توسعه یک سیستم الکترونیکی برای بهینه‌سازی چندهدفه فعالیت‌های اداری پروژه‌های ساخت با استفاده از الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II

نیما امانی[۱]، پیمان بشیری[۲]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
نویسنده مسئول: نیما امانی nima.amani@iauc.ac.ir

چکیده:

هدف این تحقیق، بکارگیری الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II در بستر مدیریت مجازی پروژه‌های ساخت جهت موازنه و بهینه‌سازی زمان، هزینه و کیفیت فعالیت‌های اداری و پشتیبانی در بستر مدیریت مجازی پروژه است. بدین منظور، ابتدا مدل ریاضی چندهدفه مسئله تدوین شده و سپس کارایی الگوریتم پیشنهادی از طریق مقایسه با روش حل دقیق محدودیت اپسیلون (ϵ-constraint) اعتبارسنجی گردیده است. جهت ارزیابی عملیاتی مدل، یک مطالعه موردی واقعی در حوزه ابنیه عمرانی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج محاسباتی حاصل از این پژوهش نشان داد که مجموع زمان صرف‌شده تجمعی در فرآیندهای اداری مدیریت سنتی معادل ۳۹۳۴۵۱۷ ساعت بوده، در حالی که این شاخص در لایه بوروکراتیک با پیاده‌سازی مدل پیشنهادی مدیریت مجازی به ۱۲/۲۲ درصدِ مقدار مبنا تقلیل می‌یابد که نشان‌دهنده پتانسیل فشرده‌سازی و کاهش ۸۷/۷۸ درصدی در زمان اجرای فرآیندهای بوروکراتیک و اداری مطالعه‌شده بدون اثرگذاری مستقیم بر زمان اجرای فیزیکی کارگاه است. همچنین تحلیل مؤلفه‌های مالی نشان می‌دهد که هزینه تجمعی فرآیندهای اداری سنتی معادل ۱۹۳۴۲۲۲۶۵۲ ریال بوده که در بخش پشتیبانی اداری در بستر مدیریت مجازی به ۲۷۳۵۱۰۰۰۰ ریال (معادل ۱۴/۱۴ درصد از هزینه‌های اداری ساختار سنتی) کاهش یافته است. این خروجی عددی بیانگر پتانسیل کاهش ۸۵/۸۶ درصدی هزینه‌های پشتیبانی اداری در شرایط مطالعه حاضر می‌باشد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی مدیریت مجازی در صورت بومی‌سازی داده‌های ورودی و پذیرش موازنه میان اهداف متناقض در جبهه پارتو، می‌تواند به کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در زمان و هزینه فرآیندهای مدیریتی و پشتیبانی و در نتیجه ارتقای کارایی جریان‌های کاری پروژه منجر گردد.

کلمات کلیدی

مدیریت الکترونیک، مدیریت پروژه، مدل سازی ریاضی، الگوریتم ژنتیک، فعالیتهای اداری

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون کلان‌شهرها و رشد فزاینده جمعیت شهرنشین، چالش‌های متعددی در زیست‌بوم شهری پدیدار شده است که سلامت روان و کیفیت زندگی شهروندان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مشکلاتی نظیر آلودگی‌های جوی و صوتی که به طور مستقیم از ترافیک و ساخت‌وسازهای درون‌شهری نشأت می‌گیرند، هزینه‌های تحمیلی و ناخواسته‌ای را بر شهروندان، سازمان‌ها و نهادهای متولی مدیریت شهری وارد می‌سازند؛ این امر، ضرورت بکارگیری و توسعه سیستم‌های مدیریت الکترونیک را برای تعدیل این هزینه‌ها بیش از پیش نمایان می‌کند [۱]. در همین راستا، با توجه به چالش‌های زمانی و بودجه‌ای حاکم بر پروژه‌های عمرانی، تمایل به بهره‌گیری از مزایای مدیریت الکترونیک با هدف بهبود کارایی زمان و هزینه افزایش یافته است تا بستری برای پیشبرد بهینه فرآیندهای اجرایی و به حداقل رساندن اتلاف منابع فراهم شود. دلیل اصلی چرخش به سمت ابزارهای مدیریت مجازی، گسترش فناوری‌های نوین ارتباطی است که از یک سو سرعت تبادل اطلاعات را به شدت ارتقا داده و از سوی دیگر، هزینه‌های گردش اطلاعات را کاهش داده است. این پتانسیل ساختاری به کارفرمایان و مجریان اجازه می‌دهد تا با رصد دقیق و لحظه‌ای مراحل پیشرفت کار، بستر مناسبی را برای اتخاذ تصمیمات اصلاحی به‌موقع و بهبود نظارت سیستماتیک فراهم آورند.

با وجود توسعه فزاینده صنعت ساخت‌وساز در دهه‌های اخیر، برخی از ساختارهای سازمانی حاکم بر این حوزه همچنان با ناکارآمدی‌های ساختاری مواجه‌اند که در مواردی حتی از الگوهای سنتی مدیریت پروژه نیز کارایی کمتری دارند. در این میان، بهره‌گیری از مدل‌های سازمانی پیشرفته و مبتنی بر بسترهای مجازی که فراتر از محدودیت‌های فیزیکی و دیوان‌سالاریِ سازمان‌های سنتی عمل می‌کنند، راهکاری متمایز برای بهبود فرآیند اجرای پروژه‌های عمرانی به شمار می‌رود. بررسی روند اجرای بسیاری از پروژه‌های عمرانی و کلان‌پروژه‌ها نشان می‌دهد که تحویل نهایی کار غالباً با انحرافات محسوسی نسبت به خطوط مبنا رخ می‌دهد؛ به طوری که هزینه‌های نهایی فراتر از برآوردهای اولیه، زمان اجرا طولانی‌تر از برنامه‌ریزی زمان‌بندی و کیفیت خروجی کمتر از مراجع بازدهی مورد انتظار است. در این راستا، جهت دستیابی به اهداف سه‌گانه مدیریت پروژه (کاهش هزینه، بهینه‌سازی زمان و ارتقای کیفیت)، بکارگیری الگوهای سازمانی مجازی پتانسیل بالایی در حذف هزینه‌های سربار اداری و جذب تیم‌های تخصصی متبحر در فازهای طراحی، اجرا و کنترل پروژه دارد؛ چرا که این ساختارها با الکترونیکی کردن جریان‌های ارتباطی، اتلاف منابع زمانی و مالی را کاهش داده و امکان بکارگیری نیروهای کارآمد را با هزینه‌های رقابتی فراهم می‌سازند [۲]. بر این اساس، یک زنجیره مجازی می‌تواند در قالب یک سیستم چندعاملی مبتنی بر همکاری متعادل میان کارگزاران سازمانی شکل گیرد؛ زنجیره‌ای که از طریق طبقه‌بندی خودکار سازمانی، بستر مناسبی را برای شبیه‌سازی مراحل مختلف پروژه، از جمله فرآیندهای مذاکره میان واحدهای درون‌سازمانی و شرکت‌های همکار فراهم می‌آورد [۳]. از منظر چرخه حیات، یک سازمان مجازی را می‌توان به عنوان سیستمی پویا متصور شد که بازه زمانی میان شکل‌گیری، ادغام عناصر تشکیل‌دهنده و در نهایت انحلال خود را طی می‌کند؛ تبیین عملکرد و بازتنظیم این ساختار به پژوهشگران نشان می‌دهد که مدیریت چرخه عمر سازمان‌های مجازی شکل‌گرفته را می‌توان با استفاده از چارچوب‌های استانداردِ ارائه‌شده توسط پیکره‌های دانش مدیریت پروژه، نظیر استاندارد PMBOK، ساختاردهی و هدایت کرد [۴]. در نتیجه، الگوهای مدیریت الکترونیک بر پایه تبادل یکپارچه و اینترنتی اطلاعات، راهکاری کلیدی با مزایای ساختاری متعدد برای تحقق این اهداف شبکه‌ای به شمار می روند.

با بررسی ادبیات تحقیق مشخص می‌شود که علیرغم توسعه مدل‌های مختلف بهینه‌سازی در مهندسی و مدیریت ساخت، بیشتر تمرکز پژوهشگران بر روی فرآیندهای فیزیکی و کارگاهی (مانند زمان‌بندی اجرای سازه، مدیریت ماشین‌آلات و زنجیره تأمین مصالح) بوده است [۵-۷]. نقص عمده مطالعات پیشین، عدم توجه کمی و ساختاریافته به جریان‌های کاری اداری، بوروکراسی سازمانی و فرآیندهای پشتیبانی مدیریت پروژه است؛ فرآیندهایی که در سیستم‌های سنتی به دلیل ماهیت کاغذی و غیرمنسجم، پتانسیل بالایی در ایجاد تأخیرهای پنهان و افزایش هزینه‌های بالاسری پروژه‌ها دارند [۸-۹]. بر این اساس، خلأ علمی و کاربردی

ACCEPTED MANUSCRIPT

موجود، نبود یک مدل ریاضی چندهدفه است که بتواند با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفی، بوروکراسی اداری پروژه‌ها را بهینه‌سازی کند[۱۰].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به نقش فناوری‌های دیجیتال در صنعت ساخت پرداخته‌اند. با این حال، مرور متون پژوهشی نشان می‌دهد که بخش عمده این مطالعات بر بهینه‌سازی فعالیت‌های فیزیکی کارگاه، مدیریت ماشین‌آلات و ارتقای تولید در فاز اجرای مستقیم متمرکز بوده‌اند و دیجیتالی‌سازی فرآیندهای اداری عمدتاً به ارزیابی‌های کیفی یا سیستم‌های ساده مدیریت اطلاعات محدود شده است. مرور دقیق ادبیات نشان می‌دهد که خلاء تحقیقاتی موجود در این حوزه را می‌توان در چند لایه مشخص و قابل‌سنجش خلاصه کرد: نخست، در سطح مسئله‌شناسی، اکثر مدل‌های بهینه‌سازی، لایه بوروکراسی اداری و فرآیندهای پشتیبانی (مانند گردش استعلام‌ها، تاییدات مهندسی و صورت‌وضعیت‌ها) را نادیده گرفته یا آن را صلب فرض کرده‌اند. دوم، در سطح مدل‌سازی ریاضی، یک فرمول‌بندی صریح و چندهدفه برای موازنه هم‌زمان زمان، هزینه و کیفیت منحصراً در لایه اداری پروژه‌های عمرانی ارائه نشده است. سوم، در بعد روش‌شناسی، از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نظیر NSGA-II جهت تولید پاسخ‌های بهینه پارتو و ایجاد یک سیستم تصمیم‌یار برای مدیریت اداری استفاده نشده است. و در نهایت، یک ارزیابی عددی دقیق برای مقایسه عملکرد بستر سنتی و مجازی در لایه اداری بر پایه یک مطالعه موردی واقعی کمتر مورد توجه بوده است. پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این خلاءهای مشخص طراحی شده است. جنبه نوآورانه این مقاله در بکارگیری الگوریتم NSGA-II و ارائه یک مدل تصمیم‌یار چندهدفه (DSS) برای ۱۷ فرآیند اداری و پشتیبانی کلیدی است تا امکان موازنه شفاف میان زمان، هزینه و کیفیت مدیریتی و انتخاب سناریوهای بهینه برای مدیران پروژه فراهم گردد.

