لیندلی [۲۸] در رابطه با عدم قطعیت در پدیده‌های حقیقی نشان می‌دهند که استفاده از احتمالات بهترین روش برای بیان عدم قطعیت می‌باشد. بر این اساس، ریاضیات آمار و احتمالات به تحلیل چگونگی وقوع این پدیده‌ها می‌پردازد.

#### ۱-۳-۳- متغیرهای تصادفی

متغیر تصادفی به متغیری گفته می‌شود که مقدار آن براساس شанс و اتفاق تعیین می‌گردد. بنابراین یک متغیر تصادفی دارای مقدار مشخصی نبوده بلکه مجموعه‌ای از مقادیر ممکن را به خود اختصاص می‌دهد. تحلیل متغیرهای تصادفی از طریق ایجاد نمونه‌های تصادفی و سپس دریافت استنباطی از پارامترهای جامعه آن متغیر تصادفی، حاصل می‌گردد. پس از تعیین نوع توزیع احتمالی، مقادیر پارامترهای آن متغیر به عنوان "آماره" (مانند میانگین و واریانس) و به کمک نمونه تصادفی محاسبه گردد. سپس با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری آماری، که به کمک آن از نمونه منتخب

<sup>31</sup> Scenario trees

جامعه، استنباطهایی در مورد پارامترهای جامعه بدست می‌آید، تخمینی از توزیع احتمالی و دیگر پارامترهای آماری این متغیر نتیجه می‌گردد. تحقیقات متعددی با استفاده از این رویکرد در حوزه انرژی انجام شده است. (باتل [۲۹]، بیوگین [۳۰]) اما نقطه اشتراک این تحقیقات در مدلسازی عدم قطعیت‌های تصادفی آن است که فرایندهای اتخاذ شده به صورت یک ماجول کاملاً مستقل بوده و امکان درونی‌سازی شدن آن به صورت یکپارچه در مدل انرژی مقدور نمی‌باشد.

### ۲-۳-۳ - فرایندهای تصادفی

در نظریه احتمالات، فرایندهای تصادفی<sup>۳۲</sup> به عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی معرفی می‌گردد. فرایند تصادفی تحولات یک متغیر تصادفی در زمان‌های مختلف یا مکان‌های مختلف را نشان می‌دهد و برپایه سه خاصیت استوار می‌باشد:

۱- فضای حالت ۲- فضای پارامترها و ۳- ارتباط بین متغیرهای تصادفی. برخلاف فرایندهای قطعی<sup>۳۳</sup> در یک فرایند تصادفی حتی اگر شرایط اولیه کاملاً مشخص باشد، تحولات بعدی شامل رخدادهای غیرقطعی و همراه با احتمالات وقوع مختلف خواهد بود. در دنیای واقعی مثال‌های زیادی از فرایندهای تصادفی قابل مشاهده می‌باشند که از آن جمله می‌توان به تغییرات قیمت‌ها در بازار سهام، نوسانات سیگنال‌های مخابراتی یا تغییرات آب و هوایی اشاره نمود. مدلسازی فرایندهای تصادفی با استفاده از توابع و معادلات تصادفی انجام می‌گیرند. فرایندهای تصادفی هم می‌توانند به صورت گسسته و هم به صورت پیوسته وجود داشته باشند. ریاضیات مربوط به فرایندهای تصادفی این قابلیت را ایجاد می‌کنند تا با توسعه انواع مختلفی از فرایندها به توان بسیاری از منابع عدم قطعیت در دنیای واقعی را مدلسازی نمود. یکی از انواع مهم فرایندهای تصادفی را فرایندهای مارکووی<sup>۳۴</sup> تشکیل می‌دهند. بنا بر تعریف، یک فرایند تصادفی را می‌توان مارکووی نامید اگر شرایط آینده آن را بتوان فقط بر اساس شرایط زمان حاضر پیش‌بینی نمود. به عبارت دیگر، شرایط آینده را می‌توان مستقل از شرایط گذشته درنظر گرفت. رفتار مارکووی برای مدلسازی غالب فرایندهای تصادفی در عالم واقعی قابل استفاده بوده و از این حیث در حوزه معادلات دیفرانسیل تصادفی کاربرد زیادی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از فرایندهای تصادفی در مدل‌های برنامه‌ریزی می‌تواند منجر به هم پیوسته عدم قطعیت‌ها شده و به همین دلیل در مقایسه با کاربرد روش‌های قدیمی‌تر مانند تحلیل حساسیت و سناریوسازی منجر به نتایج کاراتر و قابل اطمینان‌تری گردد.

<sup>32</sup> Stochastic Process

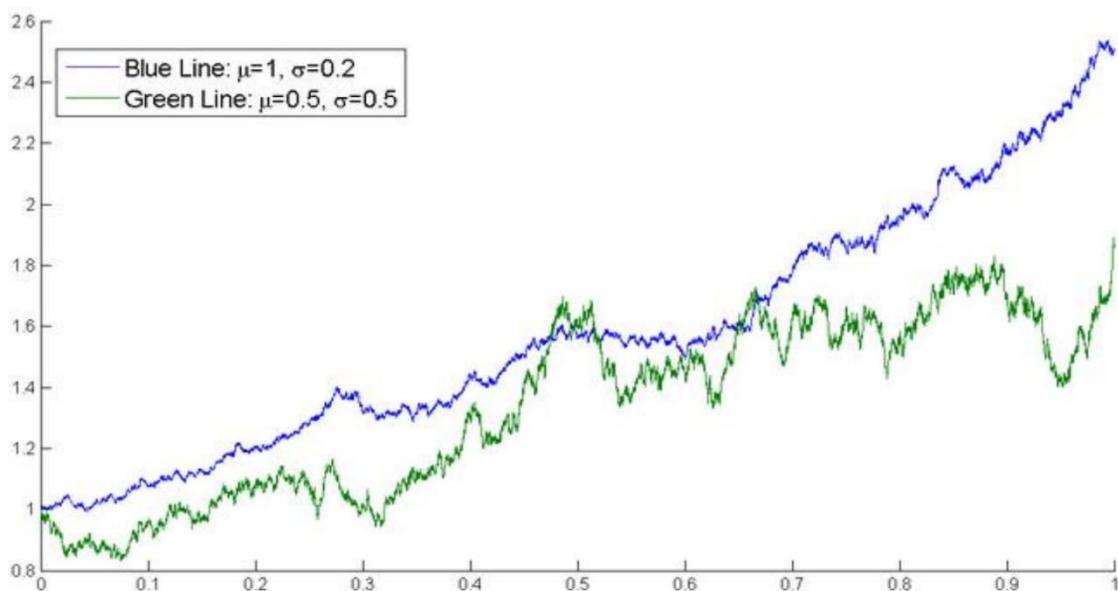
<sup>33</sup> Deterministic Process

<sup>34</sup> Markovian Process

یکی از انواع شناخته شده فرایند مارکووی، فرایند براونی<sup>۳۵</sup> (BM) می‌باشد که براساس حرکت تصادفی ذرات شکل گرفته است. حد مقیاس بودن فرایند براونی برای فرایند گام زدن تصادفی باعث می‌گردد تا این فرایند در توضیح بسیاری از فرایندهای طبیعی نمایان گردد. با این وجود به دلیل محدودیت‌های ریاضی موجود در آن، فرایند تصادفی جدیدی براساس تغییرات نامنفی فرایند BM توسعه داده شد تا به عنوان مثال به تواند روند تغییرات نوسانی قیمت سهام در بازار بورس را توضیح دهد و به آن مدل BM هندسی<sup>۳۶</sup> (GBM) گفته می‌شود. فرم کلی معادله دیفرانسیل تصادفی به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\frac{dS_t}{S_t} = \mu \cdot dt + \sigma \cdot dB_t \quad (4)$$

که در آن  $S_t$  پارامتر دارای عدم قطعیت می‌باشد،  $\mu$  بیانگر تغییرات مقدار متوسط متغیر تصادفی بوده و بنام Drift نامگذاری می‌گردد و  $\sigma$  مبین انحراف معیار تغییرات پارامتر بوده و بنام Volatility نامگذاری می‌گردد. این دو پارامتر مشخصه با استفاده از اطلاعات تاریخی متغیر مورد بررسی قابل محاسبه می‌باشد. همچنین  $B_t$  یک فرایند BM (وینر) استاندارد است که دارای توزیع نرمال با متوسط صفر می‌باشد. شکل ۴-۳ نمونه‌ای از رفتار تصادفی مبتنی بر مدل GBM را به ازای مقادیر مختلف برای ضرایب  $\sigma$  و  $\mu$  نمایش می‌دهد.

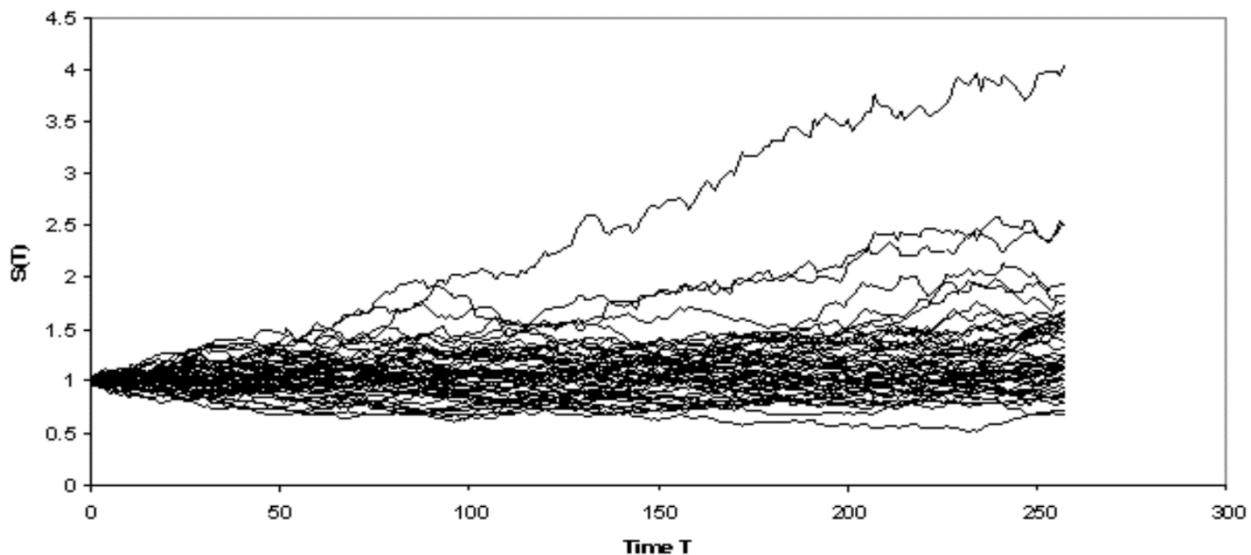


شکل ۴-۳: رفتار تصادفی براساس مدل GBM و به ازای مقدار متفاوت ضرایب مشخصه

<sup>35</sup> Brownian Motion

<sup>36</sup> Geometric Brownian Motion

با حل معادله دیفرانسیل تصادفی مدل GBM و با درنظر گرفتن جمله تولید کننده نوسانات تصادفی در این معادلات (B<sub>t</sub>), جواب حاصله به صورت مجموعه‌ای از سناریوهای احتمالی قابل وقوع نتیجه می‌گردد. شکل ۵-۳ نمونه‌ای از مجموعه GBM سناریوهای قابل وقوع برای یک فرایند GBM را نمایش می‌دهد. مطابق با تحقیقات انجام شده، استفاده از روش GBM برای قیمت‌گذاری کالاهای واقعی در حوزه انرژی که همان حامل‌های انرژی را دربرمی‌گیرد، روشی مناسب می‌باشد راجرز و لویس [۳۱] با بررسی نحوه توزیع تابع احتمال قیمت‌های تاریخی حامل‌های انرژی امکان استفاده از مدل GBM برای مدلسازی عدم قطعیت حامل‌های انرژی در دوره‌های زمانی کوتاه مدت/میان مدت را تایید نمودند.



شکل ۵-۳: مجموعه سناریوهای محتمل تولید شده مربوط به یک مدل GBM

همچنین استفاده از روش GBM برای مدلسازی قیمت مجموعه متنوع حامل‌های انرژی (یانگ و همکاران [۳۲]) قیمت نفت خام (پوستالی [۳۳]) قیمت برق (موست [۳۴]) مناسب می‌باشد. علاوه بر پژوهش‌ها و فعالیت‌های ذکر شده در بالا، در بسیاری از مدل‌های انرژی برای مدلسازی هزینه‌های انتشار دی‌اکسید کربن از مدل GBM برای مدلسازی قیمت کربن استفاده می‌گردد که از آن جمله می‌توان به کارهای آبادی و همکاران [۳۵]، بليت و همکاران [۳۶] اشاره نمود.

در کنار مرور بر ادبیات انجام شده که بیانگر استفاده از فرایند GBM برای مدلسازی عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی در کوتاه مدت و میان مدت می‌باشد، مشاهده گردید که عدم قطعیت هزینه فناوری‌های انرژی نیز می‌تواند توسط فرایندهای تصادفی توضیح داده شوند. مزیت استفاده از مدل تصادفی برای پوشش عدم قطعیت هزینه فناوری‌های انرژی در آن است که از آنجایی که توابع یادگیری این فناوری‌ها غیرخطی می‌باشند، امکان استفاده مستقیم از آن‌ها در مدل انرژی با معادلات خطی وجود ندارد، ولی استفاده از مدل‌های تصادفی باعث می‌گردد تا به نوعی این رفتار غیرخطی درون

مدل خطی-تصادفی مدلسازی گردد. همچنین تحقیقات مشابهی در رابطه با مدلسازی عدم قطعیت تقاضای انرژی توسط مدل GBM انجام شده است (لیانگ [۳۷]).

از آنجایی که ساختار ریاضی مدل GBM برپایه فرضیه گام زدن تصادفی<sup>۳۷</sup> شکل گرفته است، روابط ریاضی آن امکان بروز مقادیر بیش از اندازه بزرگ را در افق زمانی بلند مدت‌تر محتمل می‌گرداند. حال آنکه مطالعات پیندیک [۳۷] و شوارتز [۳۸] بر روی مقادیر واقعی و تاریخی قیمت حامل‌های انرژی نشان داده است که اگرچه روند تغییر قیمت حامل‌های انرژی می‌تواند همراه با شوک و پرش به مقادیر بزرگ باشد ولی اثرات این شوک‌ها ماندگار نبوده و در بلند مدت قیمت حامل‌های انرژی به مقدار متوسط خود که بیانگر هزینه حاشیه‌ای<sup>۳۸</sup> بوده و تابع عواملی مانند هزینه تولید و میزان تقاضا هستند، میل می‌نماید. بر این اساس مدل جدیدی برای پوشش عدم قطعیت این گونه پارامترها مورد توجه قرار گرفت و به نام فرایند MRM<sup>۳۹</sup> معرفی گردید. مدل MRM اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط واژیچک و برای مدلسازی پویای نرخ بهره استفاده شد.

همانگونه که از فرم عمومی معادلات دیفرانسیل تصادفی برای نوشتمن معادلات مدل GBM استفاده گردید با همان رویکرد معادله دیفرانسیل تصادفی مدل MRM به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$ds_t = k(\alpha - \ln(S_t)).S_t \cdot dt + \sigma \cdot S_t \cdot dB_t \quad (5)$$

در این فرایند شاخص قیمت  $S$  تمایل دارد تا در بلندمدت با نرخ  $k$  به عنوان Reversion Rate به میزان متوسط  $\alpha$  (لگاریتم قیمت بلند مدت) بازگشت نماید. شکل ۶-۳ نمونه‌ای از نوسانات قیمت نفت خام برنت را که توسط مدل MRM قابل توضیح می‌باشد نشان می‌دهد.

همانند مدل GBM در مدل MRM مقادیر ضرایب معادلات با استفاده از اطلاعات تاریخی متغیر تصادفی قابل محاسبه می‌باشد. با مرور ادبیات استفاده از مدل MRM مشاهده می‌گردد که رویکرد رایج در کاربرد این روش محدود به استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد که در آن مجموعه‌ای تصادفی از سناریوهای محتمل تولید می‌گردد. شکل ۶-۴ نمونه‌ای از این سناریوهای تولیدی برای فرایند MRM را بر حسب محور افقی زمان نشان می‌دهد. استفاده از روش مونت کارلو زمانی که تعداد گزینه‌های تصمیم‌گیری زیاد می‌گردد مانند سیستم انرژی که در آن ترکیب متنوعی از فناوری‌ها و

<sup>37</sup> Random Walk

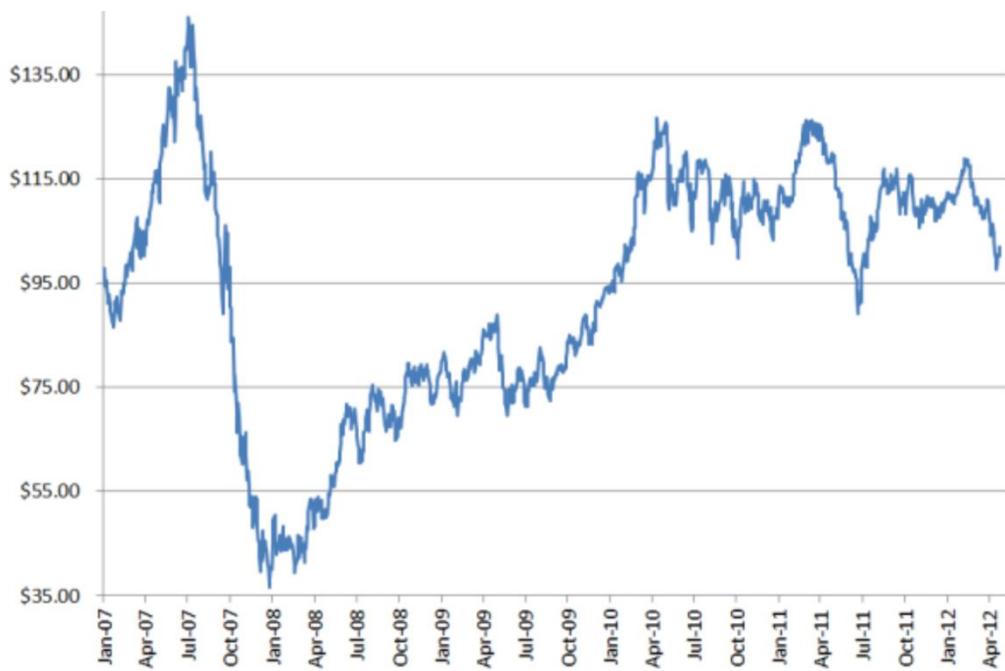
<sup>38</sup> Marginal Cost

<sup>39</sup> Mean-Reversion

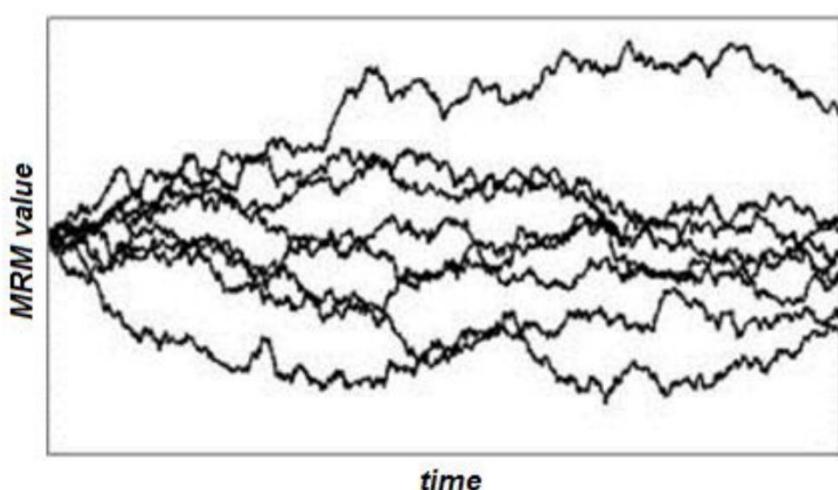
Bottom-Up حامل‌های انرژی وجود دارد از پیچیدگی محاسباتی زیادی برخوردار بوده و کاربرد آن برای مدل انرژی توصیه نمی‌گردد. لذا رویه اتخاذ شده در این پژوهش مبنی بر استفاده از شبکه‌های گسسته‌سازی شده احتمالی برای فرایند MRM نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. عمدۀ موارد کاربرد روش MRM برای حوزه انرژی در مسائل تعریف شده توسط تئوری اختیارات طبیعی<sup>۴۰</sup> و حل آن به کمک برنامه‌ریزی پویای عقب‌گرد می‌باشد. از روش فوق برای یک مسئله ROA جهت تصمیم‌گیری در سرمایه‌گذاری بر روی نیروگاه گازی سیکل ترکیبی در مقایسه با نیروگاه گازی/اذغالی سیکل Binomial ترکیبی در شرایطی که قیمت سوخت از فرایند MRM پیروی می‌کند استفاده نمودند و همگرایی شبکه

را با

توجه به مقادیر  $\Delta T$  تحلیل حساسیت نمودند.



