

# انتخاب مناسب ترین ساختار برای بهبود قابلیت اعتماد سیستم با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

حسن حاله و حسین کریمیان

## چکیده:

در این مقاله مسئله بهبود قابلیت اعتماد 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 معرفی شده است، تعیین معیارهای مؤثر در مسیر انتخاب و سپس استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای به عنوان یکی از تکنیک‌های قوی و پر کاربرد تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد.

## کلمات کلیدی

قابلیت اعتماد،  
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 ایمن بودن ابزار و وسایل مورد استفاده خود بوده است. امروزه مجموعه فعالیت‌هایی که برای طراحی، تولید و کارکرد مناسب یک دستگاه و یا یک سیستم انجام می‌گیرد، مهندسی قابلیت اعتماد نام دارد [۱]. مطالعات انجام گرفته در زمینه قابلیت اعتماد را می‌توان به چند دسته زیر تقسیم کرد [۲]:

- ۱- بررسی توزیع‌های مورد استفاده در قابلیت اعتماد
- ۲- برآورد قابلیت اعتماد سیستم
- ۳- طراحی برای قابلیت اعتماد بیشتر
- ۴- گارانتی<sup>۲</sup>

## ۵- نگهداری و تعمیرات

در این مقاله سعی می‌شود با انتخاب معیارهایی مانند هزینه، ایمنی دستگاه یا سیستم مورد نظر و میزان مصرف انرژی آن در کنار قابلیت اعتماد، از بین گزینه‌های مؤثر بر قابلیت اعتماد مانند تغییر ساختار، بهبود کیفیت قطعات سیستم، اضافه کردن قطعه‌ای به سیستم و یا در نظر گرفتن قطعه ذخیره، عواملی که تأثیر بیشتری بر افزایش قابلیت دارند شناسایی و معرفی شود.

در این مسیر برای استخراج بهترین گزینه از بین چند گزینه رقیب از مفاهیم و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کمک گرفته می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در همه زمینه‌های صنعت به کار گرفته شود. به عنوان مثال می‌توان در زمینه گارانتی، با استفاده از نتیجه این مقاله طول عمر محصول تولیدی مورد نظر را افزایش داده، مدت زمان بیشتری کارکرد کالا را تضمین کرد و در صحنه رقابت (که با توجه به پیشرفت صنعتی اهمیت زیادی پیدا کرده است) با مدت گارانتی بیشتر، از رقبا پیشی گرفت و یا برای طراحی یک دستگاه یا سیستم خاص از نظر ساختاری یا کیفیت قطعات مورد استفاده برای ساخت آن سیستم، بهترین حالت را از بین گزینه‌های مطرح انتخاب نمود.

بر این اساس در بخش ۲ به مرور و بررسی تحقیق‌های انجام شده در زمینه قابلیت اعتماد و تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته می‌شود.

تاریخ وصول: ۸۸/۱۲/۵

تاریخ تصویب: ۸۹/۳/۲۶

دکتر حسن حاله، استادیار دانشکده مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها،  
دانشگاه صنعتی اصفهان، hhaleh@cc.iut.ac.ir  
حسین کریمیان، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، h.karimian@in.iut.ac.ir

<sup>2</sup> - Reliability Engineering<sup>3</sup> - Guarantee

استفاده از روش‌هایی مانند فرایند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۳</sup> (AHP) جواب نهایی را انتخاب می‌کند[۵].

پیش از این کویت و جین با نگرشی آماری برآورد قابلیت‌اعتماد همراه با واریانس این برآورد را مورد نظر قرار داده بودند. آن‌ها بیان می‌کنند که یک سیستم با برآورد قابلیت‌اعتماد بالا ممکن است در واقعیت گزینه نامناسبی باشد اگر واریانس این برآورد مقدار زیادی داشته‌باشد به‌همین منظور واریانس نیز در بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفته‌است[۶].

به‌طور کلی در این‌گونه مسائل به‌دلیل بی‌شمار بودن حالات و ساختارهای سیستم روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی آرمانی<sup>۴</sup>، الگوریتم ژنتیک، روش تابع مطلوبیت<sup>۵</sup>، بهینه‌یابی پارتو<sup>۶</sup>، تابع هدف وزن-دار شده<sup>۷</sup> و ... استفاده می‌شود و تکنیک‌هایی مانند AHP و تاپسیس<sup>۸</sup> (TOPSIS) مناسب نیستند[۷].