۲- پیشینه تحقیق

بررسی سیر تکاملی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه مدیریت الکترونیک و سازمان‌های مجازی بیانگر آن است که ادبیات این موضوع علیرغم توسعه بسترهای ساختاری، از منظر بهینه‌سازی ریاضی فرآیندها با خلاءهای جدی روبرو است. در همین راستا، بخش عمده‌ای از مطالعات اولیه بر توسعه مفاهیم بنیادین و زیرساخت‌های کلان فناوری اطلاعات تمرکز داشته‌اند؛ به‌طوری‌که سلمانیان کوزه کنان [۱۱] به تبیین اصول ساختاری مدیریت مجازی پرداخت و در سطوح اجرایی‌تر، سرگزی [۱۲] و محبعلی [۱۳] پتانسیل‌های پیاده‌سازی سازمان مجازی و بکارگیری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) را در ساختار مدیریت شهری واکاوی کردند. با انتقال داده‌های سازمانی به محیط‌های اشتراکی، مسئله امنیت این بسترها نیز توسط احمدلو و نجف‌زاده [۱۴] در قالب چالش‌های رایانش ابری مورد ارزیابی قرار گرفت. اگرچه تحقیقات ذکر شده زیرساخت‌های نظری و امنیتی لازم را برای گذار از رویکردهای سنتی به مدرن تبیین می‌کنند، اما نگاه آن‌ها به بسترهای دیجیتال، نگاهی صرفاً بسترور و توصیفی است و جریان‌های کاری پویا و مدل‌های ریاضیِ سنجش کارایی فعالیت‌ها در بطن این سیستم‌ها مغفول مانده است. در سطحی پیشرفته‌تر، تلاش‌هایی برای نظام‌مند کردن و استانداردسازی این فرآیندها صورت پذیرفت. Matsuda و همکاران [۳] چارچوبی را بر پایه کاتالوگ‌های الکترونیکی جهت تبادل داده در شرکت‌های چابک توسعه دادند و در رویکردی جامع‌تر در حوزه مدیریت پروژه، Ferreira و همکاران [۴] یکپارچه‌سازی سازمان‌های مجازی را با تکیه بر پیکره دانش مدیریت پروژه (PMBOK) مدل‌سازی نمودند. با وجود اینکه اتصال فرآیندهای مجازی به استانداردهایی نظیر PMBOK گام رو به جلویی در جهت ساختاردهی به پروژه محسوب می‌شود، اما نقص متدولوژیک این دسته از پژوهش‌ها، صلب و ایستا فرض کردن جریان‌های کاری است؛ چرا که استانداردهای مدیریتی فرآیندها را به صورت کیفی دیکته می‌کنند، اما ابزار یا راهکار ریاضی برای حل تعارضات ذاتی شاخص‌های متناقض (مانند کاهش زمان و هزینه در عین حفظ کیفیت) در بطن بوروکراسی‌های اداری ارائه نمی‌دهند. در سال‌های اخیر، گرایش محققان به سمت کاربردی‌سازی و اتوماسیون فرآیندهای داخلی سازمان‌ها سوق یافته است، چنان‌که نوری و همکاران [۱۵] نقش ابزارهای الکترونیک را در مدیریت منابع انسانی واکاوی کردند. در ابعادی تخصصی‌تر، توسعه پلتفرم‌های ابری مدیریت اسناد الکترونیک (EDMS) و خودکارسازی فرآیندها نیز در مراجع جدیدتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، خلأ علمی آشکار در این دسته از پلتفرم‌های اتوماسیون، عدم بهره‌گیری از رویکردهای بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه مبتنی بر پارتو است. این سیستم‌ها فرآیندهای اداری را از حالت کاغذی به الکترونیکی تبدیل می‌کنند، اما فاقد

ACCEPTED MANUSCRIPT

مکانیزمی هستند که بتواند گزینه‌های بهینه متعددی را بر اساس تعادل میان زمان و هزینه در اختیار مدیران قرار دهد. با نگاهی به مطالب و تحقیقات انجام شده مشخص می‌شود که در ادبیات مهندسی و مدیریت ساخت، بهینه‌سازی ریاضی همواره معطوف به فعالیت‌های فیزیکی کارگاه بوده و گردش کارهای اداری و بوروکراسی پشتیبانی پروژه صرفاً به عنوان فرآیندهایی روتین رها شده‌اند. تحقیق حاضر با درک این شکاف متدولوژیک، مدل ریاضی چندهدفه (NSGA-II) را مستقیماً بر جریان فرآیندهای اداری در مدیریت مجازی پروژه اعمال کرده است تا نقایص موجود در مطالعات پیشین را پوشش دهد.

۳- روش تحقیق

مبنای تجربی این پژوهش در سال ۱۳۹۷ هجری شمسی بر روی مجتمع تجاری-اداری همیلا در غرب تهران متمرکز بود که در زمینی به مساحت ۸۱۰۰ مترمربع و در ۲۷ طبقه (شامل بخش‌های پارکینگ، تجاری و اداری) احداث گردیده است. عملیات اجرایی این پروژه توسط یکی از شرکت‌های پیمانکاری رتبه یک و باسابقه در حوزه ابنیه و زیرساخت‌های عمرانی پیش می‌رود. بر اساس بازدیدهای میدانی و مصاحبه‌های ساختاریافته با مسئولان بخش‌های مختلف کارگاه، ساختار سازمانی فرآیندهای اداری پروژه در قالب پنج واحد اصلی شامل «مدیریت پروژه»، «کنترل پروژه»، «دفتر فنی»، «انبارداری» و «حسابداری» تفکیک شد. با توجه به فعالیت هم‌زمان این واحدها در زمان انجام پژوهش، تلاش شد تا ضمن تعریف وظایف هر واحد، تبیین دقیقی از روندهای اجرایی فعالیت‌ها و تعاملات ساختاری میان آن‌ها حاصل شود. این تحقیق از نظر ماهیت، در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد که هدف آن توسعه راهکارهای عملیاتی در بستر محدودیت‌های واقعی و شرایط حاکم بر کارگاه‌های ساخت است. با توجه به ماهیت مدل‌سازی محاسباتی این پژوهش، فرآیند تحقیق مبتنی بر روش‌های نمونه‌گیری آماری نبوده و پایایی آن از طریق روش‌های ریاضی سنجیده می‌شود.جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در بخش ادبیات موضوع از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی آنلاین، کتاب‌ها و رساله‌های تخصصی صورت گرفته و داده‌های میدانی نیز از طریق مصاحبه با خبرگان حوزه اجرا و مدیریت پروژه در محل کارگاه ساختمانی مذکور گردآوری شده است. مسئله اصلی این پژوهش، تبیین چگونگی بکارگیری سیستم‌های الکترونیک در راستای موازنه بهینه زمان، هزینه و کیفیت در فرآیندهای عمرانی است. در این راستا، ابتدا روابط همبستگی و ساختار پیش‌نیازی فرآیندها در قالب ماتریس مقایسات زوجی و با بهره‌گیری از روش فرآیند تحلیل شبکه فازی (ANP فازی) استخراج گردید. پس از محاسبه وابستگی فرآیندها، ماتریس شبکه فرآیند (PNM) به عنوان یکی از پارامترهای پایه‌ای وارد مدل ریاضی شد. در گام بعد، مدل‌سازی ریاضی چندهدفه مسئله تدوین شد و جهت استخراج جبهه پارتو و بهبود هم‌زمان سه فاکتور کیفیت، زمان و هزینه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بکار گرفته شد. در نهایت، به منظور ارزیابی کارایی روش حل، نتایج حاصل از الگوریتم با روش دقیق محدودیت اپسیلون (constraint-ϵ) مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت. فرآیند اعتبارسنجی مدل محاسباتی، ظرفیت و کارایی ساختار مدیریت مجازی پیشنهادشده را در بهبود شاخص‌های زمان‌بندی و کاهش تداخلات بوروکراتیک در مقایسه با رویکردهای سنتی موجود به خوبی تایید می‌کند.

۳-۱- مصاحبه و جمع آوری داد ه ها

جمع‌آوری داده‌های میدانی و بومی‌سازی فرآیندهای اداری بر پایه نظرات یک پنل ۵ نفره از خبرگان و متخصصان کلیدی پروژه مورد مطالعه صورت گرفته است. جدول ۱ خلاصه‌سازی ویژگی‌های پنل خبرگان را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات دموگرافیک و ساختار پنل خبرگان

Table 1: Demographics and expert panel profile

شاخص / ویژگی	جزئیات متدولوژیک و اجرایی در پژوهش
تعداد خبرگان	۵ نفر (متشکل از مدیر پروژه، سرپرست کارگاه، مسئول دفتر فنی، ناظر مقیم مشاور، و نماینده کارفرما)
تخصص و حوزه فعالیت	مدیریت پروژه، دفتر فنی، کنترل پروژه، مدیریت ساخت و نظارت کارگاهی
سوابق کاری	حداقل ۱۵ سال سابقه اجرایی و مدیریتی در پروژه‌های عمرانی بزرگ‌مقیاس
معیار انتخاب خبرگان	۱. تسلط بر فرآیندهای بوروکراتیک و اداری ساختار ۴ عاملی پیمان‌ها ۲. سابقه مدیریت یا ارشدیت در کلان‌پروژه‌های شهری یا ابنیه سنگین

ACCEPTED MANUSCRIPT

	۳. تحصیلات مرتبط (حداقل کارشناسی ارشد مهندسی سازه و مدیریت ساخت)
نحوه انجام مصاحبه	مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته به همراه توزیع پرسش‌نامه‌های مقایسات زوجی ANP فازی در محل کارگاه
روش اجماع نظر	روش دلفی فازی (Fuzzy Delphi) و میانگین‌گیری فازی ماتریس‌های مقایسات زوجی
نحوه کنترل سوگیری (Bias)	۱. سنجش نرخ ناسازگاری (Inconsistency Ratio < ۰/۱) در ماتریس‌های قطعی ۲. استفاده از اعداد فازی مثلثی جهت پوشش عدم قطعیت و سلیقه‌گرایی

برای دستیابی به اجماع نظر میان خبرگان و حذف نظرات سلیقه‌ای، از تکنیک دلفی فازی (Fuzzy Delphi) و تجمیع دیدگاه‌ها با استفاده از میانگین فازی استفاده شد. همچنین جهت کنترل سوگیری ذهنی و احراز پایایی ماتریس‌های مقایسات زوجی در الگوریتم ANP فازی، نرخ ناسازگاری (CR) برای ماتریس‌های قطعی متناظر محاسبه گردید. تنها ماتریس‌هایی که نرخ ناسازگاری آن‌ها کمتر از ($CR < ۰/۱$) بود مورد پذیرش قرار گرفتند و در موارد عدم احراز، فرآیند نظرسنجی و اصلاح ماتریس‌ها تا احراز پایداری ریاضی تکرار گردید.

۳-۲- مساله تحقیق

فرآیند اجرایی این پژوهش در قالب گام‌های سیستماتیک زیر ساختاردهی شده است:

گام اول (شناسایی فرآیندهای پایه‌ای): در این گام، ابتدا با بررسی جامع ادبیات نظارتی، پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی و تحلیل ساختار پروژه‌های مشابه، فرآیندهای کلان مدیریتی، فعالیت‌های وابسته و بازخوردهای متقابل آن‌ها به عنوان مبنای اولیه پژوهش استخراج گردید. سپس از طریق مطالعات میدانی اولیه، ساختار این فرآیندها با شرایط حاکم بر مدیریت اداری پروژه‌های عمرانی همسو شد.

گام دوم (غربالگری و بومی‌سازی فرآیندها): مجموعه فرآیندهای استخراج‌شده در گام نخست، در اختیار پنل خبرگان تحقیق قرار گرفت تا از طریق نظرسنجی ساختاریافته و بر اساس ویژگی‌های بوروکراتیک و لجستیکی زنجیره ساخت، فرآیندها و مکانیزم‌های پاسخ نهایی متناسب با ابعاد مسئله انتخاب و نهایی شوند.

