



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، صص ۲۷-۵۲

نوع مقاله: پژوهشی

کاربرد مجموعه‌های راف مبتنی بر تسلط در مسئله انتخاب

تعاملی پورتفولیوی فناوری‌های جذب و بازیابی کربن

ساناز شیخ تاجیان^۱، جعفر باقری نژاد^{۲*}، عمران محمدی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران.
۳. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

چکیده

ضرورت کاهش انتشار گازهای آلاینده در دنیا سبب افزایش حمایت‌های دولتی در زمینه توسعه فناوری‌های سبز از جمله فناوری‌های جذب و بازیافت کربن شده است. در این تحقیق مسئله انتخاب بهینه پورتفولیوی فناوری‌های جذب و بازیابی کربن به‌منظور تخصیص مشوق‌های دولتی در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به عدم قطعیت و ابهامات موجود در مسیر توسعه فناوری و باهدف شفاف و عینی نمودن فرایند تصمیم‌گیری در مدل پیشنهادی از تلفیق روش بهینه‌سازی تعاملی و تئوری راف مبتنی بر تسلط استفاده شده است. بر اساس اطلاعات مبتنی بر گزارش‌های پژوهشگاه نیرو و پیاده‌سازی مدل در سه‌گام انتخاب اولیه، استخراج قوانین تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی جواب در قالب فرایندی تعاملی و تکرارشونده، پورتفولیوی بهینه فناوری‌های جذب و بازیابی کربن تعیین گردیده است. نتایج پیاده‌سازی مبین کارایی مدل ارائه شده جهت شفاف و نظام‌مند نمودن فرایند تصمیم‌گیری است. این مدل که مبتنی بر تلفیق مزایای رویکرد بهینه‌سازی تعاملی در کنار توانمندی ابزار راف مبتنی بر تسلط در استخراج قوانین تصمیم‌گیری توسعه داده شده است، می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب کارآمد سیاست‌گذاری در حوزه‌های مختلف از جمله مباحث زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی تعاملی، تئوری مجموعه راف مبتنی بر تسلط، بهینه‌سازی پورتفولیوی فناورانه، جذب و بازیابی کربن



۱- مقدمه و بیان مسئله

پیشگیری از اثرات شدید اقلیمی ناشی از گرمایش زمین در گرو کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای است. بر اساس مطالعات بین‌المللی، سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌بایست تا سال ۲۰۳۰ به حداقل ۴۹ درصد میزان آن در سال ۲۰۱۷ محدود گشته و تا سال ۲۰۵۰ به سطح کربن صفر برسد [۱]. با توجه به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران، این موضوع در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان و سیاست‌گذاران در کشور قرار گرفته است. طبق گزارش سال ۲۰۲۲ مؤسسه بین‌المللی انرژی (IEA)^۱، ایران با انتشار ۶۹۶/۳۷۱ میلیون تن دی‌اکسیدکربن در رتبه ششم آلاینده‌های جهان قرار دارد که خود موید لزوم تسریع پیاده‌سازی پروژه‌های ملی کاهش کربن در کشور است [۲]. یکی از فناوری‌های مؤثر در کاهش آلاینده‌های جوی و حل مشکلات زیست‌محیطی بالاخص در کشورهایی که سوخت فسیلی همچنان سهم بالایی از مصرف انرژی را به خود تخصیص داده، فناوری‌های جذب و بازیابی کربن (CCUS)^۲ است. در این گروه از فناوری‌ها، کربن منتشرشده با روش‌های مختلف جذب و تبدیل به مواد مختلفی چون متان، اوره و... گشته و ضمن کاهش حجم آلاینده‌ها، قابلیت بازگشت به چرخه مصرف انرژی را پیدا می‌کند.

یکی از چالش‌های اصلی بر سر راه تجاری‌سازی این فناوری‌ها هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و وجود عدم قطعیت‌های مختلف است [۳] و تخصیص مشوق‌های دولتی یکی از روش‌های مؤثر در تسهیل این فرایند محسوب می‌گردد [۴]. لذا انتخاب بهینه پورتفولیوی فناوری‌ها متناسب با اهداف و سیاست‌های کلان دولتی از سویی و لحاظ نمودن محدودیت‌هایی چون سقف بودجه موضوع مهمی است که می‌بایست به آن پرداخته شود.

اساس بررسی و انتخاب پورتفولیوی فناوری مشابه رویکرد تحلیل پورتفولیوی پروژه‌هاست. آنچه این دو موضوع را تا حدودی از هم متمایز می‌نماید عدم قطعیت‌ها و ابهاماتی است که در مسیر توسعه فناوری وجود دارد. در این پژوهش، مسئله انتخاب بهینه پورتفولیوی فناوری‌های بازیابی کربن جهت تخصیص مشوق‌های دولتی در شرایط داده‌های مبهم و نادقیق مورد بررسی قرار گرفته است. تصمیم‌گیرنده (دولت) اطلاعات کافی و منسجم در خصوص ظرفیت فناوری‌ها، بازار آتی، فضای رقابتی فناوری‌های مورد بررسی نداشته و این موضوع فرایند

^۱ International Energy Agency

^۲ Carbon Capture and Utilization



تصمیم‌گیری را پیچیده نموده است. هدف این مطالعه ارائه مدلی جهت شفاف نمودن و تسهیل فرایند انتخاب بهینه پورتفولیوی فناوری‌ها در شرایط ابهام و داده‌های نادقیق است. یکی از رویکردهای اخیر در حل مسائل تحلیل پورتفولیو در شرایط عدم شفافیت و ابهام، مدل‌سازی و احصا ترجیحات تصمیم‌گیرنده است [۵]. باتوجه به توانمندی بالای رویکرد تئوری راف مبتنی بر تسلط (DRSA) ^۱، در تحلیل داده‌های مبهم و نادقیق و همچنین قابلیت آن در تحلیل ترجیحات تصمیم‌گیرنده، در این پژوهش مدل بهینه‌سازی تعاملی مبتنی بر تئوری راف مبتنی بر تسلط توسعه داده شده است و از نرم‌افزار رول رنک ^۲ جهت نظام‌مند نمودن تحلیل و استخراج قوانین تصمیم‌گیری استفاده شده است.

با این هدف ادامه این مقاله بدین صورت سازمان‌دهی شده است. ابتدا مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه گردیده است. در بخش سوم مدل پیشنهادی به تشریح شده است. نتایج پیاده‌سازی مدل بر مبنای اطلاعات مستخرج از گزارش پژوهشگاه نیرو در بخش چهارم تشریح شده و در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله انجام گرفته است.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱- رویکرد راف

مجموعه راف (RSA) ^۳ یکی از روش‌های داده‌کاوی است که توسط محقق لهستانی به نام پاولاک ^۴ در سال ۱۹۸۲ ارائه شده است. راف رویکردی توانمند جهت احصا الگوی نهفته در داده‌ها بوده و در زمینه‌های مختلفی چون داده‌کاوی، طراحی سیستم‌های خبره، یادگیری ماشینی و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مزیت این روش عدم نیاز به اطلاعات اضافی در مورد داده‌ها بوده و کارایی بالایی در حل مسائل با دانش مبهم، متناقض و نادقیق دارد [۶].

۲-۲- رویکرد راف مبتنی بر تسلط

رویکرد مجموعه راف مبتنی بر تسلط که یکی از توسعه‌های رویکرد راف است، این روش توسط اسلاوینسکی ^۵ (۲۰۱۰) پیشنهاد گردید و باتوجه به قابلیت‌های آن در خصوص تعامل با

^۱ Dominance-based rough set theory

^۲ Rule Rank

^۳ Rough Set Approach

^۴ Pawlak

^۵ Słowiński



تصمیم‌گیرنده، استخراج قوانین تصمیم‌گیری از اطلاعات ترجیحی ساده و ارائه توصیه‌های قابل فهم بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷].

