دانشکده مدیریت

رشته MBA گرایش عمومی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل مسیر بحرانی فعالیت‌ها در شرایط عدم اطمینان با اطلاعات خاکستری

نگارنده: فرزانه حلاجی

استاد راهنما

دکتر محمدعلی مولایی

بهمن۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مدیریت و صنایع

گروه :مدیریت

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فرزانه حلاجی

تحت عنوان: تحلیل مسیر بحرانی فعالیت‌ها در شرایط عدم اطمینان با اطلاعات خاکستری

در تاریخ ۹۲۷ /۱۰ /۹۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	**امضاء**	**اساتید مشاور**	**امضاء**
دکتر محمدعلی مولایی		دکتر رضا شیخ	
اساتید داور	**امضاء**	**نماینده تحصیلات تکمیلی**	**امضاء**
دکتر میر لوحی		نام و نام خانوادگی :	
دکتر حکمی			

تقدیم با بوسه بر دستان پدرم و به مادر عزیزتر از جانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی، همواره یاوری دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

تقدیرنامه

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه سار بنده نوازی هایش پایان نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگر شان نبود، هرگز این پایان نامه به انجام نمی رسید.

از استاد راهنما؛ جناب آقای دکتر محمد علی مولایی و استاد مشاور: جناب آقای دکتر رضا شیخ که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند، از پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛ از خواهر و برادران عزیز و مهربانم به جهت همراهی و همفکری در خلال سالیان تحصیلم، صمیمانه تشکر و سپاسگذارم.

از ریاست محترم دانشکده مهندسی صنایع و مدیریت، اساتید عزیزم، آموزش دانشکده، و سایر دوستان و سرورانی که به نحوی از الطاف بی ریایشان بهره مند گشتم، تشکر و قدردانی می نمایم.

فرزانه حلاجی

بهمن ۹۴

تعهد نامه

اینجانب فرزانه حلاجی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته MBA دانشکده مدیریت و صنایع دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین مسیر بحرانی فعالیت‌ها در شرایط عدم اطمینان با اطلاعات خاکستری تحت راهنمائی دکتر محمد علی مولایی متعهد می شوم .

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .**
- **در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .**
- **مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .**

تاریخ ۹٤/۱۰/۲۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

چکیده

مدیریت و کنترل مسیر بحرانی و فعالیت‌های قرارگرفته بر روی این مسیر شرط لازم برای موفقیت در زمانبندی پروژه‌ها محسوب می‌شود. تکنیک مسیر بحرانی در صورت وجود پارامترهای قطعی بسیار کاراست. اما در دنیای واقعی معمولاً نمی‌توان پارامترهای یک پروژه مانند هزینه و زمان و ... را با اعداد قطعی و مشخص تعریف کرد. در نتیجه برنامه‌ریزی شبکه های ایجاد شده به دلیل وجودعدم قطعیت در پارامترهای مختلف آن با نیازهای پروژه تطابق ندارد. از این رو، مطالعه شرایط عدم قطعیت به دلیل نبوداطلاعات کافی در برنامه ریزی شبکه ها، از اهمیت قابل توجه‌ایی برخودار است، چرا که تنها از این طریق، می‌توان از تخصیص بهینه منابع و پیشرفت پروژه طبق برنامه زمانبندی شده، اطمینان حاصل کرد. تحلیل فعالیتهای پروژه بر اساس اطلاعات ناقص مبتنی بر در جه اعداد خاکستری، یکی از روش های رویارویی با این عدم قطعیت است. دراین پژوهش در قالب مثال موردی پروژه عمرانی بلوک B بنیاد مسکن شهرستان نیشابور تلاش شده است تا فعالیت های پروژه بر اساس هسته، درجه و فرم تنزیل‌شده اعداد خاکستری مورد تحلیل قرار گیرد و در نهایت با استفاده از حرکات پیش‌رو و پس رو، مسیر بحرانی و زمان تکمیل پروژه تعیین شود.

واژگان کلیدی: کنترل پروژه، مسیر بحرانی، تئوری اعداد خاکستری.

مقالات مستخرج

۱. حلاجی ف، مولایی م و شیخ ر، (۱۳۹۴)، "روشی جدید برای محاسبه مسیر بحرانی در شبکه های خاکستری"، اولین کنفرانس بین المللی کارآفرینی، خلاقیت و نوآوری، پذیرش نهایی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ۱

کلیات پژوهش ۱

۱-۱) مقدمه ۲

۱-۲) بیان مسئله ۲

۱-۳)ضرورت و توجیه انجام پژوهش ۶

۱-۴) هدف پژوهش ۸

۱-۵) سوالات و فرضیات پژوهش ۸

۱-۶)روش پژوهش و مدل مفهومی پژوهش ۹

۱-۷)قلمرو پژوهش ۱۰

۱-۸) نوآوری پژوهش ۱۰

۱-۹) توصیف اصطلاحات و واژگان کلیدی ۱۰

۱-۹-۱) کنترل پروژه ۱۰

۱-۹-۲) مسیر بحرانی پروژه ۱۱

۱-۹-۳) تئوری سیستم‌های خاکستری ۱۱

فصل دوم ۱۳

مرور ادبیات و پیشینه پژوهش ۱۳

۲-۱) مقدمه ۱۳

۲-۲) اطلاعات ناقص ۱۴
۲-۳) عدم قطعیت ۱۷
۲-۳-۱) عدم قطعیت تصادفی ۱۸
۲-۳-۲)عدم قطعیت خاکستری ۱۹
۲-۳-۳)عدم‌قطعیت نامشخص ۲۰
۲-۳-۴)عدم قطعیت فازی ۲۱
۲-۴) مقایسه سه تئوری عدم قطعیت ۲۲
۲-۵-۱) اعداد خاکستری ۲۵
۲-۵-۲) طبقه‌بندی اعداد خاکستری ۲۵
۲-۵-۳) محاسبات ریاضی اعداد خاکستری ۲۷
۲-۵-۴) ارزش سفید کنندگی اعداد خاکستری ۲۹
۲-۵-۵) هسته عدد خاکستری ۳۱
۲-۵-۶) درجه خاکستری ۳۲
۲-۵-۷) محتوای اطلاعاتی خاکستری ۳۷
۲-۵-۷) فرم تنزیل شده عدد خاکستری ۳۹
۲-۵-۸) روابط رتبه‌بندی اعداد خاکستری ۴۱
۲-۶) مفهوم بحرانی بودن در پروژه ۴۴
۲-۶-۱) تعریف یک مسیربحرانی قطعی ۴۵
۲-۶-۱) تعریف یک مسیربحرانیخاکستری ۴۵
۲-۷) پیشینه تجربی ۴۶
۲-۷-۱) مطالعات خارجی ۴۶

۲-۷-۲) مطالعات داخلی ۵۱

فصل سوم ۵۵

متدولوژی تحقیق ۵۵

۳-۱) مقدمه ۵۶

۳-۲) نوع پژوهش ۵۷

۳-۲-۱)تحقیقات بنیادی..... ۵۸

۳-۲-۲)تحقیقات کاربردی ۵۸

۳-۲-۳)تحقیقات عملی ۵۸

۳-۲-۴)تحقیق توصیفی..... ۵۹

۳-۲-۵)تحقیق پیمایشی..... ۵۹

۳-۳) روش گردآوری داده‌ها ۵۹

۳-۴) جامعه و نمونه‌آماری ۶۰

۳-۵) تعیین مسیر بحرانی در شرایط عدم قطعیت ۶۰

۳-۵-۱) تعیین مسیر بحرانی با استفاده از بهترین زمان و بدترین زمان ۶۲

۳-۵-۱-۱) متد تعیین مسیر بحرانی خاکستری اولیه ۶۵

۳-۵-۱-۲)-متد تعیین مسیر خاکستری بحرانی ثانویه ۶۵

۳-۵-۲)تعیین مسیر بحرانی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ۶۵

۳-۵-۳) تعیین مسیر بحرانی با استفاده از حد کنترل پایینی، انتظار نسبی و واریانس نسبی ..۶۷

فصل چهارم ۶۹

تجزیه و تحلیل داده‌ها ۶۹

۴-۱) مقدمه ۷۰
۴-۲) مطالعه موردی ۷۱
۴-۳) روش تعیین مسیر بحرانی خاکستری ۷۵
فصل پنجم ۸۷
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۷
۵-۱) مقدمه ۸۸
۵-۲) نتیجه‌گیری ۸۹
۵-۳) محدودیت‌های تحقیق ۹۱
۵-۴) پیشنهادات ۹۰
۵-۴-۱)پیشنهادات کاربردی ۹۲
۵-۴-۲) پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۹۳
منابع ۹۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱) اهداف مدیریت پروژه ۷

شکل ۱-۲) مدل مفهومی پژوهش ۱۵

شکل۲-۱) تابع وزنی سفیدکننده برای مقدار نیتروژه سریع‌العمل در خاک ۲۹

شکل ۳-۱) تابع وزنی سفیدکننده ۵۴

شکل۴-۱) رابطه $\boldsymbol{A} \preceq_{\boldsymbol{LR}} \boldsymbol{B}$ ۷۷

شکل ۴-۲) رابطه $\boldsymbol{A} \preceq_{\boldsymbol{CW}} \boldsymbol{B}$ ۷۷

شکل۴-۳) رابطه $\boldsymbol{A} \preceq_{\boldsymbol{LC}} \boldsymbol{B}$ ۷۷

شکل ۵-۱) شبکه فعالیت‌های پروژه ۷۱

شکل ۵-۲) مدیریت زمان پروژه ۸۸

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱) مقدمه

پروژه به معنای تلاشی موقت به منظور خلق محصول و یا خدمتی مشخص، عبارت است از مجموعه اقدامات پیچیده و منحصربه‌فردی، که از فعالیت‌های منطقی و مرتبط به یک‌دیگر تشکیل شده‌است و زیر نظر یک مدیریت و سازمان اجرایی مشخص برای تأمین هدفی مشخص در چارچوب برنامه‌ریزی و بودجه‌ی از پیش تعیین شده، اجرا می‌شود و دارای مشخصات زیر است[۱].

-1-دارای هدفی معین است.

-2-زمان شروع و خاتمه آن تعریف شده است.

-3-بودجه آن محدود است.

-4-منابع در درسترس را مصرف می‌کند

-5-جدید است.

سیستم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، مجموعه‌ای از پرسشنامه‌ها، فرم‌های دریافت اطلاعات، سیستم‌ها یا برنامه‌های از پیش‌ساخته، روش‌ها، فنون و منابعی است که مرتبط و وابسته به یکدیگر هستند. هدف سیستم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه هدایت پروژه بر طبق برنامه زمان‌بندی و بودجه تعیین‌شده و همچنین تأمین نتایج، هدف‌ها و محصولات نهایی پروژه است. به عبارت دیگر، مأموریت این سیستم یاری دادن به مدیر پروژه و توانا ساختن وی در زمینه‌ی بهینه کردن سه عامل زمان، هزینه و قلمرو در اجرای یک پروژه است[۱].

شبکه، یک نمودار گرافیکی یا تصویری از پروژه است که فعالیت‌های پروژه و روابط میان آن‌ها را نمایش می دهد[۱]. هرشبکه مجموعه‌ای از گره‌ها و کمان‌ها می‌باشد که بنا بر نوع کاربرد شبکه، گره‌ها و یا کمان‌ها نماینده فعالیت‌های پروژه خواهند بود [۲].

مسیر کامل شبکه، مسیری از گره ابتدا تا گره انتها است. طول مسیر برابر با مجموع زمان انجام فعالیت‌های روی مسیر است. مدت زمان اتمام پروژه برابر با طول طولانی‌ترین مسیر کامل شبکه است. طولانی‌ترین مسیر، مسیر بحرانی نامیده می‌شود. پروژه زمانی تکمیل می‌شود که تمام فعالیت‌های موجود در مسیر تکمیل شده‌باشد[۳]. لازم به ذکر است که با هر تأخیر در اجرای فعالیت‌های موجود در مسیر بحرانی، اتمام پروژه بر اساس زمانبندی اولیه با تأخیر انجام خواهد پذیرفت. در روش مسیر بحرانی با استفاده از مدت زمان، ارتباطات، وابستگی ها و توالی فعالیت‌ها؛ زودترین و دیرترین زمان‌های شروع و خاتمه هر فعالیت با محاسبه یکباره کل فعالیت‌ها بطور قطعی تعیین و مشخص می‌گردد توجه اصلی این روش روی محاسبه زمان‌های شناوری و میزان انعطاف در زمان‌های اجرای فعالیت می باشد[۱].

یکی از جنبه های مهم رشد تکنولوژی، افزایش در پیچیدگی‌های فنی، اقتصادی، سیاسی و اجتماعی است. پروژه‌ها معمولاً یک سری تهعدات وسیع، هزینه‌بر و با ریسک بالا را شامل می‌شوند که باید در یک تاریخ معین، با بودجه‌ای مشخص و در سطح کارایی مورد انتظار به پایان برسند.مطالعات نشان می‌دهند که پروژه‌ها معمولاً دیرتر از زمان موردانتظار و با صرف بودجه‌ای بیشتر از بودجه تعیین شده به پایان رسیده‌اند و کیفیت خواسته شده را نداشته‌اند. وجود ریسک و عدم قطعیت در پروژه موجب کاهش دقت در تخمین مناسب اهداف می‌شود و از کارایی پروژه‌ها می‌کاهد؛ بنابراین نیاز به شناخت و مدیریت ریسک در پروژه کاملاً روشن است[۴].

۱-۲) بیان مسئله

برای کنترل یک پروژه با توجه به ویژگی‌های فعالیت‌های آن روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آنها متد مسیر بحرانی یا CPM می‌باشد[۱].

روش مسیر بحرانی (CPM) که در سال ۱۹۶۰ توسعه یافت، یکی از ابزارهای مهم و کاربردی در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌ها است. این روش شامل تعیین مسیر بحرانی، فعالیت‌های بحرانی و وقایع بحرانی در شبکه پروژه، با در نظر گرفتن زودترین زمان ممکن اتمام پروژه است[۵].

فعالیت‌های موجود بر روی مسیر بحرانی، تعیین‌کننده شکست و یا موفقیت پروژه هستند و طول این مسیر (مجموع مدت فعالیت‌هایی که بر روی این مسیر قرار دارند) نشانگر بهترین مدت برای تکمیل پروژه است[۶].

اگر هدف تکمیل پروژه طی این مدت باشد آنگاه تمامی فعالیت‌هایی که روی مسیر بحرانی قرا گرفته‌اند دارای شناوری صفر خواهند بود. به این معنا که این فعالیت‌ها بایستی دقیقاً در زمان‌های ثابت و و از پیش تعیین شده آغاز یابند و پایان یابند. رویدادهایی که نیز روی این مسیر قرار دارند بایستی دقیقاً در زمان‌های ثابت و و از پیش تعیین شده رخ دهند، در غیر این صورت امکان تکمیل پروژه طی این مدت وجود نخواهد داشت. بنابراین اطلاعات در مورد مسیرهای بحرانی، فعالیت‌های بحرانی و رویدادهای بحرانی در یک پروژه برای شخص تصمیم‌گیر بسیار حیاتی هستند چرا که این اطلاعات منعکس‌کننده حیاتی‌ترین عناصری هستند که تصمیم‌گیرنده جهت تکمیل موفقیت آمیز پروژه در زمان ثابت و از پیش مشخص‌شده بایستی بر آنها متمرکز شود[۲].

مسیر بحرانی کلید اساسی کنترل پروژه می باشد، در مدیریت و کنترل پروژه، هنگامی که زمان فعالیت‌ها قطعی باشد، استفاده از تکنیک‌های کلاسیک، مانند مسیر بحرانی ابزار مناسبی در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه است[۷].

اما مطالعات نشان می‌دهند که پروژه‌ها معمولاً دیرتر از زمان موردانتظار و با صرف بودجه‌ای بیشتر از بودجه تعیین شده به پایان رسیده‌اند و کیفیت خواسته شده را نداشته‌اند. وجود ریسک و عدم قطعیت در پروژه موجب کاهش دقت در تخمین مناسب اهداف می‌شود و از کارایی پروژه‌ها می‌کاهد[۷].

در حقیقت، در دنیای واقعی، پروژه در محیطی اجرا می‌شود که عدم قطعیت یکی از مشخصه‌های اصلی این محیط است. یکی از این عدم قطعیت‌ها در فرایند برنامه‌ریزی پروژه، تخمین مدت زمان

فعالیت‌ها است، تخمین غیرواقعی مدت زمان پروژه، باعث ایجاد خطا در برآورد هزینه‌های پروژه، برنامه‌ریزی منابع پروژه، سلب اعتماد و تحمیل جریمه‌ها در عقد قراردادها، تناقض در گزارشات پیشرفت پروژه و غیره می‌شود. یکی از دلایل اصلی تخمین غیرواقعی در مدت زمان پروژه، عدم استفاده از روش‌های مناسب در تخمین مدت زمان فعالیت‌های پروژه است. مدت زمان فعالیت‌ها، معمولاً توسط متخصصین و با توجه به قدرت قضاوت و تجربه آنها تخمین زده می‌شود. متخصصین برای بیان مدت زمان هر فعالیت، کلماتی همچون تقریباً، کمی‌بیشتر، حدوداً، کمی‌کمتر و کم و بیش را به زبان می آورند. این کلمات به روشنی نوعی از عدم قطعیت را نشان می‌دهد. روش‌های متعددی برای به کارگیری این عدم قطعیت در تخمین زمان فعالیت‌ها وجود دارد[۳].

از جمله روش‌های رویارویی با عدم قطعیت در تخمین زمان‌ها، شبکه‌هایی هستند که در آن زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد فازی و یا متغیرهای تصادفی مشخص شده‌اند . در مورد متغیرهای تصادفی برای به کارگیری این عدم قطعیت در تخمین مدت زمان فعالیت‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که مهمترین و پرکاربردترین آن‌ها، شبیه سازی مونت کارلو و روش‌های احتمالی مانند PERT و GERT است [۳].

این روش‌ها از توزیع‌های احتمالی از قبیل توزیع نرمال و توزیع بتا برای تخمین مدت زمان فعالیت‌های پروژه استفاده می‌کنند. برای استفاده از توزیع های احتمال به نمونه‌های تصادفی تکرارپذیر نیاز است و این امر به علت منحصر به فرد بودن فعالیت‌های پروژه و یا کم سابقه بودن آن‌ها به خوبی امکان‌پذیر نیست. علاوه بر آن هنگام استفاده از یک توزیع احتمال، متغیرهای زمان بندی به رفتار توزیع وابسته می‌شود و این موضوع باعث ایجاد محدودیت در زمان‌بندی پروژه می‌شود[۳].

در مورد اعداد فازی، مزیت اساسی استفاده از این متدولوژی اینست که هنگام استفاده از این روش، نیازمند اطلاع از توزیع فراوانی فعالیت نیستیم. در روش فازی می‌توانیم با داده‌های ورودی غیردقیق بر پایه قضاوت ذهنی فرد به حل مسئله بپردازیم[۷].

ایده اصلی متد اعداد فازی تبدیل اعداد فازی به اعداد بازه‌ای است[۶].

ساده ترین راه نمایش عدم قطعیت در مورد زمان انجام فعالیت‌ها ، در نظر گرفتن بازه است. در حقیقت به زمان انجام هر فعالیت بازه‌ای را اختصاص می‌دهیم که زمان حقیقی انجام فعالیت مقداری در این بازه را اتخاذ خواهد کرد اما اینکه دقیقاً کدام مقدار را اتخاذ خواهد کرد، مشخص نخواهد بود[۹].

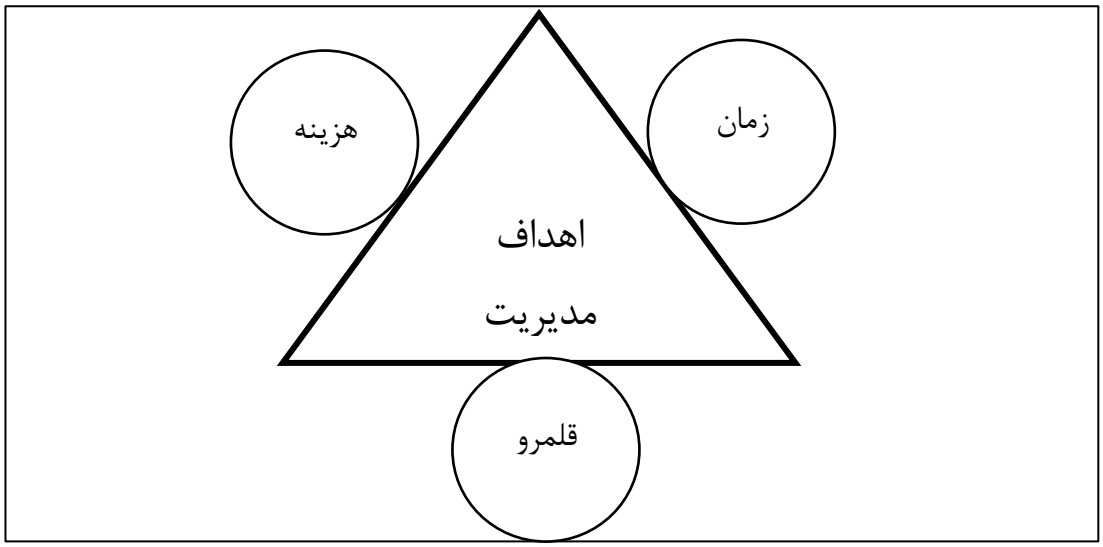
در بسیاری از موارد ما در مورد زمان انجام فعالیت‌ها صرفاً با بازه‌های خاکستری روبرو هستیم درحالی‌که هیچ اطلاعی در مورد توزیع آنها نداریم[۸].

در واقع برای تخمین مدت زمان فعالیت‌ها، نظرات کارشناسان که به صورت متغیرهای زبانی بیان می شوند،در قالب اعداد بازه‌ای نشان داده‌شده‌است[۹].

۱-۳)ضرورت و توجیه انجام پژوهش

مطالعات نشان می‌دهند که پروژه‌ها معمولاً دیرتر از زمان موردانتظار و با صرف بودجه‌ای بیشتر از بودجه تعیین شده به پایان می‌رسند و کیفیت خواسته شده را ندارند[۱۱].

حال آنکه موفقیت پروژه به معنای تکمیل پروژه در محدوده زمانی، هزینه و قلمرو تعیین شده می باشد (شکل ۱-۱) [۹]. از این رو برای موفقیت پروژه، مدیر پروژه باید بتواند عدم قطعیت‌های پروژه را شناسایی، ارزیابی و آن‌ها را کنترل کند[۵].