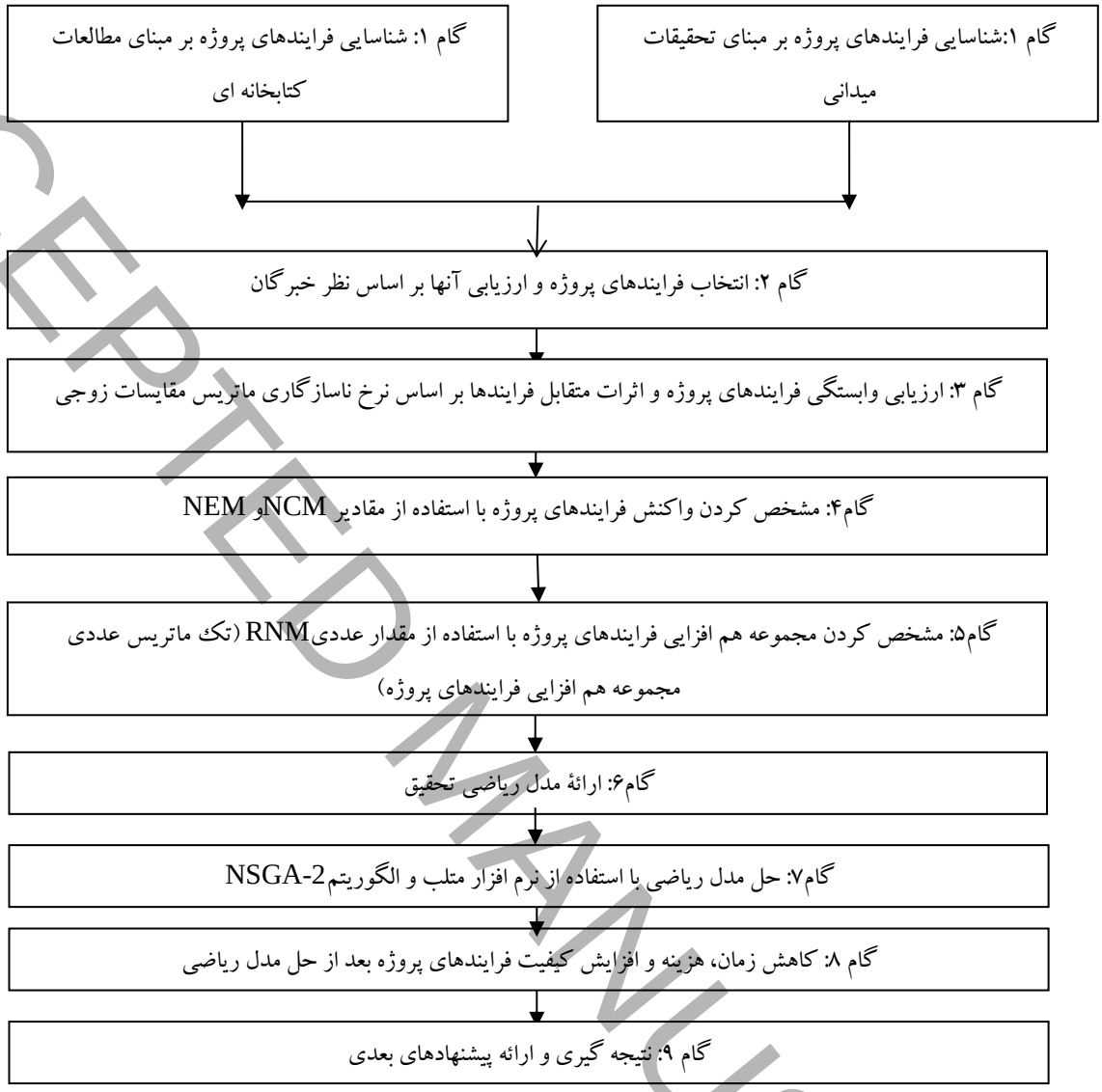
گام سوم (تحلیل روابط متقابل و شبکه همبستگی): در این مرحله، وابستگی درونی و اثرات متقابل فرآیندها بر اساس تکنیک فرآیند تحلیل شبکه فازی (Fuzzy ANP) و با تشکیل ماتریس‌های مقایسات زوجی بر مبنای آرای ۵ خبره برجسته حاصل شد. جهت تایید پایایی ریاضی روابط، نرخ ناسازگاری ماتریس‌های قطعی متناظر محاسبه گردید و تنها در صورت احراز شرط پایداری (نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱)، صحت روابط همبستگی تایید و به عنوان ساختار شبکه بهینه پذیرفته شد.

گام چهارم (کمی‌سازی ساختار علت و معلولی): برای هر فرآیند، بردارهای عددی اثرگذاری و اثرپذیری در قالب ماتریس‌های روابط کلان استخراج شد تا رفتار معلولی و علتی فرآیندها بر اساس مقادیر ماتریس شبکه ارتباطی فرآیند (NCM) و ماتریس اثرات محیطی فرآیند (NEM) به طور دقیق کمی‌سازی شود.

گام پنجم (استخراج هم‌افزایی فرآیندها): در این گام، مجموعه هم‌افزایی پاسخ‌های بهینه برای هر یک از فرآیندهای پروژه با بهره‌گیری از مقادیر عددی حاصل از ماتریس رابطه مجموعه هم‌افزایی فرآیندها (RNM) تعیین گردید تا وزن‌دهی نهایی متغیرها به تعداد فرآیندهای فعال مشخص شود.

گام‌های ششم و هفتم (مدل‌سازی ریاضی و حل الگوریتمی): با توجه به پیچیدگی محاسباتی شدید مدل ریاضی تدوین‌شده و قرارگیری آن در کلاس مسائل سخت (NP-hard)، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) جهت استخراج جبهه پارتو بکار گرفته شد. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم، شاخص‌های عملکردی کلیدی شامل شاخص میانگین فاصله از ایده آل (MID)، تعداد پاسخ‌های بهینه پارتو (NOP)، زمان محاسبات (Time)، شاخص یکنواختی فاصله‌گذاری (Spacing) و شاخص تنوع پاسخ‌ها (Diversity) محاسبه شدند. در نهایت، ساختار متغیرهای مورد بررسی به صورت سلسله‌مراتب گرافیکی تدوین شد تا مکانیزم سنجش و اندازه‌گیری دقیق هر متغیر در بدنه مدل تبیین گردد. شکل ۱ ساختار روش تحقیق را نشان می دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱: ساختار روش تحقیق

Figure 1: Research methodology framework

۳-۳- شناسایی فعالیت‌ها

مبنای گزینش و تجمیع ۱۷ فعالیت اداری مورد بررسی در این پژوهش، بر شناسایی و تحلیل جریان‌های کاریِ بحرانی، پرتکرار و متوالی در ساختار پشتیبانی پروژه‌های عمرانی استوار است. با توجه به اینکه هدف اصلی مدل ریاضی توسعه‌یافته، بهینه‌سازی توابع هدف متناقضِ زمان، هزینه و کیفیت در بستر پلتفرم مجازی است، تمرکز ارزیابی بر آن دسته از فرآیندهایی معطوف گردید که در سیستم‌های سنتی به دلیل ماهیت چندکاربره و نیاز به تأییدات سلسله‌مراتبی، بیشترین پتانسیل را در ایجاد تأخیرهای پنهان و افزایش هزینه‌های بالاسری پروژه دارند. در گام نخست جهت بررسی فرآیندهای اداری پروژه، با مرور اسناد پیمان و مصاحبه با خبرگان، در مجموع ۳۸ فعالیت اداری و پشتیبانی شناسایی گردید. از آنجا که ورود تمام ۳۸ فعالیت به مدل ANP

ACCEPTED MANUSCRIPT

فازی موجب پیچیدگی بی‌مورد ریاضی و کاهش دقت مقایسات زوجی می‌شد، فرآیند غربالگری و ساختاردهی در سه گام حذف، ادغام و انتخاب فعالیت‌های نماینده انجام شد که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: معیارهای انتخاب، حذف، ادغام و پوشش ۱۷ فعالیت اداری

Table 2: Criteria for selection, exclusion, merging, and coverage of 17 administrative activities

شاخص / ویژگی	جزئیات متدولوژیک و داده‌های مقاله
کل فعالیت‌های اداری شناسایی‌شده	۳۸ فعالیت در شناسنامه اولیه فرآیندهای پشتیبانی و اداری پروژه
معیارهای غربالگری و انتخاب	۱. بحرانی بودن زمانی: فعالیت‌هایی که در مسیر حرج یا پیش‌نیاز شروع کارهای اجرایی/مالی بودند. ۲. تکرارپذیری و تواتر: فرآیندهایی که مستمراً در طول دوران ساخت رخ می‌دهند. ۳. تاثیر بر جریان مالی/حقوقی: فعالیت‌هایی که عدم انجام آن‌ها موجب خسارت تأخیرات یا تعلیق می‌شد.
معیارها و فرآیند حذف	حذف ۱۲ فعالیت به دلایل زیر: ۱. فرآیندهای غیربحرانی و درون‌سازمانیِ محض (مانند بایگانی داخلی، درخواستی‌های جزئی انبار) ۲. فرآیندهای فاقد تاثیر بر زمان‌بندی کل پروژه
معیارها و فرآیند ادغام	ادغام ۹ فعالیت فرعی و هم‌راستا در زیرفرآیندهای اصلی (مثلاً ادغام مراحل مختلف تایید پیش‌نویس صورت‌وضعیت در یک عنوان کلی)
تعداد فعالیت‌های نهایی انتخاب‌شده	۱۷ فعالیت نماینده (شامل A_1 تا A_{17})
نسبت به کل فعالیت‌ها	44/7 درصد (38 / 17) از نظر تعدادی، اما با پوشش بیش از ۸۵ درصد از زمان و بوروکراسی اداری پروژه
میزان پوشش فرآیندهای پشتیبانی	پوشش کامل ۴ حوزه اصلی پشتیبانی: ۱. مالی و صورت‌وضعیت‌ها ۲. تدارکات و خرید تجهیزات/مصالح ۳. صورت‌جلسات و دستورکارها ۴. مجوزهای قانونی، فنی و استعلامات خارج از کارگاه

این مجموعه فعالیت‌ها اگرچه تمامی تراکنش‌های اداری و موازی یک سازمان را در بر نمی‌گیرد، اما به عنوان یک نمونه نماینده و جامع از فرآیندهای اداری-مدیریتیِ متصل به چرخه ساخت (از جمله فرآیندهای ابلاغ، تأییدات کارگاهی، مکاتبات ذینفعان و مستندسازی اسناد) قلمداد می‌شود. از این رو، جامعیت فرآیندهای مذکور در لایه پشتیبانی، امکان تعمیم‌پذیری خروجی‌های الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II را فراهم ساخته و بستر معتبری را برای سنجش فرآیند بهینه‌سازی فراهم می‌کند. فعالیتها در جدول ۳ لیست شده اند.

جدول 3: شرح فعالیت های پروژه مساله تحقیق

Table 3: Description of research project activities

ردیف	شرح فعالیت
۱	تهیه برنامه زمان بندی پروژه
۲	تنظیم و ارائه گزارش های روزانه
۳	تنظیم و ارائه گزارش های هفتگی
۴	تنظیم و ارائه گزارش های ماهانه
۵	بررسی تاخیرات پروژه و تهیه برنامه زمان بندی جبرانی
۶	تنظیم صورتجلسات کارکرد
۷	تنظیم صورت وضعیت های کارکرد
۸	تنظیم صورت وضعیت های تعدیل
۹	تهیه دستور کارهای اجرایی

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱۰	تهیه و تنظیم اجازه کار های مورد نیاز در مراحل مختلف کاری
۱۱	تهیه نقشه های چون-ساخت
۱۲	انجام مکاتبات و مراودات اداری
۱۳	واحد انبارداری پروژه
۱۴	خرید
۱۵	انبارگردانی
۱۶	واحد حسابداری پروژه
۱۷	حسابداری حقوق، مزایا و بیمه کارکنان و کارگران

اگرچه این ۱۷ فعالیت از نظر عددی ۴۴/۷ درصد کل فعالیت‌های اداری شناسایی‌شده را تشکیل می‌دهند، اما طبق ارزیابی خبرگان، بیش از ۸۵ درصد از زمان تلف‌شده اداری و کل ۴ حوزه اصلی پشتیبانی پروژه شامل: الف) مالی و صورت‌وضعیت‌ها، ب) تدارکات و ابلاغ خریدها، ج) مجوزها و دستورکارها، و د) تغییرات مقادیر و استعلامات فنی را به‌طور کامل پوشش می‌دهند. جهت شفاف‌سازی مکانیزم عملکردی و ساختار جریان اطلاعات در مدل تصمیم‌یار پیشنهادی، چارچوب عملیاتی مدل در قالب یک فرآیند سه‌لایه‌ای متشکل از ورودی‌ها، هسته پردازش الگوریتمی و خروجی‌های سیستم مشخص می‌گردد. لایه نخست به داده‌های ورودی و کاربران اختصاص دارد؛ کاربران اصلی این مدل، مدیران پروژه و برنامه‌ریزان بخش پشتیبانی هستند که مشخصات و فرآیندهای متوالی ۱۷ فعالیت اداری مبنا (شامل زمان‌های انتظار، هزینه‌های ثابت و متغیر پرسنلی، و شاخص‌های کیفی اولیه) را به عنوان ماتریس‌های پیش‌نیازی وارد مدل می‌کنند. لایه دوم یا هسته محاسباتی، ساختار بهینه‌سازی ریاضی را بر عهده دارد. در این لایه، جریان اطلاعات از طریق کدنویسی الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II پردازش شده و پس از اعمال قیود بوروکراتیک و سازمانی، توابع هدف متناقض (زمان، هزینه و کیفیت) را در تکرارهای متوالی ارزیابی می‌کند. در نهایت، لایه سوم به خروجی‌های تصمیم‌یار مربوط می‌شود که خروجی آن به جای یک پاسخ تک‌بعدی، مجموعه‌ای از نقاط بهینه پارتو (Pareto Frontier) است. این خروجی، گزینه‌های موازنه شده‌ای از زمان و هزینه را در اختیار مدیریت قرار می‌دهد تا بر حسب شرایط دینامیک پروژه، بهینه‌ترین ساختار جریان کار الکترونیک را انتخاب و پیاده‌سازی کند.

۳-۴- مدل سازی مساله تحقیق

مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تحقیق در جداول ۴ تا ۶ لیست شده اند.

