

مدل ترکیبی تحلیل مؤلفه‌های اصلی و برنامه‌ریزی آرمانی برای انتخاب بالگردهای نظامی

رحیم فوکردی^۱، رضا علیخانی^۲، محسن صادق عمل‌نیک^۳

چکیده: پژوهش حاضر به ارائه رویکردی جایگزین در تصمیم‌گیری و به‌کارگیری آن در انتخاب بهترین بالگرد نظامی از میان گزینه‌های موجود می‌پردازد. برای این کار، پس از شناسایی معیارهای ارزیابی و انتخاب بالگردهای نظامی، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین اوزان اهمیت این معیارها استفاده شد. سپس این اوزان در صورت‌بندی مدل برنامه‌ریزی آرمانی به کار رفت. در نهایت با اجرای مدل برنامه‌ریزی آرمانی، به‌ازای پارامترهای متناظر با گزینه‌های در دسترس، ضمن رتبه‌بندی گزینه‌ها، امکان انتخاب بهترین گزینه فراهم شد. مزایای متعددی چون، اتکای کمتر به نظرات ذهنی و ادراکات فردی و تأکید بیشتر بر داده‌های واقعی، حذف هم‌خطی‌های چندگانه بین شاخص‌های ارزیابی، کاهش چشمگیر ابعاد مسئله ارزیابی بدون ریزش قابل توجه اطلاعات، انعطاف‌پذیری در مواجهه با معیارهای کمی و کیفی و سهولت به‌کارگیری، حکایت از قابلیت بالای این مدل در حل مسئله ارزیابی و انتخاب گزینه‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: انتخاب سامانه تسلیحاتی، بالگرد، برنامه‌ریزی آرمانی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی.

۱. استادیار دانشکده مدیریت دانشگاه قم، ایران

۲. کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳. دانشیار دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۲۵

نویسنده مسئول مقاله: رحیم فوکردی

E-mail: r.foukerdi@qom.ac.ir

مقدمه

امروزه با کاربرد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در بسیاری از حوزه‌های تصمیم‌گیری مواجه هستیم. در پژوهشی مروری (هو، ژو و دی، ۲۰۱۰)، این فرایند دومین روش پُرکاربرد پس از روش تحلیل پوششی داده‌ها و در تلفیق با مدل برنامه‌ریزی آرمانی، نخستین رویکرد تلفیقی پُرکاربرد در میان روش‌های ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده شناسایی شده است. یکی از کاربردهای مهم فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در ارزیابی و انتخاب سامانه‌های تسلیحاتی است؛ به طوری که در معدود مقاله‌های چاپ‌شده (داگدویران، یاووز و کیلینک، ۲۰۰۹)، ارزیابی و انتخاب این نوع سامانه‌ها به کمک فرایند مذکور، وجه‌اشتراکی غالب شمرده می‌شود. به ظاهر، تمایل محققان حوزه طراحی سامانه‌های تسلیحاتی به استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، متأثر از فراگیربودن این رویکرد در بیشتر حوزه‌های تصمیم‌گیری است.

به طور مشخص، انتخاب سامانه‌های تسلیحاتی یکی از موضوعات حیاتی برای امنیت ملی کشورها به شمار می‌رود. در نبردهای پیشرفته یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر نتیجه جنگ، برتری تسلیحاتی است. سامانه‌های تسلیحاتی پیچیده، دقیق و در عین حال گران‌قیمت هستند. از این رو، انتخاب این سامانه‌ها مستلزم دقت بسیاری است. در سازمان‌های نظامی، ارزیابی و انتخاب سامانه‌های تسلیحاتی، بر اساس عواملی چون هزینه خرید، مباحث عملکردی و عوامل لجستیکی انجام می‌پذیرد. به همین دلیل، ارزیابی و انتخاب این سامانه‌ها یک مسئله تصمیم‌گیری چندشاخصه به حساب می‌آید (مون، ۱۹۹۵؛ چن و شیو، ۲۰۰۶).

با وجود استقبال محققان و فعالان صنعت از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، این فرایند با کاستی‌های متعددی روبه‌رو است (مون، ۱۹۹۵؛ چنگ، یانگ و هوانگ، ۱۹۹۹؛ لین، وانگ و یو، ۲۰۰۸). پژوهش حاضر ضمن تأکید بر این کاستی‌ها، درصدد ارائه رویکردی جایگزین برای حل مسائل تصمیم‌گیری است. در این پژوهش با تلفیق روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ و روش برنامه‌ریزی آرمانی، رویکردی منعطف برای بهبود فرایند تصمیم‌گیری ارائه شده است. ضمن آنکه به واسطه اهمیت تصمیمات در حوزه طراحی سامانه‌های تسلیحاتی، قابلیت این رویکرد در مسئله انتخاب بالگردهای نظامی به بوته آزمایش گذاشته شده است.

ادبیات پژوهش

مقاله‌های معدودی با محوریت ارزیابی سامانه‌های تسلیحاتی به چاپ رسیده است (داگدویران، یاووز و کیلینک، ۲۰۰۹). در اکثر این مقاله‌ها از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یا تلفیق آن با دیگر

روش‌های تصمیم‌گیری در شرایط قطعی و فازی استفاده شده است. برای مثال، مون (۱۹۹۵) از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با اوزان آنتروپی و چنگ و مون (۱۹۹۴) از فرایند مذکور با مقیاس‌های فازی در ارزیابی سامانه‌های تسلیحاتی استفاده کرده‌اند. از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای ارزیابی سامانه‌های موشکی (چنگ، ۱۹۹۶)، بالگردهای نظامی (چنگ، یانگ و هوانگ، ۱۹۹۹) و سامانه‌های تسلیحاتی (داگدویران، یاووز و کیلینک، ۲۰۰۹) استفاده شده است.

در سال ۱۹۷۷، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای کمک به حل مسائل اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی ارائه شد و از آن پس، به شکلی گسترده در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. این فرایند با ارائه ساختاری سلسله‌مراتبی برای مسائل پیچیده، امکان ارزیابی همزمان تعداد زیادی عوامل کمی و کیفی متضاد را در قالب رویکردی نظام‌یافته فراهم می‌کند (چان و چان، ۲۰۰۴). با وجود این، فرایند مزبور از کمبودهایی رنج می‌برد. برای مثال، بیان دقیق ترجیحات نسبی به‌واسطه محدودیت‌های مقیاس نه ارزشی ساعتی، کار دشواری است (لین، وانگ و یو، ۲۰۰۸). به‌علاوه، رتبه‌بندی‌های دقیقی در این فرایند انجام نمی‌گیرد. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی عدم اطمینان موجود در بیان عددی قضاوت‌ها را لحاظ نمی‌کند و با محدود کردن تصمیم‌گیرنده در چارچوب‌های از پیش تعریف‌شده، قضاوت‌ها، ترجیحات و انتخاب‌های وی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (مون، چنگ و لین، ۱۹۹۴؛ چنگ، یانگ و هوانگ، ۱۹۹۹).
با مرور پیشینه پژوهش، هفت ویژگی مهم برای یک روش بهینه ارزیابی و انتخاب برشمرده می‌شود:

