پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صص ۱۹۳-۲۱۳
نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تأثیر عدم قطعیت طول زمان فعالیت‌ها بر زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع

محمدعلی موفق پور[1*]

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

چکیده

زمانبندی پروژه با داده‌های قطعی سابقه طولانی در تحقیقات دارد. در این میان استفاده از اعداد غیرقطعی برای نمایش پارامترهای مسئله فقط محدود به تکنیکهای PERT و برخی الگوریتم‌های ابتکاری برای محاسبه زمان ختم پروژه می‌گردند که توانایی در نظر گرفتن همه انواع این حالت‌های عدم قطعیت را ندارند. در این تحقیق برای محاسبه مسیر بحرانی و میزان شناوری فعالیت‌های پروژه تحت شرایط عادی و تسریع پروژه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی توسعه داده‌شده است. بررسی تجربی کارکرد این مدل‌ها در حالت قطعی با نتایج حاصل از الگوریتم‌های شناخته‌شده برای محاسبه مسیر بحرانی پروژه همخوانی داشته و اعتبارسنجی شده‌اند؛ علاوه بر اینها یک الگوریتم برای تولید سناریوهای حدی بر اساس مقادیر بازه‌ای پارامترهای ورودی طراحی شد. الگوریتم توسعه داده‌شده قادر به تولید بازه بهینه برای مقادیر متغیرهای تصمیم در زمان‌بندی پروژه است. حل مسئله زمان‌بندی یک پروژه واقعی احداث ساختمان شامل بیش از ۸۰ فعالیت نشان داد؛ در صورتی که مقدار پارامترهای ورودی مسئله اعداد بازه‌ای باشند، مقادیر متغیرهای تصمیم خروجی از مدل‌ها نیز در بیشتر اوقات اعداد بازه‌ای و با عدم قطعیت کمتری خواهند بود. انتشار خطا و ریسک در پروژه در اکثر اوقات به‌صورت خطی هست. این بدان معنا است در صورتی‌که برنامه‌ریزی بهینه‌ای برای زمان‌بندی پروژه صورت گیرد، در اکثر اوقات خطا و ریسک در پروژه باعث بروز رفتار قابل پیش‌بینی در متغیرهای تصمیم غیرقطعی خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی، بهینه‌سازی غیرقطعی، مدل‌سازی ریاضی، برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای، شناوری کل بازه‌ای.

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: Movafaghpour@jsu.ac.ir

۱- مقدمه

به‌طور طبیعی هر فعالیتی با ریسک و مخاطره، همراه بوده و انسان‌ها از زمان‌های بسیار دور، به این مفهوم پی برده و به‌دنبال شناسایی و کنترل عوامل و منابع آن هستند. در محیط‌های سازمانی و تصمیم‌گیری امروزه نیز پیچیدگی شرایط و ترکیب اطلاعات دستیابی به تصمیمات بهینه را بی‌نهایت مشکل می‌سازد. بنابراین دیگر قوانین سرانگشتی و بهترین حدس و گمان، کارساز نخواهد بود بلکه برای مدل کردن رفتار غیرقطعی اجزا سیستم‌های برنامه‌ریزی تولید و یا پروژه باید به دنبال روش‌های دقیق‌تری بود. با توجه به اینکه نیاز به انجام مدیریت ریسک در پروژه‌ها به دلیل افزایش پیچیدگی، حجم پروژه، رقابت و سایر مسائل اقتصادی و سیاسی امری اجتناب‌ناپذیر هست و امکان مدیریت و پاسخ به تمامی ریسک‌های شناسایی شده وجود ندارد، پس از شناسایی ریسک‌های پروژه، ارزیابی این ریسک‌ها برای مدیریت و پاسخ به آن‌ها لازم و ضروری است. از سوی دیگر وجود ریسک در پروژه، بیانگر آن است که در فضای اجرا و پیاده‌سازی پروژه‌ها، عدم اطمینان حاکم است که محاسبات با اعداد بازه‌ای، ابزار بسیار مناسبی جهت مدل‌سازی و اندازه‌گیری این عدم اطمینان‌ها است.

به دلیل اینکه بیشتر تصمیم‌گیرندگان یا مدیران پروژه، معمولاً به‌سادگی می‌توانند حد پایین و بالای پارامترهای غیرقطعی را شناسایی کنند، اعداد بازه‌ای ابزار مفیدی برای سروکار داشتن با ابهام موجود در فرایند برنامه‌ریزی پروژه ارائه می‌کند. لذا در این مقاله، با به‌کارگیری اعداد بازه‌ای، مدل‌های ریاضی جهت کمی‌سازی و مدل کردن پارامترهای ورودی برنامه‌ریزی زمانی پروژه ارائه شده است. در فرایند مدیریت پروژه وقتی‌که منابع ریسک شناسایی شده‌اند، مدیر پروژه باید آن‌ها را ارزیابی نماید. فرایند جمع‌آوری داده‌ها، معمولاً وابسته به بررسی مشاهدات تاریخی و ثبت‌های گذشته است. جمع‌آوری داده‌های گذشته در صورتی امکان دارد که یک دوره نسبتاً طولانی از تجربیات، پایش و اندازه‌گیری شده باشند. که الزاماً این مشاهدات تاریخی برای همه انواع پروژه‌ها در دسترس نیستند؛ زیرا در برخی موارد مانند جدید بودن فرایند شکل‌گیری بنگاه و یا تغییر ناگهانی و جامع شرایط حاکم بر محیط مسئله باعث ایجاد موضوعاتی می‌گردد که قبلاً مشاهداتی از رویداد آن‌ها موجود نبوده است. سایر عواملی که می‌توانند باعث ایجاد تأخیر در پروژه‌ها گردند بدون اینکه سوابق ثبت شده‌ای از آن‌ها موجود باشد شامل استفاده از پیمانکاران غیر فنی و کم‌تجربه است که عوامل اجرایی آن‌ها نیز به همین صورت فاقد تجربه کافی هستند. تأخیرات ناشی از مشاجرات بین کارفرما و پیمانکار که بیشتر تابع الگوی فرهنگ صنعتی محل اجرای پروژه است. سایر عوامل بیرونی که می‌توانند در ایجاد

تأخیر در تکمیل پروژه مؤثر باشند، شامل فشارهای قانونی داخلی یا فشارهای سیاسی بین‌المللی است. در صورتی که مشاهدات تاریخی از یک فرایند موجود باشد، تحلیل ریسک مرتبط با آن فرایند به‌سادگی و بر اساس تکنیک‌های آماری و برنامه‌ریزی احتمالی قابل انجام است. ولی در صورت عدم وجود مشاهدات تاریخی باید از داده‌های بازه‌ای به همراه رویکردهای تحلیل سناریو استفاده کرد. به‌طور طبیعی هر فعالیتی در پروژه با ریسک و مخاطره همراه است. شناسایی، تجزیه‌وتحلیل، اولویت‌بندی و داشتن برنامه برای برخورد با این اتفاقات، می‌تواند نقش بسزایی در موفقیت پروژه داشته باشد. از طرفی وجود ریسک حاکی از اجرای پروژه در محیط‌هایی با عدم قطعیت و عدم اطمینان است که موجب می‌گردد تا محاسبات بازه‌ای ابزار بسیار مناسبی جهت برخورد با عدم قطعیت باشد. در موارد بسیاری، از توانایی اندازه‌گیری با هر درجه دقت خاص محرومیم. ازاین‌رو با عدم قطعیت در اطلاعات کسب‌شده روبرو هستیم. در اینجا با کمبود اطلاعات دانش مواجه نیستیم، بلکه با یک عدم قطعیت در اطلاعات روبرو هستیم. چنین عدم قطعیت را می‌توان با بازه‌های غیرتصادفی برای پارامترهای ورودی مسئله نمایش داد. رویکرد بازه‌ای ابزار بسیار مناسبی جهت برخورد و کنار آمدن با این عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی متغیرها و پارامترها هست.