اما در مواقعی که تعداد ساختارهای موردنظر برای سیستم معهود است و یا فقط یک سیستم خاص برای بهینه‌سازی ساختار و اجزای آن مدنظر است می‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. به‌عنوان مثال لی وهمکاران در سال ۲۰۰۸ برای بهبود شرایط یک سیستم که قبلاً توسط متاس<sup>۹</sup> مطرح شده بود از AHP استفاده کرده‌اند[۸].

متاس در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۰ یک روش ابتکاری برای بهینه‌سازی تخصیص قابلیت‌اعتماد 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 قابلیت‌اعتماد همه عناصر برابر ۰/۹ فرض شده و بهبود قابلیت‌اعتماد تک‌تک اجزای سیستم مورد توجه بوده و برای تعیین اولویت عناصر جهت بهبود کیفیت الگوریتمی ارائه گردیده- است[۹].

مسئله‌ای که در همه این تحقیق‌ها چندان مد نظر 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 گزینه‌ها 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 گزینه از بین این سیستم‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردد. برای این منظور نیز فرایند تحلیل شبکه‌ای توصیه می‌شود، چراکه این روش روابط بین متغیرهای و معیارهای مختلف

سپس در بخش ۳ مدل‌سازی 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 فرایند 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 به‌دست 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 قابلیت‌اعتماد سیستم با تخصیص ساختار و اجزای خاص به خصوص با اجزای اضافی همواره از مهمترین مسائل مهندسی قابلیت‌اعتماد بوده‌است. ثابت شده‌است که تخصیص اجزای اضافی<sup>۱</sup> (که در واقع به گونه‌ای همان تغییرساختار سیستم می‌باشد) یک مسئله NP-hard می‌باشد و حل کردن آن بسیار مشکل است[۳].

به‌همین دلیل از تکنیک‌های مختلفی برای ارائه راه‌حل در این زمینه استفاده شده‌است. به‌عنوان مثال کویت و اسمیت قابلیت‌اعتماد سیستم‌های سری-موازی را با کاربرد الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> بهینه ساخته‌اند. به این ترتیب که با تعریف بیشینه‌سازی قابلیت‌اعتماد به عنوان تابع هدف و محدودیت‌هایی مانند انواع اجزای به کاررفته در سیستم، هزینه، وزن و یا حداکثر سطح مجاز برای اجزای اضافی در نظر گرفته شده برای سیستم الگوریتم ابتکاری ژنتیک برای تحلیل و تعیین ساختار و ترکیب بهینه برای سیستم‌های سری-موازی توسعه داده شده‌است[۴].

کویت وهمکاران در تحقیقی با اشاره به این‌که معمولاً قابلیت‌اعتماد اجزای سیستم‌ها معلوم و مقادیر دقیقی فرض می‌شود درحالی‌که در واقعیت این حالت کمتر رخ می‌دهد، یک رویکرد برای بهینه‌سازی قابلیت‌اعتماد سیستم در شرایط عدم اطمینان در مورد میزان قابلیت‌اعتماد اجزای سیستم معرفی کرده‌اند. چون قابلیت‌اعتماد سیستم قطعی نبوده بنابراین برآورد آن‌ها مد نظر واقع شده و تابع هدف به صورت بیشینه‌سازی برآورد قابلیت‌اعتماد سیستم و قرینه واریانس این برآورد تعریف شده‌است. در این مقاله دو مثال نیز ارائه شده‌است که اولی یک سیستم سری-موازی فرضی است و دومی یک مثال با داده‌های واقعی در زمینه سیستم‌های صوتی و صداشناسی می‌باشد. جواب‌های بدست‌آمده در این مثال‌ها یکتا نبوده و چند جواب ناچیره بودند که تصمیم‌گیرنده با حس و تجربه خود و یا با

<sup>3</sup> - Analytical Hierarchy Process (AHP)

<sup>4</sup> - Goal Programming

<sup>5</sup> - Utility Function

<sup>6</sup> - Pareto Optimality

<sup>7</sup> - Weighted Objective Function

<sup>8</sup> - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

(TOPSIS)

<sup>9</sup> - Mettas

<sup>1</sup> - Redundancy Allocation

<sup>2</sup> - 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 کار گرفته شده‌اند که در ادامه چند نمونه از آن‌ها آورده می‌شود.

