نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۶۵۷ تا ۴۶۸۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.18439.6872

تدوین مدل های ارزیابی سطح ایمنی پروژه های ساختمانی به روش های رگرسیون چندمتغیره خطی و شبکه ی بیزین

غلامرضا هروی*، امیربهادر کتابی

دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

خلاصه: صنعت ساخت سهم عمده ای از صنعت را در کشورهای مختلف به خود اختصاص می دهد. نرخ حوادث، سوانح و تلفات در این بخش از صنعت، بسیار بیشتر از سایر صنایع گزارش شده است. ایمنی یکی از دغدغه های اصلی در صنعت ساخت است. از جمله بخش‌های پرخطر این صنعت، احداث ساختمان های بلندمرتبه است در این تحقیق تلاش شده است تا با ارزیابی سطح عوامل تأثیرگذار بر ایمنی پروژه، بتوان سطح ایمنی پروژه های آتی را بر پایه ی سوابق و اطلاعات پروژه های پیشین، پیش بینی نمود، چرا که با درک صحیح از میزان تأثیرگذاری عوامل بر ایمنی، می توان سیاست های لازم جهت بهبود ایمنی و کاهش صدمات این بخش از صنعت را پیش گرفت و مانع هدررفت منابع کشور شد. برای رسیدن به این هدف ابتدا، نه عامل تأثیرگذار بر ایمنی به کمک مطالعه ادبیات پیشین و مرور آمار غیررسمی حوادث ناشی از کار کشور، شناسایی شده است و در ادامه رابطه ی میان این عوامل و سطح ایمنی پروژه برای ۹۵ پروژه واقع در شهر تهران و جزیره ی زیبای کیش که اطلاعات آن ها به کمک پرسش نامه جمع آوری گردیده، به کمک شبکه ی بیزین و رگرسیون خطی چندمتغیره، مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل سازی های پیشنهادی این تحقیق، میزان اثر هر یک از گروه های تأثیرگذار بر ایمنی پروژه، با کاوش در اطلاعات پروژه های مشابهِ پیشین، تعیین می شود. طبق نتایج این پژوهش، "نظارت و سرپرستی بر ایمنی پروسه های کاری" و "روند ایمن انجام کار"، از جمله ی تأثیرگذارترین عوامل بر سطح ایمنی پروژه های بلندمرتبه–سازی با ضرائب رگرسیونی ۰/۳۳۸ و ۰/۲۶۴ می باشند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
صنعت ساخت
پروژه‌های ساختمانی
خطرات ایمنی
ریسک های ایمنی
سطح ایمنی پروژه

۱- مقدمه

صنعت ساخت، سهم عمدهای از صنعت را در کشورهای مختلف به خود اختصاص می دهد. نرخ حوادث، سوانح و مرگ ومیر در این بخش از صنعت در مقایسه با سایر صنایع فعال، با اختلاف چشمگیر و قابل تأمل، بیشتر گزارش شده است؛ به عنوان مثال، صنعت ساخت آمریکا با داشتن تقریباً چهار درصد از کل نیروی کار فعال در صنعت، نوزده درصد تلفات صنعت این کشور را شامل شده است [۱-۳]. در ایران نیز در حالی که تنها بیست و نه درصد از کارگران مشغول به کار در کل صنعت ایران در بخش ساخت فعالیت دارند، نزدیک به چهل درصد از حوادث گزارش شده در محل کار در صنعت ساخت گزارش شده است [۴]. همچنین، مطالعات انجام شده در خصوص حوادث رخ داده در محیط کار، که توسط وزارت کار کشور به انجام رسیده است، نشان داده است که در میان تمامی صنایع کشور، صنعت ساخت دارای بیشترین حوادث و سوانح بوده است [۵]. پروژه های عمرانی، شامل مراحل و فعالیت های متعددی هستند که افراد مرتبط با پروژه، در حین انجام این فعالیت ها، با ماشینآلات، ابزار، مواد، مصالح و روش های متفاوت اجرایی گوناگون سروکار دارند که هر یک از آنها خطرات و ریسک های مربوط به خود را دارا هستند و به همین دلیل صنعت ساخت یکی از خطرناک ترین صنایع در دنیا به شمار میرود [۶].

ایمنی از اهداف اصلی پروژه های ساختمانی است که میبایست در کنار دیگر اهداف پروژه مورد توجه قرار گیرد. حوادث ایمنی در محیط کار می تواند اثرات نامطلوب بسیاری بر اهداف دیگر پروژه مانند کاهش بهره وری، تأخیر در برنامه ی زمانی و به طول انجامیدن فعالیتها [۷]، افزایش هزینه [۸] و کاهش سطح کیفیت نهایی [۹] پروژه های ساخت داشته باشد؛ در نتیجه، ارزیابی سطح ایمنی پروژه ها[1] و تلاش برای ارتقا سطح آن، می تواند کمک بسیار شایانی به اهداف کلی پروژه نماید. به همین جهت، شناسایی خطرات و ریسک های ایمنی، به یکی از فرآیندهای اصلی مدیریت ایمنی تبدیل شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: heravi@ut.ac.ir

1 (Project Safety Level (PSL

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

است؛ چرا که ریسکهای ناشی از خطرات شناسایی شده را می توان به کمک اقدامات پیشگیرانه، کاهش داد و یا حذف نمود تا در نتیجه ی آن بتوان سطح ایمنی پروژه ها را افزایش داد و به اهداف پروژه در سطوح بالاتری دست یافت [۱۰, ۱۱].

آسیب های ناشی از کار که مسئولین پروژه ملزم به گزارش دادن آنها هستند، می توانند دارای دامنه‌ای بسیار گسترده باشند. متداول است که آسیب های ناشی از کار را در قالب چهار گروه :۱) آسیب های جزئی، ۲) آسیب های بیش از سه روز، ۳) آسیب های اساسی، و ۴) تلفات و آسیب های کشنده طبقه بندی کنند [۱۲, ۱۳]. در این راستا در تحقیق حاضر، ریسک های ایمنی ای که سبب وارد آمدن آسیب های اساسی و تلفات می شوند، به علت آنکه می توانند بر اهداف پروژه (هزینه، زمان و کیفیت) تأثیرگذار باشند، مورد بررسی قرار گرفته اند و از آسیب های جزئی و بیش از سه روز صرفنظر شده است. این دسته از آسیبها اغلب می توانند به علت سقوط، برخورد با تجهیزات و مواد، برق گرفتگی، گیر افتادن بین تجهیزات و مواد و سایر حوادث رخ دهند [۱۴, ۱۵]. به همین دلیل در پژوهش حاضر، میزان حضور و یا همچنین احتمال وقوع این دسته از ریسک ها به عنوان معیار تعیین سطح ایمنی به کار گرفته شده است.

همچنین پژوهش های بسیاری در زمینه ی شناسایی عوامل تأثیرگذار بر سطح ایمنی پروژه ها انجام شده است که در طی آنها، عوامل تأثیرگذار گوناگونی بر سطح ایمنی و در سطوح متفاوت، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند [۱۶-۱۹]. در این مطالعه، عوامل تأثیرگذار بر سطح ایمنی پروژه، از طریق مرور ادبیات و همچنین آمار غیررسمی حوادث کشور، شناسایی شده است، چرا که با درک صحیح از میزان تأثیرگذاری عوامل بر ایمنی، میتوان سیاست های لازم جهت بهبود ایمنی و کاهش صدمات این بخش از صنعت را پیش گرفت و مانع هدررفت منابع کشور شد. در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با جمع آوری اطلاعات پروژه های ساخت بلندمرتبه داخل کشور و همچنین ساخت و بهره گیری از دو مدل شبکه ی بیزین[1] و همچنین رگرسیون خطی چندمتغیره[2]، رابطه ی بین عوامل تأثیرگذار بر ایمنی و سطح ایمنی بررسی گردیده، تا نهایتاً بتوان به کمک مدلهای ساخته شده، سطح ایمنی پروژه های آتی را با توجه به اطلاعات و سوابق پروژه های پیشین، پیشبینی نمود. مقایسه پتانسیل کار برد و توانایی های دو مدل نیز از دیگر اهداف این تحقیق است.

1 Bayesian Network
2 Multiple Linear Regression (MLR)

۲- مرور ادبیات

با توجه به هدف تحقیق، ادبیات ایمنی در چهار دسته زیر بررسی شده است:

۲- ۱- شناسایی خطرات و ریسکهای ایمنی و روشهای متداول

طبق استاندارد ISO8402:1992 واژه ی ایمن برای حالتی در نظر گرفته می شود که در آن احتمال آسیب به اشخاص یا خسارات مادی، به میزان قابل قبولی محدود شده باشد، و همچنین ایمنی را مجموعه ای از شرایط می داند که میزان مخاطرات را به حداقل رسانده باشد. عدم وجود آسیب غیر قابل قبول، تعریف دیگری است که ISO/IEC Guide2 و OHSAS18001 برای ایمنی بکار برده اند. طبق این تعاریف، حذف کامل مخاطرات منجر به آسیب مطرح نبوده ولیکن اجتناب از مخاطرات با شدت بالا مد نظر قرار گرفته است [۲۰]. از طرفی، هر عاملِ بالقوه‌ی منفی که توانایی آسیب رساندن به پروژه را داشته باشد، خطر ایمنی[3] به شمار می رود. در واقع تعداد زیادی از این عوامل در محلهای کار و سایت های ساخت امکان وقوع دارند و حادثه ی ناشی از هر یک از این خطرات به عنوان ریسک ناشی از آن خطر در نظر گرفته می شود. در روند شناسایی خطرات ایمنی و متعاقباً مدیریت ریسک های ناشی از این خطرات، فهم و درک روشن از تفاوت میان خطر و ریسک، با وجود رابطه ی تنگاتنگ بین آنها بسیار ضروری و ارزشمند است. واژه‌ی «ریسک» در حیطه‌ی ایمنی، برای بیان میزان احتمال آسیب‌دیدن فرد توسط خطرات تهدیدکننده‌ِی پروژه به کار می رود [۱۲].

روشهای مختلفی برای شناسایی خطرات و ریسک های پروژه وجود دارد. در حال حاضر، بیشتر شناسایی خطرات و ریسک های ساخت وساز، بر پایه ی توانایی های مدیران ایمنی و کمک گرفتن از دانش قبلی آنها استوار است. در نتیجه، تعداد زیادی از خطرات نهفته ممکن است همچنان ناشناخته باقی بمانند؛ که ممکن است کارگران ساخت را در معرض ریسک های قابل توجهی قرار دهند [۲۱]. به طور کلی، مدیران ایمنی با بازرسی از سایت های ساخت طی فرآیندی با نام تحلیل خطرات کار، خطرات و ریسک های ساخت را شناسایی می کنند [۱۳, ۲۲ و ۲۳]؛ اگرچه مطالعات بسیاری نشان داده اند که تعداد بسیاری از خطرات یا شناخته نشده خواهند ماند و یا اینکه به خوبی در صنعت ساخت قابل ارزیابی نخواهند بود [۱۱, ۲۴ و ۲۵]. به نظر می‌رسد چنین عملکرد ضعیفی در شناسایی خطرات تا حدی نتیجه ی

3 Safety Hazard

فقدان منابعی نظیر بازرسی های ایمنی، روشهای کارآمد شناسایی ریسک و دیگر موارد مشابه به صورت پیوسته، در طول دوره‌ی ساخت برای شناسایی خطرات در محیط پروژه باشد [۲۶]. همچنین نبود دانش و تکنیک برای شناسایی خطرات نیز دلیل دیگری است که با تأکید بر این موضوع که هر پروژه دارای ماهیتی واحد است و در اغلب مواقع خطرات ویژه و خاص خود را دارد که در دانش موجود (به عنوان مثال مقررات، حوادث گذشته و غیره) تعریف نشده است، سبب این عملکرد ضعیف می شود؛ به علاوه آنکه، برخی از خطرات با توانایی های شناختی انسان، به راحتی قابل شناسایی نیستند [۲۵]. از طرفی، شناخت و گزارش حوادث قریب الوقوع نیز می تواند فرصت بسیار خوبی برای آشکارسازی خطرات نهفته را برای افراد فراهم سازد و در نتیجه از وقوع حوادث در آینده جلوگیری کند، به ویژه شناخت و گزارش از طریق آنالیز ریشه ای علل وقوع حوادث [۲۷-۲۹]؛ این در حالی است که به دلیل وجود چالش های بسیار در ثبت حوادث قریب الوقوع، بدست آوردن داده های نزدیک به واقعیت بسیار سخت است. به همین دلیل دشوار است تا از آنها برای شناسایی خطرات نهفته در تحلیل های کمی و روش های دیگر به صورت قابل اعتماد استفاده کرد [۲۸]. افزون بر موارد نامبرده، از دیگر روش های شناسایی خطرات می توان به روش هایی همچون مرور مفهومی ایمنی[1]، تجزیه و تحلیل مفهومی خطر[2]، تجزیه و تحلیل درخت خطا[3]، تجزیه و تحلیل علل-پیامدها[4]، شناسایی خطر[5] و غیره که هر یک قابلیت استفاده در مراحل مختلفی را دارند، اشاره کرد.

۲- ۲- انواع آسیب های محتمل و طبقه بندی آنها

آسیب های ناشی از کار که افراد مسئول پروژه ملزم به گزارش دادن آنها هستند، می توانند دامنه‌ی گسترده ای را پوشش دهند. جزئی ترین آسیب، ممکن است برداشتن زخمهای سطحی، کبودیها و دیگر موارد مشابه باشد و از طرف دیگر، مرگومیر، شدیدترین نوع آسیبها در نظر گرفته شود. بنابراین متداول است که آسیب های ناشی از کار، در چهار گروه طبقه بندی شوند:

- آسیب های جزئی: آسیبهایی که منجر به غیبت کارگر نخواهند شد و با درمانِ سرپایی درمان‌پذیر هستند.
- آسیب های بیش از سه روز: آسیب هایی را که منجر به غیبت بیشتر از سه روز کارگر در محل کار می شوند.
- آسیب های اساسی: آسیب های شدیدتری که با شکستگی، قطع و یا نقص عضو، دررفتگی های استخوان، از دست دادن موقتی یا دائمی بینایی، آسیب ناشی از شوکهای الکتریکی و دیگر مواردی که به بیهوشی می‌انجامد، و همچنین سایر موارد که منجر به بستری حداقل ۲۴ ساعته در بیمارستان می شود، در گروه آسیبهای اساسی طبقه بندی می‌شوند.
- تلفات و آسیب های کشنده: آسیب های منجر به فوت هستند که بدون تعلل و تأخیر باید گزارش شوند.

با توجه به اینکه در بیشتر مواقع، دو دسته ی آسیب های اساسی و تلفات، سبب پیامدهای ناگوار و وارد شدن خسارات جانی و مالی بالا به ذی‌نفعانی همچون کارفرمایان و کارگران می شود، در این مطالعه از حوادثی که منجر به آسیب های جزئی و آسیب های بیش از سه روز می گردند، صرف‌نظر و به حوادث منجر به آسیب های اساسی و تلفات پرداخته شده است. بنابراین، منظور از آسیب، آسیب اساسی و منظور از حادثه، آن دسته از حوادثی است که در نتیجه ی وقوع آن، وارد آمدن آسیب اساسی به کارگر شود و یا مرگ وی انتظار برود.