در این بخش مفاهیم رویکرد DRSA در مقایسه با رویکرد کلاسیک RSA مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. در هر دو روش فرض می‌شود مجموعه مرجعی به نام U وجود دارد که شامل تعداد متناهی از مشاهدات است. به منظور طبقه‌بندی اعضای مجموعه بر اساس معیاری معین، رابطه هم‌ارزی (عدم تمایز) به صورت ذیل تعریف می‌شود.

$$I_Q = \{(x, y) \in U \times U : f(x, g) = f(y, g) \text{ for all } g \in G\} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، G مجموعه‌ای محدود از معیارها بوده و $f(x, g)$ ارزش مشاهده x بر اساس معیار g است.

بر اساس رابطه هم‌ارزی I_Q هر یک از مشاهدات متعلق به مجموعه مرجع $\forall x \in U$ به کلاس‌های هم‌ارزی طبقه بندی میشوند.

$$I_Q(x) = \{y \in U : y I_Q x\} \quad (۲)$$

طبق تعریف ارائه شده هم‌ارز بودن و یا غیرقابل‌تمایز^۱ بودن دو مشاهده x و y از منظر معیار Q بدین معناست که مشاهده x و y هر دو متعلق به یک کلاس هم‌ارزی هستند که به شکل $I_Q(x)$ نشان داده می‌شود.

به‌عنوان مثال می‌توان مجموعه‌ای از اشیاء را بر اساس معیار رنگ و بدون توجه به شکل هر یک در کلاس‌های هم‌ارزی با هم قرارداد و بدن ترتیب کلاس‌های هم‌ارزی از رنگ‌های مختلف تعریف نمود. خانواده تمام کلاس‌های هم‌ارزی رابطه I_Q با U نشان داده می‌شود. کلاس‌های هم‌ارزی رابطه I_Q را مجموعه‌های اولیه Q و یا گرانول‌های دانش منتج از Q نیز می‌نامند. بر اساس دانش موجود در یک سیستم در خصوص تعلق هر مشاهده مانند $x \in U$ به $X \subseteq U$ سه ذیل حالت ممکن است :

- مشاهده x مطلقاً به مجموعه X تعلق دارد.

^۱ Q-indiscernible

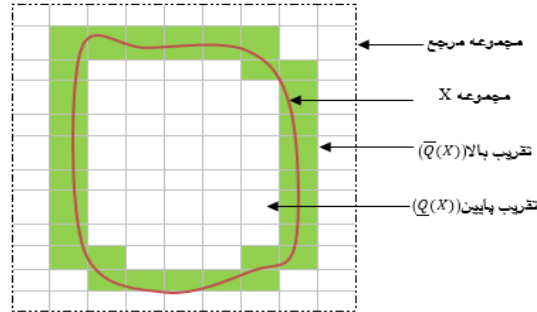


- مشاهده X مطلقاً به مجموعه X تعلق ندارد.
 - مشاهده X ممکن است به مجموعه X تعلق داشته و یا نداشته باشد.
- در حالت سوم که ناشی از عدم کفایت دانش جهت طبقه‌بندی مجموعه مورد نظر است، می‌بایست از دو مفهوم تقریب بالا و تقریب پایین استفاده نمود. با استفاده از رابطه عدم تمایز I_Q برای هر مجموعه $X \subseteq U$ تقریب پایین و بالای Q به شکل زیر تعریف میشود:

$$\underline{Q}(X) = \{x \in U : I_Q(x) \subseteq X\} \quad (۳)$$

$$\overline{Q}(X) = \{x \in U : I_Q(x) \cap X \neq \emptyset\} \quad (۴)$$

یک مشاهده عضو مجموعه تقریب پایین $\underline{Q}(X)$ است، اگر به‌طور قطعی خودش و همه مشاهدات هم‌ارز با آن متعلق به X باشد و در مقابل یک مشاهده عضو مجموعه تقریب بالا $\overline{Q}(X)$ است در صورتی‌که احتمالاً عضو X بوده و حداقل یک مشاهده هم‌ارز با آن نیز به X تعلق داشته باشد. مفاهیم ارائه‌شده در مورد رویکرد راف در قالب شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مفاهیم تئوری راف

RSA روش بسیار کاربردی در حوزه کشف دانش و داده‌کاوی بوده و در بسیاری از مسائل دنیای واقعی از آن استفاده می‌شود، با این حال هنگامی‌که بحث ترجیحات و اولویت‌بندی مشاهدات مطرح باشد نمی‌توان از این رویکرد استفاده نمود. کلید رفع این موضوع جایگزینی



رابطه "عدم تمایز"^۱ در رویکرد راف کلاسیک با "رابطه تسلط"^۲ که برگرفته از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است.

در ادامه رویکرد DRSA تشریح می‌گردد. فرض کنید یک مسئله مرتب شده داریم و هدف انتخاب پورتفولیویی از پروژه‌ها بر اساس معیارهای مشخص است.

- به صورت $X = \{x_1, \dots, x_j, \dots, x_n\}$ مجموعه‌ای محدود از پورتفولیوهاست.
- تصمیم‌گیرنده ترجیحات خود را به صورت ساده با تفکیک پورتفولیوها به دو گروه "خوب" و "سایر" انجام می‌دهد. با این طبقه‌بندی دو کلاس Cl_{good} و Cl_{others} را خواهیم داشت.
- G مجموعه‌ای محدود از معیارها به شکل $G = \{G_1, \dots, G_i, \dots, G_m\}$ است که $g_i : X \rightarrow \mathbb{R}$.

ارزش مشاهده $x_j \in X$ بر اساس معیار $G_i \in G$ را به شکل $G_i(x_j)$ نشان می‌دهیم. برای همه پورتفولیوها و بر اساس همه معیارها خواهیم داشت:

$$G_i(x_j) \geq G_i(x_k) \Leftrightarrow x_j \succeq_i x_k \quad (5)$$

در رابطه فوق \succeq_i نشان‌دهنده ارجحیت نسبی (تسلط) بوده و به این معنی است که " x_j بر اساس معیار G_i حداقل به اندازه x_k خوب است".

در این صورت مجموعه متناهی از کلاس ترجیحات $Cl = \{Cl_1, \dots, Cl_Z\}$ خواهیم داشت به گونه‌ای که برای همه $r, s = 1, \dots, Z$ اگر $r > s$ آنگاه پورتفولیوهای متعلق به Cl_r به پورتفولیوهای Cl_s ترجیح داده می‌شوند.

^۱ Indiscernibility relation

^۲ Dominance relation



همچنین اگر برای زیرمجموعه‌ای از معیارها $Q \subseteq G$ و برای $G_i \in Q$ ، داشته باشیم $G_i(x_j) \geq G_i(x_k)$ در آن صورت x_j بر پورتفولیوی x_k بر اساس معیار Q غلبه دارد^۱ که آن را به صورت $x_j D_Q x_k$ نشان می‌دهند.

با در نظر گرفتن تعاریف فوق، مجموعه غالب و مغلوب به شکل ذیل تعریف می‌گردد. مجموعه غالب $D_Q^+(x_j)$ مجموعه اعضایی است که بر x_j غلبه دارند و در مقابل مجموعه مغلوب $D_Q^-(x_j)$

$$D_Q^+(x_j) = \{x_k \in X: x_k D_Q x_j\}, D_Q^-(x_j) = \{x_k \in X: x_j D_Q x_k\} \quad (6)$$

مجموعه‌ای است که x_j بر آن‌ها غلبه دارد.