شکل ۶-۳: نوسانات قیمت نفت خام برنت، قابل توضیح توسط مدل MRM



شکل ۷-۳: سناریوهای تولید شده برای یک فرایند MRM

<sup>40</sup> Real Option Theory-ROA

تحقیقات انجام گرفته توسط پیندیک [۲] و انجام تست‌های اقتصادسنجی بر روی مدل‌های GBM و MRM در توضیح رفتار تصادفی قیمت حامل‌های انرژی، با استفاده از اطلاعات تاریخی، نشان داده است که کاربرد این مدل‌ها بستگی به افق زمانی، دوره زمانی و همچنین نوع حامل‌های انرژی دارد. برای غلبه بر این نارسایی، شوارتز [۳] مدل کامپوزیت 2F-MRM را معرفی نمود که تلفیقی از دو مدل GBM و MRM می‌باشد. در این مدل فرض بر آن است که قیمت‌ها بر یک روند بلند مدت متعادل استوار بوده و در کوتاه مدت نسبت به آن دارای نوسان می‌باشند.

برای بیان ریاضی فرایند کامپوزیت 2F-MRM، با توجه به آنکه مدل‌های GBM و MRM دارای فرض نرمال بودن لگاریتمی برای متغیر تصادفی هستند، لگاریتم متغیر قیمت در فرایند کامپوزیت نیز به صورت جمع قیمت تعادلی بلند مدت  $\xi_t$  بدست آمده از یک فرایند GBM و قیمت انحرافی  $X_t$  بدست آمده از فرایند MRM درنظر گرفته می‌شود.

$$\ln(S_t) = \xi_t + X_t \quad (6)$$

نهایتاً معادلات فرایند کامپوزیت 2F-MRM ترکیبی از معادلات فرایندهای GBM و MRM و همپوشانی آماری متغیرها وینر این دو فرایند  $\xi_t$  می‌باشد.

$$d\xi_t = \mu_\xi dt + \sigma_\xi dz_\xi \quad (7)$$

$$d\chi_t = \kappa(\bar{\chi} - \chi_t)dt + \sigma_\chi dz_\chi \quad (8)$$

$$dz_\xi dz_\chi = \rho_{\xi\chi} dt \quad (9)$$

برای حل و استفاده از معادلات فوق از روش Kalman Filter استفاده می‌گردد که در آن مقادیر متغیرها در هر مرحله توسط روابط تجمعی از مقادیر متغیرها در مقطع قبلى تخمین زده می‌شوند. پس از مرور تحقیقات اشاره شده در فوق برای استفاده از مدل‌های 2F-MRM و GBM، MRM و MRM ۲جهت مدل‌سازی پارامترهای تصادفی در حوزه انرژی، مشاهده گردید که رویکرد تعریف مسئله در اغلب آن‌ها استفاده از روش اختیارات طبیعی<sup>۴۱</sup> و حل آن توسط روش شیوه‌سازی مونتکارلو و برنامه‌ریزی پویای عقب‌گرد بوده است و کاربردی از این روش در مدل‌های انرژی Bottom-up یافت نگردید.

<sup>41</sup> Real Option Analysis-ROA

## فصل ۴ - مدلسازی ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی

در ادبیات برنامه‌ریزی، مفهوم ریسک به تفسیر اثرات وجود عدم قطعیت می‌پردازد. بر این اساس ریسک عبارت است از هزینه یا خسارت ناشی از وقوع یک پدیده غیرقطعی. معمولاً این تغییرات نسبت به یک مرجع مانند میزان انتظاری یا متوسط پارامتر دارای عدم قطعیت سنجیده می‌شود. در سیستم عرضه انرژی، فرایند سرمایه‌گذاری و توسعه زیربخش‌ها و فناوری‌های مورد نیاز در آن از مقیاس قابل ملاحظه اقتصادی برخوردار می‌باشد و عدم پوشش ریسک می‌تواند در نتایج مدل تأثیرگذار باشد. در این زمینه توسعه سیستم کلان عرضه انرژی دارای خاصیت بازگشت‌ناپذیری بوده بدین معنا که از لحاظ اقتصادی پس از ساخت یک پالایشگاه یا نیروگاه، هزینه انجام شده قابل تغییر شکل و یا جابه‌جایی نمی‌باشد. از لحاظ رویکرد اقتصادی مفهوم ریسک به یکی از انواع سیستمی و غیر سیستمی تقسیم می‌گردد. ریسک سیستمی<sup>۴۲</sup> به ریسکی گفته می‌شود که مربوط به تحولات کلی بازار اقتصاد بوده و تمامی بازیگران عرصه اقتصادی و یا حجم کنترل سیستم مورد بحث را دربرگرفته و بر تک اجزاء اثر می‌گذارد. این ریسک غیرقابل اجتناب می‌باشد و می‌بایست مورد قبول قرار گیرد. به عنوان نمونه، تورم در سطح کشور به عنوان یک ریسک سیستمی مطرح می‌باشد و بر تمامی بخش‌ها و عوامل اقتصادی در چارچوب سیستم مورد بحث اثر می‌گذارد. متغیر بتا شاخصی برای ارزیابی ریسک سیستمانیک می‌باشد. این کمیت نسبت نوسانات نسبی بازگشت یک سرمایه‌گذاری ( $r_a$ ) نسبت به بازگشت کل سرمایه‌گذاری‌های سیستم اقتصادی ( $r_b$ ) را بیان می‌نماید  $\beta = \frac{\text{Covariance}(r_a, r_b)}{\text{Variance}(r_b)}$  و در این صورت مقادیر بتای بزرگتر از واحد نشان‌دهنده نوسانات کمتر نسبت به نرخ متوسط کل و ریسک پایین‌تر می‌باشد.

ریسک غیر سیستمی<sup>۴۳</sup> به ریسک‌هایی گفته می‌شود که مختص به یک حوزه معین یا بنگاه اقتصادی خاص می‌باشد. این نوع ریسک توسط روش‌هایی مانند تنوع‌بخشی<sup>۴۴</sup> قابل کاهش می‌باشد. وجود عدم قطعیت‌ها در سیستم اقتصاد-انرژی موجب به وجود آمدن ریسک سیستمی و غیرسیستمی می‌گرددند که روش‌های مدیریت ریسک عمدتاً بر ریسک‌های غیر سیستمی تمرکز می‌کنند. مطابق با گزارشی از IEA در رابطه با مدیریت ریسک در پروژه‌های انرژی [۳۸]، پس از شناسایی ریسک و منشأ آن در یک سیستم، سه رویکرد متفاوت برای برخورد با آن وجود خواهد داشت:

<sup>42</sup> Systematic risk

<sup>43</sup> Un-Systematic risk

<sup>44</sup> Diversification

- ۱) حذف آن: در این شرایط پروژه مدنظر اجرا نخواهد شد.
  - ۲) کنترل ریسک: در این حالت که مربوط به ریسک‌های غیرسیستمی می‌باشد کنترل ریسک و تصمیم‌گیری پایدار مدنظر قرار می‌گیرد.
  - ۳) قبول ریسک: این حالت همانند مورد اول بیشتر مربوط به ریسک‌های سیستمی می‌باشد که سرمایه‌گذار مجبور به قبول ریسک و لحاظ خسارات مربوطه در محاسبات مالی می‌باشد.
- مطابق با نظریه‌های کنترل و مدیریت ریسک در سیستم‌های تصادفی، دو رویکرد عمدۀ برای تصمیم‌گیری پایدار<sup>۴۵</sup> در شرایط وجود ریسک وجود دارد. یک رویکرد شامل کمینه‌کردن بیشترین خسارت<sup>۴۶</sup> بوده و به روش MiniMax معروف می‌باشد و دیگری شامل محاسبه تغییرپذیری تابع هدف با استفاده از توابع ریسک بوده و به رویکرد Mean-risk شناخته می‌گردد. مرور بر ادبیات تحقیقات انجام گرفته در زمینه مدلسازی ریسک، چگونگی پوشش آن در مدل‌های برنامه‌ریزی و خصوصاً مبحث تصمیم‌گیری پایدار در مدل‌های انرژی را نمایان می‌سازد. ایکهورن [۳۹] برای بازار رقابتی عرضه انرژی با تابع هدف ماکزیمم کردن سود، با استفاده از روش Mean-Risk به کمینه کردن ریسک موجود ناشی از عدم قطعیت در قیمت و میزان تقاضا پرداخت. در همین راستا ارائه مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای بازار برق بادی صورت گرفت و با استفاده از تابع ریسک Cvar اثرات عدم قطعیت‌های ناشی از تولید برق به کمک نیروی باد در بیشینه کردن سود را بررسی شد. تحقیقات دیگر با تکیه بر تئوری پورتفولیو در ریاضیات مالی، نشان داده شده است که برای سیستم‌های عرضه انرژی الکتریکی، وارد نمودن ریسک عدم قطعیت باعث می‌گردد تا ضمن نفوذ بیشتر فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، متنوع‌سازی فناوری‌های عرضه انرژی تحت تأثیر قرار گیرد. در مبحث مدیریت ریسک، زمانی که کاهش ریسک مدنظر صورت می‌گیرد، اصطلاحاً مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مربوطه به نام مدل‌های ریسک گریز<sup>۴۷</sup> شناخته می‌گردد. کاپرد برنامه‌ریزی تصادفی ریسک گریز در مدل‌های انرژی Bottom-up بسیار محدود می‌باشد.

آرتِنس و همکاران [۴۰] با استفاده از مدل MARKAL به صورت یک مدل تصادفی دومرحله‌ای به بررسی ریسک ناشی از عدم قطعیت انتشار گاز CO<sub>2</sub> برای سیستم عرضه انرژی کشور بلژیک پرداختند. در تحقیق ایشان چهار سناریوی احتمالی ناشی از مصوبات پروتکل کیوتو مدنظر قرار گرفت و نتایج اجرای این مدل در مقایسه با نتایج مدل ریسک خنثی در توسعه فناوری‌ها در راستای کاهش گازهای گلخانه‌ای مقایسه گردید. در تحقیقی مشابه که در مؤسسه IIASA انجام

<sup>45</sup> Robust Decision Making

<sup>46</sup> Minimization of Maximum Regret

<sup>47</sup> Risk averse

شده است، با استفاده از نسخه برنامه‌ریزی تصادفی مدل MESSAGE برای زمانی که هزینه فناوری‌ها و انتشار کرbin دارای عدم قطعیت می‌باشد، مدلی ریسک‌گریز توسعه داده شده است. نتایج کاربرد این مدل برای یک مثال موردی، توسعه سریع‌تر فناوری‌های پیشرفته به همراه کاهش انتشار آلینده‌ها را نمایش می‌دهد.

#### ۴-۱- روشن Minmax

مطابق با روش ارائه شده توسط رایفا [۴۱] هدف رویکرد MiniMax کمینه کردن بیشترین خسارات محتمل ناشی از عدم قطعیت برای تصمیم‌گیری است. رابطه ریاضی روش MiniMax برای یک مسئله دو مرحله‌ای مطابق با فرمول زیر عبارت است از کمینه کردن بیشترین تفاضل هزینه ناشی از مدل تصادفی و هزینه سیستم قطعی به ازای سناریوهای معین.

$$\text{Min} & \text{Max}\{f_1(x) + f_2(x, \omega) - Z(\omega)\} \quad (10)$$

در رابطه فوق تابع  $f_1$  مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری قبل از ظهر عدم قطعیت‌ها می‌باشد. تابع  $f_2$  مربوط به تصمیم‌گیری بعد از وقوع عدم قطعیت بوده و تابع  $f_3$  مقدار تابع هدف برای حل مدل در شرایط قطعی و به ازای یک سناریوی معین می‌باشد.

روش MiniMax صرفاً به سناریوهای حدی بستگی دارد و سناریوهای میانی را پوشش نمی‌دهد. در این شرایط برای حل مسئله، نحوه توزیع تابع احتمالی عدم قطعیت‌ها مطرح نبوده و اثرات آن در نتایج منعکس نمی‌گردد. لذا این روش بیشتر در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرد که توزیع تابع احتمالی عدم قطعیت‌ها در دسترس نبوده و صرفاً چند سناریو (بدون احتساب احتمال وقوع) مدنظر باشند. همچنین تحت شرایطی روش MiniMax معادل با دوگان روش ریسک‌گریزی مبتنی بر توابع ریسک می‌باشند. در راستای به کارگیری این روش در مدل‌های انرژی، ریباس و همکاران [۴۲] به توسعه مدلی استراتژیک برای برنامه‌ریزی در شبکه تأمین نفت پرداخته‌اند. منابع عدم قطعیت درنظر گرفته شده شامل قیمت نفت خام، تقاضای پالایشگاه‌ها و میزان تولید نفت می‌باشد. پوشش ریسک در مدل ایشان توسط روش MiniMax صورت گرفته است و نتایج آن ضمن تحلیل تفاوت هزینه‌های سیستم در مقایسه با زمانی که مدل ریسک خنثی می‌باشد، تفاوت سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز را نمایان می‌کند. همچنین می‌توان با بسط روابط مربوط به روش MiniMax برای یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای، نتایج کاربرد این روش را برای مثال کلاسیک Inventory Company کرد.

## ۴- روش Mean-risk

بعد از معرفی تئوری بهرهمندی<sup>۴۸</sup> توسط فون نیومن و مورگشتاین در سال ۱۹۴۴ برای توضیح نحوه عملکرد رفتار عقلایی در تصمیم‌گیری، مطالعات متعددی در رابطه با مبحث تصمیم‌گیری در شرایط وجود ریسک انجام شده است. این رویکرد بعدها توسط مارکوویتز (۱۹۵۲) در قالب تئوری پورتفولیو منجر به شکل‌گیری توابع ریسک گردید. بنا بر تعریف شاپیرو در مقدمه‌ای بر مدیریت ریسک در برنامه‌ریزی تصادفی، مقدار ریسک<sup>۴۹</sup> از لحاظ ریاضی نگاشتی است از مجموعه متغیرهای تصادفی به مجموعه‌ای از اعداد حقیقی. مقادیر ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با اضافه شدن به توابع هدف، آنها را به توابع Utility تغییر شکل می‌دهد. این توابع Utility تلاش می‌نماید تا به طور همزمان میان کمینه‌سازی هزینه (یا بیشینه‌سازی سود) از یک طرف و کاهش هزینه ناشی از تغییرپذیری به واسطه عدم قطعیت‌ها از طرف دیگر، تعادل و بهینه‌سازی برقرار نماید. مارکوویتز با استفاده از این رویکرد برای اولین بار به معرفی مدل‌های Mean-risk در حوزه ریاضیات مالی مبادرت ورزید. در رابطه با مفهوم اصلی رویکرد Mean-risk برای مدل‌سازی متغیر تصادفی دو مؤلفه اسکالر معرفی می‌گردد. یکی مقدار متوسط ( $E[Y]$ ) که امید ریاضی متغیر را نشان می‌دهد و دیگری مقدار انحراف<sup>۵۰</sup> ( $D[Y]$ ) که ریسک ناشی از وجود عدم قطعیت را اندازه‌گیری می‌نماید. مدل مارکوویتز بر این اساس به مدل Mean-Variance<sup>78</sup> معروف می‌باشد که در آن شاخص واریانس برای اندازه‌گیری ریسک به کاربرده می‌شود. مدل MV را می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

$$[Y] + \text{Var} \min E[Y] \quad (11)$$

در رابطه با کاربرد روش MV، کو و همکاران<sup>۴۲</sup> در سال ۲۰۱۱ روشی برای مدیریت ریسک در مدل EFOM ارائه نمودند. پایداری نتایج در مدل ایشان با اضافه کردن توابع ریسک مبتنی بر واریانس حاصل گردید. کاربرد این مدل برای یک سیستم نیروگاه برق و فناوری سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته و ضمن تشریح پایداری بدست آمده در نتایج با استفاده از توابع پنالتی در تابع هدف، سطح انتشار آلاینده‌های زیست محیطی نیز مدنظر قرار گرفته است. همچنین با استفاده از توابع ریسک مبتنی بر واریانس در مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای به توسعه مدل عرضه انرژی برای شبکه‌ای از پالایشگاه‌های نفت پرداخت. کاربرد این تحقیق برای چند سیستم موردي، پایداری مدل و پایداری نتایج را در شرایط عدم قطعیت نشان می‌دهد. یکی از نقاط ضعف واریانس به ماهیت تقارنی<sup>۵۱</sup> آن برمی‌گردد، حال آنکه تلقی ریسک

<sup>48</sup> Utility Theory

<sup>49</sup> Risk measure

<sup>50</sup> Deviation

<sup>51</sup> Symmetric

یک مفهوم غیرمتقارن می‌باشد. مطابق با این پژوهش روش MV در برخی موارد می‌تواند تخمین‌های نادرستی از توزیع پورتفولیو را بدست دهد. با توجه به کاستی‌های روش MV، روش دیگری به نام MAD<sup>۵۲</sup> توسط کونو و یامازاکی (۱۹۹۲) معرفی گردید. مطابق با رابطه ۱۲ در روش MAD شاخص ریسک بر اساس قدرمطلق تفاضل متغیر غیرقطعی و میزان متوسط انتظاری آن محاسبه می‌گردد.

$$\min E[Y] + \lambda E[|Y - E[Y]|], \lambda \in \{0,1\} \quad (12)$$

ضریب  $\lambda$  در رابطه فوق نشان‌دهنده درجه ریسک گریزی برای تصمیم‌گیری می‌باشد.

خور و همکاران [۴۳] در یک ساختار Bottom-up به توسعه مدلی دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد یک پالایشگاه در افق زمانی میان‌مدت پرداختند. در مدل ایشان برای حصول به نتایج پایدار از دو رویکرد MV و توابع ریسک MAD در مقایسه با تابع واریانس استفاده گردید. روش MAD هردو انحراف مثبت و منفی مقادیر تصادفی نسبت به مقدار متوسط را به عنوان ریسک لحاظ می‌نماید. حال آنکه تصمیم‌گیری در شرایط ریسک‌گریز معمولاً یکی از این دو حالات را در برمی‌گیرد. بر این اساس تابع Semi-down-deviation (Semi-upper-deviation) معرفی گردید که فقط یک نیمه از انحرافات نسبت به میزان متوسط را در برمی‌گیرد. این شاخص که در گروه Downside Semi Deviation قرار دارد و برای مسائل بهینه‌سازی پورتفولیو مورد بسط و تشریح قرار گرفت و عملکرد بهتر آن در مقایسه با روش‌های MAD و MV نتیجه‌گیری گردید.

کری و همکاران [۴۴] با اقتباس از مدل MESSAGE به توسعه مدلی پرداختند که در آن سیستم انرژی به صورت چند منطقه‌ای دیده می‌شود. با فرض عدم قطعیت در قیمت انرژی‌های اولیه، تابع ریسک در نظر گرفته شده از نوع SUD می‌باشد. نتایج استفاده از این مدل در مقایسه با مدل ریسک خنثی، تغییر آرایش فناوری‌های جدید و کاهش مصرف انرژی نهایی به واسطه افزایش راندمان را نشان می‌دهد.

در مقایسه با توابع مبتنی بر انحرافات مرکزی، گروه دیگری از توابع ریسک معرفی گردیده‌اند که تمرکز آنها بر روی قسمت انتهایی تابع توزیع احتمالی متغیرهای تصادفی می‌باشد. اینگونه تابع ریسک را به نام Weighted Mean Deviation from Quantile مطابق با رابطه زیر تعریف می‌نمایند.

$$q_\alpha(Y) = \min_{F^{-1}} E[\max\{(1-\alpha)(\eta - Y), \alpha.(Y - \eta)\}], \alpha \in (0,1) \quad (13)$$

<sup>۵۲</sup> Mean-absolute-deviation80

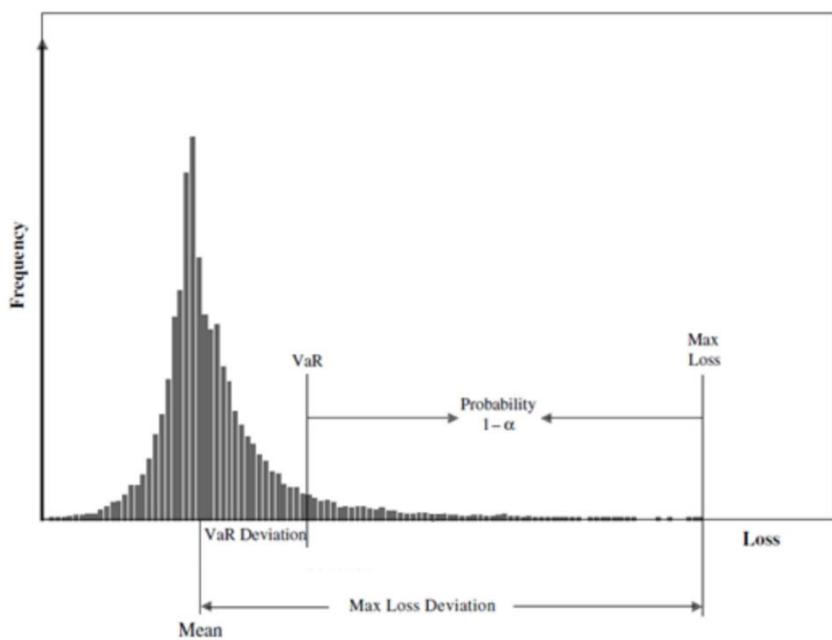
نتیجه حل مسئله کمینه‌سازی فوق، به عنوان  $\alpha - quantile$  توزیع متغیر تصادفی  $Y$  شناخته می‌شود. اگر  $F_Y(u) = \Pr\{Y \leq u\}$  آنگاه برای یک سطح اطمینان  $\alpha$ ،  $F_Y^{-1}(\alpha) = \min\{t : F_Y(t) \geq \alpha\}$  باشد. تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی  $Y$  مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$F_Y^{-1}(\alpha) = \min\{t : F_Y(t) \geq \alpha\} \quad (14)$$

بر اساس تعریف  $var$ ، مورگان در سال ۱۹۹۴ به معرفی تابع Value at Risk (VaR) پرداخت که عبارت است از بیشترین مقدار زیان (انحراف از مقدار متوسط) با سطح اطمینان آماری  $\alpha$  (شکل ۱-۴۵). سالیکارین [۴۵] رابطه  $VaR$  و Mean Deviation from Quantile را مطابق زیر تعریف می‌نماید:

$$VaR_\alpha = \min\{t : F_Y(t) \geq 1 - \alpha\} = F_Y^{-1}(1 - \alpha) \quad (15)$$

تابع VAR به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری ریسک در بازارهای بورس از کاربرد زیادی برخوردار بوده است. یکی از جنبه‌های مورد مطالعه برای این تابع ریسک، چگونگی محاسبه آن برای متغیرهای تصادفی در بازارهای انرژی می‌باشد. در تحقیقات صادقی [۴۶] به بررسی روش‌های اقتصاد سنجی مختلف برای محاسبه تابع VAR برای نوسانات قیمت نفت خام در بازارهای جهانی پرداخته شده است.