شکل ۱-۱) اهداف مدیریت پروژه

یکی از این عدم قطعیت‌ها مربوط به مدت زمان لازم برای انجام فعالیت‌هاست، به دلیل وجود فاکتورهای مختلف عدم‌قطعیت، برنامه‌ریزی و زمانبندی شبکه‌ها با نیازهای پروژه مطابقت ندارد.در واقعیت، زمان انجام فعالیت‌های یک شبکه را نمی‌توان با اعداد قطعی مشخص کرد[۱۱].

متدهای کمی موجود برای برنامه‌ریزی و زمانبندی شبکه‌ها مانند تکنیک مسیر بحرانی (CPM) که بر اساس جستجوی فعالیت‌های بحرانی با استفاده از محاسبه شناوری و در نهایت تعیین مسیر بحرانی پایه‌ریزی شده‌است بر فرض قطعی بودن زمان انجام فعالیت‌ها استوار است[۱۲]. از سوی دیگر جهت استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و PERT اطلاع از توزیع احتمال رخداد زمان انجام فعالیت‌ها نیاز است[۱۰]. در شرایطی که زمان انجام فعالیت‌ها، به صورت متغیرهای زبانی و تنها به صورت بازه (عدد خاکستری) بدون اطلاع از توزیع احتمال آن موجود باشد، تکنیک‌های CPM و یا PERT که این بازه‌ها (اعداد خاکستری) را با اعداد قطعی بیان می‌کنند، مفید نخواهند بود، یک عدد قطعی در حقیقت یکی از بینهایت ارزش‌های سفید کنندگی یک عدد خاکستری است. در نتیجه از عدد قطعی یا مقدار مورد انتظار یک توزیع احتمال، برای نمایش یک بازه (عدد خاکستری) نمی‌توان استفاده کرد[۱۳].

به همین دلیل مطالعه زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها در شرایط عدم‌قطعیت و در صورتی که زمان انجام فعالیت‌ها به صورت بازه(عدد خاکستری) مشخص شده‌است، به منظور تعیین راهکاری برای اطمینان از تکمیل پروژه طبق زمانبندی و همچنین دستیابی به تخصیص بهینه منابع، بسیار دارای اهمیت است[۱۰].

۱-۴) هدف پژوهش

زمان‌بندی صحیح پروژه، شرط لازم برای موفقیت پروژه است. در مدل‌های سنتی زمان فعالیت‌ها به صورت اعداد قطعی درنظر گرفته می‌شد. در دنیای واقعی محاسبه قطعی و دقیق زمان انجام هر فعالیت به دلیل وجود فاکتورهای مختلف ریسک، مقدور نمی باشد و همواره با عدم قطعیت مواجه است. هدف از این پژوهش توسعه متد مسیر بحرانی خاکستری جهت پاسخگویی به شرایط عدم قطعیت و در صورت وجود اطلاعات ناقص و به‌کارگیری آن در برنامه‌ریزی یک پروژه عمرانی در واقعیت می‌باشد[۱۳].

۱-۵) سوالات و فرضیات پژوهش

این پژوهش فرضیه‌ای نداشته و به دنبال یافتن پاسخ سوالات زیر می‌باشد:

۱. در شبکه‌ای که زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد خاکستری مشخص شده‌است مسیر بحرانی چگونه تعیین می‌شود؟

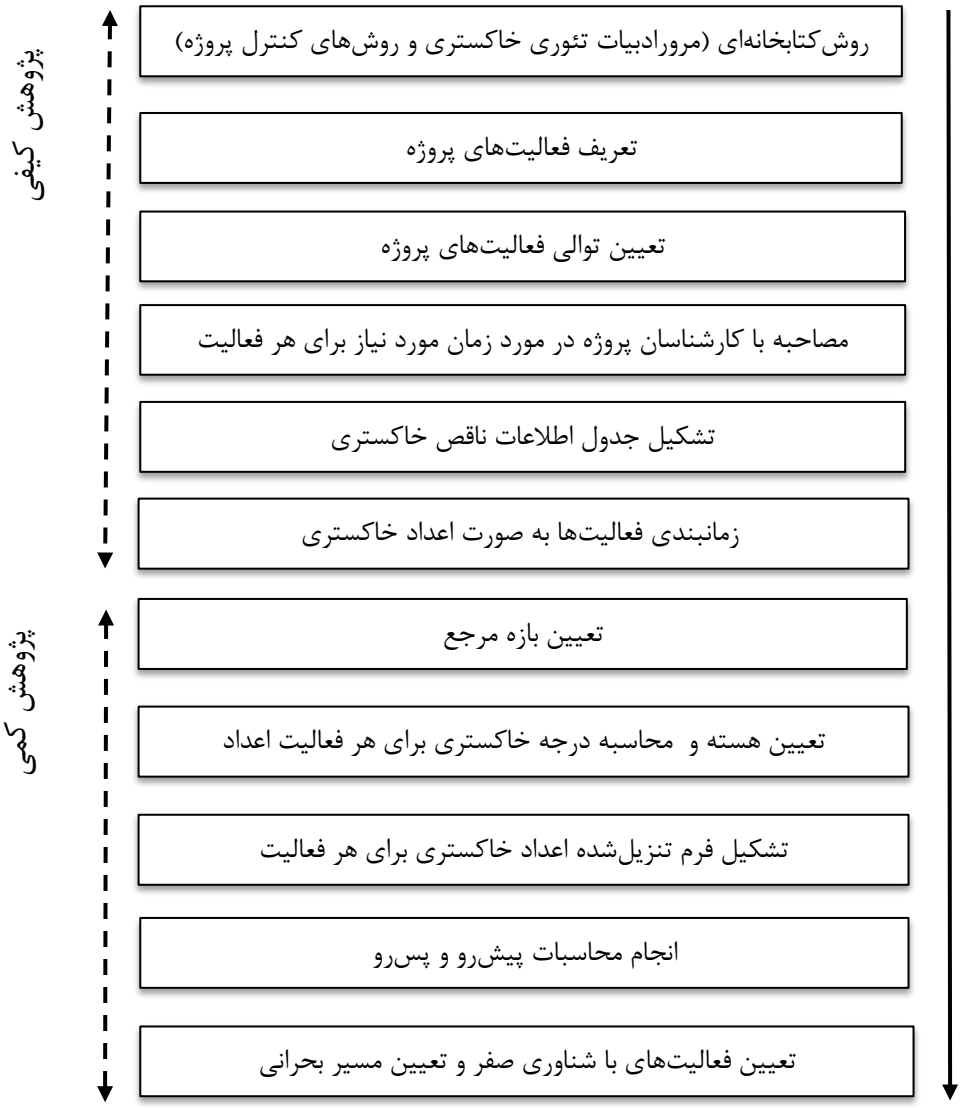
۲. در شبکه‌ای که زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد خاکستری مشخص شده‌است فعالیت‌های بحرانی چگونه تعیین می‌شود؟

۳. در شبکه‌ای که زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد خاکستری مشخص شده‌است رویدادهای بحرانی چگونه تعیین می‌شود؟

۴. در شبکه‌ای که زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد خاکستری مشخص شده‌است، زمان تکمیل پروژه چگونه تعیین می‌شود.

۱-۶)روش پژوهش و مدل مفهومی پژوهش

در این پژوهش، ابتدا ادبیات مربوط به تئوری سیستم‌های خاکستری و روش‌های تعیین مسیر بحرانی مطالعه شد، و روش تعیین مسیر بحرانی با استفاده از فرم‌تنزیل‌شده اعداد مورد بررسی قرار گرفت، سپس در مطالعه موردی مراحل تعیین مسیر بحرانی برای پروژه عمرانی ساخت بلوک B بنیاد مسکن شهرستان اجرا شد، این مراحل در مدل مفهومی پژوهش در شکل ۱-۲ ترسیم شده است.



شکل ۲-۲) مدل مفهومی پژوهش

۱-۷)قلمرو پژوهش

قلمرو موضوعی پژوهش، پروژه‌هایی می‌باشد که در شرایط عدم‌قطعیت با اطلاعات ناقص برنامه‌ریزی می‌شوند، در این پروژه‌ها، ورودی زمان فعالیت‌ها با اعداد قطعی قابل تعریف نیست. و عدم قطعیت ورودی زمان با اعداد خاکستری بیان می‌شود. در مطالعه موردی، پروژه عمرانی مربوط به بنیاد مسکن شهرستان نیشابور، در شرایطی که مدت زمان فعالیت‌ها بر اساس نظر کارشناسان به صورت بازه‌های خاکستری عنوان شده‌است مورد بررسی قرار گرفته‌است و مسیر بحرانی آن تعیین شده‌است.

۱-۸) نوآوری پژوهش

در این پژوهش با استفاده از تعریف درجه خاکستری اعداد و هسته اعداد خاکستری، فرم تنزیل شده بازه‌های عددی[1] مربوط به زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها تعیین شد، سپس با استفاده از حرکات پیشرو-پسرو، زودترین و دیرترین زمان‌های شروع و پایان فعالیت و شناوری فعالیت‌ها محاسبه شد و فعالیت‌های بحرانی و مسیر بحرانی مشخص شد، جایگزینی بازه‌های خاکستری با فرم تنزیل شده با استفاده از مفهوم درجه خاکستری و هسته اعداد خاکستری، که محاسبات پیشرو و پسرو ر اتسریع و تسهیل می سازد و نیاز به مقایسه طول تمامی مسیرهای موجود از گره ابتدایی به گره انتهایی را رفع می سازد، نوآوری تحقیق محسوب می‌شود.

۱-۹) توصیف اصطلاحات و واژگان کلیدی

۱-۹-۱) کنترل پروژه

برنامه‌ریزی و هدایت پروژه در چارچوب زمان، هزینه و قلمرو مشخص است. کنترل پروژه، فعالیت‌های برنامه‌ریزی، سازماندهی، نظارت بر اجرا و هدایت اجرا را در بر می‌گیرد و سعی دارد تا با استفاده

[1] Reduced Form

درست از منابع، نتایج مشخص و مورد انتظار را با هزینه توافق شده قبلی در موعد درست خود تحویل دهد[۱۳].

۱-۹-۲) مسیر بحرانی پروژه

مسیر بحرانی پروژه در واقع، وقتگیرترین توالی رخدادها وفعالیت‌های لازم برای تکمیل پروژه است، مدت اجرای پروژه برابر با طول مسیر بحرانی است، مفهوم بحرانی بودن یک مسیر با تولد تکنیک مسیر بحرانی شکل گرفت، مسیر بحرانی از فعالیت‌های بحرانی تشکیل شده است و یک فعالیت تنها در صورتی بحرانی است که دیرترین وزودترین تاریخ شروع آن با هم برابر باشند ویا به عبارتی شناوری آن برابر با صفر باشد[۹].

۱-۹-۳) تئوری سیستم‌های خاکستری

پروفسور دنگ با چاپ مقاله‌ای تحت عنوان مسایل کنترل سیستم‌های خاکستری در مجله بین المللی سیستم‌ها و حروف کنترل[1] در سال ۱۹۸۲، تئوری سیستم‌های خاکستری را معرفی نمود که کاربردهای آن امروزه در پنج حوزه ارزیابی، مدل‌سازی، پیش‌بینی، تصمیم‌گیری و کنترل قابل دسته‌بندی است. سیستم‌های خاکستری بر پایه رنگ موضوعات تحت بررسی نام‌گذاری شده‌است. برای مثال، در تئوری کنترل، میزان تاریکی رنگ‌ها نشان‌دهنده میزان وضوح اطلاعات و داده‌ها است. بر این اساس سیستم‌های با اطلاعات کاملاً معلوم را سیستم سفید، سیستم‌های با اصلاعات ناشناخته یا بدون داده، سیستم سیاه و سیستم‌های با اطلاعات بخشی معلوم و بخشی ناشناخته را سیستم خاکستری می‌نامند. یک مجموعه خاکستری به صورت مجموعه‌ای از داده‌های غیرقطعی تعریف می شود که به وسیله‌ی اعداد خاکستری، معادلات خاکستری، ماتریس‌های خاکستری و غیره توصیف می‌شود[۱۴].

[1] Systems and Control Letters

فصل دوم

مرور ادبیات و پیشینه پژوهش

۲-۱) مقدمه

در فضای به شدت رقابتی امروز، توانایی مدیران پروژه در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فعالیت‌ها و کنترل پیشرفت پروژه در چارچوب زمان، هزینه و قلمرو از پیش تعیین‌شده جهت کسب مزیت رقابتی، بسیار حائز اهمیت است. تخمین جدول زمان‌بندی نامناسب و غیرواقعی باعث ایجاد خطا در برآورد هزینه بودجه جاری، برنامه‌ریزی منابع و تدارکات، سلب اعتماد و تحمیل جریمه‌ها در عقد قراردادها، تناقض در گزارشات پیشرفت پروژه و غیره می‌شود. [۳].

یکی از دلایل اصلی تخمین جدول زمان‌بندی نامناسب و غیرواقعی پروژه، عدم استفاده از تکنیک‌های مناسب در تخمین زمان‌بندی پروژه‌ها می‌باشد، این دلایل عبارتند از: عدم قطعیت در زمان فعالیت‌های پروژه، وجود سیکل‌ها و برگشت پذیری متعدد، عدم تکرارپذیری فعالیت‌های پروژه که تکنیک‌های خاصی برای تخمین جدول زمان‌بندی این پروژه‌ها نیاز است. [۱۵].

هنگامی‌که زمان انجام فعالیت‌ها قطعی و مشخص هستند، متد مسیر بحرانی (CPM) به عنوان یک ابزار کارا به چالش مدیریت پروژه پاسخ می‌دهد.در این تکنیک پارامترهای شبکه (تعریف فعالیت‌ها، توالی فعالیت‌ها و زمان فعالیت‌ها) به صورت قطعی تعیین می‌شوند. این روش ساده و کارآمد است و نرم‌افزارهای کارآمدی نیز برای آن ارائه شده‌اند که کاربری این تکنیک را بیشتر کرده‌است[۹].

با این وجود، در بسیاری از موارد، زمان انجام فعالیت‌ها را نمی‌توان با اعداد دقیق مشخص کرد، به منظور رویارویی کمی با این داده‌های نادقیق، تکنیک مرور و ارزیابی برنامه (PERT) و شبیه‌سازی مونت‌کارلو که بر پایه تئوری احتمالات می‌باشند، استفاده می‌شوند. در تکینک‌های شبکه‌های احتمالی پارامترهای شبکه مثل تعریف و توالی فعالیت‌ها، زمان فعالیت‌ها و روابط بین آن‌ها احتمالی هستند. شبکه‌های احتمالی بدون سیکل و همراه سیکل، نمونه بارز این شبکه‌ها می‌باشند.اما انتقادهایی در مورد استفاده از تکنیک پرت وجود دارد، به عنوان مثال در تحلیل این تکنیک، پیش‌فرض‌های

ساده‌کننده بسیاری به‌کار گرفته‌شده‌اند و هنگامی‌که چولگی زمان فعالیت‌ها بسیار است، توزیع بتا و واریانس آن ممکن است نتواند یک توزیع مناسب برای زمان فعالیت‌ها باشد. به‌طور کلی، نبود آمار و اطلاعات دقیق برای تخمین پارامترهای احتمالی در پروژه‌های واقعی و پیچیده و نبود روش‌های تحلیلی در شبکه‌های احتمالی با ترکیب مراحل مختلف پروژه از مشکلات کاربرد این روش در تخمین زمان‌بندی پروژه‌ها می‌باشد[۱۶].

یکی از ساده‌ترین روش‌های رویارویی با عدم قطعیت استفاده از تئوری اعداد خاکستری است، مزیت تئوری خاکستری بر تئوری فازی این است که تئوری خاکستری شراط فازی بودن را در برمی‌گیرد. به عبارت بهتر، تئوری خاکستری می‌تواند به خوبی در شرایط فازی عمل کند. به‌کارگیری تئوری فازی مستلزم تشخیص تابع عضویت مربوطه است. اما تئوری خاکستری بدون در نظر داشتن تابع عضویت و براساس محدوده اطلاعات دردسترس نیز به خوبی عمل می کند[9]. در این روش به زمان هر فعالیت یک بازه اختصاص داده می‌شود و ادعا می‌شود که زمان واقعی فعالیت، در این بازه قرار گرفته است.

۲-۲) اطلاعات ناقص

در آغاز این سوال را مطرح می‌کنیم که مفهوم اطلاعات به‌طورکلی چیست؟ در پاسخ می‌توان گفت اطلاعات یک نهاده عینی است که سطح نادانی و جهل فرد را نسبت به یک موضوع کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، عبارت امروز برف می‌بارد اطلاعات (یک عبارت خبری) است، که دیدگاه ما را نسبت به شرایط آب‌وهوایی ارتقاء می‌دهد[۱۷].

اگر A بیانگر بخشی از اطلاعات (جمله خبری) باشد، آنگاه $A \cup \overline{A}$ به معنای عدم وجود هر گونه اطلاعات می‌باشد. برای مثال، اگر A بیانگر این خبر باشد که قیمت سهام ما افزایش می‌یابد آنگاه $\overline{A}$ بیانگر این خبر خواهدبود که قیمت سهام ما کاهش می‌یابد و یا ثابت باقی می‌ماند، حال اجتماع آنها بیان می‌کند قیمت سهام ما می‌تواند افزایش یابد یا کاهش یابد و یا ثابت بماند، عملاً هیچگونه

اطلاعات خاصی داده نمی‌شود. اشتراک این دو مجموعه $A \cap \overline{A}$ بیان می‌کند قیمت سهام در هیچ جهتی تغییر نمی‌کند. [۱۱].

فرض کنید A بیانگر بخشی از اطلاعات (جمله خبری) است، عبارت $A\ \Delta x$ بیان می‌کند که عبارت خبری A اطلاعاتی را در مورد مقدار و ارزش x روشن می‌سازد. و عبارت $A\nabla x$ بیان می‌کند که A اطلاعات نامرتبطی را در مورد مجهول x مطرح می‌کند.

حال به عنوان مثال، دو اطلاعات (عبارت خبری) A و B را مطابق تعریف زیر در نظر بگیرید:

A: همه برای تماشای یک نمایش به سالن تئاتر رفتند.

B: میانگین صنعتی داوجونز، ۴۰۰ واحد افزایش یافته است.

اکنون موضوع مورد سوال و مجهول x از این قرار است: x=علی کجاست؟ بنابراین اطلاعات (عبارت خبری) A به مجهول پاسخ می دهد: $A\Delta x$، ولو اینکه مشخص نیست آیا این پاسخ درست یا خیر. بر پایه عبارت خبری A مشخص می‌شود که علی به تئاتر رفته‌است. در همین زمان، B هیچ‌گونه اطلاعاتی جهت پاسخ به مجهول x فراهم نمی‌کند: $B\nabla x$[۲۱]

حال اگر اطلاعاتی در مورد مقدار مجهول وجود داشته‌باشد اما این اطلاعات، پاسخ دقیقی را برای مقدار مجهول فراهم نکند، با اطلاعات ناقص روبرو هستیم، می‌توان اطلاعات ناقص را وجود ابهام در اطلاعات به‌گونه‌ای که چندین مقدار برای مجهول حاصل شود تعریف کرد،همچنین هر گونه تفاوت میان اطلاعات موجود و اطلاعات مورد نیاز برای تشخیص مقدار مجهول را اطلاعات ناقص تعریف می‌کنند[۱۸].

یک سیستم دارای اطلاعات ناقص خواهدبود اگر هر یک از چهار عبارت زیر در مورد آن صحیح باشد.

۱-اطلاعات در مورد عناصر(یا پارامترهای) سیستم ناقص باشد.

۲-اطلاعات در مورد ساختار سیستم ناقص باشد.

۳-اطلاعات در مورد مرزهای سیستم ناقص باشد.

۴-اطلاعات در مورد رفتار سیستم ناقص باشد[۲۰].

یکی دیگر از ویژگی‌های طبیعی اطلاعات عدم صحت آنست، عدم صحت به معنای اختلاف و انحراف از مقدار واقعی داده‌هاست، بر اساس این تعریف عدم‌صحت اطلاعات را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد: مفهوم، مقیاس و پیش‌بینی [۲۰].

الف-عدم‌صحت مفهومی: عباراتی مانند بزرگ، کوچک، زیاد، کم، چاق، لاغر، جوان، پیر، خوب، بد و ... به دلیل نبود تعریف واضح و مشخص دارای عدم‌صحت مفهومی هستند،استفاده از مقادیر کمی مشخص برای بیان مفهوم این عبارات دشوار است. یک فارغ‌التحصیل رشته MBA را در نظر بگیرید که در جستجوی شغلی با حقوق سالانه ۱۵۰۰۰۰ دلار است، یک شرکت تولیدی را در نظر بگیرید که برنامه‌ریزی کرده است نرخ کالای معیوب تولیدی را زیر ۰.۱ درصد کنترل کند، این دو مثال بیانگر آرزوها واهدافی هستند که دارای عدم‌صحت مفهومی هستند[۲۰].

ب-عدم صحت در مقیاس:این نوع از عدم‌صحت در داده‌ها به دلیل تغییر در مقیاس و سطح دقت مشاهده و تحقیق به‌وجود می‌آید. هنگامی‌که داده‌های موجود سیستم در سطح ماکروسکوپیک، کلی و یا مفهومی موجود باشند اما محقق نیازمند بررسی آنها در سطح جزئی و میکروسکوپیک باشد، داده‌ها دارای عدم‌صحت در مقیاس خواهندبود، به عنوان مثال طول قد یک فرد می‌تواند به طور صحیح در مقیاس متر و یا سانتیمتر اندازه‌گیری شود، اما اگر لازم باشد اندازه‌گیری‌ها در مقیاس یک‌ده‌هزارم صحیح باشد، اندازه‌گیری‌های صحیح قبلی دارای عدم صحت خواهند بود[۲۰].

ج-عدم صحت در پیش‌بینی (تقریب): از آنجایی که فهم و درک کامل قوانین شکل‌گیری و تکامل یک سیستم دشوار خواهد بود، تقریب و پیش‌بینی روندهای آینده همواره دارای عدم صحت خواهند بود. به عنوان مثال پیش‌بینی می‌شود که مقدار GDP یک کشور مشخص در دو سال آینده بیش از ۱۰ بیلیون دلار خواهد بود، یا پیش‌بینی می‌شود مقدار اندوخته حاصل از پس‌اندازهای فردی بانکی مشخص در سال ۲۰۱۶ برابر با ۷۰۰۰هزار تا ۹۰۰۰هزار خواهدبود و ...، تمامی این مثال‌ها بیانگر اعداد غیرقطعی و نامطمئن از نوع پیش‌بینی خواهند بود. در آمار واحتمالات، اغلب با جمع‌آوری نمونه‌هایی

که نماینده جامعه باشند به پیش‌بینی و تقریب جامعه می‌پردازند. در حقیقت، فارغ از متدی که جهت پیش‌بینی استفاده می‌شود، تقریب و پیش‌گویی مطلقاً صحیح آینده بسیار دشوار است.

