Journal of Structural and Construction Engineering, 12(11), 2026, pp. 157-187

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Using Metaheuristic Algorithm to Select Risk Response Strategy in Green Construction Industry (Case Study: Tehran City)

Ayoub Hassanvand[1], Mohammad Ehsanifar[2]*, Ehsanullah Zaighami[3]

1- *Ph. D Candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran*
2- *Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran*
3- *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran*

ABSTRACT

Successful implementation of construction projects worldwide requires a set of effective risk management plans in which the uncertainties associated with risks and effective response strategies are carefully considered. This study aims to present a metaheuristic optimization approach with which risk response strategies are selected. Metaheuristic optimization algorithms are able to select appropriate strategies to respond to risks optimally. This selection can lead to reduced project time, costs, and also reduced social and environmental damages. Accordingly, a two-stage approach is used in the present study. In the first stage, all green building risks are identified and screened, and then in the second stage, a solution process is presented using a mathematical model and metaheuristic algorithm to obtain the most optimal strategy for responding to green building risks in a case study of a green building project with respect to time, cost, and quality. The results show that for the 17 major green building risks identified in the project, they are related to 5 major and critical project activities based on the risk portfolio. Using the presented mathematical model, appropriate risk response strategies were selected optimally and the risk management system was implemented appropriately in this project. Selecting appropriate risk response strategies in green building projects is one of the concerns of the project stakeholders, and in the present study, a meta-heuristic algorithm has been used to select risk response strategies for green building projects. Tehran, which has a large number of green buildings, was selected as a case study for the present study. For this purpose, all the influential risks in the green building discussion were identified and an appropriate risk response strategy was given for each of the risks.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 November 2024
Revise Date: 27 February 2025
Accept Date: 12 May 2025

Keywords:
Risk Management
Green Construction Project
Response to Risk
Meta-Heuristic Algorithm
Tehran City

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.488008.3576

*Corresponding author:
Email address:

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

بکارگیری الگوریتم فراابتکاری به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز (مطالعه موردی: شهر تهران)

ایوب حسنوند[۱]، محمد احسانی‌فر[۲*]، احسان‌الله ضیغمی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
۲-دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
۳-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

اجرای موفقیت‌آمیز پروژه‌های ساختمانی در سرتاسر جهان مستلزم مجموعه‌ای از برنامه‌های مدیریت ریسک مؤثر است که در آن عدم قطعیت‌های مرتبط با ریسک‌ها و استراتژی‌های پاسخ مؤثر به دقت مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مطالعه با هدف ارائه یک رویکرد بهینه‌سازی فراابتکاری است که با آن استراتژی‌های پاسخ به ریسک انتخاب می‌شوند. الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری قادر به انتخاب استراتژی‌های مناسب برای پاسخ به ریسک‌ها به صورت بهینه هستند. این انتخاب می‌تواند منجر به کاهش زمان، هزینه‌های پروژه و همچنین کاهش خسارات اجتماعی و زیست‌محیطی شود. بر این اساس، از یک رویکرد دو مرحله‌ای در پژوهش حاضر استفاده می‌شود. در مرحله اول، تمامی ریسک‌های ساختمان سبز شناسایی و غربالگری شده و سپس در مرحله دوم با استفاده از یک مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری یک روند حل برای به دست آوردن استراتژی مطلوب‌تر پاسخ به ریسک‌های ساختمان سبز در یک مطالعه موردی پروژه ساختمان سبز با توجه به زمان، هزینه و کیفیت ارائه نموده است. نتایج نشان می دهد برای ۱۷ ریسک مهم ساختمان سبز شناسایی شده در پروژه، مربوط به ۵ فعالیت مهم و بحرانی پروژه بر اساس سبد ریسک می باشد. با استفاده از مدل ریاضی ارایه شده، استراتژی‌های مناسب پاسخ به ریسک‌ها به صورت بهینه انتخاب شدند و سیستم مدیریت ریسک در این پروژه به صورت مناسبی جاری‌سازی گردید. انتخاب استراتژی‌های مناسب پاسخ به ریسک‌ها در پروژه‌های ساختمان سبز یکی از دغدغه‌های ذینفعان پروژه می‌باشد که در پژوهش حاضر، یک الگوریتم فراابتکاری برای انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک پروژه‌های ساختمان سبز استفاده شده است. شهر تهران که با تعدد ساختمان‌های سبز متعدد مطالعه موردی پژوهش حاضر انتخاب شد. بدین منظور، کل ریسک‌های اثرگذار در بحث ساختمان سبز شناسایی و برای هر کدام از ریسک‌ها استراتژی پاسخ به ریسک مناسب داده شد.

کلمات کلیدی: مدیریت ریسک، پروژه ساخت و ساز سبز، پاسخ به ریسک، الگوریتم فراابتکاری، شهر تهران.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.488008.3576
۱۴۰۳/۰۹/۱۰	۱۴۰۳/۱۲/۰۹	۱۴۰۴/۰۲/۲۲	۱۴۰۴/۰۲/۲۲	۱۴۰۴/۱۱/۳۰	doi: 10.22065/jsce.2025.488008.3576

*نویسنده مسئول: محمد احسانی‌فر
پست الکترونیکی: Mo.Ehsanifar@iau.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش شهرنشینی، رشد جمعیت جهانی و توسعه فعالیت‌های تولیدی و صنعتی، هشدارهای جهانی در مورد میزان مصرف انرژی و کنترل آلودگی با هدف حفظ زمین و منابع با ارزش آن افزایش یافته است. بر اساس گزارش سازمان ملل، بیش از نیمی از جمعیت جهان اکنون در مراکز شهری زندگی می‌کنند. رشد خالص جمعیت تقریبا به‌طور کامل در مناطق شهری رخ می‌دهد و تا سال ۲۰۵۰ محیط‌های شهری پذیرای ۲/۶ میلیارد نفر جمعیت دیگر خواهند بود [۱]. اگرچه رشد زیرساختارهای شهری وابسته به حامل‌های انرژی بوده؛ اما با توجه به محدود بودن ذخایر طبیعی و افزایش نیاز جمعیت جهان به منابع انرژی، جهان امروز با بحران انرژی مواجه است. در حال حاضر، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های بشریت به‌عنوان مهم‌ترین عامل در گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی شناخته شده است. بر اساس گزارش‌های موجود، انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ بیش از ۸۰ درصد افزایش یافته است که تهدید بزرگی برای اکوسیستم جهانی به شمار می‌رود [۲]. صنعت ساختمان یکی از بزرگترین صنایع مصرف‌کننده انرژی در دنیا محسوب می‌شود. بر اساس گزارش‌های شورای ساختمان سبز[1] (U.S.GBC) آمریکا، در سال ۲۰۱۴ صنعت ساخت وساز ۴۰ درصد از کل مواد خام جهان را مصرف نموده است. گزارش شورای ساختمان سبز استرالیا[2] (GBCA) در سال ۲۰۱۳ نیز حاکی از آن است که در عملیات ساخت وساز، ۳۲ درصد از منابع تجدیدپذیر و غیرقابل تجدید جهان، ۱۲ درصد از آب موجود و ۴۰ درصد از انرژی مصرف شده و همچنین ۴۰ درصد از تمام گازهای دی‌اکسیدکربن منتشر شده از محل عملیات ساخت و ساز است [۳]. برای بهینه‌سازی مصرف مواد و انرژی در صنعت ساختمان، طیف وسیعی از سیاست‌های نظارتی و اجرایی اتخاذ شده است. یکی از سیاست‌های اجرایی برای در نظرگرفتن الزامات زیست محیطی در صنعت ساختمان، ظهور پروژه‌های ساختمان سبز است که در پی افزایش تقاضا برای ساختمان‌هایی با سازه‌های پایدارتر و مصرف انرژی کمتر به وجود آمده است [۴]. ساختمان سبز به‌عنوان راهی مؤثر برای رفع اختلافات بین توسعه سریع صنعت ساخت و ساز و همچنین حفظ منابع در سایه توجه به افزایش سطح استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و حفظ دیگر منابع انرژی محسوب می‌شود. در حال حاضر، سازه‌های سبز به جایگزین مناسبی در صنعت ساخت و ساز در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته تبدیل شده است. بر اساس گزارش‌های موجود، بیش از ۱۲/۴ میلیارد فوت مربع فضای ساختمان در بیش از ۱۵۰ کشور بر اساس گواهی لید[3] (LEED) ساخته شده‌اند و ۱/۸۵میلیون فوت مربع فضای ساختمان‌ها نیز بر اساس گواهی LEED هر روز تائید می‌شوند. گواهی LEED به‌عنوان معیاری برای سنجش طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساختمان‌های سبز[4] (GB) است و بر اساس آن صرفه‌جویی در انرژی، انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای و بهینه‌سازی سلامت ساکنین ساختمان میسر می‌شود [۵]. طراحی و ساخت ساختمان‌های سبز به آسانی امکان‌پذیر نیست و موانعی نظیر پیچیدگی ساخت، کمبود پیمانکاران و مشاوران، عدم درک پایداری و امکان افزایش هزینه‌ها مانع گسترش بیشتر ساختمان‌های سبز شده است. بر اساس یک تحقیق و بررسی توسط شورای ساختمان سبز ایالات متحده مشخص شد که روش‌های ساخت ساختمان‌های سبز نسبتا نوظهور هستند و استفاده از فناوری‌ها و روش‌های جدید می‌تواند منجر به بروز خطرات احتمالی شود. با رشد صنعت ساختمان سبز، ریسک‌های خاص مربوط به انتظارات، مقررات و تکنولوژی‌های جدید به‌تدریج پدیدار شده است. بنابراین صنعت ساخت و ساز باید با چالش‌های جدیدی در هنگام برخورد با ساز و کارهای مدیریت ریسک روبرو شود [۶]. اگرچه توسعه ساختمان‌های سبز در راستای افزایش نیازهای بازار است، اما خطرات ذاتی پروژه‌های سبز به‌شدت در توسعه ساختمان‌های سبز تأثیر می‌گذارد. بنابراین مدیریت ریسک ساختمان‌های سبز ضروری به نظر می‌رسد. اجرای طرح توسعه ساختمان سبز با توجه به رفتار محافظه‌کارانه و سنتی ذینفعان در محیط‌های مختلف، با چالش‌های زیاد و تضعیف ارتباط بین ذینفعان تیم پروژه روبرو شده است [۲].

ساختمان‌های سبز ساختار پیچیده‌تر و ریسک‌های خاص‌تری را نسبت به ساختمان‌های عادی دارند و به همین دلیل فاز مطالعاتی و ساخت اینگونه بناها باید بسیار دقیق‌تر انجام شود. همچنین با به بلوغ رسیدن ساخت ساختمان‌های سبز، ریسک‌های فنی و نهفته دیگر مربوط به تکنولوژی ساخت، قوانین و انتظارات مشتریان از ساختمان‌های سبز نیز نمایان شده است. با توجه به ناشناخته بودن ابعاد مختلف

1U.S. Green Building Council (USGBC)
2 Green Building Council of Australia (GBCA)
3Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)
4 Green Building (GB)

ریسک‌های موجود در ساخت اینگونه ساختمان‌ها، لازم است تا با مشاوره و به کار بردن روش‌های مرسوم، ریسک‌های بالقوه شناسایی و تجزیه و تحلیل شوند تا متقاضیان پروژه ساختمان سبز بتوانند ریسک‌های موجود را ارزیابی و اقداماتی برای کاهش تأثیرات احتمالی ریسک انجام دهند چراکه اگر ریسک‌های مربوط به پروژه‌های ساختمان سبز به درستی مدیریت نشوند بر تکمیل و بهره‌برداری موفق از پروژه‌های ساختمان سبز تاثیر بیشتری می‌گذارند. در نتیجه، مدیریت موثر ریسک در چرخه عمر پروژه‌های ساختمان سبز از اهمیت بالایی برخوردار است [۷]. به طور خاص، آشکارسازی پیچیدگی اجرای پروژه‌های ساختمان سبز و بررسی دقیق ریسک‌های ناشی از پیچیدگی در طول چرخه عمر پروژه و اقدامات موثر در پاسخ‌گویی به آنها، گام‌های اساسی در مدیریت ریسک است که به ترویج پذیرش وسیع‌تر شیوه‌های ساختمان سبز در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه کمک می‌نماید. بنابراین با توجه به این نکته اساسی، اکثر کشورها باید به ریسک‌های احتمالی که ممکن است مزایای اجرای ساختمان سبز را تحت تاثیر قرار دهد، توجه کافی داشته باشند [۸]. اصطلاح ریسک از قرن ۱۷ میلادی در صنعت ساخت و ساز مطرح گردید و امروزه مفهوم «ریسک» در بسیاری از زمینه‌های گوناگون و با انواع مختلفی از جمله «ریسک»، «چالش» یا «عدم اطمینان» اتخاذ می‌شود [۹]. یک پروژه ساخت و ساز با برنامه‌ریزی و طراحی شروع و پس از آن می‌تواند یک مرحله ساخت و ساز که برای چند ماه طول می‌کشد و در نهایت به دوره عملیاتی که ممکن است چندین دهه قبل از تخریب ادامه یابد و ریسک‌های مختلفی را در مراحل مختلف پروژه تجربه کند. این بدان معنی است که صرف‌نظر از فعالیت، همیشه این امکان وجود دارد که ریسک‌ها رخ دهند و ممکن است کل پروژه‌ها را تحت تاثیر قرار دهند [۱۰]. در سال‌های اخیر، با توسعه سریع و تمدن جامعه، ریسک‌ها به تدریج به دلیل افزایش پیچیدگی ساختاری، اندازه پروژه و پذیرش روش‌های جدید و پیچیده ساخت و ساز افزایش پیدا کرده‌اند [۱۱]. در نتیجه، تمام ذینفعان پروژه باید توانائی، دانش و تجربه خود را برای مدیریت ریسک‌ها در طول چرخه عمر پروژه برای تضمین یک پروژه ایمن، موفق و پایدار بهبود دهند [۱۲]. به همین دلیل یکی از هشت بخش اصلی و مهم مدیریت دانش پروژه، مدیریت ریسک است و یکی از دلایل پروژه‌ها ریسک‌های مدیریت نشده در پروژه‌ها است [۱۳]. طبق نظر برخی از محققین رویکرد سیستماتیک به مدیریت ریسک در صنعت ساخت و ساز شامل سه مرحله اصلی است: ۱) شناسایی ریسک؛ ۲) تحلیل و ارزیابی ریسک؛ ۳) پاسخ به ریسک است. مدیریت ریسک از شناسایی شروع می‌شود که از بخش‌های اصلی مدیریت ریسک است و پس از آن با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های کمی ریسک‌ها ارزیابی شده و در نهایت از استراتژی پاسخ به ریسک این ریسک‌ها کنترل و مدیریت می‌شوند [۱۰]. طبق نظر کانرو، تمامی گام‌های فرآیند مدیریت ریسک دارای اهمیت یکسانی بوده و انجام ناقص هر یک از گام‌ها منجر به مدیریت ریسک غیر موثر می‌شود. فرآیند به طور کلی، مدیریت موثر ریسک با ارزیابی ریسک شروع می‌شود و بدون انجام این مرحله، مدیریت آن امکان‌پذیر نیست [۱۴]. از طرف دیگر، بسیاری از محققین تاکید نموده‌اند که شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها بدون پاسخ‌گویی به آنها مفید نیست. براین اساس، باتوجه به اهمیت مدیریت ریسک ساختمان سبز و با بررسی پژوهش‌ها طی چند دهه اخیر مشخص گردید که تاکنون تحقیقات مختلفی به منظور بهبود مدیریت ریسک ساختمان سبز انجام شده است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود. وانگ[5] و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی اظهار نمودند که ساختمان‌های سبز (GB) توجه ویژه‌ای را برای بهبود پایداری و کاهش انتشار کربن در بخش ساختمان به خود جلب کرده‌اند و همانند پروژه‌های سنتی، مدیریت ریسک نقش مهمی در پروژه‌های سبز دارد. ناکافی بودن مدیریت ریسک ممکن است منجر به کاهش عملکرد نیروی کار، تاخیر در زمان‌بندی پروژه و کیفیت پایین پروژه‌های GB شود. برای درک مدیریت ریسک در پروژه های GB، انجام یک بررسی پیشرفته ضروری است. این مطالعه از روش موارد گزارش ترجیحی برای مرورهای سیستماتیک و متاآنالیز[6] (PRISMA) برای انتخاب ۵۲ رکورد از پایگاه داده‌های معتبر علمی استفاده کرد. تجزیه و تحلیل کتاب-سنجی نشان داد که تاکید در مدیریت ریسک بر شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها در پروژه‌های مهندسی است. متعاقباً، یک تحلیل موضوعی موضوعات تحقیق مرتبط با مدیریت ریسک، از جمله (۱) روش‌های شناسایی ریسک، (۲) شناسایی ریسک در شرایط خاص، (۳) ارزیابی ریسک با مجموعه‌های فازی، تحلیل شبکه‌های اجتماعی[7] (SNA) و مدل‌سازی ساختاری تفسیری[8] (ISM) و (۴) ارزیابی ریسک با سایر فناوری‌ها را به نمایش گذاشت. این مطالعه بر روی شکاف‌های تحقیقاتی در زمینه مدیریت ریسک، به‌ویژه در روش‌های شناسایی ریسک،