لازم به ذکر است، به آن علت که تعداد مرگ ومیرها توسط سازمانهای مختلف ثبت می شوند و قابل چشم پوشی نیستند، میتوان انتظار داشت که آمارهای مربوط به مرگ ومیر به درستی و با دقت قابل قبولی مطرح گردند. اما درباره‌ی گزارش‌های مرتبط با نرخ و شدت آسیب ها و جراحات غیر مرگبار که طبق قانون باید ثبت شوند، دلایل بسیاری برای غیر دقیق بودن و عدم گزارشده ی کامل آنها وجود دارد؛ که از جمله‌ی این دلایل می توان عدم تطابق و شناخت کامل شرکتها از روند گزارش، عدم تمایل به افشای اسرار شرکت، رشد تعداد پیمانکاران جزء و همچنین استفاده‌ی آنان از کارگران خوداشتغال را نام برد. همچنین برخی از کارگرانی که دچار آسیبی شده اند که منجر به استراحت و ترک کارشان به مدت بیشتر از سه روز شده است، غالباً به دلایل مختلفی کار خود را با انجام فعالیت های سبکتر ادامه می دهند؛ که این امر سبب گزارشده ی نادرست از نرخ آسیب و جراحات می‌شود. در نتیجه، نادرستیِ آماری که از گزارش‌ها به دست می آید در مقایسه با نرخ واقعی وقوع حوادث در صنعت، امری کاملاً محتمل است [۳۰].

۲- ۳- حوادث و ریسکهای موجود در صنعت ساخت دنیا و کشور

۲- ۳- ۱- آمار حوادث صنعت ساخت

با نگاه به آمار حوادث ثبت شده در دنیا و مطالعات و نتایج آنها، می توان ریسک هایی را که دو مؤلفه‌ی احتمال وقوع بالا و شدت اثر بالایی دارند، با عنوان مهمترین ریسک های موجود در صنعت ساخت به شرحی که در

1 Concept Safety Review (CSR)
2 Concept Hazard Analysis (CHA)
3 Fault Tree Analysis (FTA)
4 Cause-Consequence Analysis (CCA)
5 Hazard Identification (HAZID)

جدول ۱. حوادث منجر به آسیب و تلفات در صنعت ساخت

Table 1. Construction Industry' Accidents which Lead to Injuries and Fatalities

۱	سقوط از ارتفاع *	۶	لغزیدن، سکندری خوردن، افتادن
۲	برخورد با اجسام در حال حرکت *	۷	برخورد با تجهیزات *
۳	برخورد با ماشین‌آلات در حال حرکت *	۸	برخورد با اجسام ثابت
۴	برق گرفتگی *	۹	مالیده یا سائیده شدن
۵	گیر افتادن در اثر فروریختن/واژگونی *	۱۰	آتش‌سوزی و انفجار

* : موارد ستاره‌دار حوادث رایج منجر به آسیب و تلفات در صنعت ساخت داخل کشور هستند.

جدول ۱ آمده است، نام برد [۱۲, ۳۱]. همچنین طبق آمار غیررسمی حوادث صنعت داخل کشور، موارد ستاره دار جدول ۱، نشان دهنده رایج ترین حوادث در صنعت ساخت داخل کشور طی سالهای ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ هستند.

۲- ۳- ۲- علل وقوع حوادث

جلوگیری از وقوع حوادث، تنها با فهم درست از عواملی که نقش کلیدی در وقوع حوادث دارند، ممکن است [۱۵]. به همین علت، بسیاری از محققان تلاش کردهاند که علل وقوع حوادث را در طیف گسترده ای، از سطوح فردی گرفته تا سطوح سازمانی، شناسایی و بررسی کنند، که از جمله ی آنها میتوان به این موارد اشاره نمود: خطاهای انسانی[۱] و فقدان آموزشهای ایمنی[۲] به افراد حاضر در کارگاه به عنوان یکی از مهمترین علل وقوع حوادث [۳۲]، رفتار ناایمن[۳] و شرایط ناایمن[۴] به عنوان یکی از ریشه ای ترین علل وقوع حوادث [۱]، برنامه ریزی های ضعیف[۵]، نقض قوانین، خطراتِ پنهان ایجاد شده توسط دیگران و همچنین ناتوانی و عدم کفایت کارگران برای انجام فعالیت های کاری [۳۳]، سرپرستی و نظارت ضعیف بر فعالیت های اجرایی [۳۴] و سایر موارد. همچنین طبق آمار غیررسمی، عدم آموزش و عدم نظارت صحیح بر کارگاه های اجرایی، مهمترین علل وقوع حوادث در کشور بوده است.

۲- ۳- ۳- مدلسازی های وقوع حوادث

از آنجا که نیاز به ایمنی یک نیاز پایه ای فیزیکی و روانی برای انسان است [۳۵]، از این رو، محققان بسیاری تلاش برای ارائه مدلها و تئوری های مختلف در جهت مدلسازی منشاء وقوع حوادث کرده اند. دو مورد از تئوریهای شناخته شده و پر کاربرد، "تئوری دومینو[۶]" و "مدل پنیر سوئیسی[۷]" هستند که در ادامه شرح داده شده اند. همچنین از دیگر مدلسازی ها می توان به تئوری علّیت چندگانه[۸] [۳۶]، مدلهای رفتاری[۹]، رویکرد عوامل انسانی[۱۰]، تئوری فرل[۱۱]، مدل علّیت باخت اصلاح شده[۱۲] و سایر موارد اشاره نمود.

- تئوری دومینو: تئوری دومینو، وقوع حوادث را تنها به عنوان یکی از پنج عامل متوالی منجر به آسیب، جراحت و یا مرگومیر میپندارد [۳۷]. تئوری دومینو، نژاد و محیط اجتماعیِ فرد را زادگاه و بستر آموختن مهارتهای وی می پندارد و در نتیجه، خطاهای فردی و بی دقتی را ناشی از نژاد و محیط اجتماعی وی در نظر می گیرد. در ادامه، خطاهای فردی و بی دقتی که ریشه در فرهنگ وی دارد و در ناخودآگاه فرد جای گرفته است، منجر به بروز رفتار ناایمن یا ایجاد شرایط غیرایمن، می گردد که نهایتاً این رفتار یا شرایط ناایمن، می تواند به وقوع حادثه ختم گردد و نتیجه حادثه آسیب، جراحات و حتی مرگ ومیر باشد. همانند آنچه که در چیدمان دومینوها در واقعیت صورت می پذیرد، حذف هریک از دومینوها می تواند سبب توقف زنجیره وقوع آسیب شود.
- مدل پنیر سوئیسی: مدل "پنیر سوئیسی" از دیگر مدلسازی های علل وقوع حوادث است که در تجزیه و تحلیل ریسک، مدیریت ریسکِ ایمنیِ حمل ونقل، مهندسی، پزشکی و همچنین سیستم های امنیتیِ لای

1 Human Errors
2 Lack of Safety Training
3 Unsafe Acts
4 Unsafe Conditions
5 Ill Planning

6 Domino's Theory
7 Swiss Cheese Theory
8 Multiple Causation Theory
9 Behavior Model
10 Human Factor Approach
11 Ferrel Theory
12 Modified Loss Causation Model (MLCM)

های استفاده می شود. این مدلسازی، سیستم های انسانی را به چند تکه پنیر سوئیسی، که کنار هم قرار گرفته اند، تشبیه می کند که در هر لایه ضعف ها به سوراخهای روی پنیر می مانند؛ در نتیجه، تهدیدی که در حال واقعیت یافتن است، توسط لایه های پی در پی که قدرت های دفاعی متفاوتی از لحاظ ماهیتی دارند، کاهش می یابد [۳۸]؛ این مدل بروز حادثه را ناشی از ضعف در تمامی سطوح می داند چرا که در صورت عدم وجود ضعف در حتی یک لایه، می توان بروز حوادث را متوقف کرد.

۲- ۴- عوامل تأثیرگذار بر ایمنی

در تحقیقات پیشین در زمینه ایمنی ساخت و ساز، عوامل و اقدامات مختلف ایمنی در سطوح مختلف ارائه شده اند که می توانند بر عملکرد ایمنی یا میزان ایمنی تأثیر بگذارند. به عنوان مثال، در تحقیقات بسیاری وجود ارتباط مثبت تیم و پرسنل ایمنی پروژه با سطح ایمنی پروژه و یا دیگر عوامل مؤثر بر آن، مورد تائید قرار گرفته است [۱۶, ۱۷, ۳۴, ۳۹, ۴۰]. همچنین طبق تحقیقی که در سال ۱۹۸۱ توسط انجمن ایمنی نبراسکا[1] صورت پذیرفته است، پروژه هایی که اعضای متخصصی به بخش ایمنی اختصاص نداده اند، ۶۴٪ بیشتر دچار حادثه شده اند [۳۱]. صنعت ساخت به عنوان یک صنعت با ریسک بالا ارزیابی می شود؛ بنابراین، ارزیابی ریسک برای دستیابی به سطح ایمنی مناسب، امری ضروری است [۴۱]. همچنین، ارزیابی خطر را می توان به عنوان یک عامل پیش بینی کننده (متغیر مستقل) در نظر گرفت که می تواند بر میزان ایمنی پروژه تأثیر بگذارد [۱۷]. همچنین بازرسی های محل کار که توسط پرسنل ایمنی انجام می شود می تواند نقش بسزایی در ارزیابی خطر داشته باشد [۲۲]. دسترسی های مناسب، راههای عبور، مسیرهای ترافیکی، دسترسی های مناسب به بلندیها و ارتفاعات و همچنین داربست های ایمن، از جمله ویژگیهای یک مکان امن است [۴۰]. به همین ترتیب، طراحی، ساخت و اجرای صحیح داربست، حفاظت لبه ها و پرتگاه ها، پوشش مناسب و حفاظت صحیح از بازشوها به عنوان مهمترین عوامل تأثیرگذار بر خطر سقوط تعیین شده اند [۴۲]. عناصر کار ایمن شامل سیستم اجازه کار[2] برای فعالیتهای خاص نظیر کار در ارتفاع، استفاده و اطمینان از سلامت تجهیزات ایمنی و تجهیزات حفاظتی شخصی[3]، و پرهیز از فشار کاری، توسط بسیاری از محققین به عنوان عوامل تأثیرگذار بر ایمنی معرفی شده اند [۷, ۱۷, ۳۴, ۴۳]. آموزش های ایمنی در بسیاری از تحقیقات به عنوان یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر ایمنی معرفی شده اند [۳۲, ۴۳]. نشان داده شده است که فقدان آموزش مناسب می تواند یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار در راستای کاهش عملکرد ایمنی باشد [۴۴]. تعمیر، نگهداری و همچنین استفاده مناسب از ابزار، تجهیزات و ماشینآلات یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر ایمنی پروژه ها است [۱۴] و میتواند برای ارزیابی سطح ایمنی در پروژه های ساختمانی استفاده شود [۱۷]. در برخی از سیستم های قراردادی تحویل پروژه نظیر سیستم سه عاملی، کارفرمایان تصمیم به واگذاری تمامی یا بخشی از کار به افراد متخصص دیگر می گیرند؛ بدین گونه اجرای بخشی از پروژه و یا تمامی آن، به پیمانکار عمومی[4] و یا پیمانکاران جزء[5] واگذار می گردد. به همین علت، سطح ایمنی فعالیت پیمانکاران میتواند مستقیماً بر سطح ایمنی پروژه تأثیرگذار باشد؛ از این رو بسیاری تحقیقات از تأثیر نقش پیمانکاران بر سطح ایمنی پروژه یاد کرده اند [۴۵-۴۷]. مطالعات متعددی تلاش برای اثبات رابطه مستقیم بین سیستم نظارتی و متغیرهای مرتبط با ایمنی بوده اند و سیستم نظارت را به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار ایمنی شناخته اند [۴۸]؛ همچنین تأثیر مستقیم رفتار ایمنی ناظران و سرپرستان بر رفتار ایمنی کارگران و همکاران، امری ثابت شده است [۴۹]. خطرات محیطی بسیاری در محیطهای کارگاهی می توانند منجر به بروز حوادث گردند؛ از جملهی این خطرات می توان به حضور مواد شیمیایی و آلاینده، نزدیکی به خطوط انتقال برق هوایی یا زمینی، راههای دسترسی سخت به برخی کارگاه های ساختمانی، کار در شرایط نامطلوب به دلیل حضور سر و صدای فراوان، نور ناکافی و یا کار در حضور بادهای شدید و غیره اشاره کرد [۵۰].

علل و عوامل مؤثر بسیاری برای وقوع حادثه وجود دارد که میتوانند برای ارزیابی سطح نهایی ایمنی پروژه مورد استفاده قرار گیرند [۵۱]. این عوامل تأثیرگذار بر ایمنی بسیار متنوع هستند و در سطوح متفاوتی طبقه بندی می شوند. با این وجود، یک روش یکپارچه برای انتخاب این عوامل در دسترس نیست. بنابراین، انتخاب بین آنها کاری دشوار است.

۳- روش شناسی

برای دستیابی به اهداف پژوهش، نخست حوادثی که باعث آسیب جدی به کارگران می شوند، با مطالعه آمار غیررسمی حوادث کشور، شناسایی شده اند؛ از آنجایی که میزان حضور و یا همچنین احتمال وقوع این دسته از ریسکها به عنوان معیار تعیین سطح ایمنی در پژوهش حاضر به کار گرفته

1 Nebraska Safety Council
2 Working Permit System
3 Personal Protective Equipments (PPE)
4 General Contractors
5 Subcontractors

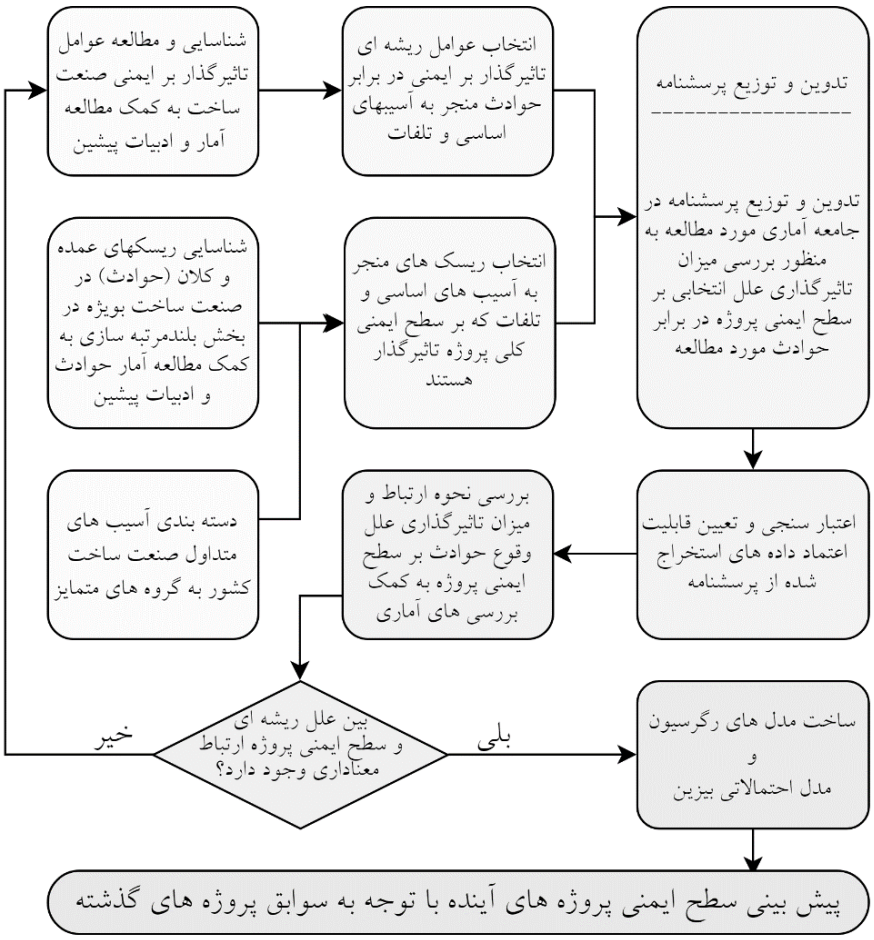


Fig. 1. Flowchart of Research Methodology

شکل ۱. نمودار جریان کار روش شناسی تحقیق

شده است، تعداد زیاد وقوع این حوادث و یا احتمال زیاد به وقوع پیوستن آنها در یک پروژه، نشان‌دهنده سطح ایمنی پایین پروژه است و بالعکس. در گام بعد، عواملی که تأثیرگذار بر سطح ایمنی پروژه ها هستند، از طریق مرور ادبیات و با نگاهی به آمار غیر رسمی حوادث کشور شناسایی و انتخاب شده است. در گام بعدی، اطلاعات ۹۵ پروژهی بلندمرتبه به کمک پرسشنامه جمعآوری و این اطلاعات وارد مدلهای بیزین و رگرسیون شده و به منظور یافتن رابطه ی بین عوامل تأثیرگذار بر ایمنی و سطح ایمنی، مورد پردازش گرفته اند. روند کلی پژوهش را می توان مطابق نمودار جریانکار[1] شکل ۱ خلاصه نمود.

