ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران ناشی از گسل شمال شهر با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر استدلال شهودی

محسن جهانخواه [۱*]، محمودرضا دلاور [۲]، بهزاد مشیری [۳] و مهدی زارع [۴]

[۱] کارشناس ارشد، گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۲] دانشیار، قطب علمی مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۳] استاد، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۲۶

چکیده

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس اطلاعات مکانی است که وزن و اهمیت هر کدام از این معیارها توسط افراد خبره تعیین می‌شود. اطلاعات مکانی با عدم قطعیت‌هایی همراه است. یکی از روش‌های تلفیق این اطلاعات، تئوری استدلال شهودی است. این تئوری بر اساس فرض استقلال منابع اطلاعاتی است که در بسیاری از موارد از جمله داده‌های مکانی، فرض صحیحی نیست. در این نوشتار یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره هوشمند بر اساس قانون ترکیب یکپارچه هوشیار (Cautious Conjunctive Rule) برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران با فرض فعال شدن گسل شمال تهران ارائه شده است. همچنین فرض شده است که فعال شدن این گسل تأثیری در فعال شدن دیگر گسل‌های شهر تهران ندارد. این قانون ترکیب نیاز به فرض استقلال منابع اطلاعاتی ندارد و می‌تواند برای استفاده از داده‌هایی که همپوشانی اطلاعاتی دارد و همراه با عدم قطعیت هستند به‌کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها : تصمیم‌گیری چند معیاره، تئوری استدلال شهودی، عدم قطعیت، قانون ترکیب یکپارچه هوشیار

***نویسنده مسئول:** محسن جهانخواه
E-mail: mohsen_jahankhah@yahoo.com

۱- مقدمه

بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری در علوم مهندسی و مدیریت، تصمیم‌گیری‌هایی هستند که بر اساس چندین معیار کمی و کیفی انجام می‌گیرند. در چنین مسائلی انجام یک تصمیم صحیح و منطقی مستلزم در نظر گرفتن همزمان همه این معیارها است (Yang & Singh, 1994; Huang & Yoon, 1981; Stewart, 1992). طی دو دهه گذشته، پژوهش‌های زیادی در رابطه با به‌کارگیری فنون هوش مصنوعی و تحقیق در عملیات به منظور بررسی عدم قطعیت در اطلاعات و استفاده از اطلاعات همراه با عدم قطعیت در فرایندهای تصمیم‌گیری و استدلال انجام شده است (Balestra & Tsoukias, 1990; White, 1990; Yager, 1995).

در ادامه این تحقیقات، با استفاده از تئوری استدلال شهودی (Evidential Reasoning) راهکارهایی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi Atribute Decision Analysis) تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است (Xu et al., 2006; Yang & Singh, 1994). این راهکارها بر مبنای یک مدل ارزیابی تحلیلی (Yang & Xu, 2002) و تئوری استدلال شهودی (Shafer, 1976) بنا شده‌اند. در این پژوهش، در نظر است تا با استفاده از اطلاعات مکانی، اولویت هر منطقه از تهران از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای بررسی شود. در این مسئله معیارهای مختلفی مانند شدت زلزله، تراکم جمعیت، تراکم جمعیت سالخورده، قدمت ساختمان و غیره مؤثر بوده و بنابراین یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است.

یکی از انواع رایج عدم قطعیت در داده‌ها، نایقینی است که در داده‌های مکانی بسیار رایج است. تئوری استدلال شهودی یکی از ابزارهای بسیار مفید برای مدل‌سازی عدم قطعیت داده‌ها و استفاده از داده‌های همراه با نایقینی است.

نایقینی داده‌های مکانی را می‌توان به صورت نبود اطلاعات مربوط به یکی از معیارها در برخی مناطق شهری و یا قابلیت اطمینان این اطلاعات در نظر گرفت. نوع دیگری از نایقینی که در این پژوهش در نظر گرفته شده است، نایقینی در تصمیم‌گیری است که در تصمیم‌گیری‌های انسان نیز مشهود است. به عبارت دیگر تصمیمات یک تصمیم‌گیرنده همواره با درجاتی از عدم قطعیت همراه است، که در روش استفاده شده در این پروژه، با استفاده از تئوری استدلال شهودی این نوع عدم قطعیت نیز مدل‌سازی شده است. یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای ترکیب اطلاعات در تئوری استدلال شهودی، تئوری Dempster - Shafer و قانون ترکیب Dempster است (Dempster, 1967; Shafer, 1976). اما همان‌گونه که توسط Dempster (1967) نیز بیان شده است، این تئوری با محدودیت‌هایی همراه است که یکی از آنها، فرض استقلال و مجزا بودن منابع شهود است.

ارائه تعبیر ملموس و آشکار از این فرض در دنیای واقعی دشوار است. اما به‌طور کلی می‌توان گفت، در این قانون ترکیب هیچ منبع شهودی نباید بیش از دو بار در ترکیب به‌کار رود. در چنین مسائلی داشتن یک قانون ترکیب که مبتنی بر فرض استقلال منابع شهود نباشد می‌تواند بسیار مفید باشد. برای رسیدن به چنین قانون ترکیبی پژوهش‌های مختلفی نیز انجام شده است که به عنوان نمونه یکی از آنها در Ling & Rudd (1989) ارائه شده است. اما این روش تنها برای ترکیب اطلاعات منابع شهود ساده مفید است. منبع شهود ساده منبعی است که حداکثر دارای دو فرضیه (Focal Element) با محاسبه چهارچوب مرجع (Frame of Discernment) باشد. یکی دیگر از روش‌های ارائه شده، روشی است که مبتنی بر تجزیه منابع شهود به مجموعه‌ای از منابع شهود ساده است (Elouedi & Mellouli, 1998). این روش‌ها در بسیاری از موارد قابل استفاده نیستند زیرا بسیاری از منابع شهود را نمی‌توان به منابع شهود ساده تجزیه کرد.