یالوئی و همکاران در بهینه‌سازی قابلیت‌اعتماد برای سیستم‌های سری- موازی تابع هزینه‌ای به نام TrueLove را به کار برده‌اند که فرمول آن به صورت زیر است [۱۲]:

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

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

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

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

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

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 مدل‌سازی مورد استفاده

### ۳-۱. تعیین معیارهای تأثیرگذار

#### ۱. قابلیت‌اعتماد

مقدار قابلیت‌اعتماد مهم‌ترین معیار مورد بحث در این مقاله می‌باشد. قابلیت‌اعتماد یک موجود<sup>۱</sup> ( $E$ ) 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 کند) 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 قابلیت‌اعتماد این سیستم‌ها معرفی شده‌است که در زیر آمده‌است:

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

که در آن  $\sum_{j=1}^n v_{ij} = k$  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.

<sup>۱</sup> - Entity

فاکتوراهمیت که در مقاله متاس معرفی گردیده تعریف شده‌است. فاکتوراهمیت عبارت‌است از مشتق جزئی قابلیت‌اعتماد کل سیستم نسبت به قابلیت‌اعتماد جزء  $i$ ام و از رابطه به‌دست می‌آید:

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

که در آن  $R_s$  قابلیت‌اعتماد سیستم و  $R_i$  قابلیت‌اعتماد جزء  $i$ ام است.

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

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{I_i} \right)} \quad (13)$$

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 ایمنی سیستم در نظر گرفته می‌شود.

طبق رابطه‌های ذکرشده برای معیارهای تعیین‌شده مشاهده می‌شود که معیارهای هزینه، ایمنی و میزان مصرف انرژی به طور کامل در ارتباط با معیار قابلیت‌اعتماد هستند. لذا تغییرات قابلیت‌اعتماد بر هرکدام از مشخصه‌ها اثر خواهد گذاشت. بنابراین با توجه به وابستگی موجود بین معیارها در بررسی اثر معیارها و تعیین گزینه برتر بایستی از روش تحلیل شبکه‌ای<sup>۱</sup> (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 روشن‌تر شدن مطلب در بخش ۴ مثالی طراحی شده و حل می‌گردد.

### ۲-۳. تشریح روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)

فرآیند تحلیل شبکه‌ای یا ANP یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط توماس ساعتی<sup>۲</sup> و بر پایه تکنیک فرآیند تحلیل سلسله 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 تصمیم‌گیری به ساختار شبکه‌ای تجزیه می‌گردد.

که  $R_i$  قابلیت‌اعتماد مورد نیاز جزء و یا سیستم  $i$ ام می‌باشد؛  $f_i$  یک عدد ثابت است که مقادیر بین صفر و یک را می‌پذیرد و میزان سختی افزایش قابلیت‌اعتماد را در آن جزء یا سیستم نشان می‌دهد.  $R_{i,\min}$  مقدار کنونی قابلیت‌اعتماد و  $R_{i,\max}$  ماکزیمم مقدار دست-یافتنی برای سیستم یا جزء  $i$ ام می‌باشد. تابع هزینه دیگر تابع زیر است که دیل و وینتر باتوم 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) قابلیت‌اعتماد و  $R_i$  میزان قابلیت‌اعتماد مورد نیاز برای سیستم  $i$ ام و یا جزء  $i$ 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 بتوان مقدار دو پارامتر را هم‌زمان تعیین کرد [۸].

اما با دقت در مقادیر مورد استفاده در این روابط استنباط می‌شود که این توابع هنگامی به‌کار می‌روند که هزینه افزایش قابلیت‌اعتماد یک سیستم و یا جزئی از سیستم مورد توجه باشد درحالی‌که در این مقاله هزینه ساخت سیستم مد نظر است چراکه مقایسه ساختارهای مختلف بدین شکل امکان‌پذیر است. پس با این منطق که دست‌یابی به مقدار قابلیت اعتماد بالاتر هزینه بیشتری در بر دارد و با الهام از تابع هزینه معرفی شده توسط دیل و وینتر باتوم [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 دنیای 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. ایمنی

معیار دیگری که در این مقاله تعریف شده است، مشخصه‌ای از سیستم است که ایمنی نام‌گذارده می‌شود. این معیار با توجه به

<sup>1</sup> - Analytic Network Process

<sup>2</sup> - Thomas L. Saaty

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.