در حالی‌که کامل بودن اطلاعات نسبی است، ناقص بودن اطلاعات مطلق است [۷]. انسان توانایی شناخت محدود خود را برای مشاهده جهان نامحدود به‌کار می‌برد، بنابراین کسب اطلاعات کامل برای او غیر ممکن خواهد بود. به عنوان نمونه در تولید کشاورزی حتی اگر فرد اطلاعات دقیق در مورد ناحیه کاشت، میزان حاصلخیزی، نوع دانه، میزان و نوع آبیاری داشته باشد به علت وجود اطلاعات ناقص در زمینه کیفیت نیروی کار، شرایط آب وهوایی، بازار کالا و... پیش‌بینی دقیق خروجی تولید و ارزش اقتصادی منتج دشوار خواهد بود. مفهوم نمونه های بزرگ که در آمار و احتمالات استفاده می‌شود در حقیقت نماینده درجه تلرانسی است که فرد می‌تواند در مورد ناقص بودن اطلاعات بپذیرد. در تئوری، زمانی که نمونه انتخابی شامل ۳۰ شیء باشد، آن را به اندازه کافی بزرگ و نماینده کل جامعه می‌دانند حال آنکه در واقعیت، در مواردی حتی نمونه‌هایی که شامل هزار و یا حتی ده هزار شیء باشند نمی‌توانند به درستی تمامی جامعه را پوشش دهند[۲۲].

۲-۳) عدم قطعیت

عدم قطعیت اطلاعاتی، به معنای وجود اطلاعات ناقص است و اساساً مربوط به کمیت و یا کیفیت اطلاعات است. [۲۰]، بر پایه مطالعات مدون،طبقه‌بندی زیر برای انواع عدم قطعیت وجود دارد:

عدم قطعیت تصادفی

عدم قطعیت خاکستری

عدم قطعیت نامشخص

عدم قطعیت مشخص

عدم قطعیت فازی

عدم قطعیت ناهنجار

عدم قطعیت منعطف سرس

عدم قطعیت کور

در ادامه برخی از این انواع عدم قطعیت به تفضیل توضیح داده می‌شود[۱۸].

۲-۳-۱) عدم قطعیت تصادفی

اگر x نامعلوم ومجهول باشد، S یک مجموعه ناتهی باشد، U نشان دهد که x عضوی از مجموعه S است و A بیان کند که x عضوی از مجموعه S است، درحالی‌که احتمال اینکه $x = e \epsilon S$ برابر با α_e است ($0 \leq \alpha_e \leq 1$ و $\sum_{e \epsilon s} \alpha_e = 1$). A بخشی از اطلاعات تصادفی نامیده می‌شود وعدم قطعیت منتج، عدم قطعیت تصادفی نامیده می‌شود. چنین عدم قطعیتی به دلیل وجود اطلاعات تصادفی A که تنها می‌تواند احتمال برابری مجهول x را با عنصر ویژه e بیان کند ایجاد شده است. این احتمال می تواند بسیار نزدیک به یک و یا حتی برابر با یک باشد با این حال باید توجه کرد که احتمال‌های بزرگ و نزدیک به یک، برابری مجهول x با عنصر خاص e را تضمین نخواهد کرد[۱۳]. در حقیقت عدم قطعیت تصادفی ناشی از ماهیت تصادفی مسئله است که با استفاده از آمار و احتمال و الگوها و توابع توزیع آماری توصیف می‌شود. مطالعه این جنبه از پدیده‌ها مبتنی بر نمونه‌هایی با حجم زیاد و این فرض است که این نمونه‌ها از یک الگوی مشخص، تحت عنوان توزیع احتمال پیروی می کنند [۱۰].

مثال-۲-۱-در یک کسب و کار مبادله کالا، بر پایه اطلاعات تاریخی، بازار برای شاخص۵۰۰ S&P(Standard & Poor's) یک شانس ۹۰ درصدی افزایش در یک پنجشنبه مشخص را داراست. بنابراین، تعدادی از تاجران وارد یک قرارداد فیوچرز خرید در پنجشنبه و فروش آن در یکی از روزهای محاسبه شده که ممکن است دوشنبه یا سه‌شنبه باشد، می‌شوند. با این وجود، ۹۰ درصد

احتمال افزایش شاخص در بازار فیوچرز، تضمین نخواهد کرد که هنگامی‌که ما در پنجشنبه خرید خود را انجام دهیم بازار مطابق با انتظار ما افزایش یابد[۱۵].

مثال -۲-۲-تصور نمایید که سازمان پیش بینی هوا اعلام می‌دارد که شانس باریدن برف در فردا ۷۰٪ می‌باشد. اگر فردا برف ببارد پیش بینی هوا درست خواهد بود چرا که سازمان بارش برف را پیش‌بینی کرده بود! اما حتی اگر فردا برف نبارد باز هم پیش‌بینی هوا درست پیشگویی کرده‌است چرا که احتمال باریدن برف را فقط ۷۰٪ اعلام کرده است! اگر عدد ۷۰٪ با عدد ۱۰۰٪ جایگزین شود، باز هم، همین مطلب را در مورد پیش‌بینی سازمان هوا می‌توان گفت، چرا که سازمان هواشناسی، فقط شانس بارش برف را ۱۰۰٪ اعلام کرده است و باریدن برف را تضمین نکرده است[۱۳].

۲-۳-۲)عدم قطعیت خاکستری

A بیانگر اطلاعات خاکستری می‌باشد، چنانچه به این صورت تعریف شود: فرض کنید x یک مجهول باشد، S یک مجموعه‌ی ناتهی باشد، S' زیرمجموعه‌ای از S باشد، U بیان کند که x عضوی از مجموعه S است و A بیان کند که x عضوی از مجموعه S' است، در این صورت عدم قطعیت و عدم اطمینانی که در مورد مقدار مشخصی که مجهول x اتخاد خواهد کرد از نوع خاکستری خواهد بود. به عنوان مثال فرض کنید: U بیان کند که x عضوی از مجموعه S است و S برابر با R (مجموعه اعداد حقیقی) و S' برابر با بازه [۲,۳] باشد وA بیان کند که x عضوی از مجموعه S' است، در این صورت اطلاعات خاکستری A عدم قطعیت خاکستری را بیان می‌کند ما می‌دانیم x عددی بین ۲ و ۳ است اما دقیقاً نمی دانیم که چه مقداری را اتخاذ می‌کند[۱۵].

مثال ۲-۳- در فرایند مذاکره خرید یک ماشین، خریدار می داند که بیشتر از ۳۰۰۰۰ دلار پرداخت نخواهد کرد، اگر x بیانگر قیمت نهایی مذاکره که مطلوب خریدار است باشد، آنگاه x عددی بین ۰ و ۳۰۰۰۰ خواهد بود. بنابراین عدم قطعیتی که در مورد قیمت نهایی خرید وجود دارد یک عدم قطعیت خاکستری است[۱۳].

۲-۳-۳)عدم‌قطعیت نامشخص

اگر در تعریف اطلاعات تصادفی، شرط برابری مجموعه احتمالات با یک $(\sum_{e\in S}\alpha_e = 1)$ را با شرط کوچکتر مساوی یک $(\sum_{e\in S}\alpha_e \leq 1)$ جایگزین کنیم، آنگاه با عدم قطعیت نامشخص روبرو هستیم. تفاوت اصلی بین عدم‌قطعیت تصادفی و عدم قطعیت نامشخص در این است که مفهوم پیشین بر اساس این فرض ایجاد شده است که تمامی خروجی‌های یک آزمایش معلوم هستند در حالی‌که در مورد عدم‌قطعیت نامشخص فرض براین است که تنها بخشی از خروجی‌های ممکن آزمایش برای محقق شناخته شده است[۱۶].

مثال ۲-۴- گروهی از محققین، تشکیل یک جلسه را در ساعت ۱۱:۳۰ صبح پنجشنبه برنامه‌ریزی کرده‌اند. با این وجود، مهدی، یک عضو کلیدی جلسه در ساعت ۱۱:۴۵ هنوز در جلسه حاضر نشده است. بنابراین سایر اعضای گروه جهت رای‌گیری و تصویب تصمیمات گروه نیاز داشتن که در مورد مکانی که ممکن است بتوانند مهدی را آنجا بیابند،تصمیم بگیرند، اعضای گروه با دو موقعیت ممکن مواجه بودند[۱۶].

موقعیت ۱. گروه، مهدی را کاملا می‌شناسد، بنابراین گروه یک لیست از مکان‌هایی که وی ممکن است در حال حاضر آنجا باشد، در پیش رو دارد و همچنین به دلیل شناخت کاملی که سایر اعضای گروه از او دارد می تواند احتمال حضور وی در هر مکان را نیز در لیست مشخص کند. بنابراین به منظور یافتن مهدی تنها کافیست، این مکان‌ها به ترتیب بیشترین احتمال چک شوند. این مثال، نمونه‌ای از عدم‌قطعیت تصادفی است[۱۵].

موقعیت۲. هیچ یک از اعضای گروه، مهدی را به طور کامل نمی شناسد و در نتیجه نمی‌توان لیستی از تمامی مکان‌های ممکن و احتمال و اطلاعات مربوط به آن جهت مشخص نمودن مکانی که وی اکنون در آنجا قرار دارد را تهیه کرد. این مثال نمونه‌ای از عدم قطعیت نامشخص است[۱۵].

موقعیت دوم بیان می‌کند که حدود تقریبی مکانی مهدی در این زمان خاص مشخص است، از آنجایی که به عنوان یک موجود زنده، وی بایستی در هر حال در مکانی باشد. با این وجود، تصمیم گیرندگان

و سایر اعضای گروه، موقعیت مکانی مهدی را و یا اطلاعات مربوط به آن را که مهدی در تصمیم گیری در مورد رفتن و بودن در یک مکان در آن زمان مورد استفاده قرار داده است نمی دانند.این مفهوم عدم قطعیت نامشخصی است که در این موقعیت وجود دارد[۱۵].

۲-۳-۴)عدم قطعیت فازی

اطلاعات A، اطلاعات فازی نامیده می‌شوند هر گاه دارای شرایط ذیل باشد: فرض کنید x مجهول است، S یک مجموعه ناتهی است، U بیان می‌کند که x متعلق به مجموعه S است و A بیان می‌کند که x متعلق به S است درحالی‌که درجه عضویت برای x=eϵS برابر است با α_e و $0 \leq a_e \leq 1$ [۱۵].

مثال ۲-۵- ژاکلین راسکیتو عضو رسمی بسیاری از کمیته‌هاست، به دلیل ماهیت و طبیعت این کمیته‌ها، ژاکلین زمان کافی برای درگیری ۱۰۰٪ در وظایف و تصمیم‌گیری‌های تمامی این کمیته‌ها را ندارد. یک کمیته را در نظر بگیرید، به عنوان مثال کمیته الف. اگر ژاکلین به عنوان یک عضو دراین کمیته لیست شده باشد اما هیچ کاری تا کنون برای کمیته انجام نداده باشد، درجه عضویت وی در این کمیته نزدیک به صفر خواهد بود. اگر ژاکلین در این کمیته به عنوان یک عضو لیست نشده باشد وهیچ فعالیتی در کمیته تا کنون انجام نداده باشد، درجه عضویت وی در کمیته برابر با صفر خواهد بود. حال آنکه چنانچه وی در کمیته ای عضو نباشد اما در فعالیت‌های آن کمیته شرکت داشته باشد درجه عضویت وی در کمیته بزرگتر از صفر خواهد بود [۱۵].

به این ترتیب، عدم قطعیت فازی برای اطلاعات فازی A وجود دارد زمانی‌که اطلاعات A به صورت ذیل تعریف می‌شود:، A بیان می‌کند که x عضوی از مجموعه S است و درجه عضویت برای $x = e \in S$ برابر با $0 \leq \propto_e \leq 1$ و $\propto_e$ می‌باشد. در حقیقت هیچ سرنخی برای متغیر داده شده y وجود ندارد، آیا بایستی در مجموعه S درنظر گرفته شود یا خیر، ولواینکه مشخص است که درجه عضویت y در مجموعه S برابر با $\propto_e$ می‌باشد [۱۵].

مثال ۲-۶- ژاکلین به عنوان یکی از اعضای رسمی کمیته الف لیست شده است و در کلیه فعالیت‌های کمیته درگیر است.بنابراین درجه عضویت ژاکلین در کمیته الف، برابر با یک است، اکنون، عدم قطعیت فازی بیان می‌کند که درجه عضویت یک ژاکلین، درگیری و یا عضویت ۱۰۰٪ وی را درکمیته الف در آینده تضمین نمی‌کند، از طرف دیگر، جان اوکلند ، به عنوان یکی از اعضای کمیته الف لیست نشده است، از آنجایی که کمیته الف در پروژه‌ی ویژه‌ای که از نظر جان بسیار اهمیت دارد درگیر شده‌است و جان در این پروژه درگیر خواهد شد، می‌توان گفت درجه عضویت جان درکمیته الف بیشتر از صفر خواهد بود، ولواینکه در گذشته، درجه عضویت وی برابر با صفر بوده است[۱۵].

۲-۴) مقایسه سه تئوری عدم قطعیت

آمار واحتمالات، ریاضیات فازی و تئوری سیستم‌های خاکستری سه متد پرکاربرد مطالعه سیستم‌های دارای عدم قطعیت می‌باشد، هر یک از روش‌ها نوع خاصی از عدم قطعیت را مورد بررسی و مطالعه قرار می‌دهد. [۱۶].

ریاضیات فازی متمرکز بر مطالعه عدم قطعیت شناختی است، که در آن هدف ومعنای درونی مشخص اما محدوده نامشخص است. به عنوان مثال "مرد جوان" یک مفهوم فازی است چراکه همه مقصود و مفهوم درونی عبارت "مرد جوان" را درک می‌کنند، اما محدوده سنی که فرد یا قرار گرفتن در آن جوان نامیده می‌شود و در صورت قرار گرفتن در خارج از آن جوان نامیده نمی‌شود مشخص نیست. به عبارتی مفهوم "مرد جوان" دارای محدوده خارجی مشخصی نیست. برای این نوع از مسائل که دارای عدم قطعیت شناختی با مقصود مشخص اما محدوده نامشخص می‌باشند از ریاضیات فازی استفاده می‌شود.

تمرکز تئوری احتمالات و آمار بر عدم قطعیت تصادفی است که در آن داده های آماری مربوط به گذشته و چندین خروجی ممکن برای پدیده و نمونه های بزرگ جهت تعیین نوع مشخصی از توزیع آماری موجود است [۱۷] و [۱۸].

تئوری سیستم‌های خاکستری عدم قطعیتی را بررسی می کند که در آن اطلاعات کم و نمونه‌ها کوچک است، هیچ تجربه قبلی نداریم و نمی‌توانیم هیچ توزیعی را جهت توضیح پدیده معرفی کنیم، به گونه‌ای که امکان استفاده از ریاضیات فازی و احتمالی وجود ندارد [۲۰].

تفاوت اصلی تئوری خاکستری و تئوری فازی در اینست که برخلاف تئوری فازی، در تئوری خاکستری مقصود نامشخص اما محدوده مشخص است.به عنوان مثال در عبارت " چین در سال ۲۰۵۰ جمعیت خود را در محدوده ۱.۵ تا ۱.۶ بیلیون نفر کنترل خواهد کرد" محدوده مشخص و قطعی است اما در پاسخ به سوال جمعیت دقیقا" در چه عددی کنترل خواهد شد، نمی‌توان پاسخ قطعی و دقیقی فراهم کرد.بر اساس مطالب گفته شده می‌توان تفاوت میان سه روش مطالعه عدم‌قطعیت را در جدول خلاصه کرد[۲۱].

جدول ۲-۱) مقایسه سه روش عدم قطعیت

	ریاضیات فازی	آمار و احتمالات	سیستم‌های خاکستری
مجموعه‌های اساسی	مجموعه‌های فازی	نمونه های جامعه	مجموعه‌های‌مبهم‌خاکستری
شرایط تحقیق	عدم‌قطعیت شناختی	تصادف	اطلاعات کم
داده مورد نیاز	تابع‌عضویت‌شناخته شده	توزیع احتمالات	بدون توزیع
مشخصه	تجربه	نمونه بزرگ	نمونه کوچک

۲-۵) تئوری سیستم‌های خاکستری

سیستم‌های خاکستری بر پایه رنگ موضوعات تحت بررسی نام‌گذاری شده‌است، به گونه‌ای که میزان روشنی رنگ‌ها نشان‌دهنده میزان وضوح اطلاعات و داده‌ها است. بر این اساس، سیستم‌های با اطلاعات

کاملاً معلوم را "سیستم سفید"، سیستم‌های یا اطلاعات ناشناخته و یا بدون داده "سیستم سیاه" و سیستم‌های با اطلاعات بخشی معلوم و بخشی ناشناخته را "سیستم خاکستری" می‌نامند [۲۲].

در فرایند ایجاد تئوری سیستم‌های خاکستری، جولانگ دنگ[1] اصول اساسی زیر را در مورد سیستم‌های خاکستری استخراج کرد[۱۳]:

۱-اصل تفاوت اطلاعاتی: تفاوت بر وجود اطلاعات دلالت دارد، هر قطعه از اطلاعات باید نوعی از تفاوت را با خود داشته باشد، هنگامی که ما می گوییم که جسم الف با جسم ب متفاوت است، منظورمان این است که اطلاعات خاصی در مورد جسم "الف" وجود دارد که درباره جسم "ب" درست نیست .

۲-اصل عدم منحصر به فردی: راه حل هر مشکلی با اطلاعات ناقص و غیرقطعی ، منحصر به فرد نیست.

۳-اصل اطلاعات حداقلی: یکی از مشخصه های تئوری سیستم های خاکستری اینست که این تئوری بهترین استفاده را از حداقل مقادیر اطلاعات در دسترس ممکن می‌سازد.

۴- اصل تشخیص پایه: اطلاعات پایه و اساس است، مردم به وسیله آن به درک و شناخت طبیعت می پردازند. این اصل می گوید که همه شناخت ها باید بر اساس اطلاعات باشد. افراد بدون اطلاعات، هیچ راهی برای دانستن نخواهد داشت. افراد با اطلاعات کامل و قطعی ، امکان شناخت محکم و قطعی از پدیده‌ها را دارند اما بر اساس اطلاعات ناقص و غیر قطعی ، فقط امکان شناخت خاکستری ناقص و غیر قطعی از پدیده‌ها را دارند.

۵-اصل اولویت اطلاعات جدید: عملکرد بخش جدید اطلاعات بیشتر از بخش قدیمی اطلاعات است. اصل اولویت اطلاعات جدید، نکته کلیدی در مورد اطلاعات مورد استفاده در تئوری سیستم های خاکستری است. به این معنا که با وزن بیشتر دادن و اهمیت بیشتری قائل شدن برای اطلاعات

[1] Julong Deng

جدیدتر ، می توان نتیجه بهتری از مدل سازی خاکستری، پیش بینی خاکستری، تجزیه و تحلیل خاکستری ، ارزیابی خاکستری و تصمیم گیری خاکستری بدست آورد.

۶-اصل مطلق بودن خاکستری بودن: ناقص بودن اطلاعات امری مطلق است. [۶۰].

۲-۵-۱) اعداد خاکستری

در این بخش، با پایه‌های تشکیل‌دهنده یک سیستم خاکستری، که اعداد خاکستری می‌باشند آشنا می‌شویم[۵۹]. عدد خاکستری عددی است که مقدار دقیق آن معلوم نیست اما محدوده‌ای که مقدار واقعی در آن قرار می گیرد مشخص است. به عبارتی، عدد خاکستری یک بازه یا مجموعه‌ای از اعداد است[۵۸]. فرض کنیم X مجموعه مرجع باشد. آنگاه مجموعه خاکستری G از مجموعه مرجع X با دو نماد $\overline{\mu_G}$ و $\underline{\mu_G}$ براساس رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{cases}\overline{\mu_G}(X): X \to [0,1] \\ \underline{\mu_G}(X): X \to [0,1\}\end{cases} \qquad (۱-۲)$$

که در آن $\overline{\mu_G}(X) \geq \underline{\mu_G}(X)$ و $x \in X$ است. و به ترتیب حد بالا و حد پایین از تابع عضویت G می‌باشند. هنگامی‌که $\overline{\mu_G}(X) = \underline{\mu_G}(X)$ باشد، مجموعه خاکستری G تبدیل به مجموعه فازی می‌شود. این قابلیت نشان‌دهنده شمول تئوری خاکستری به حالت‌های فازی و انعطاف آن در مواجهه با مسائل غیرقطعی است[۱۳].

۲-۵-۲) طبقه‌بندی اعداد خاکستری

یک عدد خاکستری، عددی است که مقدار دقیق آن نامشخص است اما محدوده‌ای که مقدار در آن قرار دارد، شناخته شده است. به عبارتی، عدد خاکستری یک بازه یا مجموعه‌ای از اعداد است. چندین طبقه‌بندی برای اعداد خاکستری وجود دارد[۲۰].

الف)طبقه‌بندی بر اساس حد بالا وپایین

ب)اعداد خاکستری پیوسته و اعداد خاکستری گسسته

ج)اعداد سیاه وسفید

د) اعداد خاکستری اساسی و اعداد خاکستری غیراساسی

در ادامه این انواع طبقه‌بندی به تفصیل توضیح داده شده‌اند.

الف) طبقه‌بندی بر اساس حد بالا و پایین:

۱- اعداد خاکستری که فقط دارای حد پایین هستند:

اعداد خاکستری که دارای حد پایین هستند، اما حد بالا ندارند به صورت زیر نمایش داده می شوند:

$$\otimes \in \left[\underline{a}, \infty\right) \text{ or } \otimes(\underline{a}) \qquad (۲-۲)$$

در این تعریف $\underline{a}$ که بیانگر حد پایین عدد خاکستری می‌باشد، یک مقدار ثابت دارد. به عنوان مثال وزن یک درخت در یک جنگل یک عدد خاکستری با حد پایین است چرا که وزن آن عددی بزرگتر از صفر است[۲۰].

۲-اعداد خاکستری که فقط دارای حد بالا هستند.

اعداد خاکستری که فقط دارای حد بالا هستند، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\otimes \in (-\infty, \overline{a}] \text{or } \otimes(\overline{a}) \qquad (۳-۲)$$

در این تعریف $\overline{a}$ که نشان‌دهنده حد بالای عدد خاکستری $\otimes$ می‌باشد یک مقدار ثابت است[۲۰].

