



انتخاب مناسب‌ترین ساختار برای بهبود قابلیت‌اعتماد سیستم با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

حسن حاله و حسین کریمیان

چکیده:

در این مقاله مسئله بهبود قابلیت‌اعتماد سیستم به خصوص در مرحله طراحی و قبل از تولید مدنظر قرار گرفته است. راه حلی که پیشنهاد شده است با تکیه بر این مطلب که ساختار برگزیده برای تولید باید در واقعیت قابل کاربرد باشد شکل گرفته است. بدین ترتیب که ساختارهای ممکن برای سیستم مدنظر طراحی شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس از بین آن‌ها گزینه مناسب برای تولید برگزیده می‌شود. روشی که برای فرآیند انتخاب گزینه برتر معروفی شده است، تعیین معیارهای مؤثر در مسیر انتخاب و سپس استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای به عنوان یکی از تکنیک‌های قوی و پرکاربرد تصمیم‌گیری چندشاخه‌هی باشد.

کلمات کلیدی

قابلیت‌اعتماد،
تصمیم‌گیری چندمعیاره،
فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

۱. مقدمه

انسان از زمانی که تولیدکردن را آغاز نموده، همواره نگران چگونگی کارکرد و اطمینان از کارکرد صحیح و اینم بودن ابزار و وسائل مورد استفاده خود بوده است.

امروزه مجموعه فعالیتهایی که برای طراحی، تولید و کارکرد مناسب یک دستگاه و یا یک سیستم انجام می‌گیرد، مهندسی قابلیت‌اعتماد^۱ نامدارد^[۱].

مطالعات انجام‌گرفته در زمینه قابلیت‌اعتماد را می‌توان به چند دسته زیر تقسیم کرد^[۲]:

- ۱ بررسی توزیع‌های مورد استفاده در قابلیت‌اعتماد
- ۲ برآورد قابلیت‌اعتماد سیستم
- ۳ طراحی برای قابلیت‌اعتماد بیشتر
- ۴ گارانتی^۳

تاریخ وصول: ۸۸/۱۲/۵

تاریخ تصویب: ۸۹/۳/۲۶

دکتر حسن حاله، استادیار دانشکده مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها،
دانشگاه صنعتی اصفهان، hhalah@cc.iut.ac.ir

حسین کریمیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی
و اجتماعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، h.karimian@in.iut.ac.ir

² - Reliability Engineering

³ - Guarantee

استفاده از روش‌هایی مانند فرایند تحلیل سلسله مرتبی^۳ (AHP) جواب نهایی را انتخاب می‌کند^[۱۵].

پیش از این کویت و جین با نگرشی آماری برآورده قابلیت اعتماد همراه با واریانس این برآورده را مورد نظر قرارداده بودند. آن‌ها بیان می‌کنند که یک سیستم با برآورده قابلیت اعتماد بالا ممکن است در واقعیت گرینه نامناسبی باشد اگر واریانس این برآورده مقدار زیادی داشته باشد به همین منظور واریانس نیز در بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفته است^[۱۶].

به طورکلی در این‌گونه مسائل به دلیل بی‌شمار بودن حالات و ساختارهای سیستم روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی آماری^۴، الگوریتم رزتیک، روش تابع مطلوبیت^۵، بهینه‌یابی پارتو^۶،تابع هدف وزن-دار شده^۷ و ... استفاده می‌شود و تکنیک‌هایی مانند AHP و تاپسیس^۸ (TOPSIS) مناسب نیستند^[۱۷].

اما در موقعی که تعداد ساختارهای موردنظر برای سیستم محدود است و یا فقط یک سیستم خاص برای بهینه‌سازی ساختار و اجزای آن مدنظر است می‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. به عنوان مثال لی و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای بهبود شرایط یک سیستم که قبلًا توسط متاس^۹ مطرح شده بود از AHP استفاده کردند^[۱۸].

متاس در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۰ یک روش ابتکاری برای بهینه‌سازی تخصیص قابلیت اعتماد در سیستم‌های پیچیده معرفی کرد. در این تحقیق یک سیستم با ساختار خاص که در شکل مشاهده می‌شود مدنظر قرار گرفت.

در این سیستم میزان میزان قابلیت اعتماد همه عناصر برابر ۰/۹ فرض شده و بهبود قابلیت اعتماد تک‌تک اجزای سیستم مورد توجه بوده و برای تعیین اولویت عناصر جهت بهبود کیفیت الگوریتمی ارائه گردیده است^[۱۹].

مسئله‌ای که در همه این تحقیق‌ها چندان مدنظر قرار نگرفته، این است که امکان دارد جواب‌هایی که به دست می‌آید در عالم واقعیت قابل کاربرد نباشد و یا ساختارهایی که ممکن است مفیدتر باشند به دلیل زیاد بودن بیش از حد گرینه‌ها جزء پاسخ‌های معرفی شده نباشند. مثلاً ممکن است تولید یک ساختار خاص که در جواب‌ها می‌باشد در واقعیت ممکن نباشد. در این مقاله رویکردی ارائه می‌شود که ابتدا با در نظر داشتن خصوصیات مسئله چند ساختار که می‌توانند مفید باشند طراحی شود، سپس برای انتخاب بهترین گرینه از بین این سیستم‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخه استفاده گردد. برای این منظور نیز فرآیند تحلیل شبکه‌ای توصیه می‌شود، چراکه این روش روابط بین متغیرهای و معیارهای مختلف

سپس در بخش ۳ متداول‌تری مورد استفاده و روش مورد نظر مورد بحث واقع می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا تعیین معیارهای مؤثر مورد شرح داده خواهد شد و برای محاسبه مقدار عددی هر معیار مدلی ارائه خواهد گردید. پس از آن در این بخش چگونگی استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای شرح داده خواهد شد.