در این پژوهش ما به دنبال ارائه مدل‌های ریاضی برای زمان‌بندی پروژه هستیم. در این مدل‌های ریاضی پارامترهایی که باید از شرایط محیطی قرائت شوند به‌صورت اعداد بازه‌ای در دسترس‌اند.

۲- تحقیقات پیشین

تجزیه‌وتحلیل ریسک در کنترل پروژه تاریخچه مفصلی دارد؛ به‌عنوان مثال کنگری (۱۹۸۸) به‌کارگیری تئوری فازی را در روش تجزیه‌وتحلیل ریسک با استفاده از اصطلاحات زبانی را پیشنهاد داد [۱]. پیک و همکاران (۱۹۹۳) یک مدل ریسک قیمت‌گذاری که قیمت پیشنهادی یک پروژه ساخت‌وساز را تعیین کند ارائه نمودند [۲]. مدل، ریسک مرتبط با نتایج را به‌صورت اعداد فازی تخمین می‌زد که نشان‌دهنده نتایج ریسک برای انعکاس عدم قطعیت در ارتباط با پیشنهاد قیمت بود. تاه و همکاران (۱۹۹۳) یک ابزار کامپیوتری توسعه دادند که بهای هزینه‌های احتمالی را با کمک یک برنامه نوشته‌شده در محیط پاسکال تخمین می‌زد. این سیستم سطح خطر را در اصطلاحات زبانی برای تخصیص احتمالی و آماده‌سازی شرکت در مناقصه را تعیین می‌کرد. این پیشنهاد یک ساختار شکست ریسک جدید تحت عنوان سلسله مراتب ساختار

شکست ریسک (HRBS) که ریسک پیمانکار بود را فراهم می‌کرد [۳]. ویربا و همکاران (۱۹۹۶)، یک مجموعه تئوری فازی بر اساس روش ارزیابی ریسک که ریسک‌ها را شناسایی و وابستگی میان آن‌ها را بررسی و احتمال ریسک‌های صحیح ممکن الوقوع را با استفاده از متغیرهای کلامی ارزیابی می‌نمود را ارائه نمودند [۴].

کنگری [۵] معتقد بود که خطر ریسک بخش مهمی از تصمیم‌گیری هست، درحالی‌که می‌تواند بر عملکرد بهره‌وری، کیفیت و بودجه پروژه ساختمانی تأثیر گذارد با این وجود خطر ریسک پروژه نمی‌تواند محدود گردد، اما می‌تواند به حداقل رسانده شود یا از یک بخش به بخش دیگر پروژه انتقال داده شود. در سال ۱۹۹۵مون و همکاران [۶] توزیع‌های فازی در مدیریت پروژه برای تجزیه‌وتحلیل برنامه زمان‌بندی و هزینه به کار گرفته‌شده را تجزیه‌وتحلیل کردند. وانگ (۱۹۹۹) یک رویکرد مجموعه فازی به زمان‌بندی محصول پروژه‌های توسعه‌یافته با اطلاعات زمانی را توسعه داد [۷]. در تحقیق بودوارا (۱۹۹۹)، یک مدل ساده ریاضی ساخته شد که قادر است بهای ریسک ناشی از تأخیر پرداخت صورت‌وضعیت را به‌صورت یک قسمت (بخش) از قیمت نهایی برای فعالیت پیش‌بینی نماید، یا به‌عبارت‌دیگر پیش‌بینی بهایی به‌صورت تعدیل درون قیمت نهایی پیمانکار در مرحله مناقصه را انجام می‌داد [۸]. گریس نایت (۲۰۰۱)، در پژوهشی جهت پیش‌بینی حداکثر و حداقل و خزش دامنه هزینه طراحی در پروژه ساختمان تجاری از یک مدل منطق فازی مربوط به ویژگی‌های پروژه با عوامل بالقوه استفاده و آن را در یک محیط کامپیوتری اجرا و آزمایش نمود که مدل مذکور موفق در پیش‌بینی دقیق هزینه حداکثر و حداقل در فاز طراحی پروژه گردید [۹]. چاناس و زیلینسکی (۲۰۰۱) تست‌های بحرانی در شبکه با زمان‌های فعالیت‌های فازی را تجزیه‌وتحلیل کردند [۱۰]. وانگ (۲۰۰۲) بعدها با استفاده از یک روش زمان‌بندی پروژه فازی، زمان‌بندی ریسک برای توسعه محصول را به حداقل رساند [۱۱]. دوبویز و همکاران (۲۰۰۳) دیرترین زمان‌های شروع و شناوری‌ها در شبکه فعالیت‌هایی با مدت‌زمان شناخته‌شده را مطالعه کردند و در جای دیگر نیز زمان‌بندی فازی را با اطلاعات اندکی برنامه‌ریزی کردند [۱۲]. اسلیپتسو و تیشوک (۲۰۰۳)، زمان فازی ویژگی‌های عملیات برای مدیریت پروژه بر روی مدل‌های شبکه را تحقیق کردند [۱۳]. در تحقیق دیگر وانگ (۲۰۰۴)، یک الگوریتم ژنتیکی برای حل مسئله تحت هدف حداکثر رساندن بدترین مورد زمان‌بندی به کار گرفت [۱۴]. در سال ۲۰۰۸ نژاد و اسدی [۱۵] یک عملگر تقریب بیشترین عدد فازی را پیشنهاد دادند و آن را در برنامه‌ریزی کارهای اجرائی یک کارگاه ساختمانی به‌صورت فازی به‌کار بردند.

آمر و همکاران (۲۰۰۸)، در مقاله‌ای با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به ارزیابی ریسک در پروژه‌های بزرگراه‌های چین پرداختند [۱۶]. ابراهیم نژاد و همکاران (۲۰۱۰)، از رویکرد فازی چند هدفه جهت شناسایی و ارزیابی ریسک در پروژه‌ها استفاده نمودند؛ که از روش‌های لینمپ و تاپسیس فازی استفاده شده است [۱۷]. بیجیان و همکاران (۲۰۰۸)، مدلی فازی جهت ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک پروژه‌های ساختمانی ارائه نمودند [۱۸]. در تحقیق فرجی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی عوامل تأخیر پروژه‌های عمرانی و ارائه الگویی جهت کاهش زمان تأخیر می‌پردازد که بدین منظور در یک مطالعه موردی عوامل تأخیر ۵ پروژه عمرانی شناسایی و اولویت‌بندی شده و مهم‌ترین آن‌ها استخراج می‌گردند. سپس جهت بررسی دیدگاه افرادی که مستقیماً در پروژه‌های عمرانی دخیل هستند، تحقیق زمینه‌یابی با تکیه بر یک پرسشنامه محقق ساخته‌شده به شکل میدانی انجام می‌شود و علاوه بر دسته‌بندی و اولویت بندی عوامل، تحلیل روابط بین عوامل اصلی به وجود آورنده تأخیر و ساخت مدل برهم‌کنش این عوامل انجام می‌شود. نتایج هر دو مطالعه نشان داد که سه عامل مشکلات مالی، مشکلات تملک اراضی و مشکلات مطالعه و طراحی مهم‌ترین عوامل تأخیر هستند. همچنین با ساخت مدل برهم‌کنش عوامل تأخیر می‌توان دریافت که با اصلاح ساختار و قوانین پروژه‌ها و استفاده از شیوه‌های تأمین مالی مانند BOT و EPC در اجرای پروژه‌ها می‌توان علاوه بر حل مشکل مالی، افزایش مقادیر پروژه را که ناشی از روش‌های سنتی اجرا و عدم یکپارچگی مراحل طرح و ساخت است به حداقل رسانده و مشکلات تملک اراضی را نیز تا حد زیادی کاهش داد [۱۹]. در تحقیق پور مؤید و همکاران (۱۳۸۸) زمان انجام فعالیت‌ها را به‌صورت اعداد فازی فرض نموده و با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی صفر و یک که در آن ضرایب متغیرها در تابع هدف به‌صورت اعداد فازی بودند، از دوگان آن برای حل مدل مذکور بهره جستند که سمت راست آن محدودیت‌های دوگان به‌صورت فازی درآمده و سپس محدودیت‌های دوگان را با استفاده از رتبه‌بندی اعداد فازی به‌صورت خطی درآوردند که هم‌ارز مدل دوگان اولیه بود و سپس با حل مدل دوگان به‌دست‌آمده و تعیین محدودیت‌های فعال دوگان، متغیرهای پایه‌ای مدل اولیه که نشان‌دهنده مسیر بحرانی پروژه بودند و به طبع آن مسیر بحرانی و زمان انجام پروژه را به دست آوردند [۲۰]. الفت و همکاران (۱۳۸۹)، تحقیقی جهت شناسایی و اولویت‌بندی ریسک پروژه بر مبنای استاندارد PMBOK با رویکرد فازی در استان بوشهر انجام دادند. نتایج نشان داد، ریسک جزء ذاتی تمام پروژه‌ها است و امکان حذف کامل آن وجود ندارد. اگر چه می‌توان برای کاهش تأثیر ریسک در دستیابی به اهداف پروژه، آن را به‌طور مؤثری مدیریت

