

# رویکرد ترکیبی AHP-TOPSIS گروهی برای رتبه‌بندی لاستیک EPDM سنتز شده با کاتالیزور $\text{BisIndZrCl}_2$

## A Combined AHP-Topsis Group Approach for Suitable Ranking EPDM Rubber Synthesized Catalyst by BisIndZrCl<sub>2</sub>

بسپارش  
فصلنامه علمی- ترویجی  
سال دوم، شماره ۳  
صفحه ۳۴-۴۶  
۱۳۹۱  
ISSN: 2252-0449

علی سیبویه<sup>۱</sup>، سعید احمدجو<sup>۲\*</sup>، سید محمد مهدی مرتضوی<sup>۲</sup>

۱- مشهد، دانشکاه علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۱۳۵۷

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵-۱۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۹

### چکیده



علی سیبویه



سعید احمدجو



سید محمد مهدی مرتضوی

### وازگان کلیدی

متالوسن،  
لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان،  
تصمیم‌گیری چندمعیاری،  
تاپسیس،  
فرایند تحلیل سلسه مراتبی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

s.ahmadjo@ippi.ac.ir

## مقدمه

پیشرفت‌های حاصل در علوم و فناوری به رشدی فزاینده و نامحدود در تولید و مصرف پلی‌اولفین‌ها منجر شده است. به نحوی که طی دو دهه اخیر، چنین رشد قابل توجه و پیش‌بینی نشده‌ای در تولید سایر مواد پلاستیکی دیده نشده است. روند رو به رشد مصرف پلی‌اولفین‌های سنتز شده با کاتالیزورهای کوئوردیناسیونی بسیار چشمگیر بوده است.

پیش‌بینی می‌شود، این مقدار در سال ۲۰۱۸ به حدود ۱۶۰ میلیون تن بر سد [۱-۳]. امروزه، تحقیقات روی کاتالیزورها و نوآوری در تولید پلی‌اولفین‌هایی با خواص و کاربرد ویژه متمنکز شده و سهم عمده‌ای از سرمایه‌گذاری شرکت‌های مهم پلی‌اولفینی را به خود اختصاص داده است. در این راستا، پلی‌اولفینی اولفینی است، با استفاده از خواص منحصر به فرد آن کاربردهای مختلفی در صنایع ساختمانی، الکتریکی و خودروسازی و همچنین محصولاتی نظیر عایق پشت بام، روکش سیم و کابل، درزگیر و غیره دارد. در این میان، عده‌ی تلاش‌ها منجر به تولید کاتالیزورهای وانادیمی برای تولید EPDM شده است. این کاتالیزورها در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته و سال‌های متمادی در فرایند محلولی از ترکیباتی نظیر  $\text{VCl}_4$  و  $\text{VOCl}_3$  استفاده شده است [۴].

با پیشرفت‌های انجام شده در زمینه کاتالیزورهای کوئوردیناسیونی، به ویژه کاتالیزورهای متالوسنی با خواص ویژه و منحصر به فرد آنها در تولید کوپلیمرها و تریپلیمرهای اولفینی و پلیمرهایی با خواص و کاربرد ویژه، این کاتالیزورها گویی سبقت را از کاتالیزورهای زیگلر- ناتا ریوده‌اند. کومونومربذیری زیاد، توزیع یکنواخت کومونومر در زنجیر پلیمر و فضا و همچنین ویژگی ساختار پلیمر از جمله مزایای کاتالیزورهای متالوسن نسبت به کاتالیزورهای مرسوم است [۵,۶].

با توجه به این مزایا، تولید کنندگان EPDM سعی و تلاش بسیاری برای جایگزینی کاتالیزورهای متالوسنی کرده‌اند [۷,۸]. از دیگر مزایایی که می‌توان به آن اشاره کرد، توزیع یکنواخت‌تر پروپیلن و اتیلن در زنجیر، دامنه وسیع نسبت‌های خوراک، کاهش مصرف مونومر دی‌انی و خواص پخت بهتر است [۹]. مدل‌های بهینه‌سازی از دوران انقلاب صنعتی در جهان و به ویژه از زمان جنگ جهانی دوم، همواره مورد توجه ریاضی دانان و دست‌اندرکاران صنعت بوده

است. تأکید اصلی مدل‌های کلاسیک بهینه‌سازی، داشتن معیار سنجشی برای تصمیم‌گیری نهایی است. اما توجه پژوهشگران در دهه‌های اخیر به مدل‌های تصمیم‌گیری (multiple criteria- decision- making, MCDM) چندمعیاری (multiple criteria- decision- making, MCDM) برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده‌تر معطوف شده است. در این نوع از تصمیم‌گیری‌ها برای بهینه‌سازی مدل، به جای استفاده از یک معیار سنجش از چند معیار استفاده می‌شود [۱۰].

در مسائل MCDM انتخاب بهترین گزینه، از راه تجزیه و تحلیل همه گزینه‌های پیش‌رو، بر اساس معیارهای مختلف و متنوع انجام می‌پذیرد. تقریباً همه مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاری یک مجموعه چندگانه، متنوع و پیچیده متشکل از عوامل اجتماعی، واقعی و محسوس هستند که حل آنها از راه شهود محض بسیار دشوار است [۱۱].

Opricovic و همکاران [۱۲] در مطالعه خود با تصریح بر اینکه MCDM فرایندی پویا و پیچیده است، آن را شامل دو سطح مدیریتی و مهندسی دانسته‌اند. آنها سطح مدیریتی اهداف را مشخص کرده و گزینه بهینه نهایی را انتخاب می‌کنند. تصمیم‌گیرندگان (decision makers, DMs) در سطوح مدیریتی و مهندسی قادرند راه حل پیشنهادی سطح مهندسی را پذیرفته یا رد کنند. از این‌رو، ماهیت چندگانه بودن معیارهای تصمیمات در این سطح مورد تأکید قرار می‌گیرد.