شکل ۱-۴۵: تابع ریسک value at risk

### ۴-۳-توابع ریسک ساختار یافته

تحقیقات آرتزینر و همکاران (۱۹۹۹) در راستای کمی‌سازی ریسک‌ها برای تابع هدف Utility در تئوری پورتفولیو<sup>۵۰</sup> منجر به معرفی کلاس جدیدی از توابع ریسک با نام توابع ریسک ساختار یافته<sup>۵۳</sup> گردید که بر پایه اصول موضوعه<sup>۵۴</sup> بنا نهاده شده‌اند. یکی از کاربردهای مهم توابع ریسک ساختار یافته استفاده از آنها به صورت توابع ریسک پویا<sup>۵۵</sup> در قالب مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای می‌باشد. در یک مدل چندمرحله‌ای مقادیر متغیرهای تصادفی در هر مقطع زمانی می‌توانند به صورت گستته درنظر گرفته شده و تغییرات زمانی آنها با استفاده از سناریوهای تصادفی تعریف گردد. اگر  $\Omega_t$  بیانگر تعداد حالات تصادفی در مقطع زمانی  $t = 1, \dots, T$  باشد، برای هر نقطه  $a \in \Omega_t$ ، مجموعه تمام نقاط زیرشاخه آن در مقطع  $t+1$  توسط مجموعه  $C_a \subset \Omega_{t+1}$  تعریف می‌گردد. برای هر نقطه  $a$  در مقطع  $t$  تابع ریسک پویای متناظر، برابر خواهد بود با:

$$\rho^a : R^{|C_a|} \rightarrow R, a \in \Omega_t, \quad (16)$$

که در آن  $|C_a|$  کاردینالیتی<sup>۵۶</sup> یا تعداد اعضاء مجموعه را نشان می‌دهد. در این صورت تابع پویای مقطع  $t$  به صورت نگاشت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\rho_{t+1} := (\rho^{a_1}, \dots, \rho^{a_k}) : R^{k_{t+1}} \rightarrow R^k, t = 1, \dots, T-1 \quad (17)$$

$$\{a_1, \dots, a_k\} = \Omega_t \text{ و } R^{k_{t+1}} = R^{|C_{a_1}|} \times \dots \times R^{|C_{a_k}|}$$

اگر  $\Psi_t$  یک جبر سیگما و  $Z_t$  یک فضای قابل اندازه‌گیری از خروجی‌های تصادفی که روی  $\Psi_t$  تعریف شده باشند، در این صورت تابع ریسک پویا به صورت نگاشت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho_{t+1} : Z_{t+1} \rightarrow Z_t \quad (18)$$

تابع پویای  $\rho_{t+1}$  یک تابع ریسک ساختار یافته نامیده می‌شود زمانی که اصول زیر برای آن برقرار باشد:

**Convexity:**

$$\rho_{t+1}(\alpha Z_1 + (1-\alpha)Z_2) \leq \alpha \cdot \rho_{t+1}(Z_1) + (1-\alpha) \cdot \rho_{t+1}(Z_2), \forall Z_1, Z_2 \in Z_{t+1}, \alpha \in [0, 1]$$

**Monotonicity:**

$$\forall Z_1, Z_2 \in Z_{t+1}, Z_1 \leq Z_2 \Rightarrow \rho_{t+1}(Z_1) \leq \rho_{t+1}(Z_2)$$

<sup>53</sup> Coherent Risk Functions

<sup>54</sup> Axioms

<sup>55</sup> Dynamic Risk Functions

<sup>56</sup> Cardinality

Translation equivalence:

$$Z \in Z_{t+1}, Z' \in Z_{t+1} \Rightarrow \rho_{t+1}(Z + Z') = \rho_{t+1}(Z) + Z'$$

Positive homogeneity:

$$\forall \alpha \geq 0, Z \in Z_{t+1} \Rightarrow \rho_{t+1}(\alpha \cdot Z) = \alpha \cdot \rho_{t+1}(Z)$$

یکی از ویژگی‌های ثانویه توابع ریسک ساختاریافته خاصیت Sub-additivity می‌باشد که در آن به ازای هر آنگاه  $Z, Z' \in Z_t$   $\rho_t(Z + Z') \leq \rho_t(Z) + \rho_t(Z')$ <sup>۵۷</sup> منجر شده و به عنوان مهمترین دستاورد کاهش ریسک مطرح می‌گردد. یکی از اولین توابع ریسک ساختاریافته بر اساس توابع انحرافات مرکزی<sup>۵۸</sup> مطابق رابطه زیر معرفی می‌گردد:

$$\sigma[Y] = E[\{Y - E[Y]\}_+^P]^{1/P}, \quad \{\}_+ \text{ means } Y \geq E[Y] \quad (19)$$

ساده‌ترین حالت برای این تابع ریسک، زمانی است که  $P = 1$  باشد که همان تابع Semi-upper-deviation در رابطه با توابع ریسک مبتنی بر  $\alpha$ -quantile سیگو [۴۷] در مقاله‌ای اشاره می‌نماید که تابع VaR در حالت کلی ساختاریافته نبوده و از قابلیت Sub-additivity برخوردار نمی‌باشد. همچنین تابع VaR به عنوان یک تابع ریسک از ضعف عدم همگرایی برخوردار می‌باشد. همچنین او به تشریح عدم پایداری تابع VaR و ناسازگاری آن در حل عددی برای توابع توزیع احتمالی غیر نرمال می‌پردازد. علاوه بر این، تابع VaR از قدرت تمایز ریسک موجود در دنباله توزیع احتمالی به ازای مقادیر احتمالی متفاوت برخوردار نمی‌باشد.

در راستای پوشش کاستی‌های تابع VaR توابع ریسک Second order Quantile Risk Measure گردیده‌اند. همچنین با اضافه نمودن مفهوم امید انتظاری به تابع  $\alpha$ -quantile Conditional  $\alpha$ -quantile ضمن معرفی تابع جدید CVaR<sup>59</sup> به مقایسه ویژگی‌های این تابع و تابع VaR پرداخته شد. مطابق با شکل ۴-۲ تابع CVaR مقدار متوسط انتظاری  $(1-\alpha)\%$  زیان‌ها را نشان می‌دهد. به این ترتیب تابع CVaR زیان انتظاری<sup>۶۰</sup> را تداعی نموده و مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

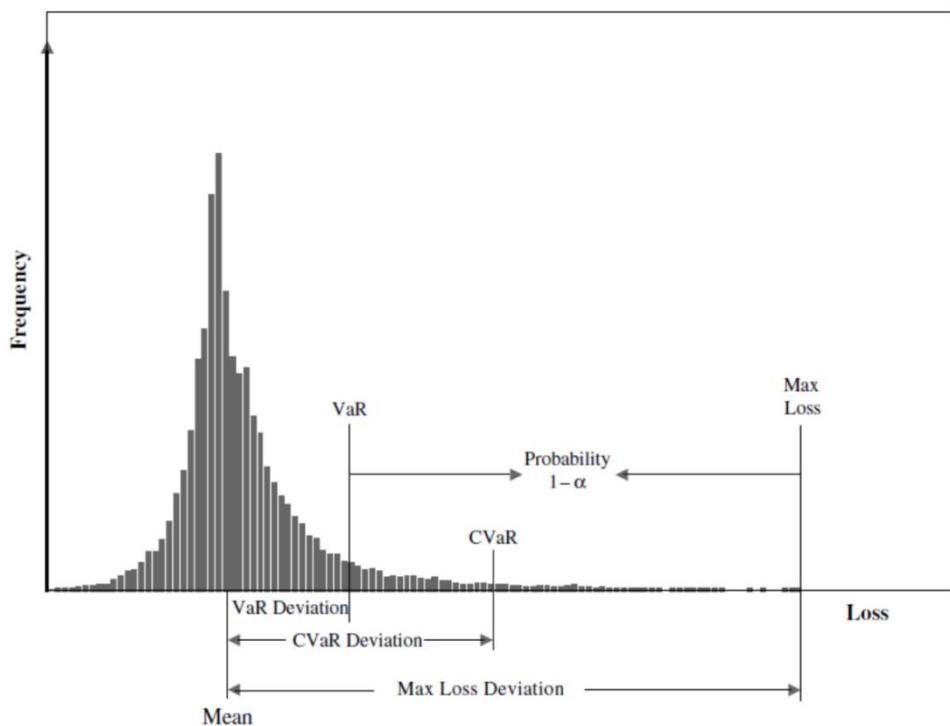
$$CVaR_\alpha[Y] = \frac{1}{1-\alpha} \int_\alpha^1 VaR_\tau[Y] d\tau, \quad \alpha \in (0,1) \quad (20)$$

<sup>۵۷</sup> Diversification

<sup>۵۸</sup> Central Semi-deviations

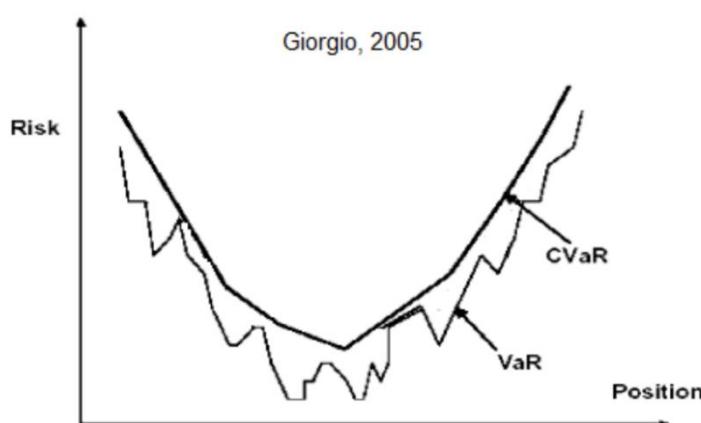
<sup>۵۹</sup> CVaR

<sup>۶۰</sup> Expected Shortfall



شکل ۲-۴: توابع ریسک و Conditional Value at Risk

شکل ۳-۴ مقایسه توابع CVaR و VaR را از لحاظ تحدب و ساختار یافتنگی نمایش می‌دهد. تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت ریسک در مدل‌های انرژی عمده رویکردی جامع نسبت به کمی‌سازی ریسک و ویژگی‌های انواع توابع ریسک نداشته و همچنین منابع محدودی از عدم قطعیت‌ها را در بر می‌گیرند. از این رو پس از مرور روش‌های پوشش ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، مدل تصادفی ESM از حالت ریسک خنثی به یک مدل ریسک‌گریز توسعه داده می‌شود که در آن طیف متنوعی از منابع عدم قطعیت پوشش داده می‌شوند. مطابق با مطالب گفته شده نتیجه می‌گردد که کاربرد توابع ریسک ساختاریافته برای مدل‌های تصادفی انرژی Bottom-up بسیار محدود می‌باشد لذا استفاده از آن برای توسعه مدل ریسک‌گریز مدنظر قرار خواهد گرفت.



شکل ۳-۴: مقایسه تحدب توابع Var و Cvar

## فصل ۵- توسعه مدل عرضه انرژی با رویکرد مدیریت ریسک

پس از مدلسازی پارامترهای دارای عدم قطعیت، هزینه انتظاری سیستم انرژی کمینه می‌گردد. این گروه از مدل‌ها که اصطلاحاً به مدل ریسک-خنثی معروف می‌باشند صرفاً به دنبال بهینه‌سازی پورتفولیوی از آرایش سیستم می‌باشند که هزینه انتظاری کل سیستم در شرایط عدم قطعیت را بهینه می‌سازد ولی ریسک ناشی از وقوع عدم قطعیت‌ها را در هزینه‌های بازگشت‌ناپذیر انجام شده و پورتفولیوی سیستم عرضه انرژی لحظه نمی‌نماید. تغییرات ضرایب مربوط به عدم قطعیت‌ها می‌تواند بر روی نتایج مدل انرژی تأثیر بگذارد و از این حیث نتایج را با ریسک مواجه می‌سازد. زمانی که اثر عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مدل، موجب انحراف نتایج نسبت به حالت متوسط شود، نتایج مدل ریسک خنثی، غیر پایدار و Non-robust می‌گردد. مدل‌های ریسک خنثی صرفاً می‌توانند برای ارزیابی ریسک به کار گرفته شوند. اگرچه در این مدل‌ها محاسبه شاخص‌هایی مانند EVPI و VSS به اهمیت و تأثیرگذاری عدم قطعیت در مدل مورد نظر اشاره می‌نماید و تحلیل حساسیت نتایج مدل نسبت به تغییرات پارامترهای دارای عدم قطعیت در ورودی، به ارزیابی ریسک موجود در مدل کمک می‌نماید ولی نیاز است تا مدل‌های انرژی که اثرات و هزینه‌های ناشی از وقوع عدم قطعیت را به صورت صرفه ریسک در نتایج‌شان منعکس سازند، توسعه پیدا نمایند.

### ۱-۵- توسعه مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز

در راستای پوشش ریسک در مدل عرضه انرژی، مطابق با مرور بر ادبیات انجام گرفته برای روش‌های پوشش ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، رویکرد Mean-Risk همراه با استفاده از توابع ریسک ساختار یافته<sup>۶۱</sup> مدنظر قرار می‌گیرد. در این شرایط با اضافه نمودن توابع ریسک به تابع هدف مدل انرژی، تابع Utility مناسب برای پوشش ریسک بدست می‌آید. زمانی که پارامترهای دارای عدم قطعیت توسط فرایند تصادفی  $(\omega_t)$  :=  $[t]$  برانگیخته شوند، تابع هدف مدل تصادفی ریسک خنثی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} & \underset{x_1 \in X_1}{\text{Min}} f_1(x_1) + \text{Exp} \left[ \underset{x_2 \in X_2(x_1, \omega_2)}{\text{Min}} f_2(x_2, \omega_2) + \dots + \text{Exp} \left[ \dots + \text{Exp} \left[ \underset{x_T \in X_T(x_{T-1}, \omega_T)}{\text{Min}} f_T(x_T, \omega_T) \right] \right] \right] \end{aligned} \quad (21)$$

<sup>61</sup> Coherent Risks

با فرض آنکه فرایند تصادفی دارای توزیع گسسته باشد، فضای متغیرهای تصادفی توسط سناریوهای چندشاخه<sup>۶۲</sup>

تصادفی مدلسازی می‌گردد. اگر  $\Omega_t$  نشان‌دهنده نقاط توزیع احتمالی در هر یک از مقاطع  $T, \dots, t = 1, \dots, T$  باشد، مطابق با روابط ارائه شده برای تابع ریسک خواهیم داشت:

$$\rho_{t+1} := (\rho^{a_1}, \dots, \rho^{a_k}) : R^{k_{t+1}} \rightarrow R^k, \rho^a : R^{|Ca|} \rightarrow R, a \in \Omega \quad (22)$$

با اعمال تابع ریسک رابطه فوق در هریک از مقاطع زمانی مسئله تصادفی چند مرحله‌ای، فرم Nested مسئله ریسک‌گریز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } F_1(x_1) + \rho_2 \left[ \inf_{x_2 \in X_2(x_1, \zeta_2)} f_2(x_2, \omega) + \dots + \right. \\ \left. + \rho_{T-1} \left[ \inf_{x_{T-1}} f_{T-1}(x_{T-1}, \omega) + \rho_T \left[ \inf_{x_T} f_T(x_T, \omega) \right] \right] \dots \right] \end{aligned} \quad (23)$$

با معرفی  $Z_t$  در یک فضای جبر سیگما، به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی مرحله  $t$  و با توجه به آنکه فرم عمومی تابع ریسک ساختاریافته با رویکرد Mean-Risk به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho_t = E[Z_t] + \lambda D[Z_t] \quad (24)$$

که در آن  $E$  تابع مقدار متوسط یا امید ریاضی بوده و  $D$  تابع انحرافات از مقدار متوسط بوده و ریسک را اندازه‌گیری می‌نماید. در این صورت تابع هدف مدل انرژی ریسک‌گریز به صورت کلی بازنویسی می‌گردد:

$$\text{Min } Z_1 + \rho_2 [Z_2 + \dots + \rho_{T-1} [Z_{T-1} + \rho_T [Z_T]] \dots] \quad (25)$$

از آنجایی که به واسطه حضور چندشاخگی و تو درتوى، سناریوهای تصادفی رابطه فوق از پیچیدگی زیاد محاسباتی برخوردار می‌باشد، برای کاهش این پیچیدگی محاسباتی می‌توان از روشی بر پایه فرض استقلال بین مرحله‌ای<sup>۶۳</sup> استفاده نمود. برای یک فرایند تصادفی  $(\omega_t, \omega_1, \dots, \omega_T)$  زمانی که بردار تصادفی  $t = 2, \dots, T$  به طور مستقل توزیع شده باشد، فرض استقلال بین مرحله‌ای برقرار می‌باشد. برای تمامی فرایندهای تصادفی مارکوفی مورد بحث در این رساله، این شرایط صادق می‌باشد. اگر شرط استقلال بین مرحله‌ای برقرار گردد، مسئله بهینه‌سازی ریسک‌گریز را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Min } Z_1 + \rho_2 [Z_2 + \dots + \rho_{T-1} [Z_{T-1}] + \rho_T [Z_T]] \quad (26)$$

با توجه به رابطه فوق برای تابع ریسک ساختاریافته، تابع هدف مسئله به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

<sup>62</sup> Scenario Tree

<sup>63</sup> Between Stage Independence

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \tilde{C}_1^T X_1 \cdot r(1) + E[\tilde{C}_2^T X_2 \cdot r(2)] + \lambda_2 \cdot D_2 [\tilde{C}_2^T X_2 \cdot r(2)] + \dots \\ & \dots + E[\tilde{C}_T^T X_T \cdot r(T)] + \lambda_T \cdot D_T [\tilde{C}_T^T X_T \cdot r(T)] \end{aligned} \quad (27)$$

*S.t.*  $\tilde{A} \cdot X \geq \tilde{B}$ , for every scenarios

$\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$  : techno - economic coefficient vectors

$X$  : Decision making variable vectors

$r$  : Risk - free discounting function

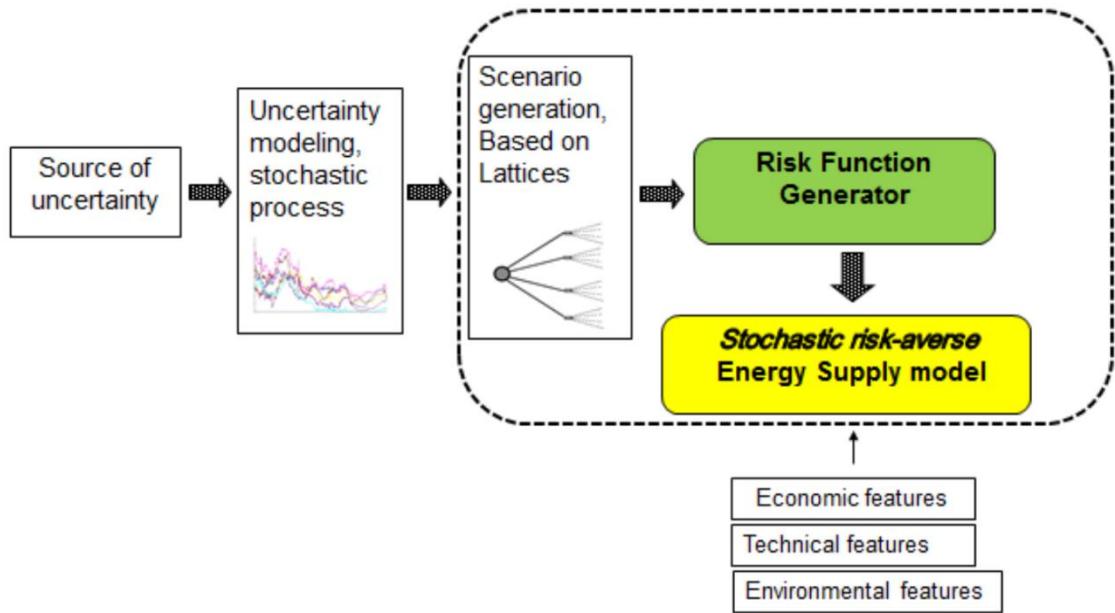
در حالت کلی ماتریس پارامترهای برونزای  $A, B, C$  در رابطه فوق می‌توانند دارای عدم قطعیت باشند. رابطه فوق

