

تحلیل اثر نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج از توالی بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی

امیرعلی فوکردی^{۱*}، سیدکامران قریشی^۲، فاطمه تقی ملایی^۳

۱. استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه قم، قم، ایران

۲. استاد، گروه آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

۳. دانش‌آموخته مدیریت پروژه، گروه مدیریت، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

چکیده

این پژوهش در پی شناسایی بارزترین نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع کار خارج‌ازتوالی و تحلیل اثر آن‌ها بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی است. بدین منظور، با اتکا به پیشینه پژوهش و نظرات گروهی متشکل از ۱۶ خبره و به کمک فن دلفی فازی بارزترین این نشانه‌ها و علل در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تعیین، و با استفاده از قواعد ماکس-ماکس و بیز اثر آن‌ها بر بهره‌وری پروژه‌های مذکور در دو موقعیت اطمینان کامل و ریسک تحلیل شد. ادغام یافته‌های دو رویکرد نشان داد که در میان بارزترین نشانه‌های هشدار اولیه، شش نشانه «ویرایش‌های زیاد در طراحی»، «حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی»، «گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه»، «برنامه‌ریزی ضعیف برای گذار از مرحله ساخت به مرحله راه‌اندازی»، «درصد بالای دوباره‌کاری»، و «استفاده زودهنگام از شناسایی» جدی‌ترین اخطار آسیب به بهره‌وری از جانب کار خارج‌ازتوالی را می‌دهند. همچنین، در میان بارزترین علل کار خارج‌ازتوالی، «عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان حین برنامه‌ریزی»، «تغییر در طراحی»، «ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه»، «عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان»، «واقعی نبودن زمان پیش‌بینی‌شده برای فعالیت‌ها»، و «نبود منابع مالی کافی برای پروژه» می‌توانند با زمینه‌سازی برای وقوع کار خارج‌ازتوالی، بیشترین آسیب را به بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی وارد کنند. یافته‌های این مطالعه به مدیران در درک بهتر نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی و پیش‌بینی تمهیداتی برای پیشگیری از وقوع یا کاهش آثار منفی این پدیده در مرحله برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری، پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی، تحلیل بیز، تحلیل ماکس-ماکس، علل، کار خارج‌ازتوالی، نشانه‌های هشدار اولیه



۱- مقدمه و بیان مسئله

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان شاخه صنعتی تولید و تجارت در عملیات احداث، تعمیر، نوسازی و نگهداری زیرساخت‌ها، عاملی تعیین‌کننده در پیشرفت فناوریانه، و بازیگری کلیدی در تضمین توسعه پایدار کشورها است [۱]. طبق آمارهای موجود، این صنعت به‌طور متوسط سهمی حدود ۸ تا ۹ درصد از تولید ناخالص داخلی کشورها را به خود اختصاص داده است [۲]. یکی از قابل‌اعتمادترین پارامترهای عملکرد پروژه‌های ساخت‌وساز بهره‌وری است [۲]. طبق تعریف، بهره‌وری مترادف با پیشرفت پروژه از طریق به‌کارگیری بهینه توانایی‌ها و استعدادهای نیروی انسانی، زمین، ماشین‌آلات، پول، تجهیزات، زمان، مکان و... برای کسب بیشترین سود است [۳]. این بدان معنی است که نقصان در بهره‌وری عملاً سایر پارامترهای ارزیابی موفقیت پروژه‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. برای مثال، افت بهره‌وری باعث افزایش هزینه و زمان اجرای پروژه‌ها می‌شود [۴، ۵]. نقش به‌سزای بهره‌وری در ارزیابی موفقیت پروژه‌ها نشان از تأثیر معنی‌دار این پارامتر بر صنعت ساخت‌وساز دارد [۶]. از این‌رو، پیشینه پژوهش از دیرباز سعی در تبیین علل کاهش بهره‌وری و یافتن راهکارهای مؤثر برای مواجهه با این مسئله داشته است [۷-۱۹]. با وجود گستردگی مطالعات انجام‌شده روی عوامل مؤثر بر بهره‌وری، هنوز برخی از این عوامل به‌صورت اصولی بررسی نشده‌اند. یکی از علل کاهش بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز که با وجود گذشت بیش از سه دهه از پی بردن به سهم به‌سزای آن در کاهش بهره‌وری و ناکارایی پروژه‌های ساخت‌وساز، اخیراً در مرکز توجه پژوهشگران قرار گرفته کار خارج‌ازتوالی^۱ است. در یکی از تعاریف اولیه، کار خارج‌ازتوالی به فعالیتی اطلاق می‌شود که برخلاف روابط از پیش تعریف‌شده با فعالیت‌های قبلی خود شروع یا پایان یابد [۲۰]. به باور برخی صاحب‌نظران، کار خارج‌ازتوالی زمانی رخ می‌دهد که یک فعالیت پیش از تکمیل فعالیت قبلی خود شروع شود [۲۱]. با ترکیب این دو دیدگاه می‌توان کار خارج‌ازتوالی را فعالیت یا مجموعه فعالیت‌هایی دانست که خارج از توالی منطقی خود برنامه‌ریزی شده می‌شوند [۲۲].

از کار خارج از توالی به‌عنوان عاملی برای بیکاری منابع، از دست رفتن بهره‌وری، و تغییر در عملکرد یاد می‌شود [۲۳]. کار خارج‌ازتوالی می‌تواند آثاری جدی بر مسیر اصلی برنامه داشته

^۱ out-of-sequence (OOS) work

باشد و بهره‌وری پروژه را تحت‌الشعاع قرار دهد [۲۴، ۲۵]. بر اساس یافته‌های یک پیمایش، ۸۵ درصد کارشناسان معتقد به اثرات شدید کار خارج‌ازتوالی بر برنامه زمانی؛ ۷۴ درصد معتقد به اثرات شدید این پدیده بر بهره‌وری؛ و ۷۳ درصد معتقد به اثرات قابل‌توجه تا شدید آن بر هزینه پروژه بوده‌اند [۲۶]. طبق یافته‌های پژوهشی دیگر، افزایش ۵ درصدی در کار خارج‌ازتوالی به‌طور متوسط منجر به کاهش ۸/۵ درصدی بهره‌وری، افزایش ۱۰ درصدی هزینه‌های ساخت، و افزایش ۱۱ درصدی زمان برنامه‌ریزی‌شده برای ساخت می‌شود [۲۵]. این شواهد حکایت از آن دارد که با حداقل کردن کار خارج‌ازتوالی می‌توان از کاهش بهره‌وری و شکست در دیگر هدف‌های پروژه جلوگیری کرد. باوجوداین، کار خارج‌ازتوالی یکی از عوامل مؤثر بر بهره‌وری است که کم‌تر به صورت مستقل مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه، در حالی که بیش‌تر عوامل مؤثر بر بهره‌وری از منظر علل وقوع و روش‌های پیشگیری از وقوع مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند [برای نمونه، بنگرید به ۳۱-۲۷]، پیشینه پژوهش به‌تازگی مطالعه کار خارج‌ازتوالی را از منظر علل ریشه‌ای، محرک‌ها، آثار، اقدامات پیشگیرانه، و اقدامات کاهنده آثار مدنظر قرار داده است [۲۶].

موفقیت پروژه‌های ساخت‌وساز هم به اقدامات مدیران پروژه در مرحله اجرا و هم به تلاش‌های پیشگیرانه آنان در مرحله برنامه‌ریزی بستگی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که تلاش بیشتر مدیریت برای برنامه‌ریزی پیش از گرفتن مجوز اجرا موجب بهبود بهره‌وری در پروژه می‌شود [۲۲]. درنتیجه، اگر مدیران پیش از اجرای پروژه تحلیلی مناسب از نشانه‌های هشدار اولیه^۱ و علل^۲ وقوع کار خارج‌ازتوالی و درجه اثرگذاری آن‌ها بر بهره‌وری پروژه داشته باشند، می‌توانند با پیش‌بینی تمهیداتی در مرحله برنامه‌ریزی مانع از وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی و به تبع آن نقصان در بهره‌وری پروژه شوند. باوجوداین، دانش حاصل از پیشینه حکایت از توجه اندک پژوهشگران به این علائم و علل دارد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با تحلیل کمی اثر علائم هشدار اولیه و علل بروز کار خارج‌ازتوالی بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی سعی در ارائه بینشی مفید به مدیران پروژه برای مواجهه با این علائم و علل در مرحله برنامه‌ریزی دارد.

^۱ early warning signs
^۲ causes



۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱- کار خارج-از-توالی

کار خارج-از-توالی به رویدادی اشاره دارد که از نظر تعداد فعالیت‌ها یا از نظر هزینه انجام فعالیت‌ها خارج از توالی منطقی خود انجام شود [۳۲]. در کار خارج-از-توالی، پیمانکار مجبور به صرف‌نظر کردن از انجام برخی فعالیت‌ها می‌شود یا برای تطبیق با شرایط جدید و کوتاه کردن برنامه‌های کاری، توالی فعالیت‌ها را دوباره تنظیم می‌کند. این موضوع باعث تغییر در کارکنان و تجهیزات و به تبع آن کاهش بهره‌وری، افزایش هزینه‌ها، کاهش سود پیمانکاران و کاهش ارزش پروژه می‌شود [۳۳]. محدودیت‌های فیزیکی وقوع کار خارج-از-توالی را به امری متداول و اجتناب‌ناپذیر در پروژه‌های ساخت‌وساز تبدیل کرده است [۲۴، ۲۵]. البته، برخی رویدادهای خارج-از-توالی ناشی از عللی مشروع هستند و آثار منفی بر پروژه ندارند. مثلاً، ممکن است کارگران پیش از موعد تعیین‌شده برای ورود به کار، فعالیتی را در یک منطقه شروع کنند تا آشنایی بیشتری با جزئیات کار پیدا کنند. با این حال، غالب رویدادهای خارج-از-توالی آثاری منفی بر پروژه دارند و زی‌نفعان پروژه در صدد به حداقل رسانیدن یا کاهش این آثار هستند [۲۱].

۲-۲- علائم هشدار اولیه و علل کار خارج-از-توالی

پروژه‌های ساخت‌وساز اغلب طبق انتظار پیش نمی‌روند. دلایل متعددی احتمال شکست این پروژه‌ها را بالا می‌برند. البته، به جز موارد بسیار استثنایی، پروژه‌های ساخت‌وساز ناگهان شکست را تجربه نمی‌کنند. این پروژه‌ها پیش از آن‌که از ادامه کار باز بمانند، علائم ضعیفی از شکست را از خود بروز می‌دهند [۳۴]. در پیشینه، از این علائم با عنوان علائم هشدار اولیه یاد می‌شود. علامت هشدار اولیه، یک مشاهده، نشانه، پیام یا هر شکل دیگری از ارتباط است که به صورت بیان، اخطار، مدرک یا شاهدهی بر وجود یک مسئله مثبت یا منفی در آینده نزدیک یا تا حدی دور ظهور می‌یابد. علائم هشدار اولیه به مثابه سیگنال، پیشگو یا نشانه‌ای برای تحولات آینده است [۳۵]. این تعریف بر اساس ایده‌های آنسوف^۱ (۱۹۷۵) درباره سیگنال‌های ضعیف و پاسخ به غافلگیری‌های راهبردی بنا شده است [۳۶].

^۱ Ansoff

طبق ابوطالب^۱ و دیگران (۲۰۱۹)، نشانه‌های هشدار اولیه به شواهد یا رویدادهایی اشاره دارند که با وجود مرتبط بودن به کار خارج‌ازتوالی، مستقیماً در وقوع این پدیده نقش ندارند. این در حالی است که علل کار خارج‌ازتوالی به عوامل و رویدادهایی اشاره دارند که مستقیماً منجر به وقوع این پدیده می‌شوند [۲۶]. در حالی که نشانه‌های هشدار اولیه سیگنال‌هایی را درباره وقوع کار خارج‌ازتوالی در آینده‌ای نزدیک می‌دهند، علت‌ها می‌توانند با نقش‌آفرینی مستقیم در وقوع کار خارج‌ازتوالی منجر به نقصان در بهره‌وری پروژه شوند. برای نمونه، تأخیر یک تولیدکننده در تأمین به‌موقع مصالح به‌عنوان یک علت مستقیماً منجر به کار خارج‌ازتوالی، و به تبع آن، کاهش بهره‌وری پروژه می‌شود. اکنون فرض کنید به‌عنوان یک ارزیاب وارد واحد تأمین یک پروژه می‌شوید و با کارکنانی بی‌تجربه و ناآشنا با فرایند تأمین روبه‌رو می‌شوید. در این صورت، پیش‌بینی می‌کنید که به دلیل ناتوانی این افراد در انتخاب تأمین‌کننده واجد شرایط، پروژه به‌زودی در تأمین مصالح با مشکل روبه‌رو می‌شود، و عن‌قرب است که مدیر پروژه مجبور شود به دلیل در دسترس نبودن مصالح برخی کارها را به صورت خارج‌ازتوالی انجام دهد، و لذا بهره‌وری پروژه دچار نقصان می‌شود. در این مثال، به‌کارگیری کارکنان بی‌تجربه به‌عنوان یک نشانه هشدار اولیه برای وقوع کار خارج‌ازتوالی عمل می‌کند.

۲-۳- مرور پیشینه تجربی

کار خارج‌ازتوالی یکی از حوزه‌های پژوهشی بکر است که به‌رغم تأکید پیشینه بر سهم قابل‌توجه آن بر عدم کارایی پروژه‌های ساخت‌وساز و از دست رفتن بهره‌وری نیروی انسانی، علل ریشه‌ای، محرک‌ها، آثار، اقدامات پیشگیرانه، و اقدامات کاهنده آثار آن اخیراً در مرکز توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از سال ۲۰۱۹ به بعد، ابوطالب و دیگران با مطالعات دامنه‌دار خود مبنای نظری و تجربی قابل‌اتکایی را برای این زمینه مطالعاتی فراهم کرده‌اند. ایشان، در مطالعه‌ای ارزشمند، ۵۴ نشانه هشدار اولیه و ۸۸ علت کار خارج‌ازتوالی را شناسایی و در ۱۱ طبقه مدیریت تیم پروژه، مدیریت برنامه‌ریزی، مدیریت مهندسی، مدیریت اجرا، مدیریت مواد، مدیریت کیفیت، مدیریت ایمنی، مدیریت منابع، مدیریت تغییر، مدیریت راه‌اندازی و مدیریت امور حقوقی و تجاری طبقه‌بندی کردند [۲۶]. گروهی از پژوهشگران با محوریت این علائم و علل، سامانه‌ای را برای محاسبه و درجه‌بندی میزان ریسک در معرض پروژه‌های ساخت‌وساز

^۱ Abotaleb



طراحی کردند [۲۲]. باوجوداین، سامانه مذکور قادر به تعیین درجه اثرگذاری این نشانه‌ها و علل بر هدف‌ها و پارامترهای پروژه نبود. در مطالعه‌ای دیگر، ابراهیم^۱ و دیگران (۲۰۲۰) با تأکید بر کم‌توجهی پیشینه به تحلیل آثار کار خارج‌ازتوالی بر معیارهای عملکرد پروژه، پیمایشی را روی مدیران پروژه ترتیب دادند. این پژوهش ضمن نمایاندن همبستگی معنی‌دار کار خارج‌ازتوالی با معیارهای عملکرد پروژه در پنج حوزه بهره‌وری، هزینه، زمان، ایمنی، و کیفیت، بر لزوم تمرکز پژوهشگران بر نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی تأکید می‌کرد [۲۵]. در مطالعه‌ای دیگر، بهره‌گیری از رویکردی آمیخته برای شناسایی و ارزیابی علائم هشدار اولیه در فاز طراحی و مهندسی پروژه‌های بیمارستانی منجر به شناسایی و طبقه‌بندی ۶۲ علامت در چهار گروه ساختار و ابزارها، عواملی زمینه‌ای و شکلی، مدیریت، و عوامل ارتباطی و دارایی‌ها شد [۳۷]. البته، این مطالعه از تحلیل کمی اثر این علائم بر هدف‌ها و پارامترهای این نوع پروژه‌ها بازماند.