جدول ۴: مجموعه های مدل تحقیق

Table 4: Research model sets

مجموعه استراتژیهای پاسخ	A= { A1,A2,..., A_M}, i=1,2,...,m
مجموعه فرایندها	B= { B1, B2,..., B_N}, j=1,2,...,m
مجموعه فعالیت ها	W= { W1,W2,..., W_K}, k=1,2,...,K
مجموعه معیارهای ارزیابی	C= { C1,C2,..., C_L}, l=1,2,...,L
مجموعه فعالیتها برای فرایندk	B^K,k=1,2,...,K
مجموعه پاسخها برای فعالیت j مربوط به فرایند k که انتخاب تعدادی از آنها منجر به ایجاد هم افزایی میگردد	St_j^k ,j=1,2,...,n k=1,2., K

جدول ۵ : پارامترهای مدل تحقیق

Table 5: Research model parameters

ACCEPTED MANUSCRIPT

$\overleftrightarrow{M}$	مجموعه ای از همه جفت استراتژیهایی که یکدیگر را تضعیف میکنند
$\overline{M}$	مجموعه ای از همه جفت استراتژیهایی که یکدیگر را تقویت میکنند
M	عدد مثبت خیلی بزرگ
s_j^k	مقدار زمانی که فعالیت k از فرایند j به تأخیر میافتد
$\tilde{s}_{ji}^k$	مقدار زمانی که استراتژی پاسخ i برای فعالیت j از فرایند k کاهش می دهد
$\widetilde{sa}_j^k$	مقدار زمانی که از هم افزایی حاصل از استراتژیهای پاسخ برای فعالیت j از فرایند k کاسته میشود
ϵ^k	حداکثر تأخیر مجاز برای فرایندk
Atr_{ji}^{kl}	مقدار اثر حاصل از معیار l از استراتژی پاسخ i در فرایند j برای فعالیتk
g_j^{kl}	هم افزایی تولید شده برای معیار ارزیابی l در فرایند j برای فعالیتk
m_j^k	حداقل استراتژی پاسخ انتخاب شده برای ایجاد هم افزایی برای فرایند j و فعالیتk
M_j^k	حداکثر استراتژی پاسخ انتخاب شده برای ایجاد هم افزایی برای فرایند j و فعالیتk
RNM_{fj}	میزان تأثیر فرایند f بر روی فرایند j که حاصل ماتریس طراحی فرایند میباشد

جدول ۶: متغیرهای مدل تحقیق

Table 6: Research model variables

x_{ji}^k	اگر استراتژی پاسخ i برای فرایند j و فعالیت k انتخاب شود، ۱ ؛ در غیر اینصورت صفر
LM_j^k	اگر هم افزایی برای پاسخهای مربوط به فرایند j و فعالیت k ایجاد شود، ۱؛ در غیر اینصورت صفر

۳-۵- مدل ریاضی مساله

ساختار بهینه‌سازی ارائه شده در این پژوهش بر پایه یک مدل ریاضی چندهدفه با توابع هدف متناقض استوار است که به طور هم‌زمان اهداف زمان، هزینه و کیفیت را در جریان کارهای اداری پروژه هدف قرار می‌دهد. جهت اجرای دقیق مکانیزم مدل، جهت‌گیری روابط و نحوه محاسبه هر یک از توابع هدف به شرح زیر ساختاردهی شده است:

تابع هدف اول به کمینه‌سازی زمان کل (Total Time) اجرای فرآیندهای اداری اختصاص دارد. این تابع، مجموع زمان‌های خالص انجام فعالیت‌ها و زمان‌های انتظار یا تأخیر ناشی از گردش کار کاغذی و بوروکراسی سلسله‌مراتبی را محاسبه می‌کند. مبنای محاسبه زمان در بستر سنتی و مجازی، بر اساس مسیر بحرانی جریان کار و توالی ماتریس‌های پیش‌نیازیِ فعالیت‌ها تعیین می‌شود تا مدل بتواند کمترین زمان ممکن را برای اتمام زنجیره فرآیندها بیابد.

تابع هدف دوم بر کمینه‌سازی هزینه کل (Total Cost) فرآیندهای پشتیبانی تمرکز دارد. محاسبات این تابع شامل دو بخش اصلی هزینه‌های ثابت (مانند تجهیزات، فضا و زیرساخت‌های فیزیکی یا مجازی) و هزینه‌های متغیر (نظیر هزینه‌های پرسنلی بر حسب ساعت کاری، مصرف اقلام مصرفی و هزینه‌های بالاسری ناشی از طولانی شدن فرآیندها) است. مدل با ارزیابی این پارامترها در هر لایه، به دنبال یافتن تخصیص بهینه‌ای از منابع است که کمترین بار مالی تجمعی را به سیستم تحمیل کند.

تابع هدف سوم، برخلاف دو تابع قبلی، به دنبال بیشینه‌سازی کیفیت کل (Total Quality) جریان کار است. شاخص کیفیت در این مدل بر اساس متغیرهای تصمیم مربوط به دقت انجام فرآیند، کاهش نرخ خطاهای انسانی در بستر دیجیتال و میزان رضایت ذینفعان ناشی از شفافیت اطلاعاتی فرمول‌بندی می‌شود. از آنجا که کاهش افراطی زمان و هزینه می‌تواند به افت کیفیت منجر شود، این تابع به عنوان یک وزن موازنه کننده عمل کرده و جبهه پارتوی بهینه‌ای را میان سه عامل متناقض زنجیره مدیریت پروژه ترسیم می‌کند.

مدل ریاضی مسئله با توجه به متغیرها و پارامترهای مساله، مدل بهینه سازی صفر و یک تحقیق به صورت زیر ارائه می شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\text{Max } z = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j \in B^k} \left(\sum_{i \in St_j^k} Atr_{ij}^{lk} x_{ij}^k + \sum_{f \in B^k} RNM_{fj} \sum_{o \in St_f^k} Atr_{of}^{lk} x_{of}^k \right) + \sum_{k=1}^{K} \sum_{j \in B^k} g_j^{lk} LM_j^k \qquad l = 1,2,\dots,L \tag{۱}$$

$$\sum_{j \in B^k} s_j^k - \left(\sum_{j \in B^k} \left[\sum_{i \in St_j^k} \tilde{s}_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{f \in B^k} RNM_{fj} \sum_{o \in St_f^k} \tilde{s}_{of}^k x_{of}^k + \widetilde{sa}_j^k LM_j^k \right] \right) \leq \varepsilon^k \qquad k = 1,2,\dots,K \tag{۲}$$

$$\sum_{i \in St_j^k} x_{ij}^k - m_j^k + 1 \leq M \times LM_j^{km} \leq \sum_{i \in St_j^k} x_{ij}^k - m_j^k + M \qquad k = 1,2,\dots,K \qquad j = 1,2,\dots,n \tag{۳}$$

$$M_j^k - \sum_{i \in St_j^k} x_{ij}^k + 1 \leq M \times LM_j^{kM} \leq M_j^k - \sum_{i \in St_j^k} x_{ij}^k + M \qquad k = 1,2,\dots,K \qquad j = 1,2,\dots,n \tag{۴}$$

$$LM_j^{kM} \times LM_j^{km} = LM_j^k \qquad k = 1,2,\dots,K \qquad j = 1,2,\dots,n \tag{۵}$$

$$x_{ij}^k + x_{i'j'}^{k'} \leq 1 \qquad (A_i, A_{i'}) \in \vec{M} \qquad i,i' = 1,2,\dots,m \qquad j,j' = 1,2,\dots,n \qquad k,k' = 1,2,\dots,K \tag{۶}$$

$$x_{ij}^k + x_{i'j'}^{k'} = 1 \qquad (A_i, A_{i'}) \in \vec{M} \qquad i,i' = 1,2,\dots,m \qquad j,j' = 1,2,\dots,n \qquad k,k' = 1,2,\dots,K \tag{۷}$$

$$x_{ij}^k - x_{i'j'}^{k'} \leq 0 \qquad (A_i, A_{i'}) \in \vec{M} \qquad i,i' = 1,2,\dots,m \qquad j,j' = 1,2,\dots,n \qquad k,k' = 1,2,\dots,K \tag{۸}$$

$$x_{ij}^k, x_{i'j'}^{k'}, LM_j^k, LM_j^{km}, LM_j^{kM} \in \{0,1\} \qquad i,i' = 1,2,\dots,m \qquad j,j' = 1,2,\dots,n \qquad k,k' = 1,2,\dots,K \tag{۹}$$

در این مدل، تابع هدف (رابطه ۱) قصد دارد مقدار حاصل از هر معیار ارزیابی را بهینه کند. محدودیت دو (رابطه ۲) بیان میکند که استراتژیهای پاسخ به فرایند طوری انتخاب شود که میزان تأخیر در اجرای هر فرایند باید از میزان مورد نظر (میزان معمول) کمتر باشد. محدودیت سوم و چهارم و پنجم (روابطه ۳ و۴ و۵) بیان میکند که اگر تعداد مشخصی از استراتژیهای پاسخ به فرایند برای مجموعه ای از فرایند مورد نظر انتخاب شود، هم افزایی برای آن فرایند ایجاد شده و اثر آن فرایند را افزایش یا کاهش می دهد. بطوریکه محدویت چهارم (رابطه ۴) بیان میکند که اگر استراتژیهای انتخاب شده مورد نظر از مقداری بیشتر باشد متغیر LM_j^{km} مقدار ۱، در غیر اینصورت ۰ میشود.

همچنین محدویت پنجم (رابطه ۵) بیان میکند که اگر استراتژیهای انتخاب شده مورد نظر از مقداری کمتر باشد متغیر LM_j^{kM} مقدار ۱، در غیر اینصورت صفر میشود. محدودیت ششم(رابطه ۶) بیان میکند که اگر مقدار استراتژیهای انتخاب شده در بازه مورد نظر بوده و مقدار دو متغیر در دو محدودیت چهارم و پنجم (روابطه ۴ و۵) ۱ باشند، یعنی هم افزایی ایجاد شده و مقدار LM_j^kیک میشود و در غیر اینصورت صفر میشود. محدودیت هفت (رابطه ۷) بیان میکند که از میان دو استراتژی یکی انتخاب شود. محدودیت هشت (رابطه ۸) مربوط به این است که حتماً از میان دو استراتژی یکی انتخاب شود. محدودیت نه (رابطه ۹) بیان میکند که اگر استراتژی اول انتخاب شد دیگری نیز انتخاب شود. ولی اگر دومی انتخاب شود اولی میتواند انتخاب شود یا نشود، یعنی استراتژی دوم پیش نیاز استراتژی اول میباشد. متغیرهای صفر و یک مدل نیز بیان شده اند.

۳-۶- کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم

کارایی و نرخ همگرایی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، به‌ویژه الگوریتم NSGA-II، به شدت تحت تأثیر کالیبراسیون و تنظیم دقیق پارامترهای ساختاری آن قرار دارد. در این پژوهش، جهت دوری از روندهای سلیقه‌ای و سنتی سعی و خطا، فرآیند تنظیم

ACCEPTED MANUSCRIPT

پارامترها بر پایه یک رویکرد سیستماتیک تجربی (Empirical Tuning) متکی بر ادبیات فنی مراجع معتبرِ مهندسی ساخت استوار شده است. بر این اساس، ابتدا محدوده‌های بهینه فرضی برای پارامترها بر اساس مطالعات پیشین استخراج گردید؛ سپس با اجرای آزمون‌های پایداری بر روی مسئله جریان کار ۱۷ فعالیت اداری تحقیق، رفتارهای همگرایی مدل رصد شد. معیار نهایی برای تثبیت تعداد تکرارها، رسیدن به پایداری نسبی در جبهه پارتو و عدم بهبود توابع هدف در تکرارهای پایانی بود که نشان‌دهنده همگرایی الگوریتم و دوری از بهینه‌های محلی است. همچنین نرخ تقاطع (P_c) و نرخ جهش (Pm) به گونه‌ای موازنه شدند که تعادل میان فرآیند جستجوی سراسری (Exploration) و استخراج محلی (Exploitation) در فضای پاسخ‌ها حفظ گردد. مشخصات دقیق و کالیبره‌شده پارامترهای مکانیزم بهینه‌سازی در جدول 7 گزارش شده است.

