



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



مرور تحلیلی- مفهومی کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت تحت عدم قطعیت

امیر اشرفی^۱، مهدی فضیلتی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده صنعت ساختمان و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران؛ amir.ashrafi@iau.ac.ir

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران؛ fazilati2001@iau.ac.ir

^۳ مرکز تحقیقات توسعه پایدار در مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران؛ fazilati2001@iau.ac.ir

*نویسنده مسئول: مهدی فضیلتی

چکیده

زمان‌بندی پروژه‌های ساخت همواره با عدم قطعیت‌ها و ابهام‌های متعدد همراه است که روش‌های قطعی و حتی احتمالاتی قادر به پوشش کامل آن‌ها نیستند. منطق فازی به عنوان یک چارچوب تحلیلی- مفهومی، امکان مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ادراکی و بهره‌گیری از دانش خبرگان را فراهم می‌کند. این مقاله با رویکردی مرور تحلیلی- مفهومی، مطالعات اخیر زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت را طبقه‌بندی و تحلیل کرده است. رویکردها شامل مسیر بحرانی فازی، زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی و مدل‌های ترکیبی/هیبریدی هستند که هر کدام مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. نتایج مرور نشان می‌دهد که استفاده از منطق فازی موجب افزایش واقع‌گرایی برنامه زمان‌بندی، بهبود تخصیص منابع و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران پروژه می‌شود. همچنین، شکاف‌های پژوهشی و زمینه‌های بالقوه برای مطالعات آینده، از جمله تلفیق داده‌های واقعی با رویکردهای فازی و توسعه ابزارهای کاربردی، شناسایی گردیده است. این مرور می‌تواند به پژوهشگران و مدیران پروژه در انتخاب و به کارگیری مناسب رویکردهای فازی کمک نماید.

کلمات کلیدی: منطق فازی، زمان‌بندی پروژه‌های ساخت، مدیریت زمان پروژه، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی پروژه، مسیر بحرانی فازی

A Conceptual and Analytical Review of Fuzzy Logic Applications in Construction Project Scheduling under Uncertainty

Amir Ashrafi¹, Mehdey Fazilat^{2,3*}

¹Ph.D. Student, Faculty of Building Industry and Environment, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran; amir.ashrafi@iau.ac.ir

²Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad university, Najafabad, Iran; fazilati2001@iau.ac.ir

³Sustainable Development in Civil Engineering Research Center, NA.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran; fazilati2001@iau.ac.ir

*Corresponding author: Mehdey Fazilat

ABSTRACT

Construction project scheduling is inherently associated with multiple uncertainties and ambiguities that deterministic and even probabilistic methods cannot fully address. Fuzzy logic, as an analytical-conceptual framework, enables the modeling of epistemic uncertainties and the incorporation of expert knowledge. This paper presents an analytical-conceptual review of recent studies on fuzzy project scheduling. The approaches are categorized into Fuzzy Critical Path, Fuzzy Resource-Constrained Scheduling, and Hybrid/Combined Fuzzy Models, each with distinct advantages, limitations, and applications. The review results indicate that applying fuzzy logic enhances the realism of project schedules, improves resource allocation, and supports project managers' decision-making. Furthermore, research gaps and potential future directions are identified, including the integration of real project data with fuzzy approaches and the development of practical tools for implementation. This review can assist researchers and project managers in selecting and effectively applying suitable fuzzy scheduling approaches.

Keywords: Fuzzy Logic, Construction Project Scheduling, Project Time Management, Uncertainty, Project Planning, Fuzzy Critical Path



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۱- مقدمه

زمان‌بندی پروژه‌های ساخت یکی از ارکان اساسی مدیریت پروژه به‌شمار می‌رود و نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق اهداف زمانی، کنترلی و اقتصادی پروژه‌های عمرانی ایفا می‌کند [۱-۳]. در پروژه‌های ساخت، تصمیمات مرتبط با زمان‌بندی نه تنها بر مدت اجرای پروژه، بلکه بر هزینه‌ها، تخصیص منابع، کیفیت اجرا و میزان رضایت ذی‌نفعان تأثیر مستقیم دارند [۴ و ۵]. با این حال، ماهیت ذاتی پروژه‌های ساخت که اغلب بزرگ‌مقیاس، منحصربه‌فرد، چندذی‌نفعه و وابسته به شرایط محیطی، اقتصادی و سازمانی هستند، باعث می‌شود فرآیند زمان‌بندی همواره با سطوح مختلفی از عدم قطعیت مواجه باشد [۶].

روش‌های کلاسیک زمان‌بندی پروژه، نظیر مسیر بحرانی (CPM)^۱ و برنامه‌ریزی و بازبینی پروژه (PERT)^۲، بر فرض قطعیت یا در بهترین حالت بر توزیع‌های احتمالاتی ساده استوارند [۷]. این فرضیات اگرچه در محیط‌های پایدار و قابل پیش‌بینی قابل قبول‌اند، اما در پروژه‌های ساخت واقعی که تحت تأثیر عواملی چون نوسانات بهره‌وری نیروی کار، شرایط نامطمئن تأمین مصالح، تغییرات طراحی، محدودیت‌های قراردادی و عوامل پیش‌بینی‌ناپذیر محیطی قرار دارند، کارایی محدودی از خود نشان می‌دهند [۸-۱۰]. در چنین شرایطی، بیان مدت فعالیت‌ها یا روابط زمانی صرفاً با مقادیر قطعی، منجر به ساده‌سازی بیش‌ازحد واقعیت و در نهایت تصمیم‌گیری‌های غیرواقع‌بینانه می‌شود [۹].

در پاسخ به این چالش، رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌ها توسعه یافته‌اند. روش‌های احتمالاتی، از جمله PERT تصادفی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تلاش کرده‌اند با استفاده از توزیع‌های آماری، عدم قطعیت موجود در مدت فعالیت‌ها را کمی‌سازی کنند [۱۱ و ۱۲]. با این حال، این رویکردها نیز با محدودیت‌هایی اساسی مواجه‌اند؛ از جمله نیاز به داده‌های تاریخی گسترده، دشواری تعیین توزیع‌های آماری مناسب، و ناتوانی در مدل‌سازی مستقیم قضاوت‌های زبانی و تجربیات خبرگان پروژه [۱۳]. در بسیاری از پروژه‌های ساخت، داده‌های دقیق و قابل اتکا در دسترس نیست و بخش قابل توجهی از تصمیمات زمان‌بندی مبتنی بر دانش ضمنی، تجربه و قضاوت انسانی مدیران پروژه اتخاذ می‌شود [۱۴].

در این بستر، منطق فازی به‌عنوان ابزاری توانمند برای مدل‌سازی عدم قطعیت، ابهام و دانش زبانی، توجه پژوهشگران حوزه مدیریت ساخت را به خود جلب کرده است. منطق فازی این امکان را فراهم می‌سازد تا مفاهیم کیفی نظیر «مدت زمان کوتاه»، «احتمال تأخیر بالا» یا «ریسک متوسط» به‌صورت ساختاریافته و ریاضی مدل‌سازی شوند [۱۷-۱۵]. برخلاف رویکردهای قطعی و حتی احتمالاتی، منطق فازی به جای تلاش برای حذف ابهام، آن را به‌عنوان بخشی ذاتی از مسئله می‌پذیرد و در چارچوب تصمیم‌گیری وارد می‌کند [۱۶ و ۱۸]. این ویژگی، منطق فازی را به گزینه‌ای جذاب برای زمان‌بندی پروژه‌های ساخت در شرایط عدم قطعیت تبدیل کرده است.