۱. قابلیت حذف همخطی چندگانه^۱ میان معیارهای انتخاب؛
 ۲. تخصیص خودکار وزن به معیارها؛
 ۳. کاستن ابعاد^۲ داده‌ها بدون ریزش بخش قابل توجهی از داده‌ها (لام، هو و ان‌جی، ۲۰۰۵)؛
 ۴. کاربرپسند^۳ بودن (چان و چان، ۲۰۰۴)؛
 ۵. قابلیت مواجهه با معیارهای کمی و کیفی (اولومولای و هریس، ۱۹۹۴)؛
 ۶. قابلیت مواجهه با تعداد زیادی گزینه؛
 ۷. توانایی در کاهش خطاهای ذهنی (ان‌جی، ۲۰۰۸).
- این در حالی است که فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی از بین این ویژگی‌ها، فقط از دو مشخصه «امکان مواجهه با معیارهای کمی/کیفی» و «سهولت استفاده کاربر» برخوردار است (لام، تاو و

1. Multicollinearity
2. Dimensionality
3. User friendly

لام، ۲۰۱۰). از این رو، به کارگیری روشی برخوردار از تمامی مشخصه‌های مذکور، ضروری به نظر می‌رسد.

مبانی نظری

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی، یکی از روش‌های فراگیر در آمار چندمتغیره به‌شمار می‌رود. اگرچه کاربرد اصلی این روش در کاهش ابعاد داده‌ها است (لام، تاو و لام، ۲۰۱۰)، اما از آن در رتبه‌بندی و تحلیل واحدهای تصمیم‌گیری^۱ نیز استفاده می‌شود. برای مثال، آزاده و ابراهیم‌پور (۲۰۰۴) از این روش برای رتبه‌بندی سامانه‌های تولیدی و پترونی و براگلیا (۲۰۰۰)، یانگ و دیگران (۲۰۰۸) و امیری، حدادی، امیرخانی و ایزدبخش (۲۰۰۸) برای رتبه‌بندی و انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده کرده‌اند.

از اجرای روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی چند هدف دنبال می‌شود. نخست، شناسایی مجموعه جدیدی از متغیرها، به‌گونه‌ای که هر کدام از این متغیرها (یا همان مؤلفه‌های اصلی) ترکیبی خطی از متغیرهای اولیه را ارائه دهند. دوم، نخستین مؤلفه از مجموعه جدید (y_1) بیشترین میزان نوسان‌های موجود در داده‌های اولیه را توصیف کند و این قابلیت برای سایر مؤلفه‌های اصلی (y_2, y_3, \dots, y_p) به‌ترتیب نزولی ادامه یابد. سوم، متغیرهای جدید از یکدیگر مستقل باشند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی کار خود را با شناسایی مقادیر ویژه ماتریس کواریانس متغیرهای اولیه آغاز می‌کند. فرض کنید $X = [x_1, \dots, x_2, \dots, x_p]$ بردار شاخص‌ها و ماتریس $D_{k \times p}$ نمایانگر امتیازهای مربوط به k گزینه موجود در قبال p شاخص باشد. هدف یافتن مجموعه‌ای جدید از متغیرهای مستقل یا همان مؤلفه‌های اصلی (تعریف می‌شود $Y_j; j = 1, 2, \dots, p$) است؛ به‌گونه‌ای که هر کدام از متغیرهای این مجموعه، ترکیب خطی متفاوتی از بردار $D_{k \times p}$ باشند. چنانکه گفته شد، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی این کار را با شناسایی مقادیر ویژه ماتریس کواریانس متغیرهای اولیه انجام می‌دهد. مؤلفه‌های اصلی به‌کمک رابطه ۱ به‌شرح زیر تعریف می‌شوند.

$$Y = \alpha^T X \quad \text{رابطه ۱}$$

به‌طوری که α_{ij} ضریب بردار متغیر j ام برای مؤلفه i ام است. مقادیر α_{ij} با رعایت سه شرط تخمین زده می‌شوند. نخست، y_1 بیشترین سهم را در توصیف نوسان‌های موجود در داده‌های

اولیه داشته باشد، γ_2 بیشترین سهم را در توصیف آن بخش از نوسان‌هایی که با γ_1 توصیف نشده است، داشته باشد و این ویژگی زنجیروار برای سایر مؤلفه‌های اصلی ادامه یابد. دوم آنکه به‌ازای مقادیر $m = 1, \dots, p$ همواره رابطه ۲ را داشته باشیم.

$$\alpha_{m1}^2 + \alpha_{m2}^2 + \dots + \alpha_{mp}^2 = 1 \quad \text{رابطه ۲}$$

و سرانجام، به‌ازای تمامی مقادیر $m \neq n$ ($n = 1, \dots, p$) داشته باشیم:

$$\alpha_{m1}\alpha_{n1} + \alpha_{m2}\alpha_{n2} + \dots + \alpha_{mp}\alpha_{np} = 0 \quad \text{رابطه ۳}$$

برای محاسبه مقادیر α_{ij} و متعاقب آن، بردارهای (y_{1j}, \dots, y_{kj}) ($j = 1, \dots, p$) و امتیازهای مؤلفه‌های اصلی، گام‌های زیر باید اجرا شود:

الف. میانگین حسابی بردار $D_{1 \times p}$ و ماتریس کوواریانس S را به‌دست آورید:

$$D_{1 \times p} = (\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_p)_{1 \times p} \quad \text{رابطه ۴}$$

به‌طوری که:

$$x_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ij} \quad j = 1, \dots, p \quad \text{رابطه ۵}$$

$$S = (S_{jq})_{p \times p} = \frac{1}{k-1} (D - \tilde{x})^T (D - \tilde{x}) \quad q = 1, \dots, p \quad \text{رابطه ۶}$$

ب. ماتریس همبستگی را با استفاده از رابطه ۷ محاسبه کنید.

$$R = C_1 / \sqrt{s_{jj}} \cdot S \cdot C_1 / \sqrt{s_{jj}} \quad \text{رابطه ۷}$$

به‌طوری که $C_1 / \sqrt{s_{jj}}$ ماتریسی قطری است که j امین عنصر روی قطر اصلی آن برابر با $1 / \sqrt{s_{jj}}$ ($j = 1, \dots, p$) است.