کرد؛ اما احتمال رخداد آن حداقل در یکی از ابعاد پروژه از قبیل محدوده، زمان، هزینه یا کیفیت وجود دارد. بنابراین، شناسایی، تجزیه‌وتحلیل و اولویت‌بندی ریسک، می‌تواند نقش بسزایی در موفقیت پروژه داشته باشد [۲۱]. برادران کاظم‌زاده و شریف موسوی (۱۳۹۰)، در تحقیق خود جهت تعیین میزان ریسک زمانی پروژه و تخمین انحراف از برنامه زمان‌بندی پروژه، یک متدولوژی ارزیابی ریسک فازی ارائه نمودند که آن متدولوژی از نمودار تأثیرگذاری برای ساخت مدل و رویکرد ارزیابی ریسک فازی برای تخمین میزان افزایش زمانی هر یک از فعالیت‌ها و انحراف زمانی فازهای پروژه استفاده می‌کند. سپس مقادیر به‌دست‌آمده از مدل ارزیابی ریسک فازی وارد برنامه کنترل پروژه شده و انحراف زمانی کل پروژه از برنامه زمان‌بندی مصوب محاسبه می‌شود. مطالعه علمی این مدل بر روی بخشی از یک پروژه بهسازی خط مربوط به اداره کل خط و ابنیه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران انجام شده است. اعتبار سنجی مدل به‌وسیله مقایسه مقادیر برآورد شده به‌وسیله مدل و مقادیر واقعی زمان فعالیت‌ها و محاسبه متوسط نسبت قدر مطلق خطاها انجام شده است [۲۲]. کاظمی و فخوری (۱۳۹۱)، تحقیقی جهت ارائه یک سیستم کنترل فازی برای تخمین زمان ختم پروژه در شبکه‌های گرت انجام دادند. به‌منظور کاهش محدودیت‌های مربوط به عدم قطعیت در برنامه‌ریزی و اجرای پروژه، منطق و سیستم کنترل فازی پیشنهاد و در آن میانگین، واریانس، ارزش و تعداد حلقه‌های شبکه گرت و همچنین عوامل تأثیرگذار محیطی بر اجرای پروژه به‌صورت فازی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب برای اولین بار، با استفاده از قابلیت‌های موجود در شبکه‌های گرت و همچنین منطق و سیستم فازی، سیستم کنترل فازی طراحی شده و در آن سعی گردیده تا تمامی حالت‌های موجود در اجرای یک پروژه تحلیل شود. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از ۱۵ آزمایش مختلف بر روی پروژه‌های با ابعاد متوسط که عمدتاً در حوزه احداث واحدهای صنعتی بوده‌اند، به این نتیجه دست یافتند که با استفاده از روش پیشنهادی، زمان‌بندی فعالیت‌ها منطقی‌تر و دقیق‌تر به دست خواهد آمد [۲۳]. یک از کاربردهای حل زمان‌بندی پروژه، زمان‌بندی شبکه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات است مثلاً در سال ۱۳۹۰ اسماعیلیان و جعفر نژاد [۲۴] زمان‌بندی تعمیرات پیشگیرانه در حالت وجود نیروی کار چند مهارته را با کمک مدل‌های ریاضی برنامه‌ریزی پروژه انجام دادند. نبی زاده و همکاران (۱۳۹۳) [۲۵] برای افزایش استواری در جواب مسئله زمان‌بندی مقاوم پروژه با منابع محدود، ماکزیمم کردن مقادیر شناوری را به‌عنوان تابع هدف مدل ریاضی مربوطه قرار دادند و با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید آن را حل کردند.

رویکرد استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای مواجهه با مسئله زمان‌بندی پروژه رویکرد رایجی است مثل تحقیقات غفوری و تقی زاده یزدی [۲۶] که مسئله زمان‌بندی پروژه تحت شرایط محدودیت منابع را با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی‌شده حل کردند؛ و یا همتا و همکاران [۲۷] که یک نسخه استوار مبتنی بر مدل استوار برتسماس برای مسئله موازنه زمان-هزینه گسسته در پروژه‌های با محدودیت بودجه ارائه دادند؛ آن‌ها یک مسئله کوچک شامل ۶ فعالیت را با الگوریتم ژنتیک در کنار جواب بهینه دقیق مدل ریاضی حل کردند. کاظمی و سروندی (۱۳۹۷) نیز برای مسئله زمان‌بندی پروژه تحت محدودیت منابع را با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری حل کردند [۲۸]. خالدیان و مؤمنی [۲۹] مسئله تسطیح منابع پروژه را تحت شرایط فازی-تصادفی موردمطالعه قرار داده و یک الگوریتم ژنتیک دوهدفه با کمک ابزارهای درون نرم‌افزار MATLAB ارائه دادند. در آخرین تحقیقات گزارش‌شده، یوسفی هنومرور و همکاران (۱۴۰۰) [۳۰] برای موازنه زمان-هزینه-کیفیت در شبکه‌های PERT از یک شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه و الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه استفاده کردند.

در جمع‌بندی تحقیقات پیشین باید گفت که در تحقیق پورمؤید و همکاران (۱۳۸۸) [۲۰] در مدل‌سازی بکار گرفته‌شده کمی‌سازی انجام نمی‌دهد و همچنین میزان تأثیرگذاری زمان انجام فعالیت‌های مؤثر بر زمان ختم پروژه مشخص نشده است. همچنین در ارزیابی رویکرد فراابتکاری مورد استفاده توسط نبی‌زاده و همکاران [۲۵]، همتا و همکاران [۲۷]، و خالدیان و مؤمنی [۲۹] باید گفت که آن‌ها برای حصول استواری در جواب بهینه نهایی از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده کردند. در مسئله مورد تمرکز این تحقیق چون مدل ریاضی مسئله خطی و پیوسته است، استفاده از حل دقیق و بهینه ریاضی برای بزرگ‌ترین مثال‌ها هم میسر و به‌صرفه است. لذا در ادامه تمرکز خود را روی توسعه یک الگوریتم برای تولید سناریوهای حدی که یک جواب بهینه داده‌شده را به چالش بکشند تمرکز خواهیم کرد. در این تحقیق ما به دنبال توسعه مدل ریاضی هستیم که بتوانند در درجه اول مقدار شناوری بهینه فعالیت‌های پروژه را محاسبه کرده و در درجه دوم با منظور کردن عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، بازه عدم قطعیت متغیرهای تصمیم (شناوری فعالیت‌های) پروژه را محاسبه کند.