5 Wang
6 Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA)
7 social network analysis (SNA)
8 Interpretive Structural Modelling (ISM)

روش‌های ارزیابی ریسک، و فرآیندهای کاهش ریسک تمرکز داشت. در نهایت، با شکاف‌های تحقیقاتی، این مطالعه همچنین جهت‌های تحقیقاتی مرتبط را برای مدیریت ریسک در پروژه های GB پیشنهاد نمود [۱۵].

وونی[9] و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی به شناسایی، طبقه‌بندی، نظریه‌پردازی واکنش‌های زنجیره‌ای ریسک‌های مختلف در پروژه‌های GB پرداختند. نتایج منجر به شناسایی ریسک در ساختمان سبز گردید. این مطالعه نه طبقه‌بندی گسترده از ریسک‌ها را به دست آورد که شامل ریسک‌های مالی، مواد و تجهیزات، طراحی، فنی، ذینفعان، مدیریت، زیست محیطی، قانونی و نظارتی می‌شود. همچنین، این مطالعه یک مدل ساختاری سلسله مراتبی ایجاد کرد که توضیح می‌دهد چگونه ریسک‌های مختلف بر یکدیگر در پروژه‌های GB تأثیر می‌گذارند. بنابراین، این مطالعه نه تنها فهرست جامعی از ریسک‌های بحرانی را به عنوان چارچوب مرجع برای محققان و متخصصان ارائه می‌کند، بلکه می‌تواند تخصیص منابع کارآمدتر را نیز ارائه کند و دیدگاه‌های جدیدی را برای شیوه‌های مدیریتی در پروژه‌های GB معرفی کند [۱۶]. وانگ و چان[10] (۲۰۲۲)، در پژوهشی به ارزیابی ریسک برای پروژه‌های ساختمان سبز پرداختند. آنها بیان داشتند که ارزیابی ریسک جزء کلیدی ساختمان‌های سبز است. در پروژه‌های ساختمان سبز، فرآیند ارزیابی ریسک با عدم قطعیت‌های زیادی مانند شرایط نامشخص، مدل‌های ارزیابی غیرقابل اعتماد و غیره مواجه است. مدیریت ریسک موثر به استفاده از مدل‌های ارزیابی ریسک مناسب بستگی دارد. از این رو، این مطالعه با هدف توسعه یک ماتریس ساختار ریسک جدید با اطلاعات زبانی احتمالی برای پروژه‌های ساختمان سبز است. برای ارزیابی ریسک‌ها با استفاده از اطلاعات زبانی احتمالی، ابتدا یک ماتریس ساختار ریسک ساخته می‌شود. پس از آن، اجماع گروه در مورد ماتریس ساختار ریسک باید تائید شود. برای نشان دادن اثربخشی ماتریس ساختار ریسک منحصر به فرد، یک مطالعه موردی انجام شد. نتایج تحقیق یک دیدگاه جایگزین برای ارزیابی ریسک‌ها ارائه کرده است که منجر به بهبود مدیریت ریسک در ساختمان‌های سبز می‌شود [۱۷]. نگوین و ماکیون[11] (۲۰۲۲)، در پژوهشی به بررسی عوامل ریسک حیاتی برای پروژه‌های ساختمان سبز در کشورهای در حال توسعه پرداختند. آنها اظهار نمودند که ساختمان‌های سبز (GB) مطابق با روند پایداری در سراسر جهان به رشد خود ادامه داده‌اند. با این حال، پروژه‌های GB به دلیل پذیرش فناوری پایداری نوآورانه، اغلب خطرات بیشتری نسبت به پروژه‌های معمولی دارند. در نتیجه، مدیریت ریسک برای پروژه‌های GB در مقایسه با پروژه‌های مرسوم، به ویژه در کشورهای در حال توسعه با مطالعات ریسک GB کمی پیچیده‌تر و ضروری‌تر است. به عنوان اولین تلاش، این تحقیق با هدف بررسی عوامل خطری که پروژه های GB اغلب در ویتنام با آن مواجه هستند، انجام شد. ابتدا، ۵۳ عامل ریسک با مرور مطالعات قبلی و مصاحبه با متخصصان صنعت شناسایی شدند. سپس پرسشنامه‌ای برای جمع آوری داده ها از ۲۰۷ متخصص ساخت و ساز برای ارزیابی اهمیت عوامل خطر GB ایجاد شد. نتیجه، فهرست رتبه‌بندی ریسک‌های GB و ارزیابی‌های مربوط به آن‌ها را ارائه کرد. سپس، تحلیل عاملی اکتشافی انجام شد و شش مؤلفه تأثیرگذار ریسک را نشان داد: (۱) ریسک فنی و منابع انسانی در مرحله ساخت و ساز، (۲) ریسک عملکرد در مرحله بهره برداری، (۳) ریسک منابع انسانی در مرحله طراحی، (۴) ریسک مالی، (۵) ریسک مقررات و پیچیدگی، و (۶) ریسک مادی. همچنین، این تحقیق هیچ تفاوتی در اولویت‌های ریسک در میان نقش‌های مختلف در پروژه‌های GB پیدا نکرد. این یافته‌ها بینشی در مورد خطرات GB ارائه می‌دهد که می‌تواند برای متخصصان و تحقیقات آینده مفید باشد. سهم نهایی شامل بحث در مورد ریسک‌های حیاتی و پیشنهاداتی برای جهت گیری های تحقیقاتی بیشتر بود [۱۸]. شیائو و همکاران در پژوهشی (۲۰۲۱) بیان داشتند که پروژه‌های ساختمانی سبز نیاز به روشی برای کنترل ریسک برای تحویل بهتر پروژه در مرحله اجرای پروژه به دلیل خطرات بیشتر مرتبط با فناوری‌ها و ابزارهای نوآورانه دارند. بنابراین در پژوهش حاضر، به ارائه روشی برای مدیریت در جهت کنترل ریسک در پروژه های ساختمان سبز نمودند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری در تلاش برای کنترل و عملکرد تقریباً یکسانی در تکمیل دارد. این امر نه تنها به بهبود تحویل پروژه کمک می‌کند، بلکه در صورت استفاده از آن برای کنترل خطرات برنامه‌ریزی شده در مرحله اجرای پروژه‌های ساختمان سبز، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای[12] (GHGs) و اثرات زیست محیطی کمک نمود [۱۲]. گیوآن و همکاران[13] (۲۰۲۰) بیان داشتند که پروژه های ساختمان سبز در سال‌های اخیر به دلیل مزایای متعدد شیوه‌های سبز برای توسعه پایدار توجه زیادی را در صنعت

9 Wuni
10 Wang & Chan
11 Nguyen & Macchion
2Green House Gases (GHGs)
3Guan et al

ساختمان به خود جلب کرده است. با این حال، تلاش‌های تحقیقاتی موجود در زمینه مدیریت ریسک پروژه ساختمان سبز بسیار محدود است و هیچ تحقیق عمیق قبلی بر مطالعه وابستگی متقابل ریسک در پروژه‌های ساختمان سبز از دیدگاه چرخه عمر پروژه و خطرات متعدد پروژه متمرکز نشده است. بدین منظور پژوهش حاضر ابتدا با شناسایی و تمایز محدودیت‌های پروژه ساختمان سبز با استفاده از مرور منسجم ادبیات آغاز می‌شود و سپس بر اساس روش مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM)، وابستگی متقابل ریسک بررسی گردید و اهمیت عوامل ریسک بر اساس انتقال تأثیر از طریق مسیرهای شبکه در مدل مبتنی بر روش ساختاری تفسیری محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقررات صادرات و واردات مواد اولیه، فناوری، محصولات بیمه شده، ایمنی پروژه در مرحله ساخت و بهره‌برداری از جمله ریسک‌های مهم در پروژه‌های ساخت‌وساز بوده است [۷]. لی و همکاران[۱۴] (۲۰۱۹) نشان دادند که از سال ۲۰۱۰ به بعد بسیاری از مهندسان ساخت و ساز، علاقه زیادی به بررسی عواملی دارند که پروژه‌های ساخت و ساز را با موفقیت همراه می‌سازند تا ریسک‌های ساخت و ساز به حداقل برسد، در این پژوهش برقراری ارتباط بین همکاران، برنامه‌ریزی و کنترل مؤثر پروژه، تعهد مالک پروژه، اهداف مشخص و عملکرد مدیر پروژه در پایان موفقیت‌آمیز پروژه های ساخت و ساز سبز تأثیرگذار هستند و رعایت این عوامل می‌تواند ریسک را تا حد زیادی کاهش دهد [۱۹]. بون گانگ[۱۵] (۲۰۱۸)، در پژوهش خود نشان دادند که عملکرد پروژه‌های ساخت‌وساز بر اساس حق بیمه سبز آن‌ها مشخص می‌شود. در واقع عملکرد بهتر هزینه حق بیمه را کاهش داده و پروژه را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش نشان داده شد که اکثر پروژه‌های ساخت‌وساز سبز دارای حق بیمه سبز هستند و ۵ تا ۱۰ درصد از ساختمان‌های مسکونی سبز بالاترین حق بیمه را دارند و نوع پروژه و اندازه پروژه بر روی حق بیمه تأثیرگذار است. از طرفی کاهش مالیات می‌تواند در کاهش هزینه حق بیمه و در نتیجه افزایش عملکرد پروژه‌ها تأثیرگذار باشد [۲۰]. همچنین در پژوهش دیگری تائو و زیانگ یانگ[۱۶] (۲۰۱۸)، در پژوهش خود با عنوان «شناسایی ریسک در پروژهای ساخت و ساز سبز بر اساس دیدگاه پایداری» ۱۹ عامل را با استناد به نظر ۱۰ کارشناس، شناسایی کردند و نشان دادند که کمبود مدیران با تجربه در مرحله عملیاتی و رضایت مردم از پروژه ها دو خطر مهم و جدی هستند که پروژه را به خطر می اندازند [۲۱]. پارک و همکاران[۱۷] (۲۰۱۶)، در پژوهشی تحت عنوان «رتبه بندی ریسک‌ها در پروژه‌های عظیم» مجوزهای مختلف، تأخیر برنامه، تغییر جریان نقدی، خطا در فرایند کسب و کار، افزایش هزینه‌های ساخت‌وساز، نامناسب بودجه و تأمین مالی طرح، احتمال وقوع ریسک مالی، تغییر از شاخص‌های کلان اقتصادی، هزینه‌های پروژه و برنامه‌ریزی پروژه، تأخیر در راه‌اندازی، ساخت‌وساز اضافی، تعارض کنسرسیوم (پیمانکار)، تأخیر در شروع ساخت‌وساز و پایان، را به عنوان ریسک‌های مؤثر در پروژه‌های عظیم ساخت‌وساز معرفی کردند [۲۲]. یانگ و همکاران[۱۸] (۲۰۱۴)، در پژوهش خود با عنوان «ریسک‌های مرتبط با ذینفعان و ارتباط بین آن‌ها در ساخت‌وساز سبز» نشان دادند که ذینفعان پروژه‌های داخلی بیشترین ریسک را تجربه می‌کنند و می‌توان با توانایی درک ریسک ها و ارزیابی به موقع، در کاهش خطرات به روش مؤثر و کارآمدی عمل کرد. بدین ترتیب هر چقدر ریسک بهتر کنترل شود و ارتباط بین ذینفعان بیشتر باشد، مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز بهتر خواهد بود [۲۳]. یانگ و همکاران (۲۰۱۶)، در پژوهش خود با عنوان «مدلسازی شبکه‌های ریسک پروژه‌های ساخت‌وساز» که با هدف الگوبرداری از شبکه‌های تعاملی بین ذینفعان در پروژه‌های ساخت‌وساز سبز انجام شد، داده‌ها از طریق کارگاه‌های گروهی متمرکز، مصاحبه حضوری و مطالعه میدانی جمع‌آوری شد و نتایج نشان داد که دولت نقش مهمی در بهبود دانش و آگاهی جوامع از فناوری سبز دارد [۲۴].