در طول دو دهه گذشته، کاربرد منطق فازی در حوزه زمان‌بندی پروژه‌های ساخت به‌طور چشمگیری گسترش یافته است. پژوهش‌ها طیف متنوعی از موضوعات، از مدل‌سازی فازی مدت فعالیت‌ها و تحلیل مسیر بحرانی فازی گرفته تا زمان‌بندی با محدودیت منابع، زمان‌بندی چندپروژه‌ای و ترکیب منطق فازی با روش‌های هوشمند نظیر الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی را دربر می‌گیرند [۲۱-۱۹]. این تنوع رویکردها اگرچه نشان‌دهنده پویایی و بلوغ تدریجی این حوزه است، اما در عین حال موجب پراکندگی ادبیات و دشواری در درک یکپارچه سیر تحول مفهومی و روش‌شناختی آن شده است.

با وجود حجم قابل توجه مطالعات، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود ماهیتی موردی یا روش‌محور دارند و تمرکز آن‌ها بر توسعه یا به‌کارگیری یک مدل خاص در یک مسئله مشخص است. در مقابل، مقالات مروری موجود یا محدود به بازه‌های زمانی قدیمی‌تر هستند، یا به‌صورت کلی به کاربردهای منطق فازی در مدیریت ساخت پرداخته‌اند و به‌طور خاص بر زمان‌بندی پروژه‌ها تمرکز نداشته‌اند. همچنین، بسیاری از مرورهای پیشین رویکردی توصیفی داشته و کم‌تر به تحلیل مفهومی، مقایسه انتقادی رویکردها و شناسایی شکاف‌های پژوهشی پرداخته‌اند. بر این اساس، نیاز به یک مرور تحلیلی-مفهومی جامع که بتواند ادبیات موجود در زمینه کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت را به‌صورت ساختاریافته دسته‌بندی، تحلیل و تفسیر کند، به‌وضوح احساس می‌شود. چنین مروری می‌تواند با ارائه یک طبقه‌بندی مفهومی از رویکردهای فازی، مقایسه مزایا و محدودیت‌های آن‌ها، و ترسیم روندهای نوظهور، تصویری منسجم از وضعیت کنونی دانش و مسیرهای آتی پژوهش ارائه دهد.

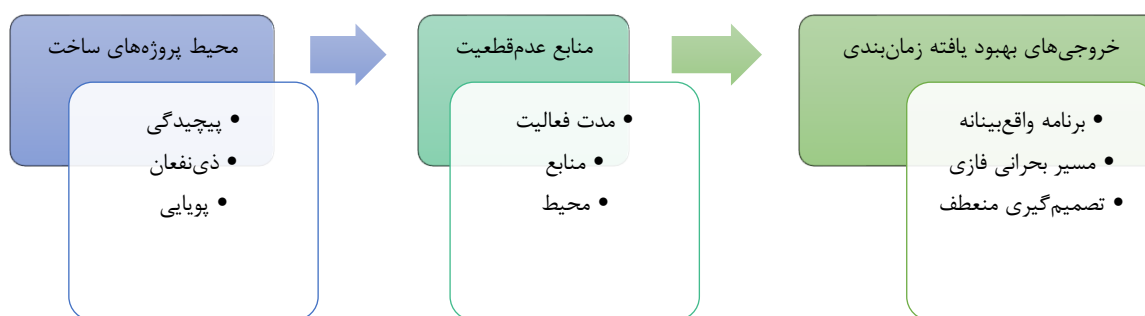
هدف اصلی این مقاله، ارائه یک مرور تحلیلی-مفهومی از کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت تحت عدم قطعیت است. بدین منظور، ابتدا چالش‌های بنیادین زمان‌بندی پروژه‌های ساخت و محدودیت‌های رویکردهای کلاسیک مرور می‌شود. سپس، مبانی

^۱ Critical Path Method

^۲ Program Evaluation and Review Technique

مفهومی منطق فازی در زمینه زمان‌بندی پروژه‌ها تبیین شده و رویکردهای مختلف فازی در قالب یک طبقه‌بندی منسجم مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه، مقایسه‌ای انتقادی میان رویکردهای فازی و سایر روش‌های متداول انجام شده و نهایتاً روندهای نوظهور، شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده تشریح می‌شود.

شکل (۱)، به‌صورت مفهومی، جایگاه منطق فازی را در مواجهه با چالش‌های عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت نشان می‌دهد و چارچوب فکری کلی مقاله را ترسیم می‌کند. این مقاله تلاش دارد با ایجاد پیوندی میان نظریه و عمل، هم برای پژوهشگران و هم برای مدیران پروژه‌های ساخت، بینش‌های ارزشمندی در زمینه بهره‌گیری مؤثر از منطق فازی در مدیریت زمان پروژه‌ها فراهم آورد.



شکل ۱- چارچوب مفهومی نقش منطق فازی در مواجهه با عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت [۱۰]

۲- دامنه پژوهش و رویکرد مرور تحلیلی- مفهومی

هدف این مقاله ارائه یک مرور تحلیلی- مفهومی از ادبیات مرتبط با کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت است. برخلاف مرورهای سیستماتیک یا فراتحلیل‌ها که تمرکز اصلی آن‌ها بر جامعیت آماری، معیارهای سخت‌گیرانه انتخاب منابع و تحلیل‌های کمی است، رویکرد اتخاذشده در این پژوهش بر تحلیل عمیق مفهومی، تبیین چارچوب‌های نظری و شناسایی الگوهای فکری حاکم بر مطالعات پیشین استوار است. این رویکرد امکان می‌دهد تا علاوه بر جمع‌بندی یافته‌ها، منطق درونی تحولات پژوهشی و مسیر تکامل رویکردهای فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت به‌صورت ساختاریافته تفسیر شود.

۲-۱- دامنه موضوعی پژوهش

دامنه این مرور بر مطالعاتی متمرکز است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از منطق فازی برای مواجهه با عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت استفاده کرده‌اند. تمرکز اصلی بر پروژه‌های عمرانی و ساخت^۱ بوده و مطالعات حوزه‌های غیرمرتبط نظیر تولید صنعتی یا پروژه‌های نرم‌افزاری تنها در صورتی مورد توجه قرار گرفته‌اند که چارچوب مفهومی آن‌ها قابلیت تعمیم به پروژه‌های ساخت را داشته باشد. از منظر موضوعی، پژوهش‌هایی که به یکی از محورهای زیر پرداخته‌اند در دامنه این مقاله قرار می‌گیرند:

- مدل‌سازی فازی مدت فعالیت‌ها و روابط تقدم و تأخر؛
- مسیر بحرانی و تحلیل شبکه‌های پروژه با رویکرد فازی؛
- زمان‌بندی پروژه‌ها تحت محدودیت منابع با استفاده از منطق فازی؛
- زمان‌بندی پروژه‌های پیچیده، بزرگ مقیاس یا چندپروژه‌ای مبتنی بر فازی؛
- رویکردهای هیبرید شامل ترکیب منطق فازی با الگوریتم‌های هوشمند و فراابتکاری.