۳- فرمول‌بندی مدل‌های بهینه‌سازی در زمان‌بندی پروژه

در زمان‌بندی شبکه فعالیت‌ها، مسیر بحرانی شامل یک یا چند زنجیره از فعالیت‌های شبکه پروژه می‌شود که توالی آن‌ها طولانی‌ترین مدت‌زمانی کلی یا ختم پروژه را نشان می‌دهد. این مسیر تعیین‌کننده کوتاه‌ترین زمان لازم برای تکمیل پروژه است. هر تأخیری برای هر فعالیت بر روی مسیر بحرانی به‌صورت مستقیم بر روی زمان تکمیل برنامه‌ریزی‌شده پروژه تأثیر می‌گذارد. در موارد بسیاری لازم است پروژه را زودتر از تاریخ محاسبه‌شده تکمیل نمود. یکی از راه‌حل‌های کوتاه نمودن زمان اجرای پروژه، تسریع در انجام فعالیت‌ها هست. برای کاهش زمان یک فعالیت باید میزان منابع مورد استفاده در آن فعالیت را افزایش داد. به‌عبارت‌دیگر برای اجرای یک فعالیت در زمانی کوتاه‌تر از آنچه در شرایط معمولی قابل اجراست، لازم است به حجم منابعی نظیر نیروی کار و تعداد تجهیزات و ماشین‌آلات افزود و یا از ماشین‌آلات پرتوان‌تر استفاده کرد.کاهش زمان اجرای پروژه همواره با صرف هزینه همراه است که در مقابل با کاهش زمان تکمیل پروژه، صرفه‌جویی‌هایی عاید می‌شود. هنگامی‌که در یک پروژه نیاز کارفرما رسیدن به هدف‌های زمانی فشرده‌تر باشد موجب می‌گردد تا زمان اتمام طرح بدون در نظر گرفتن زمان اتمام معمولی پروژه تعیین گردد، لذا زمان‌بندی بسیاری از فعالیت‌های پروژه فشرده‌تر و کوتاه‌تر می‌گردد. در برخی حالت‌ها هم فقط بودجه محدود و معینی برای تسریع پروژه در دسترس است. در چنین حالتی هدف ما یافتن بهترین ترکیب تسریع فعالیت‌ها است، به صورتی که پروژه در زودترین تاریخ ممکن تکمیل شود؛ ولی میزان بودجه‌ای که صرف کاهش زمان فعالیت‌ها می‌شود، نباید از بودجه تعیین‌شده برای این منظور عدول نماید. مدل ریاضی ذیل مسئله تسریع در زمان پروژه را حل می‌نماید.

پارامترها:

D_i: مدت‌زمان انجام فعالیت i در حالت عادی

D_i': مدت‌زمان انجام فعالیت i در حالت تسریع شده

C_i: هزینه انجام فعالیت i در حالت عادی

C_i': هزینه انجام فعالیت i در حالت تسریع شده

B : حداکثر مقدار بودجه در دسترس برای تسریع فعالیت‌ها

متغیرهای تصمیم:

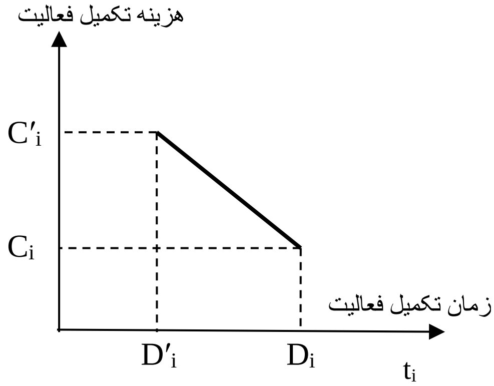
e_i : زودترین زمان آغاز فعالیت i

l_i : دیرترین زمان خاتمه فعالیت i

tf_i : شناوری کل فعالیت i

t_i: مدت‌زمان انجام فعالیت i در حالت بهینه

$finish$: زمان اتمام پروژه



شکل ۱. نمایش ارتباط هزینه تسریع فعالیت‌ها با زمان انجام فعالیت

$$\min\ w = finish - \frac{\varepsilon}{n}\sum tf_i \tag{۱}$$

$s.t.$

$$\begin{cases} e_j - e_i \ge t_i & \forall (i,j) \in A & (۲)\\ l_j - l_i \ge t_j & \forall (i,j) \in A & (۳)\\ l_i - e_i - t_i = tf_i & \forall i & (۴)\\ D'_i \le t_i \le D_i & \forall i & (۵)\\ e_i + t_i \le finish & \forall i \mid \nexists j,(i,j) \in A & (۶)\\ l_i = finish & \forall i \mid \nexists j,(i,j) \in A & (۷)\\ \sum_i \frac{C'_i - C_i}{D'_i - D_i}(t_i - D_i) \le \mathrm{B} & & (۸)\\ tf_i, l_i, e_i, t_i, finish \ge 0 & \forall (i,j) \in A & (۹) \end{cases}$$

تابع هدف (۱) زودترین زمان ختم پروژه را محاسبه می‌کند. قید (۲) اعلام می‌کند که همه فعالیت‌های j امی که فعالیت i پیش‌نیاز آن‌هاست فقط پس از اینکه فعالیت i تکمیل شد می‌توانند آغاز شوند. قید (۳) دیرترین زمان تکمیل فعالیت i را بر اساس دیرترین زمان تکمیل همه فعالیت‌های پس‌آیندش محاسبه می‌کند. قید (۴) با کمک یک ضریب کوچکی از جریمه که در تابع هدف قرار داده‌شده است قادر است تا شناوری همه فعالیت‌ها را محاسبه کند. قید (۵) اعلام می‌کند که تا زمان انجام هر فعالیت در یک بازه مجاز قابل تسریع است. قید (۶) زمان ختم

پروژه را بر اساس ماکزیمم زمان تکمیل همه فعالیت‌های بدون پس‌آیند محاسبه می‌کند. قید (۷) دیرترین زمان تکمیل همه فعالیت‌های بدون پس‌آیند را برابر زمان اتمام پروژه قرار می‌دهد. قید (۸) سقف بودجه در دسترس برای تسریع فعالیت‌ها را اعمال می‌کند. و در پایان قید (۹) بیان می‌کند که همه متغیرها پیوسته و نامنفی هستند.

۴- زمان‌بندی پروژه با داده‌های غیرقطعی

در بسیاری از پروژه‌ها، فعالیت‌های پروژه به دلایلی از قبیل: یکتا و منحصربه‌فرد بودن پروژه (یعنی هیچ پروژه عیناً مانند پروژه دیگری نیست)، وضعیت و شرایط جوی محل اجرای پروژه، تخصص و سرعت انجام کار و تجربه نیروی انسانی، حوادث و اتفاقات کارگاهی غیرمترقبه، زمان‌های تزریق منابع مالی در پروژه، تورم و بی‌ثباتی قیمت مواد مصرفی و غیره موجب محرومیت از اندازه‌گیری پارامترهای پروژه با دقت بالا می‌گردد و لذا نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت شفاف و دقیق به دست آورد. ازاین‌رو در اطلاعات کسب‌شده با نادقیقی روبه‌رو هستیم؛ همان‌گونه که گفته شد، چنین عدم قطعیتی را ما در اینجا با بازه‌های غیرتصادفی فرمول‌بندی نمود.