ج. معادله زیر را حل کنید.

$$|R - \lambda I_p| = 0 \quad \text{رابطه ۸}$$

به‌طوری که I_p ماتریس یک‌ه $p \times p$ است. می‌توان مقادیر ویژه λ و بردار ویژه $(\alpha_{m1}, \alpha_{m2}, \dots, \alpha_{mp})$ ($m = 1, \dots, p$) را با اتکا به رابطه ۹ به‌دست آورد.

$$\sum_{j=1}^p \lambda_j = p \quad (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p) \quad \text{رابطه ۹}$$

بردارهای ویژه به‌دست آمده، مؤلفه‌های اصلی Y_i را شامل می‌شوند. عناصر بردارهای ویژه، به‌ترتیب ضرایب هر کدام از مؤلفه‌های اصلی Y_i هستند (رابطه ۱۰).

$$Y_m = \sum_{j=1}^p \alpha_{mj} x_{ij} \quad m = 1, \dots, p \quad i = 1, \dots, k \quad (\text{رابطه } 10)$$

عناصر بردار Y_m با یکدیگر ناهمبسته بوده و از نظر میزان اهمیت (درصد توصیف نوسان‌های موجود در عناصر ماتریس $(D_{k \times p})$)، از y_1 تا y_p به ترتیب نزولی مرتب شده‌اند. در این شرایط، ماتریس اوزان اهمیت معیارهای تصمیم از رابطه ۱۱ حاصل می‌شود.

$$W_m = \alpha_{k \times p}^T \cdot \lambda_m \quad (\text{رابطه } 11)$$

در رابطه ۱۱، مؤلفه λ_i سهم مؤلفه اصلی λ_m در توصیف نوسان‌های موجود در داده‌های اولیه و $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ است ($m < n$).

در پیشینه پژوهش، دو روش برای تعیین مقدار m ارائه شده است: نخست، y_i ‌هایی که λ_i آنها بزرگتر از یک است و دوم، آن تعداد از y_i ‌های بالاترین λ_i که مجموع مقادیر λ_i آنها بیش از ۸۵ درصد شود (لین، ۱۹۹۸).

برنامه‌ریزی آرمانی

از برنامه‌ریزی آرمانی برای تعیین راه‌حل بهینه یک مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه استفاده می‌شود. این مدل با ایجاد راه‌حلی واحد، امکان تحقق همزمان هدف‌های مستقل و گاه متعارض را فراهم می‌کند (لی، کانگ، روزنبرگ و کیم، ۲۰۱۰). در برنامه‌ریزی آرمانی، تصمیم‌گیرنده مقادیر مطلوب خود را برای هر یک از توابع هدف با عنوان آرمان مشخص می‌کند. وجه مشترک تمامی مدل‌های برنامه‌ریزی آرمانی متغیرهای تصمیم (x_i) و متغیرهای انحراف از آرمان (d_i) است. تابع هدف همیشه از نوع کمینه این مدل، دربرگیرنده تمامی متغیرهای انحراف از آرمان است. ضریب غیرمنفی متغیرهای انحراف از هر آرمان، بیانگر اهمیت تحقق آن آرمان از دید تصمیم‌گیرنده است. از آنجا که در اغلب مواقع اندازه و مقیاس آرمان‌ها نامتجانس هستند، برای همسنگ کردن متغیرهای انحراف از آرمان، از عامل مقیاس^۱ استفاده می‌شود. عامل مقیاس از تفاوت مقادیر کمینه و بیشینه قابل تخصیص به هر آرمان، بدون در نظر گرفتن سایر آرمان‌ها و در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه با لحاظ کردن محدودیت‌های کلاسیک به‌دست می‌آید (هران و تاکاتا، ۲۰۰۸). فرم کلی مدل برنامه‌ریزی آرمانی موزون با محدودیت‌های کلاسیک و آرمانی و متغیرهای تصمیم صفر - یک به شرح مدل ۱ است.

1. Scaling Factor

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-)$$

$$\text{St : } \sum_{j=1}^n x_j = b$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \sigma_i (d_i^- - d_i^+) = g_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n$$

$$d_i^-, d_i^+ \geq 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m$$

مدل (۱)

در مدل ۱؛ w_i : وزن متغیر انحراف از آرمان i ؛ g_i : مقدار آرمان i ؛ d_i^+ : میزان انحراف مثبت از آرمان i ؛ d_i^- : میزان انحراف منفی از آرمان i ؛ σ_i : عامل مقیاس برای هدف i ؛ α_{ij} : ضریب فنی x_j در محدودیت آرمانی i ؛ x_j : متغیر تصمیم j که در صورت انتخاب، مقدار یک و در صورت عدم انتخاب، مقدار صفر به خود می‌گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

مطابق شکل ۱، برای اجرای پژوهش حاضر گام‌های زیر طی شده است.



شکل ۱. فرایند پژوهش

تعیین معیارهای انتخاب. تعیین تمامی عناصر مرتبط با موقعیت تصمیم، ضروری‌ترین اقدام پیش از ورود به فرایند ارزیابی و انتخاب است (بوفردی، گئورگ، کیریتسیس و هیروچاکیس،

۲۰۰۷؛ چرا که کیفیت خروجی نهایی مدل انتخاب تأمین کننده، تا حد زیادی به معیارهای ارزیابی و اوزان اهمیت اختصاص یافته به این معیارها متکی است. معیارهای ارزیابی سامانه‌های تسلیحاتی، شامل معیارهای فنی (که الزامات خاص سامانه تسلیحاتی مورد نظر را دربرمی‌گیرند) و معیارهای برخاسته از ملاحظات راهبردی (برخاسته از نظر خبرگان) است.

جمع‌آوری داده‌های تأمین کنندگان. با توجه به معیارهای ارزیابی شناسایی شده، امتیازهای کمی و کیفی هر کدام از سامانه‌های تسلیحاتی موجود محاسبه می‌شود. برای جمع‌آوری داده‌های کمی، از مستندات فنی و برای تعیین امتیازهای کیفی، از قضاوت‌ها و نظرات خبرگان استفاده می‌شود. می‌توان با توجه به معیارهای ارزیابی در اختیار و امتیازهای مربوط به تأمین کنندگان منتخب در قبال این معیارها، به ایجاد ماتریس تصمیم D مبادرت ورزید.

پردازش داده‌ها. در این گام با استفاده از روش تبدیل خطی، داده‌های عناصر ماتریس تصمیم D بی‌مقیاس و هم‌جهت می‌شوند. این نوع بی‌مقیاس‌سازی، ضمن حفظ تناسب داده‌های مربوط به گزینه‌ها در قبال هر شاخص، به هم‌جهت‌شدن معیارهای از نوع سود^۱ و زیان^۲ کمک می‌کند (هوانگ و یون، ۱۹۸۱). روابط ۱۳ و ۱۴، به ترتیب نحوه نرمال‌سازی معیارهای از نوع سود و زیان را نشان می‌دهند.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^*}, \quad x_j^* = \max_i x_{ij} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}}, \quad x_j^{\min} = \min_i x_{ij} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

تعیین اوزان اهمیت معیارها. در این گام، از ماتریس نرمال‌شده D برای ورودی روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده می‌شود. می‌توان مجموعه $Y = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n]$ را با کمک نرم‌افزار SPSS به‌دست آورد. سپس با استفاده از معیار $\sum_{i=1}^k \lambda_i > 85\%$ (لین، ۱۹۹۸) مؤلفه‌های برخوردار از بیشترین سهم در توصیف نوسان‌های داده‌های ماتریس D مشخص می‌شوند. حال با استفاده از رابطه ۱۱ اوزان اهمیت معیارها محاسبه می‌شوند.

صورت‌بندی مدل برنامه‌ریزی آرمانی. برای انتخاب بهترین سامانه تسلیحاتی، مدل برنامه‌ریزی آرمانی با متغیرهای تصمیم صفر - یک طراحی می‌شود. از اوزان اهمیت حاصل از گام چهارم، برای صورت‌بندی تابع هدف این مدل استفاده می‌شود. حل مدل برنامه‌ریزی آرمانی مزبور با استفاده از نرم‌افزار Win QSB امکان‌پذیر است.

1. Benefit criterion
2. Cost criterion

یافته‌های پژوهش

برای تشریح مدل پژوهش و نمایش اثربخشی آن، مسئله ارزیابی و انتخاب بالگردهای جنگی مورد مطالعه این پژوهش انتخاب شده است. انتخاب بالگردهای جنگی، همانند سایر تسلیحات نظامی، مستلزم توجه به معیارهای متعدد و متنوعی است. با وجود این، به دلیل تفاوت‌های کارکردی بالگردهای جنگی با انواع دیگر سامانه‌های نظامی، انتخاب این نوع تسلیحات مستلزم توجه به معیارهایی متفاوت و کاملاً اختصاصی است. از این رو، برای اجرای مدل پیشنهادی پژوهش، از ۲۸ معیار ارزیابی و انتخاب بالگردهای نظامی مورد استفاده چنگ، یانگ و هوانگ (۱۹۹۹) استفاده شد. این معیارها در پنج گروه به شرح زیر طبقه‌بندی شده‌اند:

- **امکانات فنی:** ۱. قدرت موتور؛ ۲. وزن بدون سوخت و سلاح؛ ۳. حداکثر سرعت؛ ۴. نسبت وزن به مساحت دیسک روتور؛ ۵. سقف پرواز؛ ۶. حداکثر دامنه پرواز؛ ۷. حداکثر مدت پرواز؛ ۸. قابلیت‌های مأموریتی.
- **قابلیت‌های لجستیکی:** ۹. قابلیت اطمینان؛ ۱۰. توانایی نگهداری؛ ۱۱. امکان‌ات ترابری؛ ۱۲. صرفه اقتصادی؛ ۱۳. انعطاف در انتخاب سلاح.
- **تجهیزات جنگ‌افزایی:** ۱۴. کالیبر تفنگ؛ ۱۵. اندازه آتش تفنگ؛ ۱۶. ظرفیت خشاب تفنگ؛ ۱۷. تعداد موشک‌های ضد تانک قابل حمل؛ ۱۸. دامنه آتش؛ ۱۹. صحت آتش؛ ۲۰. تعداد موشک‌های هوا به هوا قابل حمل؛ ۲۱. صحت آتش؛ ۲۲. تعداد راکت‌های قابل حمل.
- **سامانه‌های الکترونیکی:** ۲۳. سامانه دید در شب؛ ۲۴. سامانه ردیابی و شناسایی هدف؛ ۲۵. سامانه مجتمع؛ ۲۶. سامانه موقعیت‌یاب جهانی.
- **قابلیت‌های تدافعی:** ۲۷. سامانه زرهی؛ ۲۸. سامانه حفاظت از خلبان.

با اتکا به کتاب مرجع جینز (لانبرت، ۱۹۹۳)، داده‌های فنی و جنگ‌افزایی شش نوع بالگرد جنگی مشخص شد. در ضمن از خبرگان خواسته شد تا برای امتیازدهی به معیارهای کیفی مرتبط با قابلیت‌های لجستیکی، قابلیت‌های سامانه الکترونیکی و قابلیت‌های تدافعی، از طیف (۱: خیلی ضعیف، ۳: ضعیف، ۵: متوسط، ۷: خوب، ۹: خیلی خوب استفاده کنند. از جامعه نظری پژوهش مشتعل بر کارشناسان ارشد و مدیران یکی از سازمان‌های فعال در حوزه ساخت و تأمین تجهیزات هوانوردی کشور با توجه به دو معیار «سوابق حرفه‌ای و تخصصی» و «آشنایی با مباحث راهبردی و فنی بالگردهای جنگی»، دوازده نفر برای گروه خبره پژوهش انتخاب شد. میانگین نمره‌های اعلام‌شده خبرگان، به‌منزله امتیاز هر گزینه در قبال معیارهای کیفی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل به‌همراه آرمان‌های مورد نظر خبرگان به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. امتیازهای بالگردهای جنگی در قبال معیارهای ارزیابی

امتیاز بالگرد						آرمان	واحد اندازه گیری	معیار
ب ۶	ب ۵	ب ۴	ب ۳	ب ۲	ب ۱			
۱۳۵۶	۱۶۸۰	۱۵۳۵	۱۲۸۵	۱۲۶۵	۱۶۳۳	$۱۵۰۰ \geq$	کیلووات	۱
۴۹۶۸	۷۵۶۰	۶۷۴۵	۴۶۳۴	۵۰۹۲	۷۰۰۰	$۶۷۰۰ \leq$	کیلوگرم	۲
۲۹۰	۳۱۰	۳۰۰	۲۸۲	۲۹۳	۳۰۰	$۲۹۵ \geq$	کیلومتر بر ساعت	۳
۴۶	۶۰	۵۵	۴۰	۵۷	۴۹	$۴۵ \leq$	کیلوگرم/متر مربع	۴
۴۷۸۰	۵۹۰۰	۶۲۰۰	۴۲۷۰	۶۴۰۰	۵۸۰۰	$۵۹۵۰ \geq$	متر	۵
۴۹۰	۴۳۸	۴۷۵	۵۰۷	۴۸۲	۴۶۰	$۴۸۰ \geq$	کیلومتر	۶
۳	۲/۵	۲/۵	۲	۳	۲	$۳ =$	ساعت	۷
۸۸	۹۵	۸۵	۹۰	۹۳	۸۷	$۹۰ \geq$	-	۸
۵	۵	۷	۷	۷	۵	$۷ \geq$	-	۹
۵	۹	۷	۷	۷	۹	$۷ \geq$	-	۱۰
۵	۷	۷	۷	۹	۵	$۷ \geq$	-	۱۱
۷	۷	۵	۵	۷	۹	$۷ \geq$	-	۱۲
۹	۵	۹	۷	۹	۷	$۷ \geq$	-	۱۳
۳۰	۳۰	۳۰	۲۰	۳۰	۳۰	$۳۰ =$	میلی متر	۱۴
۷۲۵	۸۴۰	۶۲۵	۶۵۰	۶۲۵	۹۰۰	$۷۵۰ \geq$	تیر بر دقیقه	۱۵
۹۰۰	۹۰۰	۴۵۰	۷۵۰	۱۲۰۰	۳۰۰	$۷۵۰ \geq$	-	۱۶
۸	۱۶	۱۶	۸	۱۶	۱۶	$۱۲ \geq$	-	۱۷
۵	۷	۹	۸	۴	۵	$۸ \geq$	کیلومتر	۱۸
۸۲	۹۲	۷۵	۸۷	۷۶	۸۰	$۸۰ \geq$	درصد	۱۹
۴	۸	۶	۴	۴	۸	$۶ \geq$	-	۲۰
۸۵	۷۵	۸۰	۵۰	۹۰	۸۵	$۸۰ \geq$	درصد	۲۱
۷۲	۷۶	۶۰	۷۶	۷۶	۸۰	$۷۶ \geq$	-	۲۲
۵	۹	۵	۳	۹	۷	$۵ \geq$	-	۲۳
۵	۹	۵	۵	۹	۷	$۵ \geq$	-	۲۴
۷	۹	۵	۷	۹	۵	$۷ \geq$	-	۲۵
۵	۷	۳	۷	۹	۷	$۵ \geq$	-	۲۶
۵	۹	۵	۳	۷	۷	$۵ \geq$	-	۲۷
۹	۹	۵	۵	۹	۹	$۷ \geq$	-	۲۸

سپس امتیازات بالگردها در قبال معیارهای مورد نظر با استفاده از تبدیل خطی نرمال شد. نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است. گفتنی است با توجه به ماهیت معیارها، از رابطه ۱۳ برای نرمال‌سازی امتیازهای بالگردها در قبال معیارهای دوم و چهارم و از رابطه ۱۲ برای نرمال‌سازی امتیازهای بالگردها در قبال سایر معیارها استفاده شد.

جدول ۲. امتیازهای نرمال‌شده بالگردهای جنگی در قبال معیارهای ارزیابی

امتیاز بالگرد						معیار
ب ۶	ب ۵	ب ۴	ب ۳	ب ۲	ب ۱	
۰/۸۱	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۹۷	۱
۱/۰۷	۱/۶۳	۱/۴۶	۱/۰۰	۱/۱۰	۱/۵۱	۲
۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۷	۳
۱/۱۵	۱/۵۰	۱/۳۸	۱/۰۰	۱/۴۳	۱/۲۳	۴
۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۶۷	۱/۰۰	۰/۹۱	۵
۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۹۱	۶
۱/۰۰	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۶۷	۱/۰۰	۰/۶۷	۷
۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۲	۸
۰/۷۱	۰/۷۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۷۱	۹
۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۸	۱/۰۰	۱۰
۰/۵۶	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۵۶	۱۱
۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۷۸	۱/۰۰	۱۲
۱/۰۰	۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۷۸	۱۳
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۶۷	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۴
۰/۸۱	۰/۰۹۳	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۶۹	۱/۰۰	۱۵
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۳۸	۰/۶۳	۱/۰۰	۰/۲۵	۱۶
۰/۵۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۷
۰/۵۶	۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۴۴	۰/۵۶	۱۸
۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۸۲	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۸۷	۱۹
۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۲۰
۰/۹۴	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۹۴	۲۱
۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۰۰	۲۲
۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۳۳	۱/۰۰	۰/۷۸	۲۳
۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۷۸	۲۴
۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۵۶	۲۵
۰/۵۶	۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۷۸	۱/۰۰	۰/۷۸	۲۶
۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۷۸	۰/۷۸	۲۷
۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۶	۰/۵۶	۱/۰۰	۱/۰۰	۲۸

در ادامه، برای تعیین اوزان اهمیت معیارها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تحلیل داده‌های نرمال‌شده جدول ۲ و تعیین اوزان اهمیت معیارها استفاده شد. جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت‌گرفته این روش را به کمک نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد.

جدول ۳. توصیف نوسان‌های مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه	کل نوسان‌ها	درصد نوسان‌ها	درصد تجمعی نوسان‌ها
۱	۱۱/۴۹۹	۴۱/۰۶۷	۴۱/۰۶۷
۲	۶/۱۵۵	۲۱/۹۸۲	۶۳/۰۴۹
۳	۴/۹۴۸	۱۷/۶۷۳	۸۰/۷۲۲
۴	۳/۶۱۴	۱۲/۹۰۷	۹۳/۶۲۹
۵	۱/۷۸۴	۶/۳۷۱	۱۰۰/۰۰۰
۶	$۳/۶۰ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۱/۲۹ \times ۱۰^{-۱۴}$	۱۰۰/۰۰۰
۷	$۱/۵۳ \times ۱۰^{-۱۵}$	$۵/۴۷ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
۸	$۸/۸۱ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۳/۱۵ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
۹	$۵/۷۵ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۲/۰۵ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
⋮	⋮	⋮	⋮
۲۵	$-۳/۴۷ \times ۱۰^{-۱۶}$	$-۱/۲۴ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
۲۶	$-۴/۱۱ \times ۱۰^{-۱۶}$	$-۱/۴۷ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
۲۷	$-۷/۴۴ \times ۱۰^{-۱۶}$	$-۲/۶۶ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰
۲۸	$-۱/۱۹ \times ۱۰^{-۱۵}$	$-۴/۲۶ \times ۱۰^{-۱۵}$	۱۰۰/۰۰۰

چنانکه مشاهده می‌شود، ۲۸ مؤلفه اصلی برای توصیف نوسان‌های موجود در داده‌های مربوط به شش بالگرد، در قبال معیارهای ارزیابی تولید شده است که از این تعداد، چهار عنصر نخست قادر به توصیف بیش از ۸۵ درصد نوسان‌ها هستند. جدول ۴ سهم هر کدام از ۲۸ معیار ارزیابی را در تولید چهار مؤلفه اصلی نشان می‌دهد. گفتنی است، علامت مثبت و منفی ضرایب امتیازی، بیانگر همراستایی یا معکوس بودن جهت تغییرات معیارها و مؤلفه‌ها است. از این رو، قدر مطلق ضرایب امتیازی برابر با سهم یا درجه اهمیت معیارها در تولید مؤلفه‌ها است.

جدول ۴. ضریب امتیازی مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه ۴	مؤلفه ۳	مؤلفه ۲	مؤلفه ۱	معیار
۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	-۰/۱۰۷	۰/۰۶۴	۱
۰/۰۶۱	۰/۰۲۹	-۰/۰۹۱	۰/۰۶۸	۲
۰/۰۴۷	۰/۰۵۰	-۰/۰۴۱	۰/۰۷۸	۳
۰/۱۰۴	۰/۰۹۱	۰/۰۳۵	۰/۰۶۷	۴
۰/۰۶۶	۰/۱۲۹	۰/۰۲۲	۰/۰۵۹	۵
-۰/۰۴۶	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	-۰/۰۸۲	۶
-۰/۰۶۱	۰/۰۹۷	۰/۱۱۶	۰/۰۰۶	۷
۰/۰۸۵	-۰/۱۱۱	۰/۱۰۲	۰/۰۳۷	۸
۰/۱۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۴۲	-۰/۰۵۰	۹
۰/۰۹۹	-۰/۰۶۰	-۰/۰۵۸	۰/۰۶۲	۱۰
۰/۱۹۹	۰/۰۳۷	۰/۱۰۴	۰/۰۰۱	۱۱
-۰/۱۷۸	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۵	۰/۰۶۱	۱۲
-۰/۰۹۱	۰/۱۴۸	۰/۰۴۹	-۰/۰۴۴	۱۳
-۰/۰۸۹	۰/۱۳۳	۰/۰۱۱	۰/۰۶۱	۱۴
-۰/۱۱۱	-۰/۰۸۷	-۰/۰۶۸	۰/۰۶۰	۱۵
۰/۰۳۸	-۰/۰۲۵	۰/۱۵۲	-۰/۰۰۱	۱۶
۰/۰۹۰	۰/۰۸۸	-۰/۰۱۱	۰/۰۶۷	۱۷
۰/۱۸۱	۰/۰۱۲	-۰/۱۰۱	-۰/۰۳۰	۱۸
۰/۰۶۷	-۰/۱۷۰	-۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۱۹
۰/۰۲۶	-۰/۰۱۷	-۰/۰۹۸	۰/۰۶۸	۲۰
-۰/۱۲۹	۰/۱۳۰	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	۲۱
-۰/۰۸۱	-۰/۱۵۶	۰/۰۴۵	۰/۰۳۰	۲۲
۰/۰۲۰	۰/۰۲۱	۰/۰۶۹	۰/۰۷۸	۲۳
۰/۰۶۳	-۰/۰۲۷	۰/۰۸۱	۰/۰۷۱	۲۴
۰/۰۷۹	-۰/۰۶۹	۰/۱۳۰	۰/۰۲۳	۲۵
۰/۰۰۷	-۰/۱۰۹	۰/۱۰۴	۰/۰۲۷	۲۶
۰/۰۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۸۵	۲۷
-۰/۱۵۳	-۰/۰۲۷	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۲۸

در ادامه با توجه به سهم چهار مؤلفه اصلی نخست در توصیف نوسان‌های معیارهای ارزیابی (نگاه کنید به جدول ۳) و اطلاعات جدول ۴ و با اتکا به رابطه ۱۱، اوزان اهمیت ۲۸ معیار ارزیابی محاسبه شد. بدین ترتیب، اوزان اهمیت ۲۸ معیار مورد استفاده در ارزیابی بالگردهای جنگی به شرح جدول ۵ است.

جدول ۵. اوزان اهمیت معیارهای ارزیابی

معیار	وزن (%)	معیار	وزن (%)	معیار	وزن (%)	معیار	وزن (%)
۱	۵/۲	۸	۶/۸	۱۵	۶/۹	۲۲	۶/۰
۲	۶/۱	۹	۶/۳	۱۶	۴/۳	۲۳	۵/۳
۳	۵/۶	۱۰	۶/۲	۱۷	۵/۷	۲۴	۶/۰
۴	۶/۵	۱۱	۵/۵	۱۸	۶/۰	۲۵	۶/۱
۵	۶/۰	۱۲	۵/۵	۱۹	۴/۹	۲۶	۵/۴
۶	۴/۸	۱۳	۶/۷	۲۰	۵/۶	۲۷	۴/۳
۷	۵/۳	۱۴	۶/۱	۲۱	۶/۹	۲۸	۶/۵

برای انتخاب بهترین بالگرد از میان گزینه‌های موجود، مدل برنامه‌ریزی آرمانی با متغیرهای تصمیم صفر - یک طراحی شد. با توجه به ناهمگونی اندازه و مقیاس آرمان‌ها، هنگام صورت‌بندی محدودیت‌های آرمانی، نسبت به محاسبه عامل مقیاس برای هر آرمان اقدام شد. محدودیت‌های آرمانی مربوط به امکانات فنی بالگرد به شرح زیر است:

$$1633x_1 + 1265x_2 + 1285x_3 + 1535x_4 + 1680x_5 + 1356x_6 + 235(d_1^- - d_1^+) = 1500$$

$$7000x_1 + 5092x_2 + 4634x_3 + 6745x_4 + 7560x_5 + 4968x_6 + 300(d_2^- - d_2^+) = 6700$$

$$300x_1 + 293x_2 + 282x_3 + 300x_4 + 310x_5 + 290x_6 + 13(d_3^- - d_3^+) = 295$$

$$49x_1 + 57x_2 + 40x_3 + 55x_4 + 60x_5 + 46x_6 + 15(d_4^- - d_4^+) = 45$$

$$5800x_1 + 6400x_2 + 4270x_3 + 6200x_4 + 5900x_5 + 4780x_6 + 450(d_5^- - d_5^+) = 5950$$

$$460x_1 + 482x_2 + 507x_3 + 475x_4 + 438x_5 + 490x_6 + 42(d_6^- - d_6^+) = 480$$

$$2x_1 + 3x_2 + 2x_3 + 2/5x_4 + 2/5x_5 + 3x_6 + (d_7^- - d_7^+) = 2/5$$

$$87x_1 + 93x_2 + 90x_3 + 85x_4 + 95x_5 + 88x_6 + 5(d_8^- - d_8^+) = 90$$

محدودیت‌های آرمانی مربوط به قابلیت‌های لجستیکی بالگرد به شرح زیر است:

$$5x_1 + 7x_2 + 7x_3 + 7x_4 + 5x_5 + 5x_6 + 2(d_9^- - d_9^+) = 7$$

$$9x_1 + 7x_2 + 7x_3 + 7x_4 + 9x_5 + 5x_6 + 2(d_{10}^- - d_{10}^+) = 7$$

$$5x_1 + 9x_2 + 7x_3 + 7x_4 + 7x_5 + 5x_6 + 2(d_{11}^- - d_{11}^+) = 7$$

$$9x_1 + 7x_2 + 5x_3 + 5x_4 + 7x_5 + 7x_6 + 2(d_{12}^- - d_{12}^+) = 7$$

$$7x_1 + 9x_2 + 7x_3 + 9x_4 + 5x_5 + 9x_6 + 2(d_{13}^- - d_{13}^+) = 7$$

محدودیت‌های آرمانی مربوط به تجهیزات جنگ‌افزاری بالگرد به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} 30x_1 + 30x_2 + 20x_3 + 30x_4 + 30x_5 + 30x_6 + 10(d_{14}^- - d_{14}^+) &= 30 \\ 900x_1 + 625x_2 + 650x_3 + 625x_4 + 840x_5 + 725x_6 + 125(d_{15}^- - d_{15}^+) &= 750 \\ 300x_1 + 1200x_2 + 750x_3 + 450x_4 + 900x_5 + 900x_6 + 450(d_{16}^- - d_{16}^+) &= 750 \\ 16x_1 + 16x_2 + 8x_3 + 16x_4 + 16x_5 + 8x_6 + 4(d_{17}^- - d_{17}^+) &= 8 \\ 5x_1 + 4x_2 + 8x_3 + 9x_4 + 7x_5 + 5x_6 + 4(d_{18}^- - d_{18}^+) &= 8 \\ 80x_1 + 76x_2 + 87x_3 + 75x_4 + 92x_5 + 82x_6 + 4(d_{19}^- - d_{19}^+) &= 80 \\ 8x_1 + 4x_2 + 4x_3 + 6x_4 + 8x_5 + 4x_6 + 2(d_{20}^- - d_{20}^+) &= 6 \\ 85x_1 + 90x_2 + 50x_3 + 80x_4 + 75x_5 + 85x_6 + 30(d_{21}^- - d_{21}^+) &= 80 \\ 80x_1 + 76x_2 + 76x_3 + 60x_4 + 76x_5 + 72x_6 + 16(d_{22}^- - d_{22}^+) &= 76 \end{aligned}$$

محدودیت‌های آرمانی مربوط به سامانه‌های الکترونیکی بالگرد به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} 7x_1 + 9x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 9x_5 + 5x_6 + 2(d_{23}^- - d_{23}^+) &= 5 \\ 7x_1 + 9x_2 + 5x_3 + 5x_4 + 9x_5 + 5x_6 + 2(d_{24}^- - d_{24}^+) &= 5 \\ 5x_1 + 9x_2 + 7x_3 + 5x_4 + 9x_5 + 7x_6 + 2(d_{25}^- - d_{25}^+) &= 7 \\ 7x_1 + 9x_2 + 7x_3 + 3x_4 + 7x_5 + 5x_6 + 2(d_{26}^- - d_{26}^+) &= 5 \end{aligned}$$

محدودیت‌های آرمانی مربوط به قابلیت‌های تدافعی بالگرد به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} 7x_1 + 7x_2 + 3x_3 + 5x_4 + 9x_5 + 5x_6 + 2(d_{27}^- - d_{27}^+) &= 5 \\ 9x_1 + 9x_2 + 5x_3 + 5x_4 + 9x_5 + 9x_6 + 2(d_{28}^- - d_{28}^+) &= 7 \end{aligned}$$

در تمامی محدودیت‌های آرمانی فوق، x_j متغیر تصمیم صفر - یک است که برای انتخاب یا عدم انتخاب بالگرد j ام تعریف شده است:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{اگر گزینه } j \text{ ام انتخاب شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, 6$$

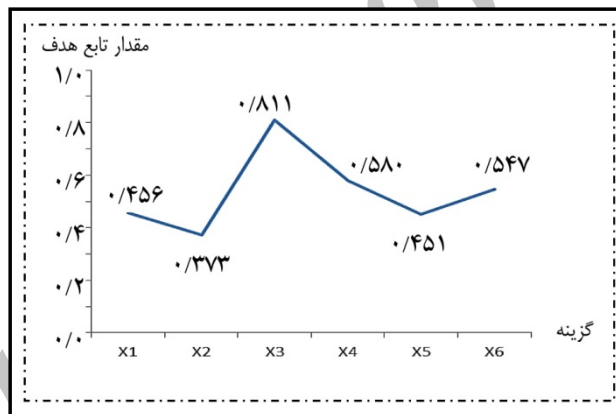
از آنجا که قصد انتخاب یک بالگرد از میان گزینه‌های موجود را داریم، از محدودیت کلاسیک زیر در مدل استفاده شد:

$$\sum_{j=1}^6 x_j = 1$$

درضمن، تابع هدف حداقل سازی مجموع موزون متغیرهای انحراف از آرمان‌ها به شرح زیر تعریف می‌شود. یادآوری می‌شود، اوزان متغیرهای انحرافی از جدول ۵ استخراج شده است.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & 0/052d_1^- + 0/061d_2^+ + 0/056d_3^- + 0/065d_4^+ + 0/060d_5^- \\ & + 0/048d_6^- + 0/053(d_7^- + d_7^+) + 0/068d_8^- + 0/063d_9^- + 0/062d_{10}^- + 0/055d_{11}^- \\ & + 0/055d_{12}^- + 0/067d_{13}^- + 0/061(d_{14}^- + d_{14}^+) + 0/069d_{15}^- + 0/043d_{16}^- + 0/057d_{17}^- \\ & + 0/060d_{18}^- + 0/049d_{19}^- + 0/056d_{20}^- + 0/069d_{21}^- + 0/060d_{22}^- + 0/053d_{23}^- \\ & + 0/060d_{24}^- + 0/061d_{25}^- + 0/054d_{26}^- + 0/043d_{27}^- + 0/065d_{28}^+ \end{aligned}$$

شکل ۲ مقادیر تابع هدف مدل آرمانی را به ازای انتخاب هر کدام از شش گزینه موجود نشان می‌دهد. بدین ترتیب امکان رتبه‌بندی گزینه‌های موجود فراهم شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، در صورت انتخاب گزینه x_2 مقدار این تابع کمینه خواهد شد. از این رو، بالگرد دوم، بهترین گزینه در میان گزینه‌های موجود انتخاب شد. نظرخواهی از خبرگان حکایت از اتکاپذیری و منطقی بودن نتایج مدل داشت.



شکل ۲. مقادیر تابع هدف مدل آرمانی به ازای انتخاب گزینه‌های موجود

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش با ترکیب روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش برنامه‌ریزی آرمانی، مدلی یکپارچه برای ارزیابی و انتخاب بهترین بالگرد طراحی شد. در بسیاری از مطالعات محاسبه اوزان اهمیت، اغلب براساس داده‌های حاصل از قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیران انجام گرفته است (سانگ و عباس، ۲۰۰۵). به باور چاریلاس و همکاران تا هنگامی که در این رویکردها نظرات

ذهنی و ادراکات افراد مبنای وزن‌دهی به شاخص‌ها باشد، دقت و مطلق بودن اوزان مورد سؤال است. در این شرایط، بزرگترین مزیت رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، استفاده از داده‌های واقعی به جای تکیه بر قضاوت‌های ذهنی خبرگان است. مدل پژوهش برای تعیین اوزان معیارها، نیازمند مقایسات زوجی پیچیده و ذهنی نبوده و روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی را مبنای نمایش چیرگی معیارها بر هم قرار داده است (چاریلایس، مارکاک، نیکیتوپولوس، و تئولوگ، ۲۰۰۸).