مشابه آنچه در خصوص تقریب مجموعه‌ها برای رویکرد راف تعریف شد تقریب پایین و بالا در رویکرد راف مبتنی بر تسلط بر اساس رابطه ارجحیت (تسلط) تعریف می‌گردد. براین اساس $Q(\underline{cl}_{good})$ تقریب پایین از کلاس cl_{good} است و شامل پورتفولیوهایی است $x_j \in cl_{good}$ که توسط هیچ‌کدام از پورتفولیوهای مربوط به کلاس cl_{others} مغلوب نشده‌اند. $\overline{Q}(cl_{good})$ تخمین بالا از کلاس cl_{good} است و نشان‌دهنده پورتفولیوهایی است که بر هر پورتفولیوی $x_j \in cl_{good}$ غلبه دارند.

$$\underline{Q}(cl_{good}) = \{x_j \in X: D_Q^+(x_j) \subseteq cl_{good}\} \quad (7)$$

$$\overline{Q}(cl_{good}) = \{x_j \in X: D_Q^-(x_j) \cap cl_{good} \neq \emptyset\} \quad (8)$$

یکی از مهم‌ترین کاربردهای DRSA استخراج قوانین تصمیم‌گیری بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. قوانین، توضیح‌دهنده شرایط عضویت در هر مجموعه یا کلاس هم ارزی هستند و به دو گروه قوانین قطعی^۲ و ممکن^۳ تقسیم می‌شوند. مبنای استخراج قوانین که به شکل "اگر... آنگاه..." هستند تقریب‌های بالا و پایین مجموعه‌ها یا کلاس‌های هم ارزی است. بر اساس تقریب بالا و پایین از کلاس cl_{good} دو گروه قوانین قطعی و ممکن احصا می‌گردند.

^۱ Q-Dominates
^۲ Certain rules

^۳ Possible rules



- قوانین قطعی نشان‌دهنده حداقل مقدار x بر اساس معیار G جهت عضویت قطعی x در کلاس Cl_{good} است که بر اساس تقریب پایین از کلاس هم ارزی تعیین می‌گردد. و به صورت ذیل تعریف می‌گردند:

اگر $G_{i_1}(x) \geq r_{i_1}$ and ... $G_{i_q} \geq r_{i_q}$ در آن صورت قطعاً $x \in Cl_{good}$ که در آن $r_{i_1}, \dots, r_{i_q} \in \mathbb{R}$ and $G_{i_1}, \dots, G_{i_q} \subseteq G$

- قوانین ممکن، نشان‌دهنده حداقل عملکرد x بر اساس معیار G جهت عضویت احتمالی x در کلاس Cl_{good} مشخص شده است و به صورت ذیل تعریف می‌گردند:

اگر $G_{i_1}(x) \geq s_{i_1}$ and ... $G_{i_p} \geq s_{i_p}$ در آن صورت احتمالاً $x \in Cl_{good}$ که در آن $s_{i_1}, \dots, s_{i_p} \in \mathbb{R}$ and $G_{i_1}, \dots, G_{i_p} \subseteq G$
استنتاج قوانین تصمیم‌گیری بر اساس الگوریتم‌های مختلف انجام گرفته و مبتنی بر تقریب پایین و بالای مجموعه Cl_{good} احصا می‌گردند.

۲-۳- پیشینه تحقیق

مطالعات انجام شده در حوزه انتخاب پورتفولیوی فناورانه نشان می‌دهند که این مسئله، یکی از زیرشاخه‌های تحلیل پورتفولیو محسوب می‌شود. با توجه به ماهیت چندمعیاره و اغلب غیرقطعی تصمیم‌گیری در این زمینه، پژوهشگران رویکردهای متنوعی را برای رتبه‌بندی و انتخاب پروژه‌های فناورانه توسعه داده‌اند. این رویکردها را می‌توان در قالب شش دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) روش‌های ارزیابی منفعت، (۲) رویکردهای برنامه‌ریزی ریاضی، (۳) مدل‌های شبیه‌سازی، (۴) روش‌های هیوریستیک، (۵) مدل‌های شناختی^۱، (۶) مدل‌های تصمیم و تئوری بازی و روش‌های مبتنی بر سیستم‌های تصمیم‌سازی و هوش مصنوعی [۹]، که در مطالعات مختلف از آنها به صورت مجزا و یا تلفیقی به منظور ارائه مدلهای کارآمد جهت انتخاب پورتفولیوی فناورانه استفاده شده است.

عباسی و همکاران (۲۰۱۳) [۱۰] با ترکیب روش تحلیل پوششی داده‌ها و کارت امتیازی متوازن، مدلی برای ارزیابی پروژه‌های تحقیق و توسعه ارائه کردند که در صنعت گاز مورد اعتبارسنجی

^۱ Cognitive



قرار گرفت. هرچند مدل مذکور در ارزیابی عملکرد پروژه‌ها موفق عمل کرد، اما به جنبه‌ها عدم قطعیت انتخاب پروژه‌ها کمتر توجه شده بود.

با توجه به اهمیت پرداختن به شرایط عدم قطعیت و نااطمینانی، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر توسعه مدل‌هایی بوده که بتوانند در این شرایط عملکرد قابل‌قبولی داشته باشند. یکی از رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت در مسائل تصمیم‌گیری استفاده از رویکرد فازی است. این مدل‌سازی در مطالعاتی مانند براری نیا و همکاران (۲۰۱۹) [۱۱] به شکل تحلیل سلسله مراتبی فازی و هم‌چنین در مطالعه عادل رستخیز و همکاران (۲۰۲۱) [۱۲] در قالب غربالگری فازی استفاده گردیده و عملکرد مناسبی در فرایند تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت داشته است. یکی دیگر از روش‌هایی که در مطالعات اخیر جهت مدل‌سازی مسائل تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت استفاده شده است رویکرد اختیار واقعی است. در همین راستا، سو و دینگ^۱ (۲۰۲۵) [۱۳] با تلفیق رویکرد اختیار واقعی و مدل بهینه‌سازی پورتفولیوی سرمایه‌گذاری مدلی در حوزه فناوری‌های تولید برق کم‌کربن توسعه داده‌اند که کارایی مطلوبی در این حوزه داشته است. همچنین چن و همکاران^۲ (۲۰۲۵) [۱۴] در پژوهش خود مدل جدیدی برای انتخاب پورتفولیو با تلفیق رویکرد اختیار واقعی و بهینه‌سازی پورتفولیوی استوار ارائه نموده‌اند. در این مدل نوسانات پارامترهای مسئله و حد ضرر سرمایه‌گذاران جهت ارزیابی در نظر گرفته شده است و نتایج پیاده‌سازی حاکی از عملکرد بهبود ارزش پروژه‌های انتخاب شده و تضمین اهداف سرمایه‌گذاران در مقایسه با مدل‌های سنتی است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رویکردهای تلفیقی و مبتنی بر مشارکت تصمیم‌گیرنده، نقش مهمی در ارتقاء کیفیت انتخاب پروژه‌ها ایفا کرده‌اند. تلفیق رویکرد تئوری راف با مدل‌های تصمیم‌گیری عملکرد مناسبی در شفاف‌نمدن فرایند تصمیم‌گیری مسائل پیچیده داشته است. در این راستا بارباتی و همکاران^۳ (۲۰۱۸) [۵] مدلی مبتنی بر بهینه‌سازی تعاملی پورتفولیو و رویکرد تئوری راف مبتنی بر تسلط برای انتخاب پورتفولیوی فناورانه ارائه نموده‌اند همچنین در مطالعه دیگر، یو و همکاران^۴ (۲۰۲۳) [۱۵] با استفاده توسعه رویکرد راف مبتنی بر تسلط

^۱ Su & Ding
^۲ Chen et al.

^۳ Barbati et al.
^۴ Yu, et al.



تحت عنوان روابط تسلط راف گروه‌محور^۱ روشی جدید جهت تصمیم‌گیری در گروه‌های بزرگ ارائه نمودند.

از دیگر مدل‌های توسعه داده شده در حوزه تصمیم‌گیری‌های گروهی می‌توان به مدل پرومته-ابری توسعه داده شده توسط گودرزی و غلامیان (۲۰۲۴) [۱۶] و مدل تعاملی بهینه‌سازی پورتفولیو مبتنی بر شبکه‌های اجتماعی تحت عنوان SN-LSGDM-PO^۲ که توسط لی و هو^۳ (۲۰۲۴) [۱۷] توسعه داده شده است اشاره نمود. مدل‌های ارائه شده گامی بزرگ در راستای تسهیل و بهبود فرایند تصمیم‌گیری گروهی محسوب می‌گردند.