در زمانی که با عدم قطعیت سروکار داریم، در واقع در زمان برنامه‌ریزی و حتی در مراحل اولیه پیاده‌سازی، مقدار دقیق پارامترهای ورودی به مدل برنامه‌ریزی مشخص نیستند. اما به‌مرور هر چه در اجرا و پیاده‌سازی متغیرهای تصمیم به‌پیش می‌رویم، وضعیت واقعی محیط بیشتر برای ما آشکار می‌گردد. در واقع اگر یک پارامتر غیرقطعی، n مقدار ممکن برای آشکارسازی داشته باشد، پس از پیاده‌سازی جواب بهینه مدل ریاضی، هر یک از n مقدار ممکن گفته‌شده می‌تواند بیان‌کننده یک سناریو متفاوت برای رفتار محیط باشد. حال اگر تعداد پارامترهای غیرقطعی مدل ریاضی بیش از یکی، مثلاً M×N تا باشند آنگاه شرایط بسیار پیچیده‌تر می‌گردد. تحت این فرض همچنان تعداد سناریوهای محتمل به دلیل شمارا بودن مقادیر ممکن هر پارامتر غیرقطعی، شمارا است. اما وضعیتی را تصور کنید که پارامترهای غیرقطعی، دارای عدم قطعیت بازه‌ای باشند؛ حتی اگر طول این بازه‌های بسیار کوتاه باشند، اما تعداد حالت‌های ممکن ناشمارا خواهند بود. در نتیجه تعداد سناریوهای محتمل برای مقادیر یک پارامتر ناشمارا هستند. حال این شرایط را به تعداد بسیار زیادی از پارامترهای غیرقطعی یک مسئله بسیار کوچک بسط دهید.

در برنامه‌ریزی خطی با داده‌هایی که عدم قطعیت بازه‌ای دارند، نمی‌توان انتظار داشت که با تکنیک‌هایی مثل شبیه‌سازی مونت‌کارلو و یا تحلیل‌های سطحی بتوان به جواب‌های نقطه‌ای قابل‌اعتمادی دست یافت. در واقع استراتژی استوار برای حل بهینه‌این‌گونه مسائل باید به‌جای تمرکز بر یافتن جواب‌های نقطه‌ای استوار (معرفی یک بردار X به‌عنوان جواب بهینه) که تحت همه سناریوها موجه (که عملاً غیرممکن است) باشد، باید به دنبال یافتن بازه‌هایی برای هر یک از متغیرهای تصمیم x_j باشد که در تحت همه سناریوهای ممکن با احتمال معینی شامل جواب موجه باشد. به‌بیان‌دیگر با داشتن مسئله بهینه‌سازی مثل LP_1 :

$$LP_1:$$

$$Max z = CX \quad (۱۰)$$

$$S.t.$$

$$\begin{cases} A\ X \le b & (۱۱) \\ A_{eq} X = b_{eq} & (۱۲) \\ X \ge O & (۱۳) \end{cases}$$

چون همه ضرایب فنی و مقادیر سمت راست بازه‌ای هستند پس جواب بهینه X^* هم باید به‌صورت بازه‌ای تعریف گردد.

$$\left.\begin{array}{l} \underline{A} \le A \le \overline{A} \\ \underline{A}_{eq} \le A_{eq} \le \overline{A}_{eq} \\ \underline{b} \le b \le \overline{b} \\ \underline{b}_{eq} \le b_{eq} \le \overline{b}_{eq} \end{array}\right\} \Rightarrow \underline{X} \le X^* \le \overline{X} \quad (۱۴)$$

به‌سادگی و با اندکی تحقیق مشخص می‌گردد که در مسائل با محدودیت‌های تساوی با احتمال بسیار قوی ممکن است هیچ جواب نقطه‌ای وجود نداشته باشد که به ازای همه حالت‌های ممکن در فضای جواب صدق کند. اما می‌توان بازه‌ای با احتمال α درصد تعریف کرد که هر متغیر تصمیم در حالت بهینه در آن قرار می‌گیرد. حال سؤال اصلی این است که«به ازای هر سطح از اطمینان α بازه عضویت متغیرهای تصمیم چه هستند». مزیت این رویکرد به حل مسائل برنامه‌ریزی با عدم قطعیت بازه‌ای در سادگی پیاده‌سازی جواب‌های تولیدشده توسط آن در شرایط عملیاتی است. به‌عنوان نمونه یک کارگاه تولیدی را در نظر بگیرید که ضرایب تکنولوژیکی میزان مصرف منابع توسط محصولات به دلیل بالا (و بالطبع غیرثابت) بودن نرخ ضایعات به‌طور قطعی قابل‌شناسایی نیست. در این شرایط هر مدیر تولید کارکشته‌ای می‌داند که مقدار بهینه تولید از هر کدام از محصولات اگر در چه بازه‌ای قرار گیرد، حتماً در پایان به

جواب موجه می‌رسد. لذا ما در این بخش با پیروی از این منطق به دنبال یافتن مقدار بهینه‌این‌گونه بازه‌های استوار برای متغیرهایی تصمیم هستیم؛ چون در واقع در عمل بازه مجاز هر متغیر تصمیم است که اجرا و پیاده‌سازی عملیاتی تعیین‌کننده بوده و مورد نیاز مدیران است. مدیران در شرایط عدم اطمینان نیاز دارند حدود مجاز متغیرهای تصمیم را بدانند تا بتوانند تصویر کلی از تصمیمات آینده داشته باشند و نه الزاماً مقادیر صریح برای متغیرهای تصمیم؛ تا بتواند با حرکت در حاشیه امنی که با احتمال معین می‌داند به جواب موجه بهینه می‌رسد عملاً اثر عدم قطعیت ورودی بر نتیجه تصمیماتش، کنترل‌شده باقی بماند.

۵- تولید سناریوهای حدی به ازای یک جواب داده‌شده

همان‌طور که گفته شد، برای بررسی اثر عدم در پارامترهای ورودی بر فضای حل مسئله، هرچند شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند مورد استفاده قرار گیرد، اما به دلیل گستردگی بی‌کران سناریوهای ممکن (به دلیل پیوسته بودن مقدار پارامترهای غیرقطعی)، بهتر است ما به دنبال تولید بدترین سناریوی ممکن به ازای یک جواب داده‌شده باشیم. قابل توجه است که فرض قطعی بودن ضرایب تابع هدف بر روی کلیت مسئله تأثیری ندارد؛ زیرا می‌توان تابع هدف را به‌صورت بیشینه کردن z نوشت و یک محدودیت $z - c^T x$ $\leq$ ۰ را به مسئله اضافه کرد.

به ازای یک سناریو دلخواه فرض کنید پارامترهای A ، A_{eq} ، b و b_{eq} مقداردهی شده و یک جواب $X_{(۱)}$ تولیدشده باشد. در این صورت چون سناریوی مفروض ممکن است در عمل رو نشود، پس این بار مقدار جواب بهینه مسئله اصلی به‌صورت یک پارامتر منظور می‌گردد و پارامترهای A ، A_{eq} ، b و b_{eq} از مسئله اصلی به‌صورت متغیرهای تصمیم مسئله محیط پیرامون مسئله اصلی خواهند بود در نتیجه مسئله تولید سناریوی متضاد جواب بهینه جاری $X_{(۱)}$ خواهد بود:

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری ـــ

LP_2 :

$$Maxz = CX_{(1)} \quad (۱۵)$$

$S.t.$

$$\begin{cases} A\ X_{(1)} \le b & (۱۶) \\ A_{eq} X_{(1)} = b_{eq} & (۱۷) \\ \underline{A} \le A \le \overline{A} & (۱۸) \\ \underline{A}_{eq} \le A_{eq} \le \overline{A}_{eq} & (۱۹) \\ \underline{b} \le b \le \overline{b} & (۲۰) \\ \underline{b}_{eq} \le b_{eq} \le \overline{b}_{eq} & (۲۱) \\ A, A_{eq}, b, b_{eq} \quad \text{آزاد در علامت} & (22) \end{cases}$$

که در آن جای متغیر تصمیم و پارامتر تعویض شده است. سؤالی که مطرح می‌گردد این است که به ازای این $X_{(۱)}$ بدترین سناریویی که می‌تواند روی دهد چه است. برای پاسخ به این سؤال باید مدل ریاضی $LP_۲$ حل گردد تا مقادیر بهینه‌ای برای A ، A_{eq} ، b و b_{eq} به دست آید تا جواب $X_{(۱)}$ به بدترین شکل ممکن و با بیشتری مقدار خطا، غیرموجه گردد. بدین منظور دو دسته متغیر جدید $Dneq_i$ و Deq_i به‌عنوان میزان تعدی به ترتیب از قیود نامساوی و مساوی تعریف می‌گردد. تابع هدف هم برابر با حداکثر کردن میزان مجموع مقادیر تعدی از قیود نامساوی و مجموع قدر مطلق تعدی از قیود مساوی تعریف می‌گردد. پارامتر X به‌عنوان جواب بهینه مسئله اصلی وارد این مدل $NLP_۳$ می‌گردد تا سناریویی کاملاً متضاد با آن در قالب مجموعه مقادیری به A ، A_{eq} ، b و b_{eq} تولید گردد.