یکی دیگر از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه توسط Denoeux (2008) ارائه شد که به‌تازگی با استفاده از مدل ترکیب TBM (Transferable Belief Model) (Smets & Kennes,1994) و قضیه‌هایی در رابطه با تجزیه منابع شهود، روشی را برای ترکیب منابع شهود وابسته به نام قانون ترکیب یکپارچه هوشیار ارائه کرد که خاصیت شرکت‌پذیری و خودترکیبی (Idempotenty) دارند. در قوانین ترکیبی که دارای خاصیت خودترکیبی هستند، از ترکیب بیش از یک بار یک منبع شهود و حتی یک منبع شهود با خودش، نتیجه جدیدی حاصل نمی‌شود و اطلاعات جدیدی به‌دست

نمی‌آید که از نظر منطقی نیز قابل قبول است. برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای مناطق مختلف تهران در این پژوهش، از این قانون ترکیب در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. در حقیقت این روش را می‌توان نوع تکامل‌یافته‌ای از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تئوری استدلال شهودی Dempster - Shafer دانست.

تابه‌حال پژوهش‌های گوناگونی برای تعیین آسیب‌پذیری انسانی تهران انجام شده است که از جمله آنها می‌توان Amiri (2008); Aghataher (2005) و Silavi (2006) را نام برد. Aghataher (2005) برای ارزیابی آسیب‌پذیری از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی فازی استفاده کرده است. Amiri (2008) نیز از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی Dempster - Shafer و تئوری مجموعه‌های زبر برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده کرده است. Silavi (2006) از تئوری مجموعه‌های فازی شهودی (Intuitionistic Fuzzy) برای مدل کردن عدم قطعیت موجود در داده‌ها استفاده کرده است.

در پژوهش حاضر برای تکمیل و تعمیم پژوهش‌های بالا از نظر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌گونه‌ای که بتوان عدم قطعیت‌های ناشی از فقدان داده و قابلیت اطمینان آنها و همچنین عدم قطعیت موجود در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره سلسله مراتبی را دخالت داد، استفاده شده است. همچنین در این پژوهش، همبستگی داده‌ها که همان منابع شهود هستند در نظر گرفته شده و در فرایند تصمیم‌گیری و ارزیابی از روش‌های استدلال شهودی تکامل‌یافته‌ای استفاده شده است، به‌گونه‌ای که وابستگی منابع نیز در ارزیابی در نظر گرفته شده است. برای امتیازدهی هر منطقه از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای از جرم‌های احتمال پایه تعلق گرفته به درجات ارزیابی و مفهوم امید ریاضی استفاده شده است.

در ادامه در بخش ۲، تئوری Dempster - Shafer و تصمیم‌گیری چند معیاره مرور خواهند شد. سپس در بخش ۳ روش ترکیب یکپارچه هوشیار معرفی و تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر آن مدل‌سازی شده است. در بخش آخر نیز نتایج پژوهش با داده‌های واقعی از تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران بررسی شده‌اند.

۲- تصمیم‌گیری چند معیاره با استفاده از استدلال شهودی

یک مسئله ارزیابی به‌صورت سلسله مراتبی از ویژگی‌ها در دو سطح که یک ویژگی کلی در سطح بالا و تعدادی ویژگی پایه در سطح پایین دارند تعریف می‌شود (Yang & Xu, 2002) (شکل ۱).

فرض می‌کنیم که دارای L ویژگی پایه $e_i (i=1,2,...,L)$ مرتبط با ویژگی کلی y هستیم. L ویژگی پایه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند:

$$E=\{e_1,e_2,...,e_L\} \quad (۱)$$

برای هر کدام از این ویژگی‌ها، وزن‌هایی به‌صورت $w=\{w_1,w_2,...,w_L\}$ در نظر گرفته می‌شود که در آن $0\le w_i\le 1$ وزن نسبی ویژگی iام e_i است. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت هر ویژگی نسبت به دیگر ویژگی‌ها در ارزیابی ویژگی کلی هستند. این وزن‌ها به‌گونه‌ای بهنجار می‌شوند که وزن مهم‌ترین ویژگی برابر ۱ است و وزن بقیه ویژگی‌ها نسبت به آن سنجیده می‌شود (رابطه ۲)(Yang & Xu, 2002).

$$\overline{w}_i=\frac{w_i}{\max\{w_i, i=1,2,...,L\}} \quad (۲)$$

همچنین 2N-1 درجه ارزیابی متشکل از درجات ارزیابی مجزای H_i و درجات ارزیابی بازه‌ای $H_{ij}=\{H_i,H_j\}$ به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شوند (Yang & Xu, 2002).

$$H=\{H_1,H_{12},H_2,H_{23},...,H_{(N-1)N},H_N\} \quad (۳)$$

که در آن H_n، nامین درجه ارزیابی مجزا است و بدون از دست دادن کلیت مسئله فرض می‌شود که در ارزیابی H_{i+1} نسبت به H_i برتر باشد. همچنین H_{ij} نیز نشان‌دهنده ارزیابی همراه با عدم قطعیت است که می‌تواند به هر کدام از درجات ارزیابی قرار گرفته در فاصله H_i تا H_j نسبت داده شود. در حقیقت درجه H_{ij} عدم قطعیت و شکی که یک ارزیاب ممکن است بین درجات H_i تا H_j داشته باشد را مدل سازی می‌کند. بازه‌های H_{ij} ارزیابی را کامل‌تر می‌کند چرا که در بسیاری از موارد نمی‌توان با قطعیت یک ویژگی را به یک درجه ارزیابی منفرد تخصیص داد. همچنین در حالت عدم قطعیت کامل نیز می‌توان از فاصله H_{1N} که شامل تمام درجات ارزیابی است استفاده کرد. مجموعه H، مجموعه‌ای شامل کلیه فرضیه‌ها را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش چهار درجه ارزیابی مجزا به صورت: H_1) کم، H_2) متوسط، H_3) زیاد و H_4) بسیار زیاد در نظر گرفته شده است.