۳- ۱- انتخاب عوامل تأثیرگذار بر ایمنی

همان‌طور که در مروری بر ادبیات پیشین ذکر شد، مطالعات زیادی در زمینه شناسایی عوامل تأثیرگذار بر سطح ایمنی پروژه صورت گرفته است که با توجه به پیشینه موضوع می توان دریافت که این عوامل در هر کشور با کشور دیگر متفاوت و مطابق با ویژگیهای صنعت ساخت آن کشور است. به همین جهت، نیاز به بررسی بومی این عوامل و میزان تأثیر هر یک از آنها بر عوامل تعیین کننده ی سطح ایمنی پروژه، در صنعت ساخت هر منطقه و یا کشور، امری بسیار ضروری و غیرقابل اجتناب است. با توجه به موارد ذکر شده و همچنین با در نظر گرفتن اهداف این تحقیق، شش عامل تأثیرگذار

1 Flowchart

بر ایمنی[1] صنعت ساخت کشور، بر پایه ی مطالعه و مرور ادبیات پیشین و همچنین نگاهی به آمار غیررسمی حوادث کشور، به عنوان مهمترین و تأثیرگذارترین عوامل شناسایی و انتخاب شده اند.

- **بازرسی های ایمنی، فرآیندهای ارزیابی خطر و ریسک ایمنی (SIF_1):** بسیاری از خطرات را می توان قبل یا حتی در حین وقوع شناسایی و در نتیجه به کمک اقدامات ایمنی از آسیبهای متعاقب آنها جلوگیری کرد. حضور افراد با تجربه تر و واجد الشرایط در طول این فرآیند، سطح این عامل را بهبود می بخشد. همچنین چک لیستهای از پیش تعیین شده می تواند کارایی این عامل را بسیار افزایش دهد [۵۲].
- **اجرای قوانین و مقرّرات ایمنی مربوط به وسایل دسترسی، داربست ها و سازه های حفاظتی (SIF_2):** این عامل نقش بسیار حیاتی در برابر سقوط و برخورد اشیاء با افراد بازی میکند. این عامل، وجود و کارایی داربست و تجهیزات دسترسی (مانند پلتفرمها، پل ها و پله های برجی) و سازه های محافظتی (حفاظهای بازشوها و لبه، شبکه های ایمنی نگهدارنده، خطوط هشدار و نرده های محافظ) را اندازه می گیرد و می سنجد.
- **فرآیند ایمن انجام کار (SIF_3):** بر پایه ادبیات پیشین، فرآیند ایمن انجام کار به صورتی تعریف شده است که سطح ایمنی فعالیتهای پروژه را نشان دهد که وابسته به عواملی چون سرعت اجرای فعالیت های پروژه (میزان اجتناب از فشار کاری)، میزان استفاده از تجهیزات حفاظت فردی توسط کارگران، سلامت و شرایط نگهداری تجهیزات حفاظت فردی، نیاز به اخذ اجازه برای انجام فعالیت های خاص در سایتها و غیره است. به طور کلی، این عامل تلاش می کند تا سطح ایمنی فرایند اجرای فعالیتها را اندازه گیری کند.
- **آموزش ایمنی (SIF_4):** این عامل بیانگر سطح آموزش ایمنی در یک پروژه است و به انواع مختلف آموزش ایمنی نظیر جلسه های ایمنی جعبه ابزاری[2]، کارگاه های ایمنی و آموزش های دورهای با توجه به پیشرفت پروژه اشاره دارد. سطح این عامل نشان می دهد که به چه مقدار کارکنان برای واکنش به شرایط خطرناک آموزش دیده اند. کاهش خطر وقوع حوادث با ایجاد آگاهی از خطرات موجود در سایت و آموزش چگونگی مقابله با آنها امری امکانپذیر است. ارتباط مستقیم بین آموزش کارگران و سطح ایمنی کلی پروژه در بسیاری از مطالعات مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.
- **نگهداری و تعمیرات ابزار و ماشین آلات (SIF_5):** پروژه های ساخت شامل ابزارهای مختلف، تجهیزات و انواع ماشین آلات متنوعی است که به علت استفاده در شرایط کاری دشوار، نیازمند نگهداری صحیح و تعمیرات به موقع هستند. نگهداری مناسب و تعمیرات به موقع می تواند از به وقوع پیوستن حوادث ناشی از نقص فنی ابزارها، تجهیزات و ماشین آلات جلوگیری کند. به عنوان مثال، رفع عیب به موقع سیم برق آسیبدیده دستگاه جوشکاری میتواند از سوختگی، سقوط از ارتفاع و دیگر حوادث ناشی از شوک الکتریکی جلوگیری کند.
- **نظارت و سرپرستی بر ایمنی پروسه های کاری (SIF_6):** از آنجایی که عمده ی کارگران ساختمانی در ایران کارگر غیر متخصص هستند، نظارت بر خطرناکترین فعالیتها نظیر حفاری، باربرداری، انتقال، مونتاژ و قالب بندی امری بسیار ضروری است و می تواند سطح ایمنی پروژه را افزایش چشمگیری دهد.

۳- ۲- جمع آوری داده

پس از شناسایی عوامل مؤثر بر سطح ایمنی پروژه، در جهت نیلِ به اهداف پژوهش و در راستای انجام مطالعات میدانی و به منظور شناسایی میزان تأثیرگذاری و اهمیت نسبی این عوامل، پرسشنامه ای شامل دو بخش: ۱) ارزیابی سطح عوامل معرفی شده به منظور تعیین میزان اثرگذاری هر یک از عوامل بر سطح ایمنی به همراه معرفی شاخصه های انتخابی برای هر یک از عوامل، و ۲) ارزیابی سطح ایمنی پروژه در برابر حوادث مختلف، تهیه گردیده است و در بین متخصصین صنعت ساخت که حرفهای مرتبط با اهداف پژوهش حاضر دارند و به نوعی با یک یا چند پروژهی بلندمرتبه درگیر بوده اند، ارسال شده است. از پاسخ دهندگان خواسته شده که با در نظر گرفتن یک پروژه بلندمرتبه که نسبت به آن از اشراف نسبی برخوردارند، پرسشنامه تکمیل گردد.

ارزیابی سطح SIFها و PSL امری بسیار پیچیده و مبهم است و تحت شرایط غیرقطعی صورت می پذیرد؛ در نتیجهی این شرایط پیچیده و مبهم، استفاده از اصطلاحات کیفی و زبانی غیر قابل اجتناب است [۵۳]. بنابراین برای ارزیابی سطوح SIFها و PSL از مقیاس لیکرت[3] شش نقطه ای بهره گرفته شده است. در مطالعات پیشین نشان داده شده است که مقیاس لیکرت شش نقطه ای دارای قابلیت اطمینان و قدرت تمایز بیشتری نسبت به مقیاس لیکرت پنج نقطه ای است [۵۴]. این مقیاس برای SIFها به شرح (۱ =

1 Safety Influential Factor
2 Safety Toolbox Meeting
3 Likert Scale

بسیار ضعیف، ۲ = ضعیف، ۳ = متوسط کم، ۴ = متوسط بالا، ۵ = قوی و ۶ = بسیار قوی) و برای PSL به شرح (۱ = ایمنی بسیار کم، ۲ = ایمنی کم، ۳ = ایمنی متوسط کم، ۴ = ایمنی متوسط بالا، ۵ = ایمنی بالا و ۶ = ایمنی بسیار بالا) است. هر یک از SIFها را می توان طی چندین مرحله به بخش های کوچکتر تقسیم نمود؛ که این امر سبب وضوح بیشتر هر یک از این عوامل می شود و همچنین تصمیم گیری در مورد هر عامل را آسانتر می کند؛ ریزتر شدن در عوامل هر موضوع، می تواند دید روشنتری نسبت به آن موضوع به افراد بدهد. در نتیجه سطح هر SIF با توجه به عوامل تشکیل‌دهنده آن ارزیابی می شود. همچنین در پژوهش حاضر، میزان حضور و یا همچنین احتمال وقوع آن دسته از ریسک ها که سبب وارد آمدن آسیب های اساسی و تلفات می شوند، به عنوان معیار تعیین سطح ایمنی پروژه به کار گرفته شده است. در بالاترین سطح ایمنی پروژه که همان سطح ششم معادل با ایمنی بسیار بالا است، احتمال وقوع حوادث منجر به آسیب های اساسی و تلفات کشنده وجود ندارد و تنها آسیب های جزیی و بیش از سه روز افراد حاضر در سایت را تهدید می کنند. در سطح پنجم آسیب های اساسی نیز می تواند سلامت افراد را مورد تهدید قرار دهد. در سطح متوسط کم و زیاد فراوانی حوادث منجر به آسیب های اساسی زیاد و همچنین احتمال وقوع حادثه منجر به مرگ بسیار زیاد است. همچنین سطح دوم و اول ایمنی پروژه به ترتیب به پروژه هایی اختصاص میابد که وقوع یک حادثه و چندین حادثه منجر به مرگ در آنها انتظار می رود.

برای اطلاع از حداقل تعداد نمونه جامعه آماری که به نتایج تحلیل پرسشنامه ها اعتماد ببخشد، کوکران[1] استفاده از رابطه (۱) را پیشنهاد داده است [۵۵] که در آن n = حجم نمونه مورد نیاز، N = اندازه جامعه آماری، t = ضریب سطح ریسک پذیرفته شده توسط پژوهشگر، s = انحراف استاندارد جامعه و d = خطای مجاز پاسخها است.

$$n=\frac{\frac{t^2\times s^2}{d^2}}{1+\frac{1}{N}\left(\frac{t^2\times s^2}{d^2}\right)} \qquad (۱)$$

برای بدست آوردن حجم نمونه مورد نیاز پژوهش حاضر یا همان n، سطح اطمینان مورد قبول پژوهش، ٪۹۵ در نظر گرفته شده است؛ با توجه به این سطح اطمینان، از جدول توزیع نرمال مقدار t=۱/۹۶ است. همچنین در پژوهش های قبل، مقدار انحراف استاندارد را برای جوامعی که این مقدار در آنها معین نیست و همچنین در ادبیات این جوامع مورد بررسی قرار نگرفته است، برای مقیاس لیکرت شش نقطهای، s=۰/۱۶۷ پیشنهاد شده است [۵۶]. خطای مجاز پاسخها برای مقیاس لیکرت شش نقطهای ٪۲ در نظر گرفته می شود، که این مقدار خطای مجاز معادل با d=۰/۱۲ است. همچنین در این تحقیق با توجه به تعداد اعضای جامعه آماری بالا که شامل تمامی پروژه های بلند مرتبه ی کشور می گردد، N، عددی بزرگ و برابر با بینهایت در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه رابطه (۱) به فرم رابطه (۲) درمی آید که با قرار دادن مقادیر انتخابی، حجم نمونه مورد نیاز برابر با ۶۷ مورد می گردد.

$$n\approx\frac{t^2\times s^2}{d^2}=\frac{1/96^2\times 0.05^2}{0.12^2}\approx 67 \qquad (۲)$$

در این پژوهش، پس از توزیع و جمع آوری پرسشنامه ها، ۹۵ پرسشنامه کامل و دارای صحت ارزیابی شده اند که با توجه به روابط فوق، شرایط جامعه آماری مورد نیاز پژوهش را فراهم ساخته اند. این اطلاعات مربوط به پروژه های بلندمرتبه (۱۸ تا ۲۶ طبقه) واقع در شهر تهران و جزیره زیبای کیش، طی سالهای ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ است که توسط سرپرست های اجرایی (فراوانی نسبی = ٪۳۵)، ناظران (فراوانی نسبی = ٪۲۸)، پرسنل ایمنی (فراوانی نسبی = ٪۱۷)، مدیرهای کارگاه (فراوانی نسبی = ٪۱۰) و مدیران پروژه (فراوانی نسبی = ٪۱۰) با سابقه حداقل ده سال کار مرتبط، تکمیل گشتهاند. اطلاعات مربوط به ۸۱ پروژه، به صورت تصادفی برای ایجاد مدلها مورد استفاده قرار گرفته و از اطلاعات ۱۴ پروژه دیگر برای ارزیابی مدلهای ساخته شده، بهره گرفته شده است.

جدول ۲ معیارهای آماری مربوط به داده های جمع آوری شده را نشان می دهد. مطابق این جدول، SIF۱ میانگینی بالاتر از سطح متوسط بالا (μ = ۴/۲۷) و همچنین واریانس متوسط (σ۲ = ۰/۸۰۱) دارد. همچنین، SIF۲ دارای کمترین میانگین (پایینتر از سطح متوسط بالا، μ = ۳/۹۸) است؛ این بدان معنی است که اکثریت پروژه ها، داربست، تجهیزات دسترسی و ساختارهای محافظتی را به خوبی اجرا نکرده اند. بر اساس مصاحبه های انجام شده در طول فرآیند تکمیل پرسشنامه ها، به دلیل هزینه های اجرایی بالای SIF۲، پروژه ها حداقل سطوح SIF۲ را بر اساس قوانین و مقررات انتخاب می کنند. بالاترین واریانس که مربوط به SIF۳ است (σ۲ = ۱/۳۵۹) نشان می دهد که پروژه ها ممکن است سطح مشخصی را به عنوان هدف از

1 Cochran

جدول ۲. معیارهای آماری داده های ایمنی جمع آوری شده

Table 2. Descriptive Statistics of Selected Safety Data

عامل	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	پایین‌ترین سطح	بالاترین سطح
SIF_1	۴/۲۷	۰/۸۹۵	۰/۲۰۹۶	۲	۶
SIF_2	۳/۹۸	۱/۰۲۴	۰/۲۵۷۳	۲	۶
SIF_3	۴/۲۰	۱/۱۶۶	۰/۲۷۷۶	۱	۶
SIF_4	۴/۲۷	۰/۷۰۷	۰/۱۶۵۶	۳	۶
SIF_5	۴/۱۵	۱/۰۱۴	۰/۲۴۴۳	۲	۶
SIF_6	۴/۰۴	۰/۹۴۱	۰/۲۳۲۹	۱	۶
PSL	۴/۲۱	۰/۸۳۲	۰/۱۹۷۶	۲	۶

پیش تعیین شده برای روند ایمن انجام کار معین نکرده و میزان ایمن بودن فرآیندهای انجام کار را کنترل نکنند. همچنین بالاترین میانگین (۴/۲۷ = μ) و پایین ترین واریانس (۰/۵۰۰ = σ^2) برای SIF_4، میتواند به این معنی باشد که پروژه های این تحقیق، کارایی و اهمیت آموزش را در نظر گرفته اند و تلاش کرده اند تا بالاترین سطح SIF_4 را برای بهبود PSL انتخاب کنند. از طرفی، SIF_5 به طور میانگین دارای سطحی بیش از سطح متوسط بالا (۴/۲۷ = μ) و واریانس نسبتاً بالایی (۱/۰۲۸ = σ^2) است. میانگین سطح SIF_6 نیز نزدیک به متوسط بالا (۴/۰۴ = μ) است. همچنین PSL در پروژه هایی که مورد مطالعه قرار گرفته اند دارای واریانسی در گسترهی متوسط (۰/۶۹۲ = σ^2) است و دارای میانگینی بیش از حد ایمنی متوسط زیاد (۴/۲۱ = μ) است.