همانطور که مشاهده می‌شود، بیشتر پژوهش‌های انجام شده در حوزه بهبود مدیریت ریسک تاکنون بر روی شناسایی و ارزیابی ریسک‌های ساخت و ساز سبز متمرکز شده و استراتژی پاسخ به ریسک را مورد توجه قرار نگرفته است که مطابق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته شناسایی و ارزیابی‌ها ریسک بدون پاسخ‌گویی به آنها مفید نیست. براین اساس با توجه به خلا مطالعاتی پی برده شده در پژوهش حاضر، پژوهشگران به طراحی یک مدل ریاضی و توسعه یک الگوریتم فرا ابتکاری به منظور حل کارآمد مدل جدید ریاضی در جهت مشخص کردن استراتژی‌های پاسخ به ریسک پروژه‌های ساخت و ساز سبز پرداختند که نتایج بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان ابزارهای پیشرفته در بهینه‌سازی و انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز، مزایای قابل توجهی دارند. این مزایا شامل موارد زیر است:

[1]Li et al
[2]Bon Gang
[3]Tao and Xiang-Yuan
[4]Park et al
[5]Yang et al

۱) **بهینه‌سازی چندهدفه**: الگوریتم فراابتکاری، توانایی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را دارند. این ویژگی به مدیران پروژه کمک می‌کند تا استراتژی‌هایی را انتخاب کنند که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، کیفیت و زمان اجرای پروژه را نیز مدنظر قرار دهند.

۲) **مدیریت ریسک زیست‌محیطی**: با استفاده از این الگوریتم‌ها، می‌توان ریسک‌های زیست‌محیطی را شناسایی و مدیریت کرد. این امر به ویژه در پروژه‌های ساختمانی که تحت تأثیر عوامل محیطی قرار دارند، اهمیت دارد.

۳) **کاهش زمان و هزینه**: شناسایی دقیق ریسک‌ها و انتخاب استراتژی‌های مناسب با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند منجر به کاهش زمان و هزینه نهایی پروژه‌ها شود. این موضوع به جلوگیری از خسارات اجتماعی و زیست‌محیطی کمک می‌کند.

۴) **سیستم مدیریت ریسک کارآمد**: پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری در انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک، موجب ایجاد یک سیستم مدیریت ریسک مؤثر در پروژه‌ها می‌شود که می‌تواند به ذینفعان اطمینان بیشتری در تصمیم‌گیری بدهد.

۵) **انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری**: این الگوریتم‌ها قابلیت تطبیق با شرایط مختلف پروژه‌ها را دارند و می‌توانند به راحتی با تغییرات محیطی و نیازهای خاص هر پروژه سازگار شوند.

استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در صنعت ساختمان سبز نه تنها به بهینه‌سازی فرآیندها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند تأثیرات مثبت برروی محیط زیست و سلامت عمومی نیز داشته باشد. بدین منظور، با توجه به مزایای ساخت و ساز سبز و اهمیت مدیریت ریسک در راستای دستیابی به موفقیت پروژه اجرا شده، این تحقیق با هدف بکارگیری الگوریتم فراابتکاری NSGA-II به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز انجام می‌شود. الگوریتم NSGA-II به دلیل ویژگی‌های خاص خود در مقایسه با سایر روش‌های فراابتکاری، انتخاب مناسبی برای بسیاری از مسائل چندهدفه است:

۱) کارایی بالا: الگوریتم NSGA-II، یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه است که کارایی آن در حل مسائل مختلف، مورد تایید قرار گرفته است. با توجه به حساسیت نسبتاً زیادی که نحوه عملکرد و کیفیت جوابهای الگوریتم NSGA به پارامترهای اشتراک برازندگی و سایر پارامترها دارد، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II معرفی گردید. این الگوریتم یکی از اساسی‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی است که می‌توان آنها را نسل دوم این گونه روش‌ها دانست [۲۵].

۲) بهینه‌سازی چندهدفه: الگوریتم NSGA-II قادر است به طور همزمان چندین هدف را بهینه‌سازی کند و در نتیجه برای مسائلی که نیاز به تعادل بین اهداف مختلف دارند، مناسب است.

۳) تنوع در حل‌ها: این الگوریتم با حفظ تنوع در جمعیت، امکان یافتن راه‌حل‌های متنوع‌تر را فراهم می‌کند که در مسائل پیچیده بسیار سودمند است.

۴) سرعت و دقت بیشتر: الگوریتم NSGA-II با توجه به سرعت و دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها و همچنین ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم، جانشین مناسبی برای روش‌های تجزیه و روش‌های سنتی می‌باشد.

در این راستا، برای دستیابی به این هدف اصلی تحقیق، ابتدا ریسک‌هایی که بر سر راه پروژه‌های ساخت و ساز سبز وجود دارد به صورت کلی شناسایی خواهند شد و سپس، با ارائه راهکارهایی بهینه ریسک‌های ارزیابی شده مدیریت خواهند شد که با اجرای ساخت و ساز سبز بتوان از مزایای آن در پروژه‌هایی که در ایران طراحی و اجرا می‌شوند بهره کافی را برد و جلوی بسیاری از دوباره‌کاری‌ها و افزایش زمان و هزینه در پروژه‌ها گرفته شود و امکان توسعه بیشتر ساخت و ساز سبز فراهم گردد و کارفرمایان و بقیه ذینفعان پروژه از مزایای ساخت و ساز سبز بهره‌مند گردند.

۲- روش‌شناسی تحقیق

روش تحقیق فرآیندی سازمان‌یافته برای رسیدن به اهداف پژوهش است که شامل مراحل مشخصی می‌باشد. نخستین مرحله در طراحی روش تحقیق، تعیین نوع آن است که بر اساس هدف، روش گردآوری داده‌ها و ماهیت پژوهش مشخص می‌شود. مرحله دوم شامل توضیح روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها است. این بخش نشان می‌دهد که پژوهشگر با استفاده از چه رویکردهایی داده‌های جمع‌آوری‌شده را بررسی و تحلیل خواهد کرد. هدف پژوهش حاضر، بکارگیری الگوریتم فراابتکاری به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز می‌باشد چرا که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسائل پیچیده و چندهدفه در مدیریت ریسک اهمیت بسیاری دارد. این الگوریتم‌ها به دلیل توانایی‌شان در جستجوی فضای بزرگ راه‌حل‌ها و یافتن پاسخ‌های بهینه یا نزدیک به بهینه، به ابزاری مؤثر در مواجهه با مسائل پیچیده تبدیل شده‌اند. در واقع، به طور کلی می‌توان گفت که الگوریتم‌های فراابتکاری ابزارهای قدرتمندی برای حل مسائل پیچیده مدیریت ریسک هستند که می‌توانند تصمیم‌گیری را تسهیل کرده و کارایی سیستم‌ها را افزایش دهند. بنابراین با توجه به اهمیت پژوهش حاضر و در راستای دستیابی به هدف اصلی، پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و توسعه‌ای است؛ زیرا هدف آن حل مسائل واقعی صنعت ساختمان سبز است. همچنین روش تحقیق پژوهش حاضر یک تحلیل کمی با استفاده مدل ریاضی و الگوریتم فرا ابتکاری می‌باشد. در طول فرآیند مدلسازی از یک حرکت رو به جلو استفاده می‌شود که بجز زمانی که پژوهشگر بخواهد اصلاحاتی بر روی مدل انجام دهد به عقب برمی‌گردد. فرآیند اجرایی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است:

شکل ۱: مراحل اجرای تحقیق.

۲-۱- شناسایی ریسک‌های موثر در پروژه‌های در ساختمان سبز

در مرحله اول، به شناسایی ریسک‌های موثر در پروژه‌های ساختمان سبز پرداخته شد. بدین منظور، ابتدا ریسک‌های تاثیرگذار بر ساختمان سبز با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای در ادبیات تحقیق و مصاحبه با خبرگان استخراج گردید. جدول ۱، عوامل ریسک تأثیرگذار در ساختمان‌های سبز را نشان می‌دهد. در ادامه هر یک از معیارها نیز تشریح می‌شوند.

جدول۱: ریسک‌های پروژه‌های ساختمان سبز.

معیار	زیرمعیار	کد زیرمعیار	منابع
سیاست‌ها و استانداردها	قوانین دولتی و مراحل تصویب پیچیده	C1	زرین‌پور و همکاران [۲]، یانگ و همکاران [۲۴-۲۳] و مصاحبه با خبرگان
	عدم وجود بیمه خاص برای مرحله ساخت ساختمانهای سبز	C2	
اقتصادی	قیمت بالای مواد اولیه ساختمان	C3	زرین‌پور و همکاران [۲]، کین[19] و همکاران [۲۶]، خوشنوا[20] و همکاران [۲۷] و مصاحبه با خبرگان
	افزایش هزینه غیرمنتظره مالک	C4	
	افزایش هزینه گواهینامه ساختمان سبز	C5	
	عدم توجه به تأثیر تورم در محاسبات اقتصادی	C6	
	عدم تخصیص بودجه کافی از سمت تأمین کننده مالی به دلیل عدم جذابیت طرح	C7	
	عدم برآورد دقیق از میزان بازده سرمایه‌گذاری ساختمان سبز در بلندمدت	C8	
زیست محیطی	تولید ضایعات	C9	زرین‌پور و همکاران [۲]، کین و همکاران [۲۶]، خوشنوا و همکاران [۲۷]، گوان و همکاران [۷] و مصاحبه با خبرگان
	مصرف انرژی بیش از مقدار پیش بینی شده	C10	
	آلودگی صوتی، آب، خاک و هوا	C11	
مدیریتی	نداشتن تجربه کافی در مدیریت ساختمان‌های سبز	C12	زرین‌پور و همکاران [۲]، کین و همکاران [۲۶]، خوشنوا و همکاران [۲۷]، گوان و همکاران [۷] و مصاحبه با خبرگان
	عدم هماهنگی بین اعضای تیم اجرایی پروژه	C13	
	تاخیر پروژه	C14	
فنی و کیفیت	کمبود مشاوران باتجربه در ساختمان سبز	C15	زرین‌پور و همکاران [۲]، کین و همکاران [۲۶]، خوشنوا و همکاران [۲۷]، گوان و همکاران [۷] و مصاحبه با خبرگان
	عدم وجود تجربه کافی در ساخت وساز با فناوری های جدید	C16	
	عملکرد نامطلوب مواد اولیه سبز	C17	

[19] Qin
[20] Khoshnava

دسته‌بندی ریسک‌ها به پنج گروه سیاست‌ها، اقتصادی، زیست‌محیطی، مدیریتی و فنی می‌تواند یک چارچوب مفید برای سازمان‌ها باشد تا ریسک‌های مختلف را شناسایی و مدیریت کنند. در ادامه توضیحاتی در مورد جامع بودن این دسته‌بندی و مقایسه آن با سایر دسته‌بندی‌های موجود ارائه می‌شود.

۱) **سیاست‌ها و استانداردها:** با توجه به اینکه دستگاه‌های اجرایی در فرآیند تأیید و تصویب ساختمان‌های سبز نقش دارند، هر یک از آن‌ها استانداردها و سیاست‌های اجرایی متفاوتی را اتخاذ می‌کنند. این تفاوت دیدگاه‌ها ممکن است اجرای قوانین مرتبط با ساختمان‌های سبز را با چالش مواجه کند. علاوه بر این، ارائه خدمات بیمه‌ای در تمام مراحل یک پروژه ساخت‌وساز ضروری است، اما تاکنون بیمه ویژه‌ای برای مرحله ساخت ساختمان‌های سبز از سوی سازمان‌های بیمه تعریف نشده است [۲].

۲) **ریسک‌های اقتصادی**: مواد اولیه مورد استفاده در ساختمان‌های سبز باید کمترین تأثیر یا هیچ تأثیری بر انسان و محیط زیست نداشته باشند تا بتوانند مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسید کربن و آلودگی داخلی ساختمان را کاهش دهند. از آنجا که ساکنان ساختمان‌ها بیش از ۸۰ درصد از زمان خود را در خانه سپری می‌کنند، وجود مواد خطرناک می‌تواند مستقیماً بر کیفیت محیط داخلی ساختمان و در نتیجه بر سلامت افراد تأثیر منفی بگذارد. اگرچه استفاده از مواد اولیه در ساختمان‌های سبز به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی کمک می‌کند، اما این مواد معمولاً هزینه بیشتری نسبت به مصالح معمولی دارند. همچنین، هزینه‌های مربوط به دریافت گواهینامه LEED می‌تواند هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده‌ای را برای مالکان این نوع ساختمان‌ها ایجاد کند. با توجه به اینکه نرخ تورم تحت تأثیر عواملی مانند هزینه انرژی، نرخ بهره، دسترسی و هزینه نیروی کار ماهر، ثبات سیاسی و کمیاب بودن مواد اولیه قرار دارد، این عوامل ممکن است بر محاسبات اقتصادی تأثیر گذاشته و جذابیت مالی پروژه‌های ساختمان سبز را کاهش دهند. یکی دیگر از چالش‌های اقتصادی مرتبط با ساختمان‌های سبز، نبود تخمین دقیق از میزان بازده سرمایه‌گذاری در بلندمدت است. به دلیل تعداد کم ساختمان‌های سبز در کشور، هنوز مکانیزم مشخصی برای ارزیابی دقیق بازده سرمایه‌گذاری وجود ندارد. این موضوع باعث شده که تأمین‌کنندگان مالی بودجه کافی برای این پروژه‌ها اختصاص ندهند و سازندگان و خریداران نیز انگیزه کمتری برای مشارکت در ساخت یا خرید این نوع ساختمان‌ها داشته باشند [۲].

۳) **ریسک زیست محیطی**: در ساخت ساختمان‌های سبز، توجه ویژه‌ای به بهره‌وری انرژی و کاهش ضایعات به‌عنوان معیارهای اصلی در انتخاب مواد و فناوری‌های سازگار با محیط زیست می‌شود. علاوه بر مصرف بهینه انرژی، مسائل مرتبط با کیفیت هوای داخلی ساختمان‌ها و آلودگی‌های صوتی، آبی و خاکی اطراف آن‌ها نیز به یکی از چالش‌های مهم در میان پژوهشگران تبدیل شده است. در این راستا، تلاش می‌شود با رعایت استانداردها و مقررات ساخت‌وساز، میزان آلودگی ناشی از فرآیند ساخت به حداقل برسد. بنابراین، عواملی مانند تولید ضایعات، مصرف انرژی بیش از حد پیش‌بینی‌شده و آلودگی‌های صوتی، آب، خاک و هوا به‌عنوان اصلی‌ترین ریسک‌های زیست‌محیطی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲].

۴) **ریسک‌های مدیریتی:** ساخت ساختمان‌های سبز به دلیل جدید بودن در سطح پیشرفته خود، با چالش‌هایی مانند کمبود تجربه کافی در میان مدیران پروژه روبه‌رو است. تیم‌های اجرایی این پروژه‌ها برای دستیابی به هماهنگی و تجربه عملی نیازمند زمان هستند، و این موضوع در کوتاه‌مدت قابل تحقق نیست. عدم همکاری موثر میان اعضای تیم‌های پروژه می‌تواند منجر به تأخیر در اجرای ساختمان‌های سبز شود. تأخیر در پروژه‌ها یکی از دغدغه‌های اصلی کارفرمایان و پیمانکاران است که هزینه‌های قابل‌توجهی را بر ذینفعان پروژه تحمیل می‌کند [۲].