جدول ۷: پارامترهای تنظیم‌شده الگوریتم NSGA-II بر اساس تحلیل همگرایی تجربی

Table 7: Parameter settings for the NSGA-II algorithm based on empirical convergence analysis

ردیف	نام پارامتر الگوریتم	نماد ریاضی	مقدار کالیبره‌شده	مبنای ساختاری و متدولوژیک
۱	اندازه جمعیت اولیه (Population Size)	N_{pop}	100	ایجاد تنوع کافی در فضای پاسخ‌های اولیه
۲	حداکثر تعداد تکرار (Max Iteration)	$MaxIt$	200	دستیابی به پایداری نسبی و همگرایی جبهه پارتو
۳	نرخ تقاطع (Crossover Probability)	P_c	۰/۸۰	تقویت بازترکیب پاسخ‌های بهینه و جستجوی سراسری
۴	نرخ جهش (Mutation Probability)	P_m	۰/۱۵	حفظ تنوع ژنتیکی و جلوگیری از همگرایی زودرس
۵	مکانیزم انتخاب (Selection Method)	-	Tournament	حفظ فشار تکاملی و شانس بقای اعضای برتر

۴- حل مسئله با استفاده از الگوریتم NSGA-II

در این پژوهش، به منظور حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی صفر و یک تدوین‌شده، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه با رتبه‌بندی غیرمغلوب (NSGA-II) استفاده می‌شود. این الگوریتم که نخستین بار توسط دِب و همکاران (۲۰۰۲) توسعه یافت، به عنوان یکی از کارآمدترین و مناسبترین ابزارهای بهینه‌سازی چندهدفه شناخته می‌شود که به دلیل پیچیدگی محاسباتی پایین و سرعت همگرایی بالا، کارایی بالایی در حل مسائل پیچیده دارد [۱۶]. الگوریتم NSGA-II مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو را بر اساس مفهوم عدم غلبه و مکانیزم فاصله تراکمی استخراج می‌کند؛ این ویژگی به تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد تا بر اساس ترجیحات مدیریتی خود، سناریوی بهینه را از میان مجموعه‌ای از طرح‌های کارآمد انتخاب کنند. در ساختار این الگوریتم، معیارهای انتخاب نخبگی و حفظ تنوع پاسخ‌ها به طور هم‌زمان بکار گرفته می‌شوند؛ به طوری که در هر تکرار، ابتدا یک جمعیت فرزند به اندازه N از جمعیت والدین تشکیل شده و سپس با ادغام آن‌ها، مجموعه‌ای به اندازه $2N$ پدید می‌آید. در گام بعد، این جمعیت ترکیبی بر اساس مکانیزم مرتب‌سازی غیرمغلوب، جبهه‌بندی شده و اعضای برتر غربال می‌گردند تا در نهایت جمعیتی پایدار به اندازه N برای نسل بعد استخراج شود.

به منظور ارزیابی مدل و کالیبراسیون الگوهای حل، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در قالب ۱۰ مسئله نمونه (مطابق با ساختار جدول ۸) سنجیده شده است. پارامترهای پایه‌ای این مسائل نمونه با بهره‌گیری از تابع توزیع یکنواخت به صورت تصادفی تولید شده‌اند و سه تابع هدف کلان شامل کمینه‌سازی زمان، کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص کیفیت به عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد مدل لحاظ گردیده‌اند. همچنین، به منظور بازسازی اثرات هم‌افزایی فرآیندها، حداقل و حداکثر شاخص عددی هم‌افزایی به ترتیب معادل ۲ و ۶ در نظر گرفته شده است. در نهایت، جهت مدل‌سازی واقع‌گرایانه در شرایط عدم قطعیت داده‌ها، فرض بر آن است که تمامی فرآیندهای کلان بر کل فعالیت‌های زیرمجموعه خود اثرگذار بوده و تمامی استراتژی‌های پاسخ نیز بر ساختار کلی فرآیندها سایه می‌اندازند؛ هرچند نرخ و شدت این اثرگذاری‌ها در بدنه ماتریس‌های محاسباتی به صورت متمایز و متغیر لحاظ شده است.

جدول ۸: مشخصات مسائل حل شده

Table 8: Specifications of solved problems

ACCEPTED MANUSCRIPT

مسئله	تعداد فعالیت های هر فرایند	تعداد فرایندها	تعداد استراتژی پاسخ
۱	۸	۳	۴
۲	۱۲	۴	۵
۳	۱۵	۵	۷
۴	۲۰	۵	۸
۵	۲۵	۶	۹
۶	۳۰	۸	۱۲
۷	۳۵	۱۰	۱۵
۸	۴۰	۱۲	۲۰
۹	۴۵	۱۵	۲۵
۱۰	۵۰	۲۰	۳۰

از تابع توزیع یکنواخت برای تولید اعداد تصادفی استفاده می کنیم.

۴-۱- تنظیم پارامتر و استخراج جواب درالگوریتم NSGA-II

تنظیم دقیق پارامترهای کنترل‌کننده در الگوریتم‌های فراابتکاری، نقشی حیاتی در ایجاد تعادل میان فرآیندهای کاوش (Exploration) و بهره‌برداری (Exploitation) و نیز تضمین تکرارپذیری محاسباتی دارد. در این پژوهش، پارامترهای الگوریتم NSGA-II منطبق بر چارچوب کالیبراسیون تجربی (بخش ۳-۶) و با تکیه بر تحلیل‌های همگرایی تجربی بر روی ساختار ۱۷ فعالیت اداری مسئله تعیین شده‌اند. بر این اساس، اندازه جمعیت اولیه (N_{pop}) معادل ۱۰۰ فرد انتخاب شد تا پوشش مناسبی در فضای پاسخ برقرار گردد. نرخ تقاطع (P_c) معادل 0/8 و نرخ جهش (P_m) معادل 0/15 لحاظ گردید تا پتانسیل همگرایی الگوریتم بدون افت تنوع ژنتیکی حفظ شود. همچنین تعداد تکرارها ($MaxIt$) بر روی ۲۰۰ تکرار تثبیت گردید که در این نقطه، پایداری نسبی بالا در جبهه پارتو و عدم انحراف توابع هدف احراز گردید. پارامترهای کالیبره‌شده الگوریتم NSGA-II که در کلیه محاسبات و ارزیابی‌های مقاله مبنای اجرا بوده‌اند، در جداول ۹ و ۱۰ خلاصه شده‌اند.

جدول ۹: پارامترهای الگوریتم NSGA-II

Table 9: NSGA-II algorithm parameters

نرخ جهش	نرخ تقاطع	جمعیت اولیه	تعداد تکرار
۰/۵	۰/۸	۱۰۰	۱۵۰

جدول ۱۰: جواب های الگوریتم NSGA-II

Table 10: Solutions of the NSGA-II algorithm

متغیر / معیار	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴
زمان	۱۷/۶۲	۳۳/۷۲	۵۷/۶۶	۷۴/۷۱
کیفیت	۱۲۸/۱۱	۲۴۷/۵	۴۱۴/۵۷	۵۷۷/۹
هزینه	۳۳۴۴	۷۰۰۳	۱۱۰۶۹	۱۵۱۵۳
زمان محاسبات	۱۱/۵۸	۱۹/۳	۲۸/۴	۳۵/۳۸
خطای لایه ۱	۲۱/۱	۲۹/۲	۴۳/۱	۴۷/۴
خطای لایه ۲	۲۵/۳	۳۴/۳	۵۰/۷	۵۳/۲
خطای لایه ۳	۲۸/۶	۳۵/۱	۵۳/۲	۵۴/۷

در ادامه جدول ۱۱ پارامترهایMID، NOP، Time، Spacing، Diversity در روش NSGA-II ارائه می گردد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۱: پارامترهایDiversity، Spacing، Time، NOP، MID

Table 11: MID, NOP, Time, Spacing, and Diversity parameters

مسئله	معیار فاصله از جواب ایده‌آل (MID)	معیار تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NOP)	معیار زمان حل مسئله (Time)	معیار فاصله‌گذاری (Spacing)	معیار تنوع پاسخ‌ها (Diversity)
۱	۴۵۱۱/۸۵	۱۲	۱۱/۵۸	۰/۹۸۴	۵۲/۸۸
۲	۱۱۳۳۹/۳۵	۵۰	۱۹/۳	۰/۵۶	۲۳۷/۴
۳	۱۹۴۳۵/۸	۶۸	۲۸/۴	۰/۵۵۸	۳۶۸/۸۱
۴	۲۸۰۰۲/۷	۶۰	۳۴/۵۸	۰/۵	۳۴۹/۷۴
۵	۴۵۶۹۴/۴	۴۴	۵۰/۶۷	۰/۶۶	۳۷۴/۲۸
۶	۹۶۹۲۵/۹	۸۵	۸۷/۰۵	۰/۶۲	۷۰۰/۶۱
۷	۱۶۲۵۵۹/۵	۸۶	۱۳۷/۸۷	۰/۵۵۸	۷۹۳/۹۶
۸	۲۶۹۶۳۵	۴۳	۲۱۸/۱۹	۰/۵۵۵	۵۶۲/۴
۹	۴۵۲۴۵۲/۶۴	۱۳۴	۳۶۵/۴۵	۰/۵۵۷	۱۵۶۹/۸۶
۱۰	۸۴۶۹۰۰/۱	۱۸۲	۶۲۷/۵۶	۰/۴۹۶	۲۰۸۸/۲

همان‌طور که نتایج محاسباتی جدول ۱۲ نشان می‌دهد، زمان حل مسئله با استفاده از روش دقیق محدودیت اپسیلون (-ϵ constraint) هم‌زمان با بزرگ شدن ابعاد مسائل نمونه، به صورت نمایی (Exponential) افزایش می‌یابد؛ به طوری که این روند در چهار مسئله ارزیابی‌شده به وضوح قابل مشاهده است. با ارتقای جزئی در ابعاد متغیرها و پیچیدگی ماتریس‌های ورودی، زمان دستیابی به پاسخ دقیق توسط این روش دچار انفجار محاسباتی شده و به شدت تخصیص منابع سیستم را به چالش می‌کشد. این رفتار ساختاری نشان می دهد که در ابعاد متوسط و بزرگ، بهره‌گیری از رویکردهای حل دقیق به دلیل محدودیت‌های زمانی و محاسباتی عملاً غیرممکن خواهد بود. در طرف مقابل، زمان حل متناظر در الگوریتم فراابتکاری NSGA-II در تمامی سطوح به مراتب کمتر و دارای پایداری تجربی نسبتاً بالا و منطقی قرار دارد، که این امر کارایی و ضرورت بکارگیری الگوریتم چندهدفه پیشنهادی را برای فرآیندهای اداری دنیای واقعی تایید می‌کند.

جدول ۱۲: زمان حل با نرم افزار لینگو و متلب و محاسبه خطای الگوریتم

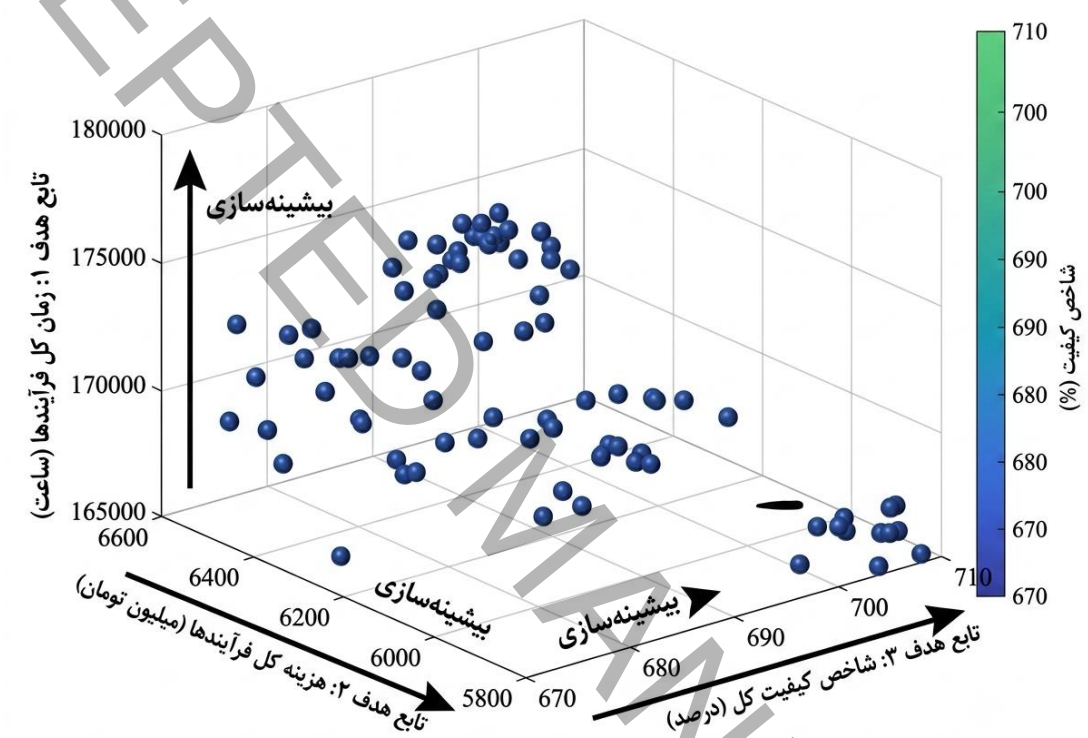
Table 12: Computation time in LINGO and MATLAB and algorithm error calculation

