علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، ویژه نامه شماره۴، بهار۱۳۹۶

مقایسه کاربرد روش مدل‌سازی بیزین و روش‌های تصمیم گیری چند معیاره در ارزیابی ریسک محیط زیستی سدها (مطالعه موردی: سد طالقان)

نگار طیب‌زاده مقدم[1]*

ntayebzadeh@gmail.com

بهرام ملک‌محمدی[2]

احمدرضا یاوری[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۳۹۳/۰۷/۱۹

چکیده

زمینه و هدف: ارزیابی ریسک محیط زیستی (ERA) ابزاری مهم در راستای دستیابی به توسعه پایدار بـه شـمار مـی‌رود. هـدف از ایـن تحقیق کاربرد روش مدل‌سازی بیزین مبتنی بر ساختار سلسله مراتبی به منظور اولویت بندی، ارزیابی و ارائه راهکارهای مدیریتی به جهت کاهش خطرات ناشی از ریسک‌های محیط زیستی سد طالقان می‌باشد.

روش بررسی: در روش اول ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان با استفاده از شبکه بیزین (BN) و بهره گیری از نرم افزار Netica صورت پذیرفت. به منظور مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش‌های متداولی چون روش‌های تصمیم گیری چنـد معیـاره (MCDM)، ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان با روش MCDM و بهره گیری از نرم افزار Expert Choice نیز صورت پذیرفت.

یافته‌ها: بر اساس نتایج این تحقیق، در میان توزیع‌های احتمالاتی گره تصمیم BN، تغییر کاربری اراضی، اثـر بـر جمعیـت و فرسـایش و رسوبگذاری مهم‌ترین ریسک‌ها هستند و آلودگی، لرزه‌خیزی، سیلاب، گردشگری و آسیب‌پذیری اکولوژیکی در اولویت‌های بعدی می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری: BNs به عنوان روشی جدید با دارا بودن مزیت‌هایی چون در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و شرایط عدم قطعیـت از مدل‌های انعطاف پذیر با توانایی بالا در ERA محسوب می‌شوند. از اینرو به منظور دست‌یابی به یک راه حل جامع برای بررسی مسـائل پیچیده‌ای چون ERA پروژه‌های عمرانی از جمله سدسازی، بکارگیری BNs می‌تواند از کارایی بالایی برخوردار باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه بیزین (BN)، ارزیابی ریسک محیط زیستی (ERA)، عامل‌های ریسک، روش‌های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM)، سد طالقان.

۱*- (مسوول مکاتبات): دانش‌آموخته کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران.

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, Special No.4, Spring 2017

Comparing the Application of Bayesian Modeling and Multi Criteria Decision Making Method in Environmental Risk Assessment of Dams (Case study: Taleghan Dam)

Negar Tayebzadeh Moghadam [1]*
ntayebzadeh@gmail.com
Bahram Malekmohammadi [2]
Ahmadreza Yavari [2]

Abstract

Background and Objective: Environmental risk assessment is an important tool to achieve sustainable development. The purpose of this study is application of Bayesian modeling method based on a hierarchical structure for prioritization, assessment and offering management solutions to reduce the hazards of Taleghan dam environmental risks.
Method: In the first method, environmental risk assessment (ERA) of Taleghan dam was performed by using Bayesian Network (BN) and the Netica software. To compare the results of this method with those of conventional methods such as multi criteria decision making method (MCDM), ERA of Taleghan dam was also performed by MCDM method and use of the Expert Choice software.
Findings: Based on the obtained results, the output node of the BN, changes in land use, effects on population and erosion and sedimentation are the most important risks and pollution, seismic, flooding, tourism and ecosensetivity are in second priorities.
Conclusion: BN as a new method with some advantages such as considering the relation between variables and uncertainty conditions data is considered flexible model with high capacity for ERA. Therefore, to achieve a comprehensive solution for environmental risk of engineering projects such as dam construction, application of BN based on the MCDM has a high performance.

Keywords: Bayesian network (BN), Environmental risk assessment (ERA), Risk factors, Multiple criteria decision making (MCDM), Taleghan dam.

1- MSc in Environmental Planning and Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
* *(Corresponding Author)*
2- Associate Professor of Environmental Planning and Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسئولیت‌های یک برنامه‌ریز محیط زیست انتخاب یک محیط امن و بی‌خطر به عنوان بستر توسعه است (۱). فعالیت‌های سدسازی همواره مخاطراتی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند که ابعاد این خطرات با توجه به ماهیت پروژه و حساسیت‌های محیط زیستی منطقه متفاوت است (۲). با پیش بینی، تقلیل اثرات سوء و مدیریت صحیح ریسک می‌توان از درجات خطر به منظور کاهش پتانسیل آسیب رسانی بر محیط زیست کاست (۳). ارزیابی ریسک محیط زیستی[1](ERA) یکی از حوزه‌های فرعی فعالیت ارزیابی ریسک است و درصدد سنجش ریسک‌های مربوط به محیط زیست می‌باشد که بر اثر فعالیت‌های صنعتی و یا سایر طرح‌های عمرانی صورت می‌پذیرد (۴).

در سال ۲۰۰۷، Pollino و همکارانش در تحقیقی به سنجش (BNs)[2] به منظور استفاده در ارزیابی ریسک اکولوژیکی پرداختند. در این تحقیق اشاره می گردد که BNs قابلیت مدل‌سازی مسایل مربوط به مدیریت محیط زیست را داراست. در این تحقیق ارزیابی ریسک جوامع ماهیان بومی حوزه آبخیز گلبرن مد نظر قرار گرفته است (۵). Watthayu & Peng در سال ۲۰۰۴ به بیان و حل یک مسئله تصمیم گیری با استفاده از چارچوبی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)[3]در قالب یک ساختار شبکه بیزی پرداختند. در این مطالعه آن‌ها به بررسی ادغام MCDM و شبکه‌های بیزین پرداخته‌اند. با در نظر گرفتن ارتباطات بین متغیرها در ساختار شبکه عدم قطعیت‌ها در مدل تعدیل می‌شود. این امر موجب می‌گردد نتایج حاصل از مدل با آنچه که در محیط واقعی روی می‌دهد مطابقت بیش‌تری داشته باشد (۶). Pollino & Hart در سال ۲۰۰۸ در تحقیقی به بررسی و توسعه مدل شبکه‌های بیزی در ارزیابی ریسک پرداختند. در این تحقیق بیان می‌شود که تصمیم سازی با وجود ریسک این هدف را برعهده دارد که احتمال وقوع خطر و شدت اثرات آن را مد نظر قرار دهد.