۳- اعداد خاکستری بازه‌ای

یک عدد خاکستری که دارای هر دو حد بالا $\overline{a}$ و پایین $\underline{a}$ می‌باشد، عدد خاکستری بازه‌ای نامیده می‌شود و به صورت $\otimes \in [\underline{a}, \overline{a}]$ نشان داده می‌شود[۲۰].

ب) اعداد خاکستری پیوسته و اعداد خاکستری گسسته

اعداد خاکستری که تعداد محدود و قابل‌شمارشی از مقادیر را در یک بازه اتخاذ می‌کنند، اعداد خاکستری گسسته نامیده می‌شوند. وآنهایی که مقادیر پیوسته‌ای را در یک بازه اتخاذ می‌کنند، اعداد خاکستری پیوسته نامیده می‌شوند[۱۷].

ج) اعداد سیاه و سفید

هنگامی‌که یک عدد خاکستری نه حد بالا و نه حد پایین داشته باشد $\otimes \in (-\infty, \infty)$، و یا حد بالا وپایین خود اعداد خاکستری باشند $\otimes \in (-\infty, \infty)$، $\otimes$ یک عدد سیاه نامیده می‌شود. و هنگامی‌که حد بالا و پایین یک عدد خاکستری برابر باشند، $\otimes \in [\underline{a}, \overline{a}]$ و $\overline{a} = \underline{a}$ ، ، $\otimes$ یک عدد سفید نامیده می‌شود[۲۰].

د) اعداد خاکستری اساسی و اعداد خاکستری غیر اساسی

عدد خاکستری اساسی، عددی خاکستری می‌باشد که مشخص نمودن مقدار سفید آن غیرممکن و یا موقتاً غیرممکن می‌باشد. عدد خاکستری غیراساسی، عددی است که می‌تواند با مقداری سفید به عنوان نماینده آن عدد خاکستری مشخص شود[۵۹].

۲-۵-۳) محاسبات ریاضی اعداد خاکستری

به طورکلی، روابط تعریف‌شده میان اعداد حقیقی برای مجموعه‌های بازه‌های خاکستری قابل تعمیم است. عملگرهای بازه‌ای توسط مور گسترش یافت[۱۳].

اعداد خاکستری زیر را در نظر بگیرید:

$$\otimes_1 \in [a, b], a < b \,, \quad \otimes_2 \in [c, d], c < d$$

مجموع این دو عدد خاکستری به صورت زیر تعریف می شود:

$$\otimes_1 + \otimes_2 \in [a + c, b + d] \qquad (۴-۲)$$

قرینه عدد خاکستری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$- \otimes_1 \in [-b, -a] \qquad (۵-۲)$$

تفریق دو عدد خاکستری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\otimes_1 - \otimes_2 = \otimes_1 + -\otimes_2 \in [a-d, b-c] \quad (۶-۲)$$

معکوس عدد خاکستری با شرط ab>0 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\otimes_1^{-1} \in \left[\frac{1}{b}, \frac{1}{a}\right] \quad (۷-۲)$$

حاصلضرب دو عدد خاکستری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\otimes_1 . \otimes_2 \in [\min\{ac, ad, bc, bd\}, \ \max\{ac, ad, bc, bd\}] \quad (۸-۲)$$

فرض کنید دو عدد خاکستری $\otimes_2$و$\otimes_1$ دو شرط زیر را تامین می‌کنند:

۱) $c < d$

۲) $cd > 0$

آنگاه تقسیم این دو عدد خاکستری به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{\otimes_1}{\otimes_2} = \otimes_1 . \otimes_2^{-1} \in \left[\min\left\{\frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d}\right\}, \quad \max\left\{\frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d}\right\}\right] \quad (۹-۲)$$

اگر k یک عدد حقیقی مثبت باشد، حاصلضرب اسکالر k در عدد خاکستری $\otimes_1$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$k . \otimes_1 \in [ka, kb] \quad (۱۰-۲)$$

باید توجه نمود که حاصل‌تفریق دو عدد خاکستری هرگز نمی‌تواند برابر با صفر شود مگر اینکه دو عدد خاکستری دقیقاً مانندهم باشند، همین مطلب در مورد حاصل‌تقسیم دو عدد خاکستری نیز برقرار است که هرگز تقسیم دو عدد خاکستری برابر با ۱ نمی‌شود مگر اینکه دو عدد خاکستری دقیقاً مانند هم باشند[۲۳].

۲-۵-۴) ارزش سفید کنندگی اعداد خاکستری

در توضیح عدد خاکستری غیراساسی گفته شد که عدد سفیدی وجود دارد که می‌تواند نماینده این عدد خاکستری باشد، این عدد سفید توسط اطلاعات و یا دانسته‌های گذشته و یا از طریق ابزار دیگری مشخص شده‌است، این عدد سفید، سفیدکننده و یا ارزش سفیدکنندگی آن عدد خاکستری نامیده می‌شود و به صورت $\widetilde{\otimes}$ نمایش داده می‌شود. علامت $\otimes(a)$ برای عدد خاکستری $\otimes$ استفاده می‌شود هرگاه ارزش سفیدکنندگی آن برابر با a باشد. به عنوان مثال، زمانی‌که از فردی می‌خواهیم تا پالتویی با قیمت حدودی ۱۰۰ دلار برای ما تهیه کند، در حقیقت ۱۰۰ دلار، ارزش سفیدکنندگی عدد خاکستری قیمت پالتو را نمایندگی می‌کند $\otimes(۱۰۰)$. [۲۴].

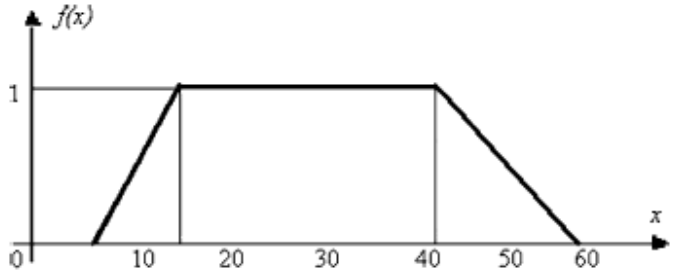
چنانچه یک عدد خاکستری، حول مقدار مشخص a نوسان کند، آن مقدار مشخص a می‌تواند به عنوان ارزش سفیدکنندگی آن عدد خاکستری استفاده شود. $\otimes(a) = a + \delta_a \text{ or } \otimes(a) \in (-, a, +)$

در این تعریف δ_a نشانگر متغیر نوسان است. ارزش سفیدکنندگی این عدد برابر با $\otimes(a) = a$ است.

اگر ارزش سفیدکنندگی $\widetilde{\otimes}$ یک عدد خاکستری بازه‌ای $\otimes \in [a, b]$ به فرم $\widetilde{\otimes} = \alpha a + (1 - a)b, \alpha \epsilon [0,1]$ باشد، این مقدار، ارزش سفیدکنندگی وزن مساوی نامیده می‌شود. اگر در این تعریف a=1/2 باشد، آن را سفیدکنندگی میانگین وزن مساوی می‌نامند. هنگامی‌که اطلاعات توزیع یک عدد خاکستری بازه‌ای نامعلوم است، اغلب از ارزش سفیدکنندگی میانگین وزن مساوی استفاده می‌شود.

هنگامی که اطلاعات مربوط به توزیع یک عدد خاکستری معلوم باشد، اغلب از ارزش سفیدکنندگی با وزن نامساوی استفاده می‌شود. به عنوان مثال، میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خاک اعداد خاکستری هستند، به منظور دستیابی به شرایط خاک حاصلخیر معمولی، میزان نیتروژن سریع‌العمل در خاک بایستی بین ۱۵ تا۴۰ ppm باشد. بنابراین می‌توان از تابع وزنی ارزش سفیدکنندگی مانند آنچه در شکل ۲-۱ نشان داده شده‌است جهت تشریح میزان نیتروژن سریع‌العمل در خاک حاصلخیز

استفاده کرد. در این شکل، بالاترین قسمت مسطح با وزن ۱، نشان‌دهنده بهینه‌ترین میزان نیتروژن در خاک است. خط شیبدار سمت چپ محتوای نیتروژن بین ۵ تا ۱۵ ppm را نشان می‌دهد.در این قسمت مشخص است که هر چقدر میزان نیتروژن افزایش یابد، اثربخشی آن بیشتر خواهد شد. خط شیبدار سمت راست محتوای نیتروژن بین ۴۰ تا ۶۰ ppm را نشان می‌دهد و همانطور که در شکل مشخص است، در این قسمت هر چقدر میزان نیتروژن افزایش یابد، از اثربخشی آن کاسته خواهد شد. منحنی از ۵ ppm شروع شده است و در نقطه ۶۰ ppm ختم می‌شود به این معنا که محتوای نیتروژن بیش از ۶۰ و کمتر از ۵ ppm برای تولید محصول خاص در خاک مجاز نمی‌باشد[۲۵].



شکل ۲-۱) تابع وزنی سفید کننده برای مقدار نیتروژن سریع العمل در خاک

در عمل به منظور تسهیل در محاسبات و برنامه‌ریزی کامپیوتری ، برای عدد خاکستری $[x_1, x_4]$، توابع وزنی سفیدکننده به فرم زیر استفاده می‌شود[۵۹].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1}, & x \in [x_1, x_2) \\ 1, & x \in [x_2, x_3] \\ \frac{x_4-x}{x_4-x_3}, & x \in (x_3, x_4] \end{cases} \qquad (۲-۱۱)$$

هنگامی‌که تابع وزنی سفیدکننده عدد خاکستری $\otimes$ معلوم است، $\widehat{\otimes} = E(\otimes)$ ارزش سفیدکنندگی میانگین عدد خاکستری $\otimes$ نامیده‌می شود، $E(\otimes)$ مقدار مورد انتظار عدد خاکستری را نمایش می‌دهد در شرایطی‌که عدد خاکستری یک متغیر تصادفی می‌باشد[۱۵].

هنگامی‌که تابع وزنی سفیدکننده عدد خاکستری نامعلوم است، اگر $\otimes$ یک عدد خاکستری پیوسته باشد، آنگاه $\widehat{\otimes}=\frac{1}{2}(a+b)$ ارزش سفیدکنندگی میانگین عدد خاکستری نامیده می‌شود، اگر$\otimes$ یک عدد خاکستری گسسته باشد آنگاه :

$\widehat{\otimes}$ با فرمول محاسبه زیر، ارزش سفیدکنندگی میانگین عدد خاکستری گسسته $\otimes$ نامیده می‌شود.

$$f(x)=\widehat{\otimes}=\begin{cases}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i\\ \lim_{n\to+\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}a_i\end{cases} \quad (۱۲-۲)$$

۲-۵-۵) هسته عدد خاکستری

ارزش سفیدکنندگی میانگین یک عدد خاکستری را هسته[1] آن عدد خاکستری می‌نامند، هسته عدد خاکستری، با توجه به نوع عدد خاکستری به یکی از سه روش زیر محاسبه می‌شود:

اگر $\otimes\in[\underline{a},\overline{a}],\ \underline{a}<\overline{a}$ یک عدد خاکستری پیوسته باشد که اطلاعات مربوط به توزیع مقادیر در بازه خاکستری آن نامعلوم باشد، هسته آن با رابطه زیر محاسبه می‌شود[۳۴].

$$\widehat{\otimes}=\frac{1}{2}(\underline{a}+\overline{a}) \quad (۱۳-۲)$$

اگر $\otimes$ یک عدد خاکستری گسسته باشد، و $a_i\in[\underline{a},\overline{a}](i=1,2,\dots,n)$ بیانگر تمامی مقادیر ممکن برای عدد خاکستری $\otimes$ باشد، هسته آن از رابطه (۲-۱۴) حاصل می‌شود[۳۶].

$$\widehat{\otimes}=\frac{1}{n}\sum_{a=1}^{n}a_i \quad (۱۴-۲)$$

اگر $\otimes\in[\underline{a},\overline{a}],\ \underline{a}<\overline{a}$ یک عددخاکستری باشد که اطلاعات مربوط به توزیع مقادیر در بازه عدد خاکستری موجود باشد، هسته عدد خاکستری مطابق رابطه (۲-۱۵) محاسبه می‌شود[۳۵].

$$\widehat{\otimes}=E(\otimes) \quad (۱۵-۲)$$

---

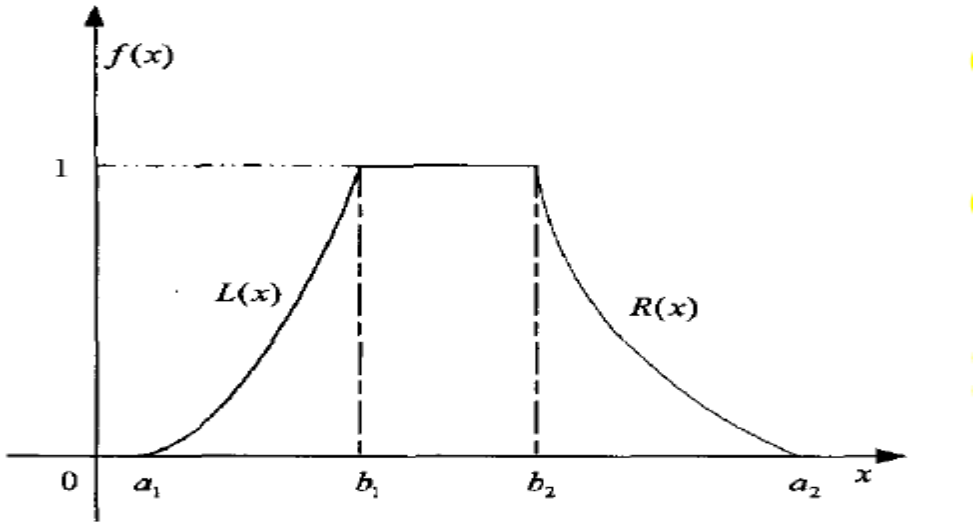
[1] Kernel

۲-۵-۶) درجه خاکستری

برای محاسبه درجه خاکستری یک عدد خاکستری، سه رابطه معرفی شده است:

۱-رابطه ۱: برای عدد خاکستری $\otimes \in [a,b],\ a < b$ هنگامی‌که تابع وزنی ارزش سفیدکنندگی $f(a_1 b_1 b_2 a_2)$ شناخته شده است .(شکل ۲-۲)، پروفسور دنگ جولانگ رابطه (۲-۱۶) را برای محاسبه درجه خاکستری معرفی کرده است.

$$g^0 = \frac{2|x_2 - x_3|}{x_2 + x_3} + \max\{\frac{|x_1 - x_2|}{x_2}, \frac{|x_4 - x_3|}{x_3}\} \qquad (۲-۱۶)$$



شکل ۲-۲) تابع وزنی سفیدکننده

در اینجا عبارت درجه خاکستری از مجموع دو قسمت تشکیل شده‌است، اولین قسمت، تأثیر ناحیه مسطح با بالاترین وزن را در مقدار درجه خاکستری نشان می‌دهد و دومین قسمت تأثیر بالهای سمت راست $L(x)$ و چپ $R(x)$ را در مقدار درجه خاکستری نشان می‌دهد، مشخصاً در حالت کلی هر چقدر ناحیه مسطح با بالاترین وزن و هر چقدر بالهای سمت راست و چپ بزرگتر باشند، مقدار درجه خاکستری بزرگتر خواهد بود. [۵۷].

۲-رابطه۲: تعریف درجه خاکستری بر اساس طول دامنه اطلاعاتی و ارزش سفیدکنندگی (هسته) عدد خاکستری ، در این تعریف، درجه خاکستری عدد خاکستری $g^{\circ}(\otimes)$ رابطه مستقیم با طول دامنه اطلاعاتی عدد خاکستری و رابطه معکوس با ارزش سفیدکنندگی میانگین $\widehat{\otimes}$ دارد. [۵۹].

$$g^{\circ}(\otimes)=\frac{\ell(\otimes)}{|\widehat{\otimes}|} \qquad (۱۷-۲)$$

در این رابطه طول عدد خاکستری، مطابق با تعریف (۲-۵-۵-۱) تعیین می‌شود.

تعریف ۲-۱) عدد خاکستری $\otimes\in [a,b],\ a<b$ را در نظر بگیرید، آنگاه $\ell(\otimes)=|b-a|$ طول دامنه اطلاعاتی عدد خاکستری $\otimes$ نامیده می‌شود[۵۹].

برای درجه خاکستری که با استفاده از رابطه تعیین می‌شود، ویژگی های زیر را می‌توان شمرد:

اصل ۲-۱ برای هر عدد خاکستری $\otimes\in [a,b],\ a<b$ ، درجه خاکستری آن بزرگتر مساوی صفر $g^{\circ}(\otimes)\geq 0$ است. [۵۹].

اصل۲-۲ هنگامی که a=b است، طول دامنه اطلاعاتی عدد خاکستری و درجه خاکستری آن برابر با صفر خواهد بود. $\ell(\otimes)=0, g^{\circ}(\otimes)=0$ [۲۰].

اصل ۲-۳ اگر $a\to-\infty$ یا $b\to+\infty$ آنگاه درجه خاکستری عدد خاکستری به سمت بینهایت میل خواهد کرد $g^{\circ}(\otimes)\to\infty$.[۵۷].

اصل ۲-۴ $g^{\circ}(k\otimes)=g^{\circ}(\otimes)$ [۵۹].

در مورد روابط بین ترکیبات اعداد خاکستری و درجه خاکستری آنها، اصول زیر برقرار است:

قضیه ۲-۱ برای دو عدد خاکستری $\otimes_1\in[a,b]\ a<b$ و $\otimes_2\in[c,d] c<d$ اگر $a\geq 0$ و $c\geq 0$ یا $b\leq 0$ و $d\leq 0$، رابطه زیر همواره برقرار است :

$$g^{\circ}(\otimes_1+\otimes_2)\leq g^{\circ}(\otimes_1)+g^{\circ}(\otimes_2) \qquad (۱۸-۲)$$

اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد :

الف) $a \geq 0\ ,\ c \geq 0$

ب) $a \geq 0\ , d\ \leq 0$

ج) $b \leq 0\ , c \geq 0$

د) $b \leq 0\ , d \leq 0$

آنگاه رابطه زیر همواره درست است :

$$g^{\circ}\ (\otimes_1 . \otimes_2\ ) \geq \max\{\ g^{\circ}(\otimes_1), g^{\circ}(\otimes_2)\} \qquad (۱۹-۲)$$

اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

الف) $a > 0\ , cd < 0$

ب) $b\ \leq 0, cd\ < 0$

ج) $ab < 0, cd < 0, \frac{|a|}{b} \geq \max\{\frac{|c|}{d}, \frac{d}{|c|}\}$

د) $ab < 0, cd < 0\ , \frac{b}{|a|} \geq \max\left\{\frac{|c|}{d}\ , \frac{d}{|c|}\right\}$

رابطه زیر همواره درست است:

$$g^{\circ}\ (\otimes_1 . \otimes_2) = g^{\circ}(\otimes_2) \qquad (۲۰۰-۲)$$

اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد[۳۴].

الف) $c > 0\ , ab < 0$

ب) $d \leq 0\ , ab < 0$

ج) $ab < 0, cd < 0, \frac{|c|}{d} \geq \max\{\frac{|a|}{b}, \frac{b}{|a|}\}$

د) $ab < 0, cd < 0\ , \frac{d}{|c|} \geq \max\{\frac{|a|}{b}, \frac{b}{|a|}\}$

رابطه زیر همواره درست است :

$$g^{\circ}\ (\otimes_1 . \otimes_2) = g^{\circ}(\otimes_1) \qquad (۲۱-۲)$$

اگر یکی از شرایط زیر برقرار باشد[۳۴].

الف) $a \geq 0, c > 0$

ب) $a \geq 0, d < 0$

ج) $b \leq 0, c > 0$

د) $b \leq 0, d < 0$

رابطه زیر همواره درست است:

$$g^{\circ}(\otimes_1 . \otimes_2) = g^{\circ}(\otimes_1)\, g^{\circ}(\otimes_1 \div \otimes_2) \geq \max\{g^{\circ}(\otimes_1), g^{\circ}(\otimes_2)\} \qquad (۲۲-۲)$$

اگر شرط $ab<0,c>0$ یا $ab<0,d<0$ برقرار باشد، رابطه زیر همواره درست است[۳۴] :

$$g^{0}(\otimes_1 \div \otimes_2) = g^{0}(\otimes_1) \qquad (۲۳-۲)$$

اگر $cd<0$ آنگاه

$$g^{0}(\otimes_1 \div \otimes_2) = \infty \qquad (۲۴-۲)$$

هر دو رابطه (۲-۱۶) و (۲-۱۷) برای محاسبه درجه خاکستری دارای دو نقص هستند که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم:

۱-زمانی که طول دامنه اطلاعاتی یک عدد خاکستری به سمت بی نهایت میل می‌کند، در هر دو رابطه ارائه شده برای درجه خاکستری، درجه خاکستری به سمت بینهایت میل خواهدکرد. [۲۳].

۲-در این دو رابطه، هیچ تعریفی برای تعیین درجه خاکستری اعدادی که هسته و یا ارزش سفیدکنندگی میانگین آنها برابر با صفر می باشد، ارائه نشده است[۲۲].

با توجه به این دو نقص توضیح داده شده، رابطه دیگری برای تعیین درجه خاکستری ارائه شده است.

۳-رابطه۳: هر عدد خاکستری بیانگر مشخصه رفتاری یک سیستم است، درجه خاکستری آن عدد نشان‌دهنده فهم افراد از میزان عدم قطعیت آن عدد می باشد. بین اندازه درجه خاکستری یک عدد و

دامنه‌ای[1] که آن عدد خاکستری را منتج کرده‌است رابطه نزدیکی وجود دارد. در واقع نمی‌توانیم در مورد اندازه درجه خاکستری یک عدد خاکستری بحث کنیم بدون آنکه سیستم خاکستری و یا دامنه ایجاد کننده آن عدد خاکستری را در نظر بگیریم به عنوان مثال عدد خاکستری (۲۰۰و۱۶۰) را در نظر بگیرید اگر توضیحی در مورد اینکه این عدد خاکستری از کجا منتج شده، ارائه نشود، نمی توانیم در مورد درجه خاکستری این عدد بحث کنیم. اما اگر گفته شود که این عدد خاکستری بیانگر طول قد یک فرد بالغ به سانتیمتر است ، درجه خاکستری آن بسیار زیاد خواهد بود چرا که این بازه تقریبا طول قد هر فرد بالغ را در بر می‌گیرد، حال اگر پلیس در جستجوی یک مجرم باشد و یک شاهد در مورد طول قد وی این بازه را بیان کند این داده تفریباً هیچ ارزشی ندارد.اما اگر این بازه بیانگر فشار خون بر حسب mmHg باشد درجه خاکستری آن بسیار پایین خواهد بود و حاوی اطلاعات ارزشمندی برای یک پزشک خواهد بود[۶۱].