سطح مهندسی گزینه‌های مورد نظر تعریف شده و به نتیجه انتخاب هر یک از آنها بر اساس معیارهای گوناگون اشاره می‌شود. همچنین، در این سطح گزینه‌ها بر اساس معیارهای چندگانه رتبه‌بندی می‌شوند. تجزیه و تحلیل MCDM در رویارویی با مسائل تصمیم‌گیری، شامل معیارهای چندگانه برای انتخاب گزینه‌ها، به طور گسترده شده است. به منظور غلبه بر مسائل MCDM روش‌های زیادی همچون پرامتی (preference ranking organization method for enrichment evaluations, PROMETHEE) و فرایند تحلیل سلسله مرتبی (analytical hierarchy process, AHP) توسعه یافته‌اند [۱۳].

با وجود تلاش‌های بسیار انجام گرفته توسط پژوهشگران در قالب هزاران ثبت اختراع و مقاله‌ای که در زمینه انواع کاتالیزورهای کوئوردیناسیونی و عملکرد آنها و نیز شناسایی پلیمرهای تولیدی با این کاتالیزورها به طور سالانه منتشر شده است، ضعف‌های بارزی در زمینه تحلیل مناسب

بنابراین، می‌توان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاری در این زمینه برای انتخاب پلیمر مناسب با توجه به معیارهای مختلف، بهره جست. در این مقاله، با استفاده از مزايا و با توجه به کاستي‌های هر روش از رویکرد ترکيبي AHP-TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی استفاده شده است.

## تجربی

### مواد و دستگاه‌ها

۱۶ نمونه لاستیک EPDM سنتز شده [۹] برای تحلیل مناسب پارامترهای موثر فرایندی استفاده شد. مقادیر اتیلن، پروپیلن و دی‌ان وارد شده در پلیمر به وسیله دستگاه زیرقمرز تبدیل فوریه (FT-IR) ساخت شرکت Bruker مدل IF505 به ترتیب طبق روش‌های ASTM D1648 و ASTM D6047 معین شد [۱۸، ۵]. برای شناسایی ریزساختار پلیمرها و تعیین درصد کومونومر از دستگاه روزنانس مغناطیسی هسته (NMR) و حلال‌های تری‌کلروبنزن و ۱،۲-تتراکلروواتان دوتریم دار استفاده شد [۱۹].

آمیزه‌ها با استفاده از غلتک آزمایشگاهی مدل Polymix 200L ساخت آلمان و معادله‌بندی مطابق روش ASTM D3568 تهیه شد. سرعت پخت، زمان برشتگی (t<sub>5</sub>) و زمان پخت بهینه (t<sub>95</sub>) آمیزه با رئومتر Zwick 4308 ساخت آلمان در دمای ۱۷۰°C اندازه‌گیری شد، روش کار مطابق با ASTM D3568 بود.

### تحویل پلیمر

برای انجام پلیمرشدن از راکتور بوچی ۱ لیتری استفاده شد. ابتدا حدود ۴۰۰ mL تولوئن خشک به عنوان محیط پلیمرشدن وارد راکتور شد. سپس، گاز نیتروژن با خلوص

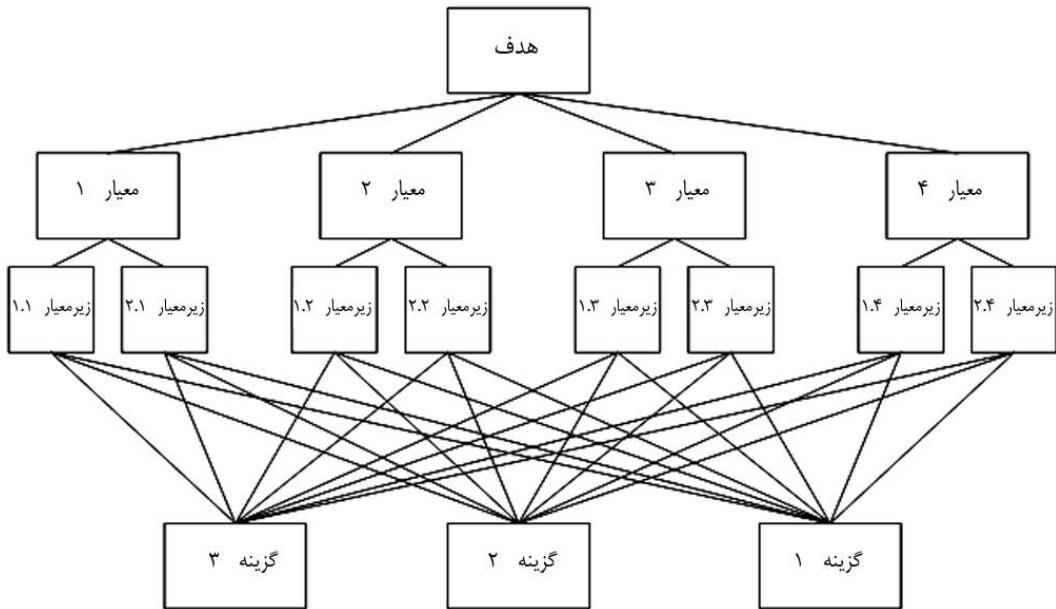
۹۹/۹۹٪ از ستون‌های محتوی سیلیکاژل، KOH و الکهای مولکولی فعال ۴A عبور داده شد. برای خارج کردن هوا و اکسیژن از محیط پلیمرشدن، از خلاء bar ۰/۱ و جریان متناوب نیتروژن در دمای ۸۵°C استفاده شد. هنگامی که دمای پلیمرشدن ثابت شد، راکتور با گازهای اتیلن و پروپیلن با نسبت معین اشباع شد. سپس، مقادیر لازم به ترتیب از کمک کاتالیزور، مونومر دی‌ان و محلول کاتالیزور در تولوئن خشک به راکتور تزریق شد. پس از گذشت h ۱، واکنش متوقف و محلول با متابول ۲% اسیدی رسوب داده شد. آنگاه رسوب در دمای ۶۰°C به مدت h ۲۴ تحت خلاء bar ۰/۱ خشک شد. از محصولات تولید شده فیلم‌های نازکی برای تعیین ترکیب شیمیایی و سایر آزمایش‌ها تهیه شد. در این پژوهش، از نرم‌افزار Expert Choice برای حل مسئله استفاده شد.