سپس در قسمت ۴ مثالی مطرح شده و مراحل راهکار پیشنهادی برای سیستم‌های پیچیده با این مثال شرح داده خواهد شد تا مسائل مذکور برای خواننده قابل فهم و روشن‌تر شود و در بخش ۵ با توجه به نتایج بدست آمده از مثال نتیجه‌گیری کلی انجام می‌شود. سپس در بخش آخر پیشنهادهایی برای ادامه و بهبود این مقاله ارائه خواهد شد.

۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

مسئله افزایش قابلیت اعتماد سیستم با تخصیص ساختار و اجزای خاص به خصوص با اجزای اضافی همواره از مهمترین مسائل مهندسی قابلیت اعتماد بوده است. ثابت شده است که تخصیص اجزای اضافی^۱ (که در واقع به گونه‌ای همان تغییر ساختار سیستم می‌باشد) یک مسئله NP-hard می‌باشد و حل کردن آن بسیار مشکل است^[۲۰].

به همین دلیل از تکنیک‌های مختلفی برای ارائه راه حل در این زمینه استفاده شده است. به عنوان مثال کویت و اسمیت قابلیت اعتماد سیستم‌های سری-موازی را با کاربرد الگوریتم رزتیک^۲ بهینه ساخته‌اند. به این ترتیب که با تعریف بهینه‌سازی قابلیت اعتماد به عنوان تابع هدف و محدودیت‌هایی مانند انواع اجزای به کار رفته در سیستم، هزینه، وزن و یا حداکثر سطح مجاز برای اجزای اضافی در نظر گرفته شده برای سیستم الگوریتم ابتکاری رزتیک برای تحلیل و تعیین ساختار و ترکیب بهینه برای سیستم‌های سری-موازی توسعه داده شده است^[۲۱].

کویت و همکاران در تحقیقی با اشاره به این که عموماً قابلیت اعتماد اجزای سیستم‌ها معلوم و مقادیر دقیقی فرض می‌شود در حالی که در واقعیت این حالت کمتر رخ می‌دهد، یک رویکرد برای بهینه‌سازی قابلیت اعتماد سیستم در شرایط عدم‌اطمینان در مورد میزان قابلیت اعتماد اجزای سیستم معرفی کرده‌اند. چون قابلیت اعتماد سیستم قطعی نبوده بنابراین برآورده آن‌ها مدنظر واقع شده و تابع هدف به صورت بهینه‌سازی برآورده قابلیت اعتماد سیستم و قرینه واریانس این برآورده تعریف شده است. در این مقاله دو مثال نیز ارائه شده است که اولی یک سیستم سری-موازی فرضی است و دومی یک مثال با داده‌های واقعی در زمینه سیستم‌های صوتی و صداشناختی می‌باشد. جواب‌های بدست آمده در این مثال‌ها یکتا نبوده و چند جواب ناچیره بودند که تصمیم‌گیرنده با حس و تجربه خود و یا با

^۳ - Analytical Hierarchy Process (AHP)

^۴ - Goal Programming

^۵ - Utility Function

^۶ - Pareto Optimality

^۷ - Weighted Objective Function

^۸ - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

^۹ - Mettas

^۱ - Redundancy Allocation

^۲ - Genetic Algorithm (GA)

برای بدست آوردن میزان قابلیت اعتماد در این گونه سیستم‌ها چند روش وجود دارد از جمله: روش شمارش، روش عنصر کلیدی و روش ردیابی مسیر. در این مقاله برای محاسبه قابلیت اعتماد سیستم از روش ردیابی مسیر استفاده شده است. بدین ترتیب که با تعیین مسیرهای مختلفی که سالم بودن اجزای آن‌ها کارکرد سیستم را تضمین می‌کند به میزان قابلیت اعتماد کل سیستم دست می‌یابیم [۱۰-۱۱].

۲. هزینه

پس از قابلیت اعتماد برای انتخاب ساختار مناسب مهم‌ترین عامل هزینه می‌باشد. برای مقایسه سیستم‌های مختلف از این نظر باید برای هزینه مدلی ارائه شود. تاکنون توابع هزینه مختلفی در این زمینه معرفی شده و به کارگرفته شده‌اند که در ادامه چند نمونه از آن‌ها آورده می‌شود.

یالوئی و همکاران در بهینه‌سازی قابلیت اعتماد برای سیستم‌های سری-موازی تابع هزینه‌ای به نام Truelove را به کاربرده‌اند که فرمول آن به صورت زیر است [۱۲]:

$$r_i(R_i) = \frac{a_i}{(1-R_i)^{b_i}} \quad (5)$$

که در آن R_i قابلیت اعتماد مورد نیاز جزء و یا سیستم ۱ ام می‌باشد و $b_i > 0$ و $a_i > 0$. راوی و همکارانش از تابع هزینه زیر استفاده کرده‌اند [۱۳]:

$$c_i(R_i) = a_i \exp\left(\frac{b_i}{1-R_i}\right) \quad (6)$$

که در آن R_i قابلیت اعتماد مورد نیاز جزء و یا سیستم ۱ ام می‌باشد و $b_i > 0$ و $a_i > 0$. تابع هزینه دیگری نیز در این زمینه به کارمی‌رود که تابع تیلمن نام دارد و دارای فرمول زیر است [۱۲]:

$$c_i(R_i) = a_i (R_i)^{b_i} \quad (7)$$

که همان قابلیت اعتماد مورد نیاز جزء و یا سیستم ۱ ام می‌باشد و $0 < b < 1$ و $a_i > 0$. تابعی که توسط متاس به کار گرفته شده‌است، به شکل زیر می‌باشد [۹]:

$$c_i(R_i) = \exp\left[\left(1-f_i\right) \frac{R_i - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i}\right] \quad (8)$$