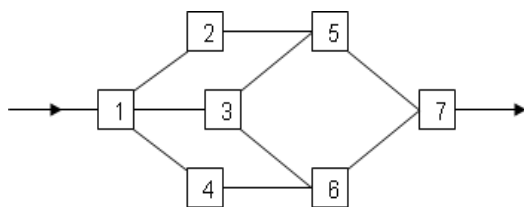
در ادامه ابرماتریس تشکیل شده با نرمال کردن تمامی ستون‌های آن به ابر ماتریس وزنی تبدیل شده و سپس برای بدست آوردن بردار وزن نهایی، ابر ماتریس وزنی بایستی مرتباً در خود ضرب شود و این فرایند آنقدر ادامه می‌یابد تا در یک بازه قابل قبول ماتریس به ماتریسی ایستا تبدیل گردد، که به این ماتریس ابر ماتریس حدی<sup>۲</sup> 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 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 لی‌و 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 قابلیت‌اعتماد 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 قابلیت‌اعتمادی 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 یافته است، یک ماتریس کمی خواهد بود.



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

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 و 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 سلسله 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 و همچنین وابستگی‌های 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<sup>۱</sup> 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.

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

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

<sup>۲</sup> - Limited Super Matrix

<sup>۱</sup> - 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
مصرف انرژی	۰/۶۳	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 قابلیت‌اعتماد نیز با توجه به رابطه مستقیم هزینه با قابلیت‌اعتماد این عامل وزن بیشتری به خود گرفت. طبیعتاً این دو معیار با هدف قرار گرفتن قابلیت‌اعتماد در مقایسه با گزینه‌ها مهم‌تر فرض شده‌اند. ابرماتریس تشکیل یافته توسط نرم‌افزار در جدول شماره ۲ آورده شده است.

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 قابلیت‌اعتماد گرفته است. کمترین وزن را نیز سیستم شماره ۲ داراست. 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.

مقادیر این محاسبات به صورت مقایسه‌ای وارد نرم‌افزار Super decisions شدند که با استفاده از تکنیک ANP اولویت‌بندی گزینه‌ها (سیستم‌ها) تعیین گردد. علت این که تکنیک ANP برای انتخاب ساختار مناسب به کار گرفته شده است وابستگی شدید دو معیار هزینه و ایمنی به میزان قابلیت‌اعتماد می‌باشد. در این مواقع 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.

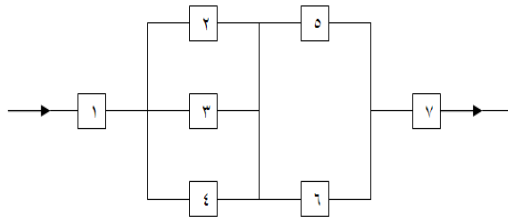
در مورد مقایسه معیارها نسبت به هر سیستم پرسشنامه‌ای برای مقایسه چهار معیار معرفی شده با یکدیگر طراحی شد و توسط آن نظرات تعدادی از خبرگان و افراد آگاه در این زمینه جمع‌آوری گردید. سپس طبق نتیجه حاصل از این پرسشنامه این گونه عمل گردید که ارزش و اهمیت میزان قابلیت‌اعتماد سیستم بیش از بقیه عامل‌ها فرض شد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

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ستون مربوط به معیار هزینه، قابلیت‌اعتماد 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 گرفته اند. با قرار دادن قابلیت‌اعتماد به عنوان هدف، در بین معیارها هزینه از ایمنی مهم‌تر می‌باشد. میزان مصرف انرژی به دلیل نداشتن ارتباط با قابلیت‌اعتماد وزن صفر گرفته است. در بین گزینه‌ها نیز سیستم

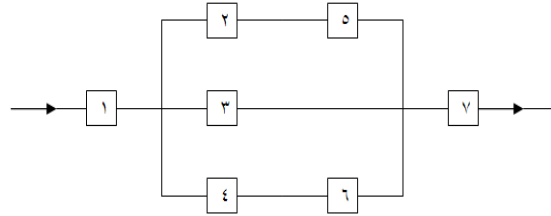
خروجی نرم‌افزار به شکل جدولی (جدول شماره ۳) قابل مشاهده است.

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.