### نتایج و بحث

ابتدا نمونه‌های مختلف از ترپلیمر EPDM در نسبت‌های مختلف از خوراک مونومرهای اتیلن، پروپیلن و مونومر دی‌ان و کمک کاتالیزور به کاتالیزور و دمای پلیمرشدن سنتز شد. در مراجع ۸ و ۹، به جزئیات کامل نحوه ترپلیمرشدن و مقادیر اتیلن و پروپیلن وارد شده در شرایط مختلف پلیمرشدن و مقادار محصول دهی کاتالیزور در پلیمر اشاره شده است. مقدار مصرفی آن، قیمت تمام شده پلیمر را معین می‌کند. برای تعیین کیفیت پلیمرها به مقادیر پروپیلن و دی‌ان وارد شده توجه شده است.

با افزایش مقدار دی‌ان وارد شده در پلیمر، زمان پخت کاهش می‌یابد. زمان کوتاه‌تر پخت برای این پلیمر از لحظه اقتصادي مقرن به صرفه‌تر است.

بنابراین، در کار حاضر معیارهای مختلف اثرگذار در کیفیت پلیمرها توسط گروه متخصصان پلیمر مشخص شد. در مرحله بعد، پلیمرهای مختلف به کمک روش AHP وزن‌دهی و به وسیله تاپسیس رتبه‌بندی شدند. در ادامه به طور مختصر رویکرد رویکرد استفاده شده برای رتبه‌بندی پلیمرها با این روش‌ها توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱- ساختار سلسله مراتبی AHP

در زیر است. نمای نمونه از سلسله مراتب تصمیم‌گیری که دارای چهار سطح‌اند، در شکل ۱ ترسیم شده است. گام دوم، مقایسه گزینه‌ها و معیارهای است. هنگامی که مسئله تجزیه شده و سلسله مراتب آن ساخته شد، رویه‌های اولویت‌بندی به منظور تعیین اهمیت نسبی معیارهای هر سطح آغاز می‌شوند. قضاوت‌های زوجی از سطح دوم (معیارها) شروع شده و در آخرین سطح پایان می‌یابند. در هر سطح معیارها به حالت زوجی و بر طبق سطح اثر خود و مبنی بر معیار مشخص شده در سطح بالاتر مقایسه

### روش‌های تحلیل داده‌ها

در این پژوهش، به علت استفاده از رویکرد ترکیبی AHP، TOPSIS، ابتدا در باره هر یک از روش‌های AHP و TOPSIS نیز درباره حالت گروهی هریک از آنها توضیحات مختصری داده شده است. سپس، در باره رویکرد ترکیبی این دو روش بحث می‌شود.

#### AHP

AHP یک فرایند سلسله مراتب تحلیلی برای تصمیم‌گیری چندمعیاری است که توسط Saaty [۱۴] ارائه شده است. ماهیت کاربردی این روش سبب شده است تا طی دو دهه گذشته در بسیاری از زمینه‌های کاربردی گوناگون و حل مسائل تصمیم‌گیری بزرگ و پیچیده به کار رود [۱۵].

Dagdeviren و همکاران [۱۶] بیان کرده‌اند، ابتدا روش AHP مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاری پیچیده را به سلسله مراتب عناصر تصمیم، یعنی هدف، معیار و گزینه‌های تصمیم مرتب با آن مسئله تبدیل می‌کند. روش AHP، اهداف، معیار یا گزینه‌ها را به شکل ساختار سلسله مراتبی، شبیه به درخت فامیلی مرتب می‌سازد. سلسله مراتب حداقل سه سطح دارد: هدف کلی مسئله در اولین سطح، قرار گرفتن معیارهای چندگانه که گزینه‌ها را ارزیابی می‌کنند در وسط و گزینه‌های تصمیم

جدول ۱- مقایسه‌های زوجی در روش AHP.

قضاوت شهودی	ردبندی شمارشی
ترجیح یکسان	۱
ترجیح متوسط	۳
ترجیح قوی	۵
ترجیح سیار قوی	۷
ترجیح بی‌اندازه	۹
۲، ۴، ۶، ۸ و ارزش‌های میانی هستند.	

جدول ۲- مقایسه‌های زوجی [۱۹].

C	$a_1$	...	$a_j$	...	$a_n$
$a_1$	۱				
:		۱			
$a_i$			$Pc(a_i, a_j)$		
:				۱	
$a_n$					۱

که در آن،  $CI$  (consistency index) ضریب یکنواختی ماتریس مقایسه‌های زوجی،  $\lambda_{max}$  بزرگترین بردار ویژه ماتریس مقایسه‌های زوجی و  $n$  تعداد معیارهای مسئله است. سپس، با استفاده از معادله زیر می‌توان نرخ سازگاری را محاسبه کرد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$RI$  شاخص سازگاری تصادفی است که از ماتریس مقایسه‌های زوجی که به طور تصادفی تولید شده، حاصل می‌شود (جدول ۳).

اگر  $0 < CR < 0.1$  باشد، مقایسه‌ها قابل قبول است. اما اگر  $CR \geq 0.1$  باشد، در آن صورت قضاوت‌ها ناسازگار بوده و باید مقادیر ماتریس مقایسه‌های زوجی دوباره بررسی و تجدید نظر شوند. تعیین اولویت کلی برای هر گزینه تصمیم و رتبه‌بندی کلی گزینه‌های تصمیم با ترکیب نتایج تمام سطوح انجام می‌گیرد.

### قضاياوت گروهی در AHP

هنگامی که یک مسئله تصمیم‌گیری به جای یک DM دارای چند DM باشد، نظرهای همگی آنها باید در هر ماتریس تصمیم‌گیری لحاظ شود. در این باره از تصمیم‌گیری گروهی، می‌توان از میانگین هندسی برای عناصر ماتریس استفاده کرد، بدین ترتیب:

Bogdanovic و همکاران [۱۷] تصریح کردند، مقایسه زوجی باید با پرسش از تصمیم‌گیرنده انجام گیرد. بدین شکل که مثلاً پرسیده می‌شود با توجه به هدف تصمیم، کدام مقیاس ۱ تا ۹، همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، باید به عنوان میزان اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر تخصیص داده شود. همچنین Vidal و همکاران [۱۸] به این نتیجه رسیدند، اعداد میانی ۲، ۴، ۶، ۸، ۲، ۴، ۶، ۸ باید برای اصلاح مقایسه استفاده شوند.