در نتیجه فرضیه‌ها برابر خواهند بود با:

$$H=\{H_1,H_{12},H_2,H_{23},H_3,H_{34},H_4,H_{14}\} \quad (۴)$$

اکنون ارزیابی یک ویژگی پایه $e_i (i=1,2,...,L)$ را می‌توان به صورت رابطه ۵ فرمول‌بندی کرد (Yang & Xu, 2002):

$$S(e_i)=\{(H_1,\beta_1),(H_{12},\beta_{12}),(H_2,\beta_2),...,(H_{(N-1)N},\beta_{(N-1)N}),(H_N,\beta_N),(H_{1N},\beta_{1N})\} \quad (۵)$$
$$i=1,2,...,L$$

در این رابطه $0\le B_i, B_{ij}\le 1$ درجات باور در ارزیابی با بازه‌های H_i تا H_j را مشخص می‌کنند و در حقیقت جرم‌های احتمال پایه اولیه هستند که خواهیم داشت (Yang & Xu, 2002):

$$\sum_{i=1}^{N}\beta_i+\sum_{i=1}^{N-1}\beta_{i(i+1)}+\beta_{1N}=1 \quad (۶)$$

فرض شود که $\overline{w}_m$ وزن بهنجار شده ویژگی e_m باشد. در این صورت جرم‌های احتمال پایه برای این درجات ارزیابی به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شوند (Yang & Xu, 2002):

$$m_i=w_m\beta_i$$
$$m_{i(i+1)}=w_m\beta_{i(i+1)} \quad (۷)$$
$$m_{1N}=1-\left(\sum_{i=1}^{N}m_i+\sum_{i=1}^{N-1}m_{i(i+1)}\right)=1-w_m\left(\sum_{i=1}^{N}\beta_i+\sum_{i=1}^{N-1}\beta_{i(i+1)}\right)=(1-w_m)+w_m\beta_{1N}$$

جرم احتمال باقی‌مانده‌ای است که در e_m به هیچ‌کدام از درجات ارزیابی تخصیص داده نشده و در حقیقت جرم عدم قطعیت بر اساس معیار e_m و وزن w_m است.

تا اینجا جرم‌های احتمال پایه برای هر کدام از معیارها با توجه به وزن آنها تعیین و جرم احتمال پایه مربوط به عدم قطعیت نیز مشخص شد. اکنون باید با استفاده از یک روش تجمیع، ارزیابی مربوط به e_mها با استفاده از جرم‌های احتمال پایه آنها ترکیب و ویژگی کلی y ارزیابی می‌شود. پس از ترکیب برای ویژگی کلی y نیز جرم‌های احتمال پایه C_{1N}, C_{ij} و C_i به‌دست می‌آید که می‌توان از آنها برای ترکیب ویژگی‌های کلی با یکدیگر در سطح بالاتر استفاده کرد.

یکی از راه‌های ترکیب ویژگی‌ها، استفاده از تئوری Dempster - Shafer است (Dempster, 1967; Shafer, 1976). اما این تئوری بر اساس فرض استقلال و مجزا بودن منابع شهود است که در بسیاری از مسائل و از جمله اطلاعات آماری و مکانی، این فرض برقرار نیست. برای حل این مشکل در پژوهش حاضر از روش‌های پیشرفته‌تر ترکیب شهود مانند روش ترکیب یکپارچه هوشیار استفاده شده است.

۳- روش ترکیب یکپارچه هوشیار

در اطلاعات به‌کار رفته در این نوشتار به عنوان منبع شهود، داده‌هایی چون تراکم جمعیت، تراکم جمعیت سالخورده، تراکم جمعیت دانش‌آموز و غیره مستقل از یکدیگر نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند. بنابراین برای ترکیب این اطلاعات در تصمیم‌گیری چند معیاره باید از فرایند ترکیبی استفاده کرد که بتواند این منابع شهود وابسته را ترکیب نماید. تاکنون تحقیقاتی در زمینه روش‌های ترکیب منابع وابسته ارائه شده است (Elouedi & Mellouli, 1998; Ling & Rudd 1989) که یکی از کامل‌ترین آنها قانون ترکیب یکپارچه هوشیار توسط Denoeux پیشنهاد شده است.

در این نوشتار برای ترکیب اطلاعات ارزیابی ویژگی‌های پایه از این قانون ترکیب استفاده شده است.

۳-۱. قانون ترکیب یکپارچه هوشیار

اکنون با توجه به مطالب بیان شده و استفاده از قانون ترکیب LCP (Least Commitment Principle) که در Smets (1993) توضیح داده شده است، قانون ترکیب یکپارچه هوشیار بیان می‌شود. قانون LCP بیان می‌کند که از بین دو تابع باور (Dempster, 1967) حاصل از ترکیب، مناسب‌ترین تابع، تابع با حداقل اطلاعات است.

فرض کنید m_1 و m_2 دو تخصیص احتمال پایه غیرصریح (Nondogmatic) باشند. ترکیب آنها با قانون ترکیب یکپارچه هوشیار که به صورت $m_{1\Theta 2} = m_1 \Theta m_2$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود (Denoeux, 2008):

$$\omega_{1\Theta 2}(A) = \omega_1 \wedge \omega_2 \qquad \forall \mathbf{A} \subset \Omega \tag{۸}$$

در نتیجه:

$$m_1 \Theta m_2 = \bigotimes_{A \subset \Omega} A^{\omega_1(A) \wedge \omega_2(A)}$$

که $\wedge$ نشان‌دهنده عملگر کمینه است، $\omega_1(A)$ و $\omega_2(A)$ توابع وزنی هستند که از تجزیه متحد استاندارد یک تخصیص احتمال با استفاده از توابع رواج (Commonality) به‌دست می‌آیند (Smets, 1995). دیده می‌شود اگر در این قانون یک منبع شهود با خودش ترکیب شود، تخصیص‌های به‌دست آمده از ترکیب تغییری نمی‌کند و همان تخصیص‌های اولیه خواهند بود.

اکنون می‌توان از این قانون برای ترکیب منابع شهود اطلاعات آماری و مکانی که منابع شهود وابسته به‌شمار می‌آیند، برای اولویت امدادرسانی مناطق مختلف تهران بر حسب میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای استفاده کرد.

۳-۲. تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس منابع شهود وابسته

همان‌گونه که بیان شد، در مدل به‌کار رفته برای تصمیم‌گیری، مجموعه $\mathrm{H} = \{\mathrm{H}_1, \mathrm{H}_{12}, \mathrm{H}_2, ..., \mathrm{H}_{(N-1)N}, \mathrm{H}_N\}$ فرضیه‌های مورد استفاده در ارزیابی را تشکیل می‌دهند. با توجه به این مجموعه، ابتدا توابع رواج و سپس توابع وزنی برای فرضیه‌ها در رابطه (۴)، به‌صورت روابط (۹) و (۱۰) تشکیل می‌شوند (Denoeux, 2008):

$$\begin{aligned}
&\mathrm{q}(\phi) = 1 \\
&\mathrm{q}(\mathrm{H}_1) = \mathrm{m}(\mathrm{H}_1) + \mathrm{m}(\mathrm{H}_{12}) + \mathrm{m}(\mathrm{H}_{14}) \\
&\mathrm{q}(\mathrm{H}_{12}) = \mathrm{m}(\mathrm{H}_{12}) + \mathrm{m}(\mathrm{H}_{14}) \\
&\vdots \\
&\mathrm{q}(\mathrm{H}_4) = \mathrm{m}(\mathrm{H}_{34}) + \mathrm{m}(\mathrm{H}_4) + \mathrm{m}(\mathrm{H}_{14}) \\
&\mathrm{q}(\mathrm{H}_{14}) = \mathrm{m}(\mathrm{H}_{14})
\end{aligned} \tag{۹}$$

$$\begin{aligned}
&\omega(H_1) = \frac{\mathbf{q(H_{12})q(H_{14})}}{\mathbf{q(H_1)}} \\
&\omega(H_{12}) = \frac{1}{\mathbf{q(H_{12})q(H_{14})}} \\
&\vdots \\
&\omega(H_4) = \frac{\mathbf{q(H_{34})q(H_{14})}}{\mathbf{q(H_4)}} \\
&\omega(\varphi) = \frac{\mathbf{q(H_1)q(H_2)q(H_3)q(H_4)}}{\mathbf{q(H_{12})q(H_{23})q(H_{34})q(H_{14})}}
\end{aligned} \tag{۱۰}$$

اکنون با استفاده از روش ترکیب یکپارچه هوشیار و خاصیت شرکت‌پذیری آن می‌توان منابع شهود را مطابق رابطه(۱۱) ترکیب کرد (Denoeux, 2008).

$$\omega_{1\Theta 2\Theta 3\Theta ...}(H_1) = \omega_1(H_1) \wedge \omega_2(H_1) \wedge \omega_3(H_1) \wedge ... \tag{۱۱}$$

$$\vdots$$

$$\Rightarrow m_1 \Theta m_2 \Theta m_3 \Theta ... = \bigotimes_{A \subset \Omega} A^{\omega_{1 \wedge 2 \wedge 3 \wedge ...}(A)}$$

۴- کار عملی

شناسایی کلیه معیارهای تأثیرگذار در آسیب‌پذیری یکی از مراحل مهم در ارزیابی آسیب‌پذیری است که در این پژوهش بر اساس مطالعات گذشته (Silavi, 2006; Amiri, 2008) کلیه معیارهای مؤثر در آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر تهران به چهار دسته تقسیم شده‌اند. متناظر با هر کدام از این دسته‌ها یک معیار کلی و تعدادی معیار پایه مرتبط با آن وجود دارد. معیارهای کلی عبارتند از عوامل انسانی، عوامل زمین‌شناسی، ساختمان‌ها و ادارات و مراکز صنعتی. معیارهای پایه مرتبط با این معیارهای کلی در شکل ۱ دیده می‌شود. برای تعیین وزن معیارهای کلی و معیارهای پایه از دانش چندین فرد خبره استفاده شده است. ویژگی آشکار این افراد فعالیت در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها و مناطق مختلف و آشنایی با معیارهای مؤثر در آسیب‌پذیری لرزه‌ای است. نظرات افراد خبره به وسیله فرم‌های نظرسنجی جمع‌آوری و به منظور تعیین وزن اهمیت هر کدام از معیارها به‌کار گرفته شد. برای تعیین این وزن‌ها به هر کدام از معیارها امتیازی نسبی از ۱ الی ۵ توسط هر فرد خبره داده شد. برای ترکیب اطلاعات این افراد می‌توان از روش‌های مختلفی مانند تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی (Saaty, 1977)، تئوری Dempster - Shafer (Shafer, 1976)، روش متوسط‌گیری وزن‌دار Yager (1988) و غیره استفاده کرد. در این نوشتار، وزن‌های تعیین شده از طرف هر فرد بهنجار شد به‌طوری که مجموع آنها برابر واحد شد و در نهایت برای ترکیب وزن‌های تعلق گرفته از سوی افراد خبره، با استفاده از روش متوسط‌گیری میانگین آنها به عنوان وزن نهایی برای هر معیار در نظر گرفته شد. نتایج حاصل در جدول ۱ دیده می‌شوند.

با استفاده از این وزن‌ها و با توجه به درخت سلسله مراتب شکل ۱ می‌توان هر منطقه آماری را با استفاده از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی توضیح داده شده از نظرآسیب‌پذیری لرزه‌ای ارزیابی کرد و برای هر منطقه یک تخصیص احتمال پایه ترکیب شده با فرضیه‌های $H = \{H_1, H_{12}, H_2, H_{23}, H_3, H_{34}, H_4, H_{14}\}$ به‌دست آورد. به عبارتی در هر منطقه یک جرم احتمال پایه ترکیب شده برای هر کدام از این فرضیه‌ها به‌دست خواهد آمد.

برای رتبه‌بندی هر منطقه از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای نسبت به بقیه مناطق، باید ارزیابی به‌دست آمده به صورت جرم‌های احتمال برای فرضیه‌های $H = \{H_1, H_{12}, H_2, H_{23}, H_3, H_{34}, H_4, H_{14}\}$ را به صورت یک عدد به عنوان امتیاز بیان کرد. برای این کار به ازای هر H_i یک امتیاز $u(H_i)$ در نظر گرفته می‌شود به‌گونه‌ای که $u(H_{i+1}) > u(H_i)$. فرضیه‌هایی چون $H_{ij}=\{H_i, H_j\}$ را می‌توان هم به H_i و هم به H_j نسبت داد. بنابراین برای هر منطقه یک امتیاز بیشینه (رابطه ۱۲) و یک امتیاز کمینه (رابطه ۱۳) به‌دست می‌آید و امتیاز نهایی میانگین این دو در نظرگرفته می‌شود (رابطه ۱۴) (Yang, 2001, 2002).

$$u_{\max}(A) = \sum_{i=1}^{4} \beta_i(A) u(H_i) + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii+1}(A) u(H_{i+1}) + \beta_{14}(A) u(H_4) \tag{۱۲}$$

$$u_{\min}(A) = \sum_{i=1}^{4} \beta_i(A) u(H_i) + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii+1}(A) u(H_i) + \beta_{14}(A) u(H_1) \tag{۱۳}$$

$$u_{avg}(A) = \frac{u_{\max}(A) + u_{\min}(A)}{2} \tag{۱۴}$$

در اینجا $u(H_i)$ها به صورت $u(H_i)=i$ در نظرگرفته شده‌اند. هر منطقه را می‌توان بر اساس u_{min}، u_{max}، u_{avg} ارزیابی کرد. در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نتایج ارزیابی بر اساس هر کدام از معیارهای کلی با استفاده از u_{avg} به صورت یک نقشه نشان داده شده است. در هر کدام از نقشه‌ها، داده‌ها به هفت رده آسیب‌پذیری لرزه‌ای تقسیم شده‌اند. این نتایج با فرض فعال شدن گسل شمال تهران در این تحقیق حاصل شده و همچنین فرض شده است که فعال شدن این گسل تأثیری در فعال شدن دیگر گسل‌های شهر تهران ندارد.

همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود با در نظر گرفتن معیار عوامل انسانی، مناطق مرکزی متمایل به جنوب با توجه به تمرکز جمعیت بیشتر آسیب‌پذیری بالاتری دارند. همچنین در شکل ۳ نیز مناطق مرکزی و جنوبی آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به دیگر مناطق دارند که به دلیل ساخت فرسوده‌تر و قدیمی‌تر و همچنین تراکم بالاتر ساختمان‌ها در این مناطق است.

با توجه به این‌که در این پژوهش سناریوی فعال شدن گسل شمال تهران در نظر گرفته شده است، در شکل ۴ نیز مناطق نزدیک‌تر به این گسل آسیب‌پذیری بسیار بالاتری نسبت به دیگر نقاط دارند.

شکل ۵ پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای را بر اساس معیار تراکم ادارات، بیمارستان‌ها و مراکز صنعتی نشان می‌دهد. با توجه به محدود بودن تعداد این مراکز و قرار گرفتن آنها در نقاط خاصی در این شکل، دیده می‌شود که تنها برخی مناطق دارای آسیب‌پذیری بالا و بیشتر مناطق آسیب‌پذیری یکسانی دارند.

در شکل۶ نتایج ارزیابی نهایی هر منطقه با ترکیب نتایج به‌دست آمده از معیارهای کلی که در شکل‌های ۲ تا ۵ دیده می‌شود، براساس u_{avg} و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بیان شده، نشان داده شده است. این نقشه نیز دارای هفت کلاس آسیب‌پذیری لرزه‌ای برای نمایش آسیب‌پذیری هر منطقه است. مناطقی که دارای امتیاز u بزرگ‌تری هستند مناطق با آسیب‌پذیری لرزه‌ای بالاتر نسبت به دیگر مناطق هستند. برای رده‌بندی داده‌ها از روش شکست طبیعی (Natural Breaks) استفاده شده است. علت انتخاب این روش این است که در اینجا از گروه‌بندی ذاتی موجود بین داده‌ها استفاده می‌شود. این گروه‌بندی به روشی انجام می‌شود که بیشترین اختلاف بین گروه‌ها دیده شود و مرز بین گروه‌ها در جایی قرار می‌گیرد که پرش بزرگی در تعداد واحدهای مربوط به مقادیر وجود داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

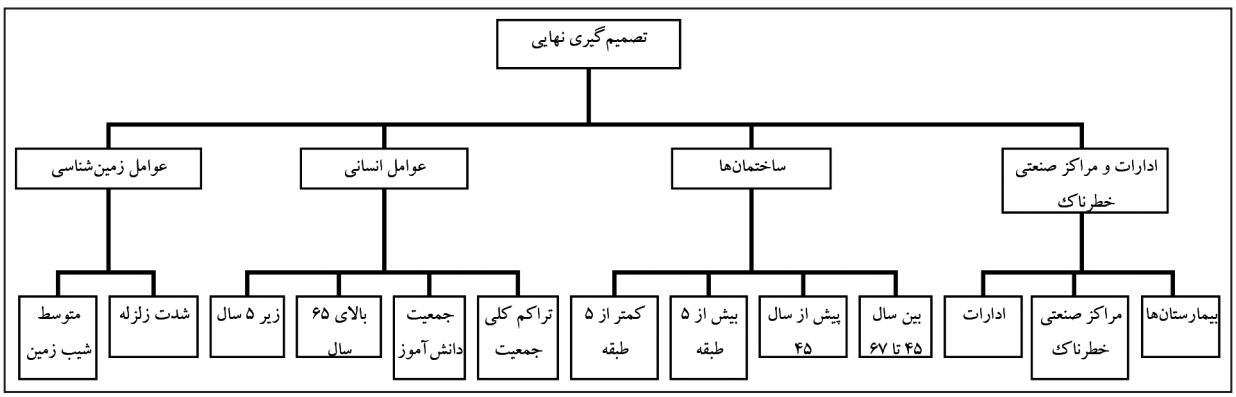
در این نوشتار نقشه‌های آسیب‌پذیری انسانی شهر تهران بر اساس سناریوی فعال شدن گسل شمال تهران با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تئوری استدلال شهودی ارائه شده است. این نقشه، آسیب‌پذیری هر منطقه از را نسبت به دیگر مناطق نشان می‌دهد. تئوری استدلال شهودی یکی از بهترین روش‌های استفاده از داده‌های همراه با عدم قطعیت است. از مهم‌ترین مشکلات اساسی تئوری دمپستر- شافر فرض استقلال منابع و ناسازگاری بین منابع شهود است. در بسیاری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس تئوری استدلال شهودی Dempster - Shafer، منابع شهود مستقل فرض شده‌اند. در مورد اطلاعات مکانی که در این نوشتار استفاده شده است، منابع شهود مستقل از یکدیگر نیستند و با یکدیگر همپوشانی دارند. بنابراین در این نوشتار از یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ترکیب شهود به نام قانون ترکیب یکپارچه هوشیار استفاده شده است که می‌تواند برای تصمیم‌گیری با استفاده از منابع شهود وابسته نیز به‌کار رود. در این پژوهش از روش یاد شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران استفاده شده است. در نقشه نهایی (شکل ۶) که حاصل ترکیب شکل‌های ۲ تا ۵ است، دیده می‌شود که مناطق مرکزی و متمایل به جنوب آسیب‌پذیری لرزه‌ای بالاتری نسبت به دیگر مناطق دارند که می‌توان آن را در اثر آسیب‌پذیری بالای این مناطق در معیارهای کلی ساختمان‌ها و عوامل انسانی دانست که این دو معیار کلی دارای وزن‌های به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۲۴ در مقایسه با دیگر معیارها هستند. همچنین مناطق شمالی تهران به علت نزدیک بودن به گسل شمال تهران در نقشه معیارهای زمین‌شناسی آسیب‌پذیری بالایی دارند اما چون این مناطق در دیگر معیارها آسیب‌پذیری کمی دارند، در نقشه نهایی ترکیب شده آسیب‌پذیری کمتری نسبت به دیگر مناطق دارند.

مشابه کار Aghataher (2005)، Amiri (2008) و Silavi (2006)، در این پژوهش نیز اقدام به تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری برای تهران شده است، با این تفاوت که از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بر اساس یک روش استدلال شهودی جدید برای ترکیب منابع شهود و مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شد. همچنین همبستگی میان منابع اطلاعات مکانی نیز در نظر گرفته شد. روش تصمیم‌گیری چند معیاره به‌کار رفته، تمامی پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی آسیب‌پذیری را مانند اهمیت معیارها، مدل‌سازی عدم قطعیت در تصمیم‌گیری، عدم قطعیت در داده‌ها و نبود داده در برخی مناطق شهر را شامل می‌شود.

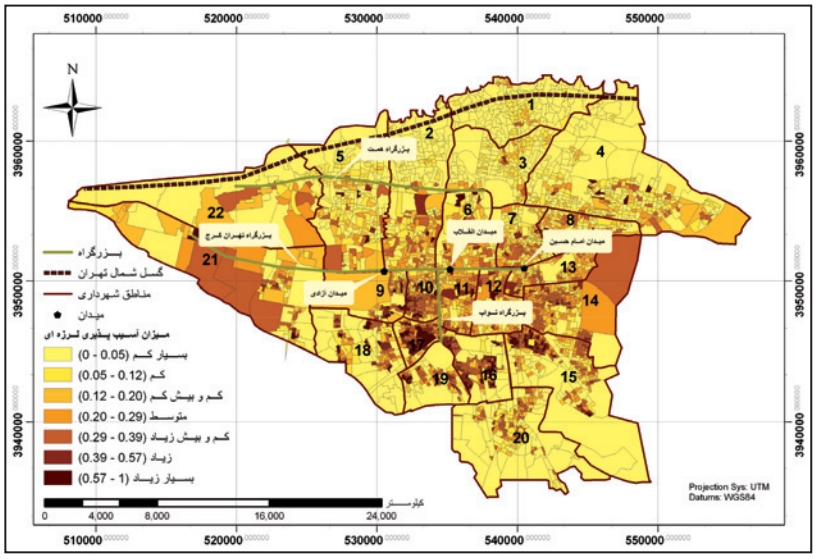
در نتایج این تحقیق ارزیابی بیشتر مناطق مشابه تحقیقات Amiri (2008) و همچنین Silavi (2006) است(شکل‌های ۷ و ۸). اما همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود آسیب‌پذیری لرزه‌ای مناطق مرکزی متمایل به جنوب بیشتر بوده در حالی که در کار Amiri (2008) در روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی Dempster - Shafer، مناطق جنوبی‌تر دارای آسیب‌پذیری لرزه‌ای بیشتری هستند (شکل ۸) و برخی مناطق جنوبی، جنوب خاوری و باختری و حاشیه‌ای تهران بر خلاف نتایج تحقیق حاضر به طور غیرمنتظره‌ای با آسیب‌پذیری بسیار زیادی ارزیابی شده‌اند. این نتیجه را می‌توان در اثر وابستگی اطلاعات مربوط به برخی معیارها و همچنین عدم مدل‌سازی کامل عدم قطعیت که در تحقیقات پیشین به آن توجه چندانی نشده است، دانست.

سپاسگزاری

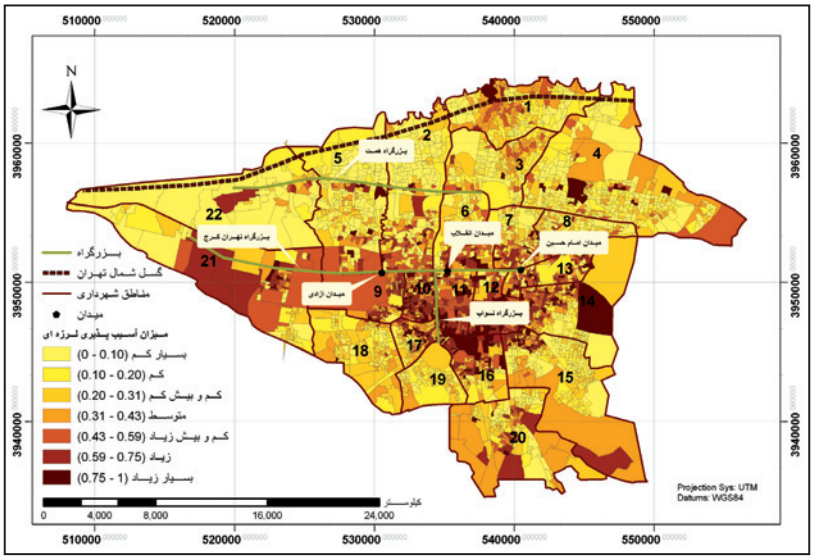
در پایان از راهنمایی‌های اساتید دانشکده مهندسی برق دانشگاه تهران و همکاری جناب آقایان مهندس امیری، آقاطاهر و همچنین سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، اساتید و محققین پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و سازمان آمار ایران که در انجام این تحقیق ما را یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.



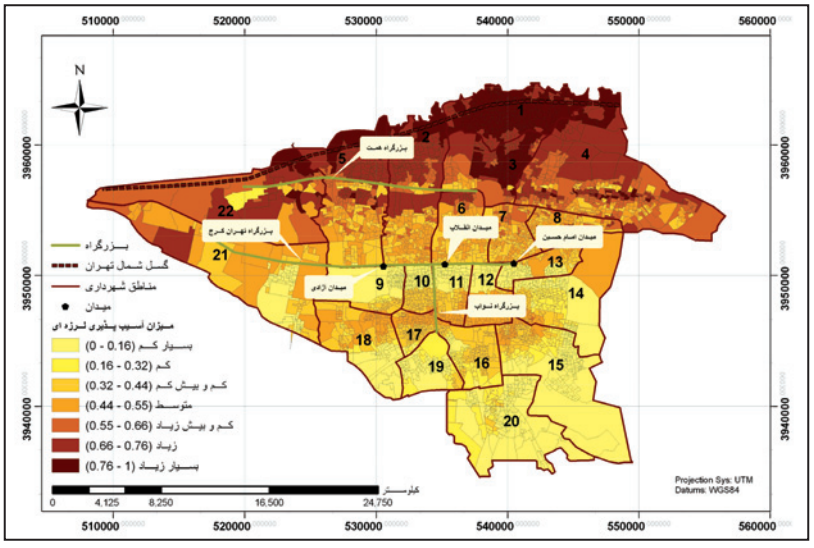
شکل ۱- درخت سلسله مراتب تصمیم‌گیری (Aghataher, 2005; Amiri, 2008)



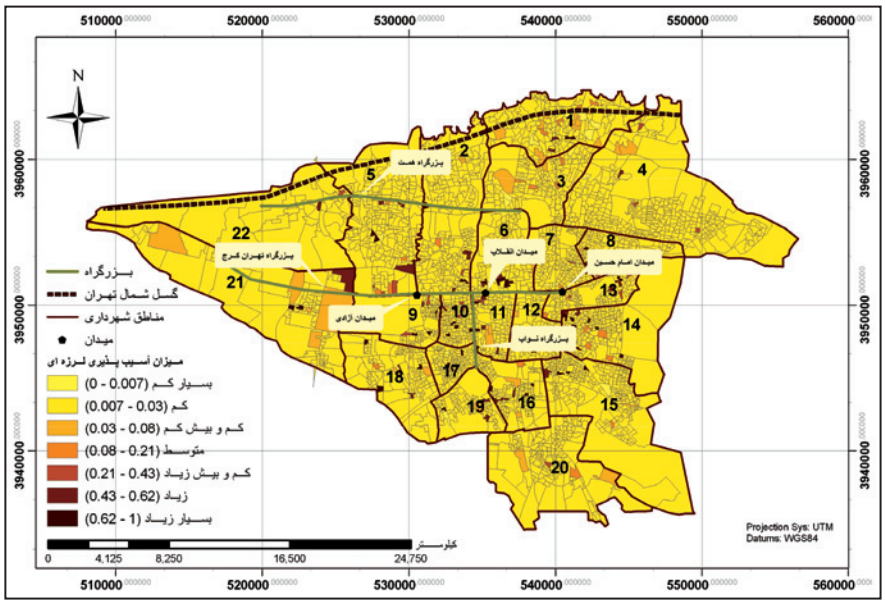
شکل ۲- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران بر حسب عوامل انسانی



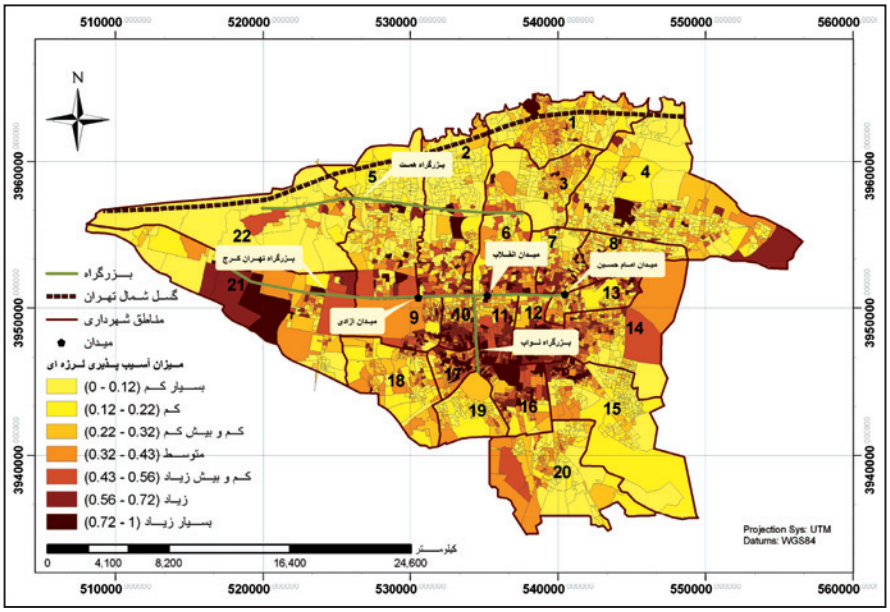
شکل ۳- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران بر حسب عوامل ساختمانی



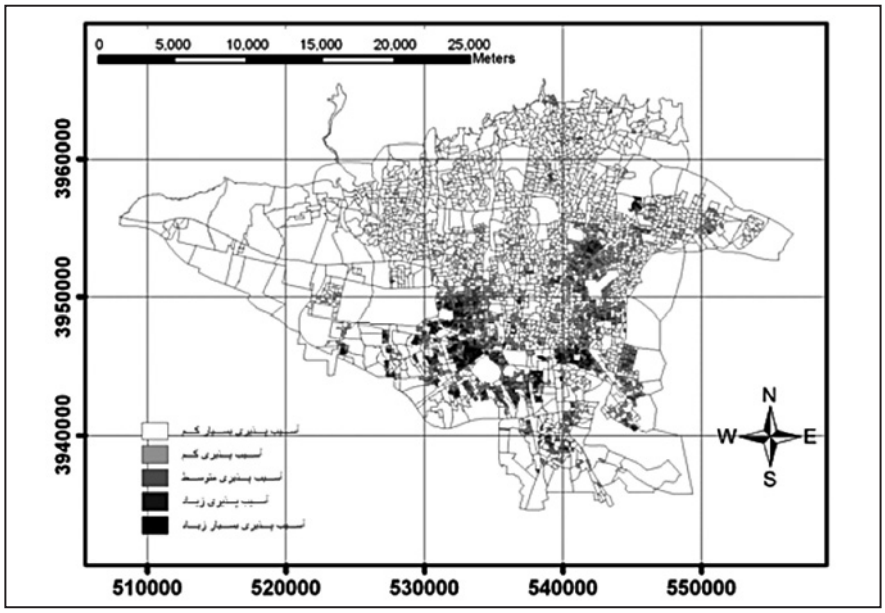
شکل ۴- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران بر حسب عوامل زمین‌شناسی