مسئله	روش محدودیت اپسیلون		الگوریتم NSGA−II		شاخص خطای RG	
نسخه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه
۱	۲۳/۴۷	۴۶۸۲	۲۳/۴۷	۴۶۸۲	۰	۰
۲	۴۸/۳	۱۰۸۰۲	۴۸/۰۶	۱۰۸۰۲	۰/۵	۰
۳	۱۰۳/۸۵	۲۳۳۱۹	۱۰۲/۵	۲۳۱۱۰	۱/۳	۰/۹
۴	۱۴۷/۳۹	۳۵۸۷۸	۱۴۴/۳	۳۵۱۹۷	۲/۱	۱/۹
۵	۲۹۴/۳۲۵	۴۷۵۲۵	۲۱۳/۲۴	۴۲۱۲۳	۰	۱/۳۶
۶	۳۵۳/۱۲۴	۸۹۷۶۵	۷۵۶/۱۰۲	۴۶۲۳۴	۳/۴	۳/۵۴
۷	۴۱۷/۲۶۵	۱۰۱۴۵۴	۱۴۴۲/۵۰	۷۳۱۵۲	۳/۸	۳/۳۳
۸	۹۲۳/۶۴۴	۱۳۴۵۶۷	۲۰۳۴/۲۴	۷۴۱۰۲	۴/۶	۴/۰۶
current	۱۵۴۷	۱۹۸۷۶۸	۷۰۱۱/۰۱	۷۳۷۰۷	۵/۴	۳/۲۵
۱۰	۳۰۲۴/۴	۲۳۲۴۵۵	۱۱۳۰۲/۰۵	۸۹۷۸۶	۶/۳	۴/۲۳

در ارزیابی عملکرد الگوریتم چندهدفه NSGA-II، تحلیل شاخص‌های کیفیتِ جبهه پارتو بر اساس اصول متدولوژیک زیر صورت می‌پذیرد؛ برای دو شاخص تعداد جواب‌های غیرمغلوب (NOP) و معیار تنوع پاسخ‌ها (Diversity)، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده پتانسیل بالای الگوریتم در کاوش فضای مسئله و استخراج فرآیندهای متنوع بوده و مطلوب‌تر است. در مقابل، برای شاخص فاصله‌گذاری (Spacing) که یکنواختی توزیع پاسخ‌ها را می‌سنجد، و همچنین شاخص زمان حل مسئله (Time)، مقادیر کمتر

ACCEPTED MANUSCRIPT

از مطلوبیت بالاتری برخوردارند. افزون بر این، در خصوص معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (MID)، با توجه به ساختار توابع هدف مسئله، بهینه‌سازی به گونه‌ای هدایت شده است که کمترین انحراف خطی از نقطه مرزی ایده آل حاصل شود تا کیفیت پاسخ‌های استخراج‌شده تضمین گردد.در ادامه، جبهه پارتوی سه‌بعدی حاصل از اجرای الگوریتم برای یک مسئله نمونه با ابعاد مشخص (شامل ۱۲ فعالیت، ۵ استراتژی پاسخ و ۴ فرآیند کلان) در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودار پارتو مشاهده می‌شود، فضای پاسخ‌های غیرمغلوب موازنه دقیقی را میان اهداف سه‌گانه برقرار ساخته است؛ به طوری که دامنه تغییرات تابع هدف اول (شاخص زمان) در بازه ۶۷۰ تا ۷۱۰ ساعت، تابع هدف دوم (شاخص هزینه) در محدوده ۵۸۰۰ تا ۶۶۰۰ میلیون ریال، و تابع هدف سوم (شاخص کیفیت) در بازه ۱۶۵۰۰۰ تا ۱۷۵۰۰۰ واحدِ کارایی کالیبره شده است. این توزیع متوازن، ظرفیت بالای الگوریتم پیشنهادی را در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره مدیریت ساخت نشان می دهد.



جبهه پارتوی سه‌بعدی حاصل از الگوریتم NSGA-II در موازنه توابع هدف زمان کل فرآیندها (ساعت)، هزینه کل فرآیندها (میلیون تومان) و شاخص کیفیت کل (درصد)، به همراه نمایش جهت مطلوب بیشینه‌سازی

شکل۲: جبهه پارتوی سه بعدی با ۱۲ فعالیت ۵ استراتژی پاسخ و ۴ فرایند

Figure 2: Three-Dimensional Pareto Front with 12 activities, 5 response strategies, and 4 processes

«با توجه به ماهیت تصادفی و احتمالات متغیر در مکانیزم‌های جستجوی الگوریتم‌های تکاملی، اتکا به یک‌بار خروجی مدل نمی تواند پایایی و تکرارپذیری نتایج را تضمین نماید. بدین منظور و جهت ارزیابی میزان پایداری (Robustness) الگوریتم چندهدفه NSGA-II در حل مسئله بهینه‌سازی ۱۷ فعالیت اداری، مدل به تعداد ۳۰ مرتبه اجرای مستقل (Independent Runs) پیاده‌سازی گردید. در این روند، جهت تضمین استقلال واقعی اجراها، تولید اعداد تصادفی در هر اجرا بر پایه بذرهای تصادفی متفاوت (تولیدشده بر اساس مولد Mersenne Twister و مقداردهی اولیه متغیر با تیک‌های زمانی سیستم) صورت گرفته است، در حالی که پارامترهای ساختاری الگوریتم (شامل اندازه جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش) در تمامی اجراها یکسان و ثابت نگاه داشته شده‌اند. جدول ۱۳ شاخص‌های آمار توصیفی حاصل از این ۳۰ اجرای مستقل را برای توابع هدف زمان کل، هزینه کل و شاخص کیفیت فرآیندها نشان می‌دهد.»

جدول ۱۳: تحلیل آمار توصیفی و ارزیابی پایداری الگوریتم NSGA-II در ۳۰ اجرای مستقل

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table 13: Descriptive statistical analysis and stability evaluation of the NSGA-II algorithm across 30 independent runs

تابع هدف مدل ریاضی	تعداد اجرا	بهترین پاسخ (Best)	بدترین پاسخ (Worst)	میانگین محاسباتی (Mean)	انحراف معیار (Std. Dev)	وضعیت پایداری مدل
تابع اول: زمان کل (ساعت)	۳۰	۱۱۴/۵	۱۱۸/۲	۱۱۵/۸	۰/۹۴	بسیار بالا (پایدار)
تابع دوم: هزینه کل (میلیون تومان)	۳۰	۴۲/۱	۴۴٫۸	۴۳/۲	۰/۷۲	بسیار بالا (پایدار)
تابع سوم: شاخص کیفیت کل (درصد)	۳۰	۸۹/۵%	۸۶/۱%	۸۸/۲%	۰/۸۵%	بسیار بالا (پایدار)

۴-۲- اعتبار سنجی الگوریتم های حل مدل

در انتها برای بررسی اعتبار سنجی مدل ارائه شده و نتیجه گیری علمی، از روش و آزمونهای فرض استفاده شده است. جدول ۱۴ ویژگیهای آماری مربوط به پنج معیار مورد نظر را برای الگوریتم محدودیت اپسیلون و NSGA-II نمایش می دهد.

جدول ۱۴: مشخصه های آماری مربوط به پنج معیار مورد بررسی برای الگوریتم

Table 14: Statistical characteristics of the five evaluated metrics for the algorithm

شاخص ارزیابی	الگوریتم / روش حل	تعداد (N)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Dev .Std)	خطای معیار میانگین (Error .Std)
MID	NSGA-II	۱۰	۱۹۴۴۴۵/۰۲۴	۲۷۰۴۱۳/۰۶۴	۸۵۵۱۲/۱۱۹
	ϵ-constraint	۱۰	۷۵۵۲۷۹/۳۴۳	۱۰۲۲۶۳۷/۴۹۵	۳۲۳۳۸۶/۳۷۱
NOP	NSGA-II	۱۰	۷۶/۴	۴۹/۴۲۴	۱۵/۶۲۹
	ϵ-constraint	۱۰	۸/۴	۷/۰۱۱	۲/۲۱۷
Time	NSGA-II	۱۰	۱۵۸/۱۶۵	۱۹۹/۰۴۳	۶۲/۹۴۳
	ϵ-constraint	۱۰	۲۰۹/۲۸۷	۲۷۹/۶۹۶	۸۸/۴۴۸
Spacing	NSGA-II	۱۰	۰/۶۲۸	۰/۱۴۸	۰/۰۴۷
	ϵ-constraint	۱۰	۰/۸۸۳	۰/۳۰۸	۰/۰۹۷
Diversity	NSGA-II	۱۰	۷۰۹/۸۱۴	۶۳۹/۵۹۹	۲۰۲/۲۵۹
	ϵ-constraint	۱۰	۲۸۰/۸۰۹	۴۲۸/۲۷۲	۱۳۵/۴۳۲

بر اساس یافته‌های استخراج‌شده از تحلیل توصیفی آزمون فرضیات، عملکرد الگوریتم محاسباتی در شاخص‌های زمان حل مسئله (Time) و معیار تنوع پاسخ‌ها (Diversity)، تفاوت ساختاری معناداری را میان دو رویکرد حل نشان نمی‌دهد. با این وجود، در بررسی معیار میانگین فاصله از جواب ایده‌آل (MID)، الگوریتم چندهدفه NSGA-II عملکرد متمایز و بهتری را ثبت کرده است؛ چرا که دستیابی به میانگین فاصله‌ای به مراتب کمتر نسبت به روش دقیق محدودیت اپسیلون (ϵ-constraint)، نشان‌دهنده توانایی بالای این الگوریتم در همگرایی به سمت مرزهای بهینه پارتو است، هرچند این برتری در آزمون‌های معناداری آمار استنباطی به طور مطلق قطعی تلقی نمی‌شود. از سوی دیگر، در شاخص‌های فاصله‌گذاری (Spacing) و تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت‌شده (NOP)، عملکرد الگوریتم‌ها دارای اختلاف ساختاری و معناداری است. در این معیارها، الگوریتم NSGA-II به واسطه توزیع یکنواخت‌تر و استخراج حجم بالاتری از پاسخ‌های کارآمد پارتو، برتری محسوسی دارد. از این رو، برآیند تحلیل‌های آماری توصیفی نشان می دهد که الگوریتم چندهدفه پیشنهادی در حل ابعاد مختلف مسئله، از کارایی، پایایی تجربی و اثربخشی بالاتری نسبت به روش دقیق محدودیت اپسیلون برخوردار است.