۵) **ریسک‌های فنی و کیفیت:** با توجه به اینکه صنعت ساخت‌وساز سبز در ایران همچنان نوپا است، تعداد مشاوران متخصص و با تجربه‌ای که بتوانند با بهره‌گیری از دانش خود در مراحل مختلف طراحی، مطالعه و نظارت بر پروژه‌ها تصمیمات اصولی و صحیح اتخاذ کنند، بسیار محدود است. علاوه بر این، تجربه کافی در زمینه استفاده از فناوری‌های نوین ساخت‌وساز نیز وجود ندارد. از سوی دیگر، مواد مورد استفاده در ساختمان‌های سبز باید دارای ویژگی‌هایی همچون پیشرفته بودن، کارایی بالا، سازگاری با محیط زیست و سلامت انسان باشند. این مواد باید قابل بازیافت بوده و به گونه‌ای طراحی شوند که در طول چرخه عمر خود تأثیر منفی بر محیط زیست و سلامت انسان نداشته باشند. اگرچه فرآیند انتخاب مواد برای مصالح سبز و غیرسبز مشابه است، اما انتخاب مصالح سبز نیازمند مسئولیت‌پذیری بیشتری است و باید بر اساس معیارهای پایداری و عملکرد سبز انجام شود. با توجه به جدید بودن این نوع مصالح، نگرانی‌هایی درباره کیفیت و عملکرد بلندمدت آنها وجود دارد [۲].

انتخاب پنج گروه یادشده (سیاست‌ها، اقتصادی، زیست‌محیطی، مدیریتی و فنی) جامعیت خوبی دارد زیرا: ۱) پوشش گسترده‌ای نسبت به انواع مختلف ریسک پروژه‌های ساختمان سبز دارد. ۲) هر یک از آنها جنبه خاصی از فعالیت‌های یک کسب وکار را مورد توجه قرار می‌دهند. ۳) امکان تحلیل دقیق‌تر هر بخش وجود دارد. همچنین برای مقایسه عمیق‌تر میان ریسک‌های مرتبط با ساختمان سبز و ساختمان سنتی، می‌توان به جنبه‌های مختلف این دو نوع ساخت‌وساز پرداخت. در ادامه، مقایسه کلی در زمینه ریسک‌ها بررسی شده‌اند و در جدول۲ ارائه شده است:

جدول۲: مقایسه کلی ریسک در ساختمان سبز و ساختمان سنتی.

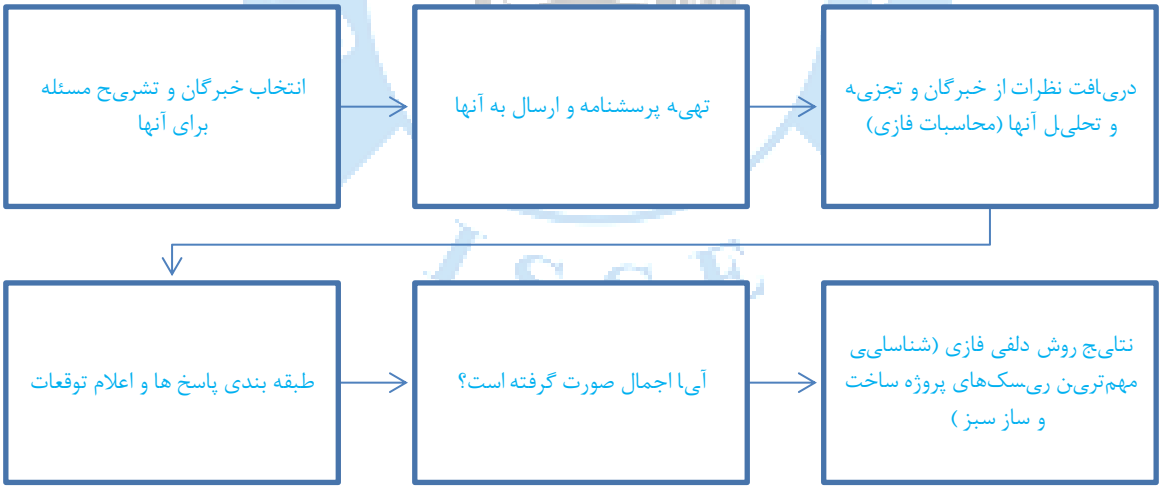
ریسک	ساختمان سبز	ساختمان سنتی
سیاست و استاندارد	☐ پیچیدگی در تصویب قوانین و مقررات مرتبط با ساختمان‌های سبز یکی از چالش‌های اصلی است. این موضوع باعث تأخیر در پروژه‌ها می‌شود. ☐ تغییرات مکرر سیاست‌های دولتی و عدم تعریف روشن از قوانین محلی نیز می‌تواند ریسک‌زا باشد. ☐ نبود بیمه خاص برای مراحل ساخت سبز، سرمایه‌گذاری را پرریسک‌تر می‌کند. بنابراین به طور کلی، ریسک سیاست و استاندارد در ساختمان سبز بالا بوده و نیازمند قوانین خاص و بوروکراسی پیچیده می‌باشد.	☐ به دلیل وجود قوانین تثبیت‌شده و آشنایی بیشتر ذینفعان با فرآیندها، ریسک ناشی از سیاست‌ها کمتر است. اما همچنان ممکن است تغییرات سیاسی یا اقتصادی در سطح کلان تأثیرگذار باشد. ☐ به طور کلی، ریسک سیاست و استاندارد در ساختمان سبز پایین بوده و قوانین تثبیت‌شده و ساده‌تر می‌باشد.
اقتصادی	☐ هزینه‌های اولیه بالا: یکی از مهم‌ترین ریسک‌های اقتصادی در پروژه‌های ساختمانی سبز، هزینه‌های اولیه بالای آن‌ها است. استفاده از فناوری‌ها و مصالح پایدار باعث افزایش هزینه ساخت می‌شود. ☐ تامین مالی چالش‌انگیز: تأمین بودجه بانکی برای پروژه‌های سبز ممکن است دشوارتر باشد زیرا توسعه‌دهندگان باید صرفه‌جویی در هزینه را در کل چرخه عمر ساختمان مدنظر قرار دهند. ☐ بازگشت سرمایه طولانی‌تر: اگرچه مزایای مالی بلندمدت وجود دارد، اما زمان بازگشت سرمایه ممکن است طولانی‌تر باشد که این	☐ هزینه انرژی بالاتر: با گذشت زمان، هزینه انرژی برای این نوع ساختمان‌ها بیشتر خواهد شد که به دلیل عدم استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است. ☐ مالیات و مقررات محیطی: با توجه به قوانین جدید محیطی، احتمال اعمال مالیات یا جریمه بر روی این نوع سازه‌ها وجود دارد که می‌تواند یک ریسک بالقوه باشد. ☐ ارزش‌گذاری کمتر: ارزش‌گذاری بلندمدت این سازه‌ها ممکن است کمتر باشد زیرا آنها به همان اندازه سازگار با محیط زیست نیستند. ☐ به طور کلی، ریسک اقتصادی در ساختمان سنتی دارای هزینه ساخت کمتری دارد اما

	☐	موضوع می‌تواند یک ریسک اقتصادی تلقی شود. به طور کلی، ریسک اقتصادی در ساختمان سبز دارای مزایای بلندمدت مانند کاهش مصرف انرژی و افزایش ارزش ملک، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر می‌باشد.	احتمالاً دارای هزینه عملیاتی بالاتر خواهد بود. ممکن است تحت تأثیر مقررات جدید زیست‌محیطی قرار گیرد.
زیست محیطی	☐ ☐ ☐	کاهش مصرف انرژی: با استفاده از فناوری‌هایی مانند سیستم‌های خورشیدی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی انجام می‌شود که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. حفاظت از محیط زیست: مصالح بازیافتی یا پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد که تأثیرات منفی بر محیط را کاهش می‌دهد. همچنین، جمع‌آوری آب باران و استفاده موثر از نور طبیعی بخشی از ویژگی‌های آن است. ریسک خاص خود: اگرچه ریسک زیست‌محیطی کمتری دارند، اما ممکن است با چالش‌هایی مانند هزینه بالاتر ساخت اولیه مواجه شوند. همچنین، نیاز به مجوزهای خاص برای تأیید سبز بودن وجود دارد که خود یک ریسک محسوب می‌شود.	☐ ☐ ☐	مصرف انرژی و منابع: ساختمان‌های سنتی معمولاً از منابع انرژی فسیلی استفاده می‌کنند که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌شود. آلودگی محیط زیست: این ساختمان‌ها ممکن است از مصالح ساختمانی با مواد مضر برای محیط زیست استفاده کنند و زباله بیشتری تولید کنند. تأثیر بر تغییرات آب‌وهوایی: مصرف سوخت فسیلی در این ساختمان‌ها باعث افزایش گرمایش جهانی می‌شود.
مدیریتی	☐ ☐ ☐	نداشتن تجربه کافی در مدیریت: این ریسک به دلیل استفاده از فناوری‌ها و مصالح جدیدتر در ساختمانی سبز بیشتر است. عدم تجربه کافی می‌تواند منجر به مشکلاتی مانند انتخاب ناصحیح مواد یا طراحی نامناسب شود که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. عدم هماهنگی بین اعضای تیم پروژه: با توجه به پیچیدگی بیشتر پروژه‌های ساختمان سبز (به دلیل استفاده از فناوری‌های نوین)، هماهنگی بین اعضای تیم بسیار مهم است تا اطمینان حاصل شود که همه اجزای سازگار با محیط زیست به‌درستی اجرا می‌شوند تاخیر پروژه: تاخیرها ممکن است بیشتر باشند زیرا دسترسی به مواد خاص یا تجهیزات مورد نیاز برای سازگاری با محیط زیست محدود باشد. همچنین، فرآیند اخذ مجوزهای زیست‌محیطی نیز زمان‌برتر است.	☐ ☐ ☐	نداشتن تجربه کافی در مدیریت: این ریسک کمتر است زیرا روش‌های ساخت سنتی شناخته شده‌تر هستند و نیاز به دانش تخصصی کمتری دارند. عدم هماهنگی بین اعضای تیم پروژه: اگرچه عدم هماهنگیبین اعضا یک چالش است، اما ممکن است کمتر از ساختمان‌های سبز باشد زیرا فرآیندهای ساخت سنتی معمولاً ساده‌تر هستند. تاخیر پروژه: تاخیرها در پروژه‌های ساختمان سنتی نسبت به ساختمان سبز کمتر می‌باشد زیرا دسترسی به مواد خاص یا تجهیزات مورد نیاز محدود نبوده.
فنی و کیفیت	☐ ☐	ساختمان‌های سبز نیاز به تخصص خاص در زمینه فناوری‌های نوین، مصالح پایدار، و طراحی محیطی دارند. بنابراین، کمبود مشاوران با تجربه در این زمینه می‌تواند منجر به مشکلات جدی در طراحی، اجرا و مدیریت پروژه شود. استفاده از فناوری‌های نوین و مواد سبز بدون تجربه کافی ممکن است منجر به	☐ ☐	ساختمان‌های معمولی نیازمند تخصص عمومی‌تر هستند که دسترسی به آن آسان‌تر است. عدم تجربه کافی با فناوری‌های جدید می‌تواند منجر به مشکلات فنی مانند استفاده نادرست از تجهیزات یا مواد شود، که ممکن است کیفیت ساخت را تحت تأثیر قرار دهد.

	☐ افزایش مصرف انرژی یا آلودگی شود که با اصول پایداری سازگار نیست. ☐ این ساختمان‌ها به دلیل استفاده از فناوری‌ها و مصالح جدید، مانند مصالح بازیافتی یا مواد سازگار با محیط زیست، با ریسک بیشتری مواجه هستند. عدم تجربه کافی در کار با این مواد می‌تواند به عملکرد نامطلوب آنها بیانجامد.	☐ ریسک عملکرد نامطلوب در ساختمان‌های سنتی بیشتر ناشی از کیفیت پایین مصالح یا روش ساخت است. استفاده از مصالح شناخته شده و تست شده معمولاً ریسک را کاهش می‌دهد.

۲-۲- تشکیل تیم خبرگان و غربالگری ریسک‌های موثر در پروژه‌های ساختمان سبز

در این مرحله با استفاده از تکنیک دلفی اقدام به غربالگری ریسک‌های شناسایی شده موثر در پروژه‌های ساختمان سبز می‌شود. گروه خبرگان شامل ترکیبی از مدیران و مدیران ارشد نظام مهندسی شهرستان تهران که دارای تخصص و تجربه کاری در پروژه ساختمان سبز بودند که مشتمل بر ۱۰ نفر می‌باشند. اگرچه کارشناسان از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای انجام مقایسه‌ها استفاده می‌نمایند اما با نظرات مبهم از قبیل اهمیت خیلی کم، اهمیت کم، اهمیت متوسط، اهمیت زیاد، اهمیت خیلی زیاد مشخص می‌شوند. معمولا تصمیم-گیرندگان با استفاده از واژگان غیردقیق و غیرکمی اتفاقات و اشیای فازی را محدود می‌کنند. باید به این نکته توجه کرد که تفکر انسان فرآیند کمی کردن عددی را به طور کامل ندارد. بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (بکارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت. در ادامه برخی از مزایای روش دلفی فازی به‌صورت خلاصه ارائه شده است: ۱) این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد تا به جای اینکه صرفاً تخمین‌هایی واضح مانند روش سنتی دلفی داشته باشد، ابهام را در رابطه با مورد پیش‌بینی و محتوای اطلاعاتی پاسخ دهندگان پردازش کند. ۲) ویژگی‌های فردی متخصصان به دلیل پیش‌بینی‌های فازی مورد استفاده روشن و در نتیجه حفظ می‌شود. در ادامه در شکل۲، فرآیند کلی دلفی فازی به صورت کامل ارائه شده است:



شکل۲: فرآیند کلی دلفی فازی.

۲-۳- طراحی مدل بهینه‌سازی برای انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک

در این مرحله یک مدل ریاضی برای تخصیص پاسخ‌های مناسب به هر ریسک شناسایی شده بر اساس اهمیت آنها ارائه می‌شود. برای این منظور کلیه مفروضات، پارامترها، متغیرها، توابع هدف و قیود لازم در این بخش توضیح داده شده است.

۱-۳-۲- مفروضات مدل ریاضی

- ☐ ذینفعان اصلی هر پروژه در سطوح مختلف مهارتی تقسیم بندی شده‌اند.
- ☐ بودجه ارتقای سطح مهارت ذینفعان در هر دوره تعیین شده و محدود است.
- ☐ تعداد پروژه‌ها معلوم است.
- ☐ هزینه اجرای هر تخصیص استراتژی به ریسک معلوم است.
- ☐ تأثیر اجرای هر استراتژی بر هر ریسک براساس سطح مهارت پاسخگویی ذینفعان معلوم است.
- ☐ به یک عضو از هر سبد ریسک حداقل بایستی یک استراتژی تخصیص شود.
- ☐ سهم هر پروژه از استراتژی حداکثر دو و حداقل یک است.
- ☐ اجرای استراتژی‌ها از عهده تک تک ذینفعان خارج است.
- ☐ تأثیر اجرای استراتژی‌ها بر همدیگر در نظرگرفته نشده است.
- ☐ اجرای استراتژی‌ها هم‌زمان اجراء نمی‌شوند.
- ☐ افق برنامه‌ریزی محدود و یکساله است.
- ☐ ترتیب اجرای استراتژی‌ها، تأثیری بر اثرگذاری آنها بر ریسک مورد نظر نمی‌گذارد.