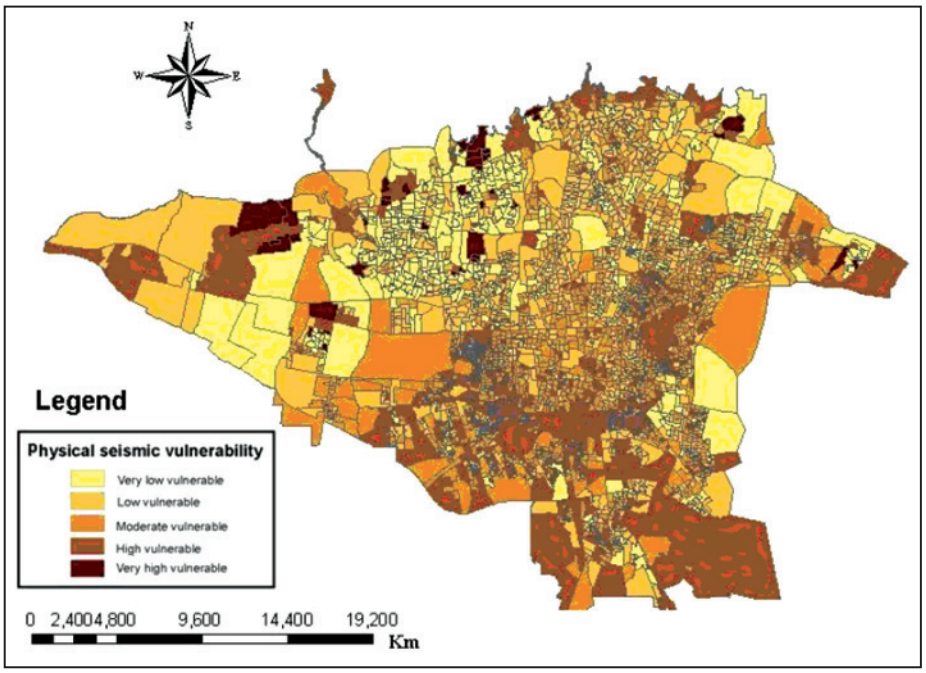
شکل ۵- پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران بر حسب عوامل ادارات و مراکز صنعتی



شکل ۶- نقشه نهایی پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تهران با استفاده از u_{avg} تئوری ترکیب یکپارچه هوشیار)



شکل ۷- ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای انجام شده توسط Silavi



شکل ۸- ارزیابی انجام شده توسط Amiri در روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبیDempster-Shafer

جدول ۱- وزن‌های به‌دست آمده برای معیارهای کلی و معیارهای پایه مرتبط با هر کدام

معیارهای کلی	انسانی	زمین‌شناسی	ساختمان‌ها	ادارات و مراکز صنعتی
وزن	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۱۶

معیارهای پایه عوامل انسانی	تراکم کلی جمعیت	تراکم جمعیت دانش‌آموز	تراکم جمعیت زیر ۵ سال	تراکم جمعیت بالای ۶۵ سال
وزن	۰/۲۷۶۱	۰/۲۱۳۴	۰/۲۵۵۲	۰/۲۵۵۲

معیارهای پایه عوامل زمین‌شناسی	متوسط شیب زمین	شدت زلزله
وزن	۰/۴۵۰۳	۰/۵۴۹۷

معیارهای پایه عوامل ساختمان‌ها	ساختمان‌های کمتر از ۵ طبقه	ساختمان‌های بیش از ۵ طبقه	ساختمان‌های پیش از سال ۴۵	ساختمان‌های ساخته‌شده بین سال‌های ۴۵ و ۶۷
وزن	۰/۲۱۷۷	۰/۲۴۳۵	۰/۲۹۵۳	۰/۲۴۳۵

معیارهای پایه عوامل ادارات و مراکز صنعتی خطرناک	ادارات	بیمارستان‌ها	مراکز صنعتی خطرناک
وزن	۰/۳۰۴	۰/۳۷	۰/۳۲۶

References

Aghataher, R., 2005- Evaluation of seismic vulnerability of Tehran using geospatial information system, MSC thesis, University of Tehran, faculty of engineering.

Amiri, A., 2008- Assessment of seismic risk in Tehran using uncertainty theories , MSC thesis, University of Tehran, faculty of engineering.

Balestra, G. & Tsoukias, A., 1990- Multicriteria analysis represented by artificial intelligence techniques, J. Oper. Res. Soc., Vol. 41, No. 5, pp. 419–430.

Dempster, A. P., 1967- Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping, Annals of Mathematical Statistics 38 pp: 325–339.

Denoeux, T., 2008- Conjunctive and disjunctive combination of belief functions induced by nondistinct bodies of evidence, Artificial Intelligence 172 pp:234–264.

Elouedi, Z. & Mellouli, K., 1998- Pooling dependent expert opinions using the theory of evidence, in: Proc. of the Seventh Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU 98), Vol. 1, Paris, France, pp: 32–39.

Huang, C. L. & Yoon, K., 1981- Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications, A State-of-Art Survey. New York: Springer-Verlag.

Ling, X. N. & Rudd, W. G., 1989- Combining opinions from several experts, Applied Artificial Intelligence 3 pp: 439–452.

Saaty, T. L., 1977- A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology, Vol15, pp:59–62.

Shafer, G., 1976 - Mathematical Theory of Evidence. Princeton. N.J.: Princeton Univ. Press.

Silavi, T., 2006- Assessment of vulnerability of earthquake in Tehran using intuitionistic fuzzy model, MSC thesis, University of Tehran, faculty of engineering.

Smets, Ph. & Kennes, R., 1994- The transferable belief model, Artificial Intelligence 66 pp:191–243.

Smets, Ph., 1993- Belief functions: the disjunctive rule of combination and the generalized Bayesian theorem, International Journal of Approximate Reasoning 9 pp:1–35.

Smets, Ph., 1995- The canonical decomposition of a weighted belief, in: Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Morgan Kaufman, San Mateo, CA, pp. 1896–1901.

Stewart, T. J., 1992- A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice," OMEGA Int. J. Manage. Sci., Vol. 20, No. 5/6, pp. 569–586.

White, C. C., 1990- A survey on the integration of decision analysis and expert systems for decision support, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 358–364.

Xu, D. L., Yang, J. B. & Wang, Y. M., 2006- The evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty, European Journal of Operational Research 174 : 1914–1943.

Yager, R. R., 1988- On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multi Criteria Decision Making, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, Vol 18, No 1,pp:183-190.

Yager, R. R., 1995- Decision-making under various types of uncertainties, J. Intell. Fuzzy Syst., Vol. 3, No. 4, pp. 317–323.

Yang, J. B. & Singh, M. G., 1994- An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 24, No. 1, pp. 1–18,.

Yang, J. B. & Xu, D. L., 2002- On evidential reasoning algorithms for multiattribute decision analysis under uncertainty, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Vol. 32, pp. 278–304.

Yang, J. B., 2001- Rule and utility based evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis under uncertainty, Eur. J. Oper. Res., Vol. 131, No. 1, pp. 31–61.