را به طور کامل در نظر می‌گیرد و ساختار شبکه‌ای آن تا حدود زیادی با دنیای واقعی به خصوص نسبت به سایر روش‌های موجود مطابقت دارد.

۳. تشریح مسئله و متدلوژی مورد استفاده

۳-۱. تعیین معیارهای تأثیرگذار

۱. قابلیت اعتماد

مقادیر قابلیت اعتماد مهم‌ترین معیار مورد بحث در این مقاله می‌باشد. قابلیت اعتماد یک موجود^(۱) مشخصه‌ای از یک موجود است که میزان توانایی آن را برای انجام کار یا کارهای معین تحت شرایط تعیین شده برای مدت‌زمان مشخص نشان می‌دهد.

محاسبه قابلیت اعتماد یک سیستم دارای قواعدی است که به آرایش اجزای آن بستگی دارد. به عنوان مثال در آرایش سری (اجزای سیستم به صورت متوالی رابطه دارند و همه باید کار کنند تا سیستم کار کنند) قابلیت اعتماد سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_s = R_1 R_2 \dots R_n \quad (1)$$

که R_i قابلیت اعتماد اجزای آن است. در آرایش موازی (اجزای سیستم به صورت موازی رابطه دارند و کارکرد یکی از آن‌ها کارکرد سیستم را تضمین می‌کند) رابطه زیر برقرار است:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2)$$

بعضی از سیستم‌ها آرایشی دارند که در واقع ترکیبی از این دو حالت است که به آرایش سری-موازی معروف است. یک رابطه کلی برای محاسبه قابلیت اعتماد این سیستم‌ها معرفی شده است که در زیر آمده است:

$$R_s = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{\binom{n}{k}} \prod_{i=1}^n R_i^{v_{ij}} (1-R_i)^{\bar{v}_{ij}} \quad (3)$$

که در آن $\sum_{i=1}^n v_{ij} = k$ و همچنین رابطه زیر در آن برقرار می‌باشد:

$$\begin{cases} v_{ij} = 1 \rightarrow \bar{v}_{ij} = 0 \\ v_{ij} = 0 \Rightarrow \bar{v}_{ij} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

گاهی هم سیستم‌ها آرایشی دارند که در هیچ یک از حالت‌های گفته شده قرار نمی‌گیرند و آرایش مختلط (یا پیچیده) نام دارند.

فاکتور اهمیت که در مقاله متأس معرفی گردیده تعریف شده است.
فاکتور اهمیت عبارت است از مشتق جزئی قابلیت اعتماد کل سیستم نسبت به قابلیت اعتماد جزء I_i و از رابطه به دست می‌آید:

$$I_i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i} \quad (12)$$

که در آن R_s قابلیت اعتماد سیستم و R_i قابلیت اعتماد جزء I_i ام است.

اگر فاکتور اهمیت برای یک یا چند عضو خاص از سیستم مقدار زیادی داشته باشد در واقع وابستگی سیستم به آن یک یا چند عضو زیاد بوده در نتیجه اینمی آن کم می‌باشد. برای محاسبه میزان اینمی هر سیستم رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{\sum_{i \in \{I_1, I_2, \dots, I_n\}} I_i} \quad (13)$$

که در واقع با میزان وابستگی سیستم به یک یا چند جزء خاص آن نسبت معکوس دارد. در این رابطه I_i همان فاکتور اهمیت می‌باشد. اگر مخرج کسر صفر شود یک عدد بزرگ برای اینمی سیستم در نظر گرفته می‌شود.

طبق رابطه‌های ذکر شده برای معیارهای تعیین شده مشاهده می‌شود که معیارهای هزینه، اینمی و میزان مصرف انرژی به طور کامل در ارتباط با معیار قابلیت اعتماد هستند. لذا تغییرات قابلیت اعتماد بر هر کدام از مشخصه‌ها اثر خواهد گذاشت. بنابراین با توجه به وابستگی موجود بین معیارها در بررسی اثر معیارها و تعیین گزینه برتر باقیستی از روش تحلیل شبکه‌ای^۱ (ANP) که در قسمت بعد شرح داده خواهد شد، استفاده کرد.

حال با در نظر گرفتن این چهار معیار ساختاری شبکه‌ای بین آن‌ها و گزینه‌های موجود ایجاد می‌شود و سپس با تعیین اهمیت معیارها یک اولویت‌بندی برای گزینه‌ها معرفی می‌شود. برای روش‌تر شدن مطلب در بخش^۴ مثالی طراحی شده و حل می‌گردد.

۳-۲. تشریح روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)

فرآیند تحلیل شبکه‌ای یا ANP یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ساعتی^۲ و بر پایه تکنیک فرآیند تحلیل سلسه مراتبی و به منظور ارتقاء قابلیت‌های این تکنیک در سال ۱۹۹۶ معرفی گردید. در این قسمت به تشریح مراحل مختلف این روش پرداخته می‌شود. فرآیند تحلیل شبکه‌ای را می‌توان در ۴ مرحله خلاصه نمود.