یکی دیگر از مزایای مهم به‌کارگیری روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، حذف هم‌خطی‌های چندگانه بین شاخص‌های ارزیابی است. هم‌خطی چندگانه شرایطی است که طی آن، یک یا بیش از یک معیار با دیگر معیارهای ارزیابی دارای روابط متقابل می‌شود. این موضوع موجب بروز خطاهای بده - بستانی و تکرارپذیری^۱ بین معیارها می‌شود. ماتریس همبستگی (جدول ۶) به‌شکلی مؤثر درجه هم‌خطی چندگانه میان معیارهای ارزیابی را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از وجود روابط هم‌خطی چندگانه مستقیم و معکوس میان اکثر معیارها است. چنین روابطی، نه تنها موجب بروز خطاهای تکرارپذیری و بده - بستانی می‌شود، بلکه افزایش پیچیدگی فرایند محاسبات را در پی دارد. این در حالی است که صفر بودن ضریب همبستگی محاسبه‌شده برای تمامی زوج مؤلفه‌های اصلی، از نبود هرگونه همبستگی بین مؤلفه اصلی تولید شده حکایت دارد. این بدان معناست که مدل پیشنهادی پژوهش به شکلی کاملاً مؤثر، اثر هم‌خطی چندگانه را از میان معیارهای ارزیابی حذف کرده است.

علاوه بر مزایای بیان شده، مدل این پژوهش بدون آنکه اطلاعات چندانی از بین رود (کمتر از هفت درصد)، به‌شکل چشمگیری ابعاد مسئله ارزیابی و انتخاب گزینه را کاهش داده است (از 6×28 به 6×4). درنهایت، می‌توان انعطاف‌پذیری در مواجهه با معیارهای کمی و کیفی و سهولت به‌کارگیری مدل را از دیگر مزایای آن برشمرد.

با وجود کاربردهای گسترده فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، این روش با کمبودهای متعددی مواجه است. پژوهش حاضر با اتکا به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، راه‌کاری جایگزین را برای مواجهه با این کمبودها ارائه داد. با وجود این، در پژوهش پیش رو قابلیت سایر رویکردها و روش‌های جایگزین، مانند روش‌های هیوریستیک و متاهیوریستیک در مواجهه با نارسایی‌هایی مترتب بر فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، مورد بررسی قرار نگرفت. به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های مذکور و مقایسه نتایج آنها با نتایج حاصل از این مطالعه، ابعاد دیگری از مسئله انتخاب روش‌های کارآمدتر تصمیم‌گیری را روشن کند. سرانجام، استفاده از رویکرد معرفی‌شده در این مقاله، در دیگر حوزه‌ها و تلفیق آن با سایر روش‌ها و فنون تصمیم‌گیری پیشنهاد می‌شود.

1. Repeatability

منابع

- Amiri, M., Hadadi, B., Amirkhani, A.H. & Izadbakhsh, H. (2008). Supplier selection via principal component analysis: an empirical examination, *Journal of Applied Science*, 8 (20): 3715-3720.
- Azadeh, M.A. & Ebrahimipour, V. (2004). An integrated approach for assessment and ranking of manufacturing systems based on machine performance. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 11: 349-63.
- Bufardi, A., Gheorghe, A., Kiritsis, R. & Hirouchakis, D. (2004). Multicriteria decisionaid approach for product end-of-life alternative selection. *International Journal of Production Research*, 42 (16): 3139-3157.
- Chan, F.T.S. & Chan, H.K. (2004). Development of the supplier selection model—a case study in the advanced technology industry, Proceedings of the Mechanical Engineers. Part B, *Journal of Engineering Manufacture*, 218 (12): 1807–1824.
- Charilas, D.D., Markaki, O., Nikitopoulos, D. & Theologou, M. (2008). Packet-switched network selection with heist Qos in 4G networks. *Elsevier Computer Networks*, 52: 248- 258.
- Chen, R.S. & Shyu, J.Z. (2006). Selecting a weapon system using zero-one goal programming and analytic network process. *Journal of Information & Optimization Sciences*, 27 (2): 379-399.
- Cheng, C.H., Yang, K.L. & Hwang, C.L. (1999). Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weights. *European Journal of Operational Research*, 116 (2): 423-435.
- Cheng, C.H. & Mon, D. L. (1994), Evaluating weapon system by analytical hierarchy process base on fuzzy scales, *Fuzzy Sets and Systems*, 63 (1): 1–10.
- Dagdeviren, M., Yavuz, S. & Kilinc, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment, *Expert Systems with Applications*, 36 (4): 8143-8151.
- Herran, D.S. & Nakata, T, (2008). Renewable technologies for rural electrification in Colombia: a multiple objective approach. *International Journal of Energy Sector Management*, 2 (1): 139-154.
- Ho, W., Xu, X. & Dey, P., (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 202 (1): 16-24.
- Holt, G.D., Olomolaiye, P.O. & Harris, F.C. (1994). Applying multi-attribute analysis to contractor selection decisions. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 1 (3): 139-148.

- Hwang, C. & Yoon, K., (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications – State of the Art Survey*, Berlin: Springer-Verlag
- Ignizio, J.P. (1980). An introduction to goal programming with application in urban systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 5 (1-2): 15-33.
- Lam, K., Tao, R. & Lam, M. (2010). A material supplier selection model for property developers using Fuzzy Principal Component Analysis. *Automation in Construction*, 19 (5): 608-618.
- Lam, K.C., Hu, T.S. & Ng, S.T. (2005). Using the principal component analysis method as a tool in contractor pre-qualification, *Construction Management and Economics*, 23 (7): 673-684.
- Lanbert, M., (1993). *Janes all the world's craft 1993-1994*, Kings Lynn: Biddles Ltd.
- Lee, J., Kang, S.H., Rosenberger, J. & Kim, S.B. (2010). A hybrid approach of goal programming for weapon systems selection. *Computer & Industrial Engineering*, 58 (3): 521-527.
- Lin, C.C., Wang, W.C., Yu, W.D. (2008). Improving AHP for construction with an adaptive AHP approach. *Automation in Construction*, 17 (2): 180-187.
- Lin, Q.S. (1988). *Multivariate Statistics*. Taipei: Dong Hua Press.
- Mon, D.L., Cheng, C. H. & Lin, J. H. (1994). Evaluating weapon system using fuzzy analytical hierarchy process base on entropy weight, *Fuzzy Sets and Systems*, 62: 127-134.
- Ng, W.L. (2008). An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem, *European Journal of Operational Research*, 186 (3): 1059-1067.
- Petroni, A. & Braglia, M., (2000). Vendor selection using principal component analysis. *Journal of Supply Chain Management*, 36 (1): 63-69.
- Song, Q. & Abbas, J. (2005). Network in an integrated wireless LAN and UMTS environmental using mathematical modelling and computing techniques. *IEEE wireless communications*, 12 (3): 42-48.
- Zongzhou, Y., Xu Q., Qiu X. & Wang H. (2008). An applied study on the method for supplier selection with PCA and ELECTRE. *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, SOLI. 12-15 Oct.