با توجه به مجموعه مطالعات بررسی‌شده که به تعدادی از آنها اشاره و باقی در قالب جدول ۱ خلاصه شده اند، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق روش‌های کمی با رویکردهای تعاملی و فازی، ظرفیت بالایی برای طراحی مدل‌های قابل‌اعتماد در انتخاب پروژه‌های تحقیق و توسعه دارد. با این حال، توسعه مدل‌هایی پویا با قابلیت انطباق با شرایط متغیر محیطی و داده‌های نادقیق، همچنان یکی از نیازهای اساسی در این حوزه به شمار می‌رود. در پاسخ به این موضوع این مطالعه با هدف توسعه چارچوبی منعطف و نظام‌مند جهت انتخاب پورتفولیوی فناوری‌ها در شرایط عدم قطعیت و داده‌های نادقیق ارائه شده است. نوآوری‌های این مطالعه به شرح ذیل است:

- تلفیق رویکرد بهینه‌سازی تعاملی و راف مبتنی بر تسلط جهت انتخاب پورتفولیوی پروژه‌های فناورانه در حوزه مدیریت کربن
- ایجاد یک چارچوب نظام‌مند و شفاف برای تصمیم‌گیری در شرایط داده‌های عدم قطعی و نادقیق
- توسعه یک روش تعاملی و باقابلیت تکرارپذیری به‌منظور ارائه چارچوبی منسجم جهت تصمیم‌گیری در مسائل پیچیده با اطلاعات نادقیق
- تلفیق رویکرد راف مبتنی بر تسلط جهت استنتاج قوانین تصمیم‌گیری دولت و پیاده‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار Rule rank.

^۱ Group-oriented rough dominance relation
^۲ a large-scale group interactive portfolio optimization method based on a social network

^۳ Li & Hu



- پیاده‌سازی و ارزیابی کارایی مدل پیشنهاد شده بر اساس داده‌های واقعی پروژه‌های جذب و بازیابی کربن در ایران.

جدول ۱: خلاصه ادبیات موضوع

حوزه مطالعه	تعلقی و ران	رویکرد انتخاب پورتفولیوی فناوری						سال	نویسنده
		هوش مصنوعی و علم داده	تئوری بازی	شناختی	هیورستیک	شبیه‌سازی	برنامه‌ریزی ریاضی		
صنعت گاز	-		✓					۲۰۱۳	عباسی و همکاران [۱۰]
فناوری نانو	-		✓					۲۰۱۹	براری نیا و همکاران [۱۱]
نوآوری	-						✓	۲۰۲۰	شاوردی و همکاران [۱۸]
صنعت برق	-						✓	۲۰۲۱	فرج ^۱ و همکاران [۱۹]
کارآفرینی	-						✓	۲۰۲۱	عادل رستخیز و همکاران [۱۲]
نوآوری	-						✓	۲۰۲۱	تولکی و همکاران [۲۰]
نوآوری	-				✓			۲۰۲۲	اتگار و کوهن ^۲ [۲۱]
انرژی نو	-						✓	۲۰۲۳	فریا و همکاران [۲۲]
نیروگاه	-						✓	۲۰۲۴	ژاو و ونگ ^۳ [۲۳]

^۱ Frej et al.^۲ Etgar & Cohen^۳ Zhao & Wang



حوزه مطالعه	تعاملی و راف	رویکرد انتخاب پورتفولیوی فناوری						سال	نویسنده
		هوش مصنوعی و علم داده	تئوری بازی	شناختی	هیورستیک	شبیه‌سازی	برنامه‌ریزی ریاضی		
نوآوری	-						✓	۲۰۲۵	سو و دینگ [۱۳]
انرژی	-						✓	۲۰۲۵	چن و همکاران [۱۴]
حمل و نقل	-		✓					۲۰۱۸	علوی و جبارزاده [۲۴]
نوآوری	✓	✓	✓				✓	۲۰۱۸	بارباتی و همکاران [۵]
بلاک‌چین	-		✓					۲۰۲۰	فرشیدی و همکاران [۲۵]
فناوری	-		✓					۲۰۲۲	سالوادو و همکاران ^۱ [۲۶]
گروهی	✓	✓						۲۰۲۳	یو و همکاران [۱۵]
گروهی	-	✓						۲۰۲۴	گودرزی و غلامیان [۱۶]
گروهی	-	✓						۲۰۲۴	لی و هو [۱۷]
کربن	✓	✓	✓				✓		مطالعه فعلی

۳- مدل بهینه‌سازی پورتفولیوی فناوری‌های جذب و بازیابی کربن

مبنای مدل‌سازی در این بخش مدل پیشنهادی در مطالعه بارباتی و همکاران (۲۰۱۸) است [۵]. مسئله مورد بررسی شامل انتخاب پورتفولیوی بهینه از میان مجموعه‌ای از پروژه‌های فناورانه در حوزه جذب و بازیابی کربن است که هنوز به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند. هر پروژه $(P_j \in P)$ بر اساس مجموعه‌ای از معیارها که توسط تصمیم‌گیرنده که در این مطالعه دولت

^۱ Salvadó et al.



است مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. $(A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\})$. سطوح رضایت برای هر معیار $A(a_i)$ نیز تعریف شده است:

$$Q_i = \{q_{1,i}, \dots, q_{A(i),j} : q_{1,i} < q_{2,i} < \dots < q_{A(i),i}\} \quad (14)$$

بر اساس سطوح رضایت تعیین‌شده، امکان طبقه‌بندی پروژه‌ها در کلاس‌های ذیل فراهم است:

$$Cl_i = \{cl_{1,i}, \dots, cl_{A(i)+1,i}\} \quad (15)$$

نحوه تخصیص پروژه‌ها در هر کلاس به شکل ذیل است:

- p_j به کلاس $cl_{1,i}$ تخصیص می‌یابد اگر $a_i(p_j) < q_{1,i}$.
- p_j به کلاس $cl_{t,i}$ تخصیص می‌یابد اگر $q_{t-1,i} \leq a_i(p_j) < q_{t,i}$.
- p_j به کلاس $cl_{A(i)+1,i}$ تخصیص می‌یابد اگر $q_{A(i)+1,i} \leq a_i(p_j)$.

به منظور توزیع متوازن پروژه‌ها در مدل پیشنهادی به جای حداکثر نمودن عایدی حاصل از انتخاب پروژه‌ها به دنبال تعیین پورتفولیوی هستیم که در آن تعداد پروژه‌هایی که سطوح رضایت تعریف‌شده را کسب نموده‌اند حداکثر گردد. بدین منظور ابتدا مجموعه بالقوه پروژه‌ها را در نظر گرفته می‌شود. هر زیرمجموعه‌ای از پروژه‌ها $(\hat{P} \subseteq P)$ یک پورتفولیوی بالقوه است که می‌توان آن را با برداری به شکل زیر نشان داد:

$$Y = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_n\} \quad (16)$$

که برای هر $p_j \in P$ خواهیم داشت:

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{if } p_j \text{ contained in } \hat{P} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

بر اساس تعاریف انجام‌شده، پروژه‌هایی که سطح رضایت t برای معیار i را کسب نموده‌اند به صورت ذیل خواهند بود:

$$\hat{P}_{t,i} = \{p_j \in \hat{P} : a_i(p_j) \geq q_{t,i}\} \quad (18)$$



بر اساس توضیحات ارائه‌شده هدف مسئله بهینه‌سازی حداکثر نمودن تعداد پروژه‌هایی است که سطح رضایت معینی را برای معیارها کسب نموده‌اند. بدین ترتیب مسئله بهینه‌سازی پورتفولیوی فناوری دولت به صورت ذیل خواهد بود:

$$\text{Max } H_{t,i}, \forall a_i \in A, \forall cl_{t,i} \in Cl_i \quad (19)$$

S.t.