گام نخست: ساخت مدل. در این گام مساله تصمیم گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد.

¹ - Analytic Network Process

² - Thomas L. Saaty

که R_i قابلیت اعتماد مورد نیاز جزء I_i و یا سیستم ام می‌باشد؛ f_i یک عدد ثابت است که مقادیر بین صفر و یک را می‌پذیرد و میزان سختی افزایش قابلیت اعتماد را در آن جزء I_i یا سیستم نشان می‌دهد. $R_{i,min}$ مقدار کنونی قابلیت اعتماد و $R_{i,max}$ ماکزیمم مقدار دست-یافتنی برای سیستم یا جزء I_i ام می‌باشد.تابع هزینه دیگر تابع زیر است که دلیل و وینترباتوم آن را معرفی نموده‌اند^[۱۴]:

$$c_i(R_i) = a_i \ln \left(\frac{1 - R_{i,min}}{1 - R_i} \right) \quad (9)$$

که در آن $R_{i,min}$ مقدار اولیه (کنونی) قابلیت اعتماد و R_i میزان قابلیت اعتماد مورد نیاز برای سیستم ام و یا جزء I_i ام از یک سیستم می‌باشد و $a_i > 0$.

در مورد استفاده از سه تابع اول یعنی روابط (۵)، (۶) و (۷) ذکر این نکته لازم است که به علت وجود دو پارامتر تعیین مقدار آن‌ها نسبت به دو تابع دیگر یعنی روابط (۸) و (۹) با دشواری بیشتری مواجه می‌باشد. لذا اطلاعات و داده‌های نسبتاً کاملی باید موجود باشد تا توان مقدار دو پارامتر را همزمان تعیین کرد^[۸].

اما با دقت در مقادیر مورد استفاده در این روابط استنباط می‌شود که این توابع هنگامی به کارم روند که هزینه افزایش قابلیت اعتماد یک سیستم و یا جزئی از سیستم مورد توجه باشد در حالی که در این مقاله هزینه ساخت سیستم مد نظر است چراکه مقایسه ساختارهای مختلف بین شکل امکان‌پذیر است. پس با این منطق که دست‌یابی به مقدار قابلیت اعتماد بالاتر هزینه بیشتری در بردارد و با الهام از تابع هزینه معرفی شده توسط دلیل و وینترباتوم [۱۴] رابطه پیشنهادی زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$C = \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{R_i}{1-R_i} \right) + \ln \left(\frac{R_s}{1-R_s} \right) \quad (10)$$

۳. میزان مصرف انرژی

مشخصه دیگری که به خصوص با توجه به اهمیت منابع انرژی در دنیا امروز اهمیت دارد میزان مصرف انرژی در هر سیستم است. در واقع کم بودن میزان مصرف انرژی از این جهت می‌تواند مهم باشد که بهنحوی هم صرفه‌جویی در منابع انرژی و هم کاهش هزینه را در بر دارد. برای بدست آوردن این مقدار نیز می‌توان رابطه پیشنهادی زیر را به کار برد:

$$E_i = \sum_{j=1}^n R_j \quad (11)$$

۴. اینمی

معیار دیگری که در این مقاله تعریف شده است، مشخصه‌ای از سیستم است که اینمی نام گذارده می‌شود. این معیار با توجه به

هیچ وابستگی وجود نداشته باشد و یا اینکه عناصر یک خوشه دارای وابستگی داخلی با یکدیگر نباشند ماتریس صفر در قسمت مربوطه در ابر ماتریس جایگزین می‌شود.

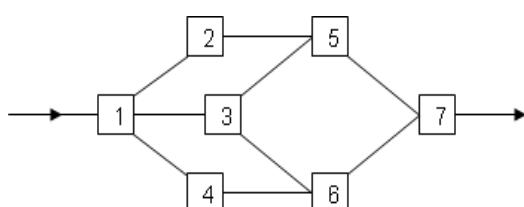
در ادامه ابرماتریس تشکیل شده با نرمال کردن تمامی ستون‌های آن به ابر ماتریس وزنی تبدیل شده و سپس برای بدست آوردن بردار وزن نهایی، ابر ماتریس وزنی بایستی مرتبأ در خود ضرب شود و این فرایند آنقدر ادامه می‌یابد تا در یک بازه قابل قبول ماتریس به ماتریسی ایستا تبدیل گردد، که به این ماتریس ابر ماتریس حدی^۲ می‌گویند.

گام چهارم: محاسبه بردار وزن نهایی. اگر ابر ماتریس به دست آمده در گام سوم کل شبکه را پوشش دهد وزن‌های گزینه‌ها و عناصر خوشه‌های مختلف را می‌توان در ستون‌های مربوطه در ابر ماتریس حدی یافت و اگر ابر ماتریس کل شبکه را پوشش نداده و فقط ارتباطات داخلی بین خوشه‌ها را شامل شود، مشابه این محاسبات می‌بایست ادامه یابد تا بردار اولویت نهایی گزینه‌ها استخراج گردد[۱۵].