توانایی پیش‌بینی تغییرات در اکوسیستم‌های پویا به دلیل وجود استرس‌های متعدد محیطی محدود به فهم ناچیز از ساختار و فرآیندهای محیط زیستی می‌شود؛ در این تحقیق محققان استفاده از BNs را به عنوان ابزاری در مدل‌سازی که قابلیت ارزیابی ریسک اکولوژیکی را با در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و کاهش عدم قطعیت‌ها دارا هستند، توصیه می‌کنند (۷). کشتکار و همکارانش در سال ۲۰۱۳ از BNs برای ارزیابی پایداری و مدیریت در حوضه آبریز حبله‌رود استفاده نمودند و بر اساس نتایج مدل به ارایه راهکارها و اقدامات مدیریتی موثر در حوضه پرداختند (۸). Morales-Nápoles و همکارانش در سال ۲۰۱۴ مدلی را با استفاده از BNs برای بررسی ایمنی سدهای خاکی در راستای کمک به تصمیم گیرندگان برای کاهش پیامدهای منفی احتمالی جاری شدن سیل در اثر شکست سد ارایه نمودند (۹).

احمدی و همکارانش در سال ۱۳۹۰ استفاده از ابزار BNs را در تعیین سطوح ریسک محیط زیستی سدها مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور ابتدا مدل مفهومی ریسک تابعی از شاخص آثار و شاخص مخاطرات توسعه داده شده، سپس مدل مفهومی در قالب BNs تدوین و احتمالات شرطی در حالات مختلف به عنوان ورودی به مدل وارد شده است، سپس برای سد ابوالعباس شاخص ها امتیاز دهی شده است و شاخص ریسک زیست محیطی سد ابوالعباس محاسبه شده است. خروجی های این مطالعه محاسبه احتمال وقوع ریسک زیست محیطی در سطوح مختلف ریسک است (۱۰).

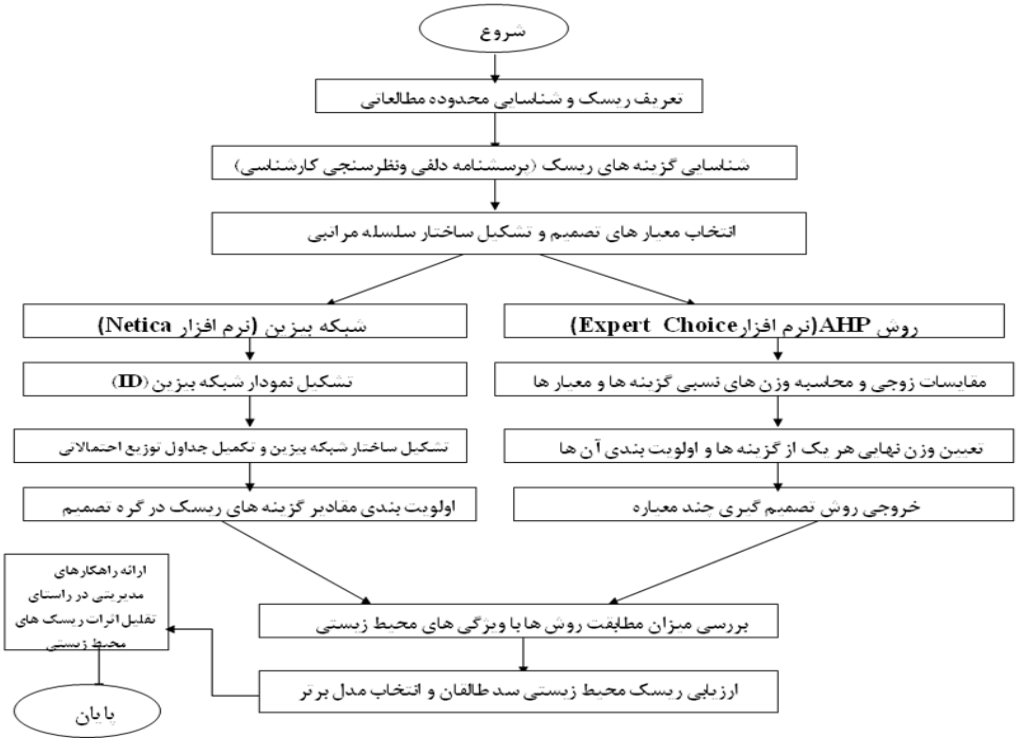
تا کنون مطالعات گسترده‌ای در راستای ارزیابی ریسک سدها صورت پذیرفته است، اما این مطالعات در کشور ما و سایر کشورهای جهان، به جنبه های ایمنی و حفاظتی سدها و سازه-های آبی توجه داشته‌اند و کم‌تر به جنبه‌های محیط زیستی آن‌ها پرداخته شده است. در فرآیند انجام ارزیابی ریسک محیط زیستی نیز در حال حاضر متداول‌ترین روش‌ها، روش MCDM است (۳). بیشتر روش‌های MCDM موجود برای ساخت مدل‌های بزرگ و پیچیده، عدم قطعیت‌ها را در نظر

1- Environmental Risk Assessment
2- Bayesian Network
3- Multi Criteria Decision Making

نمی‌گیرند و پارامترها و مقادیرشان را قطعی فرض می‌کنند (۶). علاوه بر این در اغلب آن‌ها فرض بر این است که معیارها مستقل از یکدیگر هستند، این در حالیست که در مسایل تصمیم سازی در دنیای واقعی معیارهای تصمیم گیری و روابط متقابل آن‌ها اغلب به صورت پیچیده با یکدیگر در ارتباط بوده و داده‌های موجود از عدم قطعیت بالایی برخوردار هستند (۶ و ۱۱). در این تحقیق با مدل و رویکری نوین با استفاده از BNs مبتنی بر چارچوب MCDM (ادغام شبکه‌های بیزین و MCDM) به منظور در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و کاهش عدم قطعیت‌ها، ERA سد در فاز بهره برداری انجام گرفته است.