گروهی دیگر از مطالعات با ایده کمی کردن علائم هشدار اولیه در صدد طراحی سامانه‌های هشدار ریسک در پروژه‌ها برآمده‌اند. باوجوداین، عمده این مطالعات به دلیل چالش‌های ناشی از در دسترس بودن داده‌ها با محدودیت روبه‌رو هستند. برای نمونه، زی‌می و کی‌فان^۲ (۲۰۱۳) از دو معیار انحراف بودجه و انحراف معیار بودجه تحقیق‌یافته در طول زمان برای طراحی سامانه هشدار ریسک‌های هزینه در پروژه‌های ساخت‌وساز استفاده کردند. با تعریف حدود آستانه برای این دو معیار، امکان ارزیابی ریسک هزینه‌های پروژه در سه سطح ایمن، زیر ریسک، و ریسکی فراهم می‌شد [۳۸]. مطالعه‌ای دیگر سامانه‌ای را برای تعیین سطح هشدار ریسک ایمنی (ایمن، نسبتاً ایمن، نسبتاً خطرناک، و خطرناک) در پروژه‌های ساخت‌وساز بزرگراهی ارائه کرد. این سامانه ضمن تفکیک قصورهای عمده ایمنی و قصورهای تکراری ایمنی، برای هر سطح هشدار تعریفی عملیاتی و روشی برای کنترل ریسک ایمنی پیشنهاد می‌داد [۳۹]. گروهی از محققین پس از مرور پیشینه و مصاحبه با خبرگان، شش علامت هشدار اولیه را برای پروژه‌های حفاری در صنعت نفت و گاز شناسایی کردند. سپس، با لحاظ معیار در دسترس بودن داده‌ها، همبستگی علائم هشدار اولیه شناسایی‌شده را با دو معیار تأخیر زمانی و هزینه تحلیل کردند [۴۰]. در مطالعه‌ای دیگر، پژوهشگران با تمرکز بر هفت عامل مقیاس

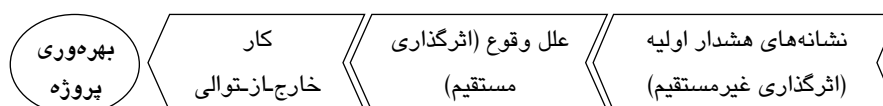
^۱ Ibrahim

^۲ Zi-mei and Ke-fan

پروژه، نوع پیمان، هزینه پروژه، توالی تغییرات، تأخیر در تأییدیه‌ها، تأخیر در تحویل مصالح، و نوع پروژه سعی در پیش‌بینی میزان تأخیر زمانی پروژه‌ها داشتند. بهره‌گیری از تحلیل رگرسیون چندگانه نشان داد که نوع پروژه (تجاری / عمرانی بزرگ) و هزینه پروژه (کم‌تر از ۵ میلیون دلار، بین ۵ تا ۱۰ میلیون دلار، بیش از ۱۰ میلیون دلار) به شکلی معنی‌دار میزان تأخیر زمانی پروژه را پیش‌بینی می‌کنند [۴۱]. در میان مطالعات متمرکز بر پیش‌بینی عملکرد پروژه از طریق کمی‌سازی علائم هشدار اولیه، برخی پژوهشگران کوشیده‌اند با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری به این هدف دست یابند (برای نمونه بنگرید به [۴۲-۴۴]). به‌مانند دیگر مطالعات متمرکز بر کمی‌سازی علائم هشدار اولیه، این مطالعات نیز به‌واسطه چالش در دسترس بودن داده‌ها با محدودیت روبه‌رو هستند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

با توجه به نقش کار خارج‌ازتوالی در کاهش بهره‌وری پروژه‌ها و با عنایت به این‌که آثار منفی این پدیده با دوراندیشی درباره نشانه‌های هشدار اولیه آن در مرحله برنامه‌ریزی به میزان قابل‌توجهی قابل‌کنترل است، پژوهش حاضر درصدد است تا با تحلیل اثر غیرمستقیم نشانه‌های هشدار اولیه و اثر مستقیم علل وقوع کار خارج‌ازتوالی بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی، به فهرستی از کلیدی‌ترین نشانه‌ها و علل وقوع کار خارج‌ازتوالی در این نوع پروژه‌ها دست یابد. شکل ۱ چارچوب مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: چارچوب مفهومی پژوهش (اقتباس از [۲۶])

اگرچه کار خارج‌ازتوالی می‌تواند بر تمامی هدف‌های پروژه اثر بگذارد، تمرکز این پژوهش بر سنجش اثر این پدیده بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز است. البته، به‌واسطه ماهیت چندبعدی مفهوم بهره‌وری مبنی بر بهره‌گیری و استفاده بهینه از توان و استعداد و مهارت نیروی انسانی، زمین، ماشین، پول، تجهیزات، زمان، و مکان در ارتقای پروژه [۳]، این پژوهش با تمرکز بر بهره‌وری تلویحاً سایر پارامترهای پروژه را نیز موردتوجه قرار می‌دهد. سرانجام، برای اطمینان از منطقی بودن قلمرو پژوهش و تحقق هدف مطالعه، این پژوهش بر تحلیل اثر

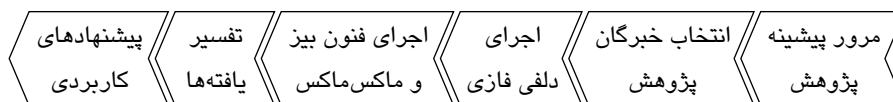


غیرمستقیم نشانه‌های هشدار اولیه و اثر مستقیم علل وقوع کار خارج‌ازتوالی صرفاً بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تمرکز دارد. انتظار می‌رود تحقق هدف اصلی پژوهش منوط به یافتن پاسخ برای پرسش‌های زیر باشد:

(۱) بارزترین نشانه‌های هشدار اولیه کار خارج‌ازتوالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی کدام‌اند؟ هر نشانه چقدر در ظهور علل کار خارج‌ازتوالی نقش دارد؛ و به طور غیرمستقیم چقدر بر بهره‌وری این نوع پروژه‌ها اثر می‌گذارد؟

(۲) بارزترین علل کار خارج‌ازتوالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی کدام‌اند؟ هر علت مستقیماً چقدر بر بهره‌وری این نوع پروژه‌ها اثر می‌گذارد؟

برای پاسخ به پرسش‌های بالا، از رویکردی توصیفی - پیمایشی پیروی می‌شود. جامعه نظری پژوهش را مهندسان و مدیران دو شرکت پیمانکاری کیسون و استراتوس تشکیل می‌دهند. نمونه‌گیری پژوهش به شیوه قضاوتی و با توجه به سطح تحصیلات، تجربه و سوابق کاری مرتبط، علاقه‌مندی به موضوع پژوهش، نداشتن محدودیت زمانی برای مشارکت، و در دسترس بودن انجام می‌شود. شکل ۲ گام‌های پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲: گام‌های پژوهش

ابتدا با مرور پیشینه فهرستی جامع از علل و نشانه‌های وقوع کار خارج‌ازتوالی شناسایی می‌شود. سپس، با نظرخواهی از نمونه پژوهش و به کمک فن دلفی فاز ۱ بارزترین نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع کار خارج‌ازتوالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تعیین می‌شوند. در ادامه، این نشانه‌ها و علل در قالب پرسشنامه‌ای دیگر در اختیار خبرگان پژوهش قرار می‌گیرد تا قضاوت‌های نظری ایشان درباره (۱) احتمال وقوع نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی (در مقیاس صفر تا ۱۰۰)؛ (۲) احتمال وقوع هر کدام از علل وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی در صورت مشاهده هر کدام از نشانه‌های هشدار اولیه (در مقیاس صفر تا ۱۰۰)؛ (۳) احتمال آسیب بهره‌وری پروژه در صورت ظهور هر کدام از علل وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی (در مقیاس صفر تا ۱۰۰)؛ و در نهایت، (۴) شدت آسیب بهره‌وری پروژه

از هر کدام از علل کار خارج‌ازتوالی (در مقیاس ۱ = خیلی کم تا ۵ = خیلی زیاد) کسب شود. پس از گردآوری داده‌ها، از فنون تصمیم‌گیری آماری برای تحلیل همبستگی نشانه‌های هشدار اولیه و علل بروز کار خارج‌ازتوالی؛ و سنجش درجه اثرگذاری هر نشانه/علت بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز استفاده می‌شود. چون در این پژوهش تصمیم‌گیری درباره ارجح‌ترین این نشانه‌ها/علل می‌تواند هم دارای درجه‌ای از ریسک و هم دارای درجه‌ای از اطمینان باشد، برای رعایت جانب احتیاط در قضاوت، یک‌بار با تأکید بر شرایط ریسک از قاعده بیز و یک‌بار با تأکید بر شرایط اطمینان از قاعده ماکس‌ماکس استفاده می‌شود؛ و سپس نسبت به ادغام نتایج دو رویکرد اقدام می‌شود.

۳-۱- دلفی فازی

دلفی فازی یکی از فنون تصمیم‌گیری گروهی است که برای مواجهه با نادقیقی قضاوت‌های ذهنی افراد، دلفی سنتی را با نظریه مجموعه‌های فازی تلفیق می‌کند. این پژوهش از شکل اصلاح‌شده دلفی فازی مبتنی بر اعداد فازی مثلثی استفاده می‌کند. از این شکل اصلاح‌شده در پژوهش‌های مختلفی استفاده شده است [۴۷-۴۸]. در ادامه، به پیروی از رجب و دیگران (۲۰۲۲)، گام‌های این فن معرفی می‌شود [۴۸].

در گام نخست، از پاسخ‌دهندگان خواسته می‌شود تا به کمک واژگان زبانی جدول ۱ درجه مرتبط بودن هر کدام از نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی مستخرج از پیشینه پژوهش را با پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تعیین کنند.

جدول ۱. متغیرهای زبانی برای ارزیابی درجه مرتبط بودن نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع کار

خارج‌ازتوالی با بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی

واژه زبانی	عدد فازی
خیلی کم	(۰/۰۰، ۰/۰۰، ۰/۲۵)
کم	(۰/۰۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
متوسط	(۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵)
زیاد	(۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱/۰۰)
خیلی زیاد	(۰/۷۵، ۱/۰۰، ۱/۰۰)

سپس، نوبت به محاسبه ارزش فازی هر نشانه/علت می‌رسد. فرض کنید درجه مرتبط بودن اعلام‌شده برای نشانه/علت i ($i = 1, \dots, m$) توسط پاسخ‌دهنده k ($k = 1, \dots, K$) یک عدد فازی



مثلی به صورت $\tilde{A}_{ij} = (l_i^k, m_i^k, u_i^k)$ باشد که در آن l_i^k حد پایین، m_i^k حد وسط و u_i^k حد بالای این عدد هستند. در این صورت، می‌توان ارزش فازی ادغامی قضاوت‌های پاسخ‌دهندگان برای هر نشانه/علت را به صورت یک عدد مثلی به صورت $\tilde{A}_i = (l_i, m_i, u_i)$ نشان داد و به کمک روابط (۱) تا (۳) به دست آورد.

$$l_i = \min(x_i^k), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (۱)$$

$$m_i = \left(\prod_{j=1}^n x_i^k \right)^{\frac{1}{n}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (۲)$$

$$u_i = \max(x_i^k), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (۳)$$

در روابط بالا، l_i حد پایین ارزش فازی نشانه/علت i و برابر با کوچک‌ترین مقدار تعیین‌شده برای این معیار توسط پاسخ‌دهندگان، m_i حد وسط ارزش فازی نشانه/علت i و برابر با میانگین هندسی نظرات پاسخ‌دهندگان، u_i حد بالای ارزش فازی نشانه/علت i و برابر با بزرگ‌ترین مقدار تعیین‌شده برای این نشانه/علت توسط پاسخ‌دهندگان، و x_i^k میانگین فازی درجه مرتبط بودن نشانه/علت i از منظر پاسخ‌دهنده k است.

غربال نشانه‌ها و علل مستلزم فازی‌زدایی از ارزش فازی درجه مرتبط بودن آن‌ها است. با وجود روش‌های مختلف برای فازی‌زدایی، در این پژوهش از رابطه (۴) برای این منظور استفاده می‌شود. در این رابطه، S_i ارزش صریح درجه مرتبط بودن نشانه/علت i است.

$$S_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (۴)$$

با در اختیار داشتن مقدار صریح هر نشانه/علت، نوبت به غربال آن‌ها براساس حد آستانه r می‌رسد. قاعده مشخصی برای تعیین حد آستانه وجود ندارد و معمولاً طبق نظر پاسخ‌دهندگان یا در شکلی محتاطانه، برابر با میانگین S_i ‌ها در نظر گرفته می‌شود. به هر روی، اگر $S_i \geq r$ باشد، یعنی نشانه/علت i از نظر خبره بارز است و بهتر است در تحلیل‌های بعدی باقی بماند. در غیر این صورت، نشانه/علت i از ادامه تحلیل‌ها کنار گذاشته می‌شود.

۳-۲- تحلیل بیز

تحلیل بیز رویکرد استنباطی منسجم و منحصربه‌فردی است که برای کاهش اثرات منفی نمونه‌های کوچک، از تجربیات گذشته - خواه شواهد تجربی خواه باورهای شخصی - برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر استفاده می‌کند و ضمن رعایت اصول احتمال، قادر به گنجاندن

الزامات یک تابع زیان در خود است [۴۹].

فرض کنید θ مقدار مجهول و مؤثر در تصمیم‌گیری و Θ مجموعه متناهی یا نامتناهی از همه θ های ممکن باشد ($\theta \in \Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_p\}$) [۵۰]. در آمار ریاضی θ مقداری عددی است که به آن پارامتر و به مجموعه Θ فضای پارامتر گفته می‌شود. همچنین فرض کنید $S = \{a_1, \dots, a_k\}$ مجموعه همه پیامدهای ممکن برای یک عمل باشد. در این پژوهش، θ مقدار نشانه‌های هشدار اولیه/علل و $a \in S$ پیامد هر نشانه/علت (میزان اثرگذاری بر بهره‌وری پروژه)، و S مجموعه تمامی نشانه‌ها/عللی است که امکان انتخاب هرکدام از آن‌ها وجود دارد و به آن فضای اعمال گفته می‌شود. همچنین ضابطه‌ای که بر اساس آن مشاهدات x به انتخاب عملی می‌انجامد را تابع عمل یا تصمیم می‌گوییم و آن را با نماد $\delta(x)$ نشان می‌دهیم. هر عمل یا تصمیم به پیامدی می‌انجامد که ارزیابی آن با مقیاس صحیح همیشه کار ساده یا ممکن نیست، زیرا برتری یک عمل بر عملی دیگر به عوامل گوناگونی بستگی دارد. در مسائل نظریه تصمیم، به ارزش و اهمیت نسبت داده شده به پیامد اعمالی که شانس در آن‌ها دخیل است در اصطلاح مطلوبیت گفته می‌شود. مطلوبیت همیشه برای عمل‌ها و وضعیت‌های طبیعی یکسان نیست اما به‌هرحال برای تعیین آن باید از اصول منطقی و معقولی پیروی کرد. هنگامی که با مشاهده x تصمیم یا عمل δ اتخاذ می‌شود، به دلیل عدم آگاهی از وضع طبیعت ممکن است با زیانی مالی یا غیرمالی روبه‌رو باشیم. فرض کنید بتوان این زیان را به صورت یک تابع دومتغیره نامنفی از θ و $\delta = \delta(x)$ در نظر گرفت. چنین تابعی که می‌تواند به صورت خطی، درجه‌دو، نمایی، یا -1 باشد تابع زیان نام دارد. در عمل، تابع زیان برابر با مطلوبیت منفی است؛ یعنی داریم:

$$L(\theta, \delta) = -U(\theta, \delta) \quad (5)$$

فرض کنید تابع زیان مناسبی برای مسئله تعریف شده باشد. هدف انتخاب تابع تصمیم $\delta = \delta(x)$ است که این زیان را کمینه کند. تابع زیان به برآورد $\delta(x)$ بستگی دارد که یک مقدار برای تابع تصمیم $\delta(x)$ ؛ یعنی $\delta = \delta(x)$ است. بنابراین، زیان به نمونه $x_1, \dots, x_n$ بستگی دارد. در این شرایط، نمی‌توان امیدوار بود که زیان هر نمونه ممکن کمینه باشد اما می‌توان متوسط زیان نمونه‌ها را کمینه کرد. بنابراین، اگر به جای انتخاب تابع تصمیمی که زیان را کمینه می‌کند بر انتخاب تابعی تمرکز شود که متوسط زیان را کمینه می‌کند، می‌توان وابستگی زیان به نمونه $x_1, \dots, x_n$ را از بین برد. برای نیل به این هدف، تابع تصمیم δ و تابع زیان $L(\theta, \delta)$ را در نظر