۴. ارائه مثال

مثالی که در این قسمت ارائه می‌شود با مدنظر قراردادن سیستم بررسی شده در مقاله‌های متاس و لی و همکاران که در شکل شماره ۱ قابل مشاهده است، طراحی خواهد شد. بدین ترتیب که با اعمال تغییراتی در ساختار سیستم مذکور هفت سیستم مختلف ایجاد شده است. شکل ۲ ساختارهای مدنظر را نشان می‌دهد. مقادیر معیارهای مذکور برای هر گزینه (ساختار) محاسبه و در جدول شماره ۱ آورده شده است.

مدل ارائه شده قابلیت بررسی گزینه‌های مختلف تغییر برای بهبود قابلیت اعتماد را دارد اما در این مثال تغییر ساختار مورد توجه است. لذا جهت آشکار شدن تأثیر تغییر ساختار برای محاسبه مقادیر معیارها فرض می‌شود که تمام اجزای سازنده این سیستم‌ها مشابه و دارای قابلیت اعتمادی برابر ۰/۹ می‌باشند. مقادیر هر کدام از معیارها نیز به ترتیبی که در بخش پیش توضیح داده شد محاسبه شده‌اند. بنابراین ماتریس مقایسات زوجی که با توجه به این مقادیر تشکیل گرفته است، یک ماتریس کمی خواهد بود.



شکل ۱. سیستم مورد بررسی در مقاله متاس [۹]

^۲ - Limited Super Matrix

هر شبکه از مجموعه‌ای از خوشه‌ها تشکیل شده است که هر خوشه شامل مجموعه‌ای از عناصر می‌باشد. به طور کلی دو نوع وابستگی اصلی در هر شبکه می‌تواند وجود داشته باشد.

۱. وابستگی میان خوشه‌ها به گونه‌ای که هر خوشه می‌تواند با خوشه دیگر در هر سطح تصمیم‌گیری دارای ارتباط متقابل بازخوردی باشد.

۲. وابستگی میان عناصر خوشه‌ها به گونه‌ای که هر عنصر در هر خوشه می‌تواند با تمامی عناصر موجود در دیگر خوشه‌ها وابستگی داخلی داشته باشد و حتی عناصر درون یک خوشه نیز می‌توانند با یکدیگر وابستگی داشته باشند.

گام دوم: انجام مقایسات زوجی و استخراج بردارهای وزن نسبی. مشابه فرایند تحلیل سلسه مراتبی، عناصر تصمیم در هر خوشه به نسبت اهمیت آن‌ها نسبت به یک عامل کنترلی به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه می‌شوند، همچنین خوشه‌ها نیز به نسبت میزان اهمیت آنها در برآورده شدن هدف با یکدیگر مقایسه می‌گردند. همچنین به منظور استخراج بردارهای اولویت (وزن) مربوط به وابستگی‌های داخلی عناصر هر خوشه، تمامی عناصر خوشه‌های دارای وابستگی شامل عناصر دو خوشه، تمامی عناصر خوشه‌های دارای وابستگی داخلی و متقابل به نسبت تک تک عناصر دیگر خوشه مرتبط به صورت زوجی مورد مقایسه قرار می‌گیرند و ماتریس‌های مختلف مشاهدات زوجی را تشکیل می‌دهند. بعد از ایجاد ماتریس مقایسات زوجی می‌توان بردار وزن‌های نسبی را محاسبه نمود.

گام سوم: تشکیل ابرماتریس. برای محاسبه وزن نهایی در یک سیستم با اثرات وابستگی، بردارهای وزن محلی در ستون‌های مناسب در ماتریسی تحت عنوان ابر ماتریس^۱ قرار داده می‌شوند. در نتیجه ابر ماتریسی حاصل می‌شود که هر درایه آن خود ماتریسی

است که رابطه بین دو خوشه را در یک سیستم نشان می‌دهد.

فرض کنید خوشه‌های یک سیستم تصمیم‌گیری را با C_k نمایش می‌دهیم که $k = 1, 2, \dots, n$ و هر خوشه K خود دارای m_k عنصر می‌باشد. بردارهای وزنی که از نتایج مقایسات زوجی صورت گرفته در گام قبلی حاصل شده اند در جای مناسب در ابر ماتریس بر اساس نوع وابستگی از یک خوشه به خوشه دیگر یا از یک خوشه به خودش، قرار داده می‌شوند. رابطه شماره یک ابر ماتریس را در حالت کلی نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{1k} & \cdots & W_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & W_{kk} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \cdots & \vdots \\ W_{n1} & \cdots & W_{nk} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

در این ابر ماتریس W_{ij} نشان دهنده بردار وزنی مربوط به رابطه بین خوشه i و خوشه j می‌باشد. هنگامی که بین دو خوشه

^۱ - Super Matrix

جدول ۱. مقادیر عددی معیارها برای هفت گزینه

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
قابلیت اعتماد	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۷	۰/۹۶
هزینه	۸/۳۸	۸/۴۳	۸/۳۴	۸/۳۴	۹/۳۸	۹/۹۹	۹/۴۰
ایمنی	۱/۱۲	۱/۰۴	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۱۱	۱/۴۳	۹
صرف انرژی	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۸۱	

دو معیار بعدی یعنی ایمنی و میزان مصرف انرژی با فرض دارا بودن اهمیت یکسان در مکان بعدی جای گرفتند. اما در مورد اهمیت دو معیار ایمنی و هزینه نسبت به قابلیت اعتماد نیز با توجه به رابطه مستقیم هزینه با قابلیت اعتماد این عامل وزن بیشتری به خود گرفت. طبیعتاً این دو معیار با هدف قرار گرفتن قابلیت اعتماد در مقایسه با گزینه‌ها مهم‌تر فرض شده‌اند. ابرماتریس تشکیل یافته توسط نرم‌افزار در جدول شماره ۲ آورده شده است.