بیانگر مدل انرژی تصادفی ریسک‌گریز می‌باشد که می‌تواند به شکل مدل قطعی معادل نوشته شود. در حالی که قیود آن برای تک سناریوهای تصادفی برقرار باشد؛ به طور همزمان حل گردد. از آنجایی که این مدل برای برنامه‌ریزی سیستم انرژی در بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این شرایط چندشاخگی تودرتوی سناریوهای احتمالی منجر به افزایش نمایی تعداد متغیرها و معادلات می‌گردد که حجم محاسباتی مسئله را بسیار زیاد می‌کند. برای پوشش این چالش می‌توان در معادلات بالا ماتریس متغیرهای تصادفی  $X$  را با ماتریس امید ریاضی این متغیرها جایگزین نمود. با این فرض، معادلات مسئله به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \tilde{C}_1^T X_1 \cdot r(1) + E[\tilde{C}_2^T] \cdot \bar{X}_2 \cdot r(2) + \lambda_2 \cdot D_2 [\tilde{C}_2^T] \cdot \bar{X}_2 \cdot r(2) + \dots \\ & \dots + E[\tilde{C}_T^T] \cdot \bar{X}_T \cdot r(T) + \lambda_T \cdot D_T [\tilde{C}_T^T] \cdot \bar{X}_T \cdot r(T) \end{aligned} \quad (28)$$

*S.t.*  $\tilde{A} \cdot \bar{X} \geq \tilde{B}$

این مدل هزینه کل سیستم انرژی به ازای مقادیر متوسط متغیرهای تصادفی را به همراه هزینه ریسک ناشی از وجود عدم قطعیت در سیستم و تحت قیود تعریف شده برای مدل کمینه می‌نماید. در این مدل ابتدا منابع عدم قطعیت مشابه مدل ریسک خنثی توسط شبکه گسسته‌سازی شده از سناریوهای تصادفی به عنوان ماجولی از مدل انرژی مدلسازی می‌گردند، سپس ضرایب توابع ریسک مطابق با روابط فوق توسط ماجول به هم پیوسته دیگری که Risk Function نامیده می‌شود، تولید می‌گردند. مزیت این رویکرد، مدلسازی منابع عدم قطعیت و محاسبه ریسک به صورت Generator به هم پیوسته درون مدل انرژی می‌باشد. شکل ۱-۵ ساختار کلی فرایندهای توسعه داده شده برای مدل انرژی تصادفی ریسک‌گریز را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵: ساختار کلی فرایندهای توسعه داده شده برای مدل انرژی تصادفی ریسک گریز

## ۲-۵- مدلسازی توابع ریسک در مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز

معرفی توابع ریسک در مدل برنامه‌ریزی ریاضی و تبدیل تابع هدف به تابع Utility مسئله بهینه‌سازی را با جنبه‌های حل‌پذیری و پایداری در نتایج مواجه می‌سازد. توسعه توابع ریسک ساختاریافته بر پایه اصول موضوع<sup>۶۴</sup> و کاربرد این توابع در مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای، تحدب<sup>۶۵</sup> و پایداری<sup>۶۶</sup> مسئله را تأمین می‌نماید. استفاده از تئوری ترجیحات تصادفی<sup>۶۷</sup> برای توابع ریسک ساختاریافته، بیان می‌دارد که بازگشت مقادیر بهینه یک پورتفولیو برای این توابع، غیر ارجح بوده است. بدین معنی که با توجه به معیار ترجیح تصادفی مرتبه دوم، هیچ جواب بهینه‌تری از لحاظ کاهش ریسک برای آن وجود ندارد. یکی از ویژگی‌های ثانویه توابع ریسک ساختاریافته خاصیت Sub-additivity می‌باشد که باعث می‌گردد تا ریسک مجموعه متنوعی از انتخاب‌ها کمتر از مجموع ریسک تک آن‌ها باشد. این خاصیت منجر به ایجاد می‌گردد و به عنوان مهمترین دستاوردهای کاهش ریسک مطرح می‌باشد.

همان طور که گفته شد کاربرد توابع ریسک ساختاریافته برای مدل‌های تصادفی انرژی Bottom-up بسیار محدود می‌باشد، لذا با توجه به اهمیت و توانایی موجود در این گروه از توابع ریسک برای مدل‌های پویا و چندمرحله‌ای، از مدل عرضه انرژی ریسک گریز استفاده شد. انتخاب نوع توابع ریسک ساختاریافته می‌تواند با توجه به متغیرهای تصادفی مورد

<sup>64</sup> Axioms

<sup>65</sup> Convexity

<sup>66</sup> Stability

نظر متفاوت باشد. بدین معنی که زمانی که رخدادهای کم احتمال ولی با اثر زیاد اولویت داشته باشند و ریسک قسمت انتهایی تابع توزیع احتمالی پر اهمیت باشند، از تابع CVaR استفاده می‌گردد ولی زمانی که ریسک انحرافات دارای اهمیت وزنی مشابه می‌باشد، از توابع انحراف مرکزی مانند Semi-upper-deviation استفاده می‌گردد.

در مدل انرژی ریسک‌گریز توسعه داده شده، منابع متنوعی از پارامترهای بروزرا همراه با عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شوند. تقسیم‌بندی این پارامترها شامل پارامترهای موجود در ضرایب تابع هدف مدل (از جمله قیمت حامل‌های انرژی اولیه و هزینه فناوری‌ها)، پارامترهای موجود در ضرایب سمت چپ قیود مدل (مربوط به راندمان فناوری‌ها و پارامترهای موجود در ضرایب سمت راست قیود مدل (مربوط به تقاضای انرژی مفید) می‌باشد. برای پوشش ریسک عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی از تابع ریسک ساختار یافته CVaR استفاده می‌گردد. مطابق با رابطه ۲۹ جزء Deviation تابع ریسک ناشی از اختلاف مثبت قیمت حامل‌های انرژی نسبت به مقدار متوسط انتظاری که به عنوان انحرافات نامطلوب قیمت انرژی مطرح می‌باشد، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$D_{t, \text{Energy price}} = CVaR @ \alpha_t (\tilde{P}_t - E[\tilde{P}_t]), \quad (29)$$

$\tilde{P}_t = \text{Matrix of uncertain energy prices}$

ماتریس  $D$  به عنوان ضریبی از ماتریس متغیرهای جریان انرژی در تابع هدف مدل انرژی لحاظ می‌گردد. به طریق مشابه، از تابع CVaR برای پوشش ریسک عدم قطعیت هزینه فناوری‌های انرژی استفاده می‌گردد. در این صورت به طریق مشابه، جزء Deviation تابع ریسک ناشی از اختلاف مثبت هزینه فناوری‌ها نسبت به میزان متوسط انتظاری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{t, \text{Tech. cost}} = CVaR @ \alpha_t (\tilde{Tc}_t - E[\tilde{Tc}_t]), \quad (30)$$

$\tilde{Tc}_t = \text{Matrix of uncertain technology costs}$

این ماتریس به عنوان ضریبی از ماتریس متغیرهای افزایش ظرفیت در تابع هدف مدل لحاظ می‌گردد. همچنین فرض می‌گردد هزینه فناوری‌های قدیمی و توسعه یافته<sup>۶۸</sup> با عدم قطعیت مواجه نمی‌باشند لذا ضریب ریسک ( $\lambda$ ) برای آنها صفر می‌باشد.

مهمنترین پارامترهای دارای عدم قطعیت در قیدهای مدل شامل ضرایب راندمان فناوری‌ها و مقادیر تقاضای انرژی می‌باشد. تعریف توابع ریسک برای تغییرات ناشی از عدم قطعیت برای این پارامترها در تابع هدف می‌بایست به گونه‌ای

<sup>68</sup> Mature

باشد که هزینه‌های (پنالتی) ناشی از انحرافات غیرمطلوب آنها منجر به تشکیل تابع Utility مناسب گردد. از آنجایی که واحد و دیمانسیون پارامترهای راندمان و تقاضای انرژی از جنس هزینه نمی‌باشد، روش معرفی شده برای تولید توابع ریسک مبتنی بر دیمانسیون متغیر هزینه و از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول آن منعکس کننده هزینه (پنالتی) واحد و جزء دوم آن معرف انحرافات بدون بعد می‌باشد. جریان انرژی گذرنده از هر حجم کنترل در نمودار مرجع انرژی یک متغیر حالت می‌باشد. محاسبه هزینه حاشیه‌ای<sup>69</sup> برای جریان متوسط گذرنده از هر حجم کنترل، شاخصی از قیمت جریان انرژی گذرنده از آن حجم کنترل می‌باشد. این شاخص بیانگر آن است که به ازای هر واحد اضافی از جریان انرژی خروجی از حجم کنترل (فناوری) چه هزینه‌ای به کل سیستم انرژی وارد می‌گردد. برای محاسبه MC جریان خروجی از یک حجم کنترل (فناوری) در سیستم انرژی، ابتدا برای هر مقطع زمانی مقدار  $\frac{\Delta \text{Total cost}}{\Delta \text{Energy flow}}$  محاسبه می‌گردد. غالباً در محاسبات  $\Delta \text{Energy flow} = 1$  درنظر گرفته می‌شود. سپس جمع تنزیل یافته مقادیر محاسبه شده به عنوان هزینه حاشیه‌ای بلند مدت بدست می‌آید. جمله مربوط به انحرافات، از تقسیم تفاضل مقادیر نامطلوب از مقدار متوسط انتظاری نسبت به مقدار متوسط انتظاری بدست می‌آید. بر این اساس جزء انحرافي تابع ریسک برای عدم قطعیت تقاضای انرژی با رویکرد Semi-upper-deviation مطابق رابطه زیر نمایش داده می‌شود:

$$D_{t, \text{Energy demand}} = E\left(\left\{\frac{\tilde{D}_{\text{em}_t} - E[\tilde{D}_{\text{em}_t}]}{E[\tilde{D}_{\text{em}_t}]} \right\}_+ \right). MC_{\text{Energy flow}} \quad (31)$$

$\tilde{D}_{\text{em}_t}$  = Matrix of uncertain energy demand

$MC_{\text{Energy flow}}$  = Marginal cost of final energy flow

لازم به ذکر است در محاسبه MC تقاضای انرژی مفید مطابق با نمودار مرجع انرژی، از آنجایی که ورودی و خروجی آخرین سطح حجم کنترل‌های بخش انرژی مفید<sup>70</sup> از نوع انرژی مفید می‌باشد، لذا انرژی ورودی به حجم کنترل‌های آن نیز از نوع انرژی مفید است و محاسبه MC تقاضای انرژی خروجی از آن تمایز فناوری‌ها در این سطح را به خوبی منعکس نمی‌کند، از این رو با توجه به تمایز فناوری‌های موجود در سطح قبلی یعنی سطح فناوری‌های انرژی نهایی، محاسبه MC برای سطح انرژی نهایی منعکس کننده تفاوت هزینه انرژی خروجی از فناوری‌های متفاوت بوده و این تفاوت باعث می‌گردد تا اجرای مدل ریسک‌گریز نسبت به مدل ریسک خنثی منجر به تغییر ساختار عرضه انرژی و فناوری‌های آن گردد.

<sup>69</sup> Marginal Cost-MC

<sup>70</sup> Useful Energy

برای تعریف توابع ریسک عدم قطعیت راندمان فناوری‌ها به طریق مشابه عمل می‌گردد. به این ترتیب MC جریان انرژی خروجی از فناوری‌های مورد نظر محاسبه گردیده و انحرافات بی‌بعد شده ضرایب راندمان‌های تصادفی نیز محاسبه می‌گردد. با رویکرد تابع ریسک CVaR جزء انحرافی تابع ریسک عدم قطعیت راندمان فناوری‌ها مطابق با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{t, \text{Efficiency}} = CVaR @ \alpha_t \left( \frac{\tilde{\eta}_t - E[\tilde{\eta}_t]}{E[\tilde{\eta}_t]} \right) MC_{\text{Energy flow}} \quad (32)$$

,  $\tilde{\eta}_t$  = Matrix of uncertain technology efficiency

,  $MC_{\text{Energy flow}}$  = Marginal cost of passing energy flow from technology

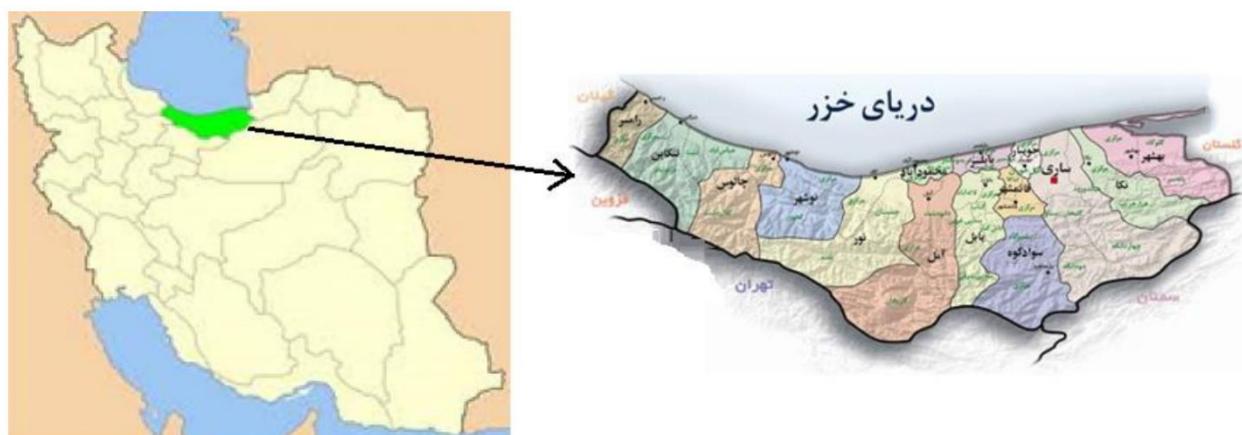
اعمال توابع ریسک رابطه در تابع هدف باعث می‌گردد تا پوشش ریسک نسبت به عدم بهبود انتظاری راندمان فناوری‌ها صورت پذیرد. تدوین کد کامپیوتری مناسب برای هریک از توابع ریسک توضیح داده شده پس از اعتبارسنجی محاسباتی منجر به توسعه ماجول تولید ریسک به عنوان بخشی از مدل عرضه انرژی ریسک‌گریز مطابق با شکل ۱-۵ می‌گردد.

## فصل ۶- کاربرد مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک‌گریز

برای تحلیل نتایج کاربرد مدل توسعه داده شده عرضه انرژی تصادفی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت، از یک سیستم عرضه انرژی مبتنی بر اطلاعات واقعی استفاده می‌گردد. برای این منظور سیستم عرضه انرژی موردنی برای استان مازندران مدل نظر قرار می‌گیرد. سپس نتایج اجرای مدل ریسک‌گریز با نتایج اجرای مدل ریسک خنثی مقایسه و از جنبه‌های متفاوت بررسی می‌گردد. برای این کار از مدل MESSAGE استفاده شده است.

### ۱-۶- سیستم عرضه انرژی (استان مازندران)

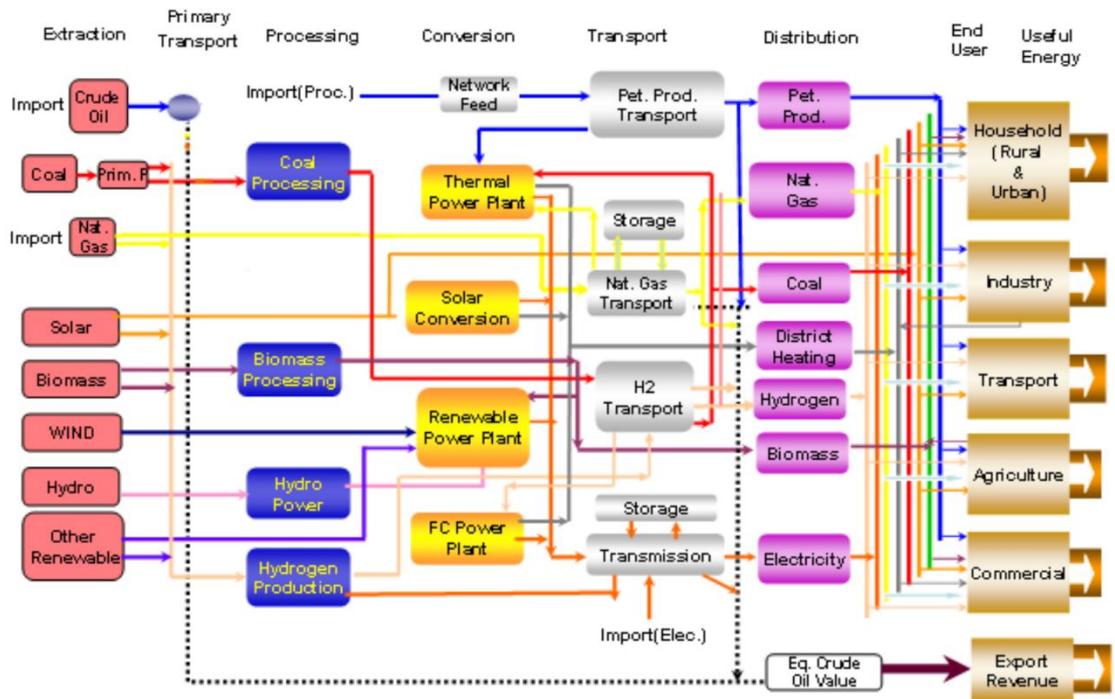
استان مازندران در شمال ایران و سواحل جنوبی دریای خزر واقع شده و دارای وسعت ۲۳/۷۵۶ کیلومتر مربع و جمعیتی بیش از سه میلیون نفر می‌باشد. این منطقه از لحاظ آب و هوایی منطقه‌ای معتدل و مرطوب همراه با پوشش گیاهی حاصل خیز و عمدتاً جنگلی می‌باشد. عمدۀ صنایع موجود در این استان شامل صنایع شیلات، کشاورزی، دامداری، نساجی، معدن و سیمان می‌باشد.



شکل ۱-۶: نقشه استان مازندران

به دلیل عدم وجود منابع هیدروکربنی بالفعل در این استان، انرژی‌های اولیه استان مازندران عمدتاً از طریق واردات گاز طبیعی و دیگر مشتقات نفت خام تأمین شده و در کنار آن علاوه بر واردات بخشی از انرژی برق مورد نیاز، انرژی حاصل از جریان آب، ذغال سنگ و زیست توده جزء منابع اصلی تأمین انرژی این استان می‌باشد. ضمناً این استان از پتانسیل بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیری چون انرژی خورشیدی، انرژی باد و انرژی زمین گرمایی برخوردار می‌باشد.

شکل ۲-۶ نمودار مرجع جریان انرژی برای استان مازندران را نمایش می‌دهد. در این نمودار جریان انرژی از محل استحصال یا واردات به سیستم انرژی به همراه مراحل تبدیل، فراورش، انتقال، توزیع و مصرف نهایی، نشان داده می‌شود.



شکل ۲-۶: نمودار مرجع انرژی استان مازندران

## ۲-۶- مدلسازی منابع عدم قطعیت و توابع ریسک

مطابق با نمودار (۵-۱) قبل از محاسبه توابع ریسک هر یک از منابع عدم قطعیت معرفی شده، مدلسازی منابع عدم قطعیت توسط فرایندهای تصادفی و تولید سناریوهای گسسته تصادفی به هم پیوسته انجام می‌گیرد.

### ۲-۶-۱- مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای قیمت حامل‌های انرژی

قیمت حامل‌های انرژی دارای عدم قطعیت بوده و این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از شرایط بازار، تعادل عرضه و تقاضا و دیگر شرایط اقتصادی، سیاسی، اجتماعی باشد. همچنین رفتار این قیمت‌ها دارای ماهیت تصادفی بوده و برای مدلسازی آنها می‌توان از فرایندهای تصادفی استفاده نمود. مطالعات انجام شده در نتیجه می‌دهد که عدم قطعیت موجود در قیمت حامل‌های انرژی عموماً بیشترین تأثیر را به نسبت سایر عدم قطعیت‌ها در سیستم انرژی به جای می‌گذارند. همچنین مطالعات انجام شده در زمینه تغییرات قیمت‌های انرژی نشان می‌دهد که میان قیمت حامل‌های انرژی و قیمت نفت خام یک همبستگی معنادار وجود دارد. چنانچه ضریب همبستگی<sup>۷۱</sup> مطابق با رابطه زیر محاسبه گردد:

$$\text{Correlation} = \frac{\text{Covariance}(A, B)}{\text{Variance}(A) \times \text{Variance}(B)} \quad (33)$$

<sup>71</sup> Correlation

بر اساس قیمت‌های تاریخی حامل‌های انرژی، ضریب همبستگی میان قیمت نفت خام و سایر حامل‌های انرژی مطابق با جدول زیر بدست می‌آید:

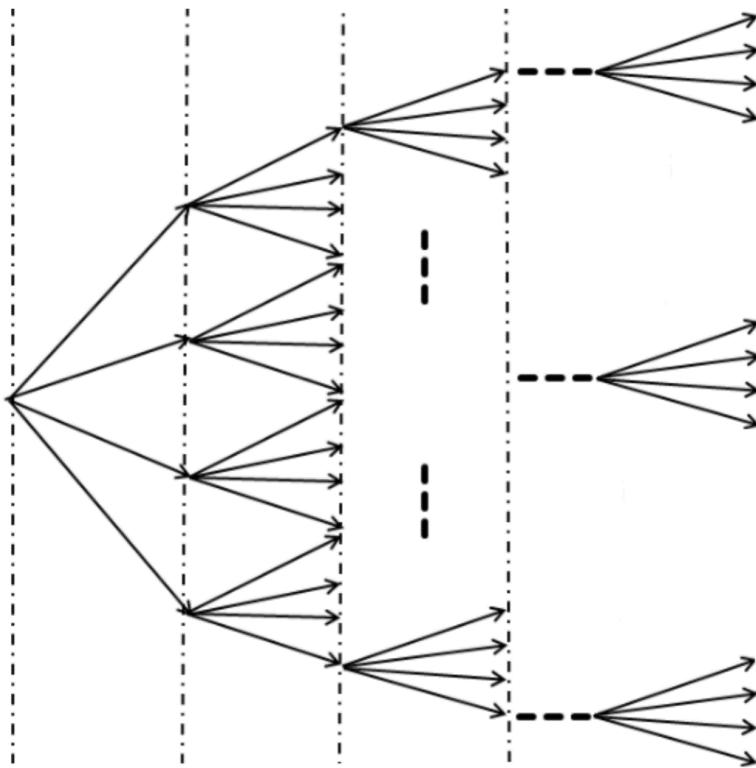
جدول ۱-۶: ضرایب همبستگی قیمت نفت خام و دیگر حامل‌های انرژی

	Crude Oil	Natural Gas	Coal	LPG	Gasoline
Corr. factor	1	0.88	0.48	0.53	0.93
	Jet Fuel	Kerosene	Gas Oil	Fuel Oil	Electricity
Corr. factor	0.99	0.99	0.93	0.95	0.68

ضرایب محاسبه شده نشان می‌دهد که با تقریب معناداری می‌توان تغییرات قیمت حامل‌های انرژی را متناسب با تغییرات قیمت نفت خام درنظر گرفت. برای مدلسازی رفتار تصادفی قیمت نفت خام، گیبسون و شوارتز [۴۸] و به دنبال آن برخی دیگر از تحقیقات، از مدل GBM استفاده نمودند. با توجه به خطای تخمین احتمالی در روش GEM تحقیقات دیگر شامل کارهای شوارتز [۴۹] و به دنبال آن پیندیک [۴۸]، امکان استفاده از فرایند Mean-Reverting را نیز تحت شرایطی برای مدلسازی قیمت نفت خام تأیید نمودند. بر این اساس به ارائه مدلی دوعلایی با نام 2-FMR که در آن از یک مدل GBM برای توضیح رفتار بلند مدت استفاده کرده و به عنوان عامل دوم، یک فرایند Mean-Reversion تصحیحات لازم برای بازگشت مقادیر به سطح متوسط را اعمال می‌نمایند. سپس این فرایند را برای توضیح رفتار قیمت نفت خام مورد اعتبارسنجی قراردادند. بر همین اساس روش 2-FMR در این بخش برای مدلسازی عدم قطعیت قیمت نفت خام مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم گسسته‌سازی و تولید سناریوهای تصادفی برای قیمت نفت خام براساس فرایند تصادفی 2-FMR و اعمال ماجول به هم پیوسته مدل انرژی مطابق با الگوریتم شرح داده شده می‌باشد. بدین ترتیب سناریوهای احتمالی قیمت نفت خام برای یک بازه زمانی ۴۰ ساله تولید می‌گردد. با استفاده از اطلاعات تاریخی قیمت [۵۰] ضرایب مدل 2-FMR برای قیمت نفت خام مطابق با جدول زیر محاسبه گردید.

جدول ۲-۶: ضرایب مدل 2-FMR برای قیمت نفت خام

$K$	Short-term reversion rate	0.789
$\sigma_x$	Short-term volatility	0.267
$\mu_3$	Equilibrium drift rate	-0.0137
$\sigma_3$	Equilibrium volatility	0.161
$\rho_{3x}$	Correlation in increments	-0.124



شکل ۳-۷: تولید ستاریوهای احتمالی قیمت نفت خام بر اساس فرایند تصادفی FMR ۲

در مرحله بعد ضرایب مربوط به ریسک عدم قطعیت ناشی از قیمت حامل‌های انرژی مطابق با رابطه (۲۹) محاسبه می‌گردد. جدول ۳-۶ یکی از حالت‌های مربوط به مقادیر تابع ریسک محاسبه شده برای عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی را نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۶: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی

Energy Carrier	Risk Function Value- Energy Price (\$/wyr)									
	2012	2013	2014	2015	2016	2021	2026	2031	2041	2051
Natural Gas	0.064836	0.087299	0.118175	0.140679	0.143765	0.257973	0.335947	0.421418	0.578995	0.719091
LPG	0.111147	0.149656	0.202586	0.241163	0.246454	0.442239	0.57591	0.722431	0.992564	1.232727
Gasoline	0.120409	0.162127	0.219468	0.26126	0.266991	0.479092	0.623902	0.782633	1.075277	1.335455
Kerosene	0.115778	0.155891	0.211027	0.251212	0.256722	0.460666	0.599906	0.752532	1.03392	1.284091
Gas oil	0.120409	0.162127	0.219468	0.26126	0.266991	0.479092	0.623902	0.782633	1.075277	1.335455
Light fuel Oil	0.069467	0.093535	0.126616	0.150727	0.154033	0.276399	0.359944	0.451519	0.620352	0.770455
Coal	0.030102	0.040532	0.054867	0.065315	0.066748	0.119773	0.155976	0.195658	0.268819	0.333864
Electricity	0.250081	0.336725	0.455818	0.542618	0.554521	0.995038	1.295797	1.625469	2.233268	2.773636

## ۲-۶-۲- مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای ویژگی فناوری‌ها

مطالعه ویژگی‌های یادگیری فناوری‌ها نشان می‌دهد که تغییرات داخلی این منحنی‌ها دارای عدم قطعیت بوده و به عنوان تابعی از ظرفیت تجمعی فناوری دارای ماهیتی غیرخطی می‌باشد. مدلسازی منحنی فرایند یادگیری همراه با عدم قطعیت در مدل‌های انرژی Bottom-up بسیار محدود می‌باشد. در این تحقیقات، عدم قطعیت ویژگی فناوری‌ها

شامل هزینه و راندمان به صورت رفتار تصادفی مدلسازی شده‌اند. در این رساله، عدم قطعیت هزینه و راندمان فناوری‌ها توسط فرایند تصادفی GBM مدلسازی می‌گردد و مشابه با روش گسسته‌سازی توسعه داده شده مبتنی بر شبکه ساریوهای احتمالی، این عدم قطعیت‌ها به صورت بخشی درونی از مدل انرژی لحاظ می‌گردد. در مرحله بعد ضرایب مربوط به ریسک عدم قطعیت ناشی از هزینه و راندمان فناوری‌های انرژی مطابق با روابط قبل محاسبه می‌گردد. جدول ۴-۶ یکی از حالت‌های مربوط به مقادیر تابع ریسک محاسبه شده برای عدم قطعیت هزینه اولیه و راندمان فناوری‌های انرژی را نمایش می‌دهد.

**جدول ۴-۷: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در هزینه و راندمان فناوری‌های انرژی**

Risk Function Value- Technology Cost (\$/w)										
Technology	2012	2013	2014	2015	2016	2021	2026	2031	2041	2051
PV- DG	0.03	0.05955	0.088657	0.117327	0.145567	0.280539	0.405687	0.521727	0.729084	0.907355
PV-power Plant	0.0375	0.0375	0.0375	0.0375	0.0375	0.216729	0.382914	0.537003	0.812351	1.049077
Wind	0.03	0.05955	0.088657	0.117327	0.145567	0.280539	0.405687	0.521727	0.729084	0.907355

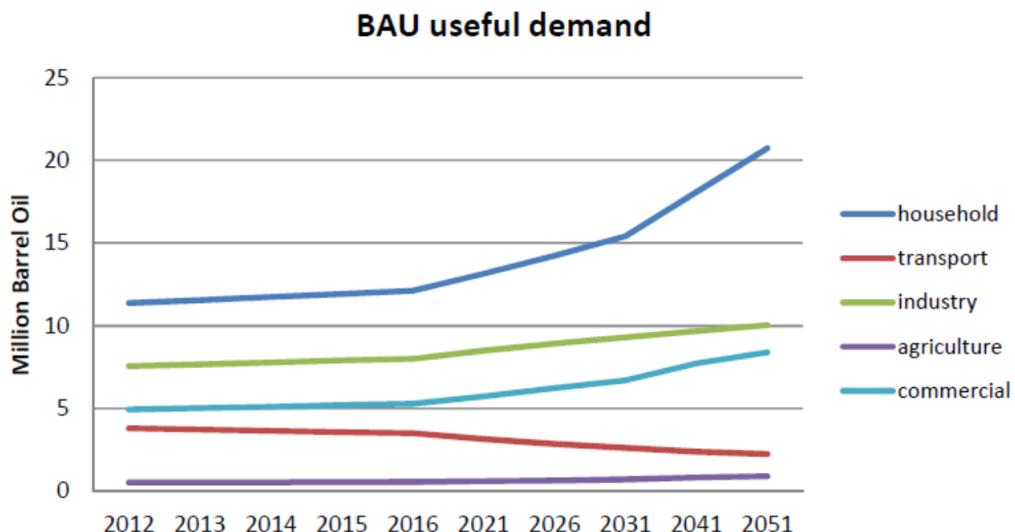
  

Risk Function Value- Technology Efficiency (\$/wyr)										
Technology	2012	2013	2014	2015	2016	2021	2026	2031	2041	2051
Wind	0.912751	0.837688	0.766216	0.698029	0.597257	0.210673	0.034495	0.072389	0.01444	0.009
PV- DG	0	0	0	0	1.115393	1.41528	1.808916	2.308382	3.769357	6.147146

### ۴-۲-۳- مدلسازی عدم قطعیت و توابع ریسک برای تقاضای انرژی مفید

صرف انرژی مفید به عنوان آخرین سطح از نمودار مرجع جریان انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری، حمل و نقل، صنعتی و کشاورزی مطرح می‌باشد. انرژی ثانویه پس از تحويل به مصرف کنندگان نهایی به شکل انرژی مفید مورد استفاده قرار می‌گردد. عدم قطعیت تقاضای انرژی در کوتاه‌مدت توسط روش‌های پیکسایی، ذخیره‌سازی و واردات مقطعی انرژی قابل پوشش می‌باشد، حال آنکه عدم قطعیت بلند مدت تقاضای انرژی نیازمند تغییرات زیربنایی سیستم انرژی و تغییرات در ساختار و ظرفیت فناوری‌های انرژی می‌باشد. در سیستم انرژی مورد بررسی در این بخش برای تحلیل نتایج مدل عرضه انرژی ریسک‌گریز، افق زمانی بلند مدت موردنظر بوده و از این حیث عدم قطعیت‌های بلند مدت تقاضای انرژی به عنوان منبع عدم قطعیت وارد مدل می‌گردد. روند تقاضای انرژی مفید در حالت قطعی با استفاده از مدل تقاضای انرژی MADE-II قابل استخراج می‌باشد. شکل ۴-۶ نتایج استفاده از این مدل به ازای ساریوی BAU<sup>72</sup> را برای سیستم عرضه انرژی استان مازندران نشان می‌دهد.

<sup>72</sup> Business As Usual



شکل ۴-۶: تقاضای انرژی مفید بخش‌های مختلف بدست آمده از مدل تقاضای انرژی

با یک فرض منطقی، عدم قطیت تقاضای انرژی به صورت یکتابع توزیع نرمال حول روندهای نشان داده شده در شکل ۴-۶ قابل تصور می‌باشد. مدلسازی این عدم قطعیت مشابه با روش توضیح داده شده مبتنی بر شبکه گستته سناریوهای احتمالی انجام می‌پذیرد.

در مرحله بعد ضرایب مربوط به ریسک عدم قطعیت ناشی از تقاضای انرژی مطابق با روابط قبل محاسبه می‌گردد.

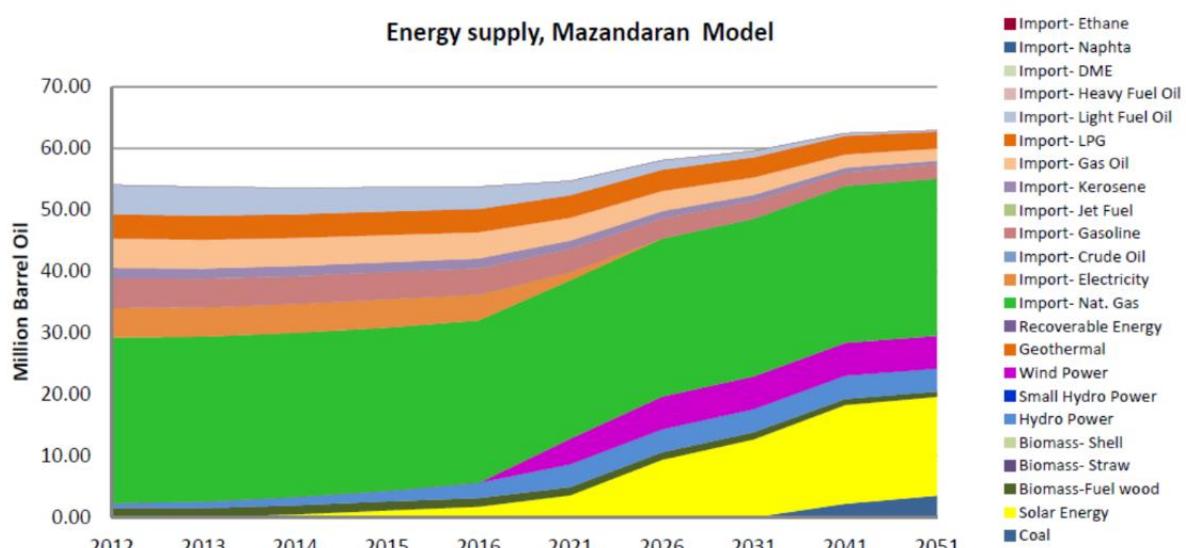
جدول ۵-۶ یکی از حالت‌های مربوط به مقادیر تابع ریسک محاسبه شده برای عدم قطعیت در تقاضای بلند مدت انرژی مفید در بخش خانگی را نمایش می‌دهد.

جدول ۵-۶: نمونه‌ای از مقدار تابع ریسک برای عدم قطعیت در تقاضای انرژی مفید خانگی

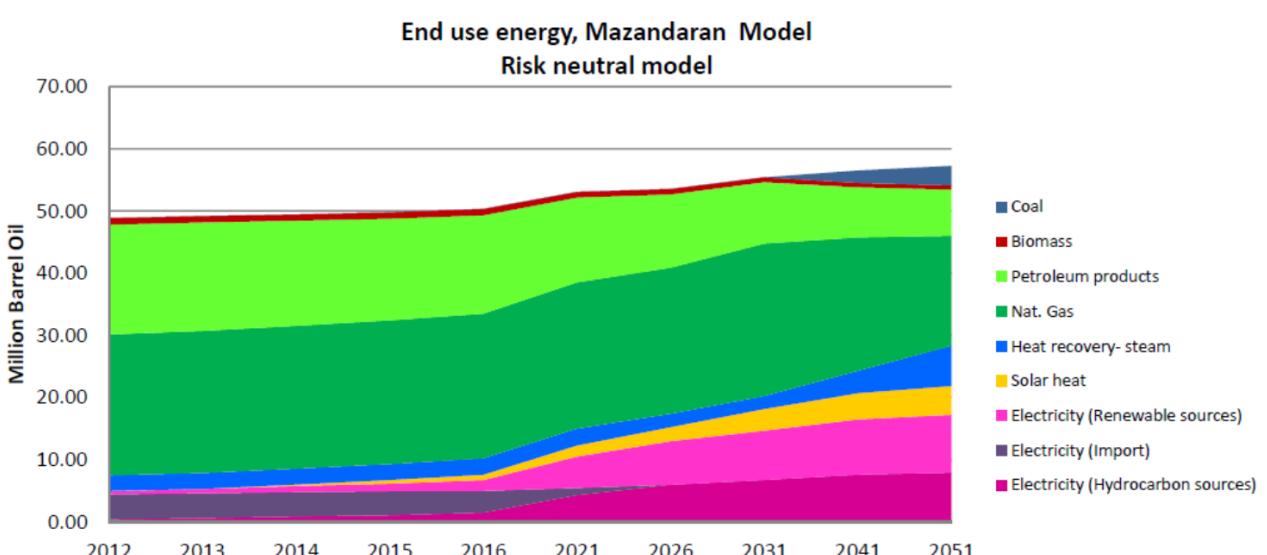
Useful demand	2012	2013	2014	2015	2016	2021	2026	2031	2041	2051
Heat- elec heat	0.803724	0.771197	0.732577	0.697467	0.813985	0.661391	0.552647	0.525472	0.30861	0.201509
Heat- elec DG	1.259511	1.163072	1.063373	1.000638	1.067067	0.811211	0.707609	0.584277	0.305909	0.124757
Heat- NG	0.00	0.08464	0.108068	0.122301	0.189793	0.20131	0.141042	0.181989	0.055864	0.015715
Heat- LPG	0.00	0.29678	0.273077	0.260566	0.944743	0.648987	0.519088	0.741668	0.466808	0.291107
Heat- Kerosene	0.00	2.653097	2.55108	2.454205	2.425799	1.937252	1.605431	1.348147	0.775009	0.359905
Heat- Central-NG	0.00	0.210742	0.226094	0.235732	0.244935	0.244564	0.168836	0.186806	0.062449	0.017358
Heat- Central-LPG	0.400435	0.371617	0.350588	0.335331	0.948796	0.66664	0.525827	0.705134	0.442612	0.275674
Heat- Central-Gas oil	0.430629	0.398575	0.453216	0.516892	0.720395	0.798709	0.806333	0.819596	0.568416	0.291393
HW- Central-NG	1.15E-05	0.283348	0.298201	0.301784	0.325854	0.333562	0.22695	0.268099	0.197593	0.148751
HW- Central-LPG	0.463213	0.427584	0.40429	0.387627	1.086836	0.766517	0.607556	0.83336	0.566567	0.381358
HW- Central-Gas Oil	0E+00	0.835755	0.877446	0.929272	1.12313	1.102303	1.053323	1.028023	0.72886	0.400451
Heat district-Heat	0.188353	0.193601	0.204469	0.213527	0.223206	0.192421	0.137929	0.138059	0.115417	0.106139
Heat district-HW	0.233497	0.228807	0.239415	0.24835	0.259233	0.229964	0.162274	0.197441	0.137291	0.113141
Heat-Solar	0.136871	0.129085	0.113095	0.105501	0.093342	0.079471	0.040523	0.042543	0.045	0.047
Heat-Solar-HW	0.169784	0.157671	0.14087	0.132344	0.112308	0.099725	0.068137	0.068137	0.061781	0.058671
Heat- Fuel Wood	3.228588	3.427992	3.22706	3.034379	2.835662	1.977843	1.462067	1.122774	0.600046	0.279242
HW-Electric	0.962659	0.906077	0.852479	0.8039	0.791932	0.632867	0.632867	0.592768	0.380476	0.213183
HW-Electric- DG	1.873026	1.763243	1.652624	1.574803	1.75508	1.406692	1.150878	0.95984	0.594144	0.313977
HW- Nat Gas	7.64E-05	0.108679	0.130392	0.14584	0.189098	0.210203	0.163332	0.225456	0.152025	0.114909
HW- LPG	0.363752	0.343395	0.324681	0.311723	0.965272	0.664195	0.537638	0.769046	0.521228	0.345645
HW- Kerosene	0.04966	0.009741	0.006303	0.004202	0.062724	0.046375	0.054626	0.297158	0.365001	0.462029

### ۳-۶- اجرای مدل انرژی ریسک خنثی

برای تحلیل نتایج اجرای مدل توسعه داده شده، ابتدا نتایج اجرای مدل انرژی ریسک خنثی برای سیستم عرضه انرژی استان مازندران بدست می‌آید. سپس با اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز نتایج با هم مقایسه و مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۵-۶ ترکیب بهینه عرضه انرژی‌های اولیه در مدل ریسک خنثی برای سیستم انرژی استان مازندران را نمایش می‌دهد. این نتایج در سال پایه ۲۰۱۲ با اطلاعات ترازنامه انرژی مقایسه و اعتبار سنجی گردیده است.



شکل ۵-۶: نتایج مدل ریسک خنثی برای ترکیب بهینه عرضه انرژی اولیه



شکل ۶-۶: نتایج مدل ریسک خنثی برای ترکیب بهینه عرضه انرژی نهایی

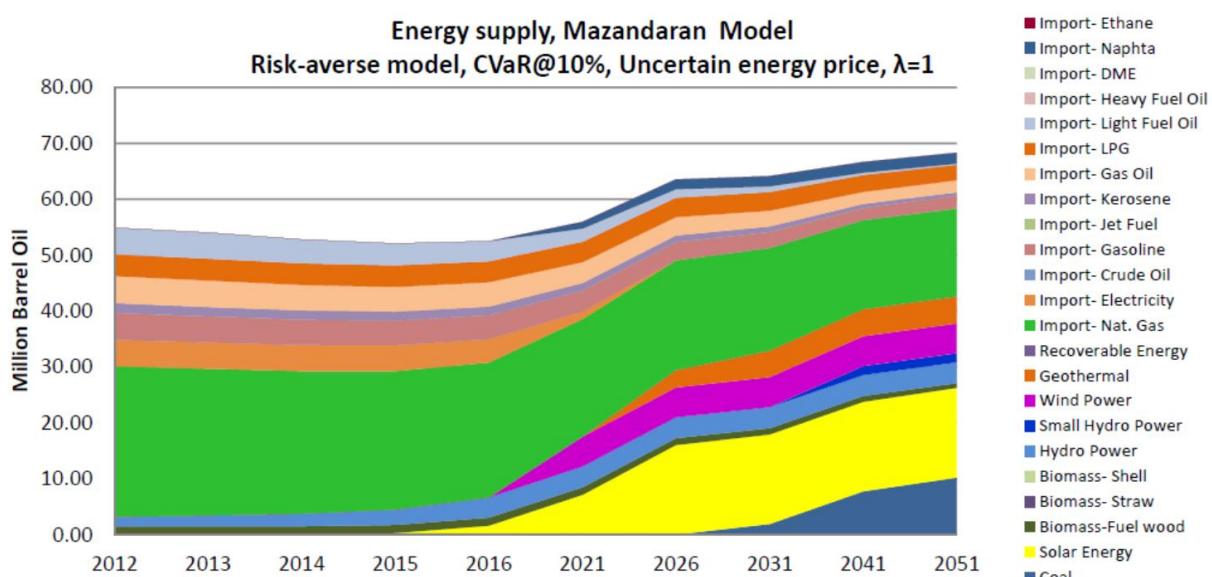
همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین سهم سبد عرضه انرژی شامل گاز طبیعی می‌باشد و در کنار آن مشتقات نفتی بیشترین سهم را بر عهده دارند. بر اساس نتایج مدل انرژی، به تدریج پس از گذشت یک دهه، برای حالت بهینه، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، هیدرو و باد در سبد عرضه انرژی اولیه افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۶-۶ ترکیب بهینه عرضه انرژی نهایی در این سیستم انرژی را نشان می‌دهد. در این میان سهم حامل گاز و فراورده‌های نفت بیشتر بوده و به تدریج سهم برق حاصل از منابع تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. در این نتایج ریسک ناشی از تغییرات احتمالی پارامترهای دارای عدم قطعیت لحاظ نگردیده‌اند.

#### ۶-۴-۱- اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز

برای بررسی نتایج مدل انرژی ریسک‌گریز این مدل با درنظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری و راندمان فناوری‌ها و تقاضای انرژی مفید اجرا می‌گردد.

#### ۶-۴-۲- نتایج اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی

در این بخش نتایج اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز با درنظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت حامل‌های انرژی بررسی می‌گردد. شکل ۶-۷ ترکیب بهینه عرضه انرژی اولیه با احتساب تابع ریسک CVaR همراه با درصد اطمینان ۹۰ درصد را نشان می‌دهد که در آن ۱۰ درصد انتها می‌توان احتمالی، زیان‌های ناشی از افزایش احتمالی قیمت حامل‌های انرژی را مدنظر قرار داده و برای آن ضریب ریسک‌گریزی  $\lambda = 1$  لحاظ می‌گردد.



شکل ۶-۷: نتایج مدل ریسک‌گریز برای ترکیب بهینه عرضه انرژی اولیه

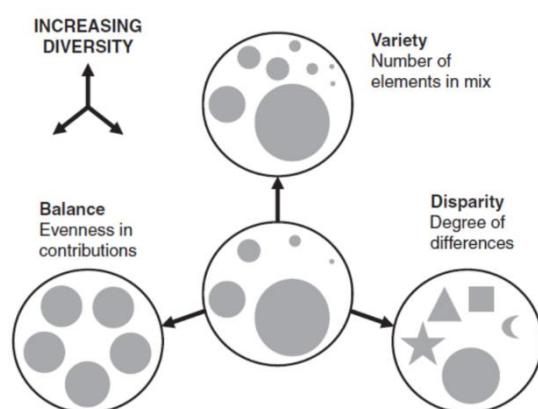
زمانی که بابت ریسک افزایش احتمالی قیمت حامل‌های انرژی، هزینه پوشش ریسک، توسط توابع ریسک، به تابع هدف مدل انرژی اضافه می‌گردد، ساختار عرضه انرژی دچار تغییر می‌گردد. در این شرایط نتایج مدل سعی می‌نماید تا از ایجاد هزینه و خسارت بیشتر در صورت وقوع عدم قطعیت احتمالی جلوگیری نماید. بدین وسیله بر اساس خاصیت Sub-additivity Diversification در ساختار سیستم عرضه انرژی موجب کمینه کردن این ریسک و هزینه‌های مربوطه می‌گردد. مطابق با شکل ۶-۷ در این شرایط با اضافه شدن حامل‌های جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی، انرژی برق حاصل از نیروگاه‌های آبی کوچک مقیاس، Diversification و افزایش امنیت عرضه انرژی در نتایج مدل ریسک‌گریز قابل مشاهده می‌باشد. برای تحلیل تنوع‌بخشی به صورت کمی می‌توان از شاخص‌های ریاضی مربوطه استفاده نمود. بر این اساس مطابق با شکل ۶-۸ Diversification، می‌تواند در حالت عمومی شامل سه ویژگی باشد که البته با توجه به ماهیت موضوع مورد بحث برای ارزیابی ریسک لزوماً همه آنها قابل استفاده نخواهد بود.

(۱) Variety: بیان کننده تنوع نوع گزینه‌های (Options) قابل انتخاب می‌باشند. این کمیت پاسخ به سوال "تعداد

نوع گزینه‌های قابل انتخاب چه می‌باشد؟" است.

(۲) Balance: بیان کننده تابعی از تسهیم سیستم انرژی میان گزینه‌های شناسایی شده می‌باشد. این کمیت پاسخ به این سوال "چه میزان می‌توان به هر گزینه اعتماد نمود؟" است.

(۳) Disparity: بیان کننده چگونگی تمایز گزینه‌ها از یکدیگر می‌باشد. این کمیت پاسخ به این سوال "چه مقدار گزینه‌های شناسایی شده با یکدیگر متفاوت می‌باشند؟" است. این شاخص در سیستم‌های انرژی کمتر مورد استفاده و رجوع قرار می‌گیرند.

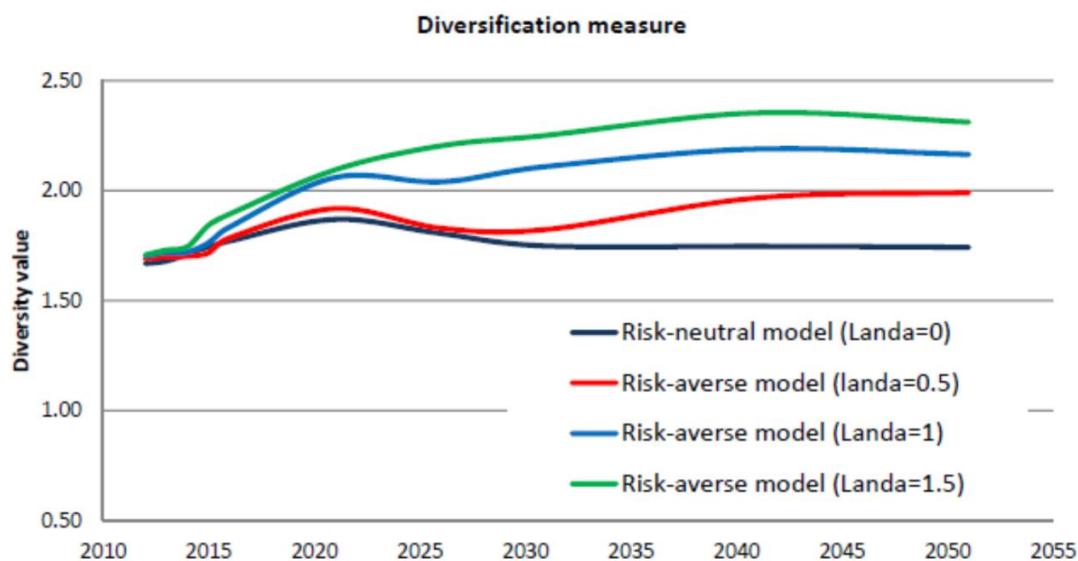


شکل ۶-۷: ویژگی‌های تشکیل دهنده Diversification

با توجه به ماهیت جریان‌های انرژی در سیستم عرضه انرژی، برای ارزیابی تنوع بخشی در نتایج مدل عرضه ریسک‌گریز از تابع Shanon-Wiener مطابق با رابطه زیر استفاده می‌گردد. این رابطه ویژگی‌های Variety و Balance را همزمان در بر می‌گیرد.

$$A = - \sum_i p_i \ln(p_i) \quad (34)$$

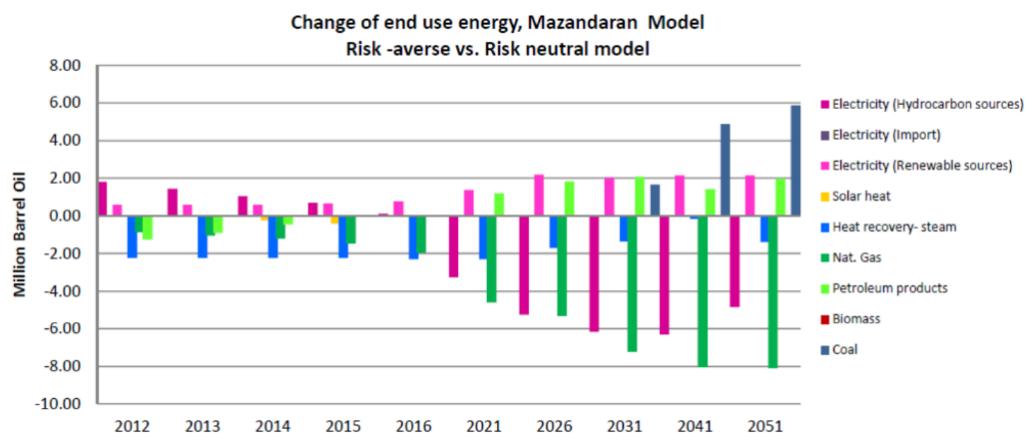
در این رابطه  $p_i$  بیانگر نسبت جریان انرژی  $i$  در پورتفولیوی کلی جریان انرژی می‌باشد. میزان Diversification با تغییر درجه ریسک‌گریزی (ضریب  $\lambda$ ) قابل تغییر می‌باشد. شکل ۶-۹ نشان می‌دهد که با تغییر ضریب ریسک‌گریزی، میزان شاخص Diversification در سیستم عرضه انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۶-۹: بررسی میزان Diversification در نتایج مدل ریسک‌گریز نسبت به تغییرات ضریب ریسک‌گریزی

ایجاد شده نه تنها در سبد حامل‌های انرژی بلکه در ساختار فناوری‌های عرضه انرژی و ترکیب بهینه انرژی‌های نهایی تأثیر می‌گذارد و از این طریق امنیت عرضه انرژی را افزایش می‌دهد. شکل ۶-۱۰ تغییرات ترکیب انرژی‌های نهایی عرضه شده میان مدل انرژی ریسک‌خنثی و مدل ریسک‌گریز ( $\lambda = 1$ ) را نمایش می‌دهد.

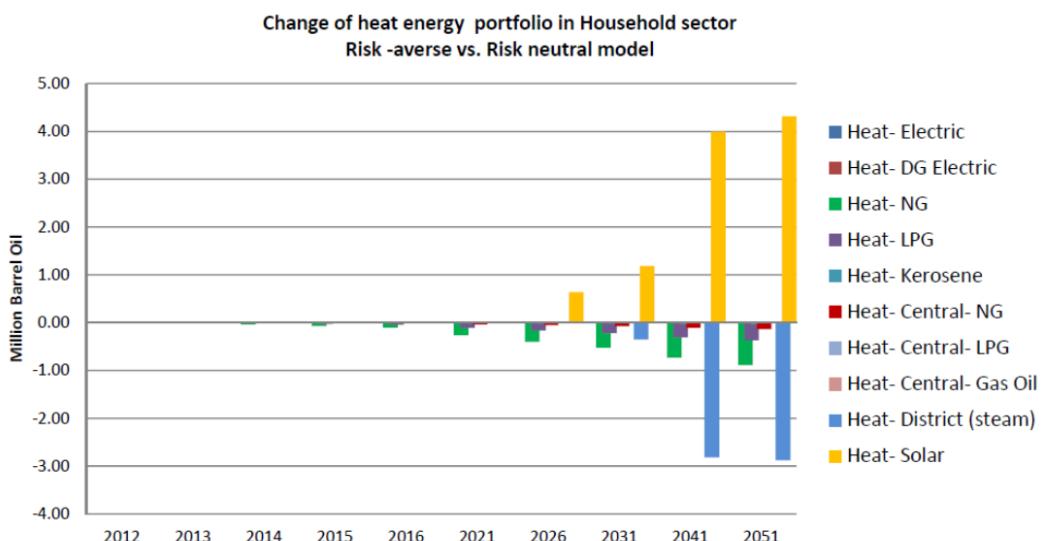
مشاهده می‌گردد که پوشش ریسک نوسان قیمت حامل‌های انرژی باعث می‌گردد تا سهم عرضه گاز طبیعی و برق تولیدی توسط منابع هیدروکربنی کاهش و توسط برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر و همچنین ذغالسنگ جایگزین گردد.



شکل ۱۰-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی نهایی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک ختنی

#### ۶-۴-۲-نتایج اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت تقاضای مفید انرژی

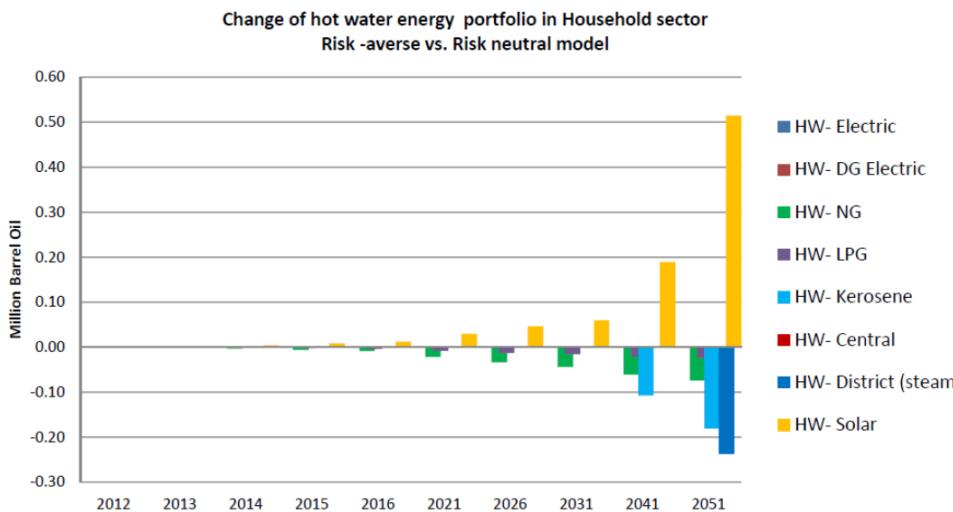
به منظور بررسی نتایج مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت تقاضای انرژی، دو نوع انرژی مفید "حرارت" و "آب گرم" در بخش خانگی مورد بررسی قرار می‌گیرند. با استفاده از روش معرفی شده برای تعریف تابع ریسک عدم قطعیت تقاضا، نتایج مدل ریسک‌گریز پوشش ریسک ناشی از افزایش احتمالی نامطلوب تقاضای انرژی بلند مدت را منعکس می‌نماید.



شکل ۱۱-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی مفید (حرارت) در بخش خانگی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک ختنی

این پوشش ریسک باعث می‌گردد تا ساختار فناوری‌های عرضه انرژی به گونه‌ای تغییر یابد که افزایش تقاضای احتمالی را با کمترین هزینه تنزیل یافته نهایی در سیستم عرضه انرژی ناشی از مجموعه هزینه‌های ثابت و متغیر به همراه راندمان فناوری‌ها و ظرفیت تاریخی آنها در سیستم انرژی جبران نماید. مقایسه نتایج مدل ریسک‌گریز و مدل

ریسک‌خنثی (شکل‌های ۱۱-۶ و ۱۲-۶) بیان‌کننده افزایش سهم انرژی در دسترس خورشیدی و کاهش عمدتاً سهم انرژی‌های فسیلی و انرژی حاصل از فناوری‌های پرهزینه توزیع حرارت پراکنده<sup>۷۳</sup> برای تولید حرارت می‌باشد.



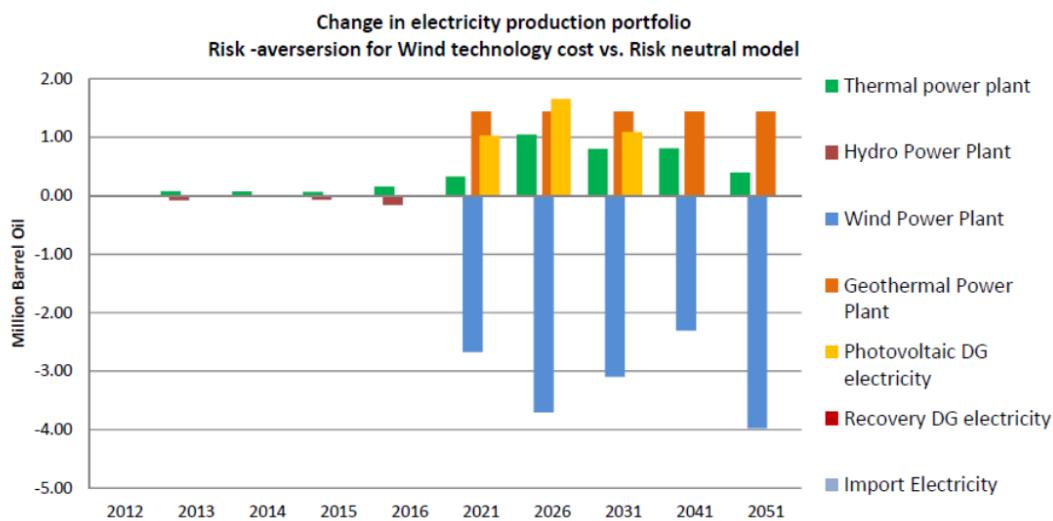
شکل ۱۲-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی مفید (آب گرم) در بخش خانگی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک‌خنثی

### ۶-۴-۳-نتایج اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت فناوری‌های انرژی

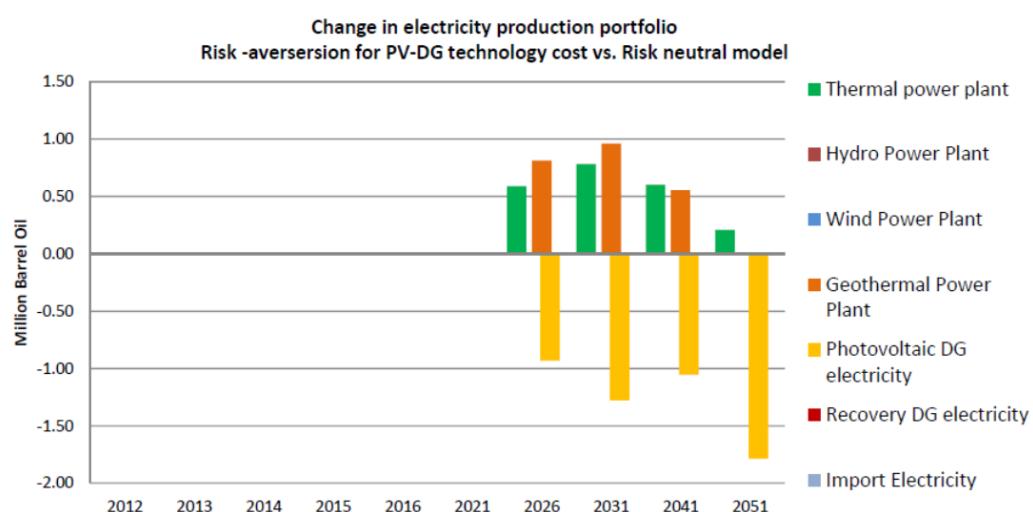
به منظور بررسی نتایج مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط ناشی از عدم قطعیت در هزینه اولیه و راندمان فناوری‌های انرژی، دو فناوری در حال پیشرفت توربین باد و فناوری فتوولتاییک برای تولید برق به صورت پراکنده(DG) بررسی می‌گردند. در شرایطی که پیش‌بینی می‌گردد هزینه این فناوری‌ها طی زمان و با توجه به فرایند یادگیری کاهش یابد، اجرای مدل ریسک‌گریز پوشش ریسک عدم کاهش احتمالی هزینه این فناوری‌ها را منعکس می‌نماید.

نتایج مدل نشان می‌دهد که بر اساس شکل ۱۳-۶ پوشش ریسک هزینه فناوری‌های توربین باد نسبت به نتایج مدل ریسک‌خنثی باعث نفوذ فناوری‌های تولید برق مبتنی بر گاز طبیعی، انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی می‌گردد. همچنین پوشش ریسک هزینه فناوری فتوولتاییک باعث نفوذ فناوری‌های مبتنی بر گاز طبیعی و زمین‌گرمایی خواهد شد (شکل ۱۳-۶). اعمال همزمان پوشش ریسک نسبت به هزینه فناوری‌های توربین باد و فتوولتاییک مطابق با شکل ۱۴-۶ موجب ایجاد پورتفولیوی پایدار برای عرضه انرژی الکتریکی می‌گردد.

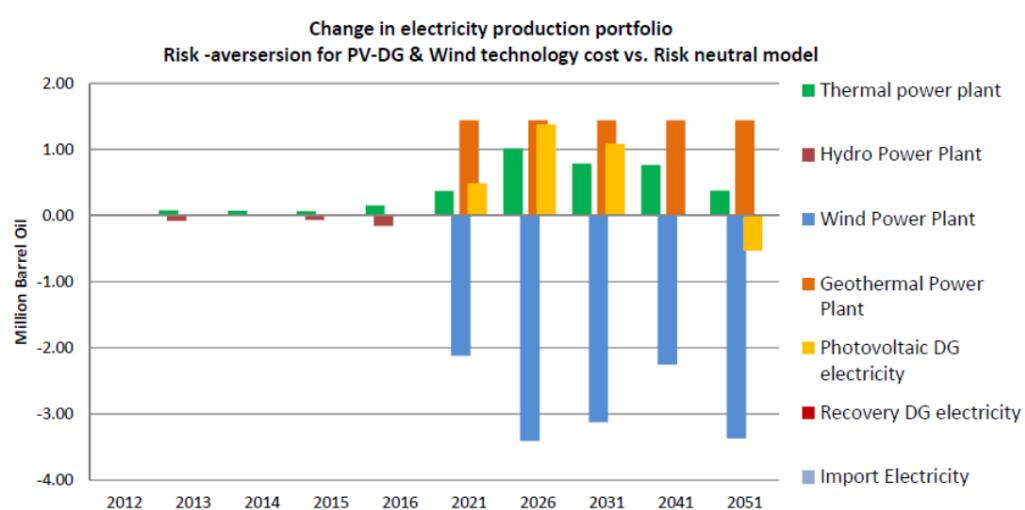
<sup>73</sup> District Heat System



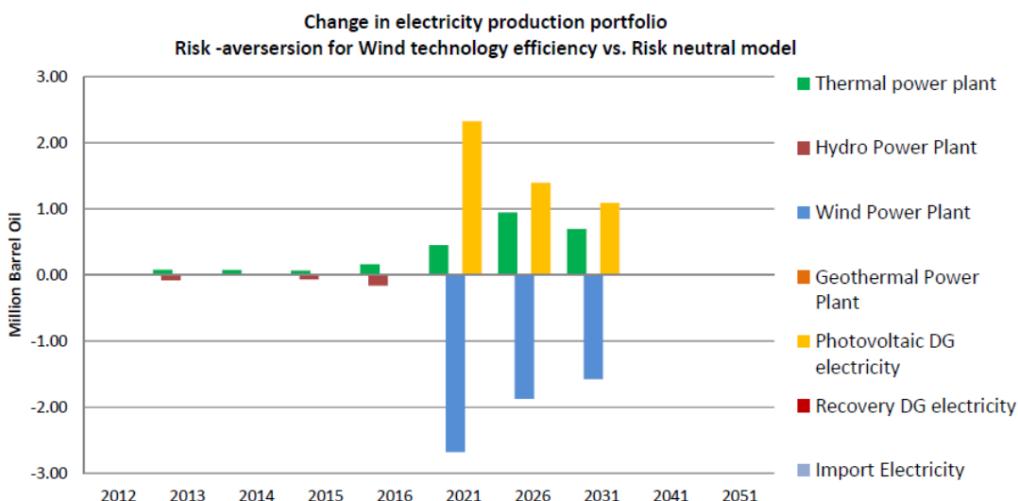
شکل ۱۳-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک گیری و ریسک خشی در راستای پوشنش ریسک هزینه فناوری توربین باد



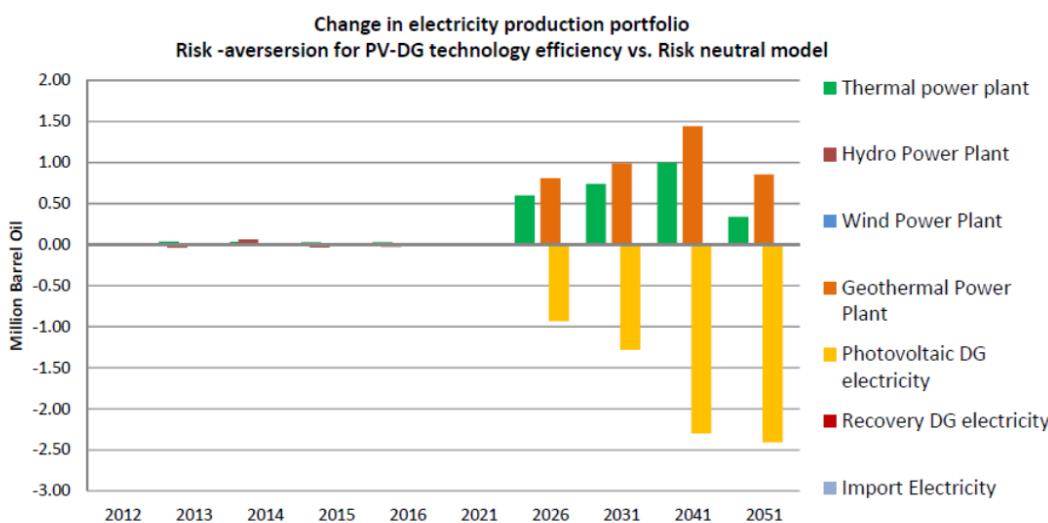
شکل ۱۴-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک گیری و ریسک خشی در راستای پوشنش ریسک هزینه فناوری فتوولتاییک



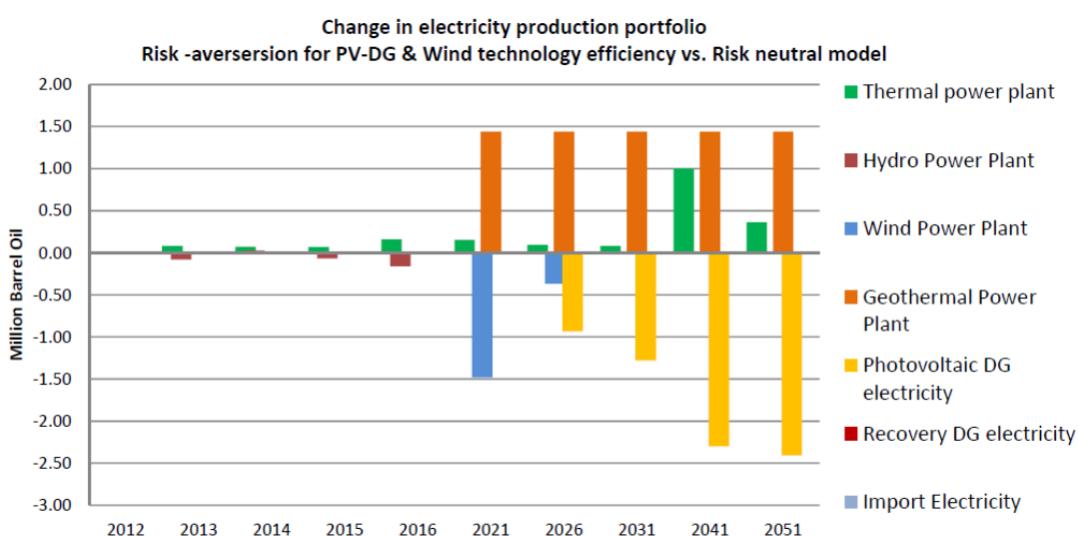
شکل ۱۵-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک گیری و ریسک خشی در راستای پوشنش همزمان ریسک هزینه فناوری توربین باد و فتوولتاییک



شکل ۱۶-۶: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک ختی در راستای پوشش ریسک راندمان فناوری توربین باد



شکل ۱۶-۷: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک ختی در راستای پوشش ریسک راندمان فناوری فتوولتایک

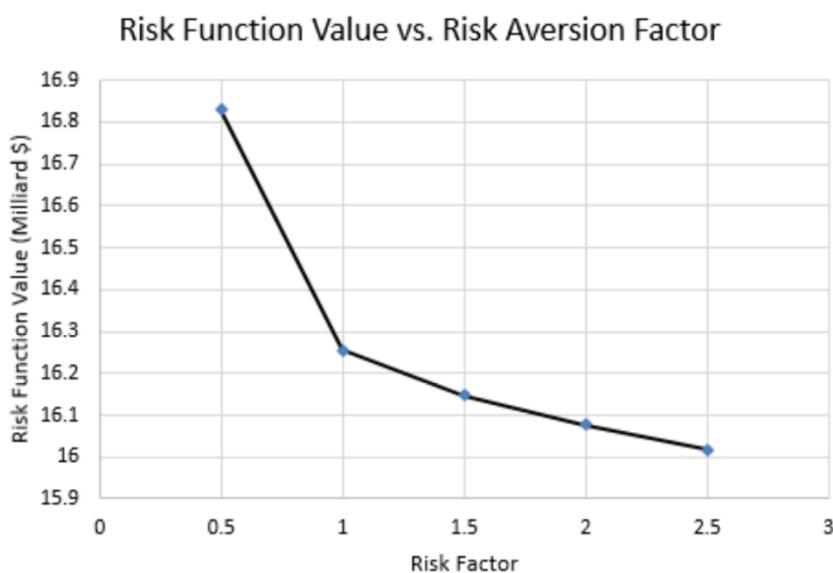


شکل ۱۶-۸: مقایسه ترکیب بهینه عرضه انرژی الکتریکی میان مدل انرژی ریسک‌گریز و ریسک ختی در راستای پوشش همزمان ریسک راندمان فناوری توربین باد و فتوولتایک

در رابطه با عدم قطعیت راندمان فناوری‌های نوین به طور مشابه انتظار می‌رود که راندمان‌ها با توجه به فرایند یادگیری طی زمان افزایش یابند. لذا پوشش ریسک نسبت به عدم افزایش احتمالی راندمان‌ها مدنظر می‌باشد. روش شرح داده شده برای پوشش ریسک عدم قطعیت ناشی از راندمان فناوری‌ها برای دو فناوری توربین باد و فتوولتاییک مطابق شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۶-۶ تغییرات پورتفولیوی انرژی الکتریکی را با درنظرگرفتن عدم قطعیت این دو فناوری به صورت مجزا و همزمان و ارائه پورتفولیوی پایدار نمایش می‌دهد.

#### ۶-۴-۴-نتایج اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط عدم قطعیت توأم پارامترهای ورودی

در راستای مدلسازی سیستم عرضه انرژی پایدار در شرایط وجود همزمان پارامترهای دارای عدم قطعیت، تمامی توابع ریسک تولید شده به صورت همزمان در مدل انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این شرایط تحلیل اثر هر یک از منابع عدم قطعیت در نتایج مدل به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد ولی تأثیر عدم قطعیت‌های قیمت حامل‌های انرژی بیشترین تأثیر را در نتایج مدل بر عهده دارند. با تغییر ضریب ریسک‌گریزی  $\lambda$ ، ساختار عرضه انرژی و هزینه اعمال شده به کل سیستم دچار تغییر می‌گردد. شکل ۱۹-۶ روند تغییر مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات ضریب  $\lambda$  را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۹-۶: تغییر مقادیر تابع هدف مدل انرژی ریسک‌گریز نسبت به تغییرات ضریب ریسک

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب ریسک‌گریزی  $\lambda$  مقدار تابع ریسک کاهش و پایداری در نتایج مدل افزایش می‌یابد.

## فصل ۷- جمع‌بندی

مطابق با مرور بر ادبیات انجام شده در این پژوهش، مشاهده شد که استفاده از سناریوهای برونزآ باعث عدم پوشش مناسب عدم قطعیت‌ها در بخش انرژی می‌گردد، کاربرد سناریوهای برونزآ در مدل انرژی قطعی می‌تواند نتایجی غیر بهینه برای سیاستگذاری در بخش انرژی را موجب گردد، و درنظر نگرفتن اثر ریسک عدم قطعیت‌ها در مدل انرژی می‌تواند به تصمیماتی غیرپایدار برای سیستم انرژی منجر گردد. لذا بر اساس اهداف پژوهشی تعیین شده نتایج بدست آمده به شرح

زیر می‌باشد:

- ۱) به کمک روشی جدید، مدلسازی به هم پیوسته منابع عدم قطعیت در مدل عرضه انرژی توسعه یافت که در آن پارامترهای دارای عدم قطعیت پس از مدلسازی توسط فرایندهای تصادفی، به صورت شبکه‌های از سناریوهای تصادفی گسسته‌سازی شده به مدل انرژی وارد می‌گردد.
- ۲) مدل عرضه انرژی تصادفی چند مرحله‌ای توسعه داده شد که در آن سناریوهای تصادفی به طور همزمان پوشش داده شده و بهینه‌سازی بهره‌برداری و افزایش ظرفیت سیستم عرضه انرژی همزمان مدنظر قرار می‌گیرد.
- ۳) برای پوشش و مدیریت اثر ریسک ناشی از عدم قطعیت‌ها در سیستم عرضه انرژی، مدل عرضه انرژی تصادفی با رویکرد استفاده از توابع ریسک ساختاریافته توسعه داده شد.
- ۴) به کمک روشی جدید، توابع ریسک ساختار یافته برای اعمال در مدل انرژی ریسک‌گریز با درنظر گرفتن مجموعه پارامترهای دارای عدم قطعیت در تابع هدف، ضرایب سمت راست و چپ مدل عرضه انرژی تولید گردید. استفاده از این توابع حل‌پذیری و پایداری مدل برنامه‌ریزی را تضمین می‌نماید.
- ۵) نتایج مدل انرژی تصادفی ریسک‌گریز توسعه یافته در مقایسه با نتایج مدل ریسک‌خنثی مورد ارزیابی قرار گرفت و چگونگی توسعه بهینه فناوری‌های انرژی، سرمایه‌گذاری‌های مرتبط و ترکیب بهینه عرضه حامل‌های انرژی با درنظر گرفتن اثر ریسک بررسی گردید. بر این اساس در مدل ریسک‌گریز جدید، ضمن کمینه شدن ریسک سرمایه‌گذاری‌ها، چگونگی تنوع بخشی در پورتفولیوی بهینه فناوری‌ها و حامل‌های انرژی نتیجه‌گیری گردیده و همراه با ایجاد ساختاری پایدارتر برای سیستم انرژی، امنیت عرضه انرژی افزایش می‌یابد.

## ۱-۷- بحث و نتیجه‌گیری

مدلسازی سیستم انرژی به عنوان ابزاری تحلیلی در قالب معادلات ریاضی به بررسی چگونگی رفتار اجزاء سیستم تحت تأثیر پارامترهای درونی و بیرونی آن می‌پردازد. در این راستا اجرای مدل انرژی به یافتن شرایط بهینه برای طراحی، بهره‌برداری و تخصیص منابع اقتصادی در بخش انرژی می‌پردازد. اگرچه فرایندهای مدلسازی شده در مدل‌های انرژی دارای ماهیتی معین می‌باشند ولی تحولات پیرامون بخش انرژی دارای وجودی نامعین و غیرقطعی بوده و از این حیث کاربرد، مدل‌های انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مرور بر ادبیات مبانی مدل‌های انرژی و همچنین بررسی و معرفی منابع عدم قطعیت در سیستم عرضه انرژی، اهداف پژوهشی ذیل را دنبال می‌کند:

(۱) روشی جدید برای مدلسازی یکپارچه منابع عدم قطعیت ورودی به مدل عرضه انرژی.

(۲) توسعه مدل عرضه انرژی در شرایط عدم قطعیت.

(۳) مدیریت ریسک نتایج مدل عرضه انرژی در شرایط عدم قطعیت.

در فصل دوم از رساله، ابتدا مرور بر ادبیات روش‌های مدلسازی عدم قطعیت‌ها در ارتباط با حوزه سیستم‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، اگرچه عدم قطعیت‌ها را می‌توان توسط روش‌های تحلیل حساسیت و سناریوسازی کمی نموده و اثرات آنها را در مدل‌ها ارزیابی نمود ولی رویکرد سناریوسازی برونزابگونه‌ای است که امکان پوشش همزمان عدم قطعیت‌ها را به همراه نداشته و نتایج حاصل از آن می‌تواند از پایداری و ارجحیت برخوردار نباشد. بررسی انجام شده نمایانگر آن است که در مقابل با سناریوهای برونزابگونه که مبتنی بر ویژگی‌های کیفی متغیرهای مؤثر بوده و وابسته به تجربه و دانش شخص سناریونویس می‌باشند، استفاده از متغیرهای تصادفی می‌توانند کاستی‌های عدم پوشش حالات قابل وقوع موجود در روش سناریوسازی را جبران نماید. برای استفاده از اطلاعات تصادفی پارامترها عمدها از روش‌های نمونه‌گیری و تخمین‌های آماری مبتنی بر اطلاعات تاریخی استفاده می‌گردد. مرور بر ادبیات استفاده از این ابزارهای آماری نشان می‌دهد که روش‌های نمونه‌گیری برای یک سیستم پویا که در طی زمان درحال تحول مداوم می‌باشد بستر ریاضی مناسبی برای درونی‌سازی یکپارچه عدم قطعیت‌ها در مدل انرژی نخواهد بود. در این راستا مرور بر ادبیات فرایندهای تصادفی نشان می‌دهد که مدلسازی منابع عدم قطعیت توسط رفتار مبتنی بر فرایندهای تصادفی ضمن پوشش مناسب عدم قطعیت‌ها از امکان درونی‌سازی عدم قطعیت‌ها در مدل انرژی برخوردار بوده و می‌تواند در کنار روش سناریوسازی به عنوان ابزاری قوی جهت مدلسازی عدم قطعیت‌ها برای استفاده در مدل‌های انرژی بکار گرفته شود.

در شرایطی که عدم قطعیت‌ها توسط فرایندهای تصادفی مدلسازی می‌گردند برای پوشش همزمان آنها در مدل انرژی لازم است از رویکر برنامه‌ریزی ریاضی در فضای تصادفی استفاده گردد. در ادامه فصل دوم با مرور ادبیات روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی و بررسی کاربرد آنها برای سیستم‌های انرژی، نتیجه می‌گردد که با درنظر گرفتن ماهیت مدل عرضه انرژی که یک مدل Bottom-up شبه پویا برای برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم انرژی بوده و منابع عدم قطعیت‌های شناسایی شده در آن به تدریج در طول زمان ظاهر می‌شوند، روش‌شناسی برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای به عنوان رویکرد توسعه مدل انرژی مورد استفاده قرار گیرد. در این مدل پوشش همزمان و به هم پیوسته عدم قطعیت‌ها مورد توجه قرار گرفته و همچنین بهینگی زمانبندی در افزایش ظرفیت و توسعه فناوری‌های سیستم انرژی مطالعه می‌گردد.

مرور بر ادبیات روش‌های پوشش ریسک در مدل‌های انرژی Bottom-up نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر مدل‌های انرژی برای پوشش ریسک و هزینه‌های احتمالی ناشی از وقوع عدم قطعیت را نمایان می‌کند. پس از مرور بر ادبیات روش‌های پوشش ریسک در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی نتیجه‌گیری گردید که روش Mean-Risk رویکرد مناسبی برای پوشش عدم قطعیت‌ها در مدل انرژی می‌باشد. در این رویکرد، اضافه شدن توابع ریسک به تابع هدف مدل انرژی، آنها را به تابع Utility تغییر شکل می‌دهد. سپس این تابع Utility تلاش می‌نماید تا به طور همزمان میان کمینه‌سازی هزینه از یک طرف و کاهش هزینه ناشی از تغییرپذیری به واسطه عدم قطعیت‌ها از طرف دیگر، تعادل و بهینه‌سازی برقرار نماید. مرور بر ادبیات انواع توابع ریسک که عمدتاً در حوزه ریاضیات مالی کاربرد دارند، بیانگر نقاط قوت و ضعف این توابع می‌باشد. در این بین به کارگیری توابع ریسک ساختار یافته با توجه اصول موضوعه حاکم بر آن‌ها، ضمن سازگاری مناسب با مدل‌های تصادفی چند مرحله‌ای، حل‌پذیری و پایداری مدل برنامه‌ریزی را تضمین نموده و با توجه به اصل ارجحیت مرتبه دوم از کارایی بالایی برخوردار می‌باشند. بر این اساس در فصل پنجم، به عنوان یک رویکرد جدید برای پوشش Riesck در مدل‌های Bottom-up انرژی، با استفاده از توابع ریسک ساختار یافته، مدل عرضه انرژی تصادفی ریسک گریز<sup>۷۴</sup> توسعه داده شد. این مدل هزینه کل سیستم انرژی به ازای مقادیر متوسط متغیرهای تصادفی را به همراه هزینه ریسک ناشی از وجود عدم قطعیت در سیستم و تحت قیود تعریف شده برای مدل کمینه می‌نماید. در این مدل ابتدا منابع عدم قطعیت مشابه مدل ریسک خنثی توسط شبکه گستره‌سازی شده از سناریوهای تصادفی، به عنوان ماجولی از مدل انرژی مدلسازی می‌گردد، سپس ضرایب توابع ریسک توسط ماجول به هم پیوسته تولید توابع ریسک، ایجاد می‌گردد. مزیت

<sup>74</sup> Risk Averse

این رویکرد، مدلسازی منابع عدم قطعیت و محاسبه ریسک به صورت به هم پیوسته درون مدل انرژی می‌باشد. در مدل انرژی ریسک‌گریز توسعه داده شده، منابع متنوعی از پارامترهای بروناز همراه با عدم قطعیت درنظر گرفته می‌شوند. تقسیم‌بندی این پارامترها شامل پارامترهای موجود در ضرایب تابع هدف مدل (از جمله قیمت حامل‌های انرژی اولیه و هزینه فناوری‌ها) پارامترهای موجود در ضرایب سمت چپ قیود مدل (مربوط به راندمان فناوری‌ها) و پارامترهای موجود در ضرایب سمت راست قیود مدل (مربوط به تقاضای انرژی مفید) می‌باشد.

برای پوشش ریسک عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی، جزء انحراف<sup>75</sup> تابع ریسک ناشی از اختلاف مثبت قیمت حامل‌های انرژی نسبت به مقدار متوسط انتظاری، که به عنوان انحرافات نامطلوب قیمت انرژی مطرح می‌باشد به عنوان ضریبی از ماتریس متغیرهای جریان انرژی در تابع هدف مدل انرژی لحاظ می‌گردد. به طریق مشابه، برای پوشش ریسک عدم قطعیت هزینه فناوری‌های انرژی، جزء انحرافی تابع ریسک ناشی از اختلاف مثبت هزینه فناوری‌ها نسبت به میزان متوسط انتظاری (این اختلاف مثبت به دلیل عدم کاهش احتمالی هزینه‌ها با توجه به فرایند یادگیری می‌باشد)، به عنوان ضریبی از ماتریس متغیرهای افزایش ظرفیت در تابع هدف مدل لحاظ می‌گردد.

در رابطه با مدلسازی ریسک پارامترهای همراه با عدم قطعیت موجود در ضرایب قیود مدل انرژی پایین به بالا در این پژوهش روش جدیدی معرفی گردید. مهمترین پارامترهای دارای عدم قطعیت در قیدهای مدل شامل ضرایب مرتبه به راندمان فناوری‌ها و مقادیر تقاضای انرژی می‌باشد. تعریف توابع ریسک برای تغییرات ناشی از عدم قطعیت برای این پارامترها در تابع هدف می‌باشد که هزینه‌های (پنالتی) ناشی از انحرافات غیرمطلوب آنها منجر به تشکیل تابع Utility مناسب گردد. از آنجایی که واحد و دیمانسیون پارامترهای راندمان و تقاضای انرژی از جنس هزینه نمی‌باشد، روش معرفی شده برای تولید توابع ریسک، مبتنی بر دیمانسیون متغیر هزینه بوده و از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول آن منعکس کننده هزینه (پنالتی) واحد و جزء دوم آن معرف انحرافات بدون بعد می‌باشد. جریان انرژی گذرنده از هر حجم کنترل در نمودار مرجع انرژی یک متغیر حالت می‌باشد. محاسبه هزینه حاشیه‌ای<sup>76</sup> برای جریان متوسط گذرنده از هر حجم کنترل، شاخصی از قیمت جریان انرژی گذرنده از آن حجم کنترل خواهد بود. این شاخص بیانگر آن است که به ازای هر واحد اضافی از جریان انرژی خروجی از حجم کنترل، شاخصی از قیمت جریان انرژی گذرنده از آن حجم کنترل خواهد بود. این شاخص بیانگر آن است که در روش معرفی شده، جمله مرتبه به جزء انحرافات، از تقسیم تفاضل مقادیر نامطلوب از مقدار متوسط انتظاری، نسبت به مقدار متوسط انتظاری بدست می‌آید. بر این اساس جزء انحرافی تابع ریسک برای عدم قطعیت تقاضای انرژی، از

<sup>75</sup> Deviation

<sup>76</sup> Marginal Cost-MC

حاصل ضرب  $MC$  محاسبه شده و انحرافات بی بعد انتظاری بدست می آید. برای تعریف توابع ریسک عدم قطعیت راندمان فناوری‌ها به طریق مشابه عمل می‌گردد. به این ترتیب  $MC$  جریان انرژی خروجی از فناوری‌های مورد نظر محاسبه گردیده و انحرافات بی بعد شده ضرایب راندمان‌های تصادفی نیز محاسبه می‌گردد. جزء انحرافی تابع ریسک عدم قطعیت راندمان فناوری‌ها، از حاصل ضرب این دو عامل بدست می‌آید.

در فصل ششم، کاربرد و اجرای مدل انرژی ریسک‌گریز توسعه داده شده، بررسی گردید. برای این منظور یک سیستم عرضه انرژی مبتنی بر اطلاعات واقعی مورد توجه قرار گرفت. در این سیستم انرژی، منابع انرژی، فناوری‌ها و تقاضای انرژی با توجه به اطلاعات حقیقی و محدودیت‌های موجود مدلسازی گردید. اجرای مدل انرژی ریسک خنثی برای این سیستم انرژی، ترکیب بهینه عرضه انرژی و فناوری‌های انرژی را نتیجه می‌دهد. براساس این نتایج، عمدۀ عرضه انرژی اولیه توسط حامل‌های انرژی گاز طبیعی و فراورده‌های نفتی صورت می‌گیرد و نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و انرژی باد صرفا در افق بلندمدت توجیه‌پذیر می‌باشد. برای بررسی نتایج مدل انرژی ریسک‌گریز ابتدا این مدل با درنظر گرفتن عدم قطعیت قیمت حامل‌های انرژی اجرا گردید. زمانی که بابت ریسک افزایش احتمالی قیمت حامل‌های انرژی، هزینه پوشش ریسک، توسط توابع ریسک به تابع هدف مدل انرژی اضافه می‌شود، ساختار عرضه انرژی دچار تغییر می‌گردد. در این شرایط مدل سعی می‌نماید تا از ایجاد هزینه و خسارت بیشتر در صورت وقوع عدم قطعیت احتمالی جلوگیری نماید. بدین وسیله بر اساس خاصیت Sub-additivity در تابع ریسک ساختاریافته، ایجاد تنوع‌بخشی یا Diversification در ساختار سیستم عرضه انرژی موجب کمینه کردن این ریسک و هزینه‌های مربوطه می‌گردد. در این شرایط با اضافه شدن حامل‌های جدید مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی، انرژی برق حاصل از نیروگاه‌های آبی کوچک مقیاس و ذغال سنگ، در کنار افزایش سهم دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر، پدیده Diversification و افزایش امنیت عرضه انرژی در نتایج مدل ریسک‌گریز قابل مشاهده می‌باشد. برای تحلیل تنوع‌بخشی به صورت کمی، می‌توان از شاخص‌های ریاضی مربوطه استفاده نمود. با بهره‌گیری از تابع Shanon-Wiener Diversification با افزایش درجه ریسک‌گریزی ( $\lambda$ ) قابل تغییر می‌باشد.

مطابق با نتایج بدست آمده، Diversification ایجاد شده نه تنها در سبد حامل‌های انرژی بلکه در ساختار فناوری‌های عرضه انرژی و ترکیب بهینه انرژی‌های نهایی تأثیر می‌گذارد و از این طریق امنیت عرضه انرژی را افزایش می‌دهد. مقایسه تغییرات ترکیب انرژی‌های نهایی عرضه شده میان مدل انرژی ریسک‌خنثی و مدل ریسک-گریز نشان می‌دهد که پوشش

ریسک نوسان قیمت حامل‌های انرژی باعث می‌گردد تا سهم عرضه گاز طبیعی و برق تولیدی توسط منابع هیدروکربوری کاهش و توسط برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر و همچنین ذغالسنگ جایگزین گردد.

با استفاده از روش معرفی شده برای تعریف تابع ریسک عدم قطعیت تقاضا، نتایج مدل ریسک‌گریز، پوشش ریسک ناشی از افزایش احتمالی نامطلوب تقاضای انرژی بلند مدت را منعکس می‌نماید. این پوشش ریسک باعث می‌گردد تا ساختار فناوری‌های عرضه انرژی به گونه‌ای تغییر یابد که افزایش تقاضای احتمالی را با کمترین هزینه تنزیل یافته نهایی در سیستم عرضه انرژی، ناشی از مجموعه هزینه‌های ثابت و متغیر، به همراه راندمان فناوری‌ها و ظرفیت تاریخی آن‌ها در سیستم انرژی جبران نماید. مقایسه نتایج مدل ریسک‌گریز و مدل ریسک‌خنثی برای انرژی‌های مفید "حرارت" و "آب گرم" در بخش خانگی استان مازندران، بیان کننده افزایش استفاده از سهم انرژی در دسترس خورشیدی و کاهش عمدتاً سهم انرژی‌های فسیلی و انرژی حاصل از فناوری‌های پرهزینه مانند فناوری توزیع حرارت پراکنده<sup>۷۷</sup> می‌باشد.

به منظور بررسی نتایج مدل انرژی ریسک‌گریز در شرایط ناشی از عدم قطعیت فناوری‌های تکنولوژیکی، در شرایطی که پیشینی می‌گردد هزینه فناوری‌های نوین طی زمان و با توجه به فرایند یادگیری کاهش یابد، اجرای مدل ریسک‌گریز پوشش ریسک عدم کاهش احتمالی هزینه این فناوری‌ها را منعکس می‌نماید. نتایج مدل نشان می‌دهد که پوشش ریسک هزینه فناوری‌های توربین باد نسبت به نتایج مدل ریسک‌خنثی باعث نفوذ فناوری‌های تولید برق مبتنی بر گاز طبیعی، انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی می‌گردد. همچنین پوشش ریسک هزینه فناوری فتوولتاییک باعث نفوذ فناوری‌های مبنی بر گاز طبیعی و زمین‌گرمایی می‌گردد. مطابق با نتایج بدست آمده، اعمال همزمان پوشش ریسک نسبت به هزینه فناوری‌ها موجب ایجاد پورتفولیوی پایدار<sup>۷۸</sup> برای عرضه انرژی الکتریکی می‌گردد.

در رابطه با عدم قطعیت راندمان فناوری‌های نوین به طور مشابه انتظار می‌رود که راندمان‌ها با توجه به فرایند یادگیری طی زمان افزایش یابند. لذا پوشش ریسک نسبت به عدم افزایش احتمالی راندمان‌ها مدنظر می‌باشد. روش شرح داده شده برای پوشش ریسک عدم قطعیت ناشی از راندمان فناوری‌های تولید انرژی الکتریکی، تغییرات پورتفولیوی انرژی الکتریکی را با درنظرگرفتن عدم قطعیت راندمان فناوری‌ها و ارائه پورتفولیوی پایدار همراه با نفوذ بیشتر فناوری‌های نوین و تجدیدپذیر نتیجه می‌دهد.

<sup>۷۷</sup> District Heat System

<sup>۷۸</sup> Robust

در راستای مدلسازی سیستم عرضه انرژی پایدار در شرایط وجود همزمان پارامترهای دارای عدم قطعیت، تمامی توابع ریسک تولید شده به صورت همزمان در مدل انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. در این شرایط تحلیل اثر هر یک از منابع عدم قطعیت در نتایج مدل به سهولت امکان پذیر نمی باشد ولی تأثیر عدم قطعیت‌های قیمت حامل‌های انرژی بیشترین تأثیر را در نتایج مدل بر عهده دارد. نتایج کاربرد همزمان توابع ریسک موجب ایجاد پورتفولیوی از فناوری‌های و ساختار عرضه انرژی در راستای توسعه پایدار سیستم انرژی می‌گردد.

مطابق با نتایج بدست آمده، با تغییر ضریب ریسک‌گریزی، ساختار عرضه انرژی و هزینه اعمال شده به کل سیستم دچار تغییر گردیده و به عنوان نتیجه، افزایش ضریب ریسک‌گریزی باعث کاهش مقدار تابع ریسک و بالاتر رفتن درجه پایداری در نتایج و همچنین افزایش امنیت عرضه انرژی می‌گردد.

## فصل ۸- منابع و مراجع

- [1] Nakata T. Energy-Economic models and the environment. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30: 417-475.
- [2] Jebaraj S. et al. A review of energy models. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10: 281-311.
- [3] Connolly D. Lund H. Mathiesen B.V. Leahy M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 2009.
- [4] Loulou R. et al. Documentation of MARKAL family of models. ETSAP, IEA, 2004.
- [5] Baretto L. et al. Extension to the energy-system GMM model: An overview. Paul Scherrer Institute, 2006.
- [6] Schrattenholzer L. The energy supply model MESSAGE. International Institute for Applied Systems Analysis, Austria, 1981.
- [7] Saboohi Y. Ein regionalisiertes model für die energiplanung in entwicklungslandern. Institut für Kernergetic und Energie systeme. Universität Stuttgart. ISSN 0173-6892, 1989.
- [8] Kann A. et al. Approaches for performing uncertainty analysis in large-sclae energy/economic policy models. *Environmental modeling and assessment*, 2000, 5: 29-46.
- [9] Dungan J. L. Gao D. Pang A. T. Definitions of Uncertainty. White paper, NASA Ames research center, 2002.
- [10] Portney P.R. Weyant J.P. Discounting and integrational equity. *Resources for future*, Washington, 1999.
- [11] Ruszczynski A. Modeling Uncertainty. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, summer 1995, 12-13.
- [12] Zapert R. Gaertner P.S. Filar J.A. Uncertainty propagation within an integrate model of climate change. *Energy Economy*, 1998, 20: 5-6.
- [13] Pindyck R. S. The dynamics of commodity spot and futures markets: A primer. *Energy Journal*, 2001, 22(3):1-29.
- [14] Pindyck R. S. Volatility in natural gas and oil market. *Journal of energy and development*, 2004, 30(1)
- [15] Blanken K.D. Long-run forecasting of energy prices: Analysing natural gas, steam coal and crude oil prices for DELTA energy. Ms.Sc. Thesis, Erasmus University Rotterdam, 2008.
- [16] Evarest E. Pricing of energy by means of stochastic model. Ms.Sc. Thesis, University of Dar es Salam, 2008.
- [17] British Petroleum Annual Energy Outlook, 2010.
- [18] Jones C.T. Accounting for Technical Progress in Aggregate Energy Demand. *Energy Economics*, 1994, 16: 245-252.
- [19] Hunt L. C. Judge G. and Ninomiya Y. Underlying Trends and Seasonality in UK Energy Demand: A Sectoral Analysis. *Energy Economics*, 2003a, 25: 93-118.

- [20] Hunt L. C. Judge G. and Ninomiya Y. Modelling Underlying Energy Demand Trends, Chapter 9 in Hunt, L. C. (Ed) Energy in a Competitive Market: Essays in Honour of Colin Robinson, Cheltenham. UK: Edward Elgar, 2003b, 140-174.
- [21] Karlsson K. Meibom P. Optimal investment paths for future renewable based energy systems- Using the optimization model Balmorel. Int. Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(7):1777-1787.
- [22] Rout U.K. Blesl M. Remme U. Vo A. Uncertainty in the learning rates of energy technologies:An experiment in a global multi-regional energy system. Energy Policy, 2009, 37: 4927-4942.
- [23] Salas P. Literature Review of Energy – Economics Models, Regarding Technological Change and Uncertainty. Cambridge Center for Climate Change Mitigation Research (4CMR), Working Paper 4CMR#3, 2013.
- [24] Tarhan B. Grossmann I.E. Goel V. A multistage stochastic programming approach for the planning of offshore oil or gas field infrastraucture under decision dependent uncertainty. Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48(6): 3078-3097.
- [25] Goel V. Grossmann I. A stochastic programming approach to planning of offshore gas field developments under uncertainty in reserves. Computer & Chemical Engineering, 2004, 28: 1409- 1429.
- [26] Dreimann M. Speck R. Solar Power: Managing uncertainty of emerging technologies. Mark Center for Technological Innovation, University of Pennsylvania, 2010.
- [27] Zhang L. Zhang X. Li Sh. Wang Q. Comprehensive utilization of oil shale and prospect analysis. Energy Procedia, 2012, 17: 39-43.
- [28] Vengosh A. Warner N. Jackson R. Darrah T. The effects of shale gas exploration and hydraulic fracturing on the quality of water resources in the United States. Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7: 863-866.
- [29] Christian Muller-Scholl C. Feri U. Uncertainty analysis in solar collection measurement. Proceedings of European 2000, Copenhagen.
- [30] Holttinen H. Miettinen J. Sillanpaa S. Wind power forecasting accuracy and uncertainty in Finland. VTT technical research center of Finland, ISSN-L-2242-1211, 2013.
- [31] Brower M. Robinson N. Hale E. Wind flow modeling uncertainty, Quantification and application to monitoring strategies and project design. AWS Truepower LLC, 2010.
- [32] Newell R.G. Pizer W.A. Regulating stock externalities under uncertainty. 2003, 416-432.
- [33] Yang M. et al. Evaluating the power investment options with uncertainty in climate policy.
- [34] Fuss S. Johansson D.J.A. Szolgayova J. Obersteiner M. Impact of climate policy uncertainty on the adoption of electricity generating technologies. Energy Policy, 2009, 37: 733-743.
- [35] Bylth W. et al. Investment risks under uncertain climate change policy. Energy Policy, 2007, 5766-5773.
- [36] Boetres S. Koornneef J. Supply of renewable energy sources and the cost of EU climate policy. Energy Economics, 2011, 33: 1024-1034.

- [37] Moss R.H. Schneider S.H. Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations to lead authors for more consistent assessment and reporting. In: Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC [eds. R. Pachauri, T. Taniguchi and K. Tanaka]. World Meteorological Organization, Geneva, 2000, 33-51.
- [38] Frey H.C. Patil S.R. Identification and review of sensitivity analysis methods. Risk Anal. 2002, 22(3): 553-78.
- [39] Hwang, D. Byun, D.W. and Odman M.T. An Automatic Differentiation Technique for Sensitivity Analysis of Numerical Advection Schemes in Air Quality Models. Atmospheric Environment, 1997, 31(6): 879-888.
- [40] Bood R. Postma T. J. B. M. Strategic Learning with Scenarios. European Management Journal, 1997, 15(6): 633-647.
- [41] Bishop P. Hines A. & CollinsT. The current state of scenario development: An overview of techniques. 2007, 9(1): 5-25.
- [42] Brummell, A. & MacGillivray, G. Scenario Planning- A Tool for Navigating Strategic Risk. Scenarios to Strategy Inc. (self published), 2008.
- [43] Nakicenovic N. Grubler A. McDonald A. Global energy perspectives. IIASA-WEC, 1995.
- [44] Krishan V. Scenario planning process of energy companies in Sweden. M.Sc. Stockholm, INDEK, 2011, 50.
- [45] Kah M. Scenario Planning: A strategic tool. ConocoPhilips/ University of Oklahoma, Managerial Energy Economics Program, 2007.
- [46] Loulou R. Tostao G.C. Scenario approach to the evaluation of energy choices, the concept of hedging strategies. ETSAP workshop and training course, Brasilia, Nov. 2007.
- [47] Johnson T.L. et al. MARKAL Scenario analyses of technology options for the electric sector: The impact on air quality. United State Environmental Protection Agency, EPA/600/R-06/114, 2006.
- [48] Balta-Ozkan N. Kannan R. Strachan N. Analysis of UKSHEC hydrogen visions in the UK MARKAL energy system model. UKSHEC Social Science Working Paper No. 32, Policy Studies Institute, 2007.
- [49] Mietzner D. Reger R. Scenario Approches-History, Differences, Advantages and Disadvantages. Seminar on New technology foresight, forecasting & assessment methods-Seville, May 2004.
- [50] Moss R. et al. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. Technical summary, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2008.
- [51] Saradhi I.V. Pandit G.G. Puaranik V.D. Energy supply, demand and environmental analysis-A case study of Indian energy scenario. Int. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2009, 3: 115-120.