۲-۲- منطق انتخاب رویکرد مرور تحلیلی- مفهومی

انتخاب رویکرد تحلیلی- مفهومی در این مقاله ناشی از ماهیت متنوع، پراکنده و روش‌محور ادبیات موجود در حوزه زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت است. بسیاری از مطالعات پیشین با تمرکز بر توسعه یک مدل خاص یا حل یک مسئله موردی، از پرداختن به پیوندهای مفهومی میان رویکردهای مختلف غفلت کرده‌اند. از این‌رو، مرور تحلیلی- مفهومی این امکان را فراهم می‌کند که به‌جای مقایسه صرف نتایج عددی،

^۱ Construction Projects



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



به بررسی مفروضات نظری، نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت، سطح تصمیم‌گیری و کاربرد مدیریتی هر رویکرد پرداخته شود. این نوع مرور همچنین بستر مناسبی برای شناسایی شکاف‌های پژوهشی فراهم می‌آورد؛ شکاف‌هایی که لزوماً از کمبود تعداد مطالعات ناشی نمی‌شوند، بلکه ریشه در نبود انسجام مفهومی، ضعف در پیاده‌سازی صنعتی یا محدودیت‌های روش‌شناختی دارند. بنابراین، رویکرد اتخاذ شده با هدف ایجاد ارزش افزوده مفهومی برای پژوهشگران و همچنین ارائه بینش‌های کاربردی برای مدیران پروژه انتخاب شده است.

۲-۳- فرآیند شناسایی و غربالگری مطالعات

فرآیند شناسایی مطالعات مورد بررسی به صورت هدفمند و مرحله‌ای انجام شده است. در گام نخست، پایگاه‌های علمی معتبر بین‌المللی نظیر ScienceDirect، Web of Science، Scopus و برای شناسایی مقالات مرتبط مورد استفاده قرار گرفتند. کلیدواژه‌هایی از قبیل "Fuzzy Logic"، "Construction Project Scheduling"، "Fuzzy CPM"، "Fuzzy PERT" و "Uncertainty in Scheduling" به صورت ترکیبی در جست‌وجوها به کار رفتند.

در گام دوم، عناوین و چکیده مقالات بررسی شدند تا ارتباط آن‌ها با دامنه موضوعی مقاله احراز شود. مقالاتی که تمرکز اصلی آن‌ها بر زمان‌بندی پروژه‌های ساخت نبوده یا صرفاً به کاربردهای کلی منطق فازی در مدیریت پروژه پرداخته بودند، کنار گذاشته شدند. در نهایت، مقالات منتخب به صورت تمام‌متن مطالعه شده و بر اساس معیارهایی نظیر نوع مسئله زمان‌بندی، رویکرد فازی به کاررفته، سطح پروژه و نوع خروجی مدیریتی، مورد تحلیل قرار گرفتند.

۲-۴- چارچوب تحلیلی و نحوه طبقه‌بندی مطالعات

برای دستیابی به یک تحلیل منسجم، یک چارچوب تحلیلی مفهومی جهت طبقه‌بندی مطالعات انتخاب شده تدوین گردید. این چارچوب که در بخش‌های بعدی مقاله به تفصیل به کار گرفته می‌شود، مطالعات را بر اساس چهار بعد اصلی دسته‌بندی می‌کند: (۱) نوع مسئله زمان‌بندی، (۲) شیوه مدل‌سازی فازی، (۳) سطح پیچیدگی پروژه و (۴) نوع کاربرد مدیریتی. جدول (۱)، نمای کلی این چارچوب تحلیلی و معیارهای طبقه‌بندی مطالعات را نشان می‌دهد و مبنای تحلیل‌های مقایسه‌ای در ادامه مقاله قرار می‌گیرد. این رویکرد ساختاریافته امکان می‌دهد تا ضمن حفظ جامعیت، از پراکندگی تحلیل جلوگیری شده و سیر تحول مفهومی کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت به صورت شفاف ترسیم شود.

جدول ۱- چارچوب تحلیلی و معیارهای طبقه‌بندی مطالعات مرتبط با زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت

بُعد تحلیلی	معیار طبقه‌بندی	شرح معیار	نمونه خروجی تحلیلی
نوع مسئله	مدل‌سازی مدت فعالیت	برآورد مدت فعالیت‌ها با استفاده از اعداد فازی	تحلیل عدم قطعیت مدت فعالیت‌ها
نوع مسئله	تحلیل شبکه و مسیر بحرانی	شناسایی مسیر بحرانی فازی و درجه بحرانی بودن فعالیت‌ها	مسیر بحرانی فازی و احتمال بحرانی شدن
نوع مسئله	زمان‌بندی با محدودیت منابع	تخصیص و هموارسازی منابع تحت عدم قطعیت	تعادل زمان-منابع
نوع مسئله	زمان‌بندی پروژه‌های پیچیده	پروژه‌های بزرگ مقیاس، چندپروژه‌ای یا پویا	افزایش پایداری برنامه زمان‌بندی
مدل‌سازی فازی	نوع عدد فازی	مثلی، دوزنقه‌ای، بازه‌ای یا فازی نوع-۲	دقت و انعطاف‌پذیری مدل
مدل‌سازی فازی	سیستم استنتاج فازی	قواعد اگر- آنگاه، توابع عضویت و مکانیزم استنتاج	پشتیبانی از تصمیم‌گیری خبرگان
سطح پیچیدگی	پروژه تک‌گانه	تمرکز بر یک پروژه با ساختار شبکه مشخص	کاربردپذیری عملی
سطح پیچیدگی	چندپروژه‌ای/بزرگ مقیاس	وجود وابستگی میان پروژه‌ها یا فعالیت‌های متعدد	مقیاس‌پذیری مدل
نوع کاربرد مدیریتی	پشتیبانی تصمیم	کمک به تصمیم‌گیری مدیر پروژه در شرایط عدم قطعیت	افزایش کیفیت تصمیم
نوع کاربرد مدیریتی	کنترل و پایش زمان	به‌روزرسانی برنامه زمان‌بندی و تحلیل انحرافات	افزایش قابلیت اطمینان زمان‌بندی

۳- مبانی منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت

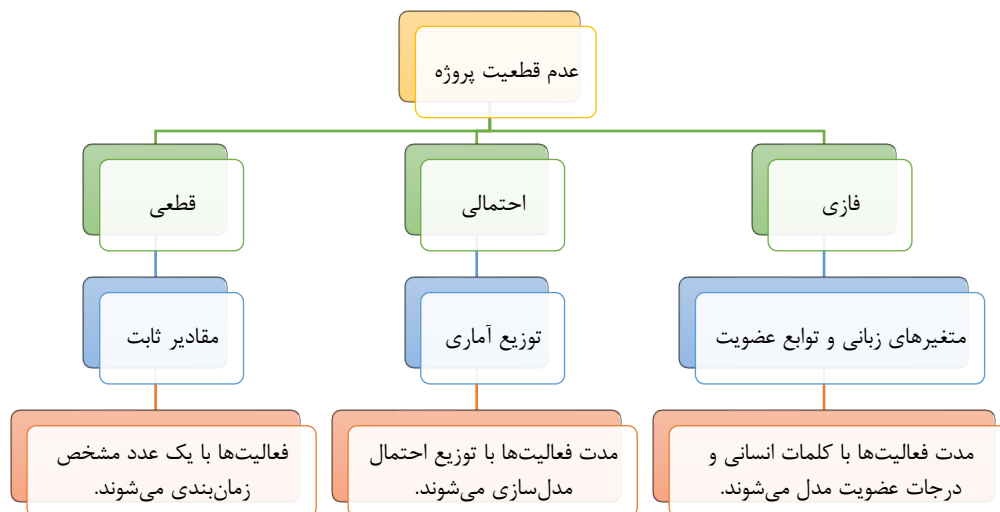
زمان‌بندی پروژه‌های ساخت ذاتاً با عدم قطعیت، ابهام و اطلاعات ناقص همراه است [۲۲]؛ مسائلی که به سختی می‌توان آن‌ها را با رویکردهای قطعی کلاسیک به طور کامل مدل‌سازی کرد. در چنین شرایطی، منطق فازی به عنوان یک چارچوب ریاضی-مفهومی، امکان نمایش و پردازش عدم قطعیت‌هایی را فراهم می‌کند که منشأ آن‌ها نه تصادفی بودن صرف، بلکه قضاوت انسانی، دانش ضمنی و توصیف‌های زبانی است [۲۳-۲۵]. این بخش به تبیین مبانی نظری منطق فازی و نحوه به کارگیری آن در مسئله زمان‌بندی پروژه‌های ساخت می‌پردازد.