۵- نتایج و یافته ها

در این پژوهش، با تلفیق ارگانیک دانش مدیریت پروژه و تجربیات پنل خبرگان، راهکارهای پیاده‌سازی سیستم‌های الکترونیک در فرآیندهای ساخت با هدف موازنه بهینه زمان، هزینه و کیفیت تبیین گردید. پس از آن، به منظور کنترل اثرگذاری مکانیزم‌های پاسخ بر فرآیندها، مدل ریاضی ویژه‌ای توسعه یافت تا میزان اثربخشی این رویکردها در بهبود شاخص‌های کلان پروژه در

ACCEPTED MANUSCRIPT

کوتاه‌مدت سنجیده شود. در این راستا، کل زمان‌های صرف‌شده در هفده فرآیند مدیریتی حاکم بر پروژه برای کل دوره توافق‌نامه کارگاهی که در قرارداد برابر ۲ سال (معادل ۲۴ ماه) قید شده است، محاسبه گردید. مکانیزم محاسبه زمان تجمعی به این صورت است که ابتدا زمان مورد نیاز برای یک بار اجرای هر فرآیند، در تواتر تکرار ماهانه آن فرآیند ضرب شده و حاصل در عدد ۲۴ (تعداد ماه‌های کل پروژه) ضرب می‌گردد تا زمان کل سالانه برای تک‌تک فرآیندها استخراج شود. با جمع‌پذیری زمان‌های صرف‌شده در تمامی این ۱۷ فرآیند کلان (که خود ساختاری متشکل از چندین فعالیت زیرمجموعه دارند)، زمان تجمعی کل فرآیندها حاصل می‌شود. شایان ذکر است که این فرآیندها به صورت موازی و هم‌زمان با عملیات اجرایی کارگاه پیش می‌روند؛ بنابراین، شاخص عددی استخراج‌شده در این بخش نشان‌دهنده زمان کل پیشرفت فیزیکی پروژه نبوده، بلکه صرفاً بازتاب‌دهنده ظرفیت زمانیِ مورد نیاز برای پیشبرد فرآیندهای مدیریتی و بوروکراتیک پروژه است.در گام بعد، زمان‌های صرف‌شده در فرآیندهای جایگزینِ مبتنی بر مدیریت مجازی، مشابه با الگوهای سنتی محاسبه گردید. در این بخش نیز برای استخراج زمان کل مورد نیاز در طول چرخه حیات پروژه، زمان یک‌بار اجرای فرآیند مجازی در تواتر تکرار ماهانه و سپس در عدد ۲۴ ضرب شد تا با جمع‌بندی آن‌ها در تمامی ۱۷ حوزه، زمان تجمعی مجازی کل حاصل شود. نتایج تقابلی این محاسبات زمانی به منظور ارزیابی دقیق‌تر در جدول ۱۵ و ۱۶ منعکس شده است که میزان انحراف و اختلاف زمان‌های صرف‌شده در سیستم‌های سنتی و مجازی را به تصویر می‌کشد. بر اساس یافته‌های مندرج در جدول ۱۵، مجموع زمان صرف‌شده تجمعی در فرآیندهای مدیریت سنتی معادل ۳۹۳۴۵۱۷ ساعت محاسبه شده است، در حالی که این شاخص با پیاده‌سازی مدیریت مجازی به ۱۲/۲۲ درصدِ مقدار مبنای سنتی تقلیل می‌یابد. به بیانی دیگر، بکارگیری ساختار مدیریت مجازی منجر به فشرده‌سازی و کاهش چشمگیر ۸۷/۷۸ درصدی در زمان اجرای فعالیت‌ها و فرآیندهای بوروکراتیک سیستم می‌گردد. به زبان ساده، سیستم الکترونیک قادر است تا ۸۷/۷۸ درصد از اتلاف زمان در فرآیندهای مدیریتی پروژه‌هایی با ابعاد پژوهش حاضر را مهار کند؛ هرچند همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این صرفه‌جویی زمان صرفاً معطوف به لایه بوروکراسی مدیریت ساخت بوده و شامل فرآیندهای فیزیکی و اجرایی کارگاه نمی‌شود.افزون بر این، تحلیل داده‌های مالی نشان می‌دهد که هزینه تجمعی فرآیندهای سنتی معادل ۱۹۳۴۲۲۲۶۵۲ ریال برآورد شده، در حالی که هزینه تجمعی همین فرآیندها در بستر بومی‌سازی شده مدیریت مجازی به ۲۷۳۵۱۰۰۰۰ ریال کاهش یافته است؛ این خروجی عددی نشان می دهد که هزینه مدیریت مجازی تنها معادل ۱۴/۱۴ درصد از هزینه‌های تحمیلی در رویکرد سنتی بوده و پتانسیل بالایی در بهینه‌سازی منابع مالی پروژه دارد.

جدول ۱۵: محاسبه و مقایسه زمان های صرف شده در مدیریت سنتی و مجازی

Table 15: Calculation and comparison of time spent in traditional and virtual management

ردیف	عنوان فعالیت‌های فرآیند	تعداد دفعات تکرار در هر ماه	مدیریت سنتی: زمان برای هر بار	مدیریت سنتی: زمان در کل پروژه	مدیریت مجازی: زمان برای هر بار	مدیریت مجازی: زمان در کل پروژه
۱	تهیه برنامه زمان‌بندی پروژه	۵۲	۴۲/۱	۱۷۶۸۰۰	۵۰/۰	۶۲۴۰۰
۲	تنظیم و ارائه گزارش‌های روزانه	۲	۶۵/۵۰۰	۳۱۴۴۰۰	۳۰/۹۲۰	۱۴۸۴۰۰
۳	تنظیم و ارائه گزارش‌های هفتگی	۵۲	۳۳/۱	۱۶۶۴۰۰	۵۸/۰	۷۲۸۰۰
۴	تنظیم و ارائه گزارش‌های ماهانه	۰	۲۹۲/۵۰۰	۲۹۲۵۰	۲۱/۶۰۰	۲۱۶۰۰
۵	بررسی تأخیرات پروژه و تهیه برنامه زمان‌بندی جبرانی	۱	۵۳/۶۷۰	۱۲۸۸۰۰	۵/۵۰۰	۱۳۲۰۰
۶	تنظیم صورتجلسات کارکرد	۱	۷۵۸/۳۳۰	۷۳۳۳۳	۰	۰
۷	تنظیم صورت وضعیت‌های کارکرد	۱	۵۶/۱۷۰	۱۳۴۸۰۰	۳/۶۷۰	۸۸۰۰
۸	تنظیم صورت وضعیت‌های تعدیل	۰	۱۰۹	۸۷۲۰۰	۱۹	۱۵۲۰۰

ACCEPTED MANUSCRIPT

۹	تهیه دستور کارهای اجرایی	۱	۳۲/۳۳۰	۷۷۶۰۰	۹/۵	۲۲۸۰۰
۱۰	تهیه و تنظیم اجازه کارهای مورد نیاز در مراحل مختلف کاری	۰	۸/۳۳۰	۴۰۰۰	۸/۵	۴۰۸۰
۱۱	تهیه نقشه‌های چون-ساخت	۵	۵۰/۶	۷۸۰۰۰	۶/۷۵۰	۸۱۰۰۰
۱۲	انجام مکاتبات و مراودات اداری	۱۰	۹۳۰/۱	۴۶۰۰۰	۲۵۰/۱	۳۰۰۰۰
۱۳	واحد انبارداری پروژه	۹	۵۲/۶۲۰	۱۱۴۳۰۰۰	۰	۰
۱۴	خرید	۱	۹۳/۶۷۰	۱۴۹۸۶۷	۰۸/۰	۱/۳۳۰
۱۵	انبارگردانی	۱	۴۷۹/۶۷۰	۱۱۵۱۲۰۰	۰	۰
۱۶	واحد حسابداری پروژه	۱	۱۶/۱۷۰	۲۵۸۶۷	۰	۰
۱۷	حسابداری حقوق، مزایا و بیمه کارکنان و کارگران	۳	۲۳/۵۰۰	۱۶۹۲۰۰	۰	۰
	جمع کل			۳۹۳۴۵۱۷		۴۸۰۷۱۰/۳

جدول ۱۶: محاسبه و مقایسه هزینه های صرف شده در مدیریت مجازی و سنتی با هدف کاهش هزینه های مدیریتی پروژه

Table 16: Calculation and comparison of costs incurred in virtual and traditional management aimed at reducing project management costs

ردیف	عنوان فعالیت‌های فرآیند	تعداد دفعات تکرار در هر ماه	مدیریت سنتی: هزینه برای هر بار	مدیریت سنتی: هزینه در کل پروژه	مدیریت مجازی: هزینه برای هر بار	مدیریت مجازی: هزینه در کل پروژه
۱	تهیه برنامه زمان‌بندی پروژه	۵۲	۷۸/۱۲۶	۹۷۵۰۰۰۰۰	۷۳/۷۴۹	۵۴۶۰۰۰۰۰
۲	تنظیم و ارائه گزارش‌های روزانه	۲	۱/۵۷۵/۰۰۰	۷۵۶۰۰۰۰۰	۸۶۸/۷۴۹	۴۱۷۰۰۰۰۰
۳	تنظیم و ارائه گزارش‌های هفتگی	۵۲	۶۲/۱۰۳	۷۷۵۰۴۷۰۰	۷۱/۸۷۴	۸۹۷۰۰۰۰۰
۴	تنظیم و ارائه گزارش‌های ماهانه	۰	۶۰/۲۵۶/۸۵۱	۶۰۲۵۶۸۵۱	۵۳/۱۰۰/۰۰۰	۵۳۱۰۰۰۰۰
۵	بررسی تأخیرات پروژه و تهیه برنامه زمان‌بندی جبرانی	۱	۱۰/۴۶۳/۷۰۰	۲۵۱۱۲۸۸۰۰	۳۳۲/۸۱۴	۷۹۸۷۵۰۰
۶	تنظیم صورتجلسات کارکرد	۱	۲۷/۱۸۹/۵۰۱	۴۳۵۰۳۲۰۰۱	۰	۰
۷	تنظیم صورت وضعیت‌های کارکرد	۱	۶/۲۴۹	۱۵۰۰۰۰	۲۳/۴۳۹	۵۶۲۵۰۰
۸	تنظیم صورت وضعیت‌های تعدیل	۰	۱/۶۷۱/۰۰۰	۱۳۳۶۸۰۰۰	۱/۰۶۸/۷۵۰	۸۵۵۰۰۰۰
۹	تهیه دستور کارهای اجرایی	۱	۹۱۲/۵۰۱	۲۱۹۰۰۰۰۰	۲۸۱/۲۵۰	۶۷۵۰۰۰۰
۱۰	تهیه و تنظیم اجازه کارهای مورد نیاز در مراحل مختلف کاری	۰	۱۲/۵۰۱	۶۰۰۰۰۰	۸۲/۱۲۵	۱۳۵۰۰۰
۱۱	تهیه نقشه‌های چون-ساخت	۵	۹۳/۷۵۰	۱۱۲۵۰۰۰۰	۵۶/۲۵۰	۶۷۵۰۰۰۰
۱۲	انجام مکاتبات و مراودات اداری	۱۰	۱۵/۶۲۴	۳۷۵۰۰۰۰	۱۴/۰۶۴	۳۳۷۵۰۰۰
۱۳	واحد انبارداری پروژه	۹	۱/۷۵۳/۰۷۴	۳۷۸۶۶۴۲۰۰	۰	۰
۱۴	خرید	۱	۱۰/۱۰۸/۵۲۴	۱۶۱۷۳۶۳۹۹	۰	۰
۱۵	انبارگردانی	۱	۲/۰۰۶/۴۹۹	۵۵۲۵۶۰۰۰	۰	۰
۱۶	واحد حسابداری پروژه	۱	۳/۶۰۸/۹۸۵	۵۷۷۴۳۷۵۱	۰	۰
۱۷	حسابداری حقوق، مزایا و بیمه کارکنان و کارگران	۳	۱/۷۸۶/۶۹۵	۱۲۸۶۴۱۹۵۰	۰	۰
	جمع کل (ریال)			۱۹۳۴۲۲۲۶۵۲		۲۷۳۵۱۰۰۰۰

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- بحث و بررسی

نتایج حاصل از جبهه پارتوی سه‌بعدی مدل محاسباتی، صرفاً یک دستاورد انتزاعی ریاضی نیست، بلکه ابزاری راهبردی و کاربردی برای بهینه‌سازی زنجیره تصمیم‌گیری در بخش اداری و پشتیبانی پروژه‌های ساخت به شمار می‌رود. تحلیل عمیق این جبهه پارتو نشان می‌دهد که در مدیریت ۱۷ فعالیت اداری مورد مطالعه (شامل فرآیندهای پیچیده اخذ تاییدیه نقشه‌ها، بروکراسی های کارفرمایی، جریان‌های مالی و مستندسازی کارگاهی)، هر نقطه بهینه روی نمودار، یک سناریوی عملیاتیِ مشخص را پیش روی مدیران پروژه قرار می‌دهد؛ به طوری که فشرده‌سازی زمان کل فرآیندها به مقدار بهینه خود یعنی ۴۸۰۷۱۰/۳ ساعت، نیازمند تخصیص منابع فشرده‌تر و موازی‌سازی موافقت‌نامه‌ها است که هزینه کل را به صورت غیرخطی تا سقف ۲۷۳۵۱۰۰۰۰ ریال (معادل ۲۷/۳۵۱ میلیون تومان) افزایش می‌دهد، اما مدل نشان می دهد که شتاب‌دهی به بروکراسی‌های کارگاهی دارای یک مرز اقتصادی مشخص است و فراتر از آن، نرخ بازگشت سرمایه پروژه به شدت آسیب می‌بینـد.از سوی دیگر، رفتار تابع هدف کیفیت روشن می‌سازد که بالاترین سطح کارایی کیفی (۸۹/۵ درصد) لزوماً در گران‌ترین یا طولانی‌ترین سناریو محقق نمی‌شود، بلکه الگوریتم با بازآرایی روابط پیش‌نیازی و حذف فرآیندهای موازیِ فاقد ارزش افزوده، راه‌حل‌های بهینه‌ای را در جبهه پارتو استخراج کرده است که حتی در کم‌هزینه‌ترین سناریوها نیز سطح کیفیت اداری از مرز پایداری ۸۶/۱ درصد افت نخواهد کرد. در نهایت، این دستاورد با تبدیل مدیریت شهودی و سنتی کارگاه به یک سیستم داده‌محور و پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS)، این انعطاف را به مدیران ساخت می‌دهد تا در فازهای بحرانی پروژه، با جابه‌جایی آگاهانه در طول زنجیره پاسخ‌های پارتو، موازنه بهینه‌ای را میان الزامات زمانی و محدودیت‌های شدید نقدینگی برقرار سازند.