مواد و روش بررسی

در این تحقیق از دو روش به منظور ارزیابی ریسک محیط زیستی استفاده شد. نمودار فرآیند انجام ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی سد طالقان در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- فرآیند ارزیابی ریسک های محیط زیستی سد طالقان

Figure 1- Environmental risk assessment process of Taleghan Dam

تاکنون بحث‌های زیادی در مورد بهترین روشی که بتواند عدم قطعیت‌ها را مدل کند، صورت پذیرفته است. اغلب روش‌های پیشنهاد شده در این زمینه مبتنی بر تئوری احتمالات و منطق فازی هستند. از بین این دو روش برای مدلسازی عدم قطعیت-ها، روش احتمالاتی از اساس تئوری قوی تری برخوردار است. یکی از جدیدترین روش‌های احتمالاتی، BNs می‌باشند. با استفاده از این شبکه‌ها می‌توان احتمالات پسین متغیرهای خروجی را با استفاده از مقادیر مشاهداتی متغیرهای ورودی محاسبه نمود (۱۲). از شبکه‌های احتمالاتی برای تصمیم‌گیری و استدلال در شرایط عدم قطعیت استفاده می‌شود (۱۳، ۱۴ و ۱۵). در BNs، یک گراف متشکل از مجموعه گره‌ها و مسیرهای ارتباطی می‌باشد. گره‌ها نماینده متغیرهای تصادفی گسسته‌سازی شده و مسیرهای ارتباطی نمایش دهنده ارتباطات شرطی بین متغیرها هستند. BNs ساختارهای محاسباتی هستند که توسط آن‌ها توزیع احتمالاتی پیوسته توأم یک مجموعه از متغیرهای مربوط به هم از طریق داده‌های مشاهداتی استنباط می‌گردند. در حالت ساده، توزیع احتمالاتی توأم یک مجموعه از متغیرها، با فرض مستقل بودن آن‌ها، از

حاصلضرب توزیع احتمالاتی شرطی آن‌ها از طریق رابطه شماره ۱ بدست می آید (۱۵).

در این رابطه:

x_i: i امین مقدار متغیر تصادفی،

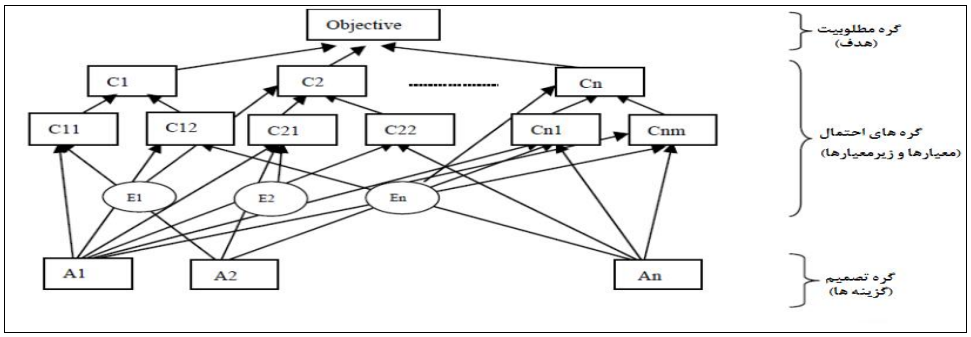
$P(x_1, x_2,..., x_n)$: احتمال توأم مقادیر $(x_1,x_2,....,x_n)$،

$\pi(x_i)$: ارزش کمی (مقادیر کمی) مجموعه علل x_i است.

$$P(x_1,x_2,...,x_n) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i|\pi(x_i)) \qquad (1)$$

کاربرد شبکه های بیزین در مدل‌سازی مسایل تصمیم گیری چند معیاره

یک ساختار سلسله مراتبی در MCDM متشکل از مجموعه‌ای از اهداف، گزینه‌ها، معیارها و زیرمعیارها برای تصمیم گیری است (۱۶ و ۱۷). در این مطالعه سه نوع از گره‌ها (گره احتمالی، گره مطلوبیت و گره تصمیم) در ساختار BN استفاده شده است. گره‌های تصمیم نمایش دهنده مجموعه‌ای از گزینه‌ها هستند$\{A_i,\ldots,A_n\}$، گره مطلوبیت نمایش دهنده مجموعه‌ای از اهداف (اولویت‌های تصمیم‌گیر) است و گره‌های احتمالی که شامل مجموعه‌ای از معیارها و زیرمعیارها می‌باشد$\{C_1,\ldots,C_n,C_{11},\ldots,C_{nm}\}$، این معیارها ممکن است با یکدیگر ارتباط داشته باشند، آن‌ها همچنین می توانند توسط عوامل متعدد $\{E_1,\ldots,E_n\}$ تحت تاثیر قرار گیرند (۶). در شکل شماره ۲ نمودار ساختار سلسله مراتبی در BN نشان داده شده است. در این تحقیق در مدل‌سازی BN نرم افزار Netica استفاده شده است (۱۸).



شکل ۲- ساختار سلسله مراتبی در شبکه بیزین (۶)

Figure 2- The hierarchical structure of the Bayesian network

ساختار شبکه بیزین

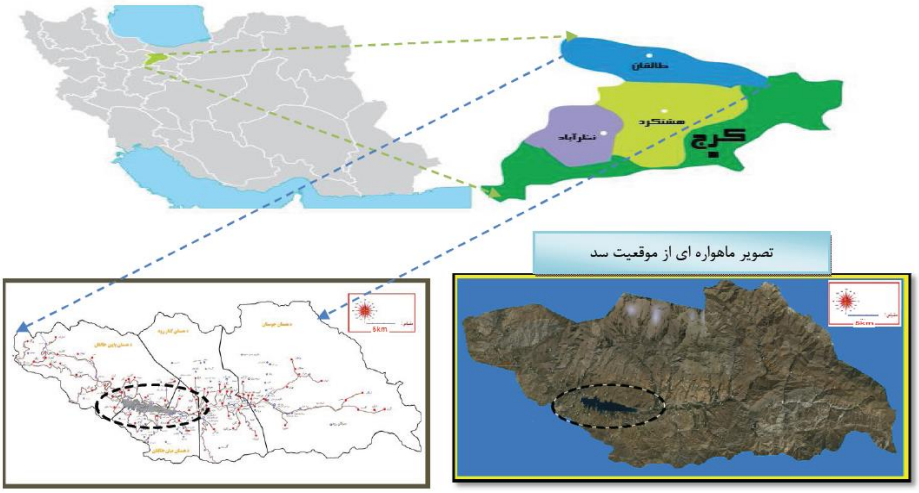
در BN توسعه داده شده، گره تصمیم در برگیرنده مجموعه‌ای از گزینه‌ها است، یک گره مطلوبیت در برگیرنده مجموعه‌ای از اهداف (اولویت‌های تصمیم گیر) می‌باشد و معیارها، زیر معیارها در سطوح مختلف نیز گره‌های احتمالی هستند (۶ و ۱۹). ارتباطات میان این گره‌ها به صورت کیفی از طریق آرک‌ها در نمودار مشخص می شوند و ارتباطات کمی میان آن‌ها از طریق (CPT)[1] در ارتباط با هر یک از گره‌ها مدل‌سازی می‌شوند (۱۱، ۲۰ و ۲۱). در BN انتخاب گره‌ها، حالات، ارتباطات بین متغیرها و مقادیر CPT با قضاوت‌های کارشناسی و یا داده های بدست آمده از منطقه کامل می‌شوند. در مدل‌سازی بیزین اطلاعات علمی موجود در قالب‌های مختلف و دانش کیفی متخصصان به عنوان منابع با ارزش اطلاعاتی، با یکدیگر تلفیق می شوند این امر موجب می‌گردد نتایج به طور معنی داری بهبود یابد (۱۱، ۲۲). با کامل نمودن CPT مربوط به هریک از گره‌ها و تشکیل BN مقادیر توزیع احتمالاتی مجموعه گزینه-های ریسک نیز در گره تصمیم مشخص و اولویت‌بندی می‌شود (۶ و ۱۴).

معرفی منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی طالقان در۱۲۰کیلومتری شمال غربی تهران و در جنوب رشته کوه‌های البرز در دره طالقان قرار گرفته است.

1-Conditional Probability Table

محل سد مخزنی طالقان با طول جغرافیایی '۳۷ و °۵۰ الی '۱۰ و °۵۱ و عرض جغرافیایی '۵ و °۳۶ الی '۲۵ و °۳۶ درپایین دست بند انحرافی سنگبان واقع شده است. شکل شماره ۳ موقعیت سد طالقان را نشان می دهد (۲۳).



شکل ۳- موقعیت سد طالقان

Figure 3- Position of Taleghan Dam

شناخت گزینه‌های ریسک

شناخت از وضعیت هر یک از گزینه‌های اصلی ریسک محیط زیستی سد طالقان که از طریق پرسشنامه دلفی انتخاب گردیده یکی از فرآیندهای مهم در ERA سد است. بدین ترتیب که ابتدا پرسشنامه دلفی شامل مجموعه‌ای از عوامل ریسک بر اساس اطلاعات موجود از منطقه، در اختیار کارشناسان خبره در امر محیط زیست و سازه‌های آبی و مطلع از وضعیت بهره برداری از سد طالقان قرار گرفت و در نهایت گزینه‌های اصلی ریسک محیط زیستی این سد در فاز بهره برداری به منظور مدل‌سازی ERA در شبکه بیزین مشخص گردید.

تحلیل نتایج

در این تحقیق یک چارچوب تصمیم‌گیری با بهره‌گیری از BN به منظور ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان تدوین و تحلیل شده است. سپس به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبکه بیزین در ERA سد طالقان با روش‌های متداولی چون MCDM، با این روش نیز ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان انجام گرفت. در BN در مجموع ۲۵ گره در شبکه استفاده شد. در جدول شماره ۱ نام و مشخصات این گره‌ها شامل نام گره، معادل انگلیسی، سطح گره در ساختار سلسله مراتبی، حالات گره و نوع آن در ساختار BN ارایه شده است. پس از مشخص شدن گره‌ها، حالات متغیرها و ارتباطات میان آن‌ها BN ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان در محیط نرم افزار Netica تشکیل داده شد.

این ارزیابی شامل یک گره تصمیم با مجموعه‌ای از گزینه‌های ریسک محیط زیستی سد طالقان، یک گره مطلوبیت به عنوان هدف اصلی (ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان) و ۲۳ گره احتمالی در ساختار شبکه است. معیارها، زیر معیارها و دیگر فاکتورها گره‌های احتمالی هستند. در این شبکه ارتباطات بین متغیرها از طریق آرک‌ها (خط‌ها) مشخص می‌شود. در این ساختار دو شاخص اصلی ریسک (احتمال وقوع و شدت اثرات) دو معیار اصلی می باشند. هریک از معیارها می‌تواند توسط زیر معیارها تحت تاثیر قرار گیرد به عنوان مثال هریک از معیارهای احتمال وقوع و شدت اثرات تحت سه زیر معیار (محیط طبیعی، محیط بیولوژیکی و محیط اقتصادی- اجتماعی) قرار می‌گیرد، هر یک از معیارها و زیرمعیارهای سطوح بالاتر نیز می تواند تحت تاثیر زیرمعیارهای سطوح پایین‌تر قرار گیرد. احتمالات به شکل یک CPT برای هر گره در شبکه وارد می‌گردد. ارتباطات کمی میان متغیرها از طریق CPT در ارتباط با هر یک از

گره‌ها مدل‌سازی می‌شود. این جدول‌ها به ازای هر ترکیب ممکن از حالت‌های والد، به گره مولود یک احتمال اختصاص می‌دهد. مقادیر احتمالاتی در این جدول‌ها براساس نظر کارشناسی و داده‌های بدست آمده از منطقه تخمین زده شده و در جدول‌ها به صورت درصد بیان گردید. برای پرکردن احتمال وقوع هر سناریو در جدول‌ها به منظور هماهنگی بیشتر مقادیر احتمالاتی وارد شده در CPT متغیرها، از جدول شماره ۲ استفاده شده است.

جدول ۱- نام و مشخصات گره‌ها در ساختار شبکه بیزین

Table 1- The name and descriptions of nodes in the structure of Bayesian network

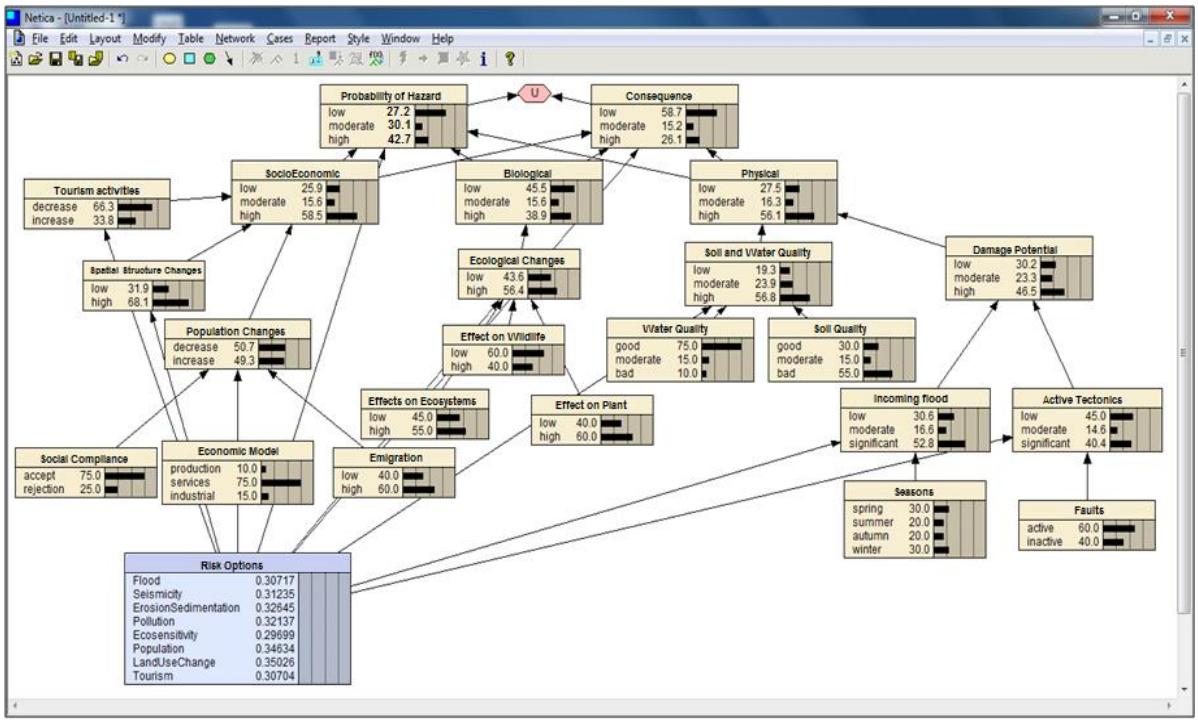
نام گره	معادل انگلیسی	سطح گره در ساختار سلسله مراتبی	حالات گره	نوع گره
مطلوبیت	Utility	هدف	-	مطلوبیت
شدت اثرات	Consequence	معیار	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
احتمال وقوع خطر	Probability of Hazard	معیار	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
محیط فیزیکی	Physical	زیرمعیار سطح۱	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
محیط بیولوژیکی	Biological	زیرمعیار سطح۱	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
محیط اقتصادی، اجتماعی	Social Economic	زیرمعیار سطح۱	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
کیفیت آب و خاک	Soil and Water Quality	زیرمعیار سطح۲	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
پتانسیل تخریب سد	Damage Potential of Dam	زیرمعیار سطح۲	کم، متوسط، زیاد	احتمالی
فعالیت‌های گردشگری	Tourism Activities	زیرمعیار سطح۲	افزایش، کاهش	احتمالی
تغییرات اکولوژیکی	Ecological Changes	زیرمعیار سطح۲	کم، زیاد	احتمالی
تغییر ساختار فضایی	Spatial Structure Changes	زیرمعیار سطح۲	کم، زیاد	احتمالی
تغییرات جمعیت	Population Changes	زیرمعیار سطح۲	افزایش، کاهش	احتمالی
فعالیت تکتونیک	Active Tectonics	زیرمعیار سطح۳	کم، متوسط، شدید	احتمالی
سیلاب ورودی به مخزن	Incoming Flood	زیرمعیار سطح۳	کم، متوسط، شدید	احتمالی
کیفیت آب	Water Quality	زیرمعیار سطح۳	خوب، متوسط، آلوده	احتمالی
کیفیت خاک	Soil Quality	زیرمعیار سطح۳	خوب، متوسط، آلوده	احتمالی
اثر بر گیاهان	Effect on Plant	زیرمعیار سطح۳	کم، زیاد	احتمالی
اثر بر حیات وحش	Effect on Wildlife	زیرمعیار سطح۳	کم، زیاد	احتمالی
اثر بر اکوسیستم‌ها	Effects on Ecosystems	زیرمعیار سطح۳	کم، زیاد	احتمالی
الگوی اقتصادی منطقه	Economic Model	زیرمعیار سطح۳	تولیدی، خدماتی، صنعتی	احتمال
مهاجرت	Emigration	زیرمعیار سطح۳	کم، زیاد	احتمالی
پذیرش اجتماعی سد	Social Compliance	زیرمعیار سطح۳	پذیرش، عدم پذیرش	احتمالی
گسل‌ها	Faults	زیرمعیار سطح۴	فعال، غیر فعال	احتمالی
فصول	Seasons	زیرمعیار سطح۴	بهار، تابستان، پاییز، زمستان	احتمالی
گزینه‌های ریسک	Risk Options	گزینه‌ها	سیلاب، لرزه خیزی، اثر بر جمعیت، فرسایش و رسوب گذاری، آلودگی آب و خاک، آسیب پذیری اکولوژیکی، تغییر کاربری اراضی، گردشگری	تصمیم

جدول ۲- نحوه تعیین مقادیر احتمالاتی در CPT

Table 2: How to determine the probability values in CPT

مقادیر احتمالاتی	تشریح
۱۰۰-۸۰	نتیجه احتمال ترکیبی وضعیت گره‌های والد بسیار زیاد است.
۸۰-۶۰	نتیجه احتمال ترکیبی وضعیت گره‌های والد زیاد است.
۶۰-۴۰	نتیجه احتمال ترکیبی وضعیت گره‌های والد متوسط است.
۴۰-۲۰	نتیجه احتمال ترکیبی وضعیت گره‌های والد کم است.
‹۲۰	نتیجه احتمال ترکیبی وضعیت گره‌های والد بسیار کم است.

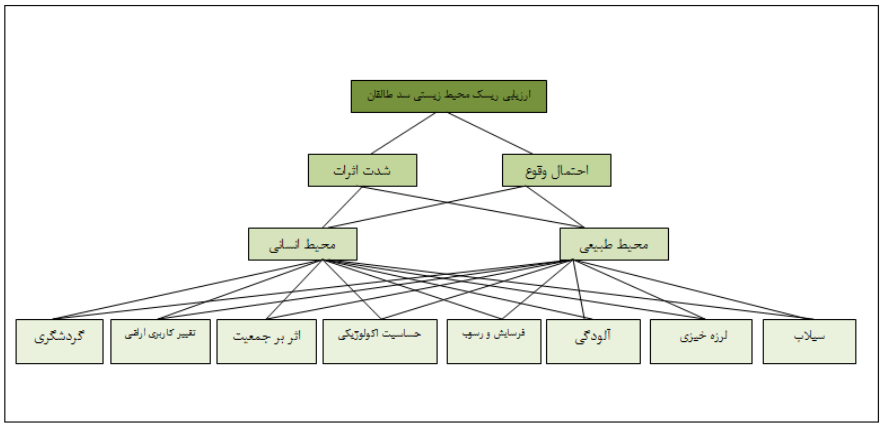
با تشکیل ساختار BN و با کامل نمودن CPT مربوط به هریک از گره‌ها، توزیع‌های احتمالاتی گزینه‌های گره تصمیم نیز مشخص شد. در شکل شماره ۴ شبکه بیزین ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان در مرحله بهره برداری نشان داده شده است. تغییر کاربری اراضی، اثر برجمعیت و فرسایش و رسوب‌گذاری به ترتیب با مقادیر ۰/۳۵۰، ۰/۳۴۶ و ۰/۳۲۶ مهم‌ترین ریسک‌ها هستند و آلودگی، لرزه‌خیزی، سیلاب، گردشگری و آسیب پذیری اکولوژیکی به ترتیب با مقادیر ۰/۳۱۲/۳۲۱، ۰/۳۰۷۱/۰، ۰/۳۰۷۰/۰و ۰/۲۹۶ در اولویت‌های بعدی قرار دارند.



شکل ۴- شبکه بیزین ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان در فاز بهره برداری

Figure 4- Bayesian network for environmental risk assessment of Taleghan Dam in exploitation phase

به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبکه بیزین در ERA سد طالقان با روش‌های متداولی چون MCDM، با این روش نیز ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان انجام گردید. گزینه‌های اصلی ریسک که در روش BN به کار برده شد، در ساختار سلسله مراتبی روش MCDM نیز استفاده گردید. در شکل شماره ۵ نمودار سلسله مراتبی ERA طالقان نشان داده شده است.

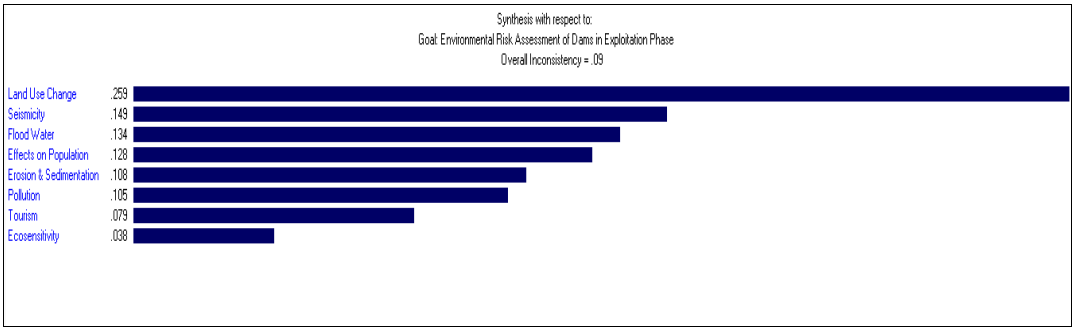


شکل ۵- ساختار سلسله مراتبی ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان

Figure 5- Hierarchical structure for environmental risk assessment of Taleghan Dam

پس از ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قدم بعدی ارزیابی عناصر با مقایسه زوجی است. مقایسه زوجی، فرایندی است برای مقایسه اهمیت، ارجحیت یا درست نمایی دو عنصر نسبت به عنصر سطح بالاتر. مقایسات ERA سد طالقان در قالب ماتریس‌های مقایسه زوجی صورت گرفت. درسطر اول در مقایسه احتمال وقوع و شدت اثرات نسبت به هدف به عنوان معیارهای ERA سد طالقان، این دو عامل از آن جهت که مولفه‌های اصلی ریسک می باشند و ریسک از حاصلضرب احتمال وقوع در شدت اثرات به دست می آید از اهمیت یکسانی برخوردار بوده و هر کدام اولویت ۱ و وزن ۰/۵ را دریافت می‌کنند. سپس مقایسه دو محیط طبیعی و انسانی به عنوان زیر معیارهای شاخص شدت اثرات در ساختار سلسله مراتبی ERA سد طالقان انجام یافت. محیط انسانی از نظر پیامد ریسک‌ها دچار مخاطرات بیش‌تری می شود و احتمال وقوع هر یک از گزینه‌های ریسک در محیط انسانی بیش‌تر است و حتی بسیاری از این خطرات در منطقه به وقوع پیوسته است.

جدول‌های مقایسات زوجی گزینه‌های ریسک محیط زیستی سد طالقان نسبت به سطوح بالاتر خود نیز بر اساس قضاوت های کارشناسی و ویژگی‌های منطقه مطالعاتی کامل گردید. در ادامه با استفاده از نرم افزار Expert Choice وزن هریک از شاخص‌ها نسبت به شاخص‌های سطح بالاتر (وزن نسبی) به روش بردار ویژه محاسبه شد و با تلفیق آن‌ها در محیط نرم افزار وزن نهایی مربوط به هر یک از گزینه‌های ریسک محیط زیستی سد طالقان مشخص شد. با توجه به نتایج بدست آمده از نرم افزار EC، تغییر کاربری اراضی، اثر بر جمعیت و فرسایش و رسوب‌گذاری به ترتیب با وزن نهایی ۰/۲۵۹ ، ۰/۱۴۹ و۰/۱۳۴ اولویت های اول تا سوم را به خود اختصاص دادند و اثر بر روی جمعیت، فرسایش و رسوبگذاری، آلودگی، گردشگری و آسیب پذیری اکولوژیکی به ترتیب با اعداد ۰/۱۲۸، ۰/۱۰۸، ۰/۱۰۵، ۰/۰۷۹ و ۰/۰۳۸ اولویت‌های بعدی را دارند. شکل شماره ۶ نمودار اولویت بندی وزن نهایی گزینه‌ها را نشان می دهد.



شکل ۶- اولویت بندی وزن نهایی گزینه‌ها

Figure 6- Prioritizing final weight of alternatives

روش BN مبتنی بر ساختار سلسله مراتبی MCDM با در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و تعدیل عدم قطعیت‌ها نتایج مستدل و قابل قبولی را می‌دهد و اولویت‌بندی صحیحی را برای تدوین راهکارهای مناسب برای کاهش ریسک محیط زیستی ارایه می‌کند. پس از اولویت‌بندی ریسک‌ها، راهکارهایی در راستای کاهش و مدیریت ریسک‌های محیط زیستی سد طالقان به منظور مقابله با آن‌ها و استفاده از فرصت‌های مناسب قبل از به وقوع پیوستن خطرات ارایه شده است. در جدول شماره ۳ نیز اولویت‌بندی ریسک‌های محیط زیستی سد طالقان با دو روش MCDM و شبکه‌های بیزین و چند روش کاهش ریسک برای گزینه‌های اصلی ریسک در منطقه آورده شده است.

جدول ۳- مقایسه اولویت بندی نتایج ERA سد طالقان در روش MCDM و شبکه بیزین و ارائه راهکارهای پیشنهادی در راستای مدیریت ریسک‌ها

Table 3- Compare the prioritizing results of ERA for Taleghan Dam in MCDM method and Bayesian network and proposing strategies for risk management purposes

ریسک	مقادیر احتمالاتی روش بیزین	اولویت بندی	وزن نهایی گزینه ها در روش (MCDM)	اولویت بندی	راهکارهای مدیریتی ریسک‌ها
تغییر کاربری اراضی	۰/۳۵۰	۱	۰/۲۵۹	۱	بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در بالادست، انجام مطالعات ارزیابی توان اکولوژیکی، ارزیابی اثرات توسعه، ارزیابی ریسک و مکانیابی قبل از هر توسعه در منطقه، کنترل تغییر کاربری اراضی در حاشیه رودخانه، جلوگیری از ساخت و ساز بی‌رویه و تغییر ساختار ارگانیک منطقه پس از احداث سد.
اثر بر جمعیت	۰/۳۴۶	۲	۰/۱۲۸	۴	تعیین آسیب و خسارات وارد بر اراضی زراعی، ارزش مسکن، فرصت‌های شغلی از دست رفته و بازپرداخت غرامت‌های مربوطه، احداث مناطق سکونتگاهی جدید در پایین دست مخزن، تامین تسهیلات برای ساکنان بومی و جابه‌جا شده و ایجاد شرایط مناسب جهت بازگشت مردم بومی به منطقه.
فرسایش و رسوب‌گذاری	۰/۳۲۶	۳	۰/۱۰۸	۵	اجرای عملیات آبخیزداری و مدیریت آبخیز شامل احیا و بازیابی وضعیت طبیعی اکوسیستم، اصلاح آبراهه‌ها، کشت گونه‌های تثبیت کننده کناره رودخانه، تثبیت اراضی شیب دار در داخل مخزن و محدوده نوسانات آب، بازسازی و احیای بستر رودخانه و مسیل با رعایت تراز و سطح اساس آبراهه.
آلودگی آب و خاک	۰/۳۲۱	۴	۰/۱۰۵	۶	احداث سدهای کمکی، کنترل میزان کود و سموم مصرفی، احداث زهکش‌های مناسب، کنترل فاضلاب ورودی اراضی مسکونی به رودخانه، رعایت حریم و بستر رودخانه طالقان، اجرای عملیات لایروبی و زهکشی اراضی، پایش کیفیت آب مخزن در بالادست و پایین دست سد.
لرزه خیزی	۰/۳۱۲	۵	۰/۱۴۹	۲	ایجاد تراس‌بندی مناسب برای حفظ شیب‌های دیواره‌ها در اطراف مخزن، بررسی فعالیت گسل‌ها در منطقه.
سیلاب	۰/۳۰۷۱	۶	۰/۱۳۴	۳	احداث دیواره نگهبان به منظور افزایش حجم ذخیره آب و افزایش اطمینان گذردهی سیلاب بر روی تاج سد، ساخت کانال های هدایت جریان آب، احیا و تقویت پوشش گیاهی در مسیر سیلاب‌ها به سمت سد طالقان.
گردشگری	۰/۳۰۷۰	۷	۰/۰۷۹	۷	ایجاد مکان‌های رفاهی مخصوص گردشگران به منظور کاهش تخریب محیط زیست، استفاده از قوانین و تابلوهای هشدار دهنده در مناطق مستعد تخریب.
آسیب پذیری اکولوژیکی	۰/۲۹۶	۸	۰/۰۳۸	۸	توجه افراد ذینفع و ذی‌نفوذ به حساسیت و ارزش اکولوژیکی مناطق و جلوگیری از توسعه‌های بی رویه و آسیب‌رسان به محیط‌زیست در ابعاد طبیعی و انسانی بدون انجام مطالعات پایه و ارزیابی‌های اولیه در منطقه.

بحث و نتیجه گیری

روش‌های MCDM امروزه به سبب سهولت در پیاده‌سازی و اجرا، در زمینه‌های مختلف تصمیم‌سازی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در مسایل پیچیده‌ای نظیر ERA سدها، قابلیت اجرایی بودن خود را از دست می دهند. BN به عنوان روشی جدید با دارا بودن مزیت‌هایی چون در نظر گرفتن روابط بین متغیرها و شرایط عدم قطعیت، قابلیت تلفیق اطلاعات موجود در قالب‌های مختلف با دانش و داده‌های کارشناسی، ساماندهی افکار و آرای پراکنده در یک موضوع به صورت تصویری و ساده، امکان به روز رسانی با افزایش متغیرها و یا - داده‌های جدید، از مدل‌های انعطاف پذیر با توانایی بالا در ERA هستند.