۳- ۳- مدل رگرسیون خطی چندگانه

آنالیزهای رگرسیونی از کارآمدترین مدلسازی ها برای پیشبینی متغیرهای وابسته هستند. جدول ۳ برخی از مطالعات قبلی را نشان می دهد که از تحلیل رگرسیون در حیطه ی ایمنی استفاده کرده اند. یکی از انواع مدلسازی های رگرسیونی، رگرسیون خطی چندگانه[1] است که بررسی رابطه ی یک متغیر وابسته را به کمک متغیرهای مستقل فراهم می سازد. در این تحقیق، یک مدل MLR با استفاده از داده های استخراج شده ی یک بررسی میدانی، برای پیش بینی PLS بر اساس اطلاعات پروژه های گذشته ایجاد شده است که در ادامه به شرح کامل آن پرداخته شده است.

۳- ۳- ۱- شرح رگرسیون خطی چندگانه

در مدلهای MLR، چند متغیر مستقل، در تلاشند تا مقادیر متغیر وابسته را تعیین کنند. فرم کلی این مدل در رابطه (۳) نشان داده شده است که در آن، β_1، β_2، ...، و β_k = ضرایب رگرسیون، x_1، x_2، ...، و x_k = متغیرهای مستقل، ε = خطای تصادفی (میانگین ε صفر است)، و y = متغیر وابسته است. در مطالعه حاضر، SIFها متغیرهای پیشبینی کننده و PSL متغیر هدف (متغیر وابسته) است.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x1 + \beta_2 \times x2 + \ldots \beta_n \times x_n + \varepsilon \qquad (۳)$$

به هنگام وارد کردن متغیرهای x_1، x_2، ...، و x_k به مدل رگرسیون، می توان از چندین روش مختلف استفاده کرد که عبارتند از: ۱) روش همزمان، ۲) روش گامبهگام، ۳) روش حذف، ۴) روش پسرونده و ۵) روش پیش رونده. لازم به ذکر است نتایج این روشها میتواند متفاوت باشد. روش مورد استفاده این تحقیق، روش گام به گام است که از روشهای انتخاب مدل به صورت خودکار هستند که در آنها الگوریتم رایانه، مدل ارجح را تعیین میکند. روش رگرسیون گام به گام ایده های دو روش پیشرونده و پسرونده را با یکدیگر ترکیب میکند. در این روش، ابتدا متغیری که بیشترین میزان β و همبستگی با متغیر وابسته را دارد، به صورت مستقل شناسایی می شود. در گام بعدی متغیر جدید با الحاق متغیر قبلی، وارد مدل می شود. در گام سوم، متغیر جدید (منظور متغیر سوم است) با الحاق متغیر اول و دوم وارد مدل می شود و متغیرهایی که از سطح معنی داری برخوردار نباشند از مدل حذف می گردند.

1 Multiple Linear Regression (MLR)

جدول ۳. استفاده از تحلیل رگرسیون برای پیش بینی پاسخ بر اساس متغیرهای مستقل

Table 3. Previous Studies Using the Regression Analysis to Predict Responses based on the Predictor Variables

تحقیق	روش و تکنیک تحلیل	متغیر وابسته	متغیرهای مستقل
[۵۷]	رگرسیون خطی چندگانه	احتمال خطر در کارگاه	نرخ مشاهدات رفتار ایمن، نرخ کارگران جدیدالورود، سن کارگران، نرخ حوادث قریب‌الوقوع
[۵۸]	تجزیه و تحلیل همبستگی دو جانبه[۱] و رگرسیون	هزینه‌های ناشی از حوادث	ابعاد سازمان، ابعاد پروژه، شاخص خطر پروژه، پیچیدگی مدیریت پروژه، میزان مشارکت و درگیری پیمانکاران جز، نرخ وقوع حوادث
[۵۹]	تجزیه و تحلیل رگرسیون سلسله مراتبی[۲]	رفتار ایمن[۳]	جو ایمنی حاکم، رفتارهای ایمنی پیشین
[۶۰]	رگرسیون خطی چندگانه	رفتار ایمن	آموزش‌های ایمنی
[۴۹]	رگرسیون خطی چندگانه	جو ایمنی حاکم[۴]	واکنش‌های ایمنی سازمان، سرپرستان، همکاران و کارگران، ریسک‌های شناسایی شده
[۶۱]	رویکرد سیستماتیک (استفاده از رگرسیون خطی)	عملکرد ایمنی	جو ایمنی حاکم، فرهنگ ایمنی حاکم، تمایلات ایمنی، رفتار ایمن
[۶۲]	رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی[۵]	رفتار ایمن	تمایل افراد به رفتار ایمن، کنترل رفتار ایمنی افراد
[۱۶]	رگرسیون خطی چندگانه	جو ایمنی حاکم	تعهد مدیریت و میزان مشارکت کارکنان، روند ناایمن و نامناسب اجرای فعالیت‌ها

[۱] Bivariate Correlation

[۲] Hierarchical Regression Analysis

[۳] Safety Behavior

[۴] Safety Climate

[۵] Neural Network (NN)

گام های بعدی به همین ترتیب تا دست‌یابی به خطای پنج درصد ادامه پیدا می کند. همچنین P-value = ۰/۵ به عنوان معیار انتخاب برای رسیدن به این هدف و ضریب تعیین[۱] (R^2) به عنوان معیاری برای انتخاب بهترین مدل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مقدار معینی به عنوان مرز قابل قبول برای مقدار R^2 تعریف نشده است [۶۳]؛ به همین دلیل مقدار R^2 قابل قبول در پژوهش های مختلف، متفاوت است و بستگی به حیطه فعالیت دارد.

۳- ۳- ۲- ساخت رگرسیون خطی چندگانه

نمودار فرآیند کار ساخت مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ساخت مدل تحقیق، از نرم افزار SPSS استفاده شده است.

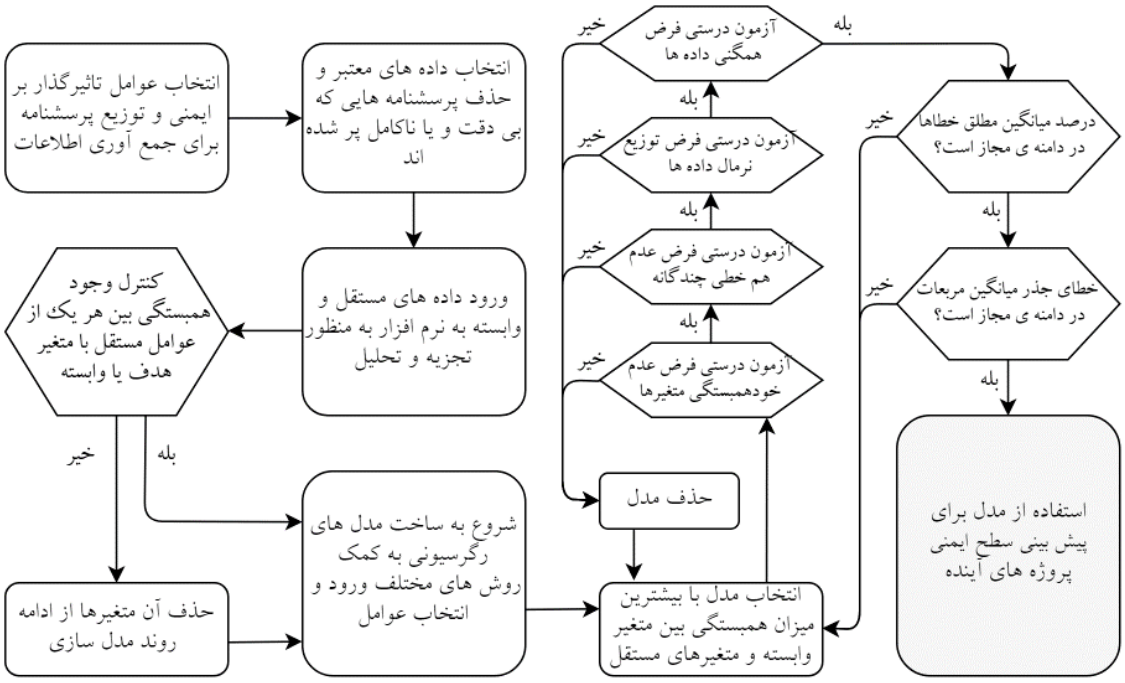
برای توسعه مدل MLR ابتدا رابطه ی خطی بین هر یک از SIFها و PSL با استفاده از رگرسیون خطی ساده[۲] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی شامل ضرایب رگرسیون، ضریب تعیین و معناداری آماری[۳] برای هر SIF در جدول ۴ نشان داده شده است. تمامی SIFهای مورد استفاده در پژوهش حاضر بر اساس تحقیقات میدانی انجام شده، رابطه خطی مستقیم با PSL ($\beta > ۰$ و Sig. $< ۰/۰۵$) دارند. بنابراین، به دلیل وجود رابطه ی خطی بین هر یک از SIFها و PSL، همه آنها به عنوان پیشبینی کننده های PSL در MLR مورد استفاده قرار گرفته اند.

سپس، بر اساس روش گام به گام، چهار مدل MLR با معناداری کمتر از ۰/۰۵ توسعه یافته است. با توجه به نتایج SLR که در جدول ۴ نشان داده شده است، SIF ۳ همبستگی مثبت و بیشترین معناداری (حداکثر R) را با PSL دارد. در نتیجه، SIF ۳ به عنوان اولین عامل وارد شده به MLR

1 Coefficient of Determination (R^2)

2 Single Linear Regression (SLR)

3 Significance Coefficient (P)



شکل ۲. نمودار فرآیند کار ساخت مدل رگرسیون خطی چندگانه

Fig. 2. Flowchart of Multiple Linear Regression Model Creation

جدول ۴. ضرایب رگرسیون خطی SIFها در پیش بینی PSL

Table 4. The SIFs' Linear Regression Coefficients

SIF	ضرایب رگرسیون (B)	ضرایب همبستگی (R)	ضرایب تعیین (R^2)	معناداری آماری (P)
SIF_1	۰/۲۴۰	۰/۲۵۸	۰/۰۶۷	۰/۰۲۰
SIF_2	۰/۴۲۲	۰/۵۱۹	۰/۲۶۹	۰/۰۰۰
SIF_3	۰/۴۳۷	۰/۶۱۳	۰/۳۷۶	۰/۰۰۰
SIF_4	۰/۴۸۴	۰/۴۱۲	۰/۱۷۰	۰/۰۰۰
SIF_5	۰/۲۰۰	۰/۲۴۴	۰/۰۵۹	۰/۰۲۸
SIF_6	۰/۳۸۶	۰/۴۳۷	۰/۱۹۱	۰/۰۰۰

جدول ۵. نتایج تجزیه و تحلیل آماری مدل های ساخته شده

Table 5. The Statistical Analysis Results

مدل	MLR	R	Adj. R^2	ANOVA	
				F	Sig.
۱	$PSL=2.373+0.438\times SIF_3$	۰/۶۱۳	۰/۳۶۸	۴۷/۶۴۵	۰/۰۰۰
۲	$PSL=1.186+0.407\times SIF_3+0.326\times SIF_6$	۰/۷۱۵	۰/۴۹۸	۴۰/۶۸۳	۰/۰۰۰
۳	$PSL=0.648+0.314\times SIF_3+0.319\times SIF_6+0.24\times SIF_2$	۰/۷۶۲	۰/۵۶۵	۳۵/۵۶۸	۰/۰۰۰
۴	$PSL=-0.055+0.264\times SIF_3+0.338\times SIF_6+0.216\times SIF_2+0.219\times SIF_4$	۰/۷۸۰	۰/۵۸۷	۲۹/۴۵۷	۰/۰۰۰

انتخاب شده است. در مراحل بعدی، SIF_6، SIF_2، و SIF_4 به ترتیب وارد مدل شده اند. تمام چهار متغیر وارد شده به مدل، همبستگی مثبت با PSL و P-value کمتر از ۰/۰۵ دارند. P-value متغیر بعدی با وارد شدن به چهارمین مدل بزرگتر از ۰/۰۵ می شود. جدول ۵ نتایج تجزیه و تحلیل آماری مدلها را نشان می دهد.

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری که در جدول ۵ آمده است، مدل چهارم بهترین مدل MLR (تنظیم R^2 = ۰/۵۸۷) است که میتواند PSL را پیشبینی کند، و همچنین دارای بالاترین ضریب تعیین است که نشان میدهد ٪۵۸/۷ از واریانس PSL را می توان توسط این مدل پیشبینی نمود. همچنین سطح معنی داری ارائه شده از سوی آزمون ANOVA برای مدل رگرسیونی که کمتر از ۰/۰۱ است حکایت از تایید مدل رگرسیونی دارد و نشانده ندهی آن است که متغیرهای مستقل این مدل قادر به پیشبینی تغییرات متغیر وابسته هستند.

۳- ۳- ۳- مدل نهایی

با دقت در نتایج مدلها، میتوان دریافت که مدل چهارم هیچ یک از فرضیه های ساخت مدلهای رگرسیونی را نقض نکرده است و همچنین بیشترین توان در پیشبینی سطح ایمنی پروژه را دارد؛ بنابراین، به عنوان مناسبترین مدل برای پیشبینی PSL بر پایه SIFها مبتنی بر پروژه های گذشته استفاده میشود. بر همین اساس، مدل MLR نهایی که در تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، در رابطه (۴) نمایش داده شده است که در آن، PSL = سطح ایمنی پروژه، SIF_2 = سطح ایمنی داربست و تجهیزات دسترسی، SIF_3 = سطح فرآیند ایمن انجام کار، SIF_4 = سطح آموزش ایمنی و SIF_6 = سطح سیستم نظارت است.

$$PSL=(0.216\times SIF2)+(0.264\times SIF3)+(0.219\times SIF4)+(0.338\times SIF6)-0.055 \quad (۴)$$

۳- ۳- ۴- آزمون درستی فرضیه های ساخت مدل

مدل رگرسیون بر اساس برخی مفروضاتی که باید درستی آنها تأیید شود، ایجاد میگردد. فرض اولیه وجود رابطهی خطی بین هر متغیر مستقل و متغیر وابسته قبل از ایجاد مدل، در بخش ۳-۳-۲ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مطالعات پیشین و مشابه، فرضیه ها مورد بررسی قرار گرفته اند [۵۷, ۶۳]؛ بنا بر این مطالعات، در این مطالعه سه فرضیه زیر می بایست چک شوند. نقض هر یک از این مفروضات منجر به رد مدل MLR می گردد. این مفروضات عبارتند از:

• عدم همبستگی چندگانه[1]: هم خطی چندگانه زمانی اتفاق می‌افتد که دو یا بیش از دو متغیر توضیح دهنده ی (مستقل) در یک رگرسیون چندمتغیره نسبت به یکدیگر از همبستگی بالایی برخوردار باشند. منظور از همبستگی در اینجا وجود یک ارتباط خطی بین متغیرهای مستقل است. بسته به شدت همبستگی بین متغیرهای مستقل، میزان و نوع همخطی متفاوت خواهد بود. همخطی کمابیش در همه ی مدل‌های رگرسیون وجود دارد؛ آنچه که مهم است شدت هم خطی بین متغیرهای مستقل است. عدم وجود همبستگی چندگانه زیاد بین متغیرهای مستقل از اصلی ترین فرضیات برای ایجاد یک

1 Lack of Multicollinearity

MLR است. SIFهایی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند، در ابتدا از یکدیگر مستقل فرض شده اند و یا در صورت وجود همبستگی بین هر یک از آنها، این عوامل با یکدیگر ترکیب و به عنوان یک عامل ادغام خواهند شد. عامل تورم واریانس[1] (VIF) پارامتری است که برای هر متغیر مستقل محاسبه می شود تا میزان همبستگی را با دیگر عوامل به کار رفته در مدل ارزیابی کند. VIF بیش از ۱۰ برای هر متغیر نشان می دهد که متغیرهای دیگر می توانند متغیر مورد نظر را تعریف کنند. در این بخش، VIF برای تکتک SIFها محاسبه شده است: VIFهای محاسبه شده برای SIF_3، SIF_6، SIF_2، SIF_4، به ترتیب برابر با ۱/۴۳۷، ۱/۰۳۱، ۱/۲۸۰ و ۱/۲۸۳ است. بنابراین، با توجه به مقادیر محاسبه شده، فرض همبستگی چندگانه، رد میشود و متغیرهای مستقل با یکدیگر تداخل و همبستگی ندارند.