مقادیر این محاسبات به صورت مقایسه‌ای وارد نرم‌افزار ANP Super decisions اولویت‌بندی گزینه‌ها (سیستم‌ها) تعیین گردید. علت این که تکنیک ANP برای انتخاب ساختار مناسب به کار گرفته شده است وابستگی شدید دو معیار هزینه و ایمنی به میزان قابلیت اعتماد می‌باشد. در این موقع فرآیند تحلیل شبکه‌ای بهترین و قوی‌ترین روش می‌باشد. مقایسات بین گزینه‌ها نسبت به هر معیار با توجه به مقادیر شاخص‌های تعریف شده، که در جدول ۱ قابل مشاهده است، انجام گرفته است.

در مورد مقایسه معیارها نسبت به هر سیستم پرسشنامه‌ای برای مقایسه چهار معیار معرفی شده با یکدیگر طراحی شد و توسط آن نظرات تعدادی از خبرگان و افراد آگاه در این زمینه جمع‌آوری گردید. سپس طبق نتیجه حاصل از این پرسشنامه این گونه عمل گردید که ارزش و اهمیت میزان قابلیت اعتماد سیستم بیش از بقیه عامل‌ها فرض شد و سپس هزینه در مقام دوم اهمیت قرار گرفت.

جدول ۲. ابرماتریس مربوط به مثال

	C	R	S	E	1	2	3	4	5	6	7
C	0.000	0.310	0.000	0.000	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230
R	0.370	0.000	0.256	0.000	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608
S	0.000	0.166	0.000	0.000	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081
E	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081	0.081
1	0.124	0.044	0.035	0.204	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.084	0.053	0.023	0.204	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.171	0.021	0.082	0.204	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.158	0.024	0.055	0.204	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.043	0.040	0.033	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.032	0.124	0.142	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.017	0.218	0.374	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

شماره ۷ بالاترین اهمیت و سیستم شماره ۳ کمترین اهمیت را دارند. نسبت به معیار ایمنی سیستم شماره ۷ با داشتن مقدار بالای ایمنی حتی وزنی بیشتر از معیار قابلیت اعتماد گرفته است. کمترین وزن را نیز سیستم شماره ۲ دارد.

اما میزان مصرف انرژی که با تعداد اجزاء رابطه مستقیم دارد برای سیستم‌های ۱ تا ۴ برابر است. با توجه به اوزان ستون چهارم ماتریس، این چهار سیستم وزن بیشتری دارند و سیستم شماره ۷ کمترین وزن را دارا می‌باشد.

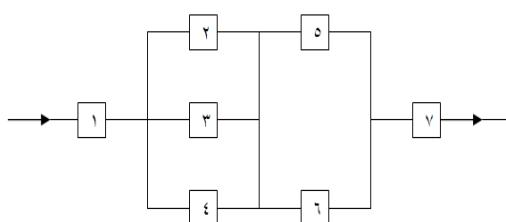
همان‌طور که مشاهده می‌شود در ستون مربوط به معیار هزینه، قابلیت اعتماد که نقش تعیین کننده‌ای در تعیین مقدار هزینه دارد مهم‌ترین عامل به حساب می‌آید. در بین گزینه‌ها نیز سیستم شماره ۳ کمترین هزینه سیستم شماره ۷ بیشترین هزینه را دربرداشته و به ترتیب بیشترین و کمترین وزن را به خود گرفته‌اند.

با قرار دادن قابلیت اعتماد به عنوان هدف، در بین معیارها هزینه از ایمنی مهم‌تر می‌باشد. میزان مصرف انرژی به دلیل نداشتن ارتباط با قابلیت اعتماد وزن صفر گرفته است. در بین گزینه‌ها نیز سیستم

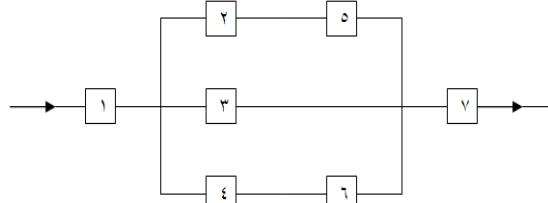
خروجی نرمافزار به شکل جدولی (جدول شماره ۳) قابل مشاهده است.

این جدول نشان‌دهنده ماتریس حدی است که از به توان رسیدن ابرماتریس ایجاد شده، حاصل می‌شود و در واقع وزن‌های نهایی مربوط به گزینه‌ها و معیارها و در نتیجه اولویت‌بندی گزینه‌ها را نشان می‌دهد. در قسمت بعد با بررسی بیشتر این ماتریس حدی نتایج حاصل تجزیه و تحلیل شده، سپس پیشنهادهایی برای ادامه این تحقیق ارائه می‌گردد.