جدول مقایسه‌های زوجی عناصر در AHP همانند جدول ۲ تکمیل می‌شود. در این جدول،  $Pc(a_i, a_j)$  نشانگر میزان ارجحیت معیار  $a_i$  بر معیار  $a_j$  است [۱۹]. همان‌طور که واضح است، ارجحیت میان دو معیار یکسان برابر با یک است. همچنین، Bogdanovic و همکاران [۱۷] گزارش کرده‌اند، در این جدول ویژگی دوطرفه بودن وجود دارد، یعنی  $a_{ij} = a_{ji}$  از این جدول برای مقایسه معیارها و گزینه‌ها نیز استفاده می‌شود.

بر اساس مطالعه این پژوهشگر، برای به دست آوردن وزن‌ها به نحو زیر عمل می‌شود.

ابتدا به کمک معادله (۱) نرمال‌سازی انجام می‌گیرد:

$$a_{ij}^* = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad \forall j, j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

به منظور نرمال‌سازی، باید هر عنصر بر حاصل جمع همه عناصر همان ستون از ماتریس مقایسه‌های زوجی تقسیم شود. سپس، وزن‌ها از راه معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$w_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}^* / n \quad \forall i, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

برای بررسی اعتبار مقایسه‌های انجام گرفته میان معیارها، باید ضریب یکنواختی ماتریس به‌وسیله معادله (۳) محاسبه شود:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (3)$$

جدول ۳- شاخص‌های تصادفی سازگاری [۱۴].

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	n
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹	۱/۵۱	۱/۴۸	۱/۵۶	۱/۵۷	۱/۵۹	RI



که در قدم اول یک ماتریس تصمیم‌گیری برای  $n$  گزینه و  $m$  معیار بنا می‌شود [۲۴]. این ماتریس مقدار هر گزینه را بر اساس هر معیار به صورت  $x_{ij}$  نشان می‌دهد:

$$X_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

در گام بعدی اوزان اهمیت برای هر معیار توسط DM مشخص می‌شوند، به طوری که:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

سپس، برای بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری، از تقسیم هر عنصر ماتریس تصمیم‌گیری ( $x_{ij}$ ) بر مجدول مجموع مربعات مقادیر در هر ستون استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n X_{ij}^2}} \quad (8)$$

$r_{ij}$  اندازه مقدار گزینه  $i$  بر اساس شاخص  $j$  و  $r_{ij}$  مقدار بی‌مقیاس شده آن در ماتریس تصمیم‌گیری است. ماتریس زیر ماتریس بی‌مقیاس شده مسئله است:

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

در گام بعدی، اوزان معین شده به وسیله DM برای هر معیار، از راه ضرب در ماتریس بی‌مقیاس شده و ماتریس بی‌مقیاس وزین حاصل می‌شود. بنابراین،  $v_{ij}$  مقدار وزین بی‌مقیاس شده گزینه  $i$  برای معیار  $j$  است:

$$V = W_{n \times n} \cdot R_{n \times m} = \begin{bmatrix} V_{11} & \dots & V_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n1} & \dots & V_{nm} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$W_{n \times n} = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$$

$$a'_{ij} = \left( \prod_{l=1}^k a_{ijl} \right)^{1/k}; \quad i = 1, 2, \dots, k \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad i \neq j \quad (5)$$

که در آن،  $a'_{ij}$  تعداد تصمیم‌گیرندگان است. نظر DM های مختلف بهتر است زمانی وارد محاسبات گروهی شود که نرخ سازگاری نظرات هر DM کمتر از  $0.1$  باشد.

### تابپسیس

تابپسیس برای اولین بار توسط Hwang ارائه شد [۲۰]. تنها داده ذهنی مورد نیاز روش تابپسیس، اهمیت اوزان معیارهای است که این امر موجب جذبیت این روش برای تصمیم‌گیرندگان شده است [۲۱]. مفهوم تابپسیس، بیان کننده این مطلب است که ایده‌آل‌ترین گزینه تنها گزینه‌ای نیست که کوتاه‌ترین فاصله را از راه حل ایده‌آل مثبت دارد، بلکه بیشترین فاصله را از راه حل ایده‌آل منفی نیز دارد [۲۲].

بنابراین مفهوم تابپسیس، نیازمند تعیین یک نقطه ایده‌آل است. تعیین نقطه ایده‌آل عمولاً گام اول برای حل مسائل MCDM است. روش معیار جهانی (global criterion method)، برنامه‌ریزی آرمانی (goal programming)، برنامه‌ریزی فازی (fuzzy programming) و رویکردهای تعاملی همگی به منظور دست‌یابی به راه حلی نسبتاً بهینه به نقاط ایده‌آل اولیه نیازمندند. با وجود یک نقطه ایده‌آل، می‌توان مسائل MCDM را از راه جایابی گزینه‌ها یا تصمیمات حل کرد، مبنی بر اینکه کدام یک به نقطه ایده‌آل نزدیک‌تر است. حال مسئله این است که چگونه این فاصله از نقطه ایده‌آل سنجیده می‌شود. تابپسیس از روش اقلیدسی برای محاسبه فواصل از نقاط ایده‌آل مثبت و منفی بهره می‌گیرد [۲۳].

مزایای روش تابپسیس به شرح زیر است:

- ۱- مفهوم عقلائی و جامع،
- ۲- محاسبات آسان،
- ۳- توانمندی در به تصویر کشیدن پیگیری بهترین عملکرد عملیات یک شرکت برای هر معیار ارزیابی، در یک شکل ساده ریاضی و
- ۴- گنجاندن اوزان هدف در فرایندی مقایسه‌ای با توجه به مفهوم آن [۲۲].