NLP_3 :

$$Maxz = \sum_i Dneq_i + \sum_k |Deq_k| \quad (۲۳)$$

$S.t.$

$$\begin{cases} AX - Dneq \ge b & (۲۴) \\ A_{eq} X - Deq = b_{eq} & (۲۵) \\ \underline{A} \le A \le \overline{A} & (۲۶) \\ \underline{A}_{eq} \le A_{eq} \le \overline{A}_{eq} & (۲۷) \\ \underline{b} \le b \le \overline{b} & (۲۸) \\ \underline{b}_{eq} \le b_{eq} \le \overline{b}_{eq} & (۲۹) \\ A, A_{eq}, b, b_{eq}, D, Deq \quad \text{آزاد در علامت} & (30) \end{cases}$$

که در آن $Dneq_i$ میزان تعدی از نامساوی i ام مدل LP_1 و Deq_k میزان تعدی از تساوی k ام مدل LP_1 است. به بیان دقیق‌تر در مقابل هر جواب بهینه $X_{(1)}$ مسئله LP_1 که به ازای A ، A_{eq} ، b و b_{eq} داده‌شده تولید می‌شود، NLP_3 یک سناریوی منحصربه‌فرد (در قالب متغیرهای تصمیم خودش که همان پارامترهای مدل اصلی LP_1 هستند) تولید می‌کند که در صورت اعمال این سناریو در مدل LP_1 ، جواب داده‌شده $X_{(1)}$ به بدترین شکل ممکن طرد کرده و ناموجه می‌گردد. برای شناسایی بدترین سناریوی حدی طرد کننده جواب‌های بهینه مدل ریاضی ذیل مسئله تسریع در زمان پروژه (۱-۹) مطابق NLP_3 داریم:

متغیرهای تصمیم جدید:

$Dbudget$: میزان تعدی از قید کوچک‌تر مساوی حداکثر بودجه مجاز تسریع

$Dneql_i$: میزان تعدی از حد پایین قید (۵) (بزرگ‌تر مساوی حداقل زمان فعالیت)

$Dnequ_i$: میزان تعدی از حد بالای قید (۵) (کوچک‌تر مساوی حداکثر زمان فعالیت)

NLP_4 :

$$\max z = Dbudget + \sum_i Dneql_i + Dnequ_i \qquad (۳۱)$$

$s.\ t.$

$$\begin{cases} D'_i - Dneql_i \geq t_i & \forall i \qquad (۳۲) \\ D + Dnequ_i \leq t_{ii} & \forall i \qquad (۳۳) \\ D'_i \leq D_i & \forall i \qquad (۳۴) \\ C' \leq C_i \qquad (۳۵) \\ \sum_i \frac{C'_i - C_i}{D'_i - D_i}\left(t_i - D_i\right) - Dbudget \geq \mathrm{B} \qquad (۳۶) \\ \underline{B} \leq B \leq \overline{B} \qquad (۳۷) \\ \underline{C} \leq C \leq \overline{C} \qquad (۳۸) \\ \underline{C'_i} \leq C'_i \leq \overline{C'}_i \qquad (۳۹) \\ \underline{D} \leq D \leq \overline{D} \qquad (۴۰) \\ \underline{D'} \leq D' \leq \overline{D'} \qquad (۴۱) \\ C, C', D, D', Dbudget, Dneql, Dnequ \quad \text{آزاد در علامت} \qquad (42) \end{cases}$$

از میان همه قیود (۱-۹) فقط قیدهایی که با پارامترهای غیرقطعی D_i ، D'_i ، C_i ، C'_i و B ارتباط دارند، در مدل NLP_4 آورده می‌شوند زیرا سایر قیود تأثیری بر مقدار این پارامترهای

غیرقطعی ندارند. قیود (۳۲)، (۳۳) و (۳۶) میزان تعدی از قیود به ترتیب (۵) و (۸) مسئله اصلی را محاسبه می‌کنند.

۶- فرایند متوالی تولید سناریوهای حدی

در حالت عمومی می‌توان مدل ریاضی NLP_3 که به دلیل وجود تابع قدر مطلق در تابع هدف آن، غیرخطی محسوب می‌گردد را خطی‌سازی کرد. اما چون مدل ریاضی اصلی مورد مطالعه در اینجا قیود تساوی ندارد، لذا عبارت قدر مطلقی در تابع هدف NLP_4 وجود ندارد. نحوه استفاده از این مدل به این صورت است که با شروع از یک سناریوی دلخواه A ، A_{eq} ، b و b_{eq} (در اینجا پارامترهای B ، D_i و D_i') جواب بهینه (es_i ، lf_i و tf_i) مدل اصلی را محاسبه می‌کنیم و سپس با کمک مدل NLP_4 مقدار پارامترهای B ، D_i و D_i' مربوط به بدترین سناریوی ممکن را تولید می‌کنیم. در ادامه بر اساس این پارامترهای جدید، سناریوهای حدی جدید را تولید می‌کنیم و این سناریو را با مجدداً با کمک مدل اصلی حل می‌کنیم.

۷- الگوریتم SELIS برای تولید سناریوهای حدی

در صورت فراخوانی متوالی مدل اصلی و سپس NLP_4 مجموعه‌ای از سناریوها تولید می‌گردد. فرایند تولید متوالی سناریوهای حدی[1] تا زمانی ادامه می‌یابد که یا یکی از سناریوهای تولیدشده عنا یا تقریباً مشابه آن مجدداً تولید شود و یا اینکه تعداد معینی تکرار طی شود. پس از توقف تکرارها، برای هر متغیر x_j (در اینجا es_i ، lf_i و tf_i) مقادیر متعددی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها تحت یک سناریوی حدی تولیدشده است. در نتیجه می‌توان بزرگ‌ترین بازه شامل همه مقادیر بهینه تولیدشده در طی تکرارهای مختلف برای هر متغیر تصمیم را به‌عنوان بازه مقادیر ممکن آن معرفی کرد. نام این بازه را بازه «بهینگی-موجه بودن» متغیر x_j می‌نامیم. در صورتی که طول نسبی این بازه برای برخی متغیرهای تصمیم کوچک باشد، این متغیرها، متغیرهای تصمیم استوارتر خوانده می‌شوند و در صورتی که طول نسبی این بازه برای برخی متغیرهای تصمیم بزرگ باشد، این متغیرها، متغیرهای تصمیم نااستوارتر (بی‌ثبات‌تر)[2] خوانده می‌شوند.