فرض کنید که Ω نشان دهنده بازه مرجعی باشد که عدد خاکستری$\otimes$ از آن منتج شده باشد، طول عدد خاکستری با μ نشان داده شود، درجه خاکستری عدد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$g^{\circ}(\otimes) = \frac{\mu(\otimes)}{\mu(\Omega)} \qquad (۲۵-۲)$$

سه اصل زیر همواره در مورد درجه خاکستری که با رابطه (۲-۲۵) محاسبه می‌شود وجود دارد[۵۷]:

اصل ۲-۵: درجه خاکستری یک عدد خاکستری همواره بین صفر و یک است. درجه خاکستری یک، بیانگر بیشترین میزان ابهام (عدد سیاه) و درجه خاکستری صفر بیانگر کمترین میزان ابهام(عدد سفید) می‌باشد[۳۶].

$$0 \leq g^{\circ}(\otimes) \leq 1 \qquad (۲۶-۲)$$

[1] Background or Field

اصل۲-۶:عدد خاکستری که حد بالا و پایین آن برابر باشد و در نتیجه یک عدد قطعی باشد دارای درجه خاکستری برابر با صفر خواهد بود[۳۸].

اصل ۲-۷:درجه خاکستری بازه مرجع همواره برابر با یک خواهد بود [۱۹].

$$g^0(\Omega) = 1 \qquad (۲۷-۲)$$

۲-۵-۷) محتوای اطلاعاتی خاکستری

در سال ۱۹۸۴، شانون فرمول زیر را برای محاسبه مقیاس اطلاعاتی بر فضایی که از سیستم‌های گسسته تصادفی تشکیل شده است، معرفی نمود:

$$I = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log P_i, \quad \sum_{i=1}^{n} p_i = 1 \qquad (۲۸-۲)$$

این فرمول ، به نام فرمول آنتروپی شانون شناخته شده است. ژانگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ با استفاده سری تصویر ساختاری Y= (y1, y2, …. , ys)، مفهوم آنتروپی را برای تفاوت سری اطلاعاتی X=(x1, x2, … , xs) معرفی کردند[۱۹].

$$I(X) = -\sum_{j=1}^{s} y_j . \ln y_j \qquad (۲۹-۲)$$

محتوای اطلاعاتی که در اعداد خاکستری وجود دارد بایستی درجه فهم محقق را از یک سیستم خاکستری ویژه منعکس کند. اگر $I(\otimes)$ محتوای اطلاعاتی عدد خاکستری باشد و $\mu(\otimes)$اندازه دامنه‌ای باشد که بر روی آن عدد خاکستری $\otimes$ تعریف می‌شود آنگاه [۲۱].

اصل ۲-۸: $0 \le I(\otimes) \le 1$

اصل۲-۹: $I(\Omega) = 0$

اصل۲-۱۰ $I(\otimes)$ رابطه مستقیم $\mu(\overline{\otimes})$ با و رابطه معکوس با $\mu(\Omega)$دارد. (دامنه معرفی‌کننده عدد خاکستری Ω می باشد و $\otimes \subset \Omega$ و $\overline{\otimes} = \Omega - \otimes$)

در روابط توجه داشته باشید که اصل ۲-۸محتوای اطلاعاتی یک عدد خاکستری را به بازه بسته [۰,۱] محدود می‌کند، هر چقدر $I(\otimes)$ به صفر نزدیکتر باشد، محتوای اطلاعاتی عدد خاکستری کمتر است و در مقابل هر چقدر $I(\otimes)$ به یک نزدیکتر باشد، محتوای اطلاعاتی عدد خاکستری بیشتر خواهد بود. اصل ۲-۹ بیان می‌کند که محتوای اطلاعاتی دامنه‌ای که عدد خاکستری را منتج شده‌است برابر با صفر است. چرا که دامنه و پیش‌زمینه‌ای که اعداد خاکستری را معرفی می‌کند به طور معمول برای افراد شناخته شده‌است. به همین دلیل شناخت دامنه Ω هیچ اطلاعات مفیدی برای محقق فراهم نمی‌کند، به عنوان مثال عبارت " لوکوموتیو قادر است هر وزنه بزرگتر از صفر پوند را بکشد" هیچ اصلاعات مفیدی را فراهم نمی‌کند و $\Omega = (0, +\infty)$ پیش‌زمینه‌ای را که تمامی وزنه‌های ممکن می‌تواند در آن قرار بگیرد، نمایش می‌دهد. اصل ۲-۱۰ بیان می‌کند هنگامی‌که پیش‌زمینه Ω ثابت است، مقادیر بزرگ $\mu(\overline{\otimes})$ مجموعه $\overline{\otimes}$ نشان‌دهنده محتوای اطلاعاتی بیشتر در عدد خاکستری $\otimes$ می‌باشد[۲۱].

به عبارتی هر چقدر مقیاس خود عدد خاکستری $\otimes$ کوچکتر باشد، محتوای اطلاعاتی آن بیشتر است. به عنوان مثال اگر یک عدد خاکستری $\otimes$بیانگر تقریبی برای مقدار یک عدد حقیقی باشد، هنگامی‌که قابلیت اعتماد ثابت است، مقادیر کوچکتر مقیاس عدد خاکستری $\otimes$ به معنای مفهوم و مقصود بیشتر درآن تقریبی است که عدد خاکستری $\otimes$ حاصل نموده است[۲۱].

$I(\otimes)$ به عنوان معیار محتوای اطلاعاتی عدد خاکستری می‌تواند به صورت زیر تعریف شود[۶۳].

$$I(\otimes) = \frac{\mu(\overline{\otimes})}{\mu(\Omega)} \qquad (۳۰-۲)$$

قضیه زیر ویژگی‌های محتوای اطلاعاتی اعداد خاکستری را لیست می‌کند[۶۳].

قضیه ۲-۲ برای اعداد خاکستری $\otimes_1 \in [a,b]\ a < b$ و $\otimes_2 \in [c,d] c < d$

۱-اگر $\otimes_1 \subset \otimes_2$ آنگاه $I(\otimes_1) \geq I(\otimes_2)$

۲-همواره $I(\otimes_1 \cup \otimes_2) \leq I(\otimes_K), k = 1,2,$ درحالی‌که $\otimes_1 \cup \otimes_2 = \{\xi | \xi \epsilon [a,b] or\ \xi \epsilon [c,d]\}$

۳-همواره $I(\otimes_1 \cap \otimes_2) \geq I(\otimes_K), k = ,2,$ درحالی‌که $\otimes_1 \cap \otimes_2 = \{\xi | \xi \epsilon [a, b] and\ \xi \epsilon [c, d]\}$

۴-اگر $\otimes_1 \subseteq \oplus_2$ آنگاه $I(\otimes_1 \cup \otimes_2) = I(\otimes_2)$ و $I(\otimes_1 \cap \otimes_2) = I(\otimes_1)$

۵- اگر $\mu(\Omega) = 1$ اعداد خاکستری $\otimes_1$ و $\otimes_2$ از معیار μ مستقل هستند و در نتیجه دو عبارت ذیل همواره درست هستند:

الف) $I(\otimes_1 \cup \otimes_2) = I(\otimes_1) I(\otimes_2)$

ب) $I(\otimes_1 \cap \otimes_2) = I(\otimes_1) + I(\otimes_2) - I(\otimes_1) I(\otimes_2)$

روش‌های مختلفی که با استفاده از آن‌ها اعداد خاکستری ترکیب می‌شوند بر محتوای اطلاعاتی و قابلیت اعتماد محتوای اطلاعاتی اعداد خاکستری منتج، تاثیر می‌گذارد. به طور کلی، اجتماع اعداد خاکستری باعث می‌شود، محتوای اطلاعاتی منتج کاهش یابد درحالی‌که قابلیت اعتماد محتوای اطلاعاتی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، اشتراک اعداد خاکستری باعث می‌شود، محتوای اطلاعاتی افزایش و قابلیت اعتماد کاهش‌یابد. در عمل، هنگام رویارویی با یک مسئله با ضرورت پردازش شمار زیادی از اعداد خاکستری، می‌توان ترکیب این اعداد خاکستری را در سطوح مختلف در نظر گرفت و به‌این‌ترتیب اطلاعات مفیدی در هر سطح می‌تواند مستخرج شود.همچنین می‌توان مفاهیم مختلف اجتماع و اشتراک را در سطوح مختلف جهت رسیدن به قابلیت اعتماد و محتوای اطلاعاتی مطلوب به کار برد.

۲-۵-۷) فرم تنزیل شده عدد خاکستری

اگر $\widehat{\otimes}$ هسته عدد خاکستری $\otimes$ را نمایش دهد و $g^0(\otimes)$ نشاندهنده درجه خاکستری آن عدد خاکستری باشد. فرم ساده یک عدد خاکستری به صورت رابطه زیر نشان داده‌می‌شود.

$$\text{Reduced Form} = \widehat{\otimes}_{g^0(\otimes)} \qquad (۳۱-۲)$$

اصل ۲-۱۱: فرم تنزیل شده تمام اطلاعات عدد خاکستری را در بر می‌گیرد

اصل ۲-۱۲: یک تناظر یک به یک بین اعداد خاکستری و فرم تنزیل‌شده اعداد خاکستری در یک مجموعه مرجع مشخص وجود دارد.

برای عملگرهای اساسی فرم تنزیل شده اعداد خاکستری اصول زیر معرفی شده‌اند:

اصل ۲-۱۳

$$\widehat{\otimes}_{1g_1^0} = \widehat{\otimes}_{2g_2^0} \Leftrightarrow \widehat{\otimes}_1 = \widehat{\otimes}_2, \text{theng}_1^0 = g_2^0 \quad (۳۲-۲)$$

اصل ۲-۱۴

$$\widehat{\otimes}_{1g_1^0} + \widehat{\otimes}_{2g_2^0} = (\widehat{\otimes}_1 + \widehat{\otimes}_2)_{g_1^0 \vee g_2^0} \quad (۳۳-۲)$$

اصل ۲-۱۵

$$-\ \widehat{\otimes}_{g^0(\otimes)} = \widehat{-\otimes}_{g^0(\otimes)} \quad (۳۴-۲)$$

اصل ۲-۱۶

$$\widehat{\otimes}_{1g_1^0} - \widehat{\otimes}_{2g_2^0} = (\widehat{\otimes}_1 - \widehat{\otimes}_2)_{g_1^0 \vee g_2^0} \quad (۳۵-۲)$$

اصل ۲-۱۷

$$\widehat{\otimes}_{1g_1^0} \times \widehat{\otimes}_{2g_2^0} = (\widehat{\otimes}_1 \times \widehat{\otimes}_2)_{g_1^0 \vee g_2^0} \quad (۳۶-۲)$$

اصل ۲-۱۷

$$\text{If } \widehat{\otimes} \neq 0, \text{then } {}^{1}\!/_{\widehat{\otimes}_{g^0}} = ({}^{1}\!/_{\widehat{\otimes}})_{g^0} \quad (۳۷-۲)$$

اصل ۲-۱۸

$$\text{If k is a real number, k.}\widehat{\otimes}_{g^0} = (\text{k.}\,\widehat{\otimes})_{g^0} \quad (۳۹-۲)$$

اصل ۲-۱۹

$$\text{If } \widehat{\otimes}_2 \neq 0 \text{ then } \quad \widehat{\otimes}_{1g_1^0} \Big/ \widehat{\otimes}_{2g_2^0} = \left(\widehat{\otimes}_1 \Big/ \widehat{\otimes}_2\right)_{(g_1^0 \vee g_2^0)} \tag{۳۸-۲}$$

اصل ۲-۲۰ اجتماع تعدادی بازه خاکستری، یک بازه مرجع برای کلیه اعداد خاکستری تشکیل می‌دهد.

اصل ۲-۲۱ لیو وهمکاران در مقاله خود، رابطه دیگری را برای جمع وتفریق فرم تنزیل‌شده دو عدد خاکستری عنوان کردند[۳۱]:

$$\widehat{\otimes}_{1g_1^0} \pm \widehat{\otimes}_{2g_2^0} = \left(\widehat{\otimes}_1 \pm \widehat{\otimes}_2\right)_{w_1 g_1^0 + w_2 g_2^0} \tag{۳۹-۲}$$

در این رابطه اندیس وزن درجه خاکستری، به صورت زیر تعیین می‌شود:

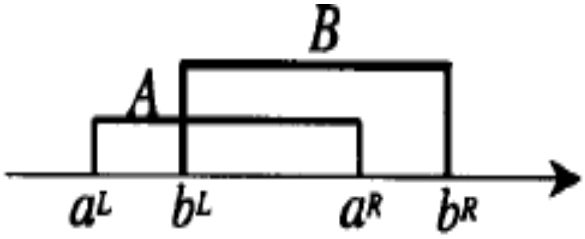
$$w_i = \frac{\hat{g}_i}{\sum_{i=1}^{n} \hat{g}_i}, i = 1, 2, \dots, n \tag{۴۰-۲}$$

۲-۵-۸) روابط رتبه‌بندی اعداد خاکستری

مجموعه متنوعی از تعریفات و توضیحات برای رتبه بندی بازه‌های عددی ارائه شده‌اند. در این تعریفات از پارامترهای حد راست بازه، حد چپ بازه، مرکز بازه و عرض بازه جهت مقایسه بازه‌ها استفاده می شود.

تعریف۲-۲ برای هر دو بازه $A = [a^L, a^R]$ و $B = [b^L, b^R]$ ، رتبه بندی بر اساس حد راست و حد چپ بازه به صورت زیر تعریف می‌شود:

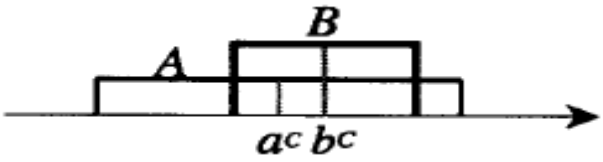
$$A \leq_{LR} B \Leftrightarrow a^L \leq b^L \text{ and } a^R \leq b^R \tag{۴۱-۲}$$



شکل ۲-۳) رابطه $A \leq_{LR} B$

تعریف ۲-۴ برای هر دو بازه $B =< b^C, b^W >$ و $A =< a^C, a^W >$ رتبه‌بندی بازه‌ها بر اساس مرکز و عرض بازه به صورت زیر تعریف می‌شود: [۳۲].

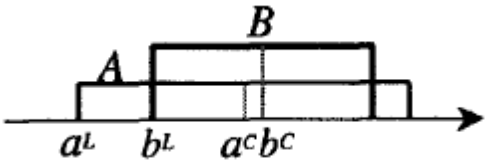
$$A \leq_{CW} B \Leftrightarrow a^C \leq b^C \text{ and } a^W \geq b^W \qquad (۴۱-۲)$$



شکل ۲-۴) رابطه $A \leq_{CW} B$

تعریف ۲-۴ برای هر دو بازه A و B رتبه‌بندی بازه‌ها بر اساس مرکز و حد چپ به صورت زیر تعریف می‌شو[۳۴].

$$A \leq_{LC} B \Leftrightarrow a^L \leq b^L \text{ and } a^C \leq b^C \qquad (۴۱-۲)$$



شکل ۲-۵) رابطه $A \leq_{LC} B$

تعریف ۲-۵ برای دو بازه A و B هنگامی‌که با استفاده از تعاریف (۲-۴)، (۲-۳)و (۲-۲) نتوانیم رتبه بندی کنیم، اوکادا[1] و گنت[1] رابطه دیگری برای رتبه‌بندی بازه‌ها بر اساس مرکز و عرض و تعریف ضریب β معرفی کرده‌اند[۱۳]:

[1] Shinkoh Okada

$$A \leq_\beta B \leftrightarrow b^C - a^C \geq (1-\beta)(b^W - a^W) \text{ and } \quad (۴۲-۲)$$

$$b^C - a^C \geq \beta(b^W - a^W)$$

در این رابطه b^C و a^C نشان‌دهنده هسته و یا مرکز عدد خاکستری است و b^w و a^w نشان‌دهنده عرض ($\frac{\mu(a)}{2}$) عدد خاکستری و ضریب β نماینده درجه نسبی بزرگی و عددی در بازه [0,0.5] می‌باشد.

اصول زیر برای این نوع رتبه بندی برقرار است[۳۸].

اصل ۲-۲۰ برای هر بازه A

$$A \leq_\beta A. \quad (۴۳-۲)$$

اصل ۲-۲۱ برای هر بازه A و B و هر $\beta \in [0, 0.5)$

$$A \leq_\beta B \text{ and } B \leq_\beta A \Longrightarrow A = B \quad (۴۴-۲)$$

اصل ۲-۲۲ برای هر بازه A و B و C

$$A \leq_\beta B \text{and } B \leq_\beta A \Rightarrow A \leq_\beta C \quad (۴۵-۲)$$

اصل ۲-۲۳ برای هر $\beta = 0.5$ و هر بازه A , B

$$A \leq_{0.5} B \text{ Or } B \leq_{0.5} A \quad (۴۶-۲)$$

---

[1]Mitsuo Gent

۲-۶) مفهوم بحرانی بودن در پروژه

یک شبکه از فعالیت‌ها، مجموعه ای از گره‌ها و کمان‌ها هستند، که برای نمایش گرافیکی پروژه ترسیم می‌شوند. دو نوع شبکه برای نمایش یک پروژه وجود دارد، شبکه‌هایی که فعالیت روی کمان رسم می‌شود و شبکه‌هایی که فعالیت روی گره‌ها رسم می‌شود. مسیر بحرانی عبارتست از طولانی‌ترین مسیر موجود که از گره آغارین شبکه، نشان‌دهنده نقطه شروع پروژه، شروع می‌شود و به گره انتهایی شبکه، نشان دهنده نقطه پایان پروژه، ختم می‌شود.

در یک شبکه فعالیت لزوما" فقط یک مسیر بحرانی وجود ندارد، یک شبکه می تواند دارای چندین مسیر بحرانی باشد[۲].

طول مسیر بحرانی بیانگر کوتاهترین زمان ممکن اتمام پروژه است. اگر هدف، تکمیل پروژه طی این مدت زمان باشد، تمامی فعالیت‌های روی مسیر بحرانی دارای شناوری صفر خواهند بود. به این معنا که هر یک از این فعالیت‌ها بایستی در زمان مشخص و دقیقی طبق برنامه آغاز شوند و پایان یابند، در غیر این صورت پروژه در زمان مشخص شده آماده تحویل نخواهد بود. به همین دلیل، فعالیت‌هایی که روی این مسیر قرار گرفته‌اند فعالیت‌های بحرانی نامیده می‌شوند و مشابهاً رویدادهایی که روی این مسیر قرار دارند رویدادهای بحرانی نامیده می شوند. که بایستی دقیقاً در زمان‌های مشخصی رخ دهند تا پروژه در موعد تحویل، تکمیل شود. در پژوهش حاضر از مدل شبکه فعالیت روی کمان استفاده می‌کنیم. بحث در مورد بحرانی بودن رویدادها، تنها زمانی ممکن است که از مدل شبکه " فعالیت روی کمان" استفاده شود. در شبکه‌ای که فعالیت‌ها با گره‌ها مشخص شده‌باشند، بحرانی بودن رویدادها را نمی‌توان بررسی کرد[۳۶].

یکی از پیش فرض های استفاده از متد مسیر بحرانی، قطعی و مشخص بودن زمان انجام فعالیت‌های شبکه می‌باشد، در حالی‌که در واقعیت، احتمال تحقق این پیش‌فرض بسیار کم است، به عبارت ریگر

در واقعیت با عدم قطعیت روبرو هستیم. یکی از متدهای بررسی عدم‌قطعیت در پروژه‌ها متد خاکستری می‌باشد[۴۱].

۲-۶-۱) تعریف یک مسیربحرانی قطعی

در یک شبکه قطعی $G(A,V)$ ، V نشان دهنده مجموعه گره‌ها و $A=V\times V$ نشان دهنده مجموعه کمان‌ها (کمان‌ها بیانگر فعالیت‌ها هستند) می‌باشد. اگر ۱ گره ابتدایی و n گره انتهایی را نمایش دهد و $P(n)$ بیانگر مجموعه مسیرها از گره ابتدایی به گره انتهایی باشد و (i,j) نشان‌دهنده مدت زمان فعالیت (i,j) باشد. $t(p)$ برای مسیر $p \in P(n)$، نشان دهنده مدت زمان مسیر p می باشد[۳۴].

تعریف۲-۶ . مسیر $p^* \in P(n)$ یک مسیر بحرانیست اگر و فقط اگر آن بلندترین مسیر در شبکه $G(A,V)$ باشد.

$$t(p^*) = \max \sum_{p\in P(n),(i,j)\in p} t(i,j) \qquad (۴۷-۲)$$

۲-۶-۲) تعریف یک مسیربحرانی خاکستری

یک شبکه خاکستری دارای پیکر بندی مشابه با یک شبکه قطعی است با این تفاوت که زمان انجام فعالیت ها به صورت اعداد خاکستری نمایش داده می شوند، از آنجایی که زمان انجام فعالیت ها اعداد خاکستری هستند، زمان کل شبکه نیز برابر با یک عدد خاکستری خواهد بود، زمان کل به صورت زیر نمایش داده میشوند[۲۰].

$$T^- = \max \sum_{p\in P(n),(i,j)\in p} t^-(i,j) \qquad (۴۸-۲)$$
$$T^+ = \max \sum_{p\in P(n),(i,j)\in p} t^+(i,j)$$

اصل۲-۲۴ مسیر $p\epsilon P(n)$ در شبکه G یک مسیر بحرانی است اگر و فقط اگر در صورت جایگزینی زمان فعالیت‌ها –که به صورت بازه بیان شده‌اند- با اعداد قطعی مطابق با رابطه ۲-۴۹، آن مسیر، یک مسیر بحرانی باشد[۵۴].

$$t_{ij} = \begin{cases} \overline{t_{ij}} & \text{if } (i,j) \in p \\ \underline{t_{ij}} & \text{if } (i,j) \notin p \end{cases} \qquad (۴۹-۲)$$

۲-۷) پیشینه تجربی

پیشینه تحقیق در دو بخش مطالعات خارجی و داخلی تدوین شده، که در هر بخش پیشینه تحقیقات مربوط به تعیین مسیر بحرانی در سه گروه شرایط عدم‌قطعیت احتمالی، فازی و خاکستری ارائه می‌شود.

۲-۷-۱) مطالعات خارجی

در گروه عدم‌قطعیت احتمالی، مالکولم[۱] و همکاران (۱۹۵۹) توضیح دادند که تکنیک مرور وارزیابی پروژه[۲] رایج‌ترین تکنیک در کنترل پروژه می‌باشد[۶۰].

تابع چگالی احتمال مدت زمان انجام فعالیت‌ها در یک پروژه ناشناخته است و وابسته به نوع پروژه تعیین می‌شود، هیلییر[۳] و لیبرمن[۴] (۱۹۸۶) و آبوریزک[۵] و هاپلین[۶] (۱۹۹۲) و فنته[۷] و همکاران (۱۹۹۹) و فتانه[۸] (۲۰۰۲) نشان دادند که به طور کلی، تغییرپذیری تقریب‌های زمانی یک فعالیت از

[1] Malcolm
[2] Program Evaluation and Review Technique
[3] Hillier
[4] Lieberman
[5] AbouRizk
[6] Haplin
[7] Fente
[8] Fataneh

توزیع بتا پیروی می‌کند و مسیر بحرانی پروژه از طریق تفریب سه زمان خوش‌بینانه، بدبینامه و محتمل برای هر فعالیت تعیین می‌شود،[۳۱] و[۳۶] و[۵۰] و[۳۴].

انگ[1] و تانگ[2] (۱۹۷۵) نشان دادند هنگامی‌که زمان مورد انتظار در مرکز بین زمان خوش‌بینانه و زمان بدبینانه قرار گرفته باشد، توزیع بتا مانند توزیع نرمال عمل می‌کند. هنگامی‌که زمان مورد انتظار نزدیک‌تر به زمان بدبینانه باشد، توزیع دارای چولگی مثبت خواهد بود و اگر زمان مورد انتظار نزدیکتر به زمان خوش‌بینانه باشد، توزیع دارای چولگی منفی خواهد بود[۲۶].

در میان مطالعاتی که در این گروه انجام شده‌است، عبدلقادر (۲۰۰۴) مسیر بحرانی و مدت زمان مورد نیاز برای تکمیل پروژه را در شرایطی تعیین کرد که متغیر تصادفی مدت زمان انجام فعالیت‌ها دارای توزیع وایبول بود[۹۲].

یکی از مشکلات استفاده از روش پرت، دشواری محاسبه توزیع کل متغیرهای تصادفی است، مک کریمون[3] و ریاوک[4] (۱۹۶۲)و وان اسلایک (۱۹۶۳) در مطالعات تحلیلی خود خطاهایی را که فرضیات روش PERT و استفاده از آن به همراه داشت برشمردند،[۳۷].و[۱۲].

کراندال[5] (۱۹۷۷) بیان کرد که روش پرت زمان تکمیل پروژه را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و از این رو متدولوژی جدیدی برای افزایش صحت برنامه‌ریزی و زمانبندی فعالیت‌ها مورد نیاز است[۱۹].

وان اسلایک[1] (۱۹۶۳) بیان کرد که قابل‌اعتمادترین روش پیش‌بینی رفتار کلی شبکه‌ای که از فعالیت‌های احتمالی تشکلیل شده‌است، تکنیک شبیه‌سازی است[۲۴].

---

[1] Ang
[2] Tang
[3] MacCrimmon
[4] Ryavec
[5] Crandall

در شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ساخت مدل ریاضی، در هر دور شبیه‌سازی به تعداد فعالیت‌های پروژه عدد تصادفی تولید گردیده و بر اساس آنها زمان‌های تصادفی فعالیت‌ها به دست می‌آید و محاسبه زمان کل پروژه به روش معمول شبکه‌های CPM، انجام گرفته و تاریخ تکمیل پروژه در هر دور تعیین می‌شود. در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، با توجه به اینکه زمان‌های اختصاص داده شده برای هر فعالیت در دورهای مختلف محاسبات، با یکدیگر متفاوت می‌باشند، بنابراین، مسیرهای بحرانی نیز که در دورهای مختلف محاسبات تعیین می‌شوند ممکن است با یکدیگر متفاوت باشند، بنابراین یکی از مزایای این روش آنست که به جای مشخص نمودن یک مسیر بحرانی برای یک شبکه (که همواره نمی‌تواند قابل اطمینان باشد)، سطح احتمال اینکه هر یک از فعالیت‌های پروژه بحرانی شوند را مشخص می‌نماید. [۱۷]و [۳۲].

بومن[۲] (۱۹۹۴)و الماقرابی[۳](۲۰۰۰) تکنیک‌های مشابهی را جهت حل مشکلات مربوط به استفاده از متد پرت[۴] در گروه عدم قطعیت احتمالی پیشنهاد کردند. لورانس[۵] و کوچران[۶](۱۹۹۵) جهت دستیابی به یک تقریب خطی برای زمان انجام فعالیت‌های توزیع،تکنیک‌های کاهش و تقریب چندگوشه‌ای[۷] را مطرح کردند. متد آنها با توزیع‌های احتمال مختلف قادر به تعیین زمان تکمیل پروژه بود. [۲۹].و[۳۰] و[۷۰].

در گروه عدم قطعیت فازی،متدهای مختلفی برای مشخص نمودن مسیر بحرانی وجود دارد، به عنوان مثال چاناس و کامبوروسکی[۸](۱۹۸۱) بااستفاده از تکنیک پرت فازی، مسیر بحرانی را تعیین کردند دراین تکنیک به جای احتمالات، از متد a-cut برای تعیین زمان تکمیل پروژه استفاده شده است. [۱۴].

---

[1] Van Slyke
[2] Bowman
[3] Elmaghraby
[4] PERT (Project Evaluation and Review Technique)
[5] Lawrence
[6] Cochran
[7] Polygonal approximation and reduction techniques
[8] Kamburowski

هاپک[1] و اسلواینسکی[2] (۱۹۹۶) متدی جهت محاسبه زودترین زمان شروع فعالیت‌ها پیشنهاد دادند. [۶۳].

چاناس[3] و زلینسکی[4](۲۰۰۱) تعمیمی از مفهوم بحرانی بودن در یک شبکه را ارائه نمودند،[۵۴].

همچنین جینگ[5] و فنگ[6] (۲۰۰۳) روش مسیر بحرانی فازی را مطرح کرده اند که در آن از a-cut استفاده کردند[۱۷].

دیوبویس[7] (۲۰۰۳) یک روش ابتکاری برای محاسبه مجموعه مقادیر ممکن از دیرترین زمان‌های شروع و شناوری فعالیت‌ها و سپس زلینسکی (۲۰۰۵) متدی جهت محاسبه دیرترین زمان شروع فعالیت‌ها با استفاده از الگوریتم‌های چندجمله‌ای پیشنهاد دادند. [۵۳]و [۴۹].

چن[8] و هوانگ[9] (۲۰۰۷) مدل جدیدی برای تعیین مسیر بحرانی و درجه بحرانی بودن فعالیت‌ها ارائه نمودند، در این روش مسیر بحرانی با استفاده از حرکت‌های پیشرو و پسرو و با استفاده از شناوری فعالیت‌ها تعیین می‌شود. [۳۷].

چن(۲۰۰۷) در پژوهش دیگری سطوح امکان‌پذیری متفاوتی را برای مدل‌های اولیه و تانویه به کار برد و زمان تکمیل پروژه را به صورت یک عدد فازی مشخص کرد، وی همچنین بحرانی‌ترین مسیر را با استفاده از معیارهای رتبه‌بندی اعداد فازی مشخص کرد[۲۶].

.

مطالعاتی در زمینه برنامه‌ریزی و مدلسازی فازی و تعیین مسیر بحرانی از این طریق صورت گرفته است که می توان به چن[1] و سو[2] (۲۰۰۸) اشاره کرد. آنها با ریاضیات برنامه‌ریزی فازی و معیار

---

[1] Hapke
[2] Slowiniski
[3] Chanas
[4] Zielinski
[5] Jing
[6] Feng
[7] Dubois
[8] Chen
[9] Huang

رتبه‌بندی یاگر[3] برای هر مسیر شبکه، مقدار عضویت بحرانی بودن را تعریف کردند و مسیری که مقدار عضویت بحرانی بودن آن از همه بیشتر بود به عنوان مسیر بحرانی مشخص شد[۵۲].

در گروه عدم قطعیت خاکستری، اوکادا[4] و گنت[5] (۱۹۹۳)روشی را برای تعیین رابطه ترتیبی (بزرگی و کوچکی)اعداد خاکستری ارائه دادند و سپس کاربرد آن را در تعیین کوتاهترین مسیر در یک شبکه نشان دادند، طبعاً می‌توان از این روش برای تعیین بزرگترین مسیر که همان مسیر بحرانی می‌باشد نیزاستفاده کرد.

چاناس و زلینسکی (۲۰۰۲) پیچیدگی محاسباتی مسائل بحرانی را (مسیر بحرانی، فعالیت‌های بحرانی، رویدادهای بحرانی) در یک شبکه از فعالیت‌هایی که زمان آنها به صورت بازه تعریف شده‌است، بررسی کردند. آنها در پژوهش خود تلاش کردند تا به پنج سوال مربوط به متد CPM خاکستری پاسخ دهند. این پنج سوال عبارتند از: مسئله تعیین مسیر بحرانی، مسئله بررسی بحرانی بودن یک مسیر، مسئله بررسی بحرانی بودن یک فعالیت، مسئله بحرانی بودن یک رویداد و مسئله یافتن K مسیر بحرانی، اما مسئله یک، یعنی یافتن یک مسیر بحرانی در این پژوهش بی پاسخ باقی مانده‌است و در پاسخ به این مسئله صرفاً بیان شده است که کافی است الگوریتم کلاسیک را به کار بریم و بلندترین مسیر گراف را بیابیم اما در مورد مشکللاتی که در انجام محاسبات با اعداد خاکستری و ترتیب آنها وجود دارد توضیحی ارائه نشده‌است. [۲].

ژائو[6]، چن و یو[7](۲۰۰۹) در مطالعه مسیر بحرانی خاکستری، بر اساس انتخاب حد پایین و یا حد بالای بازه عدد خاکستری، مسیر بحرانی اولیه و ثانویه را تعریف کردند و سپس با محاسبه میزان شناوری

---

[1] Chen
[2] Hsueh
[3] Yager
[4] Okada
[5] Gent
[6] Zhao
[7] Yu

فعالیت‌ها و تشخیص فعالیت‌های بحرانی با شناوری صفر روش محاسبه مسیرهای بحرانی را ارائه دادند.

سانگ[1] و یان[2] و یو (۲۰۰۹) با تعریف یک تابع هدف، چند هدفه و تعیین ضرایب به گونه‌ای که این تابع مینیمم شود،روشی برای تعیین مسیر بحرانی ارائه دادند. اما در این روش بایستی طول کلیه مسیرهای ممکن از گره ابتدایی به گره انتهایی مشخص شود و سپس در این تابع هدف، بهترین آن انتخاب شود. و حال آنکه در واقعیت و در بسیاری از شبکه ها تعداد مسیرهای موجود از گره آغازین به گره انتهایی بسیار زیاد است و در نتیجه استفاده از این روش بسیار زمان‌بر خواهد بود. [۸۴].

لی[3] و وانگ[4] (۲۰۱۵) روش مدلسازی شبکه خاکستری را با متد برنامه‌ریزی اعداد صحیح صفر و یک ارائه کردند و همچنین بیان کردند که در شرایط واقعی در یک شبکه خاکستری چندین مسیر بحرانی وجود دارد و کلید اصلی حل مساله یافتن مهمترین مسیر از میان مسیرهای موجود است. از این رو جهت انتخاب مهمترین مسیر، آنها شاخص ترجیح λ و تابع ترجیح منتاظر آن را تعریف کردند و بر اساس انتخاب شاخص ترجیح λ از بازه [۱و۰] مسیر بحرانی منتاظر با آن را مشخص کردند. [۹۰].

.

۲-۷-۲) مطالعات داخلی

در زمینه تعیین مسیر بحرانی در شرایط عدم قطعیت تحقیقات اندکی در ایران انجام شده است.

در گروه عدم قطعیت احتمالی، سوخکیان و بحرانی (۱۳۸۷) در پژوهش خود سه فاکتور زمان، هزینه و ریسک را در نظر گرفتند و زمان و هزینه را متغیرهای وابسته و ریسک ها را متغیرهای تاثیر گذار در نظر گرفتند و قوانین شبکه های PERT را بر روی فاکتور ریسک پیاده نموده و سه نوع ریسک

---

[1] Song
[2] Yan
[3] Li
[4] Wang

خوشبینانه، متحمل و بدبینانه بترتیب با احتمال ۶/۱ و ۶/۴ . ۶/۱ برای هر فعالیت معرفی کردند و همراه با هزینه و زمان مورد نیاز هر فعالیت، الگوریتمی جهت نشان دادن احتمال بحرانیت هر مسیر و همچنین احتمال بحرانیت هر کدام از فعالیت ها معرفی کردند[۲۳].

شهبازنیا و طالقانی (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی زمان و هزینه پروژه با آنالیز مونت‌کارلو پرداختند. [۲۴].

تقوی فرد و خضری (۱۳۹۳) الگوریتمی جدید برای تحلیل حساسیت مسیر بحرانی در شبکه‌های پرت با در نظرگرفتن ریسک‌های موجود در پروژه معرفی کردند[۲۹].

در گروه عدم قطعیت فازی اشتهاردیان و همکاران (۱۳۷۸) مدلی را برای بدست آوردن زمان اجرای هر مسیر در شبکه و مقایسه زمان مسیرها برای بدست‌آوردن زمان اجرای پروژه با استفاده از ریاضیات فازی پیشنهاد کردند، در این مدل شاخص آلفا اثر ریسک‌پذیری و خوش‌بینی مدیر پروژه در انتخاب مسیر بحرانی با لحاظ کردن برش‌های خوش‌بینی بتا را نشان می‌دهد،مزیت عمده این مدل علاوه بر ورود بحث عدم قطعیت در زمان اجرای فعالیت‌ها، دخالت میزان ریسک‌پذیری و خوش‌بینی مدیر پروژه در انتخاب مسیر بحرانی و نتیجتاً تخمین زمان اجرای پروژه با تغییر آلفا و بتا بود[۳۱].

صادقیه واخوان (۱۳۸۷) یک روش ساده و کاربردی برای تخمین زمان تکمیل پروژه و تعیین مسیر بحرانی در شبکه پروژه در شرایط فازی ارائه کردند، در این روش اعداد فازی مثلثی جهت نمایش زمان فعالیت‌ها در شبکه پروژه در نظر گرفته شده و مسئله مسیر بحرانی فازی به شکل یک مدل برنامه‌ریزی خطی با ضرایب تابع هدف فازی فرمول‌بندی شد و سپس براساس ایده رتبه بندی یاگر، مسئله CPM فازی به مسئله قطعی که قابل حل توسط روش‌های حل LP[1] ساده و کارا است تبدیل شد[۲۷].

پورموید (۱۳۸۸) و همکاران با فرض اینکه زمان انجام فعالیت‌ها به صورت اعداد فازی هستند، از طریق مدل برنامه‌ریزی خطی صفر ویک که در آن ضرایب متغیرها در تایع هدف به صورت اعداد

[1] Linear Programming

فازی‌اند مسیر بحرانی و زمان انجام پروژه را تعیین کردند، در حل این مدل، ابتدا دوگان آن نوشته شده، سپس با استفاده از رتبه‌بندی اعدادفازی مدل دوگان به صورت قطعی درآمده که هم‌ارز مدل دوگان اولیه می‌باشدو با حل مدل دوگان بدست‌آمده و تعیین محدودیت‌های فعال دوگان، متغیرهای پایه‌ای مدل اولیه حاصل شد[۱۴].

سجادی و پورموید (۱۳۸۹) راه‌حلی جهت تعیین مسیر بحرانی پروژه در محیطی با عدم قطعیت دوگانه فازی و احتمالی ارائه دادند[۱۷].

شهسواری‌پور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از رتبه‌بندی اعداد فازی، الگوریتم متد مسیر بحرانی فازی را برای تعیین مسیر بحرانی در شرایط عدم قطعیت فازی پیشنهاد کرد، در هیچ مرحله‌ای از این الگوریتم، دی فازی کردن اعداد فازی انجام نمی‌شود و زمان تکمیل پروژه بصورت یک عدد فازی ذوزنقه‌ای بدست می‌آمد[۱۲].

جعفریان مقدم و همکاران (۱۳۹۰) یک الگوریتم پیشنهادی ابتکاری به منظور اندازه گیری طولانی ترین مسیر (مسیر بحرانی) در شبکه پروژه با در نظر گرفتن زمان های فازی گسسته برای فعالیت های آن شبکه ارائه دادند[۲۹].

مروت دار و آقایی (۱۳۹۰) با استفاده از تعریف اعداد خطی تکه ای و هم چنین عملگرهای خاص آن، ریسک استفاده از روابط تقزیبی برای انجام محاسبات مربوط به زمان‌بندی فازی را برطرف کردند. هرچند انجام محاسبات با استفاده از این اعداد کمی پیچیدگی بیشتری نسبت به روابط تقریبی دارد، ولی روش ارایه شده نه تنها باعث به دست آوردن تابع عضویت دقیق برای زودترین و دیرترین زمان های اجرای پروژه می شود، بلکه امکان تشخیص برای مسیرهای بحرانی ممکن در شبکه پروژه را نیز بوجود می آورد[۳۰].

افشار نجفی و جنتی فرد (۱۳۹۱) در پژوهش خود یک مدل ریاضی زمانبندی پروژه با محدودیت منبع ارایه کردند، درحالی‌که طول زمان انجام فعالیت ها از تابع توزیع نمایی پیروی می کنند و مدل

پیشنهادی شبکه بصورت برداری فرض شده است و همچنین روابط پیش نیازی و پارامتر میانگین تابع توزیع نمایی برای هرفعالیت مشخص می باشد، در نهایت در این پروژه پارامترهای احتمالی طول زمان پروژه و مسیربحرانی به همراه درجه بحرانی بودن مسیرها و زمان اغاز ـ پایان هرفعالیت حاصل می‌شود.

امیری (۱۳۹۲) هزینه و زمان انجام فعالیت‌های پروژه را به صورت فازی در نظر گرفتن و با استفاده از روش CPM و روش TOPSIS به رتبه بندی ریسک فعالیت‌های پروژه پرداخت[۳۱].

یکدل و کیا (۱۳۹۲) یک روش ابتکاری بهبود یافته مبتنی بر اولویت برای مسأله زمانبندی پروژه محدود با پارامترهای فازی معرفی کردند[۳۲].

نادرپور و همکاران (۱۳۹۳)با استفاده از منطق فازی در عدم قطعیت غیرتصادفی به تععین مسیر بحرانی پروژه پرداختند[۳۳].

نادرپور , و همکاران (۱۳۹۴) تحقیقات انجام شده در خصوص محاسبات شبکه زمانبندی و مسیربحرانی فعالیت های پروژه با رویکرد فازی(FCPM) را در مقاله‌ای مرور کرده‌اند[۳۸].

در گروه عدم قطعیت خاکستری مرادی و موسوی (۱۳۹۴)، روشی جهت تحلیل ارزش کسب شده بر پایه تئوری خاکستری برای بهبود آنالیز شاخص های ارزش کسب شده ارائه دادند و در نهایت زمان و هزینه اتمام پروژه را در شرایط عدم قطعیت برای بهینه‌سازی زمان و هزینه پروژه تخمین زده‌ند.

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که در مورد تعیین مسیر بحرانی در شرایط عدم‌قطعیت خاکستری تا کنون پژوهشی انجام نشده است.

فصل سوم

متدولوژی تحقیق

۳-۱) مقدمه

تکنیک مسیر بحرانی یک روش جهت رویارویی با مسائل مربوط به زمانبندی و برنامه‌ریزی پروژه است. [۳].

تکنیک مسیر بحرانی، از دیاگرام‌های شماتیک جهت نمایش توالی و روابط بین فعالیت‌ها و عملیات یک پروژه استفاده می‌کند، زمان تکمیل هر فعالیت می‌تواند به منظور تعیین تأثیر آن بر زمان تکمیل کل پروژه و هزینه‌های مربوطه تحلیل شود. با استفاده از این اطلاعات، موازنه منابع (به عنوان مثال: پول، ماشین‌آلات و نیروی انسانی) جهت دستیابی به تخصیص بهینه زمان/هزینه ممکن می‌شود. متد مسیر بحرانی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی مانند برنامه‌ریزی ساخت و تولید، آماده‌سازی مناقصه‌ها و مزایده‌ها، برنامه‌ریزی تعمیرات و نگهداری، توزیع منابع و ... به‌کار می‌رود[۱۱] و [۲۳].

با این‌حال،استفاده از این متد بر این فرضیه استوار است که مدت زمان و هزینه انجام فعالیت‌ها اعداد قطعی و مشخصی هستند که در عمل و در دنیای واقعی، این فرضیه ممکن است برقرار نباشد. بنابراین زمانی که سیستم دارای عدم‌قطعیت و ابهام قابل‌توجهی است به گونه‌ای که پارامترها تحت تأثیر قرار می‌گیرند، استفاده از متد مسیر بحرانی اثربخش نخواهد بود. [۳۷].

روش‌هایی که جهت برنامه‌ریزی پروژه‌ها در شرایط عدم‌قطعیت به کار می‌رود شامل پرت PERT تکنیک‌های ارزیابی شبکه در حالت احتمالی و شبیه‌سازی مونت کارلو وتکنیک فازی می‌باشد. تکنیک PERT، هنگامی‌که عدم‌قطعیت قابل‌توجهی در پیش‌بینی مدت زمان انجام فعالیت‌ها وجود دارد بسیار کاراست و قادر است به شیوه‌ای کاملاً اثربخش زمانبندی پروژه را کنترل کند. این مدل به سه تقریب برای مدت زمان انجام فعالیت‌ها نیازمند است، این سه تقریب زمانی، از طریق پرسش از افرادی که به‌طور مستقیم در مدیریت و تکمیل پروژه درگیر هستند حاصل می‌شود. این سه تقریب عبارتند از تقریب خوش‌بینانه، تقریب محتمل و نقریب بدبینانه. سپس این تقریب‌ها جهت تعیین توزیع مدت

زمان انجام فعالیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و از این طریق احتمال تکمیل پروژه طبق زمان‌بندی تقریب زده می‌شود. [۵۴] و [۵۵].

مشکل بالقوه در استفاده از این تکنیک اینست که اولاً این روش بر پایه شماری از فرضیات آماری استوار است مانند فرضیاتی که در محاسبه انحراف معیار و امید ریاضی به کار می‌رود و همچنین فرضیات مربوط به استقلال آماری و توزیع نرمال زمان انجام فعالیت‌ها. در حالی که در عمل ممکن است تمامی این فرضیات برقرار نباشند[۷۳].

تکنیک‌های دیگر برنامه‌ریزی پروژه تحت شرایط عدم قطعیت مانند تکنیک‌های احتمالی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو و فازی نیز در زمینه الگوریتم‌های حل و نیازمندی‌های محاسباتی و داده‌های در دسترس دارای مشکلاتی هستند[۹۱].

به منظور رفع کاستی‌های توضیح داده شده در تکنیک‌های برنامه‌ریزی پروژه در شرایط عدم قطعیت، مفهوم سیستم خاکستری و تصمیم‌گیری خاکستری در چارچوب متد مسیر بحرانی شکل گرفت و به این ترتیب متد مسیر بحرانی خاکستری GCPM متولد شد. متد مسیر بحرانی خاکستری این امکان را بوجود می آورد که عدم قطعیت (که به شکل بازه‌های عددی نمایش داده می‌شود)با چارچوب مدلسازی متد مسیر بحرانی ارتباط برقرار کرده و در شرایطی که مدت زمان انجام فعالیت‌ها و هزینه انجام فعالیت‌ها به صورت بازه ظاهر شده است این متد قابل پاسخگویی باشد[۸۲].

نتایج خروجی در این متد قابلیت انعکاس شرایط بالقوه ناثبات سیستم را که در اثر عدم‌قطعیت در متغیرهای ورودی حاصل شده است داراست.

۳-۲) نوع پژوهش

براساس هدف، تحقیقات علمی را می‌توان به سه گروه بنیادی، کاربردی و علمی تقسیم کرد.

۳-۲-۱) تحقیقات بنیادی

این تحقیقات که گاه تحقیقات مبنایی یا پایه‌ای خوانده می‌شود، در جستجوی کشف حقایق و واقعیت‌ها و شناخت پدیده‌ها و اشیاء بوده، که مرزهای دانش عمومی بشر را توسعه می‌دهند و قوانین علمی را کشف نموده، به تبیین ویژگی‌ها و صفات یک واقعیت می‌پردازند. دراین تحقیقات ممکن است نظریه‌ای انشاء شود یا اصول، فرضیه‌ها یا قضایای نظریه‌ای مورد آزمایش قرار گیرد. [۵].

۳-۲-۲) تحقیقات کاربردی

این تحقیقات با استفاده از زمینه و بستر شناختی و معلوماتی که از طریق تحقیقات بنیادی فراهم شده برای رفع نیازمندی‌های بشر و بهبود و بهینه‌سازی ابزارها، روش‌ها، اشیاء و الگوها در جهت توسعهٔ رفاه و آسایش و ارتقای سطح زندگی انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تحقیقات مبادی شناختی خود را از قوانین، نظریه‌ها و نتایج تحقیقات بنیادی، می‌گیرند. [۱۶].

۳-۲-۳) تحقیقات عملی

این تحقیقات را باید تحقیقات حل مسئله یا حل مشکل نامید و آنها را نوعی تحقیق کاربردی محسوب کرد؛ زیرا نتایج آن مستقیماً برای حل مسئله خاص بکار گرفته می‌شود. تحقیقات عملی نوعاً خصلت محلی و موضعی دارد و معمولاً خاصیت تعمیم‌پذیری زیاد ندارد. این تحقیقات نیز بر داده‌های تحقیقات بنیادی تکیه دارند؛ زیرا از معلومات و قوانین آنها استفاده می‌شود. چون تحقیقات عملی با هدف رفع مشکل انجام می‌شود، هرکس که با مشکل روبرو باشد می‌تواند آن را انجام دهد.

بر اساس نحوه گردآوری داده‌ها پژوهش‌ها به دو دسته توصیفی و آزمایشی تقسیم می شوند

۳-۲-۴) تحقیق توصیفی

در تحقیقات توصیفی محقق به دنبال چگونه بودن موضوع است که شامل جمع‌آوری اطلاعات برای آزمون فرضیه یا پاسخ به سؤالات مربوط به وضعیت فعلی موضوع مورد مطالعه می‌شود. [۲۲].

۳-۲-۵) تحقیق پیمایشی

تحقیق پیمایشی به عنوان شاخه‌ای از تحقیقات توصیفی، یک روش جمع‌آوری داده‌هاست که در آن از یک گروه خاصی از افراد خواسته می‌شود تا به تعدادی سؤال خاص پاسخ دهند. [۳۶].

این پژوهش با توجه به هدف کاربردی و از نظر روش‌شناسی توصیفی- پیمایشی می‌باشد.

۳-۳) روش گردآوری داده‌ها

یکی از اصلی‌ترین بخش های هر کار پژوهشی جمع‌آوری اطلاعات می‌باشد. چنانچه این کار به شکل منظم و صحیح صورت پذیرد کار تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری از داده‌ها با سرعت و دقت خوبی انجام خواهد شد. محققان برای جمع‌آوری داده‌های موردنظر از ابزارهای مختلفی استفاده می‌نمایند، در این تحقیق با توجه به هدف و سوالات مطرح شده از دو روش مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شده است. برای جمع‌آوری اطلاعات و پیشینه تحقیق از کتاب‌ها و مقالات تخصصی زیادی استفاده شده است که بخش زیادی از تحقیق به دلیل عدم تحقیق مشابه در داخل کشور از منابع خارجی استفاده شد. و در باب مثال موردی که مربوط به پروژه عمرانی ساخت بلوک B بنیاد مسکن نیشابور می‌باشد، با مراجعه مستقیم به محل اجرای پروژه و پرسش از کارشناسان، مراحل ابتدایی مدیریت زمان، که شامل انجام تعریف فعالیت‌ها، تعیین توالی فعالیت‌ها و برآورد مدت زمان فعالیت‌ها بود صورت گرفت.

۳-۴) جامعه و نمونه‌آماری

جامعه مورد نظر این پژوهش کلیه پروژه‌هایی هستند که در شرایط عدم قطعیت با اطلاعات ناقص، زمان انجام فعالیت‌ها با داده‌های خاکستری بیان می‌شود. در مطالعه موردی، پروژه عمرانی ساخت بلوک B بنیاد مسکن نیشابور که فعالیت‌های آن توسط کارشناسان پروژه به صورت بازه‌های عددی تعریف شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۵) تعیین مسیر بحرانی در شرایط عدم قطعیت

شبکه‌های فعالیت[1] که به منظور مدلسازی پروژه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد کاربرد وسیعی در تولید، برنامه‌ریزی و کنترل دارند[۸۵].

بر اساس پارامترهایی که در این شبکه‌ها به‌کار می رود می‌توان آنها را به شبکه‌های قطعی، تصادفی، فازی و خاکستری دسته‌بندی کرد[۹۰].

شبکه‌های قطعی، شبکه‌هایی هستند که در آن پارامترهای پروژه مانند زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد قطعی و دقیق مشخص شده‌اند، در این شبکه‌ها جهت تعیین زمان تکمیل پروژه، کنترل و زمانبندی آن می توان از متد مسیر بحرانی که یکی از بهترین ابزارهای کنترل زمانی پروژه می‌باشد استفاده کرد. کلی[2] یکی از نخستین افرادی بود که مفهوم مسیر بحرانی(CPM) ، فعالیت‌های بحرانی و رویدادهای بحرانی واهمیت آنها در کنترل و زمانبندی پروژه را معرفی کرد، در این روش، مسیر بحرانی پروژه از طریق حرکات پیش‌رو و پس‌رو تعیین می‌شود، در این شبکه‌های قطعی همچنین می‌توان از روش‌های ریاضی مانند مدل‌های برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین زمان تکمیل پروژه و مسیر بحرانی استفاده کرد. [۷۳].

[1] Activity Network
[2] Kelley

در شرایط واقعی، به دلیل وجود فاکتورهای مختلف ریسک، پروژه‌های فراوانی وجود دارد که زمان انجام فعالیت‌هاو سایر پارامترهای آنها اعداد دقیق، قطعی و در دسترسی نیست، در این موارد متدهای متفاوتی جهت رویارویی با این عدم‌قطعیت وجود دارد. به طور کلی این متدها را در سه گروه احتمالات، فازی و خاکستری می‌توان دسته‌بندی کرد، که به ترتیب در شبکه‌هایی به همین نام مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در اولین گروه، عدم قطعیت احتمالی که در شبکه‌های احتمالی یا تصادفی وجود دارد، یک تابع توزیع اولیه مانند نرمال، نمایی، ارلنگ و ...جهت تعیین زمان تکمیل پروژه و مسیر بحرانی مورد نیاز است،رایج ترین شیوه تعیین مسیر بحرانی و زمان تکمیل پروژه در این نوع از شبکه‌ها تکنیک مرور وارزیابی برنامه[1] می‌باشد. در این تکنیک زمان انجام فعالیت‌ها از یک توزیع بتا پیروی می‌کند و مسیر بحرانی پروژه با تخمین سه زمان خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل تعیین می‌شود[۶۱].

به منظور استفاده از عدم قطعیت احتمالی برای زمان انجام فعالیت‌ها، نیاز داریم توزیع و پارامترهای منطبق با آن را به درستی تخمین بزنیم به این منظور دسترسی به داده‌های تاریخی برای یک مدت زمانی مشخص ضروری است. اما، در بسیاری از شرایط دنیای واقعی، داده‌های تاریخی کافی و یک تقریب مناسب برای پارامترها نمی‌تواند حاصل شود. در این موقعیت‌ها، روش جایگزین استفاده از رویکرد فازی مطرح شده توسط زاده است که زمان انجام فعالیت‌ها توسط اعداد فازی مدل می‌شود[۲۳].

در این رویکرد، مدت زمان هر فعالیت توسط کارشناسان به صورت متغیرهای زبانی مطرح می‌شود و با استفاده از تئوری فازی، این متغیرهای زبانی در قالب اعداد فازی نمایش داده می‌شود، ایده اساسی متد اعداد فازی، استفاده از مجموعه cut- و تبدیل اعداد فازی به اعداد بازه‌ای می‌باشد، از این رو چه از

[1] Program Evaluation and Review Technique

زاویه تئوری و چه از زاویه عملی، مطالعه متد مسیر بحرانی در شرایطی که با اعداد بازه‌ای روبرو هستیم بسیار اهمیت دارد. [۴].

جهت تعیین مسیر بحرانی هنگامی‌که مدت زمان لازم برای انجام فعالیت‌ها به صورت اعداد بازه‌ای بیان شده‌اند، سه روش در ادامه توضیح داده می‌شود .

۳-۵-۱) تعیین مسیر بحرانی با استفاده از بهترین زمان و بدترین زمان

چن وهمکاران در شرایط عدم‌قطعیت و وجود اطلاعات ناقص، با استفاده از تعریف بهترین زمان و بدترین زمان، برای یک پروژه که زمان انجام فعالیت‌های آن به صورت بازه‌های عددی خاکستری تعریف شده بود، مسیر بحرانی خاکستری اولیه و مسیر بحرانی خاکستری ثانویه را تعریف کردند[۳۱].

تعریف۳-۱ (بهترین زمان، زمان نامطمئن، بدترین زمان) اگر زمان یک فعالیت را بتوان به صورت یک عدد خاکستری نشان داد $G_i \epsilon [a_i , b_i] = a_i + c_i \gamma_i \ , i = 1,2,..$ آنگاه a_i را بهترین زمان برای انجام فعالیت می نامیم. c_i را زمان نامطمئن و $b_i = a_i + c_i$ را بدترین زمان تکمیل آن فعالیت می‌نامیم.

تعریف۳-۲ (مسیر بحرانی خاکستری اولیه ، فعالیت های بحرانی خاکستری اولیه) فرض کنید زمان انجام فعالیت‌ها به صورت اعداد خاکستری G_i نمایش داده می‌شود. $G_i \epsilon [a_i , b_i] = a_i + c_i \gamma_i \ , i = 1,2,..$ اگر مجموع بهترین زمان انجام فعالیت‌های مسیر k از نقطه شروع به نقطه پایان مطابق با رابطه $\sum a_i^{(k)} \geq \sum a_i^{(j)}$ از مجموع بهترین زمان انجام فعالیت های سایر مسیرهایی که از نقطه شروع به نقطه پایان می رسند بیشتر باشد، مسیر k، مسیر بحرانی اولیه و فعالیت‌هایی‌که روی این مسیر قرار دارند فعالیت‌های بحرانی اولیه نامیده می شوند.

تعریف۳-۳ (مسیر بحرانی خاکستری ثانویه، فعالیت‌های بحرانی خاکستری ثانویه) فرض کنید زمان انجام فعالیت‌های یک پروژه به صورت اعداد خاکستری G_i نمایش داده شود.$= G_i \epsilon [a_i , b_i]$ $a_i + c_i \gamma_i \ , i = 1,2,..$ اگر مجموع بدترین زمان انجام فعالیت‌های مسیر k از نقطه شروع به

نقطه پایان مطابق با رابطه $\sum(a_i + c_i)^k \geq \sum(a_i + c_i)^j$, $\sum b_i^{(k)} \geq \sum b_i^{(j)}$, از مجموع بدترین زمان انجام فعالیت‌های سایر مسیرهایی که از نقطه شروع به نقطه پایان می رسند بیشتر باشد، مسیر k، مسیر بحرانی ثانویه و فعالیت‌هایی که روی این مسیر قرار دارند فعالیت‌های بحرانی ثانویه نامیده می‌شوند.

در این پژوهش با تعریف سه پارامتر زمانی برای گره‌ها (رودترین زمان ممکن گره‌ها، دیرترین زمان ممکن گره‌ها تفاوت زمانی ممکن گره‌ها از گره) و شش پارمتر زمانی برای فعالیت ها (زودترین زمان ممکن برای شروع یک فعالیت، زودترین زمان ممکن برای پایان یک فعالیت، دیرترین زمان ممکن برای شروع یک فعالیت، دیرترین زمان ممکن برای پایان یک فعالیت، تفاوت زمانی ممکن کل فعالیت، تفاوت زمانی منفرد یک فعالیت) با استفاده از حرکات پیش‌رو و پس‌رو، مسیر بحرانی خاکستری اولیه و مسیر بحرانی خاکستری ثانویه تعیین می‌شود.

تعریف ۳-۴ زودترین زمان ممکن گره‌ها $T_E(\otimes)$ برابر است با مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به گره موجود از نقطه شروع در بدترین حالت ممکن

$$T_E(\otimes)(j) = \max[T_E(\otimes)(i) + Te(\otimes)(ij)] = a_j^* + c_j^*\gamma_j, \text{where } (a_j^* = \max\{a_i + a_{ij}\}) \quad (۱-۳)$$

تعریف ۳-۵ دیرترین زمان ممکن گره‌ها $T_l(\otimes)$ برابر است با حاصل تفریق طول مدت زمان بدترین مسیر از آن گره به گره نهایی از کل مدت زمان پروژه

$$T_L(\otimes)(i) = \min[T_L(\otimes)(j) - Te(\otimes)(ij)] = d_i^* + e_i^*\gamma_i, \text{where } (d_i^* = \min\{d_j - a_{ij}\}) \quad (۲-۳)$$

تعریف ۳-۶ تفاوت زمانی ممکن گره‌ها از گره برابر است با حاصل تفریق دیرترین زمان ممکن از زودترین زمان ممکن گره ها:

$$R(\otimes)(i) = T_L(\otimes)(i) - T_E(\otimes)(i) \qquad (۳-۳)$$

تعریف ۳-۷ زودترین زمان ممکن برای شروع یک فعالیت $T_{ES}(\otimes)$ ، فعالیت‌های یک شبکه خاکستری دارای یک زودترین زمان ممکن برای شروع می باشند که امکان شروع فعالیت‌ها قبل از این زمان وجود ندارد.

تعریف ۳-۸ زودترین زمان ممکن برای پایان یک فعالیت $T_{EF}(\otimes)$ ، آن برابر است با حاصل جمع زودترین زمان شروع فعالیت با مدت زمان ممکن برای انجام آن فعالیت، مطابق با رابطه زیر حاصل می شود

$$T_{EF}(\otimes)(ij) = T_{ES}(\otimes)(ij) + T_E(\otimes)(ij) \qquad (۴-۳)$$

تعریف ۳-۹ دیرترین زمان ممکن برای شروع یک فعالیت $T_{LS}(\otimes)$. آن برابر است با دیرترین زمان ممکن گره پایانی فعالیت کسر از مدت زمان فعالیت. مطابق با رابطه زیر:

$$T_{LS}(\otimes)(ij) = T_L(\otimes)(ij) - T_E(\otimes)(ij) \qquad (۵-۳)$$

تعریف ۳-۱۰ دیرترین زمان ممکن برای پایان یک فعالیت .$T_{LF}(\otimes)$، آن برابر است با دیرترین زمان ممکن گره پایانی . مطابق با رابطه زیر:

$$T_{LF}(\otimes)(ij) = T_L(\otimes)(j) \qquad (۶-۳)$$

تعریف ۳-۱۱ تفاوت زمانی ممکن کل فعالیت بیان می‌کند چه مدت تکمیل یک فعالیت را می توانیم به تاخیر بیاندازیم بدون اینکه در تحویل به موقع پروژه خللی وارد شود.

تعریف ۳-۱۴تفاوت زمانی منفرد یک فعالیت برابر است با حاصل تفریق زودترین زمان شروع فعالیت از زودترین زمان ممکن برای پایان فعالیت.

۳-۵-۱-۱) متد تعیین مسیر بحرانی خاکستری اولیه

جهت تعیین مسیر بحرانی خاکستری اولیه با استفاده از حد پایین بازه و یا با استفاده از بهترین زمان انجام فعالیت، و متد حرکات پیشرو و پسرو، شناوری کل فعالیت‌ها رامحاسبه می‌کنیم، و فعالیت‌هایی را که شناوری کل آنها برابر با صفر است شناسایی می‌کنیم، این فعالیت‌ها، فعالیت‌های خاکستری اولیه و مجموع آنها مسیر بحرانی خاکستری اولیه را تشکیل می‌دهد.

۳-۵-۱-۲)متد تعیین مسیر خاکستری بحرانی ثانویه

فعالیت های خاکستری ثانویه، فعالیت‌هایی هستند که تفاوت زمانی خاکستری کل آنها برابر با صفر است در شرایطی که از اعداد سمت راست بازه برای انجام محاسبات استفاده می‌شود. سپس این فعالیت‌های خاکستری ثانویه، مسیر بحرانی ثانویه را تشکیل می‌دهند.

۳-۵-۲) تعیین مسیر بحرانی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی

لی[۱] و جیانجونگ[۲] در پژوهش خود با توجه به اینکه مایل‌استون[۳] کنترل پروژه، مسیر بحرانی است و متد مسیر بحرانی[۴] در شرایط قطعیت یک ابزار کاراست و حال آنکه در در واقعیت در بسیاری از موارد به علت وجود فاکتورهای ریسک، زمان انجام فعالیت‌ها را نمی توان با اعداد قطعی بیان کرد، بر اساس برنامه‌ریزی خطی ، مسئله مسیر بحرانی را به صورت رابطه فرموله کردند[۵۴].

$$D(t) = \max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} t_{ij} \cdot x_{ij} \qquad (۳-۷)$$

s.t.

$$\sum_{j=0}^{n} x_{1j} = 1$$

---

[1] Li
[2] Jianjung
[3] Keystone
[4] CPM: critical path method

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = \sum_{k=1}^{n} x_{ki} \ (i = 2, k, n-1)$$
$$\sum_{k=1}^{n} x_{kn} = 1$$
$$X_{IJ} = 0,1 \ (i, j \in A)$$

آنها عنوان کردند که در واقعیت، در یک شبکه که زمان فعالیت‌ها به صورت بازه تعریف شده‌است، تعداد زیادی مسیر بحرانی وجود دارد وکلید اساسی حل مساله یافتن مهمترین مسیر بحرانی در بین مسیرهای موجود است. به عبارتی بر اساس پژوهش آنها می توان گفت،در حالت کلی، حل مسئله عدم قطعیت به معنای انتخاب یک راه‌حل از میان راه‌حل‌های موجود می باشد. و یک دستورالعمل مشخص برای انتخاب یک مسیر کنترل از میان مسیرهای بحرانی موجود مورد نیاز است. از این رو یک شاخص ترجیح تعریف شده‌است و تابع ترجیح مطابق زیر نمایش داده می‌شود.

$$t_{ij} = \underline{t_{ij}} + \lambda(\overline{t_{ij}} - \underline{t_{ij}}) \qquad (۸-۳)$$
$$D(t) = \max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} t_{ij} \cdot x_{ij}$$
$$= \max \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (\underline{t_{ij}} + \lambda(\overline{t_{ij}} - \underline{t_{ij}})) \cdot x_{ij} \ \text{s.t.}$$
$$\sum_{j=0}^{n} x_{1j} = 1$$
$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = \sum_{k=1}^{n} x_{ki} \ (i = 2, k, n-1)$$
$$\sum_{k=1}^{n} x_{kn} = 1$$
$$X_{IJ} = 0,1 \ (i, j \in A)$$

مشخصاً زمانی‌که$\lambda = 0$ حد پایین بازه به دست خواهد آمد و زمانی که$\lambda = 1$ حد بالای بازه بدست خواهد آمد. هنگامی‌که$\lambda = 0.5$ ، مقدار مورد انتظار بازه بدست خواهد آمد و مسیر بحرانی بدست آمده مشابه استفاده از متد احتمال خواهد بود.

۳-۵-۳) تعیین مسیر بحرانی با استفاده از حد کنترل پایینی، انتظار نسبی و واریانس نسبی

سانگ و یان با تعریف حدکنترل پایینی، انتظار نسبی و ورایانس نسبی، و نهایتاً تشکیل یک تابع هدف چند هدفه، متدی برای تعیین مسیر بحرانی ارائه دادند که در ادامه به تفضیل توضیح داده خواهد شد[۵۴].

تعریف۳-۱۵ اگر یک حد کنترل پایینی داشته باشیم، احتمال$t(p) <t$ مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$F(p,t)=\begin{cases}0 & t<t^{-}(p)\\ \frac{t-t^{-}(p)}{t^{+}(p)-t^{-}(p)} & t^{-}(p)\le t\le t^{+}(p)\\ 1 & t^{+}(p)\le 1\end{cases} \qquad (۹-۳)$$

تعریف۳-۱۶ اگر یک حد کنترل پایین تعریف کنیم، مسیر$p^{*}\in P(n)$ یک مسیر بحرانیست اگرو فقط اگر:

$$F(p^{*},t)=\min F(p,t) \qquad (۱۰-۳)$$

تعریف ۳-۱۷ برای مسیر $p\in P(n)$ ، انتظار و انتظار نسبی مسیر مطابق با فرمول زیر تعریف می شود:

$$m(p)=\frac{1}{2}\left[\sum_{(i,j)\in p} t^{+}(i,j)+\sum_{(i,j)\in p} t^{-}(i,j)\right] \qquad (۱۱-۳)$$

$$\tilde{m}(p)=\frac{m(p)}{\frac{1}{2}[T^{+}+T^{-}]}=\frac{\sum_{(i,j)\in p}[t^{+}(i,j)+t^{-}(i,j)]}{T^{+}+T^{-}} \qquad (۱۲-۳)$$

تعریف ۳-۱۸ برای مسیر $p\in P(n)$ ، واریانس و واریانس نسبی مسیر مطابق با فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$d(p)=\left[\sum_{(i,j)\in p} t^{-}(i,j)-m(p)\right]^{2}+\left[\sum_{(i,j)\in p} t^{+}(i,j)-m(p)\right]^{2} \qquad (۱۳-۳)$$

$$\tilde{d}(p) = \frac{d(p)}{\frac{1}{2}(T^{+} - T^{-})^{2}} = \frac{[\sum_{(i,j)\in p}(t^{+}(i,j) - t^{-}(i,j))]^{2}}{(T^{+} - T^{-})^{2}} \qquad (۱۴-۳)$$

تعریف ۳-۱۸ با تعیین یک حد کنترل t، مسیر $p \in P(n)$ ، یک مسیر بحرانی است اگر و فقط اگر :

$$\min\{ -\tilde{m}(p), \tilde{d}(p), F(p,t)\} \qquad (۱۵-۳)$$

متدهای زیادی برای حل یک مسئله چند هدفه وجود دارد، سانگ و یان در پژوهش خود میانگین وزنی را بکار برده‌اند.

$$\min -\lambda_1 \tilde{m}(p) + \lambda_2 \tilde{d}(p) + \lambda_3 F(p,t) \qquad (۱۵-۳)$$
$$0 \le \lambda_1 \le 1, 0 \le \lambda_2 \le 1, 0 \le \lambda_3 \le 1, \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

فصل چهارم

تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱) مقدمه

پروژه‌های ساختمانی، علارغم رکود چند ساله اخیر، یکی از زمینه‌های پویا در حوزه پروژه‌های انجام شده در کشور هستند که برخلاف تجارب بسیار در این زمینه، هنوز از نافرجامی در حوزه بهره‌برداری رنج می برند. به طوری‌که نبود برنامه‌ریزی صحیح در این حیطه، عملاً باعث ناکارآمد بودن محصول نهایی شده است و در بیشتر موارد نیازها و پیش‌بینی‌های به‌عمل آمده در ابتدای کار با به تعویق افتادن اختتام پروژه دچار تزلزل و ناهمگونی می‌شود[۸۳].

به طور خاص، مدیریت در پروژه‌های ساختمانی مجموعه اهدافی دارد که با اجرای رشته عملیاتی که محدودیت منابع دارند، به دست می‌آید. بین اهداف مورد نظر از نظر خدمات، هزینه، زمان، کیفیت و محدودیت هایی که به نیروی انسانی، مصالح و منابع مالی اعمال می‌شود، تضادهایی بالقوه وجود دارد. این تضادها را باید در همان ابتدای کار حل نمود. در نتیجه وظایف مدیریت پروژه در کارهای ساختمانی عبارتند از [۸۸]:

- تنظیم مشخصات مربوط به اهداف و برنامه‌های پروژه شامل تصویر حدود کار، بودجه‌بندی، زمان‌بندی، تنظیم نیازمندی‌های اجرایی و انتخاب شرکت‌کنندگان در پروژه.

- به حداکثر رساندن بهره‌وری کارآمد منابع، از طریق تأمین نیروی کار، مواد و ماشین‌آلات، مطابق با جداول زمان‌بندی و برنامه‌های از قبل تعیین شده.

- اجرای عملیات مختلف از طریق هماهنگی و کنترل مناسب برنامه‌ریزی، طراحی، برآورد، بستن پیمان و ساخت در طول عملیات

- توسعه روابط مکانیسم‌های موثر برای حل تضادها بین شرکت کنندگان مختلف پروژه.

ایجاد زمان‌بندی در پروژه به منظور تعیین زمان شروع و پایان پروژه انجام می‌گیرد و هدف نهایی آن خلق یک زمان بندی واقع بینانه است، که مبنایی برای نظارت بر روند پیشرفت پروژه در ابعاد زمانی

مشخص را نمایش می‌دهد.برای تحلیل یا برنامه‌ریزی زمان‌بندی و نظارت بر کارها و فعالیت‌ها، روش‌ها وشیوه‌های گوناگون طراحی و ابداع و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

بزرگترین نگرانی در پروژه‌های عمرانی، عدم اطمینان از اجرای کار مطابق با برنامه زمان‌بندی و همینطور افزایش زمان و هزینه طرح‌های عمرانی است، که برطرف کردن آن در گرو استفاده از ابزارهای بروز مدیریتی در جهان می‌باشد.

۲-۴) مطالعه موردی

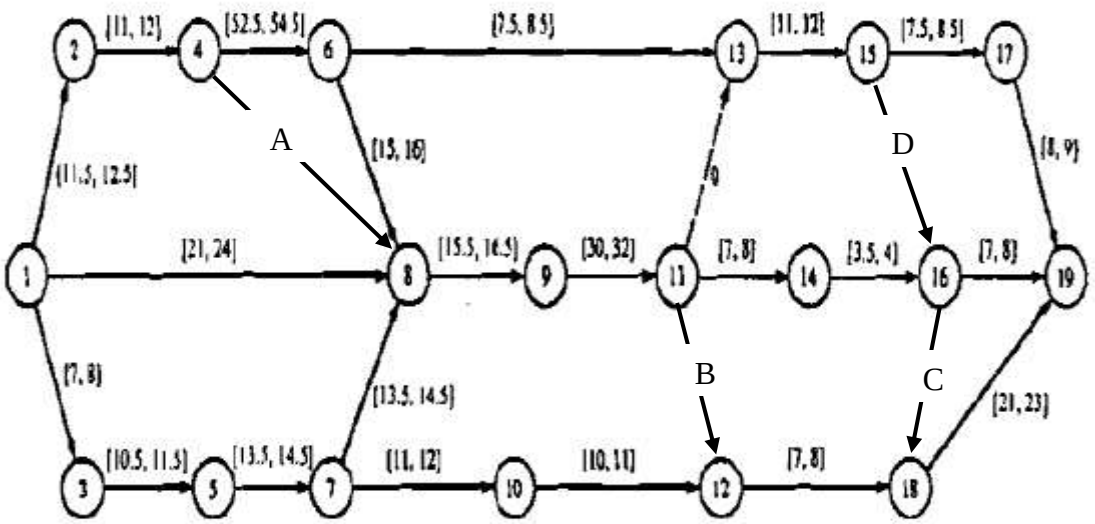
آمار پروژه‌های عمرانی کشور مستخرج از منابع و اسناد، نشان دهنده مشکلات اجرایی فراوان، عدم تطابق زمان در نظر گرفته شده با واقعیات موجود در بسیاری از پروژه‌ها می باشد[۲۵].

برنامه‌ریزی و مدیریت موفق پروژه‌های عمرانی نیازمند زمانبندی دقیق وهماهنگی تعداد زیادی از فعالیت‌های مرتبط به هم می‌باشد. این فعالیت‌ها و وظایف می‌توانند با استفاده از شبکه فعالیت‌ها نمایش داده شوند، این شبکه‌ها، فعالیت‌های مختلف پروژه و ترتیب (پیش‌نیازی و پس‌نیازی) مناسب را نشان داده و تصویر ومدلی واضح از روابط میان فعالیت‌ها می‌باشد، با استفاده از این مدل مشخص می‌شود که چطور زمانبندی و برنامه‌ریزی بر رفتار کلی سیستم اثر می‌گذارد[۶۲].

در برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی معمولاً در مدت زمان انجام فعالیت‌ها و هزینه‌های مرتبط با فعالیت‌ها عدم قطعیت وجود دارد. اطلاعات و داده‌ها به طور دقیق و قطعی قابل بیان نیست و به عنوان مثال به این صورت عنوان می‌شود: هزینه مستقیم برای پروژه بین ۱۰۰۰۰۰دلار تا ۱۲۰۰۰۰۰ دلار خواهد بود یا مدت زمان لازم برای انجام فعالیت به طور تقریبی بین ۱۵ تا ۲۰ ساعت خواهد بودو یا پروژه به طور کلی بین ۲۲ تا ۲۴ ماه طول خواهد کشید و مانند این. طبعاً چنانچه بخواهیم این سیستم‌ها را با متد مسیر بحرانی قطعی CPM مدلسازی کنیم با مشکل روبرو خواهیم شد. از این رو در متد مسیر بحرانی

خاکستری به منظور انعکاس و انتقال اثرات این عدم‌قطعیت‌ها، مفاهیم سیستم‌های خاکستری و تصمیمات خاکستری وارد چارچوب خاکستری شد [۶۸].

در این پروژه عمرانی که مربوط به بلوک B بنیاد مسکن شهرستان نیشابور می باشد، در مجموع تعداد ۳۱۲ فعالیت شناسایی شد (جهت مشاهده لیست فعالیت‌های پروژه و پیش‌نیازی و پس‌نیازی آنها به پیوست ۱ مراجعه شود.) از آنجایی هدف، صرفاً معرفی روش پیشنهاد شده و مقایسه کارایی آن با روش های موجود می باشد، ۳۱۲ فعالیت شناسایی شده در مجموع به ۲۷ فعالیت اصلی خلاصه شده‌اند. فعالیت‌های پیش‌نیاز و پس نیاز هر فعالیت مشخص شده است و شبکه فعالیت‌ها در شکل (۴-۱)، که تقدم و تأخر و وابستگی فعالیت‌ها را مشخص می‌کند ترسیم شده‌است. جهت تعیین زمان مورد نیاز برای انجام این فعالیت‌ها، کارشناسان با توجه به تغییراتی که در سرعت انجام و تکمیل هر فعالیت در صورت تغییرات در میزان در دسترس بودن منابع رخ می‌دهد و همچنین با توجه به ناپایداری شرایط آب وهوایی، پیش بینی خود را در مورد زمان مورد نیاز برای تکمیل هر فعالیت عنوان کرده‌اند. نظرات کارشناسان در یک جدول تصمیم گیری با اطلاعات ناقص گردآوری شده است. جدول (۴-۱) نمونه‌ای از جدول تصمیم‌گیری و پیش‌بینی متخصصین در مورد زمان چهار فعالیت A, B, C, D را که در شبکه فعالت‌ها در شکل (۴-۱) نمایش داده شده‌اند، مشخص می‌کند. (هیچ‌گونه اطلاعی از احتمال رخداد عدد خاصی در بازه وجود ندارد.).



شکل ۴-۱) شبکه فعالیت‌های پروژه

در جدول (۴-۱)؛ زمان مورد نیازبرای تکمیل فعالیت توسط هر کارشناس می‌تواند به صورت عدد سفید (مثال: داده مربوط به نظر کارشناس ۲ در مورد فعالیت A)، سیاه (مثال: داده مربوط به نظر کارشناس ۱ در مورد فعالیت D)، و خاکستری با حد بالا و پایین (مثال: داده مربوط به نظر کارشناس۲ در مورد فعالیتC)، خاکستری تنها با حد بالا (مثال: داده مربوط به نظر کارشناس ۴ در مورد فعالیتB) و خاکستری تنها با حد پایین (مثال: داده مربوط به نظر کارشناس ۳ در مورد فعالیت C) عنوان شود.

جدول ۴-۱) جدول تصمیم‌گیری خاکستری در مورد زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت

	کارشناس۱	کارشناس۲	کارشناس۳	کارشناس۴	بازه عددی
فعالیت A	[4,5]	[5,5]	[4,4]	[4,5]	[4,5]
فعالیت B	[2,9]	[7,9]	[6,8]	$[-\infty, 7]$	[6,9]
فعالیت C	[10,14]	[9,12]	$[9, +\infty]$	[10,15]	[9,15]
فعالیت D	$[-\infty, +\infty]$	[10,16]	[9,15]	[8,14]	[8,16]

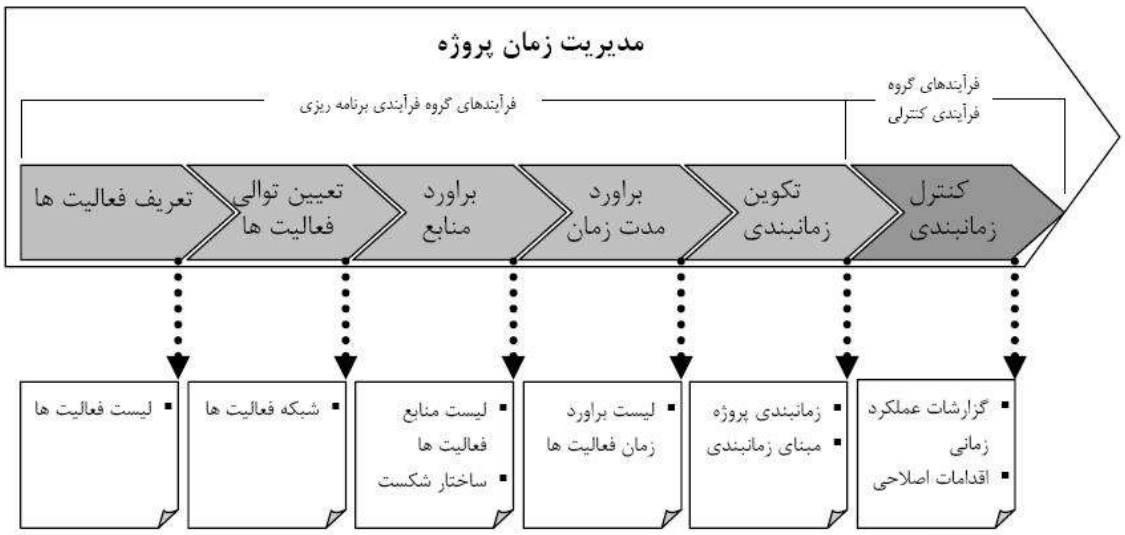
۱-اگر t زمان فعالیت x به صورت عدد خاکستری تنها با حد پایین $t(x) \in (a^{-}, +\infty)$ توسط کارشناس عنوان شود، ما فرض می‌کنیم که حد بالای عدد خاکستری موجود است اما حذف شده است و آن را با بیشترین مقدار پیش‌بینی شده توسط کارشناسان برای آن فعالیت جایگزین می‌کنیم.

۲- اگر t زمان فعالیت x به صورت عدد خاکستری تنها با حد بالا $t(x) \in (-\infty, a^{+})$ توسط کارشناس عنوان شود، ما فرض می‌کنیم که حد پایین عدد خاکستری موجود است اما حذف شده است و آن را با کمترین مقدار پیش‌بینی شده توسط کارشناسان برای آن فعالیت جایگزین می‌کنیم.

۳- اگر t زمان فعالیت x به صورت عدد سیاه $t(x) \in (-\infty, +\infty)$ عنوان شود، ما فرض می‌کنیم که حد بالا و پایین عدد سیاه موجود است اما حذف شده است(کارشناس اطلاع کافی در مورد آن ندارد.) و حد بالا را با بیشترین مقدار و حد پایین آن را با کمترین مقدار پیش‌بینی شده توسط کارشناسان برای آن فعالیت جایگزین می‌کنیم. [۶۴].

اجتماع مقادیر پیش بینی شده برای زمان مورد نیاز برای تکمیل هر فعالیت را به عنوان بازه خاکستری نماینده آن فعالیت معرفی می‌کنیم.

اکنون از مجموعه مراحل مدیریت زمان پروژه که در شکل (2-4) نشان داده شده است، مرحله تعریف فعالیت‌ها، تعیین توالی فعالیت‌ها و برآورد منابع و برآورد مدت زمان هر فعالیت را طی کردیم، و وارد مرحله تکوین زمانبندی پروژه و تعیین مسیر بحرانی می‌شویم، با استفاده از روش تشریح شده در ذیل مسیر بحرانی خاکستری را مشخص می کنیم. [۷۱].



شکل ۴-۲) مدیریت زمان پروژه

۴-۳) روش تعیین مسیر بحرانی خاکستری

فرض می‌کنیم که چهار گام ابتدایی مدیریت زمان پروژه که عبارتند از تعریف فعالیت‌ها، تعیین توالی فعالیت‌ها، برآورد منابع و برآورد مدت زمان خاکستری هر فعالیت به درستی انجام گرفته است و اکنون در مرحله تکوین زمانبندی قرار داریم.

مرحله ۱: مطابق با تعریف (۴-۳-۱) هسته بازه عددی مربوط به مدت زمان مورد نیاز برای انجام هر فعالیت را محاسبه می‌کنیم. محاسبات مربوط به هسته در ستون چهارم جدول (۴-۲) نوشته شده است.

تعریف ۴-۳-۱) هسته عدد خاکستری، با توجه به نوع عدد خاکستری به یکی از سه روش زیر محاسبه می‌شود:

اگر زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت a با عدد خاکستری $\otimes$ نمایش داده شود و $\otimes \in [t^-, t^+], t^- < t^+$ یک عددخاکستری پیوسته باشد واطلاعات مربوط به توزیع مقادیر در بازه عدد خاکستری موجود نباشد، هسته عدد خاکستری مطابق رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود.

$$\widehat{\otimes} = \frac{1}{2}(t^- + t^+) \quad (۱-۴)$$

اگر $\otimes$ یک عدد خاکستری گسسته باشد، و $t_i \in [t^-, t^+](i = 1, 2, \dots, n)$ بیانگر تمامی مقادیر ممکن برای عدد خاکستری $\otimes$ باشد، هسته آن از رابطه (۴-۲) حاصل می‌شود.

$$\widehat{\otimes} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \quad (۲-۴)$$

اگر $\otimes \in [t^-, t^+], t^- < t^+$ یک عددخاکستری باشد که اطلاعات مربوط به توزیع مقادیر در بازه عدد خاکستری موجود باشد، هسته عدد خاکستری مطابق رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شود.

$$\widehat{\otimes} = E(\otimes) \quad (۳-۴)$$

مرحله ۲: از اجتماع کلیه اعداد خاکستری مربوط به مدت زمان مورد نیاز برای فعالیت‌ها، بازه مرجعی[1] را که تشکیل دهنده این اعداد خاکستری هستند بدست می‌آوریم:

$$\Omega = [T^-, T^+] = [3.5, 54.5] \quad (۴-۴)$$

$$T^- = \min t^-(i, j) = \min\{11.5, 11, 52.5, \dots\} = 3.5 \quad (۵-۴)$$

$$T^+ = \min t^+(i, j) = \max\{12.5, 12, 54.5, \dots\} = 54.5 \quad (۶-۴)$$

[1] Field or Background

مرحله ۳: براساس رابطه طول یک عدد خاکستری در فصل ۲ (۲-، طول یک عدد خاکستری هر یک از فعالیت‌های پروژه و طول عدد خاکستری مرجع را محاسبه می‌کنیم. طول عدد خاکستری هر یک از فعالیت‌های پروژه در ستون پنجم جدول (۴-۲) نوشته شده‌است/

$$\mu(\otimes) = t^{+} - t^{-} \qquad (۴-۷)$$

$$\mu(\Omega) = T^{+} - T^{-} = 54.5 - 3.5 = 51 \qquad (۴-۸)$$

جدول ۴-۲) نمایش فعالیت‌ها همراه بازه خاکستری، هسته، درجه و فرم تنزیل شده

ردیف	فعالیت	مدت	$\widehat{\otimes}$	$\mu(\otimes)$	$g^0(\otimes)$	$\widehat{\otimes}_{g^0}$
۱	۱-۲	**[11.5,12.5]**	۱۲	۱	۰.۰۲	$12_{0.02}$
۲	۲-۴	**[11.12]**	۱۱.۵	۱	۰.۰۲	$11.5_{0.02}$
۳	۴-۶	**[52.5. 54.5]**	۵۳.۵	۲	۰.۰۴	$53.5_{0.04}$
۴	۶-۱۳	**[7.5, 8.5]**	۸	۱	۰.۰۲	$8_{0.02}$
۵	۱۳-۱۵	**[11, 12]**	۱۱.۵	۱	۰.۰۲	$11.5_{0.02}$
۶	۱۵-۱۷	**[7.5, 8.5]**	۸	۱	۰.۰۲	$8_{0.02}$
۷	۱۷-۱۹	**[8,9]**	۸.۵	۱	۰.۰۲	$8.5_{0.02}$
۸	۱-۸	**[21,24]**	۲۲.۵	۳	۰.۰۶	$22.5_{0.06}$
۹	۸-۹	**[15.5,16.5]**	۱۶	۱	۰.۰۲	$16_{0.02}$
۱۰	۹-۱۱	**[30,32]**	۳۱	۲	۰.۰۴	$31_{0.04}$
۱۱	۱۱-۱۴	**[7,8]**	۷.۵	۱	۰.۰۲	$7.5_{0.02}$
۱۲	۱۴-۱۶	**[3.5, 4]**	۳.۷۵	۰.۵	۰.۰۱	$3.75_{0.02}$
۱۳	۱۶-۱۹	**[7.8]**	۷.۵	۱	۰.۰۲	$7.5_{0.02}$
۱۴	۱-۳	**[7,8]**	۷.۵	۱	۰.۰۲	$7.5_{0.02}$
۱۵	۳-۵	**[10.5, 11.5]**	۱۱	۱	۰.۰۲	$11_{0.02}$

جدول ۴-۲) نمایش فعالیت‌ها همراه بازه خاکستری، هسته، درجه و فرم تنزیل شده

ردیف	فعالیت	مدت	$\widehat{\otimes}$	$\mu(\otimes)$	$g^0(\otimes)$	$\widehat{\otimes}_{g^0}$
۱۶	۵-۷	**[13.5,14.5]**	۱۴	۱	۰.۰۲	$14_{0.02}$
۱۷	۷-۱۰	**[11, 12]**	۱۱.۵	۱	۰.۰۲	$11.5_{0.02}$
۱۸	۱۰-۱۲	**[10, 11]**	۱۰.۵	۱	۰.۰۲	$10.5_{0.02}$
۱۹	۱۲-۱۸	**[7,8]**	۷.۵	۱	۰.۰۲	$7.5_{0.02}$
۲۰	۱۸-۱۹	**[21,23]**	۲۲	۲	۰.۰۴	$22_{0.04}$
۲۱	۷-۸	**[13.5, 16.5]**	۱۵	۳	۰.۰۶	$15_{0.06}$
۲۲	۶-۸	**[15,16]**	۱۵.۵	۱	۰.۰۲	$15.5_{0.02}$
۲۳	۱۱-۱۳	**[9,9]**	۹	۰	۰	$9_{0.00}$
۲۴	۴-۸	**[4,5]**	۴.۵	۱	۰.۰۲	$4.5_{0.02