۳-۱- ماهیت عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت

عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد؛ از جمله نوسانات بهره‌وری نیروی کار، تأخیر در تأمین مصالح، شرایط نامطمئن محیطی، تغییرات طراحی، محدودیت‌های قراردادی و تصمیمات مدیریتی [۲۶]. بسیاری از این عوامل ماهیتی کیفی دارند و بیان آن‌ها به صورت دقیق عددی یا آماری دشوار است. به همین دلیل، در عمل، مدیران پروژه اغلب از توصیف‌های زبانی نظیر «مدت زمان احتمالاً طولانی»، «ریسک تأخیر متوسط» یا «شرایط نسبتاً پایدار» برای برآورد وضعیت زمانی پروژه استفاده می‌کنند [۲۷ و ۲۸]. روش‌های کلاسیک زمان‌بندی، نظیر CPM، این عدم قطعیت‌ها را نادیده گرفته و مدت فعالیت‌ها را به صورت مقادیر قطعی در نظر می‌گیرند [۱۴-۱۶ و ۲۸]. حتی روش‌های احتمالاتی مانند PERT نیز فرض می‌کنند که عدم قطعیت را می‌توان به طور کامل با توزیع‌های آماری مشخص توصیف کرد [۲۹ و ۳۰]. این در حالی است که در بسیاری از پروژه‌های ساخت، داده‌های تاریخی کافی برای برآورد توزیع‌های آماری معتبر وجود ندارد و عدم قطعیت موجود بیش‌تر ماهیتی ادراکی و زبانی دارد تا تصادفی [۱۱].

۳-۲- منطق فازی و تمایز آن از رویکردهای قطعی و احتمالاتی

منطق فازی که نخستین بار توسط زاده معرفی شد، بر مفهوم درجه عضویت استوار است و به عناصر اجازه می‌دهد به طور هم‌زمان و با شدت‌های متفاوت به یک مجموعه تعلق داشته باشند [۳۱]. در چارچوب فازی، به جای بیان یک مقدار دقیق برای مدت یک فعالیت، می‌توان بازه‌ای از مقادیر ممکن را همراه با درجات باورپذیری آن‌ها تعریف کرد [۳۲ و ۳۵]. تفاوت بنیادین منطق فازی با رویکردهای احتمالاتی در این نکته نهفته است که احتمال، میزان وقوع یک رویداد تصادفی را توصیف می‌کند، در حالی که درجه عضویت فازی میزان سازگاری یک مقدار با یک مفهوم زبانی را نشان می‌دهد [۱۶]. بنابراین، منطق فازی به طور ویژه برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی مناسب است که ناشی از ابهام، قضاوت انسانی و نبود اطلاعات دقیق هستند؛ شرایطی که در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت بسیار رایج‌اند [۳۳]. شکل (۲)، به صورت مقایسه‌ای، تفاوت نحوه برخورد رویکردهای قطعی، احتمالاتی و فازی با عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌ها را نشان می‌دهد. این مقایسه مبنای مفهومی استفاده گسترده از منطق فازی در این حوزه را روشن می‌سازد.



شکل ۲- مقایسه رویکردهای قطعی، احتمالاتی و فازی در مواجهه با عدم قطعیت زمان‌بندی پروژه‌های ساخت [۳۳]



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



این شکل به صورت مفهومی سه رویکرد اصلی در مدل سازی عدم قطعیت زمان بندی پروژه‌ها را مقایسه می‌کند. در رویکرد قطعی، مدت فعالیت‌ها به صورت مقادیر ثابت و دقیق در نظر گرفته می‌شوند و عدم قطعیت نادیده گرفته می‌شود. در رویکرد احتمالاتی، مدت فعالیت‌ها با استفاده از توزیع‌های آماری مشخص مدل سازی می‌گردند که مستلزم وجود داده‌های تاریخی کافی است. در مقابل، رویکرد فازی عدم قطعیت را از منظر ابهام و قضاوت انسانی در نظر گرفته و با استفاده از مفاهیم زبانی و درجات عضویت، بازه‌ای از مقادیر ممکن برای مدت فعالیت‌ها ارائه می‌دهد.

۳-۳- اعداد فازی و توابع عضویت در زمان بندی پروژه‌ها

یکی از اجزای کلیدی در مدل سازی فازی زمان بندی پروژه‌ها، استفاده از اعداد فازی برای نمایش مدت فعالیت‌ها و روابط زمانی است [۳۴]. متداول ترین انواع اعداد فازی مورد استفاده در این حوزه شامل اعداد فازی مثلثی، دوزنقه‌ای و بازه‌ای هستند [۲۰ و ۱۵]. این اعداد به پژوهشگران و مدیران پروژه اجازه می‌دهند تا برآوردهای حداقلی، محتمل و حداکثری مدت فعالیت‌ها را به صورت یک ساختار ریاضی منسجم بیان کنند [۳].

انتخاب نوع عدد فازی و شکل تابع عضویت تأثیر مستقیمی بر دقت، انعطاف پذیری و پیچیدگی مدل زمان بندی دارد [۳۷-۳۵]. به طور کلی، اعداد فازی مثلثی به دلیل سادگی و سهولت پیاده سازی، بیشترین کاربرد را در مطالعات زمان بندی پروژه‌های ساخت داشته‌اند؛ در حالی که اعداد فازی دوزنقه‌ای و فازی نوع-۲ امکان نمایش عدم قطعیت‌های پیچیده تر را فراهم می‌سازند [۳۸]. جدول (۲)، انواع متداول اعداد فازی مورد استفاده در زمان بندی پروژه‌های ساخت و ویژگی‌های اصلی آن‌ها را به طور خلاصه ارائه می‌کند.