۸- نتایج محاسباتی برای زمان‌بندی یک پروژه واقعی

برای حل و استخراج نتایج مدل‌های توسعه داده‌شده از بسته تجاری لینگو[3] استفاده و مدل‌ها در محیط این نرم‌افزار نوشته شدند. پروژه واقعی مورد استفاده در این تحقیق احداث یک واحد

مسکونی با تعداد ۸۶ فعالیت است و اثر عدم قطعیت در پارامترهای ورودی بر شناوری فعالیت‌ها بررسی گردید. روابط پیش‌نیازی و مدت‌زمان انجام هر فعالیت (D_i) بر اساس داده‌های واقعی تعیین گردید. تلورانس‌های عدم قطعیت مدت‌زمان انجام فعالیت (δ_i) به‌صورت تصادفی و به‌طور متوسط برابر با ۱/۱ ٪ (حداکثر ۵۰٪ و حداقل ۰/۱٪ با انحراف معیار ۷٪) مدت‌زمان انجام فعالیت (D_i) در حالت عادی تعیین گردید. نکته جالب اینکه پس از شروع به حل با هر سناریوی دلخواه که به ازای D_i های بین $\underline{D}_i$ و $\overline{D}_i$ تولید شوند، اولین سناریوی حدی برابر $\overline{D}_i$ برای همه پارامترهای غیرقطعی D_i حاصل می‌شد و دومین سناریوی حدی برابر $\overline{D}_i$ برای همه پارامترهای غیرقطعی D_i حاصل می‌شد. در سومین تکرار نیز مجدداً سناریوها به‌صورت یک‌درمیان تولید می‌شدند. این رویه با تولید مجموعه‌ای از شبکه‌های زمان‌بندی با داده‌های تصادفی نیز تائید شد. مهم‌ترین نکته در خروجی SELIS برای مدل زمان‌بندی پروژه این بود که:

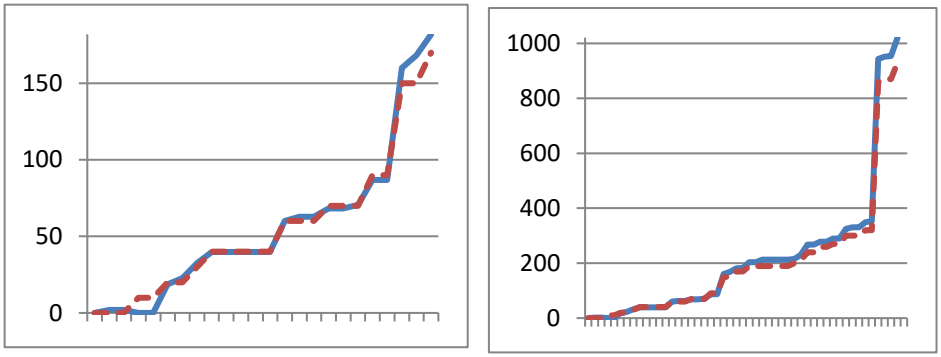
قاعده ۱: اکثر فعالیت‌هایی که مقدار شناوری کل آن‌ها تحت سناریوی زودترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \underline{D}_i$)

الف. صفر (فعالیت بحرانی) بود، تحت سایر سناریوها همچنان صفر (فعالیت بحرانی) باقی می‌ماند و

ب. هرچه بزرگ‌تر از صفر (فعالیت غیربحرانی) بود، تحت سناریوی دیرترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \overline{D}_i$) بزرگ‌تر می‌شوند.

قاعده ۲: مقدار شناوری کل اکثر فعالیت‌ها تحت سناریوی دیرترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \overline{D}_i$) بزرگ‌تر از مقدار آن تحت سناریوی زودترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \underline{D}_i$) بود.

علت به کار بردن قید اکثر در مشاهدات فوق، وجود برخی تغییرات است که آن‌ها را «تغییرات بی‌قاعده» در مقدار شناوری می‌نامیم. شکل ۱ مقدار شناوری کل فعالیت‌هایی را نمایش می‌دهد که تحت برخی سناریوها غیربحرانی‌اند. سایر فعالیت‌های بحرانی که مقدار شناوری کل برابر صفر دارند حذف شده‌اند. این نمودار در قسمت مربوط به تغییرات بی‌قاعده درشت‌نمایی شده است (شکل ۱.ب)



(ب) (الف)

شکل ۲. مقدار شناوری کل فعالیت‌های غیربحرانی تحت سناریوی زودترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \underline{D}_i$) با خط پر و دیرترین زمان انجام همه فعالیت‌ها ($D_i = \overline{D}_i$) با خط‌چین. (الف) همه فعالیت‌های غیربحرانی، (ب) برخی فعالیت‌هایی که مقدار شناوری‌شان بی‌قاعده تغییر می‌کند.

برای اعتبارسنجی یافته‌های این تحقیق، در دو قسمت بررسی صورت گرفت. اول اعتبارسنجی مدل اصلی توسعه داده شده برای مسئله موازنه زمان-هزینه تسریع پروژه و دومی الگوریتم SELIS. برای اعتبارسنجی مدل ریاضی نتایج حاصل از اجرای مدل روی چند مثال با حل دستی اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم SELIS نیز به گروهی از مدیران پروژه که دارای تجربه اجرایی بیش از ۱۵ ساله در پروژه‌های مشابه بودند عرضه شد. طبق تجربه این گروه از خبرگان، در صورتی که زمان کل فعالیت‌های یک پروژه در ابعادی مشابه آنچه در اینجا بحث شد در بازه ۱۰٪± درصد نوسان کنند، تغییری چشمگیری در مجموعه فعالیت‌های بحرانی روی نمی‌دهد.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه در عمل، اگر از مدل‌های ریاضی موجود استفاده گردد، چون این مدل‌ها فقط زودترین زمان آغاز فعالیت‌ها را محاسبه می‌کنند، برای محاسبه شناوری‌ها و شناسایی مسیر بحرانی لازم است تا پردازش ثانویه‌ای صورت گیرد. در این تحقیق ما ضمن توسعه یک مدل ریاضی جدید که توانایی محاسبه شناوری فعالیت‌ها را دارد، این امکان را فراهم کردیم تا همزمان با حل مدل ریاضی مسئله موازنه زمان-هزینه تسریع پروژه، بدون نیاز به پردازش ثانویه اطلاعات کاربردی مهمی نیز تولید شوند. این مزیت مدل توسعه داده‌شده این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان از این مدل توسعه داده‌شده بتوان برای تولید بازه‌های بهینه مقدار شناوری فعالیت‌ها استفاده کرد.

در این تحقیق همچنین الگوریتم SELIS برای تولید سناریوهای حدی برای حل مسائل دارای عدم قطعیت بازه‌ای معرفی گردید. ما در اینجا از این الگوریتم برای تولید زمان‌بندی‌های استوار استفاده کردیم. یافته‌های ما حاکی از این است که مجموعه فعالیت‌های بحرانی غالباً تحت سناریوهای مختلف تغییرات چشمگیری پیدا نمی‌کند. این بدان معناست که اگر مقدار شناوری فعالیت‌ها به‌صورت بازه‌ای در اختیار مدیران و بهره‌برداران قرار گیرد به آن‌ها این امکان را می‌دهد تا با نگاه جامع‌تری وارد فاز اجرا شوند؛ و مثلاً یک نوع پیش‌آگاهی از این موضوع داشته باشند که اگر تحت شرایط خاص محیطی قرار گیرند، کدام فعالیت‌ها هم ممکن است شرایط بحرانی (فاقد شناوری بودن) پیدا کنند. به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، محقق به دنبال استفاده از SELIS برای سایر انواع مسائل برنامه‌ریزی است که در دنیای واقعی پارامترهای آن‌ها دارای عدم قطعیت هستند. همان‌طور که در این تحقیق گفته شد بیان متغیرهای تصمیم بهینه به‌صورت اعداد بازه‌ای یکی از ملموس‌ترین و کاربردی‌ترین انواع بیان متغیرهای تصمیم برای مواجهه با شرایط جهان واقعی است. در این‌چنین شرایطی مدیران علاقه‌مند به یافتن جواب‌های استوار در قالب بازه‌های بهینه-موجه برای تک‌تک متغیرهای تصمیم هستند که می‌تواند منجر به قواعد سرانگشتی مدیریتی گردد که در عمل برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها کاربردی‌تر باشند.