$$\sum_{p_j \in P} f_i y_i \leq F,$$

که در آن تابع هدف حداکثر نمودن تعداد اعضای مجموعه $|\hat{P}_{t,i}|$ است که با $H_{t,i}(y)$ نشان داده شده است. محدودیت مدل بر اساس بودجه موردنظر دولت جهت اعطای مشوق (F) و حداقل میزان مشوق موردنیاز هر یک از پروژه‌ها (f_i) تعریف شده است. به منظور ساده نمودن تابع هدف مسئله بالا، متغیر صفر و یک $k_{i,j,t}$ به صورت ذیل تعریف به یک مسئله صفر می‌گردد:

$$k_{i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_i(p_j) \geq q_{t,i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$H_{t,i} = \sum_{p_j \in P} k_{i,j,t} \quad (21)$$

در نتیجه، مسئله چندهدفه مورد بررسی به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\text{Max } \sum_{p_j \in P} k_{i,j,t} y_j, \forall a_i \in A, \forall cl_{t,i} \in Cl_i \quad (22)$$

S.t.

$$\sum_{p_j \in P} f_i y_i \leq F$$



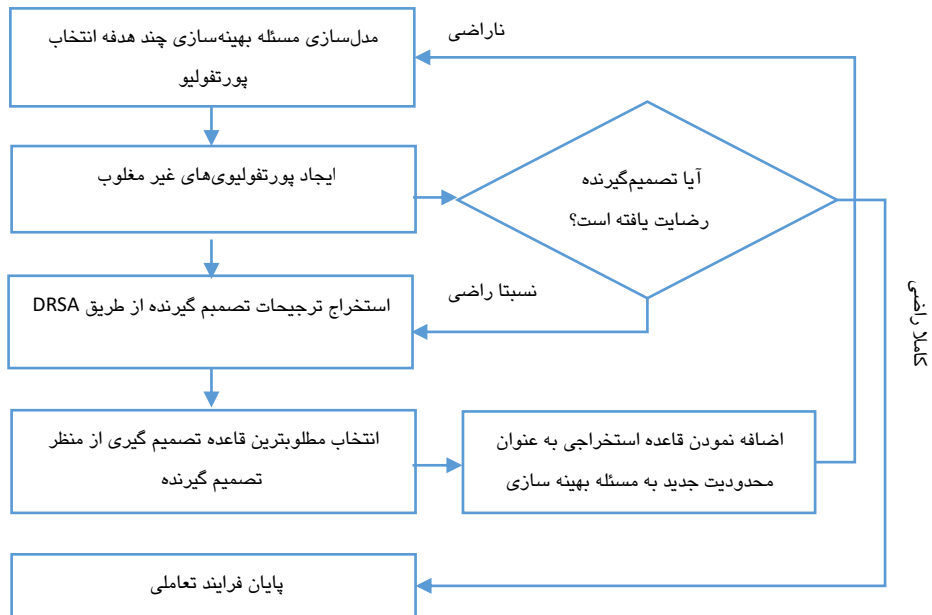
۳-۱- تلفیق رویکرد DRSA و بهینه‌سازی چندهدفه تعاملی

برای حل این مسئله از تلفیق رویکرد بهینه‌سازی تعاملی و رویکرد DRSA استفاده شده است. در این رویکرد فرایند بهینه‌سازی در تعامل با تصمیم‌گیرنده انجام می‌گیرد. فرایند حل مسئله به شرح ذیل است:

- در ابتدا مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو غیر مغلوب برای مسئله چندهدفه مورد نظر محاسبه و به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌گردد. مجموعه جواب‌های پارتو غیر مغلوب را می‌توان با راهکارهای مختلفی محاسبه نمود. در این مقاله برای هر معیار $a_i \in A$ و هر سطح رضایت $q_{t,i} \in Q_i$ ابتدا پورتفولیویی که تعداد پروژه‌ها را حداکثر می‌نماید، تعیین می‌گردد. این موضوع به معنی حداکثر سازی تعداد پروژه‌هایی است که بر اساس معیار a_i حداقل سطح رضایت $q_{t,i}$ را تأمین می‌نمایند.
- مجموعه جواب‌های پارتو غیر مغلوب به دست آمده از مرحله اول به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌گردد. حالت‌های ممکن در خصوص نظر تصمیم‌گیرنده در خصوص مجموعه پاسخ‌های ارائه شده بدین شرح است:
 - ✓ در بین راهکارهای ارائه شده یک راه حل توسط تصمیم‌گیرنده انتخاب و فرایند تعامل پایان می‌پذیرد.
 - ✓ هیچ‌یک از راهکارها مورد تأیید نیست و می‌بایست مسئله مجدد مدل‌سازی شود.
 - ✓ تصمیم‌گیرنده رضایت کامل را نداشته و پورتفولیوها از منظر وی قابل تفکیک به دو گروه "خوب" و "سایر" هستند.
- در حالت اول و دوم که ادامه کار مشخص است؛ اما در خصوص حالت سوم که رضایت نسبی حاصل شده است، اطلاعات مربوط به ترجیحات تصمیم‌گیرنده استخراج می‌گردند. با کمک نرم‌افزار رول رنگ، قواعد تصمیم‌گیری مبتنی بر ترجیحات احصا شده استخراج می‌گردند و قواعدی که به بهترین نحو ترجیحات تصمیم‌گیرنده را بر اساس نظر وی تبیین می‌نمایند انتخاب می‌شوند.
- قواعد به صورت نظام‌مند تعیین شده و به منظور رسیدن به پورتفولیوی بهینه در هر مرحله به عنوان محدودیت به مسئله بهینه‌سازی اضافه شده و جواب‌های جدید محاسبه می‌گردند این فرایند تا زمان رسیدن به رضایت کامل تصمیم‌گیرنده ادامه خواهد داشت.



فلوچارت بهینه‌سازی تعاملی و راف مبتنی بر تسلط در قالب شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: فلوچارت مدل بهینه‌سازی تعاملی و راف مبتنی بر

۴- پیاده‌سازی مدل

مبنای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در این بخش اطلاعات مستخرج از گزارش پژوهشگاه نیرو در خصوص پروژه‌های CCUS در ایران است [۲۷]. شایان‌ذکر است در بخش‌هایی نیز که اطلاعات در دسترس نبوده مانند سقف و حداقل بودجه مورد نیاز و یا سطوح رضایتمندی سعی شده تا حد امکان از فرضیات نزدیک به واقعیت استفاده گردد.

۴-۱- اطلاعات مسئله

گزارش ارائه‌شده توسط پژوهشگاه نیرو باهدف بررسی فرایندهای کاربردی به‌منظور دستیابی به روش‌های بهینه تولید محصولات باارزش افزوده از گاز دودکش نیروگاه‌ها در ایران به تحلیل فناوری‌های بالقوه از سه منظر فنی، اقتصادی و محیطی، بهداشتی، ایمنی پرداخته است



و دوازده فناوری جذب و بازیابی کربن بر آن اساس مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. علت انتخاب این فناوری‌های ماهیت محصولات آنها از منظر ایجاد ارزش افزوده و قابلیت پیاده‌سازی آنها در ایران بوده است. در این مطالعه از میان معیارهای مورد بررسی در گزارش مذکور پنج معیار ذیل به‌عنوان معیارهای مورد نظر دولت جهت انتخاب پورتفولیوی فناورانه انتخاب شده‌اند که شامل: ظرفیت بازار (a_1)، جذب کربن (a_2)، مستقل‌بودن از سوخت‌های فسیلی (a_3)، محدودیت جغرافیایی (a_4) و ارزش افزوده (a_5) هستند. نتیجه امتیازدهی اولیه بر اساس گزارش خلیلی گرکانی و همکاران (۲۰۲۰) در قالب جدول ۲ ارائه شده است. فرض شده است حداقل بودجه مورد نیاز جهت ترغیب به سرمایه‌گذاری متناسب با ماهیت پروژه‌ها f_i و کل بودجه جهت ارائه مشوق‌ها (F) معادل ۱۰۰ میلیون یورو در نظر گرفته شده است. اولین جواب‌های پارتو غیر مغلوب در قالب جدول ۳ ارائه شده‌اند. برای رسیدن به جواب‌های پارتو غیر مغلوب روش‌های مختلفی را می‌توان بکار برد در این مطالعه از حل جداگانه مسائل بهینه‌سازی برای هر معیار در هر سطح رضایت استفاده شده است. از آنجا که هدف اولیه انتخاب پورتفولیوی پروژه‌ها به‌گونه‌ای است که برای هر یک از معیارها تعداد پروژه‌هایی که حائز شرایط در هر یک از سطوح رضایت تعریف شده باشند حداکثر گردد، لذا بر اساس تعریف پنج معیار و سه سطح رضایت ۱۵ مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌گردد. به‌عنوان مثال حداکثر نمودن $H_{1,1}$ به معنای حداکثر نمودن تعداد پروژه‌هایی است که اولین سطح رضایت تعریف شده برای معیار اول را احراز نمایند. بر این اساس باید مسئله بهینه‌سازی صفر و یک معادله ۲۳ حل گردد.

$$\max \sum_{p_j \in P} k_{1,j,1} y_j, \forall a_i \in A, \forall cl_{t,i} \in Cl_i \quad (23)$$

S.t.

$$\sum_{p_j \in P} f_i y_i \leq F$$

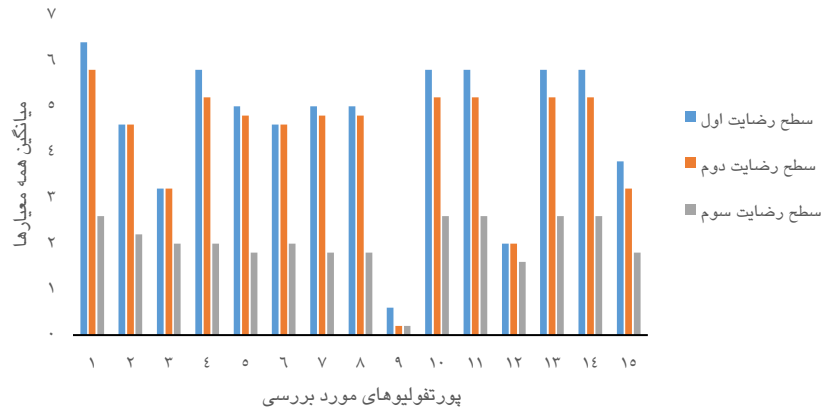


پورتفولیوی اول (p_1) شامل پروژه‌ها $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ است. مقادیر $H_{1,2}$ تا $H_{5,3}$ برای این پورتفولیو محاسبه و در جدول درج گردیده است. بهینه‌سازی هر پورتفولیو به همین ترتیب تا پورتفولیوی پانزدهم انجام و جدول تکمیل گردیده است.

جدول ۲: ارزیابی پروژه‌ها بر اساس معیارهای انتخابی

f	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	محصول پروژه	پروژه‌ها
۱۰	۴	۴	۰	۰	۴	اوره	x_1
۴۰	۰	۲	۲	۰	۴	گاز سنتز	x_2
۱۰	۴	۴	۰	۰	۰	اسید سالیک	x_3
۱۰	۴	۳	۰	۱	۱	پلی‌کربنات	x_4
۱۰	۴	۳	۲	۲	۱	دی متیل کربنات	x_5
۱۰	۴	۳	۲	۴	۲	دی متیل اتر	x_6
۳۰	۰	۳	۰	۴	۴	اتانول	x_7
۴۰	۲	۲	۲	۵	۳	کربنات سدیم	x_8
۳۰	۲	۲	۲	۴	۴	کربنات کلسیم	x_9
۴۰	۰	۰	۴	۱	۱	اسید فرمیک	x_{10}
۲۰	۲	۴	۲	۴	۴	متان	x_{11}
۱۰	۲	۲	۲	۴	۳	متانول	x_{12}

برای حل این مسائل از نرم‌افزار متلب ۲۰۲۲a استفاده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود زوج پورتفولیوهای $(p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{14})$ و (p_7, p_8) یکسان هستند. جهت آغاز فرایند بهینه‌سازی تعاملی و به‌منظور اخذ نظر تصمیم‌گیرنده نتایج بهینه‌سازی و هیستوگرام پورتفولیوها بر اساس میانگین همه معیارها به تصمیم‌گیرنده ارائه گردید (شکل ۳).



شکل ۳: میانگین عملکرد پورتفولیوها بر اساس هر معیار

فرض کنیم تصمیم‌گیرنده نتایج را بررسی و پورتفولیوها را به دو گروه خوب و سایر تفکیک نموده است (جدول ۳). با استفاده از رویکرد DRSA و بر اساس اطلاعات ترجیحات وی، قواعد تصمیم‌گیری به کمک نسخه ۲۰۱۸ نرم‌افزار Rule Rank استخراج گردیده است. (جدول ۴).

جدول ۳: مجموعه جواب‌های پارتو فرانت غیر مغلوب حاصل از اجرای اول مدل

طبقه	$H_{e,2}$	$H_{e,2}$	$H_{e,1}$	$H_{e,2}$	$H_{e,2}$	$H_{e,1}$	$H_{r,2}$	$H_{r,2}$	$H_{r,1}$	$H_{r,2}$	$H_{r,2}$	$H_{r,1}$	$H_{r,2}$	$H_{r,1}$	$H_{r,1}$	$\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}$
خوب	۴	۷	۷	۲	۷	۷	۰	۵	۵	۴	۵	۶	۳	۵	۷	P_1
-	۲	۵	۵	۲	۵	۵	۰	۴	۴	۴	۴	۴	۳	۵	۵	P_2
-	۱	۳	۳	۲	۴	۴	۰	۲	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۴	P_3
خوب	۳	۶	۶	۱	۶	۶	۰	۵	۵	۴	۵	۶	۲	۴	۶	P_4
-	۲	۵	۵	۱	۵	۵	۰	۵	۵	۴	۵	۵	۲	۴	۵	P_5
-	۱	۴	۴	۱	۵	۵	۰	۴	۴	۵	۵	۵	۳	۵	۵	P_6
-	۲	۵	۵	۱	۵	۵	۰	۵	۵	۴	۵	۵	۲	۴	۵	P_7
-	۲	۵	۵	۱	۵	۵	۰	۵	۵	۴	۵	۵	۲	۴	۵	P_8
-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	P_9
خوب	۵	۷	۷	۳	۷	۷	۰	۴	۴	۳	۴	۵	۲	۴	۶	P_{10}



طبقه	$H_{\sigma,3}$	$H_{\sigma,2}$	$H_{\sigma,1}$	$H_{\varepsilon,3}$	$H_{\varepsilon,2}$	$H_{\varepsilon,1}$	$H_{\tau,3}$	$H_{\tau,2}$	$H_{\tau,1}$	$H_{\rho,3}$	$H_{\rho,2}$	$H_{\rho,1}$	$H_{\lambda,3}$	$H_{\lambda,2}$	$H_{\lambda,1}$	$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^n H_{i,t}$
خوب	۵	۷	۷	۳	۷	۷	۰	۴	۴	۳	۴	۵	۲	۴	۶	P_{11}
-	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	P_{12}
خوب	۵	۷	۷	۳	۷	۷	۰	۴	۴	۳	۴	۵	۲	۴	۶	P_{13}
خوب	۵	۷	۷	۳	۷	۷	۰	۴	۴	۳	۴	۵	۲	۴	۶	P_{14}
-	۵	۷	۷	۳	۷	۷	۰	۴	۴	۳	۴	۵	۲	۴	۶	P_{15}

جدول ۴: مجموعه قواعد استخراج شده بر اساس نظرات تصمیم‌گیرنده متناظر با اجرای اول

ردیف	تصمیم	شرط اول	شرط دوم	شرط سوم	محدودیت متناظر
۱	$x S y$	$\text{diff_}H_{\varepsilon,1} > = 0$			-
۲	$x S y$	$\text{diff_}H_{\lambda,1} > = -2$	$\text{diff_}H_{\varepsilon,2} > = 2$		-
۳	$x S y$	$\text{diff_}H_{\tau,1} > = -2$	$\text{diff_}H_{\sigma,1} > = -1$	$\text{diff_}H_{\sigma,2} > = 0$	$H_{\varepsilon,2} > = 2$
۴	$x S y$	$\text{diff_}H_{\lambda,1} > = -1$	$\text{diff_}H_{\rho,2} > = 2$		$H_{\lambda,2} > = 2$
۵	$x S y$	$\text{diff_}H_{\rho,2} > = 1$	$\text{diff_}H_{\tau,1} > = -1$	$\text{diff_}H_{\sigma,3} > = -1$	-
۶	$x S y$	$\text{diff_}H_{\tau,1} > = 0$	$\text{diff_}H_{\sigma,3} > = -2$		-
۷	$x S c y$	$\text{diff_}H_{\tau,1} < = -0$			-
۸	$x S c y$	$\text{diff_}H_{\lambda,1} < = -1$	$\text{diff_}H_{\rho,2} < = -1$		-
۹	$x S c y$	$\text{diff_}H_{\tau,1} < = -2$	$\text{diff_}H_{\sigma,3} < = -3$		-

منظور از $x S y$ این است که پورتفولیوی x بر y غلبه دارد و $x S c y$ به معنی مغلوب شدن x است. منظور از $\text{diff_}Hit$ اختلاف مقدار $H_{i,t}$ برای دو پورتفولیوی x و y است. به عنوان مثال قانون ردیف اول بیانگر این موضوع است که پورتفولیوی x بر y غلبه دارد اگر مقدار $H_{\varepsilon,1}$ برای پورتفولیوی x بزرگتر از مقدار $H_{\varepsilon,1}$ برای پورتفولیوی y باشد و یا به عبارت دیگر $\text{diff_}H_{\varepsilon,1} > = 0$ در مرحله بعد قوانین استخراج شده به تصمیم‌گیرنده ارائه گردیده است و از میان آن‌ها قانون دوم به عنوان قانونی که بهتر از بقیه منعکس‌کننده نظرات تصمیم‌گیرنده است، انتخاب شده است. سپس شرایط حداقلی تحقق این قانون استخراج و به عنوان محدودیت به مدل بهینه‌سازی اضافه و محاسبات مجدد صورت گرفته است. بر اساس پیاده‌سازی مدل ارائه شده فرایند مذکور تا پنج مرحله ادامه یافت و در نهایت در مرحله پنجم همه جواب‌ها همگرا



گردیدند و به جدول ۵ منتج گردید که براین اساس پروژه‌های X_{10} ، X_{4} ، X_5 ، X_6 ، X_{10} ، X_{11} انتخاب گردیدند.

جدول ۵: مجموعه جواب‌های پارتو فرانت غیر مغلوب حاصل از اجرای پنجم مدل

طبقه	$H_{0,2}$	$H_{0,3}$	$H_{0,1}$	$H_{4,2}$	$H_{4,1}$	$H_{5,2}$	$H_{5,1}$	$H_{6,2}$	$H_{6,1}$	$H_{10,2}$	$H_{10,1}$	$H_{11,2}$	$H_{11,1}$	$H_{12,2}$	$H_{12,1}$	ردیف
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{10}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{12}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{13}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{4}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_5
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_6
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_V
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{11}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{12}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{13}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{14}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{15}
خوب	۴	۵	۵	۲	۵	۵	۱	۴	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۶	P_{16}



۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه مسئله بهینه‌سازی پورتفولیوی پروژه‌های فناوری‌های جذب و بازیابی کربن جهت تخصیص مشوق‌های دولتی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه فرایند انتخاب فناوری‌های CCUS به جهت عدم قطعیت‌های مختلف فرایندی غیردقیق و غیرقطعی است؛ لذا ارائه مدلی شفاف و نظام‌مند با قابلیت ارائه نتایج قابل فهم کمک شایانی در حصول نتایج مطلوب خواهد داشت. بدین منظور با توجه به قابلیت‌های رویکرد DRSA در تحلیل داده‌ها و همچنین با هدف مشارکت بیشتر تصمیم‌گیرنده در فرایند انتخاب پورتفولیوی فناوری، مدل بهینه‌سازی تعاملی پورتفولیوی پروژه‌های فناوری‌ها با استفاده از DRSA توسعه داده شده است. برای ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی نخست اطلاعات ارزیابی اطلاعات ارزیابی پروژه‌های فناوری‌ها در حوزه CCUS در ایران استخراج و سپس بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای منتخب، پورتفولیوی پروژه‌های فناوری‌ها در قالبی فرضی و در تعامل مستقیم با تصمیم‌گیرنده، تعیین شده است. تحلیل ترجیحات تصمیم‌گیرنده و استنتاج قواعد تصمیم‌گیری با استفاده از رویکرد تئوری راف مبتنی بر تسلط انجام گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده کارایی مناسب تلفیق بهینه‌سازی تعاملی و رویکرد تئوری راف مبتنی بر تسلط جهت انتخاب پروژه‌های فناوری‌ها است. رویکرد راف مبتنی بر تسلط از طریق استنتاج قوانین مبتنی بر ترجیحات تصمیم‌گیرنده امکان شفاف و نظام‌مند نمودن فرایند تصمیم‌گیری را فراهم می‌نماید. از سوی دیگر تصمیم‌گیرنده به کمک روش بهینه‌سازی تعاملی نتایج تصمیمات خود را در هر مرحله ملاحظه و در حلقه‌های تکرار شونده، اصلاح و تا رسیدن به نتیجه مطلوب بهبود می‌دهد. مدل پیشنهادی این پژوهش کاربردهای مهمی در حوزه سیاست‌گذاری و توسعه فناوری‌های جذب و بازیابی کربن دارد. استفاده از رویکرد تلفیقی راف مبتنی بر تسلط و بهینه‌سازی تعاملی در شرایط عدم قطعیت، فرایند تصمیم‌گیری را شفاف نموده و کمک شایانی به انتخاب رویکردهای مناسب می‌نماید. این مدل همچنین با فراهم نمودن امکان انتخاب پورتفولیوی متوازن از فناوری‌های کم‌کربن متناسب با معیارهای مورد نظر دولت، سبب افزایش بهره‌وری سرمایه‌گذاری دولتی در حوزه فناوری‌های سبز می‌گردد. ماهیت تعاملی روش پیشنهادی زمینه‌ساز همکاری تنگاتنگ بین ارکان سیاست‌گذار با مراکز تحقیقاتی بوده و می‌تواند نقش مؤثری در همسو نمودن اهداف کلان با منافع اقتصادی و اجتماعی ذی‌نفعان مختلف ایفا نماید.



این مدل همچنین قابلیت تعمیم به مسائل کلی تحلیل و انتخاب پورتفولیو را داشته و با رویکرد ساختاریافته و تکرارپذیر خود می‌تواند فرایند تصمیم‌گیری در حوزه‌های مختلف را تسهیل نماید.

از آنجاکه بسیاری از فناوری‌های جذب و بازیابی کربن بالاخص در ایران به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند؛ لذا پیاده‌سازی مدل بر اساس داده‌های تقریبی و در دامنه محدودی از فناوری‌های جذب و بازیابی کربن صورت‌گرفته است، این موضوع ممکن است بر نتایج پیاده‌سازی مدل اثرگذار باشند. اگرچه هدف اصلی از این مطالعه ارائه چارچوبی جهت نظام‌مند نمودن و شفاف نمودن فرایند تصمیم‌گیری در این حوزه بوده؛ اما به منظور تعمیم‌پذیری نتایج آن به سایر فناوری‌های و سایر کشورها می‌بایست مطالعات بیشتری انجام پذیرد.

در خاتمه به‌منظور توسعه مدل ارائه شده پیشنهاد می‌گردد این موارد موردتوجه محققان قرار گیرد: (۱) بررسی دقیق‌تر عوامل عدم قطعیت در مدل و درنظرگرفتن توابع توزیع احتمال در قالب برنامه‌ریزی احتمالی، (۲) توسعه IMO-DRSA به مدل IMO-Fuzzy DRSA به‌منظور واقعی‌تر نمودن مدل ارائه‌شده، (۳) تلفیق رویکردهای ارزش‌گذاری نوین مانند ارزش اختیار واقعی و راف مبتنی بر تسلط در فرایند انتخاب پروژه‌ها، (۴) پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در دامنه وسیع‌تری از فناوریهای جذب و بازیابی کربن و هم‌چنین سایر حوزه‌های انتخاب پورتفولیو و بر اساس داده‌های واقعی و در نهایت (۵) تلفیق مباحث مربوط به انتخاب پورتفولیوی مارکویتز با مدل پیشنهادی.

۶- منابع

- [۱] Jeff Tollefson. (۲۰۱۸). Clock ticking on climate action Peer-reviewed homeopathy study sparks uproar in Italy. Springer Nature Limited, ۵۶۲, ۱۷۲-۱۷۳.
- [۲] Internationa Energy Agency. (۲۰۲۲). Energy system of Iran., <https://www.iea.org/countries/iran>
- [۳] Lin, B., & Tan, Z. (۲۰۲۱). How much impact will low oil price and carbon trading mechanism have on the value of carbon capture utilization and storage (CCUS) project Analysis based on real option method. Journal of Cleaner Production, ۲۹۸, ۱۲۶۷۶۸. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126768>
- [۴] Yao, X., Fan, Y., Zhu, L., & Zhang, X. (۲۰۲۰). Optimization of dynamic incentive for the deployment of carbon dioxide removal technology: A nonlinear dynamic



- approach combined with real options. *Energy Economics*, ۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104643>
- [۵] Barbati, M., Greco, S., Kadziński, M., & Słowiński, R. (۲۰۱۸). Optimization of multiple satisfaction levels in portfolio decision analysis. *Omega (United Kingdom)*, ۷۸, ۱۹۲-۲۰۴. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.06.013>
- [۶] Mehrabanpour, M., Azar, A., Shahrami Babkan, M., (۲۰۲۲). Stock price forecasting by presenting a hybrid model using principal component analysis and rough set theory. *Modern Research in decision making*. (۷)۲, ۱۳۷-۱۶۷. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24766291.1401.7.2.6.9> [In Persian].
- [۷] Słowiński, R. (۲۰۱۰). New Applications and Theoretical Foundations of the Dominance-based Rough Set Approach. ۲-۳. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13029-3_2
- [۸] Błaszczyński, J., Greco, S., Matarazzo, B., & Szelaq, M. (۲۰۲۲). Dominance-Based Rough Set Approach: Basic Ideas and Main Trends. *Multiple Criteria Decision Making*, ۳۵۳-۳۸۲. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96318-7_18
- [۹] Stummer, C., & Heidenberger, K. (۲۰۰۱). Interactive R&D portfolio selection considering multiple objectives, project interdependencies, and time: A three-phase approach. *Picmet*, ۴۲۳-۴۲۸. <https://doi.org/10.1109/picmet.2001.902270>
- [۱۰] Abbassi, M., Ashrafi, M., Kheirkhah, A.S., Bonyad, H., Ghorbanzade, H., (۲۰۱۳). R&D Projects Portfolio Selection by Developing a Hybrid DEA-BSC Model. *Journal of Science & Technology Policy*. (۵)۳, ۶۷-۸۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080840.1392.5.3.7.9>. [In Persian].
- [۱۱] Bararinia, E., Abbasi, R., Safari, S., (۲۰۱۹). Priority Pattern of Advanced Technology Projects. *Journal of Strategic Management Studies*. (۱۰)۳۸, ۲۳۷-۲۶۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286803.1398.10.38.10.6> [In Persian].
- [۱۲] Adel rastkhiz, S., Mobini Dehkordi, A., yadollahi farsi, J. (۲۰۲۱). Introducing a model for evaluating entrepreneurial opportunities based on fuzzy approach. *Management Research in Iran*, ۲۳(۱), ۷۵-۹۷. [In Persian].
- [۱۳] Su, Q., Zhou, P., & Ding, H. (۲۰۲۰). Portfolio optimization of diversified energy transition investments with multiple risks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۲۱۹, ۱۱۵۸۴۴. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110844>
- [۱۴] Chen, H., Hu, J., Bai, S., & Shi, G. (۲۰۲۰). Robust portfolio optimization considering the value of flexibility: Application to WTE technology portfolios. *Energy Economics*, ۱۴۷. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.108470>



- [۱۵] Yu, B., Zheng, Z., Xiao, Z., Fu, Y., & Xu, Z. (۲۰۲۳). A large-scale group decision-making method based on group-oriented rough dominance relation in scenic spot service improvement. *Expert Systems with Applications*, ۲۳۳. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120999>
- [۱۶] Goudarzi, A. and Gholamian, M. R. (۲۰۲۴). Green Supplier Selection with a new PROMETHEE-Cloud Group Decision Making Method; Case Study: A Manufacturer of Oil Products. *Modern Research in Decision Making*, ۹(۲), ۶۳-۹۷.
- [۱۷] Li, D., & Hu, S. (۲۰۲۴). Adaptive large-scale group interactive portfolio optimization approach based on social network with multi-clustering analysis and minimum adjustment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ۱۳۳. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108403>
- [۱۸] Shaverdi, M., Yaghoubi, S., & Ensafian, H. (۲۰۲۰). A multi-objective robust possibilistic model for technology portfolio optimization considering social impact and different types of financing. *Applied Soft Computing Journal*, ۸۶, ۱۰۵۸۹۲. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105892>
- [۱۹] Frej, E. A., Ekel, P., & de Almeida, A. T. (۲۰۲۱). A benefit-to-cost ratio based approach for portfolio selection under multiple criteria with incomplete preference information. *Information Sciences*, ۵۴۵, ۴۸۷-۴۹۸. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.08.119>
- [۲۰] Tavakkoli, Gh., Bagherzadeh nayeri, M., Shabani sichan, M. (۲۰۲۱). -Designing and Implementing a Performance Measurement Model at R&D Centers: Combining Data Envelopment Analysis and Balanced Scorecard. *Management Research in Iran*, ۱۵(۱), ۱۳۵-۱۵۸. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.232220.1390.15.1.6.6>[In Persian].
- [۲۱] Etgar, R., & Cohen, Y. (۲۰۲۲). Roadmap Optimization: Multi-Annual Project Portfolio Selection Method. *Mathematics*, ۱۰(۹). <https://doi.org/10.3390/math10091601>
- [۲۲] Faria, V. A. D., Rodrigo de Queiroz, A., & DeCarolis, J. F. (۲۰۲۳). Scenario generation and risk-averse stochastic portfolio optimization applied to offshore renewable energy technologies. *Energy*, ۲۷۰(June ۲۰۲۲), ۱۲۶۹۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126946>
- [۲۳] Zhao, C., & Wang, F. (۲۰۲۴). Economy-equity equilibrium based bi-level provincial renewable portfolio standard target allocation: Perspective from China. *Energy*, ۲۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130248>
- [۲۴] Alavi, S. H., & Jabbarzadeh, A. (۲۰۱۸). Supply chain network design using trade credit and bank credit: A robust optimization model with real-world application.



Computers and Industrial Engineering, ۱۲۵, ۶۹-۸۶.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.005>

- [۲۵] Farshidi, S., Jansen, S., España, S., & Verkleij, J. (۲۰۲۰). Decision Support for Blockchain Platform Selection : Three Industry Case Studies. IEEE Transactions on Engineering Management, ۶۷(۴), ۱۱۰۹-۱۱۲۸.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2956897>
- [۲۶] Salvadó, L. L., Villeneuve, E., Masson, D., Akle, A. A., & Bur, N. (۲۰۲۲). Decision Support System for technology selection based on multi-criteria ranking : Application to NZEB refurbishment. Building and Environment, ۲۱۲, ۱۰۸۷۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108786>
- [۲۷] Khalili-Garakani, A., Ghaseminezhad, M., Davoodi darzi, S., (۲۰۲۰). Applied Processes to Achieve Optimal Methods of Manufacturing Value Added Products from Power Plant Flue Gas, Niroo Research Institute (NRI), DOI: ۱۰.۳۰۵۰۳/nripress.۲۰۲۰.۰۹۹. [In Persian]