جدول ۲- انواع اعداد فازی و کاربرد آن‌ها در زمان بندی پروژه‌های ساخت [۳۸]

نوع عدد فازی	اختصار	ویژگی‌های اصلی	کاربرد در زمان بندی پروژه
عدد فازی مثلثی	(a, b, c)	ساده، قابل فهم، محاسبات سریع	برآورد مدت فعالیت‌ها و تحلیل مسیر بحرانی فازی
عدد فازی دوزنقه‌ای	(a, b, c, d)	انعطاف پذیرتر از مثلثی، نمایش بازه محتمل	مدل سازی مدت فعالیت‌ها با دامنه اطمینان بالاتر
عدد فازی بازه‌ای	[a, b]	حداقل پیچیدگی، بدون تابع عضویت صریح	تحلیل‌های مقدماتی و مقایسه‌ای زمان بندی
عدد فازی نوع-۲	$\tilde{A}$	قابلیت نمایش عدم قطعیت در تابع عضویت	پروژه‌های پیچیده با سطح ابهام بالا
عدد فازی مبتنی بر نظر خبرگان	متغیر	استخراج شده از قضاوت‌های زبانی خبرگان	پشتیبانی تصمیم گیری در شرایط کمبود داده

۳-۴- استنتاج فازی و نقش آن در تصمیم گیری زمانی پروژه

علاوه بر نمایش عدم قطعیت، منطق فازی امکان استنتاج و تصمیم گیری مبتنی بر قواعد زبانی را نیز فراهم می‌کند [۳۹ و ۴۰]. سیستم‌های استنتاج فازی با استفاده از مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه، دانش خبرگان پروژه را به یک چارچوب محاسباتی تبدیل می‌کنند. به عنوان مثال، قاعده‌ای نظیر «اگر پیچیدگی فعالیت زیاد و منابع محدود باشد، آنگاه احتمال تأخیر بالا است» می‌تواند به طور مستقیم در تحلیل زمان بندی پروژه مورد استفاده قرار گیرد [۴۱].

در زمان بندی پروژه‌های ساخت، سیستم‌های استنتاج فازی عمدتاً برای ارزیابی ریسک تأخیر، اولویت بندی فعالیت‌ها و پشتیبانی از تصمیم گیری مدیران پروژه به کار گرفته می‌شوند. این رویکرد به ویژه در شرایطی که داده‌های عددی دقیق در دسترس نیست، نقش مهمی در افزایش واقع گرایی و انعطاف پذیری برنامه‌های زمان بندی ایفا می‌کند [۲۱ و ۴۲].

مبانی نظری ارائه شده در این بخش نشان می‌دهد که منطق فازی نه تنها ابزاری برای مدل سازی عدم قطعیت، بلکه یک چارچوب مفهومی برای تلفیق قضاوت انسانی و تحلیل کمی در زمان بندی پروژه‌های ساخت است. در بخش‌های بعدی مقاله، این مبانی به عنوان پایه‌ای برای طبقه بندی و تحلیل رویکردهای مختلف زمان بندی فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به ویژه، نحوه به کار گیری اعداد فازی، تحلیل مسیر بحرانی فازی و ترکیب منطق فازی با روش‌های هوشمند، در قالب یک طبقه بندی منسجم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۴- طبقه‌بندی و تحلیل رویکردهای زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت

در این بخش، مطالعات منتخب زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت بر اساس چارچوب تحلیلی ارائه‌شده در بخش ۲ و مبانی فازی تشریح‌شده در بخش ۳، طبقه‌بندی و تحلیل می‌شوند. هدف، ارائه یک نمای کلی، مقایسه‌ای و تحلیلی از رویکردهای مختلف و شناسایی شکاف‌ها است.

۴-۱- زمان‌بندی مسیر بحرانی فازی^۱

یکی از متداول‌ترین کاربردهای منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت، تحلیل مسیر بحرانی فازی است [۴۳-۴۵]. در این رویکرد، مدت فعالیت‌ها با استفاده از اعداد فازی (مثلثی، دوزنقه‌ای یا نوع-۲) مدل‌سازی می‌شوند و مسیر بحرانی پروژه با در نظر گرفتن درجات عدم قطعیت شناسایی می‌گردد [۸]. مزایای اصلی این روش عبارت‌اند از [۴۶]:

- امکان تحلیل عدم قطعیت در زمان کل پروژه و شناسایی فعالیت‌های بحرانی با درجه فازی؛
- افزایش واقع‌گرایی برنامه زمان‌بندی نسبت به روش‌های قطعی؛
- قابلیت ترکیب با روش‌های هوشمند برای بهینه‌سازی زمان‌بندی.

جدول (۳)، نمونه‌ای از مطالعات انجام‌شده در این حوزه را نشان می‌دهد که در آن نوع عدد فازی، سطح پیچیدگی پروژه و خروجی‌های مدیریتی تحلیل شده‌اند.

جدول ۳- نمونه مطالعات و طبقه‌بندی رویکردهای زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت [۳۶-۳۱]

مرجع	رویکرد فازی	رویکرد فازی	نوع عدد فازی	سطح پیچیدگی پروژه	خروجی‌های مدیریتی
[۳۱]	مسیر بحرانی فازی	مسیر بحرانی فازی	مثلثی	پروژه متوسط	شناسایی مسیر بحرانی فازی، پیش‌بینی زمان کل پروژه
[۳۲]	مسیر بحرانی فازی	مسیر بحرانی فازی	دوزنقه‌ای	پروژه کوچک	تحلیل عدم قطعیت فعالیت‌ها، اولویت‌بندی بحرانی
[۳۳]	زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی	زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی	مثلثی	پروژه بزرگ	تخصیص منابع، کاهش ریسک تأخیر، هموارسازی منابع
[۳۴]	زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی	زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی	نوع-۲	پروژه چندپروژه‌ای	انعطاف در زمان‌بندی، بهبود تخصیص منابع
[۳۵]	مدل‌های ترکیبی/هیبریدی	مدل‌های ترکیبی/هیبریدی	مثلثی + الگوریتم ژنتیک	پروژه بزرگ و پیچیده	بهینه‌سازی زمان‌بندی، پشتیبانی تصمیم، تحلیل سناریو
[۳۶]	مدل‌های ترکیبی/هیبریدی	مدل‌های ترکیبی/هیبریدی	دوزنقه‌ای + شبکه عصبی	پروژه چندپروژه‌ای	پیش‌بینی تأخیر، تصمیم‌گیری منعطف، مدیریت ریسک

در مطالعه‌ای [۴۷]، درباره کاربرد روش مسیر بحرانی فازی برای تعیین مسیر بحرانی در پروژه ساخت مسکونی ارائه شده است. در این تحقیق، مدت فعالیت‌های پروژه با اعداد فازی دوزنقه‌ای مدل شده و مراحل محاسبات شامل جلو و عقب رفتن در شبکه و تعیین شناوری‌ها بوده است. نتایج نشان داد که فعالیت‌هایی مانند آماده‌سازی زمین، بتن‌ریزی فونداسیون و اجرای سقف جزو مسیر بحرانی فازی هستند و تحلیل فازی امکان تعیین دقیق‌تر فعالیت‌های بحرانی را نسبت به CPM کلاسیک فراهم می‌کند. این مدل با وجود عدم قطعیت ورودی، مسیر بحرانی حقیقی‌تری نسبت به شیوه‌های قطعی ارائه داده است و نقطه‌ضعف‌های روش قطعی را کاهش می‌دهد.

در مطالعه‌ای دیگر [۴۸]، روش Fuzzy CPM با استفاده از اعداد مثلثی برای زمان‌بندی واقعی پروژه ساخت به کار گرفته شده است. محققان با استفاده از روش‌های α -Cut و Centroid تلاش کردند تا مدت تکمیل پروژه را در سطوح مختلف عدم قطعیت مدل‌سازی کنند. نتایج نشان داد که زمان تکمیل پروژه با مدل فازی بین مقادیر حداقلی و حداکثری قابل تفسیر است و با مقایسه دو روش فازی مختلف مشخص شد که روش مرکز ثقل برای تصمیم‌گیری بهتر مدیران پروژه در شرایط عدم قطعیت مناسب‌تر است.