۱۰- پی‌نوشت‌ها

۱. [1] Succevively gEnerating LImit Scenarios
۲. [1] frail
۳. [1] LINGO

۱۰- منابع

[۱] Kangari, R. (۱۹۸۸), *Construction Risk Management*, Civil Engineering System, ٥.

[۲] Paek, J.H., Lee, Y.W. and Ock, J.H (۱۹۹۳). Pricing Construction Risks: Fuzzy Set Theory. *Journal of Construction Engineering and Management*, ۱۱۹ (٤), ۷٤۳-۷٥٦.

[۳] Tah, J.H.M., Thorpe, A., McCaffer, R., (۱۹۹۳). Contactor project risks contingency allocation using linguistic approximation. *Computing System in Engineering*, ٤, ۲۸۱–۲۹۳.

[٤] Wirba, E.N., Tah, J.H.M., Howes, R., (۱۹۹٦). Risk interdependencies and natural language computations. Journal of Engineering, *Construction and Architectural Management*, ۳, ۲٥۱–۲٦۹.

[٥] Kangari, R. (۱۹۹٥). Risk management perception and trends of U.S. construction. *Journal of construction and management*. Vol.۱۲۱, no.٤, pp.٤۲۲-٤۲۹.

[٦] Mon, D.L., Cheng, C.H., & Lu, H.C. (۱۹۹٥). Application of fuzzy distributions on project management. *Fuzzy Sets and Systems*, ۷۳, ۲۲۷-۲۳٤.

[۷] Wang, J. (۱۹۹۹). A fuzzy set approach to activity schedule for product development. *Journal of the Operation Research Society*, ٥۰, ۱۲۱۷-۱۲۲۸.

[۸] Budawara, N. (۱۹۹۹). The Assessment of Risks Caused by Owner's Delayed Payments, Thesis, Montreal, Quebec, Canada.

[۹] Grace Knight, K. (۲۰۰۱). *A Fuzzy Logic Model for Predicting Commercial Building Design Cost Overruns*, MS thesis in the University of Alberta, Edmonton, Alberta.

[۱۰] Chanas, S., & Zielinski, P. (۲۰۰۱). Critical patch analysis in the network with fuzzy activity times. *Fuzzy Sets and Systems*, ۱۲۲, ۱۹٥-۲۰٤.

[۱۱] Wang, J. (۲۰۰۲). A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development. *Fuzzy Sets and Systems*, ۱۲۷, ۹۹-۱۱٦.

[۱۲] Dubois, D., Fargier, H., & Galvagnon, V. (۲۰۰۳a). On latest starting times and floats in activity networks with ill-known durations. *European Journal of Operational Research*, ۱٤۷, ۲٦٦-۲۸۰.

[۱۳] Slyeptsov, A.I., & Tyshchuk, T.A. (۲۰۰۳). Fuzzy temporal characteristics of operations for project management on the network models basis. *European Journal of Operational Research*, ۱٤۷, ۲٥۳-۲٦٥.

[۱٤] Wang, J. (۲۰۰٤). A fuzzy robust scheduling approach for product development projects. *European Journal of Operational Research*, ۱٥۲, ۱۸۰-۱۹٤.

[۱۵] Nezhad, S.S., & Assadi R.G. (۲۰۰۸). Preference ratio-based maximum operator approximation and its application in fuzzy flow shop scheduling. *Applied Soft Computing*, ۸, ۷۵۹-۷٦٦.

[۱٦] Amer M., Jiayin P., Zayed T.. (۲۰۰۸). Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. *international journal of project management*. ۲٦, pp. ٤۰۸-۱۹.

[۱۷] Ebrahimnejad S., M.S. Meysam, H. Seyrafianpour, (۲۰۱۰). Risk identification and assessment for build–operate– transfer projects: A fuzzy multi-attribute decision-making model. *Expert Systems with Applications*. ۳۷, pp. ٥۷٥-٥۸٦.

[۱۸] Yijian, S., H. Rufu, C. Dalilin, L. Hongnan, (۲۰۰۸). Fuzzy Set-Based Risk Evaluation Model for Real Estate Projects. *Tsinghua Science and Technology*. *۱۳, pp. ۱٥۸-۱۶۴.*

[۱۹] Faraji, Hamidreza and Siamak Nouri, (۲۰۰۹). Investigating the factors of delay in construction projects and presenting a model to reduce delay time, *Fifth International Conference on Project Management*.

[۲۰] Pourmoyed, Reza, Vahid Habibinejad, and Mohammad Qureshi, (۲۰۰۹). Application of fuzzy linear programming in finding the critical path of the project with fuzzy times, *the second international conference on research in Iranian operations*.

[۲۱] Olfat, L. and Khosravani, F., and Jalali, R. (۲۰۱۰). Identification and prioritization of project risk based on PMBOK standard with fuzzy approach (Case study: construction projects of non-level intersection in Bushehr province), *Industrial Management Studies:* V. ۸, N.*۱۹, pp ۱۴۷ –۱۶۳.*

[۲۲] Baradaran Kazemzadeh, R.; Sharif Mousavi, S.M. (۲۰۱۱). Developing a Fuzzy Risk Assessment Model to Assess the Schedule Risks in Construction Projects (Case: Track Renewal Project in Iran Railway Administration). *Management Research in Iran*, ۱٥(۱), ۱۰۹-۱۳۳.

[۲۳] Kazemi, A. and Fakhouri, P. (۲۰۱۲). Provide a fuzzy control system for estimating project completion time in Garrett networks. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*. ۲۰۱۲; ۲۳ (۲): ۲٥۱-۲٦۳.

[۲٤] Esmaelian, M., Jafarnajad, A. (۲۰۱۱). Preventive Maintenance Scheduling with Multi Skilled Workforce. *Management Research in Iran*, ۱٥(۲), ٤۷-۷۰.

[۲٥] Nabizadeh, M., Hasanpur, H., Norng, A. (۲۰۱٤). Robust Project Scheduling Model with Resources Constraint and Solving It by Simulated Annealing Algorithm (Part of the Project Activities of Gas Condensate Refinery in Bandar

Abbas). *Management Research in Iran*, ۱۸(۱), ۱-۲٤.

[۲٦] Ghafoori, S., Taghizadeh Yazdi, M. (۲۰۱۷). Proposing a Multi-Objective Mathematical Model for RCPSP and Solving It with Firefly and Simulated Annealing algorithms. *Modern Research in Decision Making*, ۱(٤), ۱۱۷-۱٤۲.

[۲۷] Hamta, N., Ehsanifar, M., Moghaddasi, A. (۲۰۱۸). An Investigation of Iranian Entrepreneurs' Decision Making Logic Based On Effectuation Theory. *Modern Research in Decision Making*, ۲(٤), ۲٥٥-۲۷۳.

[۲۸] Kazemi, A., Sarvandi, F. (۲۰۱۹). Mathematical Modeling of Resource-Constrained Project Scheduling Problem and Solving It by Using Metaheuristic Algorithms. *Modern Research in Decision Making*, ۳(٤), ۲۸-٥۰.

[۲۹] Khaledian, F., Momeni, M. (۲۰۲۱). Leveling of Project Resources under Fuzzy-Stochastic Conditions. *Modern Research in Decision Making*, ٦(۳), ۱۲۹-۱٥٤.

[۳۰] Yousefi Hanoomarvar, A., Amiri, M., Olfat, L., Naser Sadrabadi, A. (۲۰۲۱). Time-Cost-Quality Trade Off in PERT Networks Using Neural Network and Evolutionary Algorithms. *Modern Research in Decision Making*, ٦(۱), ۹۲-۱۲۲.