به منظور دست‌یابی به یک راه حل جامع برای بررسی مسایل پیچیده‌ای چون ERA پروژه‌های عمرانی از جمله سد در فاز بهره برداری و یا ساختمانی ادغام روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و شبکه‌های بیزی از کارایی بالایی برخوردار است. بر اساس خروجی حاصل از BN ارزیابی ریسک محیط زیستی سد طالقان و اولویت بندی گزینه‌های ریسک می‌توان بیان کرد که پس از احداث و بهره برداری از سد طالقان محیط اقتصادی- اجتماعی بیش از دو محیط فیزیکی و بیولوژیکی تغییر کرده است. افزایش نسبی ساخت و ساز در سطح حوزه پس از احداث سد طالقان، تبدیل اراضی زراعی به مراتع و روند کاهشی پوشش مخلوط باغ و زراعت، افزایش نسبی سطح کلاس بستر رودخانه، رفتن کل یا بخشی از روستاها به زیر آب و تغییر شبکه راه‌ها و دسترسی از جمله تغییرات کاربری در سطح منطقه پس از احداث سد می‌باشد. روند تغییرات کاربری‌ها همچنان با شتاب و به صورت منفی ادامه دار است و نسبت به سایر ریسک‌های محیط زیستی در منطقه اهمیت بالاتری دارد. از طرفی پس از احداث سد در منطقه تا کنون جمعیت نیز به لحاظ تعداد، مهاجرت، الگوی اقتصادی و ساختار فضایی به شدت دچار تغییر شده است و در خروجی مدل در اولویت دوم قرار دارد. به دلیل نوع واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مهم‌ترین ریسک در محیط فیزیکی نیز پتانسیل بالای فرسایش و رسوب‌گذاری است که در اولویت سوم قرار گرفته است. با ارایه و اجرای راهکارهای تقلیل اثرات سوء و مدیریت صحیح ریسک می‌توان شرایط فعلی را بهبود بخشید و از تخریب و نابسامانی بیشتر در منطقه جلوگیری به عمل آورد.

این روش علاوه بر ERA در پروژه‌های مختلف عمرانی، در بیش‌تر پروژه‌هایی که به نوعی به اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری منجر می‌شوند قابل استفاده بوده و تعمیم پذیر می باشد. در انجام این‌گونه مدل‌سازی‌ها نیاز است مجموعه‌ای از فرآیندها و قوانین که به عنوان راهنمایی گام به گام برای کاربر در مشخص نمودن متغیرها و روابط بین آن‌ها در طراحی و تصحیح مدل شبکه باشد ارایه گردد.

منابع

1- Lein, J. K. (2006). "Integrated Environmental Planning." Black Well Science Ltd.

2- Heller, S. (2006). "Managing Industrial Risk Having a Tested and Proven System to Prevent and Assess Risk." Journal of Hazardous Materials, 130(1-2):58-63.

3- Eldin, N.N. & Eldrandly, K.A. (2004). "A Computer A Bayesian Belief Network Analysis of Factors Influencing Wildfire Occurrence in Swaziland Aided System for Site Selection of Major Capital Investment." 1st ASCAAD International Conference, e-Design in Architecture, Dhahran, Saudi Arab.

۴- اندرودی، م. ۱۳۸۰. "اصول و روش‌های مدیریت زیست محیطی"، نشر کنگره.

5- Pollino, C. A., Woodberry, O., Nicholson, A., Korb, K. & Hart, B. T. (2007). "Parameterisation and Evaluation of a Bayesian Network for Use in an Ecological Risk Assessment." Environmental

Modelling & Software, 22(8):1140-1152.

6- Watthayu, W. & Peng, Y. (2004). “A Bayesian Network Based Framework for Multi-Criteria Decision Making.” Proc. of Multi-Criteria Decision Making Conference (MCDA 2004), Whistler, B. C., pp. 6-11.

7- Pollino, C.A. & Hart, B.T. (2008). “Developing Bayesian Network Models within a Risk Assessment Framwork.” International Congress on Environmental Modelling and Software, Australia

8- Keshtkar, A.R., Salajegheh, A., Sadoddin, A. & Allan, M.G., (2013). “Application of Bayesian networks for sustainability assessment in catchment modeling and management (Case study: The Hablehrood river catchment).” Ecological Modelling, 268:48-54.

9- Morales-Nápoles, O., Delgado-Hernández, D., De-León-Escobedo, D. & Arteaga-Arcos, J. (2014). “A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification.” Structure and Infrastructure Engineering, 10(5):589-603.

۱۰- احمدی، آ. مریدی، ع. توفیق، م. سارنگ، ا. ۱۳۹۰. "استفاده از ابزار شبکه‌های بیزین در تعیین سطوح ریسک زیست محیطی سدها"، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی.

11- Fenton, N.E. & M. Neil. (2012). “Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks.” CRC Press.

۱۲- ملک محمدی، ب.۱۳۸۷. "مدل بهینه بهره برداری از سیستم‌های رودخانه- مخزن بر پایه مدیریت ریسک سیلاب"، رساله مقطع دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

13- Newton, A. C. (2010). “Use of a Bayesian network for Red Listing under uncertainty.” Environmental Modelling & Software, 25(1):15- 23.

14- Settas, D., Bibi, P., Sfetsos, I., Stamelos, I. & Gerogiannis, V.C. (2006). “Using Bayesian Belief Networks to Model Software Project Management Antipatterns.” Proc. of the Fourth International Conference on Software Engineering, Research, Management and Applications (SERA 2006), Washington, IEEE, pp. 117-124.

15- Malekmohammadi, B., Kerachian, R. & Zahraie, B. (2009). “Developing monthly operating rules for a cascade system of reservoirs: Application of Bayesian Network.” Environmental Modelling & Software, 24(12):1420-1432.

16- Vincke, P., (1992)., “Multi-criteria Decision-Aid.” Wiley.

17- Kazantzi, V., Gerogiannis, V.C., Anthopoulos, L., (2013). “Multi-Criteria Decision Making for Supplier Selection in Biomass Supply Networks for Bioenergy Production In Outsourcing Management for Supply Chain Operations and Logistics Service.” pp. 313-343, IGI Global.

18- Norsys Software Corporation. (2010). Netica 4.16. Norsys Software, Vancouver, British Columbia.

19- Jensen, Finn V., Olesen, K.G. & Anderson, S.K., (1990). “An Algebra of Bayesian Belief Universe for Knowledge-based System.” In Networks, 20(2):637-660.

20- Sun, Z. & Müller, D. (2012). "A Framework for Modeling Payments for Ecosystem services with Agent Based Models, Bayesian Belief Networks and Opinion Dynamics Models." Environmental Modelling & Software, 45:15-28.

21- Stinson, J., Kolb Ayre, K., summers, H. & Landis, W. (1998). "The Use of Bayesian Network Modeling in Environmental Risk Assessment and Resource Management." Institute of Environmental Toxicology, Huxley College of the Environment, Western Washington University.

22- Shafer, G. (1996). "Probabilistic Expert Systems." CBMS-NFS regional Conference Series in Applied Mathematics, SIAM.

۲۳- مهندسین مشاور بازآب .۱۳۸۱.مطالعات ارزیابی اثرات زیست محیطی سد طالقان و نیروگاه زیر زمینی سنگبان.