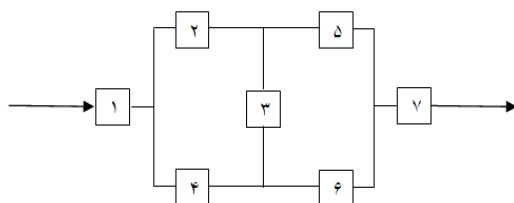
ستون پنجم تا یازدهم ماتریس گویای این مطلب است که با هدف واقع شدن هر کدام از گزینه‌ها میزان اهمیت معیارها برای همه آنها یکسان بوده و به این ترتیب می‌باشد؛ قابلیت اعتماد در مقام اول اهمیت قرار دارد، هزینه در مقام دوم و بعد از آن دو معیار ایمنی و میزان مصرف انرژی دارای اهمیت یکسان می‌باشند. اما برای تشخیص اولویت گزینه‌ها و انتخاب بهترین ساختار از بین هفت سیستم این ابرماتریس باید مرتبًا در خودش ضرب شود تا در ستون‌های مختلف آن اوزان یکسانی برای گزینه‌ها ظاهر گردد.



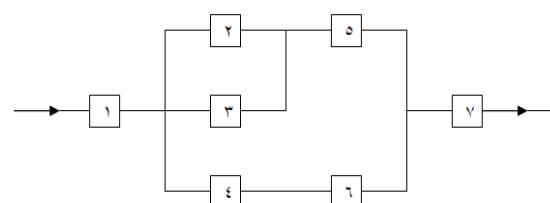
سیستم شماره ۲



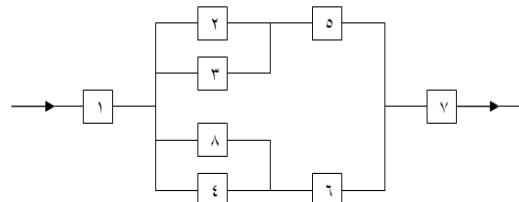
سیستم شماره ۱



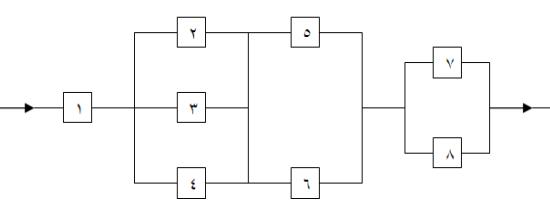
سیستم شماره ۴



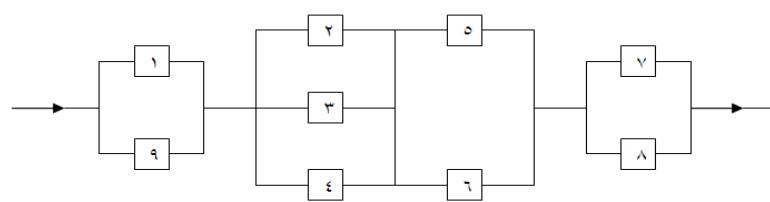
سیستم شماره ۳



سیستم شماره ۶



سیستم شماره ۵



سیستم شماره ۷

شکل ۲. ساختارهای مورد بررسی در مثال

جدول ۳. ماتریس حدی شامل وزن‌های نهایی

	C	R	S	E	1	2	3	4	5	6	7
C	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186	0.186
R	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320	0.320
S	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
E	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031
1	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
2	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
3	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052
4	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
5	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026
6	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
7	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106

بنابراین افزودن یک یا چند جزء، به سیستم به شرط بررسی جایگاه آن اجزاء مجاز می‌باشد. قضایوت در مورد حذف یا اضافه کردن یک مسیر بین اجزاء نیز همین گونه است. با بررسی جایگاه آن مسیر می‌توان تشخیص داد که این تغییر در ساختار مفید خواهد بود یا این که تأثیر منفی خواهد داشت. به عنوان مثال حذف یک مسیر در سیستم شماره ۲ و اضافه کردن دو مسیر دیگر به طوری که به شکل سیستم شماره ۱ تبدیل شود (حذف مسیر جزء ۳ به جزء ۷ و افزودن دو مسیر ۳ به ۵ و ۳ به ۶) می‌تواند مفید واقع شود.

در مطالعات پیشین تاکنون انتخاب ساختار مناسب از بین چندین ساختار مختلف (به تعداد محدود) انجام نشده است. در این تحقیق با

بررسی این گونه مسائل نتایج مفیدی حاصل شد.

از جمله این که تغییر ساختار در سیستم موردنظر باید با بررسی جوانب کار انجام شود. به طور مثال افزودن یک جزء به سیستم می-تواند تأثیر مثبت یا منفی داشته باشد، اما با بررسی مکان این جزء اضافه تأثیر آن مثبت وحداکثر خواهد داشت. یا تغییر بهبود کیفیت یک جزء تا چه مقداری از قابلیت اعتماد می‌تواند مفید باشد و این که استفاده از عنصری با میزان قابلیت اعتماد بیشتر (یا کمتر) در چه قسمتی از ساختار سیستم اثرگذاری بیشتری خواهد داشت.

تعیین معیارهای مختلف در کنار قابلیت اعتماد که حائز اهمیت هستند می‌تواند اولویت ساختارهای مختلف مدنظر را با چیزی که در ابتدا (معیار قرار دادن قابلیت اعتماد به تنها ی) به نظر می‌آید کاملاً متفاوت سازد. به عنوان مثال اضافه کردن معیاری مانند

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نتیجه اصلی، اولویت‌بندی ساختارهای مختلف می‌باشد که بدین ترتیب است:

- ۱ سیستم شماره ۷
- ۲ سیستم شماره ۶
- ۳ سیستم شماره ۳
- ۴ سیستم شماره ۴
- ۵ سیستم شماره ۱
- ۶ سیستم شماره ۲
- ۷ سیستم شماره ۵

می‌توان این گونه استنباط نمود که اضافه کردن یک جزء به سیستم به شرطی که باعث کاهش فاکتور اهمیت اجزایی که این شاخص برای آنها مقدار زیادی دارند شود، تأثیر بسیار مثبتی در بهبود قابلیت اعتماد سیستم خواهد داشت به طوری که هزینه اضافه کردن این جزء قابل چشمپوشی خواهد بود.