می‌گیریم که هر دو از قبل مشخص شده‌اند. اگر با مشاهده x ، تصمیم $\delta = \delta(x)$ اتخاذ شود و وضع طبیعت θ باشد، مقدار زیان برابر با مقدار $L(\theta, \delta(x))$ خواهد بود. با تبدیل x به $\underline{X}$ ، این عدد به متغیر تصادفی $L(\theta, \delta(\underline{X}))$ تبدیل می‌شود. در حقیقت، پیش از انجام آزمایش، زیان به صورت متغیری تصادفی است. لذا، برای محاسبه متوسط زیان باید امید ریاضی آن را حساب کرد. واضح است که این امید تابعی از θ است. چنین تابعی را تابع مخاطره می‌نامیم که برای هر تصمیم معین δ طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$R(\theta, \delta) = L(\theta, \delta(\underline{X})) \quad (6)$$

مباحث بالا در شرایط تصمیم‌گیری با داده مطرح است. در مواقعی، مانند پژوهش حاضر، با شرایطی مواجهیم که به دلیل فقدان یا عدم دسترسی به داده‌ها، ناچار به تصمیم‌گیری در شرایط بی داده هستیم. در تصمیم‌گیری‌های بی داده، تابع زیان و تابع مخاطره برابر فرض می‌شوند و برای مقایسه تصمیم‌ها، توابع ریسک آن‌ها باهم مقایسه می‌شود. اما چون توابع مخاطره وابسته به مقادیر مجهول θ هستند، این مقایسه همواره میسر نیست. لذا اگر بتوان تابع مخاطره را در یک عدد خلاصه کرد، مقایسه دو یا چند تصمیم راحت‌تر می‌شود. این مقایسه عددی، به چند نوع قاعده برای تصمیم می‌انجامد که یکی از آن‌ها قاعده بیز است. هدف از به کارگیری این قاعده، استفاده صحیح از اطلاعات قبلی است. در روش بیز، احتمالات پیشین ذهنی است؛ یعنی بر پایه تجربیات پاسخ‌دهندگان بنا شده است. اگر $R(\delta, \theta)$ تابع مخاطره برای δ و $\pi(\theta)$ چگالی پیشین θ باشد، آنگاه مخاطره بیز برای عمل δ با چگالی پیشین $\pi(\theta)$ عبارت است از:

$$r(\delta) = E(R(\delta, \theta)) \quad (7)$$

طبق رابطه (۷)، تابع مخاطره در عددی موسوم به مخاطره بیز فشرده می‌شود. درحالی‌که چگالی پیشین، باورهای شخصی را بر مبنای احتمال مقادیر θ درباره طبیعت قرار می‌دهد، به خودی خود نوعی تابع وزنی نیز برای تعیین مخاطره بیز محسوب می‌شود که می‌تواند به برخی θ ها در مقایسه با برخی دیگر وزن بیش‌تری دهد. اگر مخاطره را معیار تصمیم قرار دهیم، طبیعتاً تصمیمی بهتر است که از مخاطره بیز کم‌تری برخوردار باشد. البته، چون در این مطالعه پرمخاطره‌ها (یا زیان‌بارترها) در اولویت هستند، ارجح‌ترین علائم هشدار و علل وقوع کار خارج ازتوالی آن‌هایی هستند که از مخاطره بیز بیش‌تری برخوردار باشند.

۳-۳- قاعده ماکس-ماکس

ماکس-ماکس معیاری برای تصمیم‌گیرندگان خوش‌بین است. صرف‌نظر از تصمیم گرفته‌شده، پیروی از این رویکرد دو دیدگاه ضمنی را در پی دارد. نخست، این تصمیم بهترین پیامد ممکن را به دنبال دارد، و چه‌بسا ممکن است تصمیم‌گیرنده با پیروی از این رویکرد واقعاً به گزینه با بهترین نتیجه دست یابد. دوم، نباید چندان نگران ضعیف بودن نتیجه تصمیم بود. زیرا در هر صورت، گزینه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین بازدهی را دارا است. در مجموع، قاعده ماکس-ماکس توسط تصمیم‌گیرنده‌ای اتخاذ می‌شود که به دنبال اقدامی با بهترین پیامد ممکن است. البته، اگر نتیجه اقدامات به جای سود از جنس زیان باشد، تصمیم‌گیرنده دارای رویکرد ماکس-ماکس اقدامی را انتخاب می‌کند که دارای کم‌ترین زیان ممکن باشد [۵۱]. رابطه (۸) بیان ریاضی این گزاره را نشان می‌دهد [۵۲].

$$u^* = \min_{u \in U} \{ \max_{\theta \in \Theta} \{ L(u, \theta) \} \} \quad (8)$$

در رابطه بالا، u^* بهترین اقدام در میان اقدامات ممکن، $\min_{u \in U}$ عملگری است که عبارت داخل پرانتز را حداقل می‌کند، و $\{L(u, \theta)\}$ تابع زبانی است که مقدار زیان موردانتظار در صورت برگزیدن اقدام u را تحت پارامتر θ (در فضای پارامتر θ) نشان می‌دهد. چنان‌که اشاره شد، اگر زیان را معیار انتخاب یک اقدام قرار دهیم، طبیعتاً اقدامی بهتر خواهد بود که از زیان کم‌تری برخوردار است. چون در این مطالعه، زیان‌بارتها در اولویت بالاتر قرار دارند، ارجح‌ترین نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی آن‌هایی هستند که آسیب بیشتری به بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی وارد می‌کنند.

۴- یافته‌های پژوهش

نمونه‌گیری قضاوتی از جامعه نظری مطالعه به شناسایی ۱۶ پاسخ‌دهنده طبق جدول ۲ انجامید.

جدول ۲. خبرگان پژوهش

ردیف	شرکت متبوع	واحد سازمانی	تحصیلات	سابقه کار (سال)
۱	کیسون	مدیر پروژه	دکتری	۱۸
۲	کیسون	مدیر پروژه	دکتری	۱۸
۳	کیسون	معاون فنی	کارشناسی ارشد	۱۷
۴	کیسون	سرپرست طراحی معماری	کارشناسی ارشد	۱۶
۵	استراتوس	مدیر پروژه	دکتری	۱۷



ردیف	شرکت متبوع	واحد سازمانی	تحصیلات	سابقه کار (سال)
۶	استراتوس	کارشناسی برنامه‌ریزی و کنترل پروژه	کارشناسی ارشد	۱۷
۷	کیسون	مدیر کنترل کیفیت	دکتری	۱۶
۸	کیسون	معاون برنامه‌ریزی و توسعه	دکتری	۱۵
۹	استراتوس	مسئول کنترل کیفیت مکانیکال	کارشناسی ارشد	۱۵
۱۰	کیسون	سرپرست کنترل کیفیت	کارشناسی ارشد	۱۵
۱۱	کیسون	سرپرست دفتر فنی	کارشناسی	۱۴
۱۲	کیسون	سرپرست امور قراردادهای	کارشناسی ارشد	۱۲
۱۳	استراتوس	مسئول تدارکات	کارشناسی	۱۲
۱۴	استراتوس	سرپرست کارگاه	کارشناسی	۱۰
۱۵	کیسون	دفتر مدیریت پروژه	کارشناسی	۱۰
۱۶	استراتوس	کارشناس برنامه‌ریزی و کنترل پروژه	کارشناسی ارشد	۱۰

۴-۱- تعیین مرتبط‌ترین نشانه‌ها و علل

به دلیل جامعیت فهرست ارائه‌شده برای نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی [۲۶]، فهرست مزبور در مرکز تحلیل‌های این مطالعه قرار گرفت. لذا، از پاسخ‌دهندگان خواسته شد تا به کمک طیف منعکس‌شده در جدول ۱، درجه بارز بودن ۵۴ نشانه هشدار اولیه و ۸۸ علت کار خارج‌ازتوالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی را مشخص کنند. با اجرای محاسبات در نرم‌افزار اکسل طبق روابط (۱) تا (۴)، و انتخاب حد آستانه $\alpha = 0.05$ ، نهایتاً ۱۰ نشانه و ۲۰ علت به‌عنوان بارزترین‌ها احصا شد. جدول‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل را نشان می‌دهند.

جدول ۳: پالایش نشانه‌های هشدار اولیه وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی (حد آستانه $\alpha = 0.05$)

کد	نشانه	بیشترین	میانگین	کم‌ترین	مقدار قطعی	تصمیم
S۰۱	جابه‌جایی کارکنان عملیات از جلسات طراحی به ساخت	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۰۲	توقف انتشار کلاس‌های بنیادین صنعت (IFC) در حین کارهای عمرانی و سازه‌ای	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۰۳	برنامه‌ریز با تجربه برنامه‌ریزی در انواع مختلف پروژه	۶/۴۷	۴/۳۳	۲/۲۰	۴/۵۸	حذف
S۰۴	گسترش خواسته‌های گذشته مشتری توسط برنامه زمانی	۶/۷۹	۴/۶۹	۲/۵۰	۴/۵۳	حذف
S۰۵	درصد بالای دوباره‌کاری	۹/۰۰	۶/۶۲	۴/۳۳	۶/۶۵	انتخاب
S۰۶	جلسه هفتگی پروژه به جای اطلاعات بر روی اعداد متمرکز است.	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۰۷	ناتوانی اعضای تیم در ارائه اطلاعات مهم درباره کارهای هفته آینده	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
S۰۸	جلسات هفتگی به جای بحث روی امور برنامه‌ریزی‌شده یا موقعیت‌های برنامه‌ریزی نشده، بر ارزیابی کل کار متمرکز دارند.	۶/۸۹	۴/۹۵	۲/۶۰	۴/۵۳	حذف
S۰۹	تصمیم‌گیری‌های دیرنگام در مواجهه با تغییرات	۹/۰۰	۷/۲۶	۴/۶۷	۶/۹۸	انتخاب
S۱۰	بالا بودن تعداد درخواست بررسی‌نشده کارکنان	۶/۷۹	۴/۹۵	۲/۵۰	۴/۵۳	حذف
S۱۱	پذیرش ریسک‌های مهندسی با تغییر رویه‌ها و فرایندهای کاری استاندارد	۶/۸	۴/۹۵	۲/۱۶	۴/۵۳	حذف
S۱۲	درصد بالا یا رویه‌شد فعالیت‌های کلیدی در برنامه زمانی	۶/۶۸	۴/۹۸	۲/۰۲	۴/۵۴	حذف
S۱۳	عدم انطباق مشخصات اعلام‌شده توسط مشتری با کدهای فعلی	۶/۸۰	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف

کد	نشانه	بیشترین	میانگین	کم‌ترین	مقدار قطعی	تصمیم
S۱۴	استفاده زودهنگام از شناوری هنگام تدوین برنامه زمانی	۶/۷۹	۴/۵۵	۲/۵۰	۴/۵۳	حذف
S۱۵	گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه (در حوزه اجرا)	۹/۰۰	۷/۵۲	۴/۳۳	۶/۹۵	انتخاب
S۱۶	عدم پشتیبانی تصمیمات پروژه از طرح اصلی برای اجرای ایمن	۶/۷۹	۴/۹۵	۲/۵۰	۴/۵۳	حذف
S۱۷	استفاده تیم ساخت از نقشه‌های قدیمی یا طراحی‌های متوقف‌شده	۶/۸	۴/۴۵	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۱۸	ناکافی بودن کارکنان مدیریت کیفیت	۶/۸۵	۴/۷۳	۲/۷۵	۴/۵۳	حذف
S۱۹	عقب بودن داده‌های فروشنده و بازرسی‌ها از برنامه زمانی	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
S۲۰	توقف‌ها در ساخت	۶/۸۰	۴/۷۵	۲/۷۰	۴/۵۳	حذف
S۲۱	درصد بالای گزارش‌های عدم انطباق	۶/۷۹	۴/۶۴	۲/۵۰	۴/۵۳	حذف
S۲۲	سفارش‌های خرید دیرهنگام	۸/۶۷	۵/۶۷	۲/۰۰	۵/۴۴	انتخاب
S۲۳	کمبود متخصصین ایمنی	۶/۸۰	۴/۵۱	۲/۱۰	۴/۵۳	حذف
S۲۴	افزایش تدریجی منحنی بار نیروی کار	۷/۳۳	۴/۱۷	۲/۰۰	۴/۴۲	حذف
S۲۵	حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی	۹/۰۰	۶/۹۳	۴/۶۷	۶/۸۷	انتخاب
S۲۶	نامطلوب بودن روندهای عملکرد ایمنی	۶/۵۰	۴/۹۵	۳/۴۰	۴/۹۲	حذف
S۲۷	پرداخت دستمزدهای بالاتر در پروژه‌های دیگر	۷/۳۳	۴/۱۷	۲/۰۰	۴/۵۵	حذف
S۲۸	عدم پشتیبانی تصمیمات پروژه از برنامه اصلی	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۸	حذف
S۲۹	عدم حضور نماینده مشتری در تیم پروژه	۶/۸	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۳۰	ویرایش‌های زیاد در طراحی	۸/۳۳	۵/۷۴	۱/۳۳	۵/۱۳	انتخاب
S۳۱	بروز زودهنگام مسائل هماهنگی در همان مرحله آغازین آماده‌سازی سایت	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۷	حذف
S۳۲	شکایت همسایه‌ها از پروژه در همان مرحله آغازین بسیج امکانات و منابع	۷/۰۰	۴/۶۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
S۳۳	افزایش استخدام‌های محلی	۷/۵۰	۴/۹۵	۲/۴۰	۴/۵۰	حذف
S۳۴	استفاده زودهنگام از شناوری	۹/۰۰	۶/۹۳	۴/۶۷	۶/۸۷	انتخاب
S۳۵	خروج کارکنان به دلیل پیدا کردن فرصت‌های بهتر	۷/۰۰	۴/۶۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
S۳۶	تأخیر در سفارش‌گذاری تجهیزات اصلی	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۳	حذف
S۳۷	افزایش تعداد پروژه‌های در دست‌اقدام در منطقه	۶/۸۰	۴/۷۵	۲/۷۰	۴/۵۳	حذف
S۳۸	ضعیف بودن جلسات برنامه‌ریزی‌شده نشست آغاز کار	۷/۲۴	۴/۱۸	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۳۹	تمرکز تیم پروژه بر نمایش اعداد خوب به‌جای در پیش گرفتن اقدامات پیشگیرانه	۹/۰۰	۶/۹۳	۴/۶۷	۶/۸۷	انتخاب
S۴۰	جابه‌جایی کارکنان عملیاتی در حین بازبینی مدل‌های به‌کارگیری	۶/۸۰	۴/۷۶	۲/۷۲	۴/۵۳	حذف
S۴۱	شروع دیرهنگام فعالیت‌های پیش از راه‌اندازی	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۵	حذف
S۴۲	نبود شخصی معین برای پیگیری مجوزها	۶/۸	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۴۳	بالا و پایین شدن روندهای مقادیر	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۷	حذف
S۴۴	تأکید بیش‌ازحد روی برنامه‌ریزی یا مدیریت جریان وجوه نقد	۸/۶۰	۴/۸۰	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
S۴۵	ناکافی بودن گزارش‌ها از وضعیت اخذ مجوزها	۸/۰۰	۴/۶۷	۱/۵۰	۴/۸۹	حذف
S۴۶	درخواست مجوز در حین طراحی تفصیلی	۶/۸۶	۴/۷۸	۲/۷۰	۴/۵۳	حذف
S۴۷	ضعف برنامه‌ریزی برای گذار از مرحله ساخت به مرحله راه‌اندازی	۸/۰۰	۵/۸۱	۳/۰۰	۵/۶۰	انتخاب
S۴۸	دشواری در کسب ورودی‌های سیستم	۷/۰۰	۴/۶۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
S۴۹	گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه (در حوزه مدیریت منابع)	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
S۵۰	فقدان سامانه‌های شفاف مبتنی بر فرایندهای گردش مالی	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
S۵۱	استمرار بحث و جدل درباره الزامات خاص فرایندی	۶/۰۰	۴/۶۶	۴/۰۰	۴/۹۲	حذف
S۵۲	بالا بودن فرکانس تغییرات	۶/۰۸	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
S۵۳	تأخیر در طراحی مشخصه‌ها	۶/۶۸	۴/۹۲	۳/۳۴	۴/۹۷	حذف
S۵۴	وجود نسخه‌های مختلف از نقشه‌ها در سایت	۸/۰۰	۶/۶۳	۴/۰۰	۵/۵۰	انتخاب



جدول ۴: پالایش علل وقوع رویدادهای خارج‌ازتوالی (حد آستانه = ۰/۵)

کد	علت	بیشترین میانگین	کمترین	مقدار قطعی	تصمیم
C۰۱	ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه	۹/۰۰	۶/۹۵	۱/۰۰	انتخاب
C۰۲	نبود منابع مالی کافی برای پروژه	۸/۶۷	۵/۷۶	۱/۰۰	انتخاب
C۰۳	تحقق رویدادهای زمانی مهم در پروژه با انجام ناقص فعالیت‌ها	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	حذف
C۰۴	مدیریت ضعیف تغییرات در مشخصات و/یا نقشه‌ها	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	حذف
C۰۵	عدم برخورداری از تجربه عملی در حین برنامه‌ریزی	۹/۰۰	۷/۰۷	۴/۰۰	انتخاب
C۰۶	نامناسب بودن اندازه تیم	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۰۷	عدم توجه کافی به برگزاری جلسات دوره‌ای	۶/۸	۴/۹۵	۲/۰۰	حذف
C۰۸	اثرات اجتماعی و سیاسی بر تیم پروژه	۷/۹	۴/۷۱	۱/۰۰	حذف
C۰۹	فشار برنامه زمانی	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	حذف
C۱۰	محدودیت‌های جریان وجه نقد	۷/۳۹	۴/۱۷	۲/۰۰	حذف
C۱۱	تأخیر در پاسخ به درخواست برای اطلاعات (RFI)	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۱۲	خطاها یا حذفیات	۷/۲۳	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۱۳	سرعت دادن به برنامه با هدف برآوردن خواسته‌های کارفرما	۹/۰۰	۷/۹۳	۶/۰۰	انتخاب
C۱۴	شفافیت پایین قلمرو پروژه حین برنامه‌ریزی	۶/۶	۴/۹۵	۲/۰۰	حذف
C۱۵	واقعی نبودن زمان پیش‌بینی‌شده برای فعالیت‌ها	۹/۰۰	۶/۲۹	۵/۷۶	انتخاب
C۱۶	عدم برخورداری تیم پروژه از تجربه لازم نسبت به نوع و اندازه پروژه	۶/۳۰	۴/۳۰	۲/۳۰	حذف
C۱۷	عدم هماهنگی در تیم پروژه	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	حذف
C۱۸	ضعف در رهبری	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	حذف
C۱۹	درگیری دیر هنگام گروه راه‌اندازی	۹/۰۰	۷/۰۲	۴/۶۷	انتخاب
C۲۰	ناقص بودن برنامه راه‌اندازی و بهره‌برداری	۷/۲۳	۴/۱۷	۲/۰۰	حذف
C۲۱	تأخیر گروه راه‌اندازی در درگیر شدن با پروژه	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۲۲	تلقی از برنامه‌ریزی به عنوان اقدامی اجباری و نه اقدامی با ارزش‌افزوده	۷/۲۳	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۲۳	تأخیر کارفرما در تأیید برنامه زمانی استخدام کارکنان	۷/۶۷	۴/۷۱	۱/۰۰	حذف
C۲۴	طرح‌های ناهماهنگ	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	حذف
C۲۵	تأمین ناقص یا با تأخیر اقلام توسط کارفرما	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	حذف
C۲۶	ناکافی بودن اقدامات مدیریت ایمنی	۷/۶۷	۴/۷۱	۱/۰۰	حذف
C۲۷	عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان	۹/۰۰	۷/۷۶	۵/۶۷	انتخاب
C۲۸	بالا بودن درصد غیبت کارکنان	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	حذف
C۲۹	مسائل اجتماعی، معارض و مکان پروژه	۷/۴۳	۴/۱۷	۲/۰۰	حذف
C۳۰	ضعیف بودن طراحی چیدمان سایت	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	حذف
C۳۱	تأخیر در پرداخت‌های مؤثر بر معاملات پایین‌دستی	۹/۰۰	۵/۰۰	۳/۶۷	انتخاب
C۳۲	تعطل کارفرما در تأیید اقلام قابل تحویل	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	حذف
C۳۳	وجود خطا یا لحاظ نکردن موارد مهم در اسناد ساخت‌وساز توسط	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	حذف
C۳۴	حضور کارکنانی که کار کافی برای انجام ندارند (کار تکه‌ای)	۶/۵۰	۴/۵۰	۲/۵۰	حذف
C۳۵	عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان حین برنامه‌ریزی پروژه	۹/۰۰	۶/۳۸	۳/۳۳	انتخاب
C۳۶	تغییرات در مقادیر	۷/۳۳	۴/۱۷	۲/۰۰	حذف
C۳۷	مدیریت ضعیف ارتباطات با پیمانکاران فرعی برای به‌روزرسانی برنامه زمانی	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۳۸	ملاحظات مربوط به عقد قرارداد با نیروی کار ماهر و متخصص	۷/۲۳	۴/۷۶	۳/۰۰	حذف
C۳۹	طرح‌بندی ضعیف سایت	۹/۰۰	۵/۸۸	۲/۰۰	انتخاب

کد	علت	بیشترین	میانگین	کمترین	مقدار قطعی	تصمیم
C۴۰	تغییرات بیش‌ازحد در حین ساخت	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
C۴۱	تغییرات بیش‌ازحد ابلاغی از سوی کارفرما	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
C۴۲	فقدان هماهنگی در تغییرات رخ داده در فرایند سفارش‌ها	۶/۴۷	۴/۳۳	۲/۲۰	۴/۵۸	حذف
C۴۳	تاخیر در کسب اطلاعات تأمین‌کننده	۹/۰۰	۶/۴۵	۳/۳۳	۶/۲۶	انتخاب
C۴۴	تغییر دیر هنگام در مشخصات یا مصالح ساخت	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۴۵	فقدان ورودی ساخت‌پذیر، قابل‌انجام، قابل راه‌اندازی، یا قابل بهره‌برداری	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
C۴۶	تغییر در برنامه گردش وجوه	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۴۷	کمبود نیروی کار ماهر	۸/۳۳	۵/۷۴	۱/۳۳	۵/۱۳	انتخاب
C۴۸	همپوشانی بیش‌ازحد فعالیت‌های برنامه‌ریزی‌شده	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۷	حذف
C۴۹	ناکافی بودن برنامه اجرای پروژه	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
C۵۰	تاخیر یا عدم ارائه ورودی از جانب پیمانکاران فرعی درباره توالی هدف‌ها	۷/۳۳	۴/۱۷	۲/۰۰	۴/۵۰	حذف
C۵۱	الزامات محدودکننده یا به‌تأخیر اندازنده (مانند ملاحظات محیط‌زیستی)	۶/۹۰	۴/۸۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۵۲	شکست در شناسایی الزامات زمانی برای مرحله پیش‌راه‌اندازی	۷/۲۳	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۵	حذف
C۵۳	شناسایی نامطمئن کمیت‌ها در فرآیند برنامه‌ریزی	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
C۵۴	فشار مالی	۹/۰۰	۶/۶۲	۴/۳۳	۶/۶۵	انتخاب
C۵۵	تسطیح نامناسب منابع	۶/۷۰	۴/۴۰	۲/۱۰	۴/۵۴	حذف
C۵۶	عدم اطمینان درباره نرخ‌های بهره‌وری نیروی کار	۶/۲۰	۴/۲۰	۲/۲۰	۴/۵۶	حذف
C۵۷	تغییر در طراحی	۹/۰۰	۷/۵۷	۵/۰۰	۷/۱۹	انتخاب
C۵۸	طراحی دیر هنگام موارد ارسالی	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۵۹	مشوق‌ها یا جرائم تجاری	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
C۶۰	نامناسب بودن روند کیفیت	۶/۶۷	۴/۹۵	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۶۱	برنامه‌ریزی ناکافی برای اقدامات ایمنی مورد نیاز و الزامات سایت	۸/۰۰	۵/۸۱	۳/۰۰	۵/۶۰	انتخاب
C۶۲	ناکافی بودن سیستم ردیابی مواد	۶/۶۷	۴/۳۳	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۶۳	ناکافی بودن تجهیزات حمل عمودی (مانند جرثقیل، بالابر)	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۷	حذف
C۶۴	ذخیره‌سازی نامناسب مواد	۸/۶۷	۴/۶۷	۱/۶۷	۴/۸۹	حذف
C۶۵	تدارکات و حمل‌ونقل نامناسب	۶/۲۰	۴/۲۰	۲/۲۰	۴/۵۶	حذف
C۶۶	تأیید دیر هنگام ارسالی‌ها (مانند نقشه‌های فروشگاه)	۹/۰۰	۶/۵۲	۲/۰۰	۵/۸۴	انتخاب
C۶۷	ناکافی بودن مشخصه‌های کیفی برای ساخت یا بازرسی تأمین‌کننده	۶/۰۰	۴/۵۰	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۶۸	هماهنگی ناکافی در دسترسی به سایت	۶/۶۷	۴/۳۳	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۶۹	ادغام ضعیف ملاحظات ایمنی در طراحی	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۰	حذف
C۷۰	جابه‌جایی کارکنان	۶/۸۰	۴/۴۰	۲/۰۰	۴/۵۳	حذف
C۷۱	هم‌زمانی انجام فعالیت‌های متعدد در سایت	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۷	حذف
C۷۲	نظارت و به‌روزرسانی ضعیف برنامه زمانی	۸/۳۳	۶/۱۰	۳/۶۷	۶/۰۳	انتخاب
C۷۳	عدم پایه‌گذاری مناسب زنجیره فرماندهی پروژه	۶/۲۰	۴/۲۰	۲/۲۰	۴/۵۶	حذف
C۷۴	دور زدن نقاط مشمول بازرسی الزامی	۶/۶۸	۴/۳۴	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۷۵	به‌موقع نبودن بسیج منابع و امکانات	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۷	حذف
C۷۶	بی‌ثباتی سیاسی یا مسائل امنیتی	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
C۷۷	استراتژی ضعیف برای تدارکات	۷/۳۳	۴/۱۷	۲/۰۰	۴/۵۰	حذف
C۷۸	تعلل در تغییر قلمرو درحالی‌که این تغییر نیازمند تجهیزات یا قرایندهای جدید است.	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۷۹	خط میثاق نامناسب در شروع اجرای پروژه	۷/۲۳	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۵	حذف
C۸۰	فقدان جریان قراردادی منسجم به لایه‌های زیرین	۹/۰۰	۷/۵۲	۴/۳۳	۶/۹۵	انتخاب



کد	علت	بیشترین	میانگین	کمترین	مقدار قطعی	تصمیم
C۸۱	ازدحام در سایت	۷/۰۰	۴/۷۶	۳/۰۰	۴/۹۲	حذف
C۸۲	مدیریت ناکافی ریسک‌ها	۹/۰۰	۴/۶۷	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف
C۸۳	بیش‌ازحد بودن درخواست برای اطلاعات (RFI) از سوی پیمانکاران	۶/۶۷	۴/۳۳	۲/۰۰	۴/۵۴	حذف
C۸۴	بازرسی‌های ناکافی از سایت (عدم رعایت برنامه‌های بازرسی)	۹/۰۰	۷/۲۶	۴/۶۷	۶/۹۸	انتخاب
C۸۵	عدم استفاده مستمر از فرآیندها و رویه‌ها	۶/۰۰	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۵۵	حذف
C۸۶	عدم پذیرش تغییرات در سفارش‌ها به دلیل تحمیل شدن هزینه و زمان اضافی	۹/۰۰	۵/۲۹	۲/۰۰	۵/۴۳	انتخاب
C۸۷	به‌موقع نبودن به‌روزرسانی قرارداد با توجه به تغییرات رخ داده در کار	۶/۶۷	۴/۹۰	۳/۳۳	۴/۹۷	حذف
C۸۸	ناکافی بودن یا تأخیر در کسب اطلاعات تأمین‌کننده	۸/۰۰	۴/۵۰	۱/۰۰	۴/۸۹	حذف

۴-۲- رتبه‌بندی نشانه‌ها و علل

پس از پالایش نشانه‌ها و علل، نوبت به رتبه‌بندی آن‌ها رسید. بدین منظور، از پاسخ‌دهندگان خواسته شد ضمن بیان احتمال وقوع هر نشانه و علت، عنوان دارند که هر نشانه با چه احتمالی می‌تواند زمینه‌ساز وقوع هر علت باشد، و هر علت با چه احتمال و شدتی می‌تواند موجب آسیب به بهره‌وری پروژه شود. ضمناً از میانگین حسابی برای ادغام نظرات K پاسخ‌دهنده ($K = 1, \dots, k$) به شرح روابط (۹) تا (۱۳) استفاده شد.

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^K p_i^k}{k} \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$P_j = \frac{\sum_{k=1}^K p_j^k}{k} \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$P_{j|i} = \frac{\sum_{k=1}^K p_{j|i}^k}{k} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$P_{L_j} = \frac{\sum_{k=1}^K p_{L_j}^k}{k} \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$S_{L_j} = \frac{\sum_{k=1}^K s_{L_j}^k}{k} \quad j = 1, \dots, n \quad (13)$$

در رابطه (۹)، p_i^k احتمال وقوع نشانه i از منظر پاسخ‌دهنده k ، و P_i نظر ادغامی پاسخ‌دهندگان درباره احتمال وقوع این نشانه است. در رابطه (۱۰)، p_j^k احتمال وقوع علت j از منظر پاسخ‌دهنده k ، و P_j نظر ادغامی پاسخ‌دهندگان درباره احتمال وقوع این علت است. به‌عنوان مثال، برای ادغام نظرات پاسخ‌دهندگان درباره احتمال وقوع علت C۰۱ (ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه) از رابطه (۹)؛ و برای ادغام نظرات پاسخ‌دهندگان درباره احتمال مشاهده نشانه S۲۵ (حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی) از رابطه (۱۰) به شرح زیر استفاده شد. نتایج این تحلیل در جدول‌های ۵ و ۶ منعکس شده‌اند.

$$P_{\gamma_0} = (0/046 + 0/003 + 0/160 + 0/082 + 0/019 + 0/245 + 0/111 + 0/184 + 0/213 + 0/440 + 0/293 + 0/025 + 0/016 + 0/101 + 0/138 + 0/105) \div 16 = 0/136$$

$$P_{\gamma_1} = (0/047 + 0/025 + 0/103 + 0/106 + 0/044 + 0/064 + 0/052 + 0/113 + 0/080 + 0/084 + 0/065 + 0/037 + 0/093 + 0/106 + 0/044 + 0/094) \div 16 = 0/072$$

جدول ۵: احتمال مشاهده نشانه‌های هشدار اولیه در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی (ادغام نظر خبرگان)

نشانه	S۲۵	S۳۹	S۳۴	S۳۰	S۱۵	S۲۲	S۰۵	S۰۹	S۴۷	S۵۴
P_i	۰/۱۳۶	۰/۰۵۲	۰/۱۰۹	۰/۱۱۵	۰/۱۶۴	۰/۱۱۵	۰/۰۸۲	۰/۱۳۳	۰/۰۷۰	۰/۰۲۴

جدول ۶: احتمال وقوع علل کار خارج‌ازتوالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی (ادغام نظر خبرگان)

علت	C۰۱	C۰۲	C۱۵	C۳۵	C۰۵	C۵۷	C۴۳	C۷۲	C۶۶	C۱۳	C۵۴	C۳۹	C۲۷	C۸۴	C۶۱	C۴۷	C۸۶	C۱۹	C۳۱	C۸۰
P_j	۰/۰۷۲	۰/۰۸۷	۰/۰۸۶	۰/۰۷۱	۰/۰۶۳	۰/۰۷۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۰/۰۳۲	۰/۰۴۹	۰/۰۸۰	۰/۰۳۷	۰/۰۳۷	۰/۰۶۳	۰/۰۱۳	۰/۰۴۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۲	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵

در رابطه (۱۱)، $p_{j|i}^k$ احتمال وقوع علت j پس مشاهده نشانه i از منظر پاسخ‌دهنده k ، و $\bar{P}_{j|i}$ نظر ادغامی پاسخ‌دهندگان درباره احتمال وقوع علت j پس از مشاهده نشانه i است. مثلاً، برای ادغام نظرات پاسخ‌دهندگان درباره احتمال وقوع علت C۰۱ (ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه) پس از مشاهده نشانه S۲۵ (حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی) از رابطه (۱۱) به شرح زیر استفاده شد. نتایج تحلیل در جدول ۷ منعکس شده است.

$$P_{\gamma_{125}} = (1/00 + 0/55 + 0/50 + 0/45 + 0/50 + 0/70 + 0/60 + 0/50 + 0/80 + 0/65 + 0/45 + 0/55 + 0/60 + 0/65 + 1/00 + 0/50) \div 16 = 0/62$$

جدول ۷: احتمال وقوع علل کار خارج‌ازتوالی در صورت مشاهده هرکدام از علائم هشدار اولیه (ادغام نظر خبرگان)

علت j	نشانه i		S۲۵		S۳۹		S۳۴		S۳۰		S۱۵		S۲۲		S۰۵		S۰۹		S۴۷		S۵۴	
	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ
C۰۱	۰/۱۷	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۲۷	۰/۴۰	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۲۶	۰/۲۶
C۰۲	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۲۳	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۱۹	۰/۱۹
C۱۵	۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۴۷	۰/۲۴	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۶۸	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۲۰	۰/۴۷	۰/۲۴	۰/۵۲	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۴۶	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۱۸
C۳۵	۰/۶۱	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۶۲	۰/۲۲	۰/۶۷	۰/۲۰	۰/۵۵	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۲۴	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۲۲
C۰۵	۰/۵۳	۰/۲۵	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۲۰	۰/۵۰	۰/۲۸	۰/۵۸	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۱۹	۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۵۹	۰/۲۹	۰/۴۴	۰/۱۳	۰/۴۳	۰/۱۹	۰/۱۹
C۵۷	۰/۴۷	۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۱۶	۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۵۴	۰/۱۹	۰/۵۸	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۴۹	۰/۱۷	۰/۶۲	۰/۲۴	۰/۲۴
C۴۳	۰/۴۴	۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۲۹	۰/۴۷	۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۲۱	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۴۸	۰/۲۸	۰/۲۸
C۷۲	۰/۴۷	۰/۲۳	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۲۳	۰/۳۹	۰/۲۴	۰/۴۸	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۴۶	۰/۲۳	۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۲۵
C۶۶	۰/۶۱	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۵۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۲۴	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۲۵
C۱۳	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۲۷	۰/۴۰	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۵۶	۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۲۵
C۵۴	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۳۹	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۲۶	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۴۳	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۲۴
C۳۹	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۲۲



نشانه i	علت j	S۲۵	S۲۹	S۳۴	S۳۰	S۱۵	S۲۲	S۰۵	S۰۹	S۴۷	S۰۴
میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ	میانگین	σ
C۲۷	۰/۴۷	۰/۳۵	۰/۵۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۲۳	۰/۴۰	۰/۲۲	۰/۲۸
CA۴	۰/۵۷	۰/۳۰	۰/۶۵	۰/۲۸	۰/۳۷	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۴۳
C۶۱	۰/۵۸	۰/۲۳	۰/۶۸	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۴۳
C۴۷	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۲۸	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۵۰	۰/۲۴	۰/۴۶
CA۷	۰/۳۷	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۴۶
C۱۹	۰/۵۰	۰/۲۰	۰/۴۹	۰/۱۶	۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۲۰	۰/۴۶	۰/۳۸
C۲۱	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۱۷	۰/۲۸
CA۰	۰/۵۰	۰/۲۲	۰/۴۳	۰/۲۰	۰/۳۸	۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۲۰	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۴۴

توجه: معقول بودن مقادیر انحراف معیار قضاوت‌های پاسخ‌دهندگان نشان از همگرایی و روایی نظرات ایشان دارد.

سرانجام، در رابطه (۱۲)، احتمال آسیب بهره‌وری پروژه به دلیل وقوع علت j از منظر پاسخ‌دهنده k ، و $\bar{P}_{L_j}$ نظر ادغامی پاسخ‌دهندگان درباره احتمال آسیب بهره‌وری پروژه به دلیل وقوع علت j است. همچنین، در رابطه (۱۳)، شدت آسیب بهره‌وری پروژه به دلیل وقوع وقوع علت j از منظر پاسخ‌دهنده k ، و S_{L_j} نظر ادغامی پاسخ‌دهندگان درباره شدت آسیب بهره‌وری پروژه به دلیل وقوع علت j است. به عنوان مثال، برای ادغام نظرات خبرگان درباره احتمال آسیب بهره‌وری پروژه به دلیل وقوع علت C۰۱ (ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه) از رابطه (۱۲)، و شدت آسیب بهره‌وری پروژه‌ها به دلیل وقوع این علت از رابطه (۱۳) به شرح زیر استفاده شد. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۸ منعکس شده است.

$$P_{L_{\cdot 1}} = 1/00 + 0/60 + 0/65 + 0/65 + 0/70 + 0/50 + 0/80 + 0/50 + 0/80 + 0/55 + 0/50 + 0/80 + 0/60 + 0/90 + 0/90 + 0/50) \div 16 = 0/67$$

$$S_{L_{\cdot 1}} = (4 + 4 + 4 + 3 + 5 + 3 + 3 + 4 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 3 + 4 + 4 + 3) \div 16 = 3/53$$

جدول ۸: احتمال و شدت اثرگذاری علل کار خارج ازتوالی بر بهره‌وری (ادغام نظرات خبرگان)

علت	احتمال اثرگذاری بر بهره‌وری			شدت اثرگذاری بر بهره‌وری		
	میانگین	σ	میانگین	σ	حد بالا (میانگین + σ)	حد پایین (میانگین - σ)
C۰۱	۰/۶۷	۰/۱۶	۳/۵۳	۰/۶۲	۴/۱۵	۲/۹۱
C۰۲	۰/۶۸	۰/۲۸	۳/۶۵	۰/۶۱	۴/۲۵	۳/۰۴
C۱۵	۰/۵۶	۰/۱۴	۳/۲۴	۰/۶۶	۳/۹۰	۲/۵۷
C۳۵	۰/۶۵	۰/۲۲	۳/۴۷	۰/۶۲	۴/۰۹	۲/۸۵
C۰۵	۰/۵۳	۰/۱۵	۲/۷۶	۰/۸۳	۳/۶۰	۱/۹۳
C۵۷	۰/۵۹	۰/۳۱	۳/۵۳	۰/۸۰	۴/۳۳	۲/۷۳
C۴۳	۰/۴۳	۰/۱۹	۲/۴۱	۰/۸۰	۳/۲۱	۱/۶۲

علت	احتمال اثرگذاری بر بهره‌وری			شدت اثرگذاری بر بهره‌وری	
	میانگین	σ	میانگین	σ	حد بالا (میانگین + σ) حد پایین (میانگین - σ)
C۷۲	۰/۵۹	۰/۲۵	۳/۰۶	۰/۸۳	۳/۸۹ ۲/۲۳
C۶۶	۰/۴۴	۰/۱۸	۲/۸۸	۰/۷۰	۳/۵۸ ۲/۱۹
C۱۳	۰/۴۴	۰/۲۸	۲/۵۹	۰/۸۰	۳/۳۸ ۱/۷۹
C۵۴	۰/۴۸	۰/۲۷	۲/۸۲	۰/۸۱	۳/۶۳ ۲/۰۱
C۳۹	۰/۵۰	۰/۲۷	۲/۴۷	۰/۸۰	۳/۲۷ ۱/۶۷
C۲۷	۰/۶۷	۰/۲۱	۳/۸۸	۰/۹۳	۴/۸۱ ۲/۹۵
C۸۴	۰/۵۰	۰/۲۱	۲/۴۷	۰/۸۰	۳/۲۷ ۱/۶۷
C۶۱	۰/۴۳	۰/۲۳	۲/۷۱	۰/۸۵	۳/۵۵ ۱/۸۶
C۴۷	۰/۵۷	۰/۲۲	۳/۱۸	۰/۶۴	۳/۸۱ ۲/۵۴
C۸۶	۰/۴۴	۰/۲۳	۲/۴۹	۰/۸۵	۳/۱۴ ۱/۴۵
C۱۹	۰/۵۲	۰/۲۳	۳/۰۰	۰/۸۷	۳/۸۷ ۲/۱۳
C۳۱	۰/۴۸	۰/۲۰	۳/۰۶	۰/۹۰	۳/۹۶ ۲/۱۶
C۸۰	۰/۵۲	۰/۲۱	۳/۱۲	۰/۷۰	۳/۸۱ ۲/۴۲

توجه: معقول بودن مقادیر انحراف معیار قضاوت‌های پاسخ‌دهندگان نشان از همگرایی و روایی نظرات ایشان دارد.

۴-۳- تعیین مرتبط‌ترین نشانه‌های هشدار اولیه به هر علت

برای تعیین مرتبط‌ترین نشانه‌های هشدار اولیه به هر علت، به این پرسش پاسخ داده شد که اگر بدانیم علت z رخ داده باشد، با چه احتمالی این رخداد به واسطه مشاهده نشانه اولیه i بوده است. بیان ریاضی این پرسش به شرح رابطه (۱۴) است.

$$P_{i|j} \propto P_i \times P_{j|i} \quad (14)$$

در رابطه بالا، $P_{i|j}$ احتمال مشاهده نشانه i در صورت وقوع علت j ، P_i احتمال وقوع نشانه i و $P_{j|i}$ احتمال وقوع علت j در صورت مشاهده نشانه i است. مثلاً، در صورت وقوع علت C_{01} ، احتمال مشاهده نشانه S_{25} با توجه به اطلاعات جدول‌های ۵ و ۷ چنین محاسبه می‌شود.

$$P_{25|01} \propto 0/136 \times 0/618 = 0/084$$

جدول ۹ احتمال مشاهده هر نشانه در صورت وقوع هر علت را نشان می‌دهد. طبق این جدول، در صورت وقوع علت C_{01} ، محتمل‌ترین نشانه‌های قابل مشاهده پیش از وقوع این علت S_{15} ، S_{25} و S_{09} هستند.



جدول ۹: احتمال مشاهده نشانه‌های هشدار اولیه در صورت وقوع علل کار خارج‌ازتوالی

نشانه علت	S۲۵	S۲۹	S۳۴	S۳۰	S۱۵	S۲۲	S۰۵	S۰۹	S۴۷	S۵۴
C۰۱	۰/۰۸۴	۰/۰۱۹	۰/۰۲۳	۰/۰۴۹	۰/۰۹۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۳	۰/۰۵۵	۰/۰۳۸	۰/۰۱۱
C۰۲	۰/۰۶۰	۰/۰۲۲	۰/۰۳۹	۰/۰۴۴	۰/۰۷۷	۰/۰۵۵	۰/۰۳۸	۰/۰۶۰	۰/۰۳۲	۰/۰۰۸
C۱۵	۰/۰۸۵	۰/۰۲۵	۰/۰۸۴	۰/۰۷۸	۰/۰۹۳	۰/۰۵۵	۰/۰۴۳	۰/۰۶۲	۰/۰۳۴	۰/۰۱۱
C۳۵	۰/۰۸۴	۰/۰۱۸	۰/۰۶۸	۰/۰۷۷	۰/۰۹۱	۰/۰۶۱	۰/۰۴۷	۰/۰۶۹	۰/۰۳۵	۰/۰۱۱
C۰۵	۰/۰۷۳	۰/۰۲۸	۰/۰۶۲	۰/۰۵۸	۰/۰۹۶	۰/۰۶۲	۰/۰۵۰	۰/۰۸۰	۰/۰۳۱	۰/۰۱۱
C۵۷	۰/۰۶۵	۰/۰۲۰	۰/۰۴۰	۰/۰۹۰	۰/۰۸۹	۰/۰۶۷	۰/۰۴۶	۰/۰۶۱	۰/۰۳۵	۰/۰۱۵
C۴۳	۰/۰۶۱	۰/۰۲۲	۰/۰۴۱	۰/۰۵۰	۰/۰۷۸	۰/۰۶۱	۰/۰۳۴	۰/۰۴۸	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲
C۷۲	۰/۰۶۴	۰/۰۱۷	۰/۰۳۳	۰/۰۴۵	۰/۰۶۴	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶	۰/۰۶۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۱
C۶۶	۰/۰۶۶	۰/۰۲۰	۰/۰۳۲	۰/۰۴۷	۰/۰۴۹	۰/۰۵۳	۰/۰۴۴	۰/۰۵۴	۰/۰۳۵	۰/۰۱۳
C۱۳	۰/۰۶۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۰/۰۳۳	۰/۰۷۵	۰/۰۳۴	۰/۰۰۹
C۵۴	۰/۰۵۷	۰/۰۲۰	۰/۰۳۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۳	۰/۰۳۴	۰/۰۶۰	۰/۰۳۱	۰/۰۱۱
C۳۹	۰/۰۷۳	۰/۰۱۳	۰/۰۲۵	۰/۰۴۸	۰/۰۶۰	۰/۰۴۲	۰/۰۳۱	۰/۰۵۵	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱
C۲۷	۰/۰۶۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷	۰/۰۵۱	۰/۰۶۶	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۰/۰۶۵	۰/۰۳۲	۰/۰۱۳
C۸۴	۰/۰۷۹	۰/۰۳۴	۰/۰۴۰	۰/۰۵۴	۰/۰۶۳	۰/۰۵۸	۰/۰۴۴	۰/۰۶۱	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰
C۶۱	۰/۰۷۹	۰/۰۳۵	۰/۰۴۱	۰/۰۵۷	۰/۰۶۲	۰/۰۴۶	۰/۰۴۱	۰/۰۵۳	۰/۰۳۳	۰/۰۱۱
C۴۷	۰/۰۶۵	۰/۰۲۳	۰/۰۴۵	۰/۰۵۱	۰/۰۸۲	۰/۰۴۱	۰/۰۴۰	۰/۰۶۲	۰/۰۳۰	۰/۰۱۱
C۸۶	۰/۰۵۲	۰/۰۱۶	۰/۰۴۱	۰/۰۴۹	۰/۰۷۹	۰/۰۶۰	۰/۰۳۱	۰/۰۷۲	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰
C۱۹	۰/۰۶۹	۰/۰۲۲	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۷۱	۰/۰۵۶	۰/۰۳۸	۰/۰۷۷	۰/۰۳۸	۰/۰۰۹
C۳۱	۰/۰۶۳	۰/۰۱۷	۰/۰۴۱	۰/۰۵۱	۰/۰۷۹	۰/۰۶۷	۰/۰۲۸	۰/۰۷۱	۰/۰۳۴	۰/۰۱۰
C۸۰	۰/۰۶۸	۰/۰۲۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۰/۰۷۴	۰/۰۶۲	۰/۰۳۳	۰/۰۶۲	۰/۰۳۵	۰/۰۱۱

۴-۴- رتبه‌بندی علل کار خارج‌ازتوالی

برای اولویت‌بندی علل کار خارج‌ازتوالی و شناسایی ارجح‌ترین آن‌ها، تابع زیان بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی بر اساس دو قاعده ماکس-ماکس و بیز محاسبه شد. در این خصوص، با اتکا به روابط (۷) و (۸)، این تابع بر اساس دو قاعده بیز و ماکس-ماکس، به کمک روابط (۱۵) و (۱۶) تعریف شد.

$$L_{c_j}^{Bayes} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_i \times p_{j|i} \times p_{L_j} \times s_{L_j} \quad (15)$$

$$L_{c_j}^{Max-Max} = \max \{ p_{j|i} \times p_{L_j} \times s_{L_j} \} \quad i = 1, \dots, m \quad (16)$$

در روابط بالا، $L_{c_j}^{Bayes}$ زیان بیز علت j ، $L_{c_j}^{Max-Max}$ زیان ماکس-ماکس علت j ، p_i احتمال وقوع نشانه اولیه i ، $p_{j|i}$ احتمال وقوع علت j پس از ظهور نشانه اولیه i ، p_{L_j} احتمال آسیب بهره‌وری

پروژه از علت z_j و SL_j شدت آسیب بهره‌وری پروژه‌ها از علت z است. چنان‌که مشاهده می‌شود، طبق رابطه (۱۵)، زیان بیز احتمال وقوع نشانه‌های اولیه را در محاسبات مدنظر قرار داده و این درحالی است که طبق رابطه (۱۶)، زیان ماکس-ماکس از برشمردن احتمال وقوع نشانه‌های اولیه در محاسبات صرف‌نظر کرده است.

برای مثال، زیان بیز و ماکس-ماکس بهره‌وری پروژه به‌واسطه وقوع علت C_{01} (ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه) به کمک روابط (۱۵) و (۱۶) و اطلاعات جدول‌های ۵، ۷، ۸، و ۹ به شرح زیر حساب می‌شود.

$$L_{C_{01}}^{Bayes} = (0/14 \times 0/62 \times 0/67 \times 3/53) + (0/05 \times 0/37 \times 0/67 \times 3/53) + (0/11 \times 0/21 \times 0/67 \times 3/53) + \dots + (0/07 \times 0/55 \times 0/67 \times 3/53) + (0/02 \times 0/46 \times 0/67 \times 3/53) = 1/03$$

$$L_{C_{01}}^{Max-Max} = \frac{Ma}{x} \left\{ \begin{matrix} 0/62 \times 0/67 \times 3/53 \\ 0/37 \times 0/67 \times 3/53 \\ 0/21 \times 0/67 \times 3/53 \\ 0/55 \times 0/67 \times 3/53 \\ 0/46 \times 0/67 \times 3/53 \end{matrix} \right\} = 1/47$$

بدین ترتیب، با دانستن زیان بهره‌وری پروژه‌ها در ازای وقوع هرکدام از علل کار خارج‌ازتوالی، این علل بر اساس دو قاعده بیز و ماکس-ماکس اولویت‌بندی شد. جدول ۱۰ نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. در این جدول، زیان بهره‌وری پروژه درازای وقوع هر علت بر اساس دو قاعده بیز و ماکس-ماکس و در فاصله $\pm 1\sigma$ متوسط شدت آسیب محاسبه‌شده به ازای هر علت منعکس شده است. همچنین، می‌توان با پذیرش وضعیتی میانه بین دو موقعیت اطمینان کامل و ریسک (به‌ازای در نظر گرفتن وزنی یکسان برای نمرات هر علت در دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس)، یک رتبه‌بندی ادغامی براساس دو رویکرد ارائه داد.

طبق جدول ۱۰، علت C_{25} (عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان حین برنامه‌ریزی) در دو تحلیل ماکس-ماکس و بیز به‌ترتیب، دارای رتبه‌های اول و دوم است. پس از ادغام رتبه‌های این علت در دو رویکرد مذکور، علت C_{25} رتبه نخست را اختیار کرده است. لذا در میان علل مختلف کار خارج‌ازتوالی، این علت می‌تواند بیش‌ترین آسیب را به بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز وارد کند. از این منظر، علل C_{07} (تغییر در طراحی)؛ C_{01} (ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه)؛ C_{27} (عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان)؛ C_{15} (واقعی نبودن زمان

پیش‌بینی شده برای فعالیت‌ها؛ و C۰۲ (نبود منابع مالی کافی برای پروژه) در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۱۰: زیان بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی در صورت وقوع علل کار خارج‌ازتوالی

کد	علت	شدت اثر قاعده ماکس ماکس			شدت اثر رویکرد بیز			رویکرد ادغامی	
		حد پایین (-۱σ)	حد بالا (+۱σ)	رتبه	حد پایین (-۱σ)	حد بالا (+۱σ)	رتبه	شدت اثر	رتبه
C۰۱	ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه	۱/۲۰۹	۱/۷۲۸	۳	۰/۸۵۲	۱/۲۱۷	۵	۱/۲۵۱	۳
C۰۲	نبود منابع مالی کافی برای پروژه	۰/۹۷۸	۱/۳۶۹	۷	۰/۸۹۳	۱/۲۴۹	۴	۱/۱۲۲	۶
C۱۵	واقعی نبودن زمان پیش‌بینی شده برای فعالیت‌ها	۱/۱۰۹	۱/۶۸۲	۵	۰/۸۲۱	۱/۲۴۵	۶	۱/۲۱۴	۵
C۳۵	عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان حین برنامه‌ریزی	۱/۲۳۵	۱/۷۷۷	۲	۱/۵۰۶	۱/۴۸۷	۱	۱/۳۸۳	۱
C۰۵	عدم برخورداری از تجربه عملی در حین برنامه‌ریزی	۰/۶۳۷	۱/۱۶۶	۸	۰/۸۹۶	۱/۰۵۲	۸	۰/۸۵۳	۹
C۵۷	تغییر در طراحی	۱/۲۴۷	۱/۹۷۸	۱	۰/۸۴۴	۱/۳۳۹	۳	۱/۳۵۲	۲
C۴۳	تاخیر در کسب اطلاعات تأمین‌کننده	۰/۳۶۳	۰/۷۲۰	۲۰	۰/۲۹۷	۰/۵۹۰	۱۹	۰/۴۹۳۶	۲۰
C۷۳	نظارت و به‌روزرسانی ضعیف برنامه زمانی	۰/۸۸۸	۱/۵۴۵	۶	۰/۵۸۰	۱/۰۰۹	۹	۱/۰۰۶	۷
C۶۶	تأیید دیر هنگام ارسالی‌ها (مانند نقشه‌های فروشگاه)	۰/۵۱۹	۰/۸۵۰	۱۶	۰/۳۹۸	۰/۶۵۱	۱۶	۰/۶۰۴	۱۵
C۱۳	تسریع برنامه با هدف برآوردن خواسته‌های کارفرما	۰/۴۴۹	۰/۸۴۶	۱۷	۰/۳۶۰	۰/۶۸۰	۱۷	۰/۵۸۴	۱۶
C۵۴	فشار مالی	۰/۴۴۲	۰/۷۹۷	۱۸	۰/۳۷۷	۰/۶۷۹	۱۵	۰/۵۷۴	۱۷
C۳۹	طرح‌بندی ضعیف سایت	۰/۴۴۷	۰/۸۷۵	۱۵	۰/۳۱۷	۰/۶۲۰	۱۸	۰/۵۶۵	۱۸
C۳۷	عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان	۱/۰۴۲	۱/۶۹۶	۴	۰/۸۵۳	۱/۳۸۹	۳	۱/۲۴۵	۴
C۸۴	بازرسی‌های ناکافی از سایت (عدم رعایت برنامه‌های بازرسی)	۰/۵۴۱	۱/۰۵۹	۱۳	۰/۳۹۳	۰/۷۶۹	۱۳	۰/۶۹۱	۱۳
C۶۱	برنامه‌ریزی ناکافی برای اقدامات ایمنی مورد نیاز و الزامات سایت	۰/۵۴۲	۱/۰۳۸	۱۴	۰/۳۶۴	۰/۶۹۷	۱۴	۰/۶۶۰	۱۴
C۴۷	کمبود نیروی کار ماهر	۰/۷۲۵	۱/۰۸۸	۱۱	۰/۶۵۲	۰/۹۷۹	۷	۰/۸۶۱	۸
C۸۶	عدم پذیرش تغییرات در سفارش‌ها به دلیل تحمیل شدن هزینه و زمان اضافی	۰/۶۱۱	۰/۷۴۵	۱۹	۰/۲۷۸	۰/۶۰۵	۲۰	۰/۴۹۲۸	۱۹
C۱۹	درگیری دیر هنگام گروه راه‌اندازی	۰/۳۴۳	۱/۱۰۷	۹	۰/۴۶۵	۰/۹۳۹	۱۱	۰/۷۹۴	۱۱
C۳۱	تاخیر در پرداخت‌های مؤثر بر معاملات پایین‌دستی	۰/۶۰۴	۱/۱۰۶	۱۰	۰/۴۷۸	۰/۸۷۶	۱۲	۰/۷۶۶	۱۲
C۸۰	فقدان جریان قراردادی منسجم به لایه‌های زیرین	۰/۶۸۶	۱/۰۸۱	۱۲	۰/۵۳۴	۰/۹۰۸	۱۰	۰/۸۱۳	۱۰

۴-۵- رتبه‌بندی نشانه‌های هشدار اولیه کار خارج‌ازتوالی

چون نشانه‌های هشدار اولیه نوعاً عللی هستند که به‌طور غیرمستقیم بر بهره‌وری پروژه‌ها اثر می‌گذارند، می‌توان برای اولویت‌بندی و شناسایی ارجح‌ترین آن‌ها، تابع زیان بهره‌وری پروژه

را بر اساس دو قاعده ماکس-ماکس و بیز برای هر نشانه نوشت.
با اتکا به روابط (۷) و (۸)، زیان بیز هر نشانه با لحاظ تمامی علل مرتبط با آن نشانه و بر اساس دو قاعده بیز و ماکس-ماکس، به کمک روابط (۱۵) و (۱۶) تعریف می‌شود.

$$L_{S_i}^{Bayes} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_j \times p_{j|i} \times p_{L_j} \times S_{L_j} \quad (15)$$

$$L_{S_i}^{Max-Max} = \max_i \{p_{j|i} \times p_{L_j} \times S_{L_j}\} \quad j = 1, \dots, n \quad (16)$$

در روابط بالا، $L_{S_i}^{Bayes}$ زیان بیز نشانه اولیه i ، $L_{S_i}^{Max-Max}$ زیان ماکس-ماکس نشانه اولیه i ، p_i احتمال وقوع نشانه اولیه i ، $p_{j|i}$ احتمال وقوع علت j پس از ظهور نشانه اولیه i ، p_{L_j} احتمال آسیب بهره‌وری پروژه از علت j و S_{L_j} شدت آسیب بهره‌وری پروژه از علت j است.
برای مثال، از آنجا که S_{25} (حضور افراد بی‌تجربه در پست‌های کلیدی) به‌عنوان یک نشانه هشدار اولیه از طریق علل مختلفی می‌تواند به بهره‌وری پروژه آسیب رساند، زیان بیز و ماکس-ماکس این نشانه به کمک روابط (۱۵) و (۱۶) و با استفاده از اطلاعات جدول‌های ۶، ۷، ۸، و ۹ به شرح زیر حساب می‌شود.

$$L_{S_{25}}^{Bayes} = (0.072 \times 0.62 \times 0.67 \times 3/52) + (0.087 \times 0.44 \times 0.67 \times 3/65) + (0.086 \times 0.62 \times 0.56 \times 3/24) + \dots + (0.045 \times 0.46 \times 0.48 \times 3/0.6) + (0.035 \times 0.50 \times 0.52 \times 3/12) = 0.895$$

$$L_{S_{25}}^{Max-Max} = \max \{ (0.62 \times 0.67 \times 3/52) \text{ و } (0.44 \times 0.67 \times 3/65) \text{ و } (0.62 \times 0.56 \times 3/24) \dots \text{ و } (0.46 \times 0.48 \times 3/0.6) + (0.50 \times 0.52 \times 3/12) \} = 1/468$$

بدین ترتیب، با دانستن زیان هر نشانه نسبت به اولویت‌بندی آن‌ها طبق دو قاعده بیز و ماکس-ماکس اقدام شد. در جدول ۱۱، زیان بیز و زیان ماکس-ماکس هر نشانه در فاصله ± 15 متوسط شدت آسیب محاسبه‌شده برای آن نشانه منعکس شده است. می‌توان با اتخاذ وضعیتی میانه بین دو موقعیت اطمینان کامل و ریسک (به‌ازای در نظر گرفتن وزنی یکسان برای نمرات هر نشانه در دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس)، یک رتبه‌بندی ادغامی براساس دو رویکرد ارائه داد. این رتبه‌بندی در جدول ۱۱ منعکس شده است.

طبق جدول ۱۱، نشانه S_{30} (ویرایش‌های زیاد در طراحی) در دو تحلیل ماکس-ماکس و بیز به‌ترتیب، رتبه‌های اول و دوم را کسب کرده است. پس از ادغام رتبه‌های این نشانه در دو رویکرد ماکس-ماکس و بیز، نشانه مذکور موفق به کسب رتبه نخست شده است. این بدان معنی

است که صرف‌نظر از این‌که نشانه مذکور پیش از وقوع کدام علت رؤیت شده و صرف‌نظر از این‌که کدام علت منجر به کاهش بهره‌وری پروژه شده است، با رؤیت نشانه S۳۰ می‌توان انتظار وارد آمدن بیش‌ترین آسیب را به بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز داشت. از این منظر، نشانه‌های S۲۵ (حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی)؛ S۱۵ (گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه)؛ S۴۷ (برنامه‌ریزی ضعیف برای گذار از مرحله ساخت به مرحله راه‌اندازی)؛ S۰۵ (درصد بالای دوباره‌کاری)؛ و S۳۴ (استفاده زودهنگام از شناوری) در رتبه‌های بعد قرار دارند.

جدول ۱۱: زیان بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی در صورت مشاهده نشانه‌های هشدار اولیه

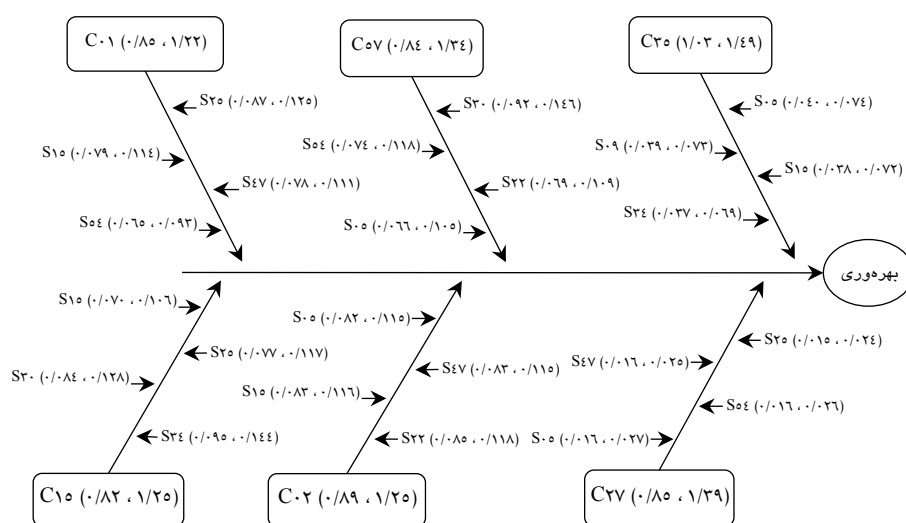
کد	نشانه	رتبه‌بندی طبق قاعده بیز			رتبه‌بندی طبق قاعده ماکس-ماکس			رویکرد ادغامی
		حد بالا (+۱۵)	حد پایین (-۱۵)	میان	حد بالا (+۱۵)	حد پایین (-۱۵)	میان	
S۲۵	حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی	۱/۱۰۳	۰/۸۹۱	۰/۸۹۵	۱/۷۲۸	۱/۲۰۹	۱/۴۶۸	۲
S۳۹	تمرکز بر نمایش اعداد خوب به جای اتخاذ اقدامات پیشگیرانه	۰/۹۰۰	۰/۵۵۵	۰/۷۲۷	۱/۶۹۶	۱/۰۴۲	۱/۳۶۹	۴
S۳۴	استفاده زودهنگام از شناوری	۰/۸۶۰	۰/۵۴۲	۰/۷۰۶	۱/۶۸۲	۱/۱۴۳	۱/۳۹۵	۳
S۳۰	پیرایش‌های زیاد در طراحی	۱/۰۸۴	۰/۶۷۴	۰/۸۷۹	۱/۹۷۸	۱/۲۴۷	۱/۶۱۲	۱
S۱۵	گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه (در حوزه اجرا)	۱/۰۲۰	۰/۶۳۸	۰/۸۲۹	۱/۵۷۲	۱/۰۹۹	۱/۳۳۵	۵
S۲۲	سفارش‌های خرید دیر هنگام	۰/۹۹۲	۰/۶۱۰	۰/۸۰۱	۱/۴۷۶	۰/۹۷۸	۱/۲۰۳	۱۰
S۰۵	درصد بالای دوباره‌کاری	۱/۰۳۹	۰/۶۴۴	۰/۸۴۲	۱/۵۶۳	۱/۰۴۹	۱/۲۷۹	۸
S۰۹	تصمیم‌گیری‌های دیر هنگام در مواجهه با تغییرات	۱/۰۱۲	۰/۶۲۴	۰/۸۱۸	۱/۵۸۲	۰/۹۷۲	۱/۲۷۷	۹
S۴۷	انقض بودن برنامه انتقال از فاز ساخت به فاز راه‌اندازی	۱/۰۱۴	۰/۶۳۲	۰/۸۲۳	۱/۵۳۹	۱/۰۷۶	۱/۳۰۷	۶
S۵۴	وجود نسخه‌های مختلف از نقشه‌ها در سایت	۰/۹۶۴	۰/۵۹۶	۰/۷۸۰	۱/۶۰۷	۱/۰۰۶	۱/۳۰۰	۷

۴-۶- تحلیل زنجیره‌ای نشانه‌های هشدار اولیه و علل

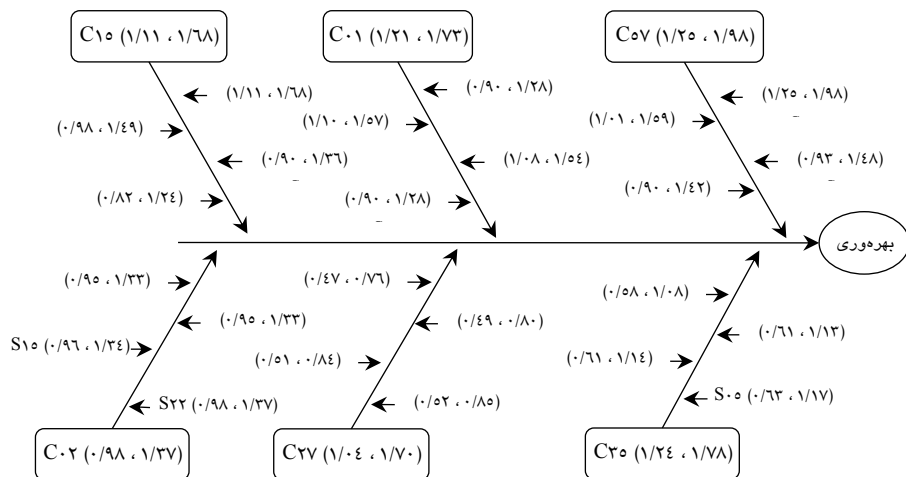
طبق مدل مفهومی پژوهش، با رؤیت علائم هشدار اولیه می‌توان انتظار وقوع علل کار خارج‌ازتوالی و به تبع آن نقصان در بهره‌وری پروژه را داشت. شکل‌های ۳، ۴، و ۵ این رابطه زنجیره‌ای را برای عمده‌ترین علل کار خارج‌ازتوالی و بارزترین علائم هشدار اولیه مربوط به این علل، از منظر سه رویکرد ماکس-ماکس، بیز، و ادغامی نشان می‌دهند. این شکل‌ها براساس اطلاعات جدول ۱۰ و روابط (۱۵) و (۱۶) رسم شده‌اند.

نمودارهای استخوان ماهی منعکس‌شده در شکل‌های مذکور اثر مستقیم هر علت و اثر غیرمستقیم بارزترین نشانه‌های مترتب بر هر علت را بر بهره‌وری پروژه نشان می‌دهند. برای مثال، طبق شکل ۳، علت C۵۷ (تغییر در طراحی) از منظر رویکرد بیز می‌تواند در بازه (۱/۳۴) و (۰/۸۴) واحد مستقیماً به بهره‌وری پروژه آسیب وارد کند؛ و این در حالی است که طبق شکل ۴، آسیب علت مذکور از منظر رویکرد ماکس-ماکس در بازه (۱/۹۸ و ۱/۲۵)؛ و در شکل ۵، از منظر

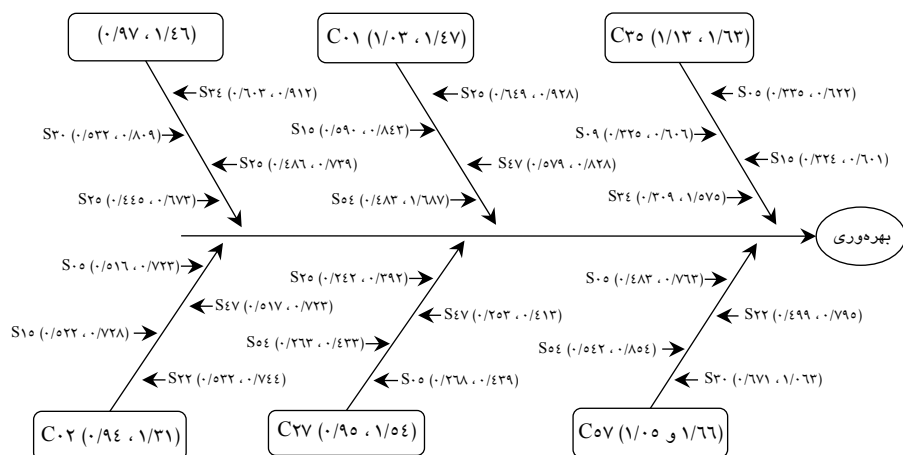
رویکرد ادغامی در بازه (۱/۶۶۰ و ۱/۰۴۵) قرار دارد. همچنین طبق شکل ۳، نشانه S۲۵ (حضور افراد بی تجربه در نقش‌های کلیدی) از منظر رویکرد بیز به صورت غیرمستقیم و از طریق علت C۵۷ می‌تواند در بازه (۰/۰۹ و ۰/۰۶) واحد به بهره‌وری پروژه آسیب وارد کند. طبق شکل ۴، این آسیب از منظر رویکرد ماکس-ماکس در بازه (۱/۲۱ و ۰/۷۶)؛ و طبق شکل ۵، از منظر رویکرد ادغامی در بازه (۰/۶۵۰ و ۰/۴۱۰) قرار دارد.



شکل ۳: نمودار استخوان ماهی ارجح‌ترین نشانه‌های اولیه و علل کار خارج ازتوالی (قاعده بیز)



شکل ۴: نمودار استخوان ماهی ارجح‌ترین نشانه‌های اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی (قاعده ماکس-ماکس)



شکل ۵: نمودار استخوان ماهی ارجح‌ترین نشانه‌های اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی (رویکرد ادغامی)

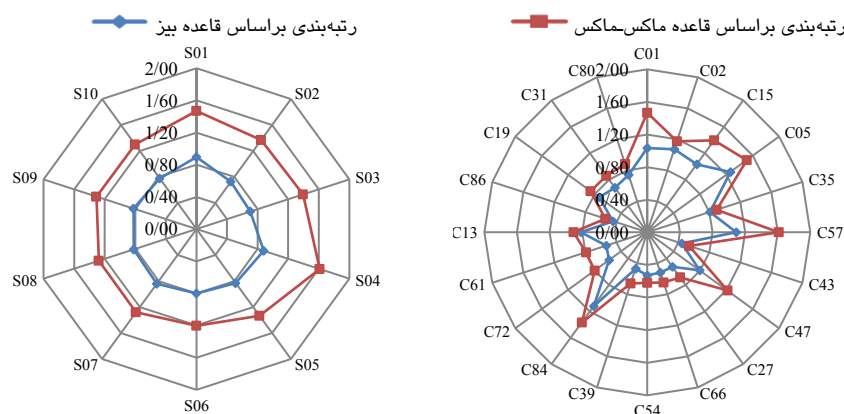
نکته حائز اهمیت این است که در هر دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس، علل مشابهی به‌عنوان مؤثرترین علل بر بهره‌وری پروژه شناسایی شده‌اند، هرچند ممکن است رتبه‌های تعیین‌شده در دو رویکرد لزوماً یکسان نباشد. این شرایط برای نشانه‌های هشدار اولیه مترتب بر هر علت نیز جاری است. این موضوع، به نوبه خود، نشان از استواری یافته‌های پژوهش دارد. گفتنی

است، حدود بالا و پایین علل و نشانه‌های شکل ۵ با میانگین‌گیری از حدود بالا و پایین این علل و نشانه‌ها در دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس حاصل شده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، پس از غربال ۵۴ نشانه هشدار اولیه و ۸۸ علت کار خارج‌از‌توالی پیشنهادشده در پیشینه توسط فن دلفی فازی، ۱۰ نشانه و ۲۰ علت بارز در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تعیین شد. سپس به کمک قواعد ماکس-ماکس و بیز، نسبت به رتبه‌بندی این نشانه‌ها و علل در دو موقعیت تصمیم‌گیری اطمینان کامل و ریسک اقدام شد. شکل ۶ نمودار راداری این رتبه‌بندی را توسط دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس نشان می‌دهد.

طبق شکل ۶، قاعده ماکس-ماکس به واسطه رویکرد محتاطانه خود همواره زیان بیشتری را در مقایسه با قاعده بیز تولید می‌کند. با وجود این، رتبه‌بندی علل کار خارج‌از‌توالی در دو رویکرد از هم‌خوانی بسیار بالا ($r_s = 0/954$)، و رتبه‌بندی علائم هشدار اولیه در دو رویکرد از هم‌خوانی متوسطی برخوردار هستند ($r_s = 0/467$).



ب: نشانه‌های هشدار اولیه کار خارج‌از‌توالی

(ضریب همبستگی اسپیرمن = $0/467$)

الف: علل کار خارج‌از‌توالی

(ضریب همبستگی اسپیرمن = $0/954$)

شکل ۶: هم‌خوانی رتبه‌بندی نشانه‌ها و علل در دو رویکرد بیز و ماکس-ماکس

طبق یافته‌های پژوهش، از منظر خبرگان، شش نشانه «ویرایش‌های زیاد در طراحی»، «حضور افراد بی‌تجربه در نقش‌های کلیدی»، «گرایش به تخطی از منحنی پیشرفت خط پایه»؛



«برنامه‌ریزی ضعیف برای گذار از مرحله ساخت به مرحله راه‌اندازی»؛ «درصد بالای دوباره‌کاری»؛ و «استفاده زودهنگام از شناوری» جدی‌ترین مخاطراتی آسیب به بهره‌وری از ناحیه کار خارج‌ازتوالی محسوب می‌شوند.

بخشی از این یافته‌ها با دانش حاصل از پیشینه هم‌خوانی دارد. برای نمونه، این مطالعه به‌مانند ابوطالب و دیگران (۲۰۱۹) درصد بالای دوباره‌کاری را به‌عنوان یکی از نشانه‌های هشدار اولیه برخورد از رتبه بالا معرفی می‌کند. باوجوداین، یافته‌های این مطالعه درباره علائم هشدار اولیه چندان با پیش‌بینی‌ها و انتظارات مبتنی بر پیشینه پژوهش انطباق ندارد. به باور لارسن و دیگران (۲۰۱۹)، علائم هشدار اولیه بسته به نوع و زمینه پروژه می‌توانند متفاوت باشند. این واقعیت، تلاش برای کسب دانش درباره علائم هشدار اولیه در پروژه‌های مختلف را توجیه می‌کند [۳۷]. پذیرش این فرض که به دلیل یکسان نبودن زمینه پروژه‌ها امکان تهیه فهرستی عمومی از علائم هشدار اولیه برای تمام انواع پروژه‌ها وجود ندارد، یافتن فهرستی غایی از علائم هشدار اولیه برای پیش‌بینی شکست انواع پروژه‌ها [۵۳]، و معرفی مدل‌هایی عمومی برای پاسخ به این علائم در موقعیت‌های مختلف را دور از دسترس می‌کند [۵۴].

همچنین، در میان بارزترین علل کار خارج‌ازتوالی، «عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان حین برنامه‌ریزی»؛ «تغییر در طراحی»؛ «ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه»؛ «عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان»؛ «واقعی نبودن زمان پیش‌بینی‌شده برای فعالیت‌ها»؛ و «نبود منابع مالی کافی برای پروژه» می‌توانند با زمینه‌سازی برای وقوع کار خارج‌ازتوالی، بیشترین ریسک را برای بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی در پی داشته باشند. از منظر علل کار خارج‌ازتوالی، یافته‌های این پژوهش از هم‌خوانی بالایی با پیشینه برخورد است. برای مثال، در مطالعه ابوطالب و دیگران (۲۰۱۹)، به استثنای دو علت «عدم توجه به الزامات ذی‌نفعان» و «نبود منابع مالی کافی»، سایر علل در زمره علل دارای بیش‌ترین ریسک برای پارامترهای پروژه محسوب می‌شوند. تغییر در طراحی به هرگونه تعدیل در اسناد طراحی اطلاق می‌شود. چنان‌که در مطالعات قبلی بر این موضوع تأکید شده است [۵۵، ۵۶، ۲۶]، تغییر در طراحی اثر معنی‌داری بر اجرای فعالیت‌های ساخت‌وساز دارد.

ارتباط ضعیف تیم پروژه با طرف‌های مختلف پروژه مواردی چون کم‌توجهی تیم پروژه به درخواست‌های مشتری برای گزارش پیشرفت؛ برگزاری جلسات بررسی پیشرفت؛ ایجاد

هماهنگی و ارتباط میان مالک، طراح، و پیمانکار؛ و همچنین ایجاد تفاهم میان ذی‌نفعان از طریق بررسی مداوم تعریف پروژه و عملکرد مورنیاز را شامل می‌شود [۲۶، ۳۲].

واقعی نبودن زمان پیش‌بینی‌شده برای فعالیت‌ها به تخمین‌های غیر واقعی زمان و تناقضات منطقی اشاره دارد. این علت به‌دفعات در مطالعات اخیر برجسته شده است [۵۷، ۵۸]. سرانجام، عدم تحویل به‌موقع توسط تأمین‌کنندگان به تأخیر تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان در تحویل مصالح، لوازم و نصب آن‌ها اشاره دارد. کار خارج‌ازتوالی عمدتاً ناشی از تحویل دیر هنگام از سوی فروشندگان است، جایی که پیمانکار برای غلبه بر تأخیر، به تغییر توالی فعالیت‌ها و کارهای پروژه متوسل می‌شود [۲۶].

طبق نظریه سیگنال‌های ضعیف آنسوف، علائم هشدار اولیه به مثابه رویکردی پیشگیرانه برای پاسخ به غافلگیری‌های راهبردی محسوب می‌شوند [۳۶]. براین‌اساس، مدیران پروژه می‌توانند با تمرکز بر این نشانه‌ها از وقوع علل منتهی به کار خارج‌ازتوالی جلوگیری کنند و از این طریق بهبود در بهره‌وری پروژه را رقم بزنند. یکی از مؤثرترین اقدامات برای پیشگیری از وقوع علائم هشدار اولیه برنامه‌ریزی مناسب است. برنامه‌ریزی مناسب شامل تعریف اهداف روشن، تعیین جدول زمانی و نقاط عطف واقع‌بینانه و تدوین برنامه‌های احتمالی برای تأخیرها یا مشکلات غیرمنتظره است. صاحبان و مدیران پروژه می‌توانند از نرم‌افزارهای مدیریت پروژه و سایر ابزارها برای تسهیل برنامه‌ریزی و نظارت بر پیشرفت استفاده کنند. یکی دیگر از اقدامات مؤثر برای پیشگیری از بروز علائم هشدار اولیه شکست پروژه تلاش برای ایجاد ارتباط مؤثر است. ذی‌نفعان پروژه باید با ایجاد کانال‌های ارتباطی باز مرتباً پیشرفت، نگرانی‌ها و انتظارات را با یکدیگر در میان بگذارند. این اقدام می‌تواند به شناسایی و رسیدگی سریع به مشکلات قبل از تبدیل شدن آنها به مشکلات مهم‌تر کمک کند.

تخصیص مطلوب منابع یکی دیگر از راه‌حل‌های مؤثر برای پیشگیری از ظهور علائم هشدار اولیه محسوب می‌شود. این اقدام شامل استخدام مهندسان و پیمانکاران باتجربه و واجد شرایط، اطمینان از تخصیص بودجه کافی و تأمین تجهیزات و مواد مناسب است. مدیریت و نظارت بر بودجه پروژه برای جلوگیری از تأخیرها و افزایش هزینه‌ها یکی دیگر از اقدامات ضروری برای پرهیز از علائم هشدار اولیه است. مدیران پروژه می‌توانند از نرم‌افزارهای مدیریت پروژه برای نظارت بر پیشرفت و شناسایی حوزه‌هایی که نیاز به بهبود دارند استفاده



کنند. این شامل رسیدگی به عوامل بالقوه‌ای چون تأخیرها، تغییرات در محدوده پروژه و مشکلات غیرمنتظره است که می‌تواند موجب نقصان در بهره‌وری پروژه شوند. سرانجام، داشتن یک طرح احتمالی از پیش تعریف‌شده برای مواجهه با علائم هشدار اولیه شکست پروژه بسیار مهم است. این طرح باید خطرات بالقوه را شناسایی کند، برنامه‌ای برای کاهش آن‌ها داشته باشد، و رویه‌های روشنی را برای رسیدگی به مشکلات (مانند نحوه تخصیص منابع اضافی یا تنظیم جدول زمانی پروژه) تعریف کند. درحالی‌که کار خارج‌از‌توالی یکی از عوامل مهم اثرگذار بر بهره‌وری پروژه‌ها است، بررسی علل و آثار این پدیده کمتر موردتوجه پیشینه پژوهش قرار گرفته است. این پژوهش با تحلیل کمی اثر نشانه‌های هشدار اولیه و علل این پدیده بر بهره‌وری پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی کوشید تا گامی در جهت توسعه پیشینه تجربی این حوزه بردارد. از آن‌جا که با چاره‌اندیشی برای عوامل مؤثر بر کار خارج‌از‌توالی هنگام برنامه‌ریزی پروژه می‌توان به میزان قابل‌توجهی پیامدهای منفی این پدیده را کنترل کرد، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به مدیران پروژه کمک کند تا با بینش بهتری آثار تصمیمات خود بر بهره‌وری پروژه را ارزیابی کنند و درنهایت، شانس موفقیت پروژه‌های خود را ارتقا دهند. باوجود سهم این مطالعه در غنی‌تر کردن پیکره دانشی پیشینه پژوهش، یافته‌های این پژوهش از چند جنبه با محدودیت‌هایی روبه‌رو است که می‌توانند زمینه‌ساز فرصت‌هایی برای مطالعات آتی باشد. نخست، این مطالعه تنها روی پارامتر بهره‌وری متمرکز بود و از تحلیل اثر نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌از‌توالی روی سایر هدف‌های پروژه، مانند زمان، هزینه، ایمنی و کیفیت بازماند. این کاستی می‌تواند مسیر جدیدی را برای مطالعات آتی پیش پای پژوهشگران قرار دهد. درحالی‌که این مطالعه برای اطمینان از تحقق هدف‌های خود صرفاً بر بارزترین نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع رویدادهای خارج‌از‌توالی در پروژه‌های ساخت‌وساز صنعتی تمرکز داشت، پژوهشگران می‌توانند بر تحلیل این نشانه‌ها و علل در دیگر انواع پروژه‌ها تمرکز یابند. هنگام مطالعه نشانه‌های هشدار اولیه و علل کار خارج‌از‌توالی از دو رویکرد خبره‌محور و پروژه‌محور می‌توان بهره برد. در حالی که رویکرد خبره‌محور مبتنی بر تجربیات و قضاوت‌های خبرگان است، رویکرد پروژه‌محور از داده‌های واقعی و تاریخی پروژه‌ها بهره می‌گیرد [۵۹]. مطالعه حاضر به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های واقعی پروژه‌ها و تمرکز بر دامنه گسترده‌ای از نشانه‌های هشدار اولیه و علل وقوع کار

خارج‌ازتوالی، ناچار به پیروی از رویکرد خبره‌محور بود. باوجوداین، به‌رغم چالش‌های موجود، تکرار این مطالعه با تکیه بر رویکرد پروژه‌محور می‌تواند ضمن کمک به اعتبارسنجی یافته‌های این پژوهش، ابعاد دیگری از مسئله پژوهش را روشن می‌کند. سرانجام، استفاده از فنون تصمیم‌گیری چندمعیاره و فنون نگاشت برای تحلیل علائم هشدار اولیه و علل کار خارج‌ازتوالی و مقایسه نتایج حاصل با یافته‌های این پژوهش فرصت مطالعاتی دیگری را رقم می‌زند.

۶- منابع

- [۱] Paulraj, M. S., Nuzhat, S., & Hussain, C. M. (۲۰۲۱). *Source reduction and waste minimization*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands,
- [۲] Dixit, S., Mandal, S. N., Thanikal, J. V., & Saurabh, K. (۲۰۱۸). Construction productivity and construction project performance in Indian construction projects. In M. J. Skibniewski & M. Hajdu (Eds.), *Proceedings of the Creative Construction Conference*, ۳۷۹-۳۸۶. Ljubljana, Slovenia: Diamond Congress Ltd. <https://doi.org/10.3311/CCC2018-050>.
- [۳] Fulford, R., & Standing, C. (۲۰۱۴). Construction industry productivity and the potential for collaborative practice. *International journal of project management*, ۳۲(۲), ۳۱۵-۳۲۶. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.05.007>.
- [۴] Mahamid, I. (۲۰۱۳). Contractor's perspective toward factors affecting labor productivity in building construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 20(۵), ۴۴۶-۴۶۰. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2011-0074>.
- [۵] Princy, J. D., & Shanmugapriya, S. (۲۰۱۷). A probabilistic fuzzy logic approach to identify productivity factors in Indian construction projects. *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 7(۳), ۳۹-۵۵. <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2017.9.29.039>.
- [۶] Alaloul, W. S., Alzubi, K. M., Malkawi, A. B., Al Salaheen, M., & Musarat, M. A. (۲۰۲۲). Productivity monitoring in building construction projects: a systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, ۲۹(۷), ۲۷۶۰-۲۷۸۵. <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2021-0211>.
- [۷] Lim, E. C., & Alum, J. (۱۹۹۵). Construction productivity: issues encountered by contractors in Singapore. *International journal of project management*, 13(۱), ۵۱-۵۸. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)90704-H](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)90704-H).
- [۸] Zakeri, M., Olomolaiye, P. O., Holt, G. D., & Harris, F. C. (۱۹۹۶). A survey of constraints on Iranian construction operatives' productivity. *Construction Management and Economics*, 14(۵), ۴۱۷-۴۲۶. <https://doi.org/10.1080/014461996373287>.
- [۹] Kaming, P. F., Olomolaiye, P. O., Holt, G. D., & Harris, F. C. (۱۹۹۷). Factors



- influencing craftsmen's productivity in Indonesia. *International journal of project management*, 15(1), ۲۱-۳۰. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)0019-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)0019-1)
- [۱۰] Alwi, S. (۲۰۰۳). Factors influencing construction productivity in the Indonesian context. *Proceedings of the 5th Eastern Asia Society for Transportation Studies*; ۲۹ October-۱ November, Fukuoka, Japan; ۱۵۵۷-۱۵۷۱. <https://eprints.qut.edu.au/4227>
- [۱۱] Faridi, A. S., & El-Sayegh, S. M. (۲۰۰۶). Significant factors causing delay in the UAE construction industry. *Construction management and economics*, 24(1), ۱۱۶۷-۱۱۷۶. <https://doi.org/10.1080/01446190600827033>
- [۱۲] Doloi, H. (۲۰۰۸). Application of AHP in improving construction productivity from a management perspective. *Construction Management and Economics*, ۲۶(۸), ۸۴۱-۸۵۴. <https://doi.org/10.1080/01446190802244789>
- [۱۳] Dai, J., Goodrum, P. M., Maloney, W. F., & Srinivasan, C. (۲۰۰۹). Latent structures of the factors affecting construction labor productivity. *Journal of construction engineering and management*, 135(۵), ۳۹۷-۴۰۶. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9374\(2009\)135:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9374(2009)135:5(397))
- [۱۴] EL-Gohary, K. M., & Aziz, R. F. (۲۰۱۴). Factors influencing construction labor productivity in Egypt. *Journal of management in engineering*, 30(1), ۱-۹. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.000168)
- [۱۵] Hwang, B. G., Zhu, L., & Ming, J. T. T. (۲۰۱۷). Factors affecting productivity in green building construction projects: The case of Singapore. *Journal of Management in Engineering*, 33(۳), ۰۴۰۱۶۰۵۲. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.000499](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.000499)
- [۱۶] Hasan, A., Baroudi, B., Elmualim, A., & Rameezdeen, R. (۲۰۱۸). Factors affecting construction productivity: a ۳۰ year systematic review. *Engineering, construction and architectural management*, 25(۷), ۹۱۶-۹۳۷. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2017-0030>
- [۱۷] Dixit, S. (۲۰۲۱). Impact of management practices on construction productivity in Indian building construction projects: An empirical study. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, 13(1), ۲۳۸۳-۲۳۹۰. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2021-0007>
- [۱۸] Awaad, S., Mahdi, I., Mahmoud, D., & Abdelrashid, I. (۲۰۲۲). Factors affecting the productivity of road construction projects in Egypt. *International Journal of Research in Engineering & Management*, 5(۲), ۴۸-۵۳.
- [۱۹] Mahat, N. A. A., Adnan, H., & Yusuwan, N. M. (۲۰۲۱). Analysing Factors Affecting Green Construction Productivity: Exploratory Factor Analysis. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(۵), ۱۹۷-۲۰۴. <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/9970>
- [۲۰] Suhail, S. A. (۱۹۹۳). Out-of-logic progress. *Cost Engineering*, 35(۴), ۲۳.
- [۲۱] Waagner, R. (۲۰۱۲). *Handling out-of-sequence progress*. Rockville, MD: Warner

- Consultants.
- [۲۲] Abotaleb, I. S., El-Adaway, I. H., Ibrahim, M. W., Hanna, A. S., & Russell, J. S. (۲۰۲۰). Developing a rating score for out-of-sequence construction. *Journal of Management in Engineering*, 36(۳), ۰۴۰۲۰۰۱۳. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000760)
- [۲۳] Lee, J. S. (۲۰۱۶). Estimating cumulative damages due to disruptions in repetitive construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(۱۱), ۰۴۰۱۶۰۶۴. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001184](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001184)
- [۲۴] Abotaleb, I. S., & El-adaway, I. H. (۲۰۱۸). Managing construction projects through dynamic modeling: Reviewing the existing body of knowledge and deriving future research directions. *Journal of management in engineering*, 34(۶), ۰۴۰۱۸۰۳۳. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000633)
- [۲۵] Ibrahim, M. W., Hanna, A. S., Russell, J. S., Abotaleb, I. S., & El-Adaway, I. H. (۲۰۲۰). Quantitative analysis of the impacts of out-of-sequence work on project performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(۸), ۰۴۰۲۰۰۹۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001871](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001871)
- [۲۶] Abotaleb, I. S., El-adaway, I. H., Ibrahim, M. W., Hanna, A. S., & Russell, J. S. (۲۰۱۹). Causes, early warning signs, and impacts of out-of-sequence construction: Expert-based survey analysis. *Journal of Management in Engineering*, 35(۶), ۰۴۰۱۹۰۳۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000724](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000724)
- [۲۷] Ye, G., Jin, Z., Xia, B., & Skitmore, M. (۲۰۱۵). Analyzing causes for reworks in construction projects in China. *Journal of management in engineering*, 31(۶), ۰۴۰۱۴۰۹۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000344](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000344)
- [۲۸] Al Saeedi, A. S., & Karim, A. M. (۲۰۲۰). Analyzing the Performance of Mega Construction Projects in Oman: A Study of Selected Projects from Oil & Gas Sector. *American International Journal of Business and Management Studies*, ۲(۲), ۵۲-۷۲. <https://doi.org/10.46540/aijbm.v2i2.247>
- [۲۹] Mahamid, I. (۲۰۲۰). Study of relationship between rework and labor productivity in Building Construction Projects. *Revista de la construcción*, 19(۱), ۳۰-۴۰. <http://dx.doi.org/10.7766/rdlc.19.1.30-40>
- [۳۰] Akal, A. Y. (۲۰۲۴). Determining the Stationary Cause of Construction Delay in Highway Projects. *Journal of Integrated Engineering and Technology*, 1(۱), ۱۸-۳۹. <https://dx.doi.org/10.2116۰۸/jiet.2024.293937.1012>
- [۳۱] Gumusburun Ayalp, G., & Arslan, F. (۲۰۲۵). Modeling Critical Rework Factors in the Construction Industry: Insights and Solutions. *Buildings*, 15(۴), ۶۰۶. <https://doi.org/10.3390/buildings15040606>
- [۳۲] Abotaleb, I. S., & El-adaway, I. H. (۲۰۱۸). First attempt toward a holistic understanding of the interdependent rippled impacts associated with out-of-sequence work in construction projects: System dynamics modeling approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(۹), ۰۴۰۱۸۰۸۴. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001529)



- [۳۳] Ibbs, W., Berry, M., & Sun, X. (۲۰۱۷). Visualizing skipped and out-of-sequence work. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 9(۴), ۰۵۰۱۷۰۰۶. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000240)
- [۳۴] Williams, T., Klakegg, O., Andersen, B., Walker, D., Magnussen, O., & Onsoyen, L. (۲۰۱۰). Early warning signs in complex projects. In *Proceedings of the PMI Research and Education Conference* (pp. ۱-۲۸). Project Management Institute.
- [۳۵] Nikander, I. O. (۲۰۰۲). *Early warnings: A phenomenon in project management*. Dissertation for Doctor of Science in Technology. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology.
- [۳۶] Ansoff, H. I. (۱۹۷۵). Managing strategic surprise by response to weak signals. *California management review*, 18(۲), ۲۱-۳۳. <https://doi.org/10.2307/41164630>
- [۳۷] Larsen, A. S. A., Karlsen, A. T., Lund, J. Å., & Andersen, B. S. (۲۰۲۲). Assessment of early warning signs in hospital projects' front-end phase. *International Journal of Managing Projects in Business*, 15(۲), ۲۹۹-۳۲۳. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-06-2021-0156>
- [۳۸] Liu, Z. M., & Xie, K. F. (۲۰۱۳, June). Research on the Early-Warning for Construction Project Cost Risk. In *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation* (pp. ۱۱۲۷-۱۱۲۹). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2013.265>
- [۳۹] Peng, J. (۲۰۱۶, October). Study on safety risk warning index for highway construction project. In *2016 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016)* (pp. ۹۳۴-۹۳۸). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.145>
- [۴۰] Shokouhi, M. R., Beheshti, M., Fatahi, K., & Rahmati, A. (۲۰۱۸). Identifying Early Warnings in Drilling Projects and Finding their Relationships to the Outcomes and Problems of these Projects in Some Real Cases in Iran. *Petroleum Business Review*, 2(۲), ۶۰-۶۷. <https://doi.org/10.22050/pbr.2018.91321>
- [۴۱] Giri, M., Zhang, C., Olorunnishola, A., Hada, S., & Pal, U. K. (۲۰۲۵). Developing a Construction Delay Prediction Model as a Delay-Avoidance Strategy for Public Construction Projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 17(۳), ۰۴۵۲۵۰۲۷. <https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-1276>
- [۴۲] Shafaat, A., Marbouti, F., & Mahfouz, T. (۲۰۲۳). Early warning system for highway construction projects using GA-SVM. *International Journal of Construction Management*, 23(۱۴), ۲۳۴۸-۲۳۵۷. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2056800>
- [۴۳] Li, G., Ran, R., Fang, J., Peng, H., & Wang, S. (۲۰۲۱). Early Warning for the Construction Safety Risk of Bridge Projects Using a RS-SSA-LSSVM Model. *Advances in Civil Engineering*, 2021(۱), ۴۴۴۹۴۵۱.

- <https://doi.org/10.1105/2021/4449451>
- [۴۴] Zhang, L., Wang, J., Wu, H., Wu, M., Guo, J., & Wang, S. (۲۰۲۲). Early warning of the construction safety risk of a subway station based on the LSSVM optimized by QPSO. *Applied Sciences*, 12(۱۱), ۵۷۱۲. <https://doi.org/10.3390/app121105712>
- [۴۵] Mahdiyar, A., Mohandes, S. R., Durdyev, S., Tabatabaee, S., & Ismail, S. (۲۰۲۰). Barriers to green roof installation: An integrated fuzzy - based MCDM approach. *Journal of Cleaner Production*, 269, ۱۲۲-۲۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122365>
- [۴۶] Wey, W. M. (۲۰۱۹). Constructing urban dynamic transportation planning strategies for improving quality of life and urban sustainability under emerging growth management principles. *Sustainable Cities and Society*, 44, ۲۷۵-۲۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.015>
- [۴۷] Ecer, F., & Pamucar, D. (۲۰۲۰). Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F - BWB) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi - criteria model. *Journal of Cleaner Production*, ۱۲۱۹۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121981>
- [۴۸] Rejeb, A., Rejeb, K., Keogh, J.G., & Zailani, S. (۲۰۲۲). Barriers to blockchain adoption in the circular economy: a fuzzy delphi and best-worst approach. *Sustainability*, 14(۶), ۳۶۱۱. <https://doi.org/10.3390/su14063611>
- [۴۹] Robert, C. (۲۰۰۷). *The Bayesian choice: from decision-theoretic foundations to computational implementation*. NY: Springer Science & Business Media.
- [۵۰] Berger, J. (۲۰۱۳). *Statistical decision theory: foundations, concepts, and methods*. Springer Science & Business Media.
- [۵۱] LaValle, S. M. (۲۰۰۶). *Planning Algorithms*, Cambridge University Press.
- [۵۲] McKenna, C. K. (۱۹۸۰). *Quantitative Methods for Public Decision Making*. United Kingdom: McGraw-Hill.
- [۵۳] Klakegg, O. J., Williams, T., & Shiferaw, A. T. (۲۰۱۶). Taming the 'trolls': Major public projects in the making. *International Journal of Project Management*, 34(۲), ۲۸۲-۲۹۶. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.03.008>
- [۵۴] Nikander, I. O., & Eloranta, E. (۲۰۰۱). Project management by early warnings. *International journal of project management*, 19(۷), ۳۸۵-۳۹۹. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(00\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(00)00211-1)
- [۵۵] Lee, S., Tae, S., Jee, N., & Shin, S. (۲۰۱۵). LDA-based model for measuring impact of change orders in apartment projects and its application for prerisk assessment and postevaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(۷), ۰۴۰۱۵۰۱۱. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000971](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000971)
- [۵۶] Liu, J., Xie, Q., Xia, B., & Bridge, A. J. (۲۰۱۷). Impact of design risk on the performance of design-build projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(۶), ۰۴۰۱۷۰۱۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001299](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001299)

- [۵۷] Son, J., & Rojas, E. M. (۲۰۱۱). Impact of optimism bias regarding organizational dynamics on project planning and control. *Journal of construction engineering and management*, 137(۲), ۱۴۷-۱۵۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000260).
- [۵۸] Babar, S., Thaheem, M. J., & Ayub, B. (۲۰۱۷). Estimated cost at completion: Integrating risk into earned value management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(۳), ۰۴۰۱۶۱۰۴. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001240).
- [۵۹] Ibrahim, M. W. W. (۲۰۱۸). *Improving project performance by mitigating out-of-sequence work and assessing construction readiness*. The University of Wisconsin-Madison. <https://www.proquest.com/openview/effad3a63600de30e071260cc1e02e7b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18700>.