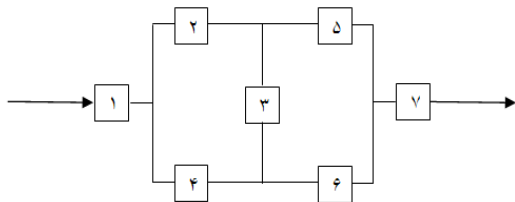
ستون پنجم تا یازدهم ماتریس گویای این مطلب است که با هدف واقع شدن هر کدام از گزینه‌ها میزان اهمیت معیارها برای همه آنها یکسان بوده و به این ترتیب می‌باشد؛ قابلیت اعتماد در مقام اول اهمیت قرار دارد، هزینه در مقام دوم و بعد از آن دو معیار ایمنی و میزان مصرف انرژی دارای اهمیت یکسان می‌باشند. اما برای تشخیص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



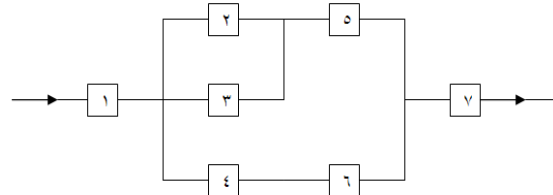
سیستم شماره ۲



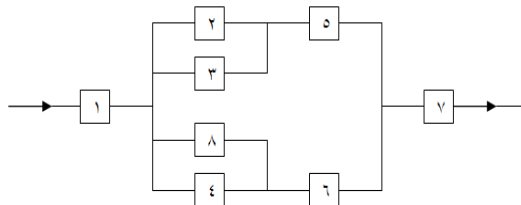
سیستم شماره ۱



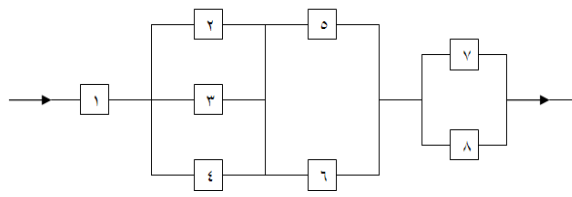
سیستم شماره ۴



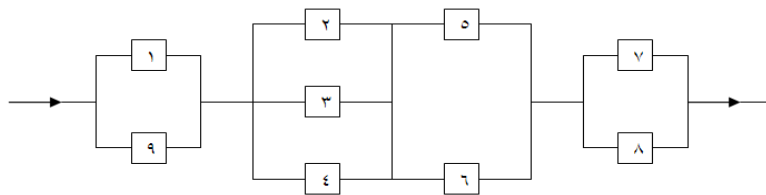
سیستم شماره ۳



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. قضاوت 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 این‌که تأثیر منفی خواهد داشت. به عنوان مثال حذف یک مسیر در سیستم شماره ۲ و اضافه کردن دو مسیر دیگر به طوری‌که 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 نشده‌است. در این تحقیق با بررسی این‌گونه مسائل نتایج مفیدی حاصل شد.

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

تعیین معیارهای مختلف در کنار قابلیت‌اعتماد که حائز اهمیت هستند می‌تواند اولویت ساختارهای مختلف مدنظر را با چیزی که در ابتدا (معیار قرار دادن قابلیت‌اعتماد به تنهایی) 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 این‌گونه 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 قابلیت‌اعتماد سیستم خواهد داشت به طوری که هزینه اضافه کردن این جزء قابل چشم‌پوشی خواهد بود.

اما افزودن یک جزء به سیستم به‌طور کلی افزایش قابلیت‌اعتماد 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 قابلیت‌اعتماد نسبت به سیستم شماره ۴ دارد کمترین وزن را در بین گزینه‌ها داراست، 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

این‌گونه تحقیق‌ها می‌توانند در به‌کارگیری مبانی و مفاهیم نظری قابلیت‌اعتماد در عالم واقعیت و در عمل مفید باشند. در این راستا پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده در نظر گرفته 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 به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته سیستم را بهینه کرد.
- می‌توان با مقایسه پاسخ‌های به‌دست‌آمده 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 به‌عنوان مثال زیبایی ظاهری دستگاه مورد نظر مباحث فازی وارد تحقیق شده و باعث توسعه کار خواهد شد.
- در این مقاله روش ANP براساس مزایا و معایب تکنیک‌های معرفی شده، انتخاب‌گشته‌است. 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 موردی و با داده‌های واقعی نتایج ملموس تری به‌دست 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.