در تشریح گام‌های روش حل تابپسیس بیان می‌دارد Tavana

رو بر اساس این شاخص، رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام می‌شود.

### قضاویت گروهی در تاپسیس

Shih و همکاران [۲۵] در مطالعه خود گزارش کردند، از آنجا که بسیاری از تصمیم‌گیری‌های سازمان‌ها به‌طور مشارکتی انجام می‌شود، پس باید تاپسیس را به‌سوی یک محیط تصمیم‌گیری گروهی توسعه داد تا با دنیای واقعی کار تناسب بیشتری داشته باشد.

آنها در مطالعه خود به تشریح فرایند استفاده از تاپسیس گروهی پرداخته‌اند. بر اساس این فرایند، با توجه به نظر هر تصمیم‌گیرنده از گروه تصمیم‌گیرنده‌گان ( $(k=1,2,\dots,n)$ ) یک ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل شده و از راه روش تاپسیس فواصل هر گزینه از گزینه ایده‌آل مثبت ( $S_i^{k+}$ ) و گزینه ایده‌آل منفی ( $S_i^{k-}$ ) به ازای هر یک از ماتریس‌های تصمیم‌گیری ناشی از نظر تصمیم‌گیرنده‌گان محاسبه می‌شود. میانگین هندسی این فواصل، معین کننده مقدار نهایی فواصل از گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی برای هر گزینه است. معادله‌های زیر بیانگر میانگین هندسی فواصل از گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی است:

$$\overline{S_i^+} = \left( \prod_{k=1}^k S_i^{k+} \right)^{1/k}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\overline{S_i^-} = \left( \prod_{k=1}^k S_i^{k-} \right)^{1/k}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

در نهایت نیز با محاسبه شاخص نزدیکی نسبی برای هر گزینه، بر اساس معادله زیر امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس بیشترین مقدار شاخص نزدیکی نسبی محقق می‌شود:

$$\overline{C_i^*} = \frac{\overline{S_i^+}}{\overline{S_i^+} + \overline{S_i^-}}; \quad 0 \leq \overline{C_i^*} \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

بنابراین، بیشترین شاخص نزدیکی نسبی  $\overline{C_i^*}$  مشخص کننده بهترین گزینه است.

### رویکرد ترکیبی AHP-TOPSIS گروهی

رویکرد ترکیبی AHP-TOPSIS به طور گسترده استفاده شده است [۲۶]. رویکرد AHP به کمک ساختاردهی مناسب

اینک نوبت به محاسبه گزینه ایده‌آل مثبت و گزینه ایده‌آل منفی می‌رسد. گزینه ایده‌آل مثبت بیشترین مقدار یک گزینه در معیارهای مثبت (معیارهای از جنس سود) یا کمترین مقدار آن گزینه در معیارهای منفی (معیارهایی از جنس هزینه) در ماتریس بی مقیاس وزین خواهد بود:

$$\begin{aligned} A^+ &= \left\{ \left( \max_{j \in B} v_{ij} \right), \left( \min_{j \in C} v_{ij} \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\} \\ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+ \} \end{aligned} \quad (11)$$

گزینه ایده‌آل منفی نیز کمترین مقدار یک گزینه در معیارهای مثبت یا بیشترین مقدار آن گزینه در معیارهای منفی در ماتریس بی مقیاس وزین است:

$$\begin{aligned} A^- &= \left\{ \left( \min_{j \in B} v_{ij} \right), \left( \max_{j \in C} v_{ij} \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\} \\ &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^- \} \end{aligned} \quad (12)$$

B عبارت از مجموعه معیارها با بار معنایی مثبت (مانند سود) و C مجموعه معیارها با بار معنایی منفی (مانند هزینه) است.

در گام بعدی، برای محاسبه فاصله گزینه ایده‌آل با گزینه ایده‌آل مثبت ( $S_i^+$ ) و گزینه ایده‌آل منفی ( $S_i^-$ ) از روش اقلیدسی استفاده می‌شود:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

در پایان نزدیکی نسبی گزینه ایده‌آل با راه حل ایده‌آل، از تقسیم فاصله آن گزینه از گزینه ایده‌آل منفی بر مجموع فواصل آن گزینه از گزینه ایده‌آل منفی و گزینه ایده‌آل مثبت حاصل می‌شود. معادله زیر بیانگر این مطلب است:

$$C_i^* = \frac{S_{i-}}{(S_{i+} + S_{i-})}; \quad 0 \leq C_i^* \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

بهترین گزینه آن است که شاخص  $C_i^*$  آن بیشتر باشد. از این



جدول ۴- معیارهای مورد مقایسه.

نام معیار	واحد	حداکثر - حداقل	توضیحات
کیفیت	۵ نقطه	بیشینه	کیفیت پلیمر به عنوان نمادی از یکنواختی توزیع پروفیلن و اتیلن در نظر گرفته شده که توسط متخصصان معین شده است.
هزینه	\$	کمینه	تخمینی از کل هزینه‌های انجام شده به ازای وزن پلیمر تولیدی در مقیاس آزمایشگاهی برآورده شده است.
محصول‌دهی	g	بیشینه	معیاری از وزن پلیمر حاصل از مرحله پلیمرشدن است.
زمان پخت	کمینه	کمینه	معیاری از میزان عملکرد لاستیک در فرایند پخت است. زمان پخت کم از لحاظ اقتصادی برای فرایندهای مصرف کننده لاستیک ارجحیت دارد.

## TOPSIS

## گردآوری داده‌ها

در این مقاله، پلیمرهای EPDM سنتز شده با کاتالیزور متالوسن  $\text{ZrCl}_2\text{Bis}(\text{Ind})_2$  که در شرایط مختلف فرایندهای نظیر دما، فشار، مقدار دی‌ان‌خوراک، نسبت پروفیلن به اتیلن، مقدار کاتالیزور و نسبت کمک کاتالیزور به کاتالیزور تهیه شده‌اند، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. برای دست‌یابی به محصول مناسب و تحلیل کمی و کیفی نمونه‌ها به منظور تعیین بهترین شرایط فرایندهای برای تولید لاستیک EPDM چهار پارامتر وزن پلیمر، کیفیت پلیمر، هزینه تمام شده پلیمر در مقیاس آزمایشگاهی و زمان پخت پلیمر به عنوان معیارهای کلیدی و اثرگذار بر محصول نهایی توسط تصمیم‌گیرنده معین شده‌اند. با توجه به پیچیدگی پلیمر EPDM وجود سه مونومر متفاوت در ساختار زنجیر اصلی، تصمیم‌گیری و انتخاب معیارها با دقت نظر انجام شده است. همان‌طور که در جدول ۴ آمده است، بر اساس اولویت‌ها، وزن پلیمر به عنوان معیاری از عملکرد محصول‌دهی کاتالیزور و کیفیت پلیمر به عنوان معیاری از

مسئله و تجزیه آن به قسمت‌های ساده‌تر و همچنین با وزن‌دهی معیارها می‌تواند به روش تاپسیس کمک کند که فن خاصی برای وزن‌دهی معیارها ارائه نمی‌کند. از طرفی، به کارگیری AHP به خاطر ظرفیت محدود بشر در پردازش اطلاعات به طور قابل توجهی محدود است و برای آن سقف مقایسه‌های زوجی  $7 \pm 2$  در نظر گرفته شده است [۱۹]

بنابراین، در کار فعلی با استفاده از مزایا و توجه به کاستی‌های هر روش از رویکرد ترکیبی AHP-TOPSIS برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی استفاده شده است [۲۵]. در قسمت زیر مراحل انجام تحقیق به‌طور کلی آورده شده است:

- تعیین معیارهای مناسب و تکمیل ماتریس مقایسه‌های زوجی بین آنها توسط تصمیم‌گیرنده‌ان،
- ترسیم ساختار سلسله‌مراتبی معیارها و گزینه‌های مختلف،
- گردآوری داده‌های کیفی و کمی پلیمرها با توجه به معیارهای مشخص شده،
- به دست آوردن وزن معیارها با روش AHP و
- رتبه‌بندی و انتخاب پلیمر مناسب به‌کمک روش

جدول ۵- طیف لیکرت ۵ نقطه‌ای.

۱	۲	۳	۴	۵
خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد

کیفیت الاستومری پلیمر و توزیع مناسب پروپیلن و اتیلن در آن مورد توجه قرار گرفته است.

هزینه تمام شده محصول به عنوان معیار اقتصادی و زمان پخت نمادی از وجود دی ان در زنجیر پلیمر در نظر گرفته شده است. در این میان، سه پارامتر وزن، هزینه و زمان پخت مقادیر کمی و قابل تجزیه و تحلیل اند. کیفیت پلیمر به عنوان معیاری کیفی توسط تصمیم گیرندگان که در این تحقیق ۵ نفر از متخصصان بوده اند، ارزیابی شده است. معیار کیفی با استفاده از طیف لیکرت ۵ نقطه‌ای (جدول ۵) و پرسش درباره کیفیت پلیمر از متخصصان، مطابق جدول ۴ معین شده است.

تعداد پلیمرهای ارزیابی شده ۱۶ نمونه است که در جدول ۶ شرایط فرایندی آنها به طور کامل آورده شده است. مقادیر اتیلن، پروپیلن و مونومر دی ان با استفاده از فن NMR و زمان پخت با دستگاه رئومتر مدل رئوتک مشخص شده است. همچنین، نظرات متخصصان

جدول ۶- داده‌های پلیمرهای مورد ارزیابی.

هزینه (\$)	زمان پخت (min)	E/P	MAO (mmol)	محصول دهی (g)	فشار (bar)	دما (°C)	پلیمر
۳/۳۴	۱۲	۸۰/۲۰	۲/۵	۱/۵	۱	۶۰	A1
۵/۳۴	۱۱/۸	۸۰/۲۰	۵	۳	۱	۶۰	A2
۹/۳۴	۱۰	۸۰/۲۰	۱۰	۵/۵	۱	۶۰	A3
۷/۳۴	۷/۵	۸۰/۲۰	۷/۵	۶/۴	۱	۶۰	A4
۴/۳۴	۱۲	۸۰/۲۰	۴	۳/۱	۱	۶۰	A5
۵/۳۴	۸/۹	۸۰/۲۰	۵	۵	۱	۷۰	A6
۵/۳۴	۱۱/۵	۸۰/۲۰	۵	۴/۱	۱	۴۰	A7
۵/۳۴	۱۱	۸۰/۲۰	۵	۵/۴	۱	۵۰	A8
۷/۳۴	۱۴	۶۷/۳۳	۷/۵	۱۲/۷	۲	۶۰	A9
۷/۳۴	۱۴	۶۷/۳۳	۷/۵	۳۴	۴	۶۰	A10
۷/۳۴	۱۴	۵۰/۵۰	۷/۵	۲۶	۴	۶۰	A11
۷/۳۴	۸	۳۳/۶۷	۷/۵	۲۰	۴	۶۰	A12
۷/۳۴	۱۲	۳۳/۶۷	۷/۵	۲	۴	۳۵	A13
۷/۳۴	۱۲	۳۳/۶۷	۷/۵	۱۶/۴	۴	۶۰	A14
۷/۳۴	۱۲/۵	۵۰/۵۰	۷/۵	۴/۳	۴	۶۰	A15
۷/۳۴	۸	۳۳/۶۷	۷/۵	۴/۳	۲	۶۰	A16

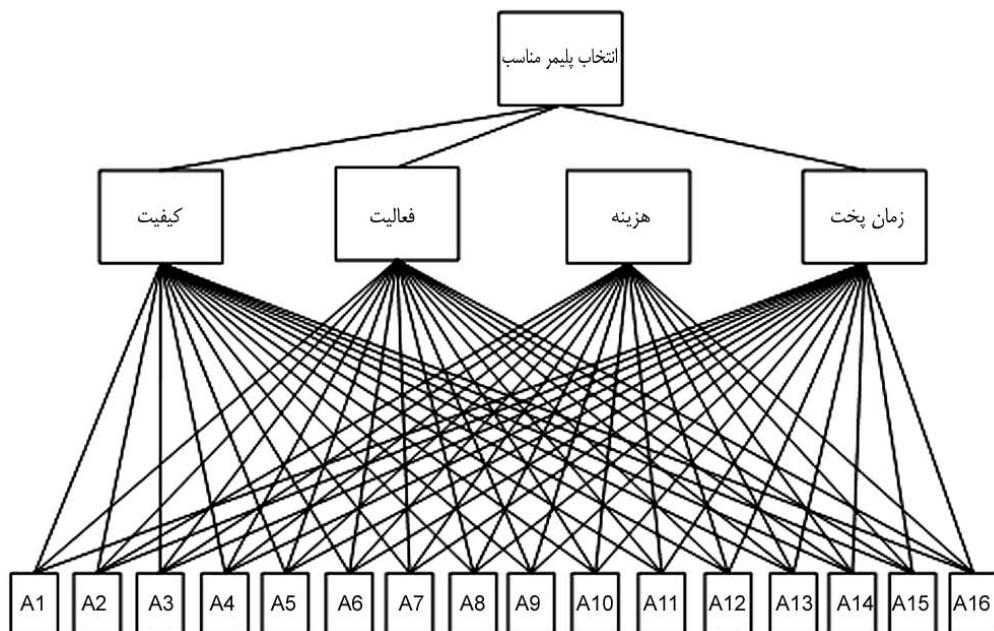
شرط پلیمرشدن: mol ENB =  $2 \times 10^{-5}$  mol Cat =  $0.15$  mol

جدول ۷- داده های مربوط به کیفیت پلیمرها از نظر متخصصان.

نام پلیمر	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5
A1	۲	۲	۳	۱	۲
A2	۳	۳	۱	۱	۲
A3	۴	۴	۳	۴	۴
A4	۳	۳	۲	۳	۴
A5	۵	۴	۴	۴	۳
A6	۶	۳	۲	۴	۴
A7	۷	۲	۱	۱	۲
A8	۸	۳	۲	۲	۲
A9	۹	۲	۳	۳	۳
A10	۱۰	۲	۲	۳	۲
A11	۱۱	۱	۳	۳	۳
A12	۱۲	۴	۳	۳	۴
A13	۱۳	۳	۳	۲	۲
A14	۱۴	۲	۳	۲	۲
A15	۱۵	۳	۳	۲	۲
A16	۱۶	۴	۵	۴	۴

ضریب ناسازگاری (معادله‌های (۴) و (۵)) با توجه به اینکه ضریب مزبور  $0/01$  و کمتر از  $0/1$  است، می‌توان نتیجه گیری کرد که متخصصان به طور منطقی مقایسه‌های بین

زمان پخت و هزینه با توجه به نظرات گروه تصمیم به ترتیب دارای بیشترین اهمیت هستند. پس از بدست آوردن



شکل ۲- ساختار سلسله‌مراتبی مسئله.



## نتیجه‌گیری

تعیین عوامل موثری نظری محصول دهنده، کیفیت و قیمت با توجه به خواص یک محصول پلیمری و رتبه‌بندی آنها به کمک روش‌های MCDM، از نتایج مهم در ارزیابی یک محصول است. در این پژوهش، با توجه به نقاط ضعف و قوت روش‌های AHP و TOPSIS با استفاده از رویکرد ترکیبی سعی شد تا از مزایای هر دو استفاده شود و رتبه‌بندی دقیقی از پلیمر حاصل به دست آید. این مطالعات نشان داد، پلیمر حاصل (نمونه A10) در نسبت خواراک E:P= ۶۷/۳۳ از دمای پلیمرشدن  $60^{\circ}\text{C}$ ، مناسب‌ترین پلیمر از لحاظ محصول دهنده، کیفیت الاستومری، زمان پخت و هزینه است.

ارزیابی کلی محصول از نظر متخصصان پلیمر برای این محصول تقریباً متوسط بود. همچنین، هزینه محصول به دست آمده نیز حدود ۷/۳۴ یورو بود. بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، پلیمری رتبه نخست را به دست آورد که تقریباً در اکثر پارامترها و معیارها وضعیت متوسطی داشت. در مطالعات آینده می‌توان این رویکرد را برای انواع دیگر پلیمر یا از روش‌های دیگری همچون PROMETHEE، ELECTRE گزینه مناسب بهره گرفت. همچنین، می‌توان رویکردهای مختلف را با هم بررسی و پلیمر مناسب را با توجه به روش‌های گوناگون مقایسه کرد.

جدول ۱۰- داده‌های مربوط به شاخص‌های  $\bar{S}_i^+$  و  $\bar{S}_i^-$  رتبه‌بندی پلیمرها.

رتبه	نام پلیمر	$\bar{C}_i^*$	$\bar{S}_i^-$	$\bar{S}_i^+$
۵	A1	۰/۴۷۵۳	۰/۰۰۰۵۰	۰/۰۰۰۵۵
۷	A2	۰/۳۳۶۳	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۶۰
۱۵	A3	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۲۸۶
۱۳	A4	۰/۰۵۱۹	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۹۷
۱۴	A5	۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۱۳۰
۱۱	A6	۰/۱۰۲۹	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۷۹
۴	A7	۰/۵۲۴۶	۰/۰۰۰۴۹	۰/۰۰۰۴۴
۸	A8	۰/۲۵۸۰	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۴۹
۳	A9	۰/۵۴۰۴	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۲۵
۱	A10	۹۷۱۸	۰/۰۰۱۳۸	۰/۰۰۰۰۴
۲	A11	۰/۹۳۸۹	۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۰۶
۱۰	A12	۰/۱۰۷۲	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۹۴
۱۲	A13	۰/۰۹۱۱	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۸۹
۶	A14	۰/۴۴۱۴	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۲۳
۹	A15	۰/۱۱۲۵	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۷۲
۱۶	A16	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۴۱۵

دی‌ان وارد شده که عامل تاثیرگذاری برای پخت است، افزایش نشان می‌دهد. از طرفی، مقدار محصول دهنده نیز در این شرایط نسبتاً زیاد است که از لحاظ اقتصادی این نمونه را مناسب می‌سازد.

## مراجع

- Heurteau B., Bouilhac C., Cloutet E., Taton D., Deffieux A., and Cramail H., Polymer Support of “Single-site” Catalysts for Heterogeneous Olefin Polymerization, *Prog. Polym. Sci.*, **36**, 89-126, 2011.
- Wannaborworn M., Praserthdam P., and Jongsomgit B., Observation of Different Catalytic Activity of Various 1-Olefins during Ethylene/1-Olefin Copolymerization with Homogeneous Metallocene Catalyst, *Macromolecules*, **16**, 373-383, 2011.
- Ciardelli F., Altomare A., and Michelotti M., Homogeneous to Supported Metallocene Catalysts, *Catal. Today*, **41**, 149-157,
- Zohuri G.H., Vakili M., Jamjah R., Ahmadjo S., and Nekom-anesh M., Comparative Polymerization Activity of EPM and EPDM Using VCl<sub>4</sub> Homogenous Ziegler-Natta Catalyst and Characterization of EPDM Obtained, *Rubber Chem. Technol.*, **78**, 682-693, 2005.
- Choi Y. and Soares J.B.P., Supported Hybrid Early and Late Transition Metal Catalysts for the Synthesis of Polyethylene with Tailored Molecular Weight and Chemical Composition Distributions, *Polymer*, **51**, 4713-4725, 2010.
- Chaichana E., Khaubunsongserm S., Praserthdam P., and



- Jongsomjit B., Effect of Ga Modification on Different Pore Size Silicas in Synthesis of LLDPE by Copolymerization of Ethylene and 1-Hexene with [t-BuNSiMe<sub>2</sub>Flu]TiMe<sub>2</sub>/MMAO Catalyst, *Polym. Bull.*, **66**, 1301-1312, 2011.
7. Mortazavi M.M., Arabi H., Zohuri G.H., Ahmadjo S., Nekoomanesh M., and Ahmadi M., Copolymerization of Ethylene/ $\alpha$ -olefins Using Bis(2-phenylindenyl)zirconium Dichloride Metallocene Catalyst: Structural Study of Comonomer Distribution, *Polym. Int.*, **59**, 1258–1265, 2010.
8. Mortazavi M.M., Arabi H., Zohuri G.H., Ahmadjo S., and Nekoomanesh M., Comparative Study of Copolymerization and Terpolymerization of Ethylene /Propylene/Diene Using Metallocene Catalyst, *J. Appl. Polym. Sci.*, **122**, 1838–1846, 2011.
9. Ahmadjo S., Arabi H., Nekoomanesh M., Zohuri G.H., Mortazavi M.M., and Naderi G., Terpolymerization of Ethylene/ Propylene/Diene Monomers Using (2-PhInd)<sub>2</sub>ZrCl<sub>2</sub>, *Macromol. React. Eng.*, **4**, 707–714, 2010.
10. اصغرپور محمد، تصمیم‌گیری‌های چنان‌معیاری، انتشارات دانشگاه تهران تهران، ۱۳۹۰.
11. Bagla V., Gupta A., and Sharma B., Leader Culling Using AHP-PROMETHEE Methodology, *Int. J. Comput. Appl.*, **2**, 7-14, 2012.
12. Opricovic S. and Tzeng G.H., Decision Aiding Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS, *Eur. J. Oper. Res.*, **156**, 445–455, 2004.
13. Halouani N., Chabchoub H., and Martel J.M., PROMETHEE-MD-2T Method for Project Selection, *Eur. J. Oper. Res.*, **195**, 841–849, 2009.
14. Saaty T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill, New York, 1980.
15. Leung P., Muraoka J., Nakamoto S.T., and Pooley Z., Evaluating Fisheries Management Options in Hawaii Using Analytic-hierarchy Process (AHP), *Fisheries Research*, **36**, 171-183, 1998.
16. Dagdeviren M., Yavuz S., and Kilinc N., Weapon Selection Using the AHP and TOPSIS Methods under Fuzzy Environment, *Exp. Syst. Appl.*, **36**, 8143–8151, 2009.
17. Bogdanovic D., Nikolic D., and Ilic I., Mining Method Selection by Integrated AHP and PROMETHEE Method, *Anais Academ. Brasil. Cien.*, **84**, 1, 219-233, 2012.
18. Vidal L.A., Sahin E., Martelli N., Berhoune M., and Bonan B., Applying AHP to Select Drugs to be Produced by Anticipation in a Chemotherapy Compounding Unit, *Exp. Syst. Appl.*, **37**, 1528–1534, 2010.
19. Macharis C., Springael J., Brucker K.D., and Verbeke A., PROMETHEE and AHP: The Design of Operational Synergies in Multicriteria Analysis, Strengthening PROMETHEE with Ideas of AHP, *Eur. J. Oper. Res.*, **153**, 307–317, 2004.
20. Hwang C.L. and Yoon K., *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York, 1981.
21. Olson D.L., Comparison of Weights in TOPSIS Models, *Math. Comput. Model.*, **40**, 721-727, 2004.
22. Deng H., Yeh C.H., and Willis R.J., Inter-company Comparison Using Modified TOPSIS with Objective Weights, *Comput. Oper. Res.*, **27**, 963-973, 2000.
23. Lai Y.J., Liu T.Y., and Hwang C.L., TOPSIS for MODM, *Eur. J. Oper. Res.*, **76**, 486-500, 1994.
24. Tavana M. and Marbini A.H., A Group AHP-TOPSIS Framework for Human Spaceflight Mission Planning at NASA, *Exp. Syst. Appl.*, **38**, 13588–13603, 2011.
25. Shih H.S., Shyurb H.J., and Lee E.S., An Extension of TOPSIS for Group Decision Making, *Math. Comput. Model.*, **45**, 801–813, 2007.
26. دانش شکیب معصومه، عقیلی صفر، چشم‌انداز مدیریت، ۳۲، ۱۳۸۸، ۱۰۹-۱۲۹