اما افزودن یک جزء به سیستم به طور کلی افزایش قابلیت اعتماد در آن سیستم را تأمین نمی‌کند چرا که جایگاه جزء اضافه اهمیت فراوانی دارد. به عنوان مثال تنها تفاوتی که سیستم شماره ۵ با سیستم شماره ۴ دارد داشتن یک جزء اضافه (جزء شماره ۸ در کنار جزء شماره ۴) است. اما مشاهده می‌شود سیستم شماره ۵ علی‌رغم افزایش کمی که در قابلیت اعتماد نسبت به سیستم شماره ۴ دارد کمترین وزن را در بین گزینه‌ها دارد، در حالی که سیستم شماره ۴ رتبه چهارم را کسب کرده است.

- [6] Coit, D., Jin, T., "Multi-Criteria Optimization: Maximization of a System Reliability Estimate and Minimization of the Estimate Variance". Proceedings of the 2001 European Safety & Reliability International Conf.(ESREL), Turin, Italy 2001.
- [7] Marseguerra, M., Zio, E., Podofillini, L., Coit, D.W., "Optimal Design of Reliable Network Systems in Presence of Uncertainty", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 2, 2005, pp. 243-253.
- [8] Lee, G. L., Lin, H. J., Yu, T.W., Ma, C.C., Chyou, S.L., "Optimal Allocation for Improving System Reliability Using AHP", *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies(ICSET)*, 2008.
- [9] Mettas, A., "Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems", *Reliability and Maintainability Symposium, Proceedi gs. Annual*, 2000.
- [10] Bain, L.J., Engelhardt, M., Statistical analysis of reliability and life-testing models: theory and methods, CRC Press, 1991.
- [11] Grvsh, D.L., Nkhkvb, M., Ability Theory of Trust (Reliability), Sharif University of Technology Institute for Scientific Publications, Tehran, 2002.
- [12] Yalaoui, A., Chu, C., "Reliability Allocation Problem in a Series-Parallel System", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 90, No. 1, 2005, pp. 55-61.
- [13] Ravi, V., Murty, B.S.N., Reddy, p.J., "Nonequilibrium Simulated-Annealing Algorithm Applied to Reliabilityoptimization of Complex Systems", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 46(2): 1997, 233-239.
- [14] Dale, C.J., Winterbottom, A., "Optimal Allocation of Effort to Improve System Reliability", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 35, No. 2, 1986, pp. 188-191.
- [15] Saaty, T.L., Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process, RWS Publications, Pittsburgh, 1996.

زیبایی ظاهری دستگاه مورد بررسی می‌تواند نتایج حاصله را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین باید در تعیین معیارها دقت فراوان نمود.

۶. پیشنهادها

- این گونه تحقیق‌ها می‌توانند در بهکارگیری مبانی و مفاهیم نظری قابلیت اعتماد در عالم واقعیت و در عمل مفید باشند. در این راستا پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده در نظرگرفته شده‌است که می‌تواند به بهبود کیفیت این مقاله و ادامه این تحقیقات کمک کند.
- پیشنهادهایی که برای مطالعات آتی ارائه می‌شود بدین ترتیب است:
 - در این گزینه برای انتخاب گزینه مناسب فقط تغییر ساختار بررسی شده‌است. می‌توان تغییر در ساختار و بهبود اجزای سیستم را به طور همزمان در نظر گرفته سیستم را بهینه کرد.
 - می‌توان با مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از روش‌های مختلف (مانند برنامه‌ریزی آرمانی، بهینه پارتو و الگوریتم ژنتیک) روی جواب‌های مشترک تمرکز کرده و از بین آن‌ها ساختار نهایی را برای سیستم انتخاب نمود.
 - با تعیین معیارهای کیفی به عنوان مثال زیبایی ظاهری دستگاه مورد نظر مباحثت فازی وارد تحقیق شده و باعث توسعه کار خواهد شد.
 - در این مقاله روش ANP براساس مزايا و معایب تکنیک‌های معرفی شده، انتخاب گشته است. اما می‌توان با استفاده از سیستم خبره و دادن اطلاعات مسئله به آن، یک روش دیگر برای حل مسئله برگزید.
 - همچنین با انجام مراحل این مقاله روی یک مطالعه موردي و با داده‌های واقعی نتایج ملموس تری به دست خواهد آمد.

منابع

- [1] Zacks, S., *Introduction to Reliability analysis*, Springer Verlag, NewYork 1992.
- [2] Barlow, R. E. and Proschan, F., *Mathematical Theory of Reliability*, Society for Industrial Mathematics, 1996.
- [3] Chern, M. S., "On the Computational Complexity of Reliability Redundancy Allocation in a Series System", *Operations Research Letters*, Vol. 11, No. 5, 1992, pp. 309-315.
- [4] Coit, D. W., Smith, A.E., "Reliability Optimization of Series-Parallel Systems Using a Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 45, No.2, 1996, pp. 254-260.
- [5] Coit, D. W., T. Jin, Wattanapongsakorn, N., "System Optimization with Component Reliability Estimation Uncertainty: a Multi-Criteria Approach", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 53, No. 3, 2004, pp. 369-380.