۲-۳-۲- اندیس‌ها

f : سبد ریسک $f = 1,2,\dots,F.$

i: نوع ریسک $i = 1,2,\dots,I.$

k: استراتژی‌ها $k = 1,2,\dots,K.$

l: سطح مهارت ذینفعان برای پاسخ‌گویی به ریسک‌ها $l = 1,2,\dots,L.$

j: تعداد پروژه‌ها $j = 1,2,\dots,J.$

۳-۳-۲- پارامترها

C_{kf}: هزینه اجرای استراتژی k ام از سبد ریسک f ام

A_{kfil}: درصد پایش شده اجرای استراتژی k ام از سبد ریسک f ام از نوع ریسک i ام با سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک‌های l

B: بودجه ارتقای سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک‌ها

T_{kfl}: تعداد پروژه‌های موجود برای تخصیص استراتژی k به سبد ریسک f با سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک‌هاl

E: حداکثرتعداد استراتژی در هر دوره زمانی

Y_{jil}: میزان توانمندی پروژه j در مواجهه با ریسک i با توجه به سطح مهارت‌های ذینفعان آن

P_{jl} : تعداد ذینفعان در پروژه j با سطح مهارت های پاسخگویی به ریسک l

Q_{kfjil} : تعداد ذینفعان پاسخگو برای استراتژی k به سبد ریسک f از پروژه j در نوع ریسک i با سطح مهارت پاسخگویی l

۴-۳-۲- متغیر تصمیم

$$X_{kf} = \begin{cases} 1 & \text{استراتژی k از سبد ریسک های f انتخاب شود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (1)$$

۵-۳-۲- مدلسازی ریاضی

$$MaxZ = \sum_{k=1}^{K}\sum_{f=1}^{F}\sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L} X_{kf} A_{kfil} T_{kfl}$$

$$\sum_{K=1}^{k}\sum_{f=1}^{F} X_{kf} C_{kf} \le B \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{kf} \le 2 \qquad \forall f = 1,...,F \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{kf} \ge 1 \qquad \forall f = 1,...,F \quad (4)$$

$$\sum_{f=1}^{F}\sum_{k=1}^{K} X_{kf} \le E \quad (5)$$

$$E.X_{kf} \ge F \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{I} Y_{jil}.X_{kf} \le T_{kfl} \qquad \forall l = 1,...,L \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{I} Q_{fkjil}.X_{kf} \ge 1 \qquad \begin{array}{l} \forall f = 1,...,F \\ \forall k = 1,...,K \\ \forall l = 1,...,L \\ \forall j = 1,...,J \end{array} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{I} Q_{fkjil} . X_{kf} \le 0.3 P_{jl} \quad \begin{matrix} \forall j = 1,...,J \\ \forall l = 1,...,L \\ \forall k = 1,...,K \\ \forall f = 1,...,F \end{matrix} \qquad (۹)$$

در مجموعه معادلات فوق؛ تابع هدف مسأله، ماکزیمم Z میزان ارزش گذاری هر استراتژی در هر سبد ریسک ها را به واسطه سطح مهارت ذینفعان در پاسخگویی به ریسک مورد نظر ماکزیمم می‌کند. ارزش ایجادشده از تخصیص استراتژی k به سبد ریسک f در درصد پایش شده اجرای استراتژی kام از سبد ریسک fام از نوع ریسک iام با سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک های l با استفاده از تعداد پروژه‌های موجود برای تخصیص استراتژی k به سبد ریسک f با سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک هاl را بیشینه می‌کند. محدودیت (۲)، به عنوان محدودیت بودجه سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک‌ها در نظر گرفته شده است، محدودیت (۳)، محدودیت حداکثر اجرای دو استراتژی را در هر سبد ریسک برای هر پروژه تضمین می‌کند، محدودیت (۴)، اجرای حداقل یک استراتژی را از هر سبد ریسک بازگو می‌کند. محدودیت (۵)، اجرای تعداد استراتژی‌ها را تضمین می‌کند. محدودیت (۶)، تضمین می‌کند که حداقل تعداد استراتژی‌ها بزرگتر یا مساوی تعداد سبدهای ریسک است. محدودیت (۷)، ظرفیت مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به هر استراتژی را نشان می‌دهد. محدویت (۸) نشان می‌دهدکه حداقل یک نفر از هر پروژه با مهارت مورد نظر در استراتژی k از سبد ریسک f وجود دارد و سرانجام محدودیت (۹) تضمین می‌کند که حداکثر ۳۰ درصد ذینفعان پاسخگو در هر مهارت از یک پروژه در استراتژی وجود دارند.

۶-۳-۲- اعتبارسنجی مدل ریاضی

در فرآیند اعتبارسنجی مدل، وقتی که یک مدل ریاضی توسعه داده می شود طبق استناد به مراجع موجود حسن پور جسری و همکاران [۲۸]، حیدری کوشال‌شاه و همکاران [۲۹] و ابوالقاسیمان و همکاران [۳۰] بررسی دو قضیه ضروری است. قضیه اول اشاره به شدنی بودن مدل ریاضی توسعه یافته و قضیه دوم اشاره به کراندار بودن ناحیه شدنی می کند. بنابراین در صورت تأیید هر دو قضیه مدل ریاضی ارائه شده معتبر خواهد بود. برای این منظور، در صورت اجرای مدل ریاضی و حصول حداقل یک راه حل، شدنی بودن مسأله قابل بررسی است. طبق نتیجه بدست آمده از اجرای مدل در نرم افزار گمز، نتایج زیر در خصوص مدل توسعه یافته بدست آمده است.

جدول۳: وضعیت مدل ریاضی.

قضیه	نتیجه	دلیل	مدت زمان اجرا
شدنی بودن	مدل شدنی است	مقدار تابع هدف برابر با ۹۲.۲۴۵ و ۴۵.۱۵۱ محاسبه شده است.	۰.۱۰۲ ثانیه
کراندان بودن	مدل کراندار است	طبق خروجی نرم افزار	

۴-۲- روش نرم افزاری تحقیق انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز

گمز[۲۱] یک زبان سطح بالا برای توسعه مدل‌های ریاضی با جملات مختصر جبری است و برای حل مسائل بهینه‌سازی خطی، غیرخطی و عددصحیح مناسب است. جدا از حال طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی، می‌تواند سیستم‌های معادله خطی و غیرخطی همزمان را اداره کند و باعث توسعه بیشتر مدل‌های خطی و غیر خطی و مشکلات ناشی از آن شود. دو ویژگی جذاب یک زبان مدلسازی عبارتند از:

- تفکیک پذیری مسئله ریاضی و روش حل

1General Algebraic Modelling System

- ☐ شرح مختصر مدل‌ها از طریق جملات جبری مستقل از الگوریتم مورد استفاده
- ☐ تفکیک پذیری داده‌ها و حفظ توصیف ریاضی مدل در عین افزایش/کاهش اندازه مسئله

بنابراین کاربر می‌تواند الگوریتم‌های متفاوتی را بدون تغییر ساختار مدل اصلی پیاده‌سازی کند و مدل‌های ریاضی بزرگ را که توانایی سازگاری با شرایط جدید را دارند بسازد. نرم افزار گمز در بسیاری از صنایع مختلف از جمله صنایع انرژی، برق و شیمیایی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. محرک اصلی ایجاد گمز، کاربران برنامه‌نویسی ریاضی بودند که به بهینه‌سازی به عناوان یک چارچوب قدرتمند و زیبا برای حل مشکلات زندگی واقعی در علوم و مهندسی اعتقاد داشتند و در عین حال از هزینه‌های بالا، مهارت‌های لازم و همچنین قابلیت اطمینان پایین ابزارهای بهینه سازی موجود ناامید شده بودند. گمز در ابتدا توسط یک گروه از اقتصاددانان بانک جهانی برای تسهیل حل و فصل بزرگ و پیچیده مدل‌های غیرخطی بر روی کامپیوتر شخصی توسعه داده شد. در واقع نرم افزار گمز امکان حل کردن غیر همزمان سیستم معادلات خطی بدون بهینه سازی برخی از توابع هدف را دارد. از مزایای نرم افزار گمز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ☐ پیاده سازی
- ☐ قابلیت حمل و انتقال بین کاربران و سیستم‌ها
- ☐ قابلیت برنامه‌نویسی و بهینه‌سازی همزمان
- ☐ راحتی بروزرسانی به دلیل ترکیب الگوریتم‌های جدید
- ☐ مهیا نمودن یک زبان سطح بالا برای خلاصه کردن برنامه‌نویسی مدل‌های بزرگ و پیچیده
- ☐ بستر مناسب برای ایجاد تغییرات آسان و ایمن در مدل‌های مختلف
- ☐ محیط و زبان بسیار ساده برای ایجاد گزاره‌ها و روابط جبری
- ☐ صرفه‌جویی در وقت و انرژی کاربر به هنگام برنامه‌نویسی به دلیل استفاده از حل‌کننده‌های مختلف
- ☐ ذخیره اطلاعات خروجی با روش‌ها و فرمت‌های مختلف
- ☐ دارای امکانات قدرتمندی مانند تولید گزارشات در هر قالب دلخواه
- ☐ دارای ویژگی‌های اشکال زدایی عالی برای شناسایی سریع خطاها است
- ☐ خروجی نرم افزار را می‌توان مستقیماً به برنامه‌های گسترده برای تجزیه‌وتحلیل گرافیکی و غیره مرتبط کرد.

۵-۲- گام چهارم: استفاده از الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک[۲۲] از هر دو علم رایانه و ژنتیک طبیعی نشأت‌گرفته، واژه‌های مورد استفاده‌اش مخلوطی از واژه‌های طبیعی و مصنوعی است. مفاهیم اولیه که در فهم الگوریتم ژنتیک بسیار حیاتی هستند، عبارت است از [۳۱]:

۱) کروموزوم: رشته‌ای از بیت‌ها است که شکل رمز شده‌ی جواب محتمل مسئله می‌باشد. البته می‌توان آن را ژنوتایپ نیز نامید. به عبارتی دیگر، کروموزوم رشته یا دنباله‌ای از بیت‌ها است که جواب ممکن (مناسب یا نامناسب) در آن به صورت کد نمایش داده می‌شود. هر عضو کروموزوم[۲۳] نمایانگر یک حل، برای مسئله‌ی موجود است.

۲) فنوتایپ: هر کروموزوم متناظر با مجموعه جوابی برای مسئله است. مجموعه‌ی متناظر باهر کروموزوم را یک فنوتایپ گویند.

22 Genetic algorithm

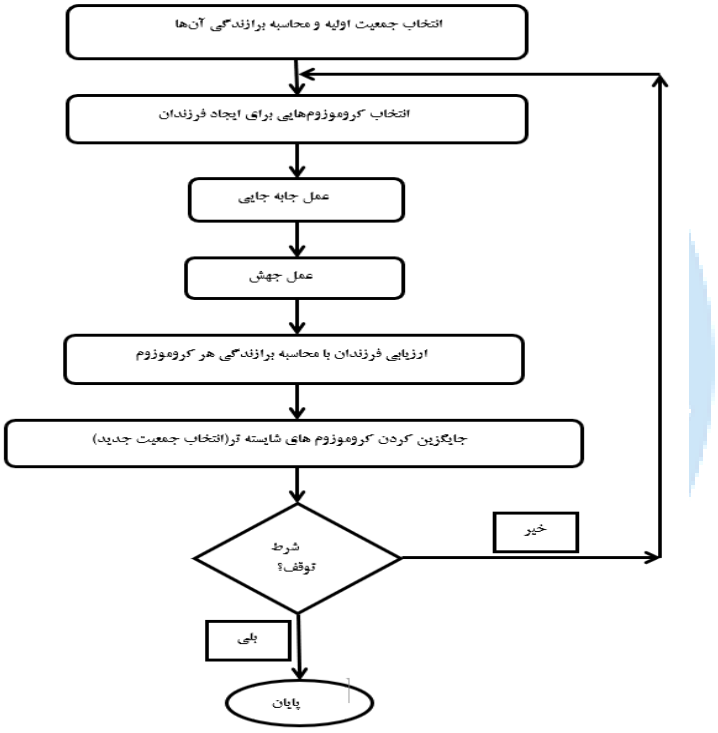
2 Chromosome

۳) بیت: بیت در یک رشته همان نقش ژن در طبیعت را دارد. مقادیر اولیه‌ی بیت‌ها به طور تصادفی مشخص می‌شود.

۴) جمعیت: مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها را جمعیت گویند. الگوریتم ژنتیک با جمعیتی از کروموزوم‌ها کار می‌کند. الگوریتم ژنتیک برخلاف سایر روش‌های جستجو، با یک مجموعه‌ی ابتدایی از جواب‌های تصادفی که جمعیت اولیه[۲۴] نام‌گذاری شده است، آغاز می‌شود.

۵) نسل: هر تکرار از الگوریتم ژنتیک را یک نسل گویند.

۶) تابع برازندگی: تابعی است که مقادیر متغیرهای مسئله در آن قرار می‌گیرد و مطلوبیت هر جواب را مشخص می‌کند. معمولاً خود تابع هدف است. تابع هدف جهت تعیین اینکه افراد چگونه در محدوده‌ی مسئله ایفای نقش می‌نمایند، مورد استفاده قرار می‌گیرد و تابع برازندگی معمولاً برای تبدیل مقدار تابع هدف به یک مقدار برازندگی وابسته به آن به کار می‌رود.



شکل۳: مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک [۳۱].

در ادامه، شبه کد الگوریتم در نرم افزار متلب نیز مطابق زیر تعریف می شود:

```
1.Initialize population P with size N
2. Evaluate fitness of each individual in P
3. While stopping criteria not met do:
    4. Create an empty population Q
    5. Perform non-dominated sorting on P
    6. Assign crowding distance to each individual in P
    7. For each front F in sorted population do:
        8. If size of Q + size of F <= N then:
            9. Add F to Q
        10. Else:
```

3 Initial Population

```
            11. Sort F based on crowding distance
            12. Add individuals from F to Q until size of Q reaches N
            13. Break
    14. Create offspring population O using crossover and mutation operators on
individuals in P and Q
    15. Evaluate fitness of each individual in O
    16. Combine P and O into a new population R
    17. Set P = R
18. End While
19. Return the non-dominated solutions from P
```

استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز به دلایل زیر توجیه می‌شود:

۱) این الگوریتم به طور خاص برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی شده است. در صنعت ساختمان سبز، تصمیم‌گیری‌ها معمولاً شامل چندین هدف متضاد است. این الگوریتم قادر است به طور همزمان بهینه‌سازی این اهداف را انجام دهد و راه‌حل‌های متعددی را ارائه دهد که تعادل مناسبی بین این اهداف برقرار می‌کنند.

۲) یکی دیگر از مزایایNSGA-II، توانایی آن در تولید مجموعه‌ای متنوع از راه‌حل‌ها (پارتوفرانت) است. این ویژگی به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که از بین گزینه‌های مختلف، استراتژی‌هایی را انتخاب کنند که بهترین تناسب را با نیازها و شرایط خاص پروژه‌های ساختمان سبز دارند.

۳) صنعت ساختمان با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است، از جمله تغییرات در هزینه‌ها، تأخیرات زمانی و ریسک‌های زیست‌محیطی. NSGA-IIمی‌تواند به شناسایی و ارزیابی این عدم قطعیت‌ها کمک کند و استراتژی‌های پاسخ به ریسک را به گونه‌ای انتخاب کند که اثرات منفی آن‌ها را کاهش دهد.

۴) با استفاده ازNSGA-II، فرآیند انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک به یک فرآیند سیستماتیک و علمی تبدیل می‌شود. این الگوریتم به مدیران پروژه کمک می‌کند تا با استفاده از داده‌های دقیق و تحلیل‌های علمی، تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.

۵) این الگوریتم به راحتی می‌تواند با تغییرات در پارامترها و شرایط پروژه سازگار شود. این انعطاف‌پذیری به مدیران پروژه این امکان را می‌دهد که در مواجهه با شرایط جدید، استراتژی‌های خود را به‌روز کنند و بهینه‌سازی‌های لازم را انجام دهند.

به طور کلی، استفاده از الگوریتم NSGA-II در انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز، به بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری پروژه‌ها کمک می‌کند.

۳-بکارگیری الگوریتم فراابتکاری به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز (مطالعه موردی: شهر تهران)

تهران، پایتخت و بزرگ‌ترین شهر ایران، در دامنه رشته کوه‌های البرز واقع شده و به عنوان مرکز استان تهران شناخته می‌شود. این شهر با جمعیتی بالغ بر ۹ میلیون نفر در سال ۱۴۰۱، به عنوان پرجمعیت‌ترین شهر غرب آسیا و سی و چهارمین شهر پرجمعیت جهان محسوب می‌شود. تهران با مساحتی حدود ۶۱۵ کیلومتر مربع، به ۲۲ منطقه و ۱۲۲ ناحیه تقسیم شده است. این شهر از شمال به کوه‌های البرز و از جنوب به دشت‌های هموار شهریار و ورامین محدود می‌شود. توسعه ساختمان‌های بلند در تهران به‌عنوان یک شهر درحال توسعه در ایران با شرایط مختلف جغرافیایی بسیار مهم است. هرساله پروژه‌های ساختمانی چندطبقه به دلیل افزایش جمعیت اجرا می‌گردد. باگذشت زمان این پروژه‌ها اثرات مخربی بر محیط زیست می‌گذارند درنتیجه ساختمان سبز راهکار مناسبی برای کاهش این اثرات می‌باشد؛ بنابراین، لازم است ارزیابی ریسک بر روی پروژه‌های ساختمانی سبز صورت گیرد تا راهکار مفیدی برای مدیران باشد. در روش‌هایی که مبتنی بر نظرات خبرگان است، بیشتر از اینکه به تعداد خبرگان اهمیت داده شود، توان علمی و ارتباط داشتن دانش افراد با موضوع اهمیت دارد. کارشناسان پژوهش حاضر، شامل افرادی است که در پروژه‌های ساختمان سبز درگیر یا از آن اطلاع دارند. حجم نمونه شامل ۱۰ نفر متشکل از مدیران

و مدیران ارشد نظام مهندسی شهرستان تهران که دارای تخصص و تجربه کاری در پروژه ساختمان سبز بودند، می‌باشد. در ادامه، نتایج مراحل شناسایی ریسک و مدل‌سازی ریاضی برای تخصیص پاسخ به ریسک‌ها ارائه شده است.

۳-۱- نتایج روش دلفی فازی (شناسایی مهم‌ترین ریسک‌های پروژه ساخت و ساز سبز)

از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی ادبیات، فهرستی از ریسک‌های موثر بر ساخت و ساز سبز شناسایی شدند. سپس غربالگری اولیه انجام شد و اقدامات تکراری یا مترادف حذف شدند که منجر به شناسایی ۱۷ خطر مهم مرتبط با اجرای ساخت و ساز سبز شد. جدول۳ عوامل شناسایی شده برای مساله را نشان می‌دهد.

۳-۲- نتایج مدل‌سازی ریاضی برای تخصیص پاسخ به ریسک‌ها

۳-۲-۱- تخصیص پاسخ های مناسب به هر ریسک

در این بخش از تحقیق با معلوم شدن ریسک‌های مرتبط با ساخت پروژه های سبز و طبقه بندی آنها در پنج سید ریسکی اعم از سیاست ها و استانداردها، اقتصادی، زیست محیطی، مدیریتی و فنی و کیفیتی مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد. در جدول ۴ استراتژی‌های مناسب در خصوص پاسخگویی به هر ریسک نیز نشان داده شده است.

جدول٤: استراتژی‌های پاسخگویی به ریسک‌ها.

استراتژی	کد استراتژی
سرویس دوره ای تجهیزات	C1
تعبیه سیستم گرمایشی و سرمایشی مناسب	C2
استفاده از افراد ماهر	C3
استفاده از وسایل مناسب برای بلند کردن اجسام سنگین	C4
محکم کردن محل قرار گیری اجسام سنگین مانند ژنراتور	C5
استفاده از دستکش ایمنی حین کار	C6
جمع آوری نخاله ها و آشغال ها	C7
استفاده مجدد از کاغذها در صورت امکان	C8
عدم قرارگیری افراد متفرقه در کنار شعله آتش	C9
استفاده از عینک محافظ حین کار	C10
استفاده از گوشی محافظ	C11
استفاده از ماسک و کار در فضای باز	C12
ارتقای امنیت محیط کار	C13
نصب علائم هشداردهنده	C14
آموزش اولیه HSE	C15
سالم بودن کابل ها	C16
عایق بودن محل اتصال	C17
مدیریت زمان	C18

در این بخش، کلیه مفروضات در نظر گرفته شده برای مدل ریاضی توسعه داده شده تعیین شده‌اند. در این تحقیق برای اجرای مدل ریاضی توسعه داده شده ریسک‌ها در پنج سبد که عموما پروژه ها با آنها روبرو می شوند در نظر گرفته شده است. این سبدهای ریسک عبارت اند از: سیاست ها و استانداردها، اقتصادی، زیست محیطی، مدیریتی و فنی و کیفیت. هر یک از این سبدهای ریسک براساس نوع آنها برای تخصیص استراتژی مربوطه به هر ریسک براساس سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک ها که به صورت سه گانه در نظر گرفته شده (کم، متوسط و زیاد) مورد سنجش قرار می‌گیرند. در مجموع ۱۸ استراتژی برای ریسک ها در نظر گرفته شده است. موارد فوق با طراحی یک پرسشنامه که در معرض قضاوت خبرگان ۱۰ پروژه ساختمان سبز که متشکل از مدیران و مدیران ارشد نظام مهندسی شهرستان تهران

که دارای تخصص و تجربه کاری در پروژه ساختمان سبز بودند، قرار گرفته است. نتایج حاصل از پایش اطلاعات گردآوری شده در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. در جدول ۵، درصد پایش شده اجرای استراتژی klام از سبد ریسک flام از نوع ریسک iام با سطح مهارت ذینفعان برای پاسخگویی به ریسک های l و در جدول ۶، درصد شرکت کنندگان در هر برنامه نشان داده شده است.

جدول۵: درصد پایش اجرای استراتژی به ریسک.

سبد ریسک ها	ریسک ها	تعداد ذینفعان برای اجرای استراتژی بر حسب مهارت آنها				هزینه
		L_1	L_2	L_3	جمع	
سیاست و استانداردها	C1	۳۵	۲۰	۱۵	۷۰	۶۰۰۰
	C2	۲۵	۱۵	۱۰	۵۰	۶۰۰۰
اقتصادی	C3	۹	۷	۷	۲۳	۳۰۰۰
	C4	۳۳	۱۲	۳۰	۷۵	۳۰۰۰
	C5	۵	۱۰	۳	۱۸	۳۰۰۰
	C6	۲۵	۱۵	۱۰	۵۰	۶۰۰۰
	C7	۹	۷	۷	۲۳	۶۰۰۰
	C8	۳۳	۱۲	۳۰	۷۵	۳۰۰۰
زیست محیطی	C9	۱۲	۵	۱۱	۲۸	۵۰۰۰
	C10	۱۲	۱۰	۵	۲۷	۱۵۰۰۰
	C11	۱۱	۵	۹	۲۵	۱۰۰۰۰
مدیریتی	C12	۲۰	۱۵	۸	۴۳	۱۰۰۰۰
	C13	۱۹	۲۳	۱۱	۵۳	۱۰۰۰۰
	C14	۱۱	۵	۹	۲۵	۱۰۰۰۰
فنی و کیفیت	C15	۱۴	۱۹	۱۲	۴۵	۱۰۰۰۰
	C16	۲۰	۱۵	۱۰	۴۵	۳۰۰۰۰
	C17	۱۰	۱۵	۱۰	۳۵	۴۰۰۰۰

جدول۶: درصد حضور ذینفعان برای اجرای استراتژی‌های مقابله با ریسک‌ها در پروژه.

سبد ریسک ها	ریسک ها	تعداد ذینفعان برای اجرای استراتژی بر حسب مهارت آنها		
		L_1	L_2	L_3
سیاست و استانداردها	C1	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C2	۰/۲	۰/۳	۰/۴
اقتصادی	C3	۰/۲	۰/۳	۰/۴
	C4	۰/۲	۰/۳	۰/۴
	C5	۰/۲	۰/۳	۰/۴
	C6	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C7	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C8	۰/۴	۰/۳	۰/۳
زیست محیطی	C9	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C10	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C11	۰/۲	۰/۳	۰/۴
مدیریتی	C12	۰/۲	۰/۳	۰/۴
	C13	۰/۲	۰/۳	۰/۴

	C14	۰/۴	۰/۳	۰/۳
فنی و کیفیت	C15	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C16	۰/۴	۰/۳	۰/۳
	C17	۰/۲	۰/۳	۰/۴

با ملحوظ دانستن موارد فوق در مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح توسعه داده شده و با به اجرا در آمدن مدل جواب بهینه برای مدل بدست می‌آید. نظر به اینکه هدف، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی به هر سبد ریسک ها است می‌توان اظهار کرد که مدل ریاضی از نوع مسأله تخصیص است. برای این منظور با بهره‌گیری از یک حل دودویی (باینری) نسبت به انتخاب یا عدم انتخاب هر برنامه در هر سبد ریسک اقدام می‌نماییم. به طوریکه، اگر استراتژی پاسخ مدنظر در هر سبد ریسک انتخاب گردد، مدل برنامه ریزی به آن مقدار عدد یک و در غیر این صورت مقدار صفر اختصاص می‌دهد. یک نمونه به عنوان مثال در جدول۷، نتایج حل محاسباتی مدل برنامه ریزی ریاضی در نرم افزار GAMS با استفاده از ابزار CPLEX به ازای سبد ریسک سیاست و استاندارد نشان داده شده است.

جدول۷: نتایج محاسباتی تخصیص استراتژی به ریسک‌های سبد سیاست و استانداردها.

استراتژی(K)	نوع ریسک(i)	سبد ریسک(F)	وضعیت
C1	C1; C2	سیاست و استانداردها	۰
C2			۰
C3			۰
C4			۰
C5			۰
C6			۰
C7			۰
C8			۰
C9			۰
C10			۰
C11			۰
C12			۰
C13			۰
C14			۱
C15			۰
C16			۰
C17			۱
C18			۰

در ادامه کلیه نتایج حل محاسباتی مدل برنامه‌ریزی ریاضی در نرم افزار GAMS با استفاده از ابزار CPLEX به ازای هر یک از سبدهای ریسک مشابه جدول۷محاسبه گردید. سپس، در جدول۸ مقدار ارزش ایجاد شده بکارگیری کلیه استراتژی‌ها در هر پروژه و همینطور مقدار ارزش بکارگیری هر استراتژی به طور مجزا در هر یک از سبدهای ریسکی نشان داده شد. در جدول۸، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی-های برای ریسک‌های مربوط با سیاست و استانداردها نشان داده شده است. دو استراتژی نصب علائم هشداردهنده و عایق بودن محل اتصال به عنوان استراتژی های پاسخ به ریسک‌های مربوطه در نظر گرفته می‌شوند. با تخصیص این استراتژی‌ها به ریسک‌ها، تابع ارزش به میزان ۱۰۲/۳۶۵ ایجاد و هزینه تخصیص برابر با ۵۰/۲۵۲ واحد پولی برآورد شد.

جدول۸: ارزش ایجاد شده استراتژی‌های پاسخ به ریسک سیاست و استانداردها.

استراتژی (K)	نوع ریسک (i)	سبد ریسک (F)	وضعیت
C14	C1; C2	سیاست و استانداردها	۱
C17			۱
ارزش ایجاد شده		۱۰۲/۳۶۵	

هزینه تخصیص (واحدپولی)	۵۰/۲۵۲

در جدول۹، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی‌های برای ریسک‌های مربوط با اقتصادی نشان داده شده است. سه استراتژی استفاده از وسایل مناسب برای بلند کردن اجسام سنگین، استفاده از دستکش ایمنی حین کار و استفاده از ماسک و کار در فضای باز به عنوان استراتژی‌های پاسخ به ریسک‌های مربوطه در نظر گرفته می‌شوند. با تخصیص این استراتژی‌ها به ریسک‌ها، تابع ارزش به میزان ۱۵۲/۶۴۷ ایجاد و هزینه تخصیص برابر با ۵۲/۳۴۷ واحد پولی برآورد گردید.

جدول۹: ارزش ایجاد شده استراتژی های پاسخ به ریسک اقتصادی.

(K)استراتژی	(i)نوع ریسک	(F)سبد ریسک	وضعیت
C4	C3; C4; C5; C6; C7; C8	اقتصادی	۱
C6			۱
C12			۱
ارزش ایجاد شده		۱۵۲/۶۴۷	
هزینه تخصیص (واحدپولی)		۵۲/۳۴۷	

در جدول۱۰، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی‌های برای ریسک‌های مربوط با زیست‌محیطی نشان داده شده است. سه استراتژی جمع‌آوری نخاله‌ها و آشغال‌ها؛ استفاده مجدد از کاغذها و آموزش اولیه HSE به عنوان استراتژی‌های پاسخ به ریسک‌های مربوطه در نظر گرفته شدند. با تخصیص این استراتژی‌ها به ریسک‌ها، تابع ارزش به میزان ۱۳۸/۴۷۸ ایجاد و هزینه تخصیص برابر با ۴۸/۲۶۵ واحد پولی برآورد شد.

جدول۱۰: ارزش ایجاد شده استراتژی های پاسخ به ریسک زیست محیطی.

(K)استراتژی	(i)نوع ریسک	(F)سبد ریسک	وضعیت
C7	C9; C10; C11	زیست محیطی	۱
C8			۱
C15			۱
ارزش ایجاد شده		۱۳۸/۴۷۸	
هزینه تخصیص (واحدپولی)		۴۸/۲۶۵	

در جدول۱۱، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی‌های برای ریسک‌های مربوط با زیست محیطی نشان داده شده است. شش استراتژی استفاده از افراد ماهر؛ عدم قرارگیری افراد متفرقه کنار آتش؛ استفاده از عینک محافظ حین کار؛ استفاده از گوشی محافظ؛ استفاده از ماسک و کار در فضای باز و مدیریت زمان به عنوان استراتژی‌های پاسخ به ریسک‌های مربوطه در نظر گرفته شدند. با تخصیص این استراتژی‌ها به ریسک‌ها، تابع ارزش به میزان ۲۳۴/۶۴۸ ایجاد و هزینه تخصیص برابر با ۷۵/۲۳۶ واحد پولی برآورد گردید.

جدول۱۱: ارزش ایجاد شده استراتژی‌های پاسخ به ریسک مدیریتی.

(K)استراتژی	(i)نوع ریسک	(F)سبد ریسک	وضعیت
C3	C12; C13; C14	مدیریتی	۱
C9			۱
C10			۱
C11			۱
C12			۱
C18			۱
ارزش ایجاد شده		۲۳۴/۶۴۸	
هزینه تخصیص (واحدپولی)		۷۵/۲۳۶	

در جدول۱۲، تخصیص مناسب‌ترین استراتژی‌های برای ریسک‌های مربوط با زیست‌محیطی نشان داده شده است. هشت استراتژی سرویس دوره‌ای تجهیزات؛ تعبیه کردن سیستم گرمایشی و سرمایشی مناسب؛ استفاده از وسایل مناسب برای بلند کردن اجسام سنگین؛

محکم کردن محل قرارگیری اجسام سگین مانند ژنراتور؛ استفاده از دستش ایمنی حین کار؛ ارتقای امنیت محیط کار؛ سالم بودن کابل‌ها و عایق بودن محل اتصال به عنوان استراتژی‌های پاسخ به ریسک‌های مربوطه در نظر گرفته شدند. با تخصیص این استراتژی‌ها به ریسک‌ها، تابع ارزش به میزان ۲۸۷/۴۱۷ ایجاد و هزینه تخصیص برابر با ۸۲/۳۲۵ واحد پولی برآورد شد.

جدول۱۲: ارزش ایجاد شده استراتژی‌های پاسخ به ریسک فنی و کیفیت.

(K)استراتژی	(i)نوع ریسک	(F)سبد ریسک	وضعیت
C1	C15; C16; C17	فنی و کیفیت	۱
C2			۱
C4			۱
C5			۱
C6			۱
C13			۱
C16			۱
C17			۱
ارزش ایجاد شده		۲۸۷/۴۱۷	
هزینه تخصیص (واحدپولی)		۸۲/۳۲۵	

بنابراین، بیشترین ارزش ایجاد شده به واسطه تخصیص هر استراتژی به هر ریسک به طور جداگانه و به صورت کلی در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

جدول۱۳: بیشترین ارزش ایجاد شده استراتژی های پاسخ به ریسک ها به صورت مجزا و کلی.

سبد ریسک ها	ارزش تخصیص	هزینه تخصیص
سیاست و استانداردها	۱۰۲/۳۶۵	۵۰/۲۵۲
اقتصادی	۱۵۲/۶۴۷	۵۲/۳۴۷
زیست محیطی	۱۳۶/۴۷۸	۴۸/۲۶۵
مدیریتی	۲۳۴/۶۴۸	۷۵/۲۳۶
فنی و کیفیت	۲۸۷/۴۰۷	۸۲/۳۲۵
جمع کل	۹۳۵/۵۴۵	۳۰۸/۴۲۵

با توجه به نتایج حاصل شده جمع ارزش کل ایجاد شده از تخصیص استراتژی ها به هر ریسک برابر با ۹۳۵/۵۴۵و هزینه کل این تخصیص برابر با ۳۰۸/۴۲۵ محاسبه شده است.

۲-۲-۳- حل محاسباتی فراابتکاری

در این بخش از تحقیق به نتایج حاصل شده از اجرای مدل با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا نحوه تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم فراابتکاری و سپس به ارائه نتایج حاصل از اجرای آن و مقایسه با حل قطعی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا با استفاده از طرح آزمایش L9 تاگوچی پرداخته شده است. برای استفاده از این روش، ابتدا برای پارامترهای الگوریتم ۳ سطح مختلف (کم با کد ۱، متوسط با کد ۲ و زیاد با کد ۳) تعریف گردید. سپس آزمایش های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامتر های این الگوریتم مطابق جدول۱۴ می‌باشد.

جدول۱٤: پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم NSGA-II.

پارامتر	مقادیر هر سطح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Population size (PS)	۴۰	۴۵	۵۰

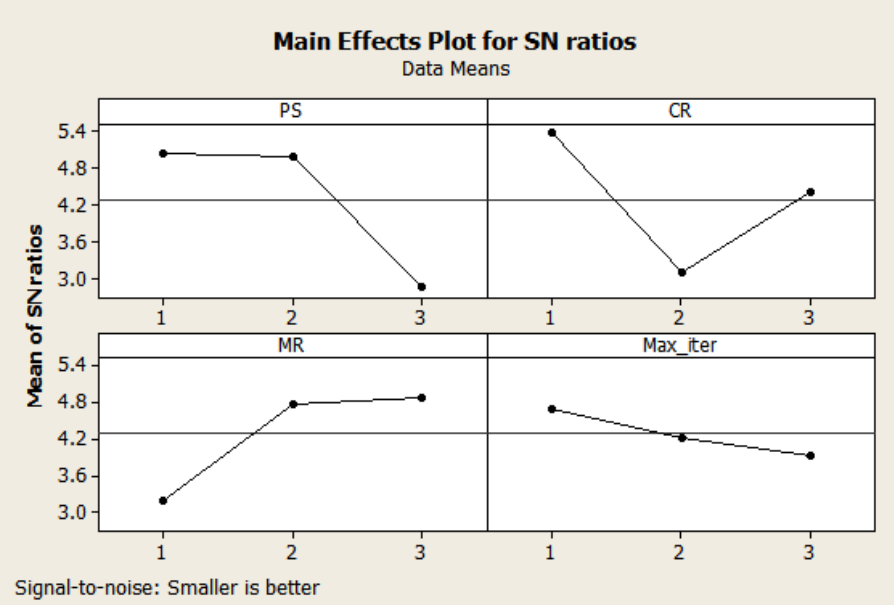
Crossover crate (CR)	۰/۸	۰/۹	۱
Mutation rate (MR)	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۲
Maximum iterations (Max_iter)	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰

سپس با طرح L9 تاگوچی آزمایشات مختلف را ایجاد و برای هر کدام، الگوریتم NSGA-II اجرا شده است. نتایج اجرا برای محاسبه شاخص MID در جدول ۱۵ ارائه شده است. در این جدول کلیه حالات ممکن به ازای سطوح مختلفی که برای فاکتورهای الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته شد، نشان داده شده است. برای مثال در آزمایش اول، کلیه فاکتورهای به ازای کمترین سطح خود در آزمایش حضور دارند. در آزمایش دوم، فاکتور PS با مقدار کمترین سطح و سایر فاکتورها با مقدار سطح متوسط مربوط به خود حضور دارند. به همین ترتیب سایر حالت ممکن براساس قاعده جایگشت در آمار تکمیل می شود. با اجرای هر آزمایش و محاسبه مقدار شاخص MID سطح پاسخ مورد نظر با استفاده از این شاخص برآورد شد.

جدول ۱۵: مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای NSGA-II.

شماره اجرا	پارامترهای الگوریتم				شاخص MID
	PS	CR	MR	Max_iter	
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵۳۴
۲	۱	۲	۲	۲	۰/۶۱۲
۳	۱	۳	۳	۳	۰/۵۳۷
۴	۲	۱	۲	۳	۰/۴۹۱
۵	۲	۲	۳	۱	۰/۵۷۶
۶	۲	۳	۱	۲	۰/۶۳۷
۷	۳	۱	۳	۲	۰/۵۹۹
۸	۳	۲	۱	۳	۰/۹۷۳
۹	۳	۳	۲	۱	۰/۶۴۲

حال با ارائه این خروجی ها به نرم افزار MINITAB نمودار S/N به صورت شکل۴ ارائه شد. براساس مقدار محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز به ازای کلیه سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از فاکتورها، هر چه این مقدار برای سطح مورد نظر کمتر باشد، مقدار آن سطح برای آن فاکتور انتخاب گردید. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS در زمانی اتفاق می‌افتد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد. بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم NSGA-II در نظر می گیریم برابر با ۵۰ خواهد بود. همچنین، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای شاخص CR مربوط به سطح متوسط با کد ۲ این فاکتور است. بنابراین، فاکتور CR با مقدار ۰/۹ در الگوریتم حضور خواهد داشت. علاوه بر این، کمترین مقدار برای فاکتور MR مربوط به زمانی است که این فاکتور در سطح پایین خود با کد ۱ قرار دارد می باشد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۰/۱۲ حضور خواهد داشت. سرانجام، فاکتور Max_iter کمترین مقدار نسبت به نویز را وقتی دارد که در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار داشته باشد. بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۱۲۰ حضور خواهد داشت.



شکل٤: خروجی مینی تب برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.

حال بر اساس خروجی ارائه شده در نمودار فوق بهترین مقدار هر پارامتر در جدول۱۷ مشخص شد و سایر مثال ها با این مقادیر پارامتر های الگوریتم، اجرا گردید. در جدول۱۶ مقدار بهینه پارامتر ها ارائه شده است.

جدول١٦: مقدار بهینه متغیرها در NSGA-II.

پارامتر	مقدار بهینه
Population size (PS)	۲۰۰
Crossover crate (CR)	۰/۷
Mutation rate (MR)	۰/۲
Maximum iterations (Max_iter)	۲۰۰

علاوه بر این در شکل های ۵ و ۶ تنظیمات مربوط به تقاطع و جهش نشان داده شده است. در شکل۵، تقاطع نقاط در الگوریتم NSGA-II نشان داده شده است. سازوکار این عملگر به این صورت است که دو نقطه به طور تصادفی در کروموزوم انتخاب می شوند و در رشته های هر کروموزوم جابه جا می شوند. در شکل۶، نحوه جهش در الگوریتم NSGA-II برای این تحقیق نشان داده شده است. این عملگر نشان می دهد که دو نقطه به صورت تصادفی انتخاب می شوند و هر رشته در این ردیف معکوس می‌شود.

شکل۵: تنظیمات مربوط به عملگر تقاطع در الگوریتم NSGA-II.

شکل۶: تنظیمات مربوط به عملگر جهش در الگوریتم NSGA-II.

سرانجام به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با روش حل قطعی و الگوریتم فراابتکاری پرداخته شد. اختلاف مقدار تابع هدف الگوریتم NSGA-II با مقدار تابع هدف ارائه شده در حل قطعی با یکدیگر مقایسه و به عنوان معیار کارایی دو روش با هم مقایسه گردید. به منظور بررسی الگوریتم NSGA-II استفاده شده برای این مسئله، این الگوریتم در محیط نرم افزار متلب کدنویسی شده است. پس از آن ۱۰ مسئله در ابعاد مختلف به ازای تغییرات در مقدار تعداد ریسک‌ها و استراتژی‌ها ارائه شده است. در جدول ۱۷، نتایج حاصل از حل دقیق مثال‌های تولید شده با نرم‌افزار گمز با نتایج حاصل از الگوریتم NSGA-II براساس دو معیار زمان و مقدار تابع هدف با یکدیگر مقایسه شده‌است.

بر طبق نتیجه بدست آمده، از اجرای محاسبات مشخص شده است که مدل ریاضی قابلیت بسیار مطلوبی در حل مسأله در ابعاد کوچک از خود نشان می‌دهد. این مطلب حتی در زمانی که تعداد ریسک‌ها و استراتژی‌ها در بیشترین حالت ممکن فرض شده است حتی با وجود اینکه زمان محاسباتی افزایش می‌یابد و بالطبع بعد مسأله افزایش یافته است نیز صدق می‌کند، زیرا شکاف بین نتایج حل قطعی و مدل فراابتکاری در حد مطلوبی گزارش شده است. اما با افزایش بیشتر در مقدار ریسک‌ها و تعداد استراتژی‌ها افزایش پیچیدگی مسأله ضمن افزایش زمان محاسباتی، شکاف بین نتایج نیز افزایش پیدا می‌کند و حتی مدل ریاضی قادر به حل مسأله نمی‌باشد. اما با توجه به اینکه در مسائل کوچک و متوسط شکاف بین مدل ریاضی و مدل فراابتکاری قابل اغماض بوده است با اعتماد به نتایج محاسبه شده طبق مدل فراابتکاری توانسته برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به نتایج ارائه شده توسط آن تکیه گردد.

جدول۱۷: نتایج حل مسائل نمونه ریاضی و فراابتکاری.

بعد مسأله	شماره مسئله	تعداد ریسک ها	تعداد استراتژی ها	حل دقیق	الگوریتم فراابتکاری	GCP (%)
				تابع هدف	تابع هدف	
بعد کوچک	PR1	۵	۱	۶۸/۸۰۱	۶۸/۸۰۱	۰/۰۰۰
	PR2	۵	۲	۷۵/۸۹۲	۷۵/۸۹۲	۰/۰۰۰
بعد متوسط	PR3	۶	۱	۳۵/۲۰۵	۳۵/۲۰۵	۰/۰۰۰
	PR4	۶	۲	۳۹/۶۵۵	۲۹/۳۲۳	۰/۲۶۰
	PR5	۱۰	۱	۱۸۲/۸۲۰	۱۵۸/۷۲۱	۰/۱۳۰

	PR6	۱۰	۲	۱۸۲/۸۲۰	۱۶۱/۹۶۴	۰/۱۱۰
بعد بزرگ	PR7	۱۱	۱	-	۹۴۵/۴۳۲	-
	PR8	۱۱	۲	-	۷۷۹/۶۹۳	-
	PR9	۱۲	۱	-	۹۲۶/۳۲۰	-
	PR10	۱۲	۲	-	۹۲۹/۱۶۹	-
			میانگین			۰/۰۸

با توجه به مقایسات انجام شده، مشاهده می‌شود که شکاف محاسباتی بین توابع هدف در روش های دقیق و فراابتکاری در ابعاد کوچک و متوسط در حد ناچیز است و در فواصل اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد می‌توان صحت اعتبار مدل فراابتکاری را نتیجه گرفته شود. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که به نتایج مدل فراابتکاری در مواجهه با مسائل بزرگ و پیچیده می‌توان اعتماد نمود.

۴-نتیجه‌گیری

مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی به ویژه در زمینه‌های ساخت و ساز سبز، یکی از چالش‌های اساسی است. با توجه به پیچیدگی و عدم قطعیت‌های موجود در این پروژه‌ها، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به بهینه‌سازی انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک کمک کند. در این راستا، طی چند دهه اخیر، انتخاب استراتژی‌های مناسب پاسخ به ریسک درپروژه‌های ساختمان سبز یکی از دغدغه‌های مدیران پروژه‌های عمرانی بوده است. بدین منظور، در پژوهش حاضر، برای اولین بار از یک الگوریتم فراابتکاری برای انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک پروژه‌های ساختمان سبز ارائه شده است. در پژوهش حاضر، مراحل انجام کار به شرح زیر است:

۱) طی انجام پژوهش، نتایج منجر به بررسی و شناسایی ۱۷ ریسک مهم که مرتبط با پروژه‌های ساختمان سبز و طبقه‌بندی آنها در پنج سبد ریسکی اعم از سیاست‌ها و استانداردها، اقتصادی، زیست محیطی، مدیریتی، فنی و کیفیتی شد.

۲) بعد از طبقه‌بندی ریسک‌ها در پنج سبد ریسکی، استراتژی‌های پاسخ به ریسک مشخص و در ادامه، با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده، استراتژی پاسخ به ریسک از بین ۱۸ استراتژی مد نظر به صورت بهینه انتخاب شدند و سیستم مدیریت ریسک پروژه‌های ساختمان سبز به صورت مناسبی جاری‌سازی گردید. نتایج بررسی منجر به تخصیص مناسب‌ترین استراتژی‌های برای ریسک‌های مربوط با سیاست‌ها و استانداردها، اقتصادی، زیست محیطی، مدیریتی، فنی و کیفیتی شد که به ترتیب در جداول ۷ تا ۱۲ ارائه شده است. در ادامه، بیشترین ارزش ایجاد شده به واسطه تخصیص هر استراتژی به هر ریسک به طور جداگانه و به صورت کلی در جدول۱۳ ارائه شد. با توجه به نتایج حاصل شده جمع ارزش کل ایجاد شده از تخصیص استراتژی ها به هر ریسک برابر با ۹۳۵/۵۴۵و هزینه کل این تخصیص برابر با ۳۰۸/۴۲۵ محاسبه شده است.

۳) سپس، در مرحله نهایی، نتایج حاصل شده از اجرای مدل با استفاده از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا نحوه تعیین پارامترهای بهینه الگوریتم فراابتکاری و سپس به ارائه نتایج حاصل از اجرای آن و مقایسه با حل قطعی و با استفاده از طرح آزمایش L9 تاگوچی پرداخته شد. برای استفاده از این روش، ابتدا برای پارامترهای الگوریتم ۳ سطح مختلف (کم با کد ۱، متوسط با کد ۲ و زیاد با کد ۳) تعریف شد. سپس آزمایش های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامتر های این الگوریتم مطابق جدول بود. با توجه به مقایسات انجام شده، مشاهده می‌شود که شکاف محاسباتی بین توابع هدف در روش های دقیق و فراابتکاری در ابعاد کوچک و متوسط در حد ناچیز است و در فواصل اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد می‌توان صحت اعتبار مدل فراابتکاری را نتیجه گرفته شود. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که به نتایج مدل فراابتکاری در مواجهه با مسائل بزرگ و پیچیده می‌توان اعتماد نمود.

به طور کلی هدف پژوهش حاضر، طراحی یک مدل تصمیم برای انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک‌های ساختمان سبز در شهر تهران بود. مهمترین نوآوری پژوهش، کاربردی بودن آن و بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز بود چرا که بکارگیری الگوریتم فراابتکاری در انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز به ویژه در پروژه‌های بزرگ و پیچیده، می‌تواند تأثیرات مثبتی بر بهبود مدیریت ریسک‌های زیست‌محیطی داشته باشد. در ادامه برخی از مزیت‌های بکارگیری الگوریتم فراابتکاری به منظور انتخاب استراتژی پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) **انتخاب بهینه استراتژی‌ها:** نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها قادر به انتخاب استراتژی‌های مناسب برای پاسخ به ریسک‌ها به صورت بهینه هستند. این انتخاب می‌تواند منجر به کاهش زمان و هزینه‌های پروژه و همچنین کاهش خسارات اجتماعی و زیست‌محیطی شود.

۲) **مدیریت سیستماتیک ریسک:** با پیاده‌سازی یک مدل ریاضی و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، سیستم مدیریت ریسک در پروژه‌های ساختمانی به طور مؤثری جاری‌سازی می‌شود. این امر نه تنها باعث افزایش کارایی پروژه‌ها می‌شود بلکه اعتماد ذینفعان را نیز افزایش می‌دهد.

۳) **نوآوری در روش‌ها**: برای اولین بار، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز پیشنهاد شده است که نشان‌دهنده نوآوری در روش‌های مدیریت ریسک است. در نهایت، بکارگیری این الگوریتم‌ها نه تنها موجب بهینه‌سازی فرآیند انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک می‌شود بلکه به تحقق اهداف پایدار در صنعت ساختمان نیز کمک می‌کند. همچنین، نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به پروژه‌های ساخت و ساز دیگر نیز تعمیم داده شود که در ادامه دلایل تعمیم‌پذیری نتایج شرح داده شده است:

۴) **مدل ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری**: استفاده از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری مانند NSGA-II در این مطالعه، رویکردی عمومی برای مدیریت ریسک‌ها ارائه می‌دهد که می‌تواند در پروژه‌های مختلف با ویژگی‌های مشابه به کار رود.

۵) **شناسایی ریسک‌های مشترک:** بسیاری از ریسک‌های زیست‌محیطی که در این مطالعه شناسایی شده‌اند، ممکن است در پروژه‌های دیگر نیز وجود داشته باشند. بنابراین، استراتژی‌های پاسخ به این ریسک‌ها می‌تواند به صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار گیرد.

۶) **تجربه عملی:** نتایج به دست آمده از شهر تهران، نشان‌دهنده کارایی روش‌ها و الگوریتم‌ها در شرایط واقعی است. این تجربیات می‌توانند به عنوان الگو برای دیگر پروژه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

در نتیجه، با توجه به این عوامل، می‌توان گفت که نتایج این مطالعه قابلیت تعمیم به پروژه‌های ساخت و ساز دیگر را دارند، به شرطی که شرایط و ویژگی‌های خاص هر پروژه مد نظر قرار گیرد. محدودیت‌های تحقیق جاری عبارت اند از: صنعت ساختمان به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی و اقتصادی قرار دارد. تغییرات ناگهانی در قوانین، مقررات زیست‌محیطی، و شرایط بازار می‌تواند بر نتایج تحقیق تأثیر منفی بگذارد و پیش‌بینی‌ها را دشوار کند. پروژه های ساختمان سبز معمولاً شامل فناوری‌های پیشرفته و روش‌های نوین ساخت و ساز هستند. این پیچیدگی‌ها می‌تواند فرآیند انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک را دشوار کند و نیاز به تخصص‌های فنی بالا داشته باشد. در برخی موارد، فرهنگ سازمانی و مقاومت کارکنان در برابر تغییرات می‌تواند مانع از اجرای استراتژی‌های جدید پاسخ به ریسک شود. این موضوع می‌تواند تأثیر منفی بر موفقیت پروژه‌های ساختمان سبز داشته باشد. این محدودیت‌ها می‌تواند بر کیفیت و قابلیت اعتماد نتایج تحقیق تأثیر بگذارد و نیاز به توجه و مدیریت مناسب در فرآیند انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک در صنعت ساختمان سبز دارد. با توجه به اینکه در این تحقیق ساختمان های سبز مد نظر بوده اند، بنابراین یک جنبه از پایداری در این تحقیق لحاظ شده است که براساس آن هدف گذاری

انجام شده است. به همین منظور برای تحقیقات بیشتر در ادامه این تحقیق در نظر گرفتن بحث پایداری ساختمان های سبز پیشنهاد می شود.

مراجع

[1] Girma, Y., Terefe, H., Pauleit, S., & Kindu, M. (2019). Urban green infrastructure planning in Ethiopia: The case of emerging towns of Oromia special zone surrounding Finfinnee. *Journal of Urban Management*, *8*(1), 75-88

[2] Zarrinpoor, N., Amiri, M., & Nematollahi, M. H. (2021). The Risk Evaluation of Green Buildings Using A Hybrid Procedure of DEMATEL and Analytic Network Process. *Decisions and Operations Research*.

[3] Chen, J. X., & Chen, J. (2017). Supply chain carbon foot printing and responsibility allocation under emission regulations. *Journal of environmental management*, *188*, 255-267.

[4] Onuoha, I. J., Aliagha, G. U., & Rahman, M. S. A. (2018). Modelling the effects of green building incentives and green building skills on supply factors affecting green commercial property investment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *90*, 814-823.

[5] Poveda, C. A., & Young, R. (2015). Potential benefits of developing and implementing environmental and sustainability rating systems: Making the case for the need of diversification. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *4*(1), 1-11

[6] Ghaobadi, J., Rezaeian, J., & Haji Aghaei Keshteli, M. (2019). Identification and Prioritization the Risks of Green Building Projects Based on the Combination of FANP and FDEMATEL: (Case study: Savadkooh County). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *51*(3), 599-616. doi: 10.22060/ceej.2017.13302.5398

[7] Guan, L., Abbasi, A., & Ryan, M. J. (2020). Analyzing green building project risk interdependencies using Interpretive Structural Modeling. *Journal of Cleaner Production*, *256*, 120372.

[8] Xiang, T., & Shu, X. Y. (2018). Identification of Risk in Green Building Projects based on the Perspective of Sustainability [J]. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 439, No. 3)

[9] Rezaei, S., Abortion seller, E., Athari Niko Rovan, H. (2016). Needs assessment to know the solutions to improve the risk management of the implementation of building information modeling in the construction industry. *International Civil Engineering Conference*. *Architecture and urban planning of contemporary Iran.* Tehran.

[10] Rahimi, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R., Iranmanesh, S. H., & Vaez-Alaei, M. (2018). Hybrid approach to construction project risk management with simultaneous FMEA/ISO 31000/evolutionary algorithms: Empirical optimization study. *Journal of Construction Engineering and Management*, *144*(6), 04018043

[11] Zegordi, S. H., Nazari, A., & Rezaee Nik, E. (2014). Project risk assessment by a hybrid approach using fuzzy-anp and fuzzy-topsis. *Sharif Journal of Indusrial Engineering and Management*, *29*(1), 3-14.

[12] Xiao, L., Bie, L., & Bai, X. (2021). Controlling the schedule risk in green building projects: Buffer management framework with activity dependence. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123852.

[13] Qiang, G., Cao, D., Wu, G., Zhao, X., & Zuo, J. (2021). Dynamics of collaborative networks for green building projects: case study of Shanghai. *Journal of Management in Engineering*, *37*(3), 05021001.

[14] Cheraghi, E., Khalilzadeh, M., and Cheraghi, A., and Rahimi, Y. (2018). selection of response strategies to environmental risk of construction projects using meta-heuristic algorithms (case study: Saba construction complex project. 4(21). 61-76.

[15] Wang, L., Chan, D. W. M., Darko, A., & Oluleye, B. I. (2024). Review on green buildings: A perspective of risk management process. *Journal of Building Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108738

[16] Wuni, I. Y., Bao, Z., Yevu, S. K., & Tetteh, M. O. (2023). Theorizing the path dependencies and hierarchical structure of the multidimensional risks in green building projects. Journal of Building Engineering, 68, 106069. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106069

[17] Wang, L., & Chan, D. W. (2022, December). Risk Assessments with Probabilistic Linguistic Information for Green Building Projects-The Case of Vietnam. In *International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 1396-1404). Singapore: Springer Nature Singapore.

[18] Nguyen, H. D., & Macchion, L. (2022). Exploring critical risk factors for Green Building projects in developing countries: The case of Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, *381*, 135138.

[19] Li, Y., Song, H., Sang, P., Chen, P.-H., & Liu, X. (2019). Review of Critical Success Factors (CSFs) for green building projects. *Building and Environment, 158*, 182-191.

[20] Bon-Gang, H. (2018). Performance and improvement of green construction projects. *Science Direct*, 15-22.

[21] Tao, X., & Xiang-Yuan, S. (2018). *Identification of risk in green building projects based on the perspective of sustainability.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

[22] Park, J., Park, B., Cha, Y., & Hyun, C. (2016). Risk factors assessment considering change degree for mega-projects. *Procedia-Social and Behavioral Sciences, 218*, 50-55.

[23] Yang, R. J., & Zou, P. X. (2014). Stakeholder-associated risks and their interactions in complex green building projects: A social network model. *Building and Environment, 73*, 208-222.

[24] Yang, R. J., Zou, P. X., & Wang, J. (2016). Modelling stakeholder-associated risk networks in green building projects. *International journal of project management, 34*(1), 66-81.
[25] daneshvar, A. , Homayounfar, M. and akhavan, E. (2019). Developing a classification Method for Imbalanced Dataset Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms. *Industrial Management Studies*, *17*(55), 161-183. doi: 10.22054/jims.2019.31226.2036
[26] Qin, X., Mo, Y., & Jing, L. (2016). Risk perceptions of the life-cycle of green buildings in China. Journal of cleaner production, 126, 148-158.
[27] Khoshnava, S. M., Rostami, R., Valipour, A., Ismail, M., & Rahmat, A. R. (2018). Rank of green building material criteria based on the three pillars of sustainability using the hybrid multi criteria decision making method. *Journal of cleaner production*, *173*, 82-99.
[28] Hasanpour Jesri Z S, Hassannayebi E, Abolghasemian M. Optimization Models for Vehicle Routing Problems with Simultaneous Delivery and Pickup under Time Window Constraints. jor 2024; 21 (2) :35-55
[29] Heydari Kushalshah, T., Daneshmand-Mehr, M., & Abolghasemian, M. (2023). Hybrid modelling for urban water supply system management based on a bi-objective mathematical model and system dynamics: A case study in Guilan province. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, *15*(1), 260-279.
[30] Abolghasemian, M., Bigdeli, H., & Shamami, N. (2024). Modeling the positioning of support forces in future battles using data envelopment analysis and the principles of natural and managerial accessibility. *Defensive Future Studies*, *9*(32), 65-98.
[31] Verma, S., Pant, M., & Snasel, V. (2021). A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems. *IEEE access*, *9*, 57757-57791.