^۱ Fuzzy Critical Path Scheduling



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۴-۲- زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع فازی^۱

در بسیاری از پروژه‌های ساخت، محدودیت منابع از جمله نیروی کار، تجهیزات و مصالح، بر زمان‌بندی پروژه تأثیرگذار است [۱۲]. رویکرد فازی در این زمینه به مدیران پروژه اجازه می‌دهد تا تخصیص منابع را تحت عدم قطعیت مدل‌سازی کنند [۲۱]. ویژگی‌های مهم این رویکرد عبارت‌اند از [۹]:

- هموارسازی منابع با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت فعالیت‌ها و بهره‌وری؛
- انعطاف در برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و کاهش ریسک تأخیر؛
- امکان تلفیق با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فازی- هوشمند.

در مطالعه‌ای [۴۹]، یک روش زمان‌بندی پروژه‌های ساخت با مدل‌سازی فازی محدودیت منابع (Fuzzy RCPS) معرفی شده است. رویکرد، مسئله زمان‌بندی را به صورت RCPSP با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با مدت زمان فعالیت‌ها و تخصیص منابع فرموله می‌کند. خروجی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از منطق فازی می‌توان یک برنامه زمان‌بندی بهینه‌تر نسبت به روش‌های قطعی به دست آورد که انعطاف بیش‌تری در برخورد با تغییرات منابع دارد و به کاهش تداخلات منابع و تأخیر در فعالیت‌ها کمک می‌کند. تحقیقی [۵۰]، به مسئله زمان‌بندی چندمنظوره با محدودیت منابع چندمهارتی در شرایط فازی می‌پردازد. نویسندگان چندین نوع منبع را با مهارت‌های مختلف در نظر می‌گیرند و با استفاده از مدل‌های فازی شبکه پروژه را حل می‌کنند. نتایج خروجی نشان می‌دهد که ترکیب تقویم منابع و مدل فازی قادر است تخصیص منابع را به گونه‌ای بهینه کند که ضمن رعایت اولویت‌های زمانی و منابع، زمان کل پروژه کاهش یابد و منابع با مهارت‌های متعدد به صورت مؤثر به فعالیت‌ها تخصیص یابند.

۴-۳- مدل‌های ترکیبی و هیبریدی^۲

با توجه به پیچیدگی پروژه‌های بزرگ و چندپروژه‌ای، بسیاری از پژوهشگران از مدل‌های ترکیبی استفاده کرده‌اند که منطق فازی را با سایر روش‌ها نظیر الگوریتم‌های تکاملی، شبکه‌های عصبی، برنامه‌ریزی خطی یا شبیه‌سازی ترکیب می‌کنند [۳۱]. اهداف اصلی این مدل‌ها عبارت‌اند از [۱۸]:

- بهبود دقت پیش‌بینی زمان پروژه تحت عدم قطعیت؛
- بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی با رعایت محدودیت منابع و وابستگی فعالیت‌ها؛
- ارائه ابزارهای پشتیبانی تصمیم قوی برای مدیران پروژه.

مطالعه‌ای [۵۱]، یک رویکرد ترکیبی فازی- تصادفی را برای زمان‌بندی پروژه‌های ساخت بزرگ مقیاس معرفی می‌کند، که عدم قطعیت‌های هم‌زمان فازی و تصادفی را مدل می‌کند. مدل ارائه شده با تبدیل پارامترهای فازی تصادفی به متغیرهای فازی و سپس اجرای الگوریتم بهینه‌سازی، نشان داده است که می‌توان بهینه‌سازی ترکیبی Cost/Make Span/Quality را با در نظر گرفتن عدم قطعیت دوگانه انجام داد و برنامه‌ای ارائه داد که نسبت به روش‌های صرفاً فازی یا صرفاً احتمالاتی مقاوم‌تر است.

در یک مطالعه دیگر [۵۲]، روش Fuzzy- GERT به عنوان یک مدل هیبریدی ترکیبی با منطق فازی برای زمان‌بندی پروژه‌های ساخت معرفی شده است. این رویکرد با ترکیب GERT و منطق فازی، عدم قطعیت در مدت فعالیت‌ها را در قالب عملیات فازی مدل می‌کند و با آزمایش بر روی چند پروژه واقعی نتایج نشان داد که زمان‌بندی فازی- GERT نزدیک‌تر به زمان واقعی اجرا شده است و این روش در مقایسه با مدل‌های قطعی توانسته دقت بیشتری در پیش‌بینی زمان تکمیل پروژه ارائه دهد.

۴-۴- مقایسه و تحلیل انتقادی رویکردها

تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که؛ ۱- رویکرد مسیر بحرانی فازی برای پروژه‌های متوسط و کوچک کاربرد گسترده دارد و پیاده‌سازی آن نسبتاً ساده است؛ ۲- زمان‌بندی فازی با محدودیت منابع برای پروژه‌های بزرگ‌تر و پیچیده ضروری است و باعث بهبود تخصیص منابع و کاهش تأخیر می‌شود و ۳- مدل‌های ترکیبی بیش‌ترین انعطاف و دقت را ارائه می‌دهند ولی پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده‌ها و دانش خبره بالا دارند [۲۲]. شکل (۳)، یک نمودار مفهومی را نشان می‌دهد که این سه دسته رویکرد را از نظر سطح پیچیدگی پروژه، انعطاف و دقت مدل‌سازی مقایسه می‌کند و چارچوب تحلیلی مقاله را تکمیل می‌سازد.

^۱ Fuzzy Resource-Constrained Scheduling

^۲ Hybrid Fuzzy Approaches



کد اختصاصی:

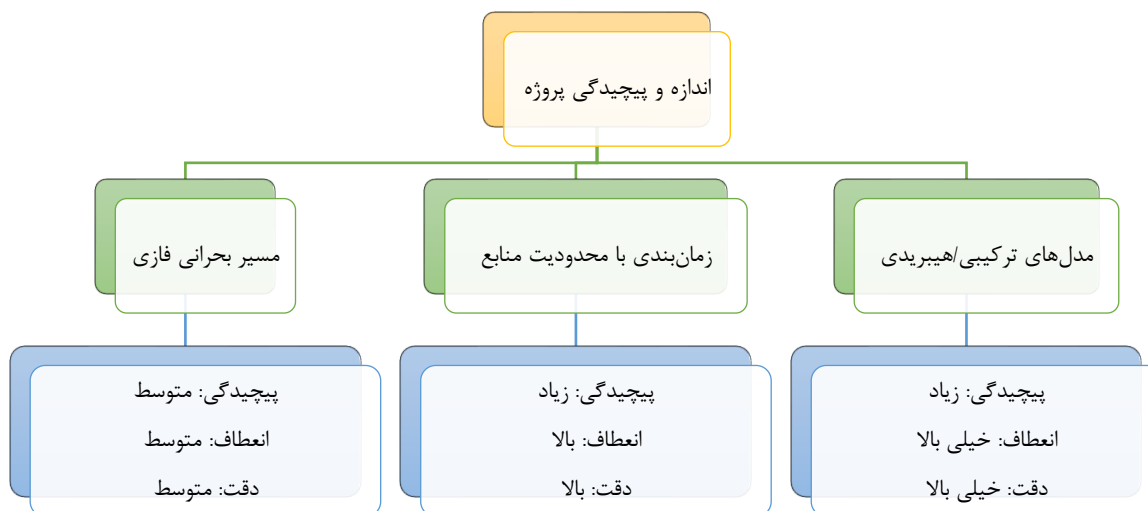
۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



شکل ۳- مقایسه سه رویکرد زمان‌بندی فازی

با توجه به مرور مطالعات، شکاف‌های پژوهشی زیر قابل شناسایی هستند:

- ۱- کمبود مطالعات تجربی و کاربردی در پروژه‌های واقعی بزرگ و چندپروژه‌ای؛
 - ۲- محدودیت در تحلیل همزمان منابع، زمان و ریسک تحت چارچوب فازی؛
 - ۳- فقدان استانداردسازی در انتخاب نوع عدد فازی و توابع عضویت؛
 - ۴- نیاز به توسعه ابزارهای کاربرپسند و قابل پیاده‌سازی در نرم‌افزارهای مدیریت پروژه؛
 - ۵- کمبود بررسی ترکیب فازی با داده‌های واقعی پروژه و تکنیک‌های هوشمند برای بهینه‌سازی تصمیمات زمان‌بندی.
- این تحلیل، مسیرهای تحقیقاتی آینده را روشن می‌سازد و نشان می‌دهد که حوزه زمان‌بندی فازی پروژه‌های ساخت همچنان فضای گسترده‌ای برای پژوهش و توسعه دارد.

۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز پژوهشی

این مقاله با هدف ارائه یک مرور تحلیلی- مفهومی از کاربرد منطق فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت، مطالعات موجود را طبقه‌بندی و تحلیل کرد. نتایج کلیدی این مرور به شرح زیر است:

- ۱- کاربرد گسترده مسیر بحرانی فازی: این رویکرد برای پروژه‌های کوچک و متوسط مناسب است و امکان تحلیل عدم قطعیت در مدت فعالیت‌ها و مسیر بحرانی پروژه را فراهم می‌کند.
 - ۲- زمان‌بندی با محدودیت منابع فازی: این روش برای پروژه‌های بزرگ و چندپروژه‌ای کاربرد دارد و انعطاف بیشتری در تخصیص منابع و کاهش ریسک تأخیر ارائه می‌کند.
 - ۳- مدل‌های ترکیبی / هیبریدی: این مدل‌ها با ترکیب منطق فازی و روش‌های هوشمند، بیش‌ترین دقت و انعطاف‌پذیری را برای مدیریت پروژه‌های پیچیده فراهم می‌کنند، اما پیچیدگی محاسباتی و نیاز به دانش خبره بالایی دارند.
- همچنین دستاوردهای مفهومی و کاربردی این پژوهش شامل موارد زیر می‌گردد:
- ایجاد یک چارچوب تحلیلی منسجم برای طبقه‌بندی رویکردهای فازی در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت؛
 - شناسایی مزایا و محدودیت‌های هر رویکرد و فراهم آوردن مبنای تصمیم‌گیری برای مدیران پروژه؛
 - روشن شدن شکاف‌های پژوهشی و زمینه‌های بالقوه برای مطالعات آینده، از جمله نیاز به مطالعات تجربی در پروژه‌های واقعی و توسعه ابزارهای کاربردی.

چشم‌انداز پژوهشی آینده نیز شامل موارد زیر می‌گردد:

- توسعه مدل‌های فازی- هوشمند مقیاس‌پذیر برای پروژه‌های بزرگ و چندپروژه‌ای؛
- بررسی تلفیق داده‌های واقعی پروژه با رویکردهای فازی برای بهبود دقت پیش‌بینی زمان و منابع؛



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- استانداردسازی انتخاب نوع عدد فازی و توابع عضویت بر اساس پیچیدگی و ماهیت پروژه؛
 - ایجاد ابزارهای نرم‌افزاری کاربرپسند برای پیاده‌سازی زمان‌بندی فازی در محیط‌های مدیریت پروژه؛
 - مطالعه اثر ترکیب فازی با روش‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری.
- درنهایت مرور تحلیلی- مفهومی ارائه‌شده نشان می‌دهد که منطق فازی ابزار بسیار مناسبی برای مدیریت عدم قطعیت در زمان‌بندی پروژه‌های ساخت است و پتانسیل بالایی برای تحقیقات و کاربردهای عملی در پروژه‌های پیچیده و چندپروژه‌ای دارد. چارچوب ارائه‌شده می‌تواند مسیر مطالعات آینده را هدایت کرده و به مدیران پروژه در تصمیم‌گیری‌های واقع‌گرایانه، منعطف و مبتنی بر تحلیل کمک نماید.

مراجع

- [1] Rezakhani, P. (2022). Project scheduling and performance prediction: A fuzzy-Bayesian network approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(6), 2233-2244.
- [2] Fayek, A. R. (2020). Fuzzy logic and fuzzy hybrid techniques for construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(7), 04020064.
- [3] Rezakhani, P. (2022). Hybrid fuzzy-Bayesian decision support tool for dynamic project scheduling and control under uncertainty. *International Journal of Construction Management*, 22(15), 2864-2876.
- [4] Ammar, M. A., & Abd-ElKhalek, S. I. (2022). Criticality measurement in fuzzy project scheduling. *International Journal of Construction Management*, 22(2), 252-261.
- [5] Aghileh, M., Tereso, A., Alvelos, F., & Monteiro Lopes, M. O. (2024). Multi-project scheduling under uncertainty and resource flexibility: a systematic literature review. *Production & Manufacturing Research*, 12(1), 2319574.
- [6] Plebankiewicz, E., Zima, K., & Wiecezorek, D. (2021). Modelling of time, cost and risk of construction with using fuzzy logic. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 412-426.
- [7] Francis, A. (2017). Simulating uncertainties in construction projects with chronographical scheduling logic. *Journal of construction engineering and management*, 143(1), 04016085.
- [8] Abd El Khalek, H., Aziz, R. F., & Kamel, H. M. (2016). Risk and uncertainty assessment model in construction projects using fuzzy logic. *American Journal of Civil Engineering*, 4(1), 24-39.
- [9] Tang, H. H., & Ahmad, N. S. (2024). Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1), 2394429.
- [10] Hriday, M. S. H. (2022). Quantitative risk assessment of rail infrastructure projects using Monte Carlo simulation and fuzzy logic. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*, 2(01), 55-87.
- [11] Elbarkouky, M. M., Fayek, A. R., Siraj, N. B., & Sadeghi, N. (2016). Fuzzy arithmetic risk analysis approach to determine construction project contingency. *Journal of construction engineering and management*, 142(12), 04016070.
- [12] Ghaleb, H., Alhajlah, H. H., Bin Abdullah, A. A., Kassem, M. A., & Al-Sharafi, M. A. (2022). A scientometric analysis and systematic literature review for construction project complexity. *Buildings*, 12(4), 482.
- [13] Roghanian, E., Alipour, M., & Rezaei, M. (2018). An improved fuzzy critical chain approach in order to face uncertainty in project scheduling. *International Journal of Construction Management*, 18(1), 1-13.
- [14] Demiss, B. A., & Elsaigh, W. A. (2024). Application of novel hybrid deep learning architectures combining convolutional neural networks (CNN) and recurrent neural networks (RNN): construction duration estimates prediction considering preconstruction uncertainties. *Engineering Research Express*, 6(3), 032102.
- [15] Afzal, F., Yunfei, S., Nazir, M., & Bhatti, S. M. (2021). A review of artificial intelligence-based risk assessment methods for capturing complexity-risk interdependencies: Cost overrun in construction projects. *International Journal of Managing Projects in Business*, 14(2), 300-328.
- [16] Antucheviciene, J., Kala, Z., Marzouk, M., & Vaidogas, E. R. (2015). Solving civil engineering problems by means of fuzzy and stochastic MCDM methods: current state and future research. *Mathematical problems in engineering*, 2015(1), 362579.
- [17] Acar, E., Bayrak, G., Jung, Y., Lee, I., Ramu, P., & Ravichandran, S. S. (2021). Modeling, analysis, and optimization under uncertainties: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(5), 2909-2945.
- [18] Taboada, I., Daneshpajouh, A., Toledo, N., & De Vass, T. (2023). Artificial intelligence enabled project management: a systematic literature review. *Applied Sciences*, 13(8), 5014.
- [19] Hazır, Ö. (2015). A review of analytical models, approaches and decision support tools in project monitoring and control. *International Journal of Project Management*, 33(4), 808-815.
- [20] Fazel Zarandi, M. H., Sadat Asl, A. A., Sotudian, S., & Castillo, O. (2020). A state-of-the-art review of intelligent scheduling. *Artificial Intelligence Review*, 53(1), 501-593.
- [21] Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic—a personal perspective. *Fuzzy sets and systems*, 281, 4-20.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- [22] Luo, N., Yu, H., You, Z., Li, Y., Zhou, T., Jiao, Y., ... & Qiao, S. (2023). Fuzzy logic and neural network-based risk assessment model for import and export enterprises: A review. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*, 1(1), 2-11.
- [23] Bray, S., Caggiani, L., & Ottomanelli, M. (2015). Measuring transport systems efficiency under uncertainty by fuzzy sets theory-based Data Envelopment Analysis: theoretical and practical comparison with traditional DEA model. *Transportation Research Procedia*, 5, 186-200.
- [24] Barghi, B. (2020). Qualitative and quantitative project risk assessment using a hybrid PMBOK model developed under uncertainty conditions. *Heliyon*, 6(1).
- [25] Mirahadi, F., & Zayed, T. (2016). Simulation-based construction productivity forecast using neural-network-driven fuzzy reasoning. *Automation in Construction*, 65, 102-115.
- [26] Uhlmann, I. R., & Frazzon, E. M. (2018). Production rescheduling review: Opportunities for industrial integration and practical applications. *Journal of manufacturing systems*, 49, 186-193.
- [27] Umer, A., Hewage, K., Haider, H., & Sadiq, R. (2016). Sustainability assessment of roadway projects under uncertainty using Green Proforma: An index-based approach. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 604-619.
- [28] Zhang, L., Chettupuzha, A. A., Chen, H., Wu, X., & AbouRizk, S. M. (2017). Fuzzy cognitive maps enabled root cause analysis in complex projects. *Applied Soft Computing*, 57, 235-249.
- [29] Ruparathna, R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2017). Economic evaluation of building energy retrofits: A fuzzy based approach. *Energy and Buildings*, 139, 395-406.
- [30] Parsamehr, M., Perera, U. S., Dodanwala, T. C., Perera, P., & Ruparathna, R. (2023). A review of construction management challenges and BIM-based solutions: perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(1), 353-389.
- [31] Dash, B., Macedo, V. D. J., Mohanachandran, D. K., Pokkuluri, K. S., Rathinakumar, V., & Sethi, K. C. (2025). Optimizing time and cost in construction under uncertainty: a fuzzy-driven NSGA-III optimization approach. *Asian Journal of Civil Engineering*, 1-16.
- [32] Khan, M. F. (2025). Artificial Intelligence in Project Scheduling Management: A Systematic Literature Review.
- [33] Zhasmukhambetova, A., Evdorides, H., & Davies, R. J. (2025). Integrating Risk Assessment and Scheduling in Highway Construction: A Systematic Review of Techniques, Challenges, and Hybrid Methodologies. *Future Transportation*, 5(3), 85.
- [34] Farahmand-Mehr, M., & Mousavi, S. M. (2025). A new interval-valued fuzzy optimisation approach for multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problems with flexible resources under uncertainty. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 12(1), 2510264.
- [35] Mitrakas, C., Xanthopoulos, A., & Koulouriotis, D. (2025). Techniques and models for addressing occupational risk using fuzzy logic, neural networks, machine learning, and genetic algorithms: a review and meta-analysis. *Applied Sciences*, 15(4), 1909.
- [36] Shehadeh, A., & Alshboul, O. (2025). Game Theory Integration in Construction Management: A Comprehensive Approach to Cost, Risk, and Coordination under Uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(5), 04025039.
- [37] Gunduz, M., Nielsen, Y., & Ozdemir, M. (2015). Fuzzy assessment model to estimate the probability of delay in Turkish construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 31(4), 04014055.
- [38] Talpur, N., Abdulkadir, S. J., Alhussian, H., Hasan, M. H., Aziz, N., & Bamhdi, A. (2023). Deep Neuro-Fuzzy System application trends, challenges, and future perspectives: A systematic survey. *Artificial intelligence review*, 56(2), 865-913.
- [39] Gürsel, G. (2016). Healthcare, uncertainty, and fuzzy logic. *Digital Medicine*, 2(3), 101-112.
- [40] Elmousalami, H. H. (2020). Comparison of artificial intelligence techniques for project conceptual cost prediction: A case study and comparative analysis. *IEEE transactions on engineering management*, 68(1), 183-196.
- [41] Belhadi, A., Kamble, S., Fosso Wamba, S., & Queiroz, M. M. (2022). Building supply-chain resilience: an artificial intelligence-based technique and decision-making framework. *International journal of production research*, 60(14), 4487-4507.
- [42] Gholamian, N., Mahdavi, I., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). Multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty: fuzzy multi-objective optimisation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(2), 149-165.
- [43] Alsalem, M. A., Alamoodi, A. H., Albahri, O. S., Dawood, K. A., Mohammed, R. T., Alnoor, A., ... & Al-Obaidi, J. R. (2022). Multi-criteria decision-making for coronavirus disease 2019 applications: a theoretical analysis review. *Artificial Intelligence Review*, 55(6), 4979-5062.
- [44] Chen, L., Dong, T., Peng, J., & Ralescu, D. (2023). Uncertainty analysis and optimization modeling with



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- application to supply chain management: A systematic review. *Mathematics*, 11(11), 2530.
- [45] Keith, A. J., & Ahner, D. K. (2021). A survey of decision making and optimization under uncertainty. *Annals of Operations Research*, 300(2), 319-353.
- [46] Fakhrzad, M. B., & Goodarzian, F. (2019). A fuzzy multi-objective programming approach to develop a green closed-loop supply chain network design problem under uncertainty: modifications of imperialist competitive algorithm. *RAIRO-Operations Research*, 53(3), 963-990.
- [47] Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2016). Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty. *Journal of Structural Engineering*, 142(9), F4016001.
- [48] Feng, G. (2018). *Analysis and synthesis of fuzzy control systems: a model-based approach*. CRC press.
- [49] Ghadi, Y. Y., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2016). Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 738-744.
- [50] Koulinas, G. K., Xanthopoulos, A. S., Tsilipiras, T. T., & Koulouriotis, D. E. (2020). Schedule delay risk analysis in construction projects with a simulation-based expert system. *Buildings*, 10(8), 134.
- [51] Elmousalami, H. H. (2020). Artificial intelligence and parametric construction cost estimate modeling: State-of-the-art review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), 03119008.
- [52] He, Q., Luo, L., Hu, Y., & Chan, A. P. (2015). Measuring the complexity of mega construction projects in China—A fuzzy analytic network process analysis. *International journal of project management*, 33(3), 549-563.