• فرض توزیع نرمال باقیمانده ها[2]: در مدل رگرسیون خطی چندمتغیره فرض می شود که باقیمانده های استاندارد شده، توزیع نرمال استاندارد دارند. برای بررسی این فرض، از آزمون های شاپیرو – ویلک[3] و یا کلوموگروف – اسمیرنوف[4] (لیلیفورس[5]) استفاده شده است. در صورتیکه سطح معنی داری این دو آزمون، بیشتر از ۰/۰۵ باشند، نشان دهنده ی یکسان بودن توزیع فراوانی تجمعی مشاهده شده با توزیع فراوانی تجمعی مورد انتظار است و به توزیع نرمال نزدیک است و می توان از آزمونهای پارامتری استفاده کرد. مقدار P محاسبه شده در مدل نهایی، برای آزمونهای کلوموگروف – اسمیرنوف و شاپیرو – ویلک به ترتیب ۰/۲۰۰ و ۰/۲۱۹ است که درستی این فرض را در ساخت مدل نهایی تأیید می کنند.

• فرض هوواریانسی یا همگنی پراکندگی[6]: هوواریانسی یا همگنی پراکندگی، هنگامی اتفاق می افتد که واریانس باقیمانده ها بدون تغییر و ثابت بماند. زمانیکه واریانس باقیمانده ها در تمام مشاهدات ثابت نیست، گفته می شود که باقیمانده به صورت پراکندهی ناهمگن[7] است. آزمون بروش – پاگان[8] یکی از رایج ترین آزمونها برای تعیین ناهمگنی پراکندگی در تحلیل رگرسیون خطی است. در این آزمون ناهمگنی پراکندگی تابعی از یک یا چند متغیر مستقل است و با این فرض بکار برده می شود که ناهمگنی تابعی از کلیه متغیرهای مستقل موجود در مدل است. برای صحت و اطمینان از نتیجه ی این آزمون، مقدار این معیار باید کوچکتر از ۰/۰۵ باشد. از آنجاییکه مقدار P = ۰/۸۵۴۹ برای این مدل محاسبه شده است، فرض مذکور مورد قبول است و هوواریانسی در داده ها دیده نمی شود.

1 Variance Inflation Factor (VIF)
2 Normality of Residuals
3 Shapiro - Wilk
4 Kolmogorov - Smirnov
5 Lilliefors
6 Homoscedasticity
7 Heteroscedastic
8 Breusch - Pegan

۳- ۳- ۵- ارزیابی مدل ساخته شده

بسیاری از محققان درصد میانگین مطلق خطاها[9] (MAPE) را برای ارزیابی مدلهای MLR به کار برده اند [۵۷, ۶۴]. MAPE، همچنین به عنوان معیار میانگین درصد مطلق انحراف شناخته می شود که دقت پیشبینی مدل MLR را با محاسبه اختلاف بین مقادیر پیشبینی توسط مدل و مقادیر مشاهدات، اندازه گیری می کند. MAPE از طریق رابطه (۵) قابل محاسبه است که در آن، MAPE = درصد میانگین مطلق خطاها در مدل MLR، n = تعداد پروژهها، P_v = مقدار پیشبینی شده PSL توسط مدل MLR، و A_v = مقدار واقعی PSL است که براساس خطرات موجود ارزیابی شده اند.

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum\left|\frac{Pv - Av}{Av}\right| \qquad (۵)$$

با توجه به مطالعات پیشین، مقادیر به دست آمده برای MAPE را میتوان در چهار دسته زیر ارزیابی کرد [۶۳]: (۱) MAPE < ۱۰٪ برای پیشبینیهای بسیار دقیق، (۲) ۱۰٪ < MAPE < ۲۰٪ برای پیشبینیهای خوب، (۳) ۲۰٪ < MAPE < ۵۰٪ برای پیشبینیهای منطقی و (۴) ۵۰٪ < MAPE برای پیشبینیهای نادرست.

برای محاسبه MAPE، پژوهشگران داده ها را به دو گروه تقسیم می کنند؛ از گروه اول که غالب داده ها را تشکیل داده اند برای ساخت مدل MLR استفاده می شود و در ادامه مدل ساخته شده، توسط دسته دوم داده ها، مورد ارزیابی قرار می گیرد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در این مطالعه اطلاعات ۹۵ پروژه جمع آوری شده، که از داده های مربوط به ۸۱ پروژه تصادفی برای ساخت مدل MLR استفاده گردیده است و داده های ۱۴ پروژه دیگر (گروه دوم دادهها) برای ارزیابی مدل استفاده قرار گرفتهاند. مقدار MAPE محاسبه شده برای مدل ساخته شده، برابر با ۸/۱۴٪ است که نشان دهنده ی دقت بسیار دقیق برای مدل است و همچنین مقدار MAPE محاسبه شده برای مدل ساخته شده به منظور پیشبینی PSL پروژه های آتی بر اساس اطلاعات پروژههای پیشین، برابر با ۱۱/۷۸٪ است که طبق صحبتهای پیشین نشانهنده طبقهبندی دقت این مدل در پیشبینی

9 Mean Absolute Percentage Errors (MAPE)

جدول ۶. استفاده از شبکه بیزین برای پیش بینی پاسخ بر اساس متغیرهای مستقل

Table 6. Previous Studies Using the Bayesian Networks to Predict Responses based on the Predictor Variables

تحقیق	روش و تکنیک تحلیل	متغیر وابسته	متغیرهای مستقل
[۶۸]	شبکه‌های باور بیزین	رفتارهای ایمن کار	یادگیری؛ ارتباطات؛ رهبری؛ الزامات مدیریتی
[۳۴]	شبکه‌های باور بیزین	ریسک سقوط از ارتفاع	مهارت‌های کارگر؛ آگاهی ایمنی؛ اخلاق کارگری؛ تجهیزات ایمنی؛ تجهیزات عملیاتی؛ شرایط محیطی؛ آموزش؛ مدیریت و نظارت کارگاه؛ برنامه‌ریزی و مدیریت ایمنی و بهداشت؛ فرهنگ سازمانی؛ طراحی ایمنی؛ ملزومات قانونی؛
[۶۹]	شبکه‌های بیزین فازی	ریسک ریزش تونل	شرایط زمین‌شناسی ضعیف؛ پارامترهای نامناسب طراحی؛ کیفیت ساخت ضعیف؛ مدیریت نامناسب؛
[۷۰]	شبکه‌های باور بیزین	ریسک ایمنی	آموزش ایمنی؛ مدیریت فضای کارگاه؛ برنامه‌ریزی ایمنی و بهداشت؛ مدیریت ایمنی و بهداشت؛
[۷۱]	شبکه‌های باور بیزین	ریسک برنامه زمانی	روش‌های ساخت نامناسب؛ عدم صلاحیت و مسئولیت‌پذیری سرپرستان؛ دوباره‌کاری؛

PSL، در دامنه ی پیشبینی های خوب است. بنابراین، نتایج MAPE نشان می دهد که MLR ایجاد شده می تواند پیشبینی خوبی برای پروژه های مشابه جدید ارائه دهد.

۳- ۴- شبکه بیزین

در رابطه با مسأله ایمنی بسیاری از عوامل به صورت علّی و معلولی با یکدیگر در ارتباط هستند تا وقوع حادثه ای را رقم بزنند. به همین دلیل در راستای مدل کردن سیستمهای علّی و معلولی پیچیده، در ابتدایی ترین تلاشها، ارتباط علّی و معلولی عوامل و استقلال شرطی مورد مطالعه قرار گرفته [۶۵] و سپس با تمرکز ویژه بر شبکه های بیزین ادامه یافتهاند [۶۶]. به تازگی شبکه های بیزین[1]، برای مدلسازی سیستم های دارای پیچیدگی بسیار، به علت توانایی بالا در توصیف کیفی و کمی وابستگی بین متغیرها و همچنین توانایی در استدلال و نمایش نتایج این مدل سازیها، پیشنهاد شده اند [۶۷]. جدول ۶ برخی از مطالعات قبلی را نشان می دهد که از شبکه های بیزین در حیطه ی ایمنی استفاده کرده اند. در این تحقیق، یک مدل از شبکههای بیزین با استفاده از داده های استخراج شدهی بخش قبل، به منظور پیشبینی PLS بر اساس اطلاعات پروژه های گذشته ایجاد شده است که در ادامه به شرح کامل آن پرداخته شده است.

۳- ۴- ۱- شرح شبکه های بیزین

شبکه های بیزین برای نخستین بار در دانشگاه استنفورد و در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافتند. شبکه بیزین که با نام شبکه های باور[2] و یا شبکه های باور بیزین[3] نیز شناخته می شوند، در طول دهه ۱۹۸۰ از دایره تحقیقات معروف خارج شدند و در دهه ۱۹۹۰ مجدداً حیات خود را بازیافتند [۷۲]. در نیمه ی اول دهه ۱۹۸۰، شبکه های بیزین از طریق پژوهش ها و فعالیتهای پیر، اسپیگ هالتر و جونز معرفی به سیستم های حرفه ای و تخصصی شدند [۷۳, ۷۴]. طبق آمار، شبکه های بیزین دارای تاریخچه ای طولانی هستند و حتی ردی از آنها را میتوان در مطالعات دهه ۱۹۶۰ میلادی پیدا کرد [۷۵]. در سالهای اخیر، استفاده از شبکه های باور بیزین به طرز چشمگیری برای تعیین احتمال ریسک هایی که بر اهداف و معیارهای موفقیت پروژه نظیر احتمال تأخیر قابل توجه در اتمام پروژه و یا مسائل ایمنی تأثیر می گذارند، رو به افزایش است [۷۱]. در حقیقت، شبکه های باور بیزین در زمینه پشتیبانی تصمیم‌گیری های تحت شرایط دارای عدم اطمینان مورد استفاده فراوان قرار گرفتهاند [۷۶, ۷۷]. شبکه های باور بیزین، در واقع برای نشان دادن دانش های دارای عدم قطعیت بسیار مناسب اند. همچنین، از آنجا که رویکرد شبکه های بیزین از فرضیه های استقلال شرطی پیروی می کند و به شدت به ارائه ی گرافیکی متکی است که ارتباط بین متغیرها و در نتیجه ساختار داده های اساسی را می تواند به راحتی نشان دهد [۷۸]. شبکه های بیزین، به عنوان ابزاری به جهت ارائه دانش در حیطه ی مسأله مورد نظر تشکیل می شوند، که شامل وابستگی احتمالاتی بین عناصر اصلی مدل و رابطه ی علّی آنها

1 Bayesian Networks (BN)

2 Belief Networks

3 Bayesian Belief Networks (BN)

در نتیجه ی تفسیر تحلیل‌گر از مسأله است. این ویژگیِ کلیدی، سبب اعتبار بخشیدن به رفتار مدل و همچنین دقت بخشیدن به آن، در گزارش دادن نتایج ناشی از تجزیه و تحلیل است [۷۹].

شبکه های باور بیزین، بر پایه ی نظریه احتمال شرطی که در اوایل دهه ۱۷۰۰ توسط توماس بیز[1] توسعه داده شده است، شکل گرفته اند. وی قانون اساسی و پایه ایِ احتمال را کشف کرد که آن را قانون بیز نامید [۷۱]. شبکه ی بیزین یک نمایش جامع و در عین حال خلاصه از جدول احتمال مشترک در تمام جامعه آماری یک مسأله است [۸۰]. یک شبکه ی بیزین، توزیع احتمال مشترک برای مجموعه ای از متغیرها را نشان می دهد. در توزیع احتمال مشترک پدیدهی مورد نظر با مجموعه‌ای از متغیّرهای تصادفی که با آن در ارتباط هستند که تفسیر و تغییرات این متغیرها در ارتباط با یکدیگر و به صورت مشترک و توأمان بررسی می‌شود. یک شبکه ی بیزین، می تواند در زمانی که اطلاعات گذشته و یا وضعیت فعلی، مبهم، ناقص، ناسازگار و متغیر باشند، مدل شود. همچنین شبکه ی بیزین جواب منطقی و مربوط برای مفاهیم نامطمئن پیشنهاد می کند و یک درک گرافیکی از تعامل بین علت و معلولها را ارائه می دهد که روش مؤثری برای مدل کردن وضعیت های نامطمئن وابسته به علت و معلول است [۸۱].

به عبارتی شبکه های بیزین را می توان متشکل از دو بخش دانست: ۱) بخش کیفی: شامل یک گراف جهتدار بدون دور[2]؛ و ۲) بخش کمّی: شامل توزیع احتمال مشترک که به کمک مجموعه توزیع احتمالی شرطیِ متعلق به ساختار DAG، نمایش داده می شود. بنابراین ساختن یک شبکه ی بیزین در دو گام صورت می پذیرد؛ در گام اول، با توجه به مسأله پیشِ رو، متغیرهای مربوطه ی مسأله و رابطه ی علّی آنها با یکدیگر تعیین می گردند که این DAG، نشان دهنده ی یک سری از فرضیات مستقل و غیرمستقل است که در گام بعد به صورت مجموعه ای از توزیع های احتمالی به فرم $P(X_v|X_{pa(v)})$ برای هر مجموعه از متغیرها تعیین می گردد [۸۲]. نمونه ای از یک گراف جهتدار بدون دور در شکل ۳ نشان داده شده است.

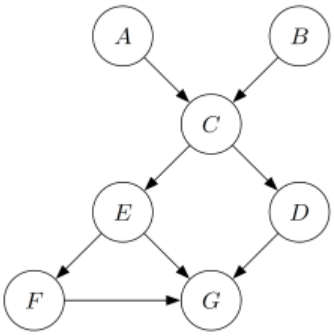


Fig. 3. Example of Directed Acyclic Graph

شکل ۳. نمونه ای از یک گراف جهت دار بدون دور

توزیع احتمال مشترک $P(X_v)$ بر روی مجموعه ای از متغیرهای V (معمولاً متغیرهای گسسته)، $X_{pa(v)}$ متغیرهای والدِ (علت) X_v برای هر v V، به صورت رابطه (۶) تعریف می شود که به بیان مجموعه ای از فرضیات مستقل میپردازد که به کمک DAG در قالب جفت گرههایی که مستقیماً با یک لینک مستقیم ارتباطی با یکدیگر ندارند، نمایش داده شده است. وجود چنین فرضیه های مستقل و مجموعه ای کوچک از والدین برای هر گره امکان تعیین احتمالات شرطی و نتیجه گیری را در یک شبکه ی بیزین فراهم می کند [۸۲].

$$P(XV)=\prod_{v\in V} P\left(Xv\middle|X\,pa(v)\right) \qquad (۶)$$

هر توزیع احتمالی شرطی $P(X_v|X_{pa(v)})$ نمایش دهنده مجموعه ای از قوانین و قواعد مطابق عبارت "اگر $X_{pa(v)} = x_{pa(v)}$ باشد، آنگاه X_v با احتمال z برابر با x_v است" می باشد. که x_v و $x_{pa(v)}$ به ترتیب نشاندهندهی مقدار اختصاص یافته به متغیر X_v و بردار مقادیر اختصاص یافته به متغیرهای والد متغیر X_vاست. همچنین اگر به X_v که فرضاً دارای سه تا متغیر والد است و هر کدام از این والدها دارای چهار مقدار مختلف اند، بتوان شش مقدار را اختصاص داد، مجموعه ی A شامل ۶×۴۳=۳۸۴ عضو است. در واقع، مفهوم این قوانین در شبکه های بیزین، تنها به طور ضمنی و تلویحی مشهود و قابل رؤیت است. ایده ی اصلی توزیع احتمال شرطی $P(X_v|X_{pa(v)})$، به جای عبارت ذکر شده در بالاست؛ به طوریکه هر عبارت به صورت یک احتمال شرطی پارامتری به صورت رابطه (۷) بیان گردد:

$$P\left(XV=x_v\middle|X\,pa(v)=x\,pa(v)\right)=Z \qquad (۷)$$

و یا حتی به طور ساده تر می توان به صورت رابطه (۸) نشان داد:

1 Thomas Bayes
2 Directed Acyclic Graph (DAG)

$$P\left(x_v \middle| x\,pa(v)\right)=Z \qquad (۸)$$

یادگیری استقرایی[1] را می توان روشی به منظور یافتن یک قاعده ی کلی، بر پایه ی تعداد قابل شمارشی از نمونه ها دانست. از طرفی نیز بدون در دست داشتن اطلاعات کافی، قطعیت این قانون را نمی توان مسلّم انگاشت؛ این بدان معناست که این یادگیری به منظور پیشبینی های آتی، میتواند دارای عدم قطعیت باشد. یادگیری استقرایی بر پایه ی ایده ی مشابهت حوادث آینده با حوادث و نتایجی که در گذشته به وقوع پیوسته اند، استوار است، به گونه ای که میتوان از نتایج حوادث وقوع یافته در گذشته به جهت پیشبینی نتایج رویدادهای آینده استفاده کرد [۸۳]. از طرفی باید توجه بسیار داشت که در مدلسازی های شرایط واقعی، پیچیده ترین مدلهای ریاضی نیز در نهایت، تنها یک مدل ساخته شده از دنیای واقعی هستند که هرگز نمی توانند یک توصیف کامل از وضعیتی که مدل کرده اند را ارائه دهند. همچنین در بسیاری از موارد، اطلاعات ورودی به مدلها نیز با قطعیت در دسترس نیستند؛ در این شرایط، منطق قیاسی[2] اعمال شده و یادگیری استقرایی، مطابق آنچه که ذکر گردید، می تواند تنها راه حل چنین مسأله هایی باشد [۸۳]. به همین جهت، قانون بروزرسانی بیز بر روی داده های گذشته، به منظور فرآیند یادگیری در شبکه اعمال می شود که در رابطه (۹) نشان داده شده است در آن قانون احتمال برای هر E:

$$P(E)=\sum_{i=1}^{m}P(H_i)\times P\left(E|H_i\right) \qquad (۹)$$

فرم تکامل یافته تر "قاعده بیز" با در نظر گرفتن مجموعهای از فرضیاتِ منحصر به فرد H_i ساخته می شود که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است که در آن $P(E)$ احتمال وقوع A، $P(H_i)$ احتمال وقوع H_i، $P(E|H_i)$ احتمال وقوع E به شرط وقوع H_i و $P(H_i|E)$ احتمال وقوع H_i به شرط وقوع E است:

$$P\left(H_i|E\right)=\frac{P(H_i)\times P\left(E|H_i\right)}{\sum_{i=1}^{m}P(H_i)\times P\left(E|H_i\right)} \qquad (۱۰)$$

مقدار $P(H_i|E)$ در رابطه (۱۰) نشان دهنده ی چگونگی بروز شدن $P(H_i)$ با مقادیر جدید احتمالاتی است که به آن احتمال مؤخر بر اساس شواهد جدید گفته می شود. این بروزرسانی مفهوم کلیدی یادگیری در شبکه های بیزین با استفاده از تجربیات گذشته است [۸۳]. به این ترتیب پس از ساخته شدن شبکه، متغیرهای شبکه بیزین به صورت مستمر با ورود داده های جدید به روز می شوند. بنابراین اساس، در ابتدا مدل مقادیری فرضی را به عنوان حدس اولیه برای متغیرها در نظر میگیرد و به تدریج و با افزایش مشاهدات به عنوان ورودی مدل، خود را به روز کرده و نتایج را بهبود می بخشد [۸۲]. ضمن بهبود یافتن شبکه، میزان تأثیرگذاری و شدت هر یک از روابط علّی و معلولی در گراف DAG نیز به روز شده و به حقیقت نزدیکتر می گردند.

۳- ۴- ۲- ساخت شبکه بیزین

برای ساخت شبکه ی بیزین، نرم افزارهای مختلفی وجود دارند که یکی از مشهورترین و در دسترسترینِ آنها، نسخهی دانشگاهی نرم افزار GeNIe است. در تحقیق حاضر نیز، از نرم افزار GeNIe V.2/00 Academic بهره گرفته شده است. در ساخت مدل های شبکه های بیزین در این نرم افزار به دو حالت می توان اقدام کرد که در ادامه نتایج ساخت مدل در هر یک از حالات به اختصار توضیح داده می شوند. در ابتدای ساخت مدل باید تمامی عوامل با توجه به مطالبی که در قسمتهای قبل توضیح داده شده است، سطحبندی شوند؛ با توجه به فرض تأثیرگذاری عوامل SIF_1، SIF_2، ... ، SIF_6 ساختار شبکه ی بیزین ترسیم می گردد که در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی فلش ها در این ساختار، به معنای ارتباط معنی دار متغیر مستقل و وابسته است. در این ساختار متغیر مستقل در ابتدای فلش و متغیر وابسته در انتهای آن قرار دارند.

• ساخت مدل احتمالاتی در حالت مبتنی بر معادله: ساخت مدل در حالت مبتنی بر معادله[3]، مشابهت بسیار زیادی به ساخت مدل به کمک رگرسیون خطی به روش همزمان دارد. چرا که با وارد کردن تمامی متغیرها به مدل، سعی بر تولید ضرایبی برای هر عامل دارد که در نهایت مدل نهایی بیشترین ضریب تعیین یا همان R را داشته باشد. اما در این حالت نرمافزار سطح معنی داری عوامل را مانند رگرسیون در نظر نخواهد گرفت. به همین دلیل در تحقیق حاضر، ابتدا سطح معنی داری متغیرهای ورودی به مدل، توسط روش های ورود متغیر به مدل رگرسیون خطی ارزیابی شده اند و پس از

1 Inductive Learning
2 Deductive Logic
3 Equation Based

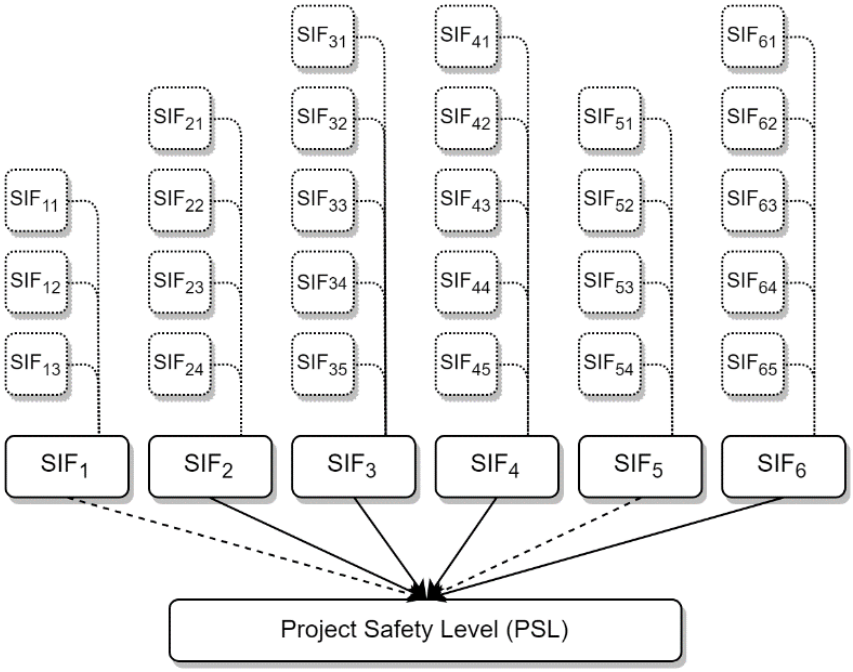


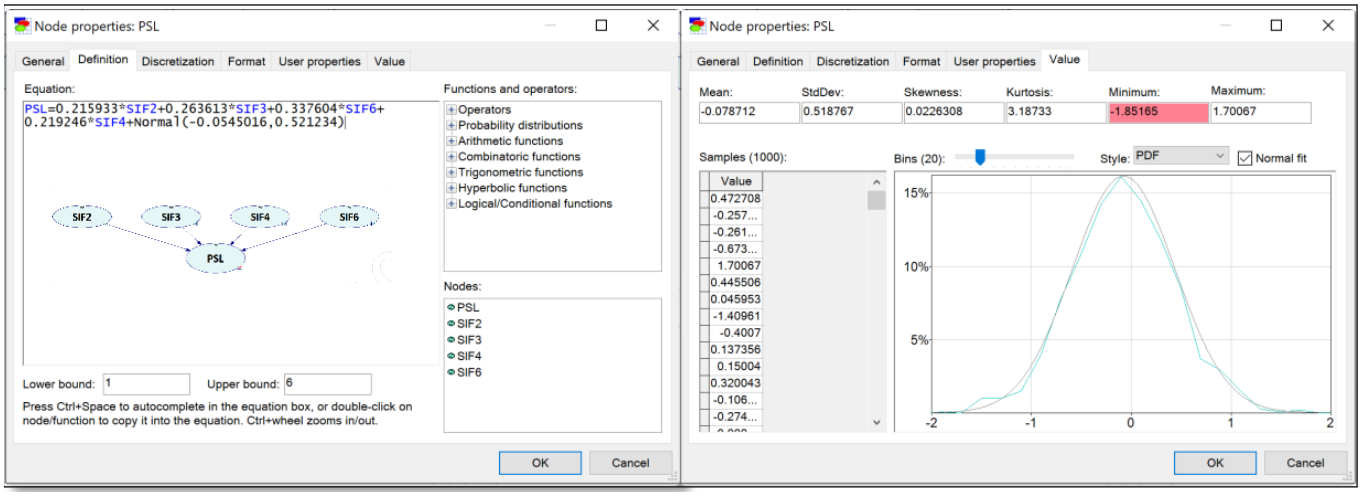
Fig. 4. Bayesian Network based on the Factors' Identified Relationships

شکل ۴. ساختار شبکه ی بیزین بر اساس روابط شناسایی شده بین عوامل

اطمینان از معنی داری متغیرها در پیشبینی متغیر وابسته، این متغیرها مطابق ساختار نشان داده شده در شکل فوق، به مدل احتمالاتی وارد شده اند (در نتیجه عوامل SIF_1 و SIF_5 که ارتباط معنی دار با پارامتر هدف ندارند، از دامنه عوامل تأثیرگذار بر PSL حذف گردیده اند).

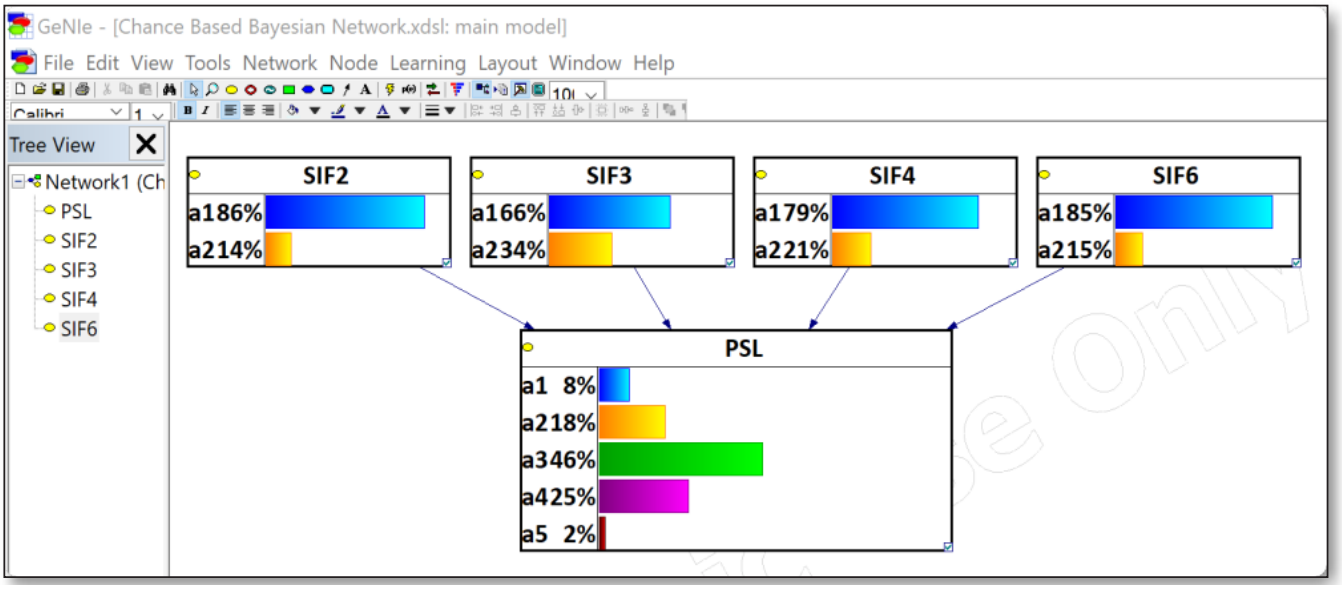
در ادامه، با ورود اطلاعاتِ چهار شاخصِ شناسایی شده توسط رگرسیون خطی به نرمافزار GeNIe که در ساخت مدل شبکه ی بیزین برای پیشبینیِ احتمالاتی سطح ایمنی پروژه های آتی کمک میک ند و همچنین با استفاده از تحلیل این نرم افزار در حالت مبتنی بر معادله، نتایج یکسانی با نتایج تحلیل رگرسیون خطی تولید می شود که تنها تفاوت خروجی های این دو حالت، تولیدِ احتمالیِ سطح ایمنی توسط شبکه ی بیزین است که توسط تعریف یک تابع توزیع نرمال به جای یک عدد ثابت (ضریبی که تحلیل رگرسیون خطی به عنوان عرض از مبدا معادله ی خط ارائه می دهد) ساخته می شود. نتایج مدلسازی شبکه ی بیزین در حالت مبتنی بر معادله، در شکل ۵ نشان داده شده است.

• ساخت مدل احتمالاتی شبکهی بیزین در حالت مبتنی بر شانس: همانگونه که در قسمت قبل توضیح داده شد، یکی از ویژگی های اصلی شبکه ی بیزین، ارائه احتمال رخدادهای آینده با توجه به سوابق گذشته از طریق قانون احتمال بیز است. استفاده از این مدلسازی علاوه بر شرط حداقلی جامعه آماری محاسبه شده طبق فرمول کوکران، شرط حداقل تعداد جامعه را بر اساس ساختار شبکه ی تعریف شده را نیز داراست. در مدلسازی شبکه ی بیزین، اگر به یک گره که دارای پنج متغیر والد است و هر یک از این والدها دارای x مقدار مختلف اند، بتوان y مقدار را اختصاص داد، نیازمند $x \times y^5$ نمونه برای پیشبینی تمام و کمال آینده است. در ادامه، به منظور ساخت مدل معتبر، با توجه به محدودیت تعداد پروژه های ارزیابی شده، چهار عامل تأثیرگذار بر سطح ایمنی پروژه در شبکه ی بیزین را برای پیشبینی سطح ایمنی پروژه های آینده، در دو سطح: ۱) متوسط و کمتر و ۲) خوب و عالی طبقه بندی شده اند. همچنین سطح ایمنی پروژه نیز در پنج سطح ۱) ضعیف، ۲) متوسط کم، ۳) متوسط زیاد، ۴) خوب و ۵) عالی دسته بندی شده است (این فرض مدلسازی را به حالتی ساده تر نسبت به حالت واقعیِ پرسش شده تبدیل می کند و این به دلیل نبود اطلاعات تعداد پروژه های زیاد است). مدل ساخته شده به کمک شبکه ی بیزین مبتنی بر حالت شانس، که از آن به اختصار همان شبکه ی بیزین در این تحقیق نام برده شده است، در شکل ۶ نشان داده شده است.



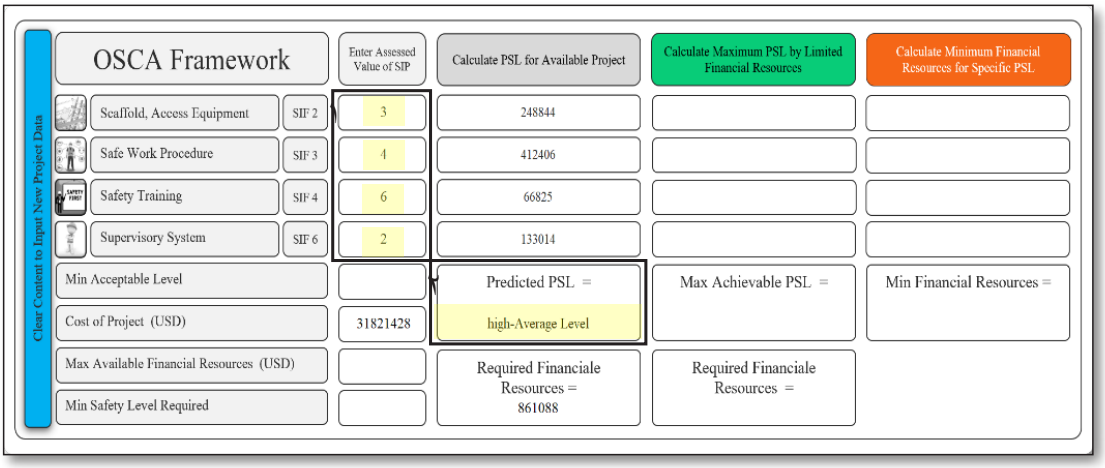
شکل ۵. نتایج مدل سازی شبکه ی بیزین در نرم افزار GeNIe در حالت مبتنی بر معادله

Fig. 5. Results of Bayesian Network Modeling in GeNIe for Equation-Based Mode



شکل ۶. مدل بیزین ساخته شده در حالت مبتنی بر شانس

Fig. 6. Bayesian Network Modeled in the Chance-Based Mode



شکل ۷. تعیین سطح ایمنی به کمک تعیین سطح عوامل تأثیرگذار بر ایمنی

Fig. 7. Determining Safety Level by Determining the Level of Safety Influential Factors

۴- تعیین سطح ایمنی پروژه ها به کمک مدلهای ساخته شده

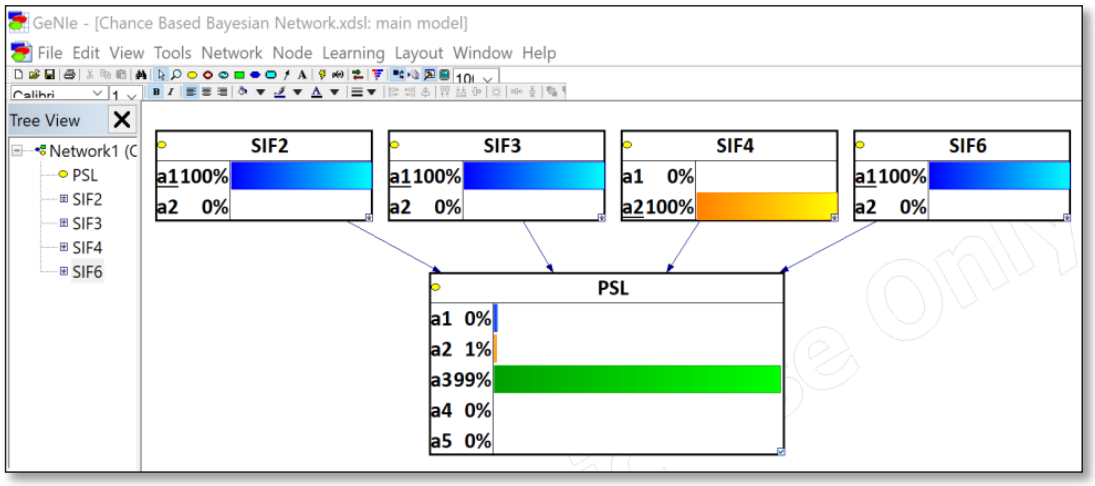
به منظور نشان دادن کاربرد عملی این دو مدل، اطلاعات یک پروژه ی جدید به مدل وارد شده و تحلیل شده است. اطلاعات این پروژه در روند ساخت مدلها وارد نشده و صرفاً از آن برای صحت درستی و کاربرد صحیح مدلها استفاده شده است. لازم به یادآوری است که در این پژوهش از نزدیک به نود درصد پرسشنامه ها برای ساخت مدلها و از نزدیک به ده درصد کل آنها برای سنجش دقت مدلها استفاده شده است. مطالعه ی موردی حاضر نیز یکی از پرسشنامه هایی که برای اطمینان از صحت پژوهش بکار گرفته شده است. همان‌گونه که در ذکر گردید با استفاده از شبکه ی بیزین و کمک گرفتن از داده های پروژه های تکمیل شدهی گذشته، می توان سطح احتمالاتی متغیر وابسته (سطح ایمنی پروژه) را پیشبینی نمود. تمامی فرضهایی که در مدل رگرسیون در نظر گرفته شده بودند، در این تحقیق برای مدل بیزین نیز در نظر گرفته شده اند که مهمترین این فرضها، فرض مستقل بودن SIFها از یکدیگر است.

۴- ۱- مطالعه موردی

مطالعه ی موردی این پژوهش، پروژهی بلندمرتبه و جدید الاحداثِ واقع در جزیره ی زیبای کیش با ارتفاع ۱۸ طبقه از روی سطح زمین و مساحت زیربنای هر طبقه ۱۶۵۰ مترمربع است که در آن سطوح عوامل نامبرده به شرح روبرو ارزیابی شده اند: سطح عامل SIF_1 (بازرسی های ایمنی، فرآیندهای ارزیابی خطر و ریسک ایمنی) در سطح دوم معادل ضعیف، سطح عامل SIF_2 (اجرای قوانین و مقرّرات ایمنی مربوط به وسایل دسترسی و سازههای حفاظتی) در سطح سوم معادل متوسط کم، سطح عامل SIF_3 (فرآیند ایمن انجام کار) در سطح چهارم معادل متوسط زیاد، سطح عامل SIF_4 (آموزش ایمنی و اطمینان از صلاحیت افراد مرتبط با پروژه) در سطح ششم معادل بسیار قوی، سطح عامل SIF_5 (نگهداری و تعمیرات ابزار و ماشین آلات) در سطح سوم معادل متوسط کم و سطح عامل SIF_6 (سرپرستی و نظارت بر ایمنی پروسه های کاری) در سطح دوم معادل با ضعیف. همچنین در پرسشنامه ی تکمیل شده مربوط به پروژه توسط کارشناس پرسش شونده، با توجه به احتمال وقوع ریسک های مورد مطالعه ی تحقیق که در بخش ۳-۲ معرفی گردید، سطح ایمنی پروژه در سطح چهار معادل با ایمنی متوسط زیاد ارزیابی شده است که در نتیجه آن می توان انتظار داشت حوادث منجر به آسیبهای اساسی دیده شود و همچنین احتمال وقوع حادثه منجر به مرگ در این پروژه وجود دارد. لازم به ذکر است که یادآوری گردد تمامی اطلاعات این بخش از وضعیت خود پروژه بدست آمده اند و سطوح اندازه گیری شده نتیجه ارزیابی متخصصان پروژه است.

۴- ۲- تعیین سطح ایمنی پروژه مطالعه موردی به کمک مدل رگرسیونی

شکل ۷ ورود اطلاعات پروژهی مطالعه موردی به ساختار ساخته شده که مدل رگرسیونی بخشی از آن است را نشان میدهد (شکل ۷ – کادر ۱). طبق مدل رگرسیون خطی چندمتغیره ی ساخته شده، این پروژه همانگونه که در قسمت تعیین شده (شکل ۷ – کادر ۲) نشان داده شده است، سطح



شکل ۸. پیش بینی احتمالی سطح ایمنی پروژه به کمک شبکه ی بیزین

Fig. 8. Probable Prediction of the Safety Level of the Project by Bayesian Network

ایمنی متوسط زیاد را داراست که این نتیجه با پیشبینی کارشناس پرسش شونده مطابقت دارد.

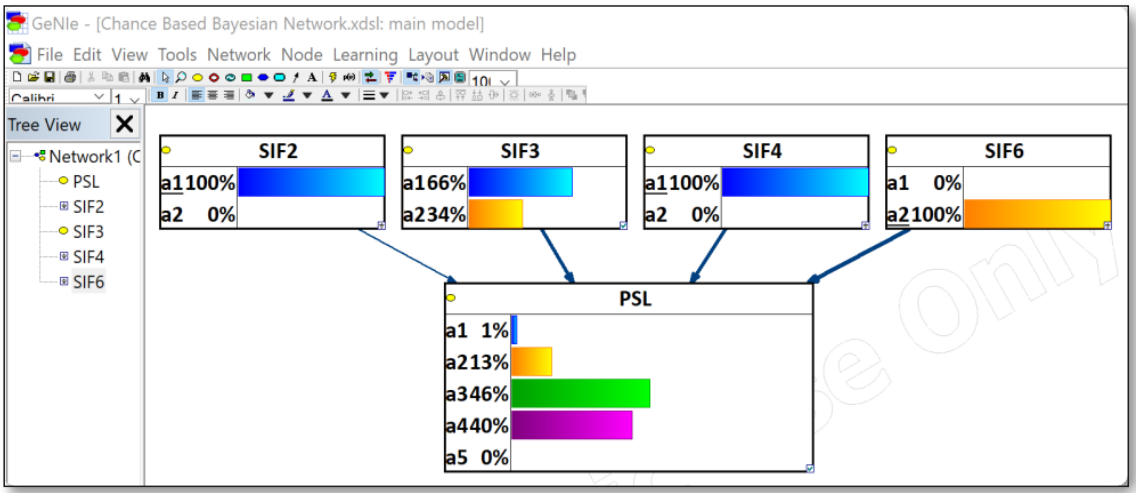
۴- ۳- تعیین سطح ایمنی پروژه مطالعه موردی به کمک شبکه بیزین

همچنین میتوان سطح ایمنی این پروژه را نیز بر اساس شواهد گذشته به کمک مدل بیزین مبتنی بر حالت شانس، پیشبینی نمود. با توجه به نیاز شبکه ی بیزین به جامعه با تعداد اعضای زیاد، در حل این قسمت از مسأله به کمک شبکه ی بیزین، بنا بر آنچه در قسمت ۲-۴-۳ ذکر شد، تعداد سطوح عوامل از شش سطح لیکرت به دو سطح بالای متوسط (سطوح پنجم و ششم) و پایین متوسط (سطوح اول تا چهارم) دسته بندی و تقسیم شده اند (به علت آنکه در صورت عدم ساده سازی، برای اطمینان از درستی جامعه آماری مدل، نیاز به اطلاعات ۸۵۵۳۶ = $۶^{۵}$ پروژه است).

انتظار میرود محتمل ترین حالت برای سطح ایمنی پروژه در مدل احتمالی بیزین نیز همین سطح از ایمنی را پیشبینی کند. همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده، مدل بیزین مبتنی بر شانس نیز نتیجه ی مدل رگرسیونی را تأیید می کند و سطح ایمنی پروژه را با احتمال ٪۹۹ "ایمنی متوسط زیاد" نشان می دهد که در نتیجه آن می توان انتظار داشت حوادث منجر به آسیب های اساسی دیده شود و همچنین احتمال وقوع حادثه منجر به مرگ در این پروژه وجود دارد. لازم به ذکر است با توجه به مطالب ذکر شده در خصوص درصد میانگین مطلق خطاها، شبکه بیزینِ ساخته شده می تواند پیشبینی هایی با دقت خوب از سطح ایمنی پروژه های آینده بنا بر اطلاعات پروژه های گذشته ارائه دهد.

۵- بحث و نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق نشان دادن چگونگی ایجاد یک چارچوب است که بتوان به کمک آن قدم به قدم برآورد اولیهای برای تعیین سطح PSL پروژه های جاری بر اساس اطلاعات پروژه های مشابه پیشین ارائه داد. به همین جهت دو روشی که نسبتاً از کارکرد با فراوانی بسیاری در بین تحقیقات گذشته برخوردارند شامل رگرسیون خطی و شبکه ی بیزین مورد مطالعه قرار گرفتند و کاربرد هر دو روش برای پروژه های مورد مطالعه توسط پژوهش حاضر تأیید گردید. برای دستیابی به این هدف، شش عامل طبق ادبیات و گزارش غیر رسمی از صنعت ساخت کشور انتخاب شده است که عمده دلایل حوادث ناشی از کار را در صنعت ساخت ایران توضیح می دهد. سپس داده های پروژه ۹۵ ساختمان با اسکلت فولادی (۱۸-۲۶ طبقه) از طریق پرسشنامه و مصاحبه جمع آوری و در دو مرحله با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و شبکه ی بیزین برای مطالعه تأثیر هر SIF بر PSL و همچنین برآورد اولیه PSL برای پروژه های فعلی مدلسازی شد. نتایج مدل نشان میدهد اگرچه ارتباط مستقیم همه SIF با PSL به اثبات رسیده است، اما بهترین مدل جهت پیشبینی سطح PSL به کمک چهار عامل توسط MLR قابل پیشبینی است که عبارتند از: $SIF_{۶}$، $SIF_{۳}$، $SIF_{۴}$



شکل ۹. پیش بینی PSL در صورت ناقص بودن اطلاعات

Fig. 9. PSL Prediction by Inadequate Information

و $SIF_{۲}$. همچنین شبکه ی بیزین نیز رابطه مستقیم هر شش عامل را بر پارامتر هدف که همان PSL است را به اثبات رسانید.

با دقت در ضرایب و وزنهای عوامل تأثیرگذار بر ایمنی در رابطه ی نهایی MLR و همچنین میزان تأثیر هر عامل بر پارامتر هدف در شبکه بیزین که تلاش شده است در شکل ۹ به کمک ضخامت خط نشان داده شود، می توان دریافت بیشترین تأثیر بر PSL را عامل $SIF_{۶}$ (سرپرستی و نظارت بر ایمنی پروسه های کاری) دارد و پس از آن به ترتیب عوامل $SIF_{۳}$، $SIF_{۴}$ و $SIF_{۲}$ دارای بیشترین تأثیر بر PSL هستند. اما تصور بسیار ساده انگارانه ای است که فکر کرد برای افزایش هر چه بیشتر PSL می بایست برای این عوامل به همین ترتیب هزینه کرد؛ چراکه میزان هزینه برای ارتقای سطوح عوامل با یکدیگر متفاوت است و می باید نرخ افزایش سطح ایمنی پروژه نسبت به میزان هزینه ها با یکدیگر مقایسه شوند که این خود موضوع تحقیق دیگر در ادامه ی پژوهش حاضر است.

همچنین به عنوان یکی از بارزترین برتری های شبکه ی بیزین بر مدل رگرسیون خطی در پیشبینی سطح ایمنی آینده پروژه های آتی، امکان پیشبینی برای زمانی است که در یک پروژه، اطلاعات برخی از عوامل در دسترس است و پروژه با کمبود اطلاعات در مورد سایر عوامل مواجه است. در این وضعیت مدل بیزین به صورت احتمالاتی قدرت بالایی در پیشبینی سطح پروژه ی آتی دارد؛ اما مدل رگرسیون برای پیشبینی آینده نیاز به اطلاعات کافی از تمامی عوامل دارد. به عنوان نمونه، در شکل ۹ مثالی از پیشبینی سطح احتمالی ایمنی برای پروژهای که اطلاعات سه عامل $SIF_{۲}$، $SIF_{۴}$ و $SIF_{۶}$ از آن پروژه در دسترس است و هیچ اطلاعی از سطح عامل $SIF_{۳}$ وجود ندارد، نشان داده شده است.

در این وضعیت، سطوح عوامل $SIF_{۲}$ و $SIF_{۴}$ در سطح پایین متوسط و $SIF_{۶}$ در سطح بالای متوسط ارزیابی شدهاند. با توجه به وضعیت پارامترهایی که اطلاعات آنها در دسترس است و وضعیت آنها در این شکل نشان داده شده است، به احتمال ٪۴۶ پروژه از سطح "ایمنی متوسطِ زیاد" برخوردار است و ٪۴۰ احتمال دارد که پروژه در سطح ایمنی خوب قرار داشته باشد. همچنین بنا بر سوابق ثبت شده پروژه های سابق، احتمال سایر سطوح نیز مشخص شده اند.

منابع

[1] T.S. Abdelhamid, J.G. Everett, Identifying root causes of construction accidents, Journal of construction engineering and management, 126(1) (2000) 52-60.

[2] M.R. Hallowell, J.W. Hinze, K.C. Baud, A. Wehle, Proactive construction safety control: Measuring, monitoring, and responding to safety leading indicators, Journal of construction engineering and management, 139(10) (2013) 04013010.

[3] J. Hinze, J.A. Gambatese, Addressing construction

worker safety in project design, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, 1996.

[4] A. Saberi, key project management skills, Faraa, 2006, (in persian).

[5] S. Gilani-nia, Optimization of safety processes in the construction industry by helping a decision support system, Journal of Business Management, 31 (2008) 159 – 178, (in persian).

[6] D. Fang, H. Wu, Development of a Safety Culture Interaction (SCI) model for construction projects, Safety science, 57 (2013) 138-149.

[7] J. Irizarry, K.L. Simonsen, D.M. Abraham, Effect of safety and environmental variables on task durations in steel erection, Journal of construction engineering and management, 131(12) (2005) 1310-1319.

[8] S. Han, F. Saba, S. Lee, Y. Mohamed, F. Peña-Mora, Toward an understanding of the impact of production pressure on safety performance in construction operations, Accident Analysis & Prevention, 68 (2014) 106-116.

[9] J. Wanberg, C. Harper, M.R. Hallowell, S. Rajendran, Relationship between construction safety and quality performance, Journal of construction engineering and management, 139(10) (2013) 04013003.

[10] R.J. Burby, R.E. Deyle, D.R. Godschalk, R.B. Olshansky, Creating hazard resilient communities through land-use planning, Natural hazards review, 1(2) (2000) 99-106.

[11] G. Carter, S.D. Smith, Safety hazard identification on construction projects, Journal of construction engineering and management, 132(2) (2006) 197-205.

[12] T. Howarth, P. Watson, Construction Safety Management, Wiley, 2008.

[13] C.D. Reese, J.V. Eidson, Handbook of OSHA construction safety and health, Crc Press, 2006.

[14] J. Hinze, X. Huang, L. Terry, The nature of struck-by accidents, Journal of construction engineering and management, 131(2) (2005) 262-268.

[15] J. Hinze, C. Pedersen, J. Fredley, Identifying root causes of construction injuries, Journal of Construction Engineering and Management, 124(1) (1998) 67-71.

[16] R.M. Choudhry, D. Fang, H. Lingard, Measuring safety climate of a construction company, Journal of construction Engineering and Management, 135(9) (2009) 890-899.

[17] K. Imriyas, An expert system for strategic control of accidents and insurers' risks in building construction projects, Expert Systems with Applications, 36(2) (2009) 4021-4034.

[18] D. Patel, K. Jha, Structural equation modeling for relationship-based determinants of safety performance in construction projects, Journal of Management in Engineering, 32(6) (2016) 05016017.

[19] X. Wu, Q. Liu, L. Zhang, M.J. Skibniewski, Y. Wang, Prospective safety performance evaluation on construction sites, Accident Analysis & Prevention, 78 (2015) 58-72.

[20] K.M. Halperin, M. McCann, An evaluation of scaffold safety at construction sites, Journal of safety research, 35(2) (2004) 141-150.

[21] H. Kim, C.R. Ahn, K. Yang, Identifying safety hazards using collective bodily responses of workers, Journal of Construction Engineering and Management, 143(2) (2016) 04016090.

[22] M. Mattila, Improvement in the occupational health program in a Finnish construction company by means of systematic workplace investigation of job load and hazard analysis, American journal of industrial medicine, 15(1) (1989) 61-72.

[23] O. Rozenfeld, R. Sacks, Y. Rosenfeld, H. Baum, Construction job safety analysis, Safety science, 48(4) (2010) 491-498.

[24] A. Albert, M.R. Hallowell, B. Kleiner, A. Chen, M. Golparvar-Fard, Enhancing construction hazard recognition with high-fidelity augmented virtuality, Journal of Construction Engineering and Management, 140(7) (2014) 04014024.

[25] P. Mitropoulos, T.S. Abdelhamid, G.A. Howell, Systems model of construction accident causation, Journal of construction engineering and management, 131(7) (2005) 816-825.

[26] A. Albert, M.R. Hallowell, B.M. Kleiner, Experimental field testing of a real-time construction hazard identification and transmission technique, Construction Management and Economics, 32(10) (2014) 1000-1016.

[27] F.B. Cambraia, T.A. Saurin, C.T. Formoso, Identification, analysis and dissemination of information on near misses: A case study in the construction industry, Safety Science, 48(1) (2010) 91-99.

[28] S. Jones, C. Kirchsteiger, W. Bjerke, The importance of near miss reporting to further improve safety performance, Journal of Loss Prevention in the process industries, 12(1) (1999) 59-67.

[29] T.W. Van der Schaaf, J. Moraal, A.R. Hale, Near miss reporting in the chemical process industry, Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift., 1992.

[30] V.J. Davies, K. Tomasin, Construction safety handbook, Thomas Telford, 1996.

[31] C.D. Reese, J.V. Eidson, Handbook of OSHA Construction Safety and Health, Second Edition, CRC Press, 2006.

[32] X. Huang, J. Hinze, Analysis of construction worker fall accidents, Journal of Construction Engineering and Management, 129(3) (2003) 262-271.

[33] L. Wong, Y. Wang, T. Law, C.T. Lo, Association of root causes in fatal fall-from-height construction accidents in Hong Kong, Journal of Construction Engineering and Management, 142(7) (2016) 04016018.

[34] L.D. Nguyen, D.Q. Tran, M.P. Chandrawinata, Predicting safety risk of working at heights using Bayesian networks, Journal of Construction Engineering and Management, 142(9) (2016) 04016041.

[35] P.X. Zou, Fostering a strong construction safety culture, Leadership and Management in Engineering, 11(1) (2010) 11-22.

[36] D. Petersen, Techniques of safety management, McGraw-Hill Companies, 1978.

[37] H.W. Heinrich, D.C. Petersen, N.R. Roos, S. Hazlett, Industrial accident prevention: A safety management approach, McGraw-Hill Companies, 1980.

[38] J. Reason, Human error, Cambridge university press, 1990.

[39] Q. Chen, R. Jin, Multilevel safety culture and climate survey for assessing new safety program, Journal of Construction Engineering and Management, 139(7) (2012) 805-817.

[40] R.M. Choudhry, D. Fang, Why operatives engage in unsafe work behavior: Investigating factors on construction sites, Safety science, 46(4) (2008) 566-584.

[41] A. Pinto, I.L. Nunes, R.A. Ribeiro, Occupational risk assessment in construction industry–Overview and reflection, Safety science, 49(5) (2011) 616-624.

[42] O. Aneziris, I.A. Papazoglou, H. Baksteen, M. Mud, B. Ale, L.J. Bellamy, A.R. Hale, A. Bloemhoff, J. Post, J. Oh, Quantified risk assessment for fall from height, Safety Science, 46(2) (2008) 198-220.

[43] A.I. Glendon, N.A. Stanton, Perspectives on safety culture, Safety Science, 34(1) (2000) 193-214.

[44] C. Tam, S. Zeng, Z. Deng, Identifying elements of poor construction safety management in China, Safety Science, 42(7) (2004) 569-586.

[45] M.R. Hallowell, J.A. Gambatese, Activity-based safety risk quantification for concrete formwork construction, Journal of Construction Engineering and Management, 135(10) (2009) 990-998.

[46] K. Imriyas, S. Low, A. Teo, S. Chan, Premium-rating model for workers' compensation insurance in construction, Journal of Construction Engineering and Management, 134(8) (2008) 601-617.

[47] S. Rajendran, J.A. Gambatese, Development and initial validation of sustainable construction safety and health rating system, Journal of Construction Engineering and Management, 135(10) (2009) 1067-1075.

[48] B.H. Guo, T.W. Yiu, Developing leading indicators to monitor the safety conditions of construction projects, Journal of Management in Engineering, 32(1) (2015) 04015016.

[49] J.L. Melia, K. Mearns, S.A. Silva, M.L. Lima, Safety climate responses and the perceived risk of accidents in the construction industry, Safety Science, 46(6) (2008)

evaluation on construction sites, 78 (2015) 58-72.

[62] Y.M. Goh, N.F. Binte Sa'adon, Cognitive factors influencing safety behavior at height: A multimethod exploratory study, Journal of Construction Engineering and Management, 141(6) (2015) 04015003.

[63] F.J. Gravetter, Statistics for the behavioral sciences - 9th edition, Wadsworth Cengage Learning, Belmont, California, 2013.

[64] D.J. Lowe, M.W. Emsley, A. Harding, Predicting construction cost using multiple regression techniques, Journal of construction engineering and management, 132(7) (2006) 750-758.

[65] W. Spohn, Stochastic independence, causal independence, and shieldability, Journal of Philosophical logic, 9(1) (1980) 73-99.

[66] J. Pearl, Causality: models, reasoning, and inference, Cambridge Univ, in, Pr, 2000.

[67] R.E. Neapolitan, Learning bayesian networks, Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2004.

[68] Jitwasinkul, B.H. Hadikusumo, A.Q. Memon, A Bayesian Belief Network model of organizational factors for improving safe work behaviors in Thai construction industry, Safety science, 82 (2016) 264-273.

[69] L. Zhang, X. Wu, M.J. Skibniewski, J. Zhong, Y. Lu, Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects, Reliability Engineering & System Safety, 131 (2014) 29-39.

[70] S.-S. Leu, C.-M. Chang, Bayesian-network-based safety risk assessment for steel construction projects, Accident Analysis & Prevention, 54 (2013) 122-133.

[71] S.-Y. Kim, N. Van Tuan, S.O. Ogunlana, Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks, International Journal of Project Management, 27(1) (2009) 39-50.

[72] McCabe, S.M. AbouRizk, R. Goebel, Belief networks for construction performance diagnostics, Journal of Computing in Civil Engineering, 12(2) (1998) 93-100.

[73] J. Pearl, Reverend Bayes on inference engines: A distributed hierarchical approach, Cognitive Systems 949-958.

[50] A. Ketabi, G. Heravi, Investigating and Identifying Safety Hazards and Risks for High-Rise Building Projects, in: 10th National Congress on Civil Engineering, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2017, (in persian).

[51] Mohammadi, M. Tavakolan, Y. Khosravi, Factors influencing safety performance on construction projects: A review, Safety science, 109 (2018) 382-397.

[52] N.J. Bahr, System safety engineering and risk assessment: a practical approach, CRC Press, 2014.

[53] S.Q. Wang, M.F. Dulaimi, M.Y. Aguria, Risk management framework for construction projects in developing countries, Construction Management and Economics, 22(3) (2004) 237-252.

[54] R. Chomeya, Quality of psychology test between Likert scale 5 and 6 points, Journal of Social Sciences, 6(3) (2010) 399-403.

[55] D. George, P. Mallery, SPSS for Windows step by step, 2006.

[56] M. Kasunic, Designing an effective survey, Carnegie-Mellon Univ. Pittsburgh Pa Software Engineering Inst., 2005.

[57] E. Pereira, S. Han, S. AbouRizk, U. Hermann, Empirical Testing for Use of Safety Related Measures at the Organizational Level to Assess and Control the On-Site Risk Level, Journal of Construction Engineering and Management, 143(6) (2017) 05017004.

[58] Y. Feng, S. Zhang, P. Wu, Factors influencing workplace accident costs of building projects, Safety science, 72 (2015) 97-104.

[59] A. Pousette, S. Larsson, M.J.S.S. Törner, Safety climate cross-validation, strength and prediction of safety behaviour, 46(3) (2008) 398-404.

[60] M.D. Cooper, R.A. Phillips, Exploratory analysis of the safety climate and safety behavior relationship, Journal of safety research, 35(5) (2004) 497-512.

[61] X. Wu, Q. Liu, L. Zhang, M.J. Skibniewski, Y.J.A.A. Wang, Prevention, Prospective safety performance

Laboratory, School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, 1982.

[74] D.J. Spiegelhalter, R.P. Knill-Jones, Statistical and knowledge-based approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology, Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), (1984) 35-77.

[75] M. Minsky, Steps toward artificial intelligence, Proceedings of the IRE, 49(1) (1961) 8-30.

[76] M. Bouissou, F. Martin, A. Ourghanlian, and Assessment of a safety-critical system including software: a Bayesian belief network for evidence sources, in: Reliability and Maintainability Symposium, 1999. Proceedings. Annual, IEEE, 1999, pp. 142-150.

[77] H. Ziv, D.J. Richardson, Constructing Bayesian-network models of software testing and maintenance uncertainties, in: Software Maintenance, 1997. Proceedings, International Conference on, IEEE, 1997, pp. 100-109.

[78] W. Premchaiswadi, Bayesian Networks, InTech, Croatia, 2012.

[79] A. Friis-Hansen, Bayesian networks as a decision support tool in marine applications, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, (2000).

[80] T.D. Nielsen, F.V. Jensen, Bayesian networks and decision graphs, Springer Science & Business Media, 2009.

[81] M. Pelikan, Hierarchical Bayesian optimization algorithm, Hierarchical Bayesian Optimization Algorithm, (2005) 105-129.

[82] U.B. Kjærulff, A.L. Madsen, Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis, Springer New York, 2012.

[83] T. Koski, J. Noble, Bayesian networks: an introduction, John Wiley & Sons, 2011.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Heravi, A. B. Ketabi, Development of Safety Level Assessment Models for Building Projects using Multiple Linear Regression and Bayesian Network, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4657-4682.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18439.6872

این صفحه عمداً خالی است