۶-۱- دستاوردهای کاربردی پژوهش

این پژوهش یک مدل تصمیم‌یار (Decision Support Model) مبتنی بر فرمول‌بندی ریاضی چندهدفه را توسعه داده است. مدل تصمیم‌یار با تلفیق الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II و ارزیابی بوروکراسی اداری پروژه‌های ساخت، به عنوان یک ابزار پشتیبان به مدیران پروژه و برنامه‌ریزان این امکان را می‌دهد تا پیش از تخصیص منابع و آغاز فرآیندها، سناریوهای مختلف موازنه زمان، هزینه و کیفیت را ارزیابی کنند. مدل توسعه‌یافته با ارائه جبهه پارتوی بهینه، نقش یک سیستم هدایت‌گر کمی را ایفا می‌کند که فرآیند تصمیم‌گیری مدیران را در گذار به مدیریت الکترونیک پروژه‌ها تسهیل و ساختاردهی می‌نماید.

در مقایسه با پژوهش‌های گذشته که غالباً دیجیتالی‌سازی و اتوماسیون را به صورت کیفی، توصیفی یا در قالب سیستم‌های صلب و بدون مکانیزم بهینه‌سازی بررسی کرده‌اند [۱۹-۱۷]، کاربرد اصلی متمایز این مطالعه در ارائه یک ابزار پویای ریاضی مبتنی بر جبهه پارتو است. در حالی که مطالعات اخیر بین‌المللی نظیر رویکردهای ادغام‌شده تحول دیجیتال و الگوریتم‌های تکاملی یا مدل‌های بهینه‌سازی خطی در بسترهای دیجیتال بیشتر بر ابعاد کلان سازمانی یا زمان‌بندی کارگاهی تمرکز داشته‌اند [۲۲-۲۰]، و با وجود اینکه مرور سیستماتیک ادبیات این حوزه نشان‌دهنده کمبود ابزارهای بهینه‌سازی چندهدفه پویا در مدیریت فرآیندهاست؛ مدل توسعه‌یافته در این پژوهش برخلاف پلتفرم‌های رایج اتوماسیون اداری، قادر است موازنه میان اهداف متناقض (کاهش زمان و هزینه در عین حفظ کیفیت) را دقیقاً در لایه بوروکراسی پشتیبانی پروژه کمی‌سازی کند و به جای یک پاسخ تک‌بعدی، گزینه‌های متعددی را متناسب با شرایط نقدینگی و زمان‌بندی کارگاه در اختیار لایه تصمیم‌گیر قرار دهد.

علیرغم دستاوردهای عددی و پتانسیل بالای مدل تصمیم‌یار توسعه‌یافته، بهره‌برداری عملیاتی و تعمیم داده‌های این مطالعه با محدودیت‌های متدولوژیکی و اجرایی همراه است. نخست، الگوریتم حاضر منحصراً بر پایه ۱۷ فعالیت اداری-پشتیبانی در یک مطالعه موردی ابنیه شهری (مجتمع تجاری-اداری) پیاده‌سازی شده و سنجش پایداری آن در سایر پروژه‌های عمرانی (مانند زیرساخت‌های خطی، صنعتی یا ساختارهای تجاری متفاوت) نیازمند کالیبراسیون مجدد است. دوم، اتکای پارامترهای پایه‌ای به داده‌های تاریخی و آراء خبرگان، احتمال انحراف و خطای برآورد زمان و هزینه را به دلیل نوسانات اقتصادی و چالش‌های کارگاهی افزایش می‌دهد. سوم، این پژوهش صرفاً یک چارچوب محاسباتی تصمیم‌یار (DSS) مبتنی بر الگوریتم NSGA-II را ارائه داده و پیاده‌سازی برخط و نرم‌افزاری آن در یک محیط واقعی صنعتی اجرا نگردیده است. همچنین، شاخص کیفیت در تابع هدف

ACCEPTED MANUSCRIPT

به‌صورت فرمول‌بندی کیفی-ریاضی لحاظ شده و فاقد سنجش میدانی و ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم کارگاهی است. در نهایت، موانع اجرایی مانند مقاومت بدنه سنتی سازمان‌ها در برابر فناوری‌های دیجیتال، نگرانی‌های امنیت داده و نیاز به آموزش پرسنل از دیگر چالش‌های بکارگیری عملیاتی این مدل محسوب می‌شوند.

۷- نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی، موازنه و بهینه‌سازی هم‌زمان سه شاخص زمان، هزینه و کیفیت در لایه فرآیندهای اداری و پشتیبانی پروژه‌های عمرانی از طریق پیاده‌سازی بستر مدیریت مجازی و الکترونیک است. این مطالعه با هدف پوشش خلاء علمی موجود در نادیده گرفتن بوروکراسی اداری و تمرکز صرف بر فعالیت‌های فیزیکی کارگاه انجام شده است. در این پژوهش، با بررسی میدانی و نظرسنجی از پنل خبرگان در یک مطالعه موردی واقعی مجتمع تجاری-اداری، ۱۷ فرآیند کلانی اداری و پشتیبانی شناسایی و بومی‌سازی شد. سپس روابط شبکه و پیش‌نیازی فرآیندها با تکنیک ANP فازی استخراج گردید. در ادامه، مدل ریاضی چندهدفه مسئله بر پایه الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II کدنویسی و حل شد و کارایی الگوریتم از طریق مقایسه با روش حل دقیق محدودیت اپسیلون (ϵ-constraint) اعتبارسنجی گردید. بر اساس خروجی‌های محاسباتی حاصل از تحلیل مطالعه موردی، مجموع زمان تجمعی صرف شده در فرآیندهای اداری مدیریت سنتی معادل ۳،۹۳۴،۵۱۷ ساعت محاسبه شد، در حالی که این میزان با پیاده‌سازی مدیریت مجازی به ۴۸۰،۷۱۰/۳ ساعت تقلیل یافت که نشان‌دهنده فشرده‌سازی و کاهش ۸۷/۷۸ درصدی در زمان اجرای فرآیندهای بوروکراتیک و پشتیبانی است. همچنین هزینه تجمعی فرآیندهای اداری در سیستم سنتی از ۱،۹۳۴،۲۲۲،۶۵۲ ریال به ۲۷۳،۵۱۰،۰۰۰ ریال (معادل ۱۴/۱۴ درصد هزینه سنتی) در بستر مدیریت مجازی کاهش یافت که بیانگر پتانسیل کاهش ۸۵/۸۶ درصدی هزینه پشتیبانی اداری است. ارزیابی‌های آماری نیز نشان داد که الگوریتم NSGA-II با ثبت شاخص MID کمتر (۱۹۴،۴۴۵/۰۲) و NOP بالاتر (۷۶/۴) نسبت به روش دقیق، از توانایی و سرعت همگرایی بالاتری در استخراج جبهه پارتوی بهینه برخوردار است. با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نظیر تمرکز ارزیابی بر ۱۷ فرآیند اداری در یک پروژه ساختمانی شهری (ابنیه)، عدم پیاده‌سازی برخط (Online) نرم‌افزاری مدل در بستر کارگاه واقعی، و اتکای برخی پارامترهای پایه‌ای کیفیت به نظرات خبرگان و داده‌های تاریخی روبرو بوده است؛ از این‌رو برای تحقیقات آتی، توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه حاضر بر پایه ادغام فرآیندهای اداری با مدلسازی اطلاعات ساختمان و قراردادهای هوشمند بلاک‌چین، پیاده‌سازی و کالیبراسیون مدل ریاضی در سایر پروژه‌های عمرانی با بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری جدیدتر در مسائل اداری با مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌گردد.

منابع

[1] M.R. Ahmadi, E. Arianian, D. Maleki, Principles of Virtualization and Cloud Computing, Niaz-e-Danesh Publications, Tehran, (2015). In Persian.

[2] F. Nouri, M. Khorasani, M.J. Barzegar, Electronic human resource management, its applications and role in modern organizations, 4th National Conference on Applied Economics and Management, (2017). In Persian.

[3] M. Matsuda, T. Nishi, M. Hasegawa, S. Matsumoto, Virtualization of a supply chain from the manufacturing enterprise view using e-catalogues, Procedia CIRP, 81 (2019) 932–937.

[4] L. Ferreira, N. Lopes, P.S. Ávila, H. Castro, M.L.R. Varela, G.D. Putnik, R. Martinho, R. Rijo, I.M. Miranda, M.M. Cruz-Cunha, Virtual Enterprise integration management based on a Meta-enterprise–a PMBoK approach, Procedia Computer Science, 121 (2017) 1112–1118.

[5] K. El-Rayes, A. Kandil, Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction, Journal of Construction Engineering and Management, 131(4) (2005) 477–486.

[6] D.X. Zheng, S.T. Ng, M.M. Kumaraswamy, Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization, Journal of Construction Engineering and Management, 130(2) (2004) 168–176.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[7] K. Sharma, M.K. Trivedi, AHP and NSGA-II-based time–cost–quality trade-off optimization model for construction projects, Artificial Intelligence and Sustainable Computing: Proceedings of ICSISCET 2020, Springer Singapore, (2021) 45–63.
[8] C.H. Caldas, L. Soibelman, Automating hierarchical document classification for construction management information systems, Automation in Construction, 12(4) (2003) 395–406.
[9] B. Zhong, C. Gan, H. Luo, X. Xing, Ontology-based framework for building environmental monitoring and compliance checking under BIM environment, Building and Environment, 141 (2018) 127–142.
[10] A.S. Rasheed, L.O. Olorunoje, S. Suleiman, The impact of cloud-based construction management systems on project delivery in Nigeria, Journal of Geomatics and Environmental Research, 9(1) (2026) 52–63.
[11] Z. Salmanian Kouzehkonan, Virtual management, 1st Student Conference on Information Technology of Iran, (2019). In Persian.
[12] H. Sargazi, Electronic city management and the necessity of implementing electronic municipality plan, 3rd National Conference on Modern Studies in Management and Accounting in Iran, (2019). In Persian.
[13] M.M. Mohebali, Electronic management based on geographic information system in Iran, 3rd National Conference on New Approaches in Humanities, Challenges and Solutions, (2018). In Persian.
[14] S. Ahmadloo, S. Najafzadeh, Virtualization security in cloud computing environment based on virtual technology, Annual International Conference on New Horizons in Electrical, Computer and Mechanical Engineering, (2018). In Persian.
[15] S.A.M. Al-Shammari, Electronic human resource management (E-HRM): a systematic review of benefits, challenges, and future research directions, Journal of Human Resource and Sustainability Studies, 12 (2024) 1–23.
[16] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T.A.M.T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2) (2002) 182–197.
[17] Q.K. Jahanger, Digitalization of construction-phase information management by project owners: qualitative analysis of potential benefits and probable factors, Engineering, Construction and Architectural Management, 32(11) (2025) 7561–7586.
[18] K. Subramanya, S. Kermanshachi, A. Pamidimukkala, Digitizing material delivery and documentation in highway construction using e-ticketing technology: study based on qualitative semistructured interviews, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 28(2) (2023) 04023009.
[19] J. Suo, S. Waje, V.K. Gunturu, A. Patlolla, C. Martani, H.N. Dib, The rise of digitalization in constructions: State-of-the-art in the use of sensing technology for advanced building-assistance systems, Frontiers in Built Environment, 10 (2024) 1378699.
[20] T.N.M. Al-Fatla, J.A. Al-Somaydaii, I.Y. Zilberova, Enhancing organizational and technological structures in construction via a mixed framework validated through Delphi and NSGA-II, Mathematical Modelling of Engineering Problems, 12(10) (2025).
[21] H. Sadok, A. Bentaleb, M.E.H. El Maknouzi, E.M. AlQodsi, M. Lazaar, I.M. Jadalhaq, Integrating the digital twin into elastic cost optimization for legally defensible construction schedule management, Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 18(4) (2026) 04526040.
[22] Y. Gao, M.F. Antwi-Afari, Y. Huang, Z.S. Chen, B. Manzoor, Artificial intelligence in construction project management: a systematic literature review of cost, time, and safety management, Buildings, 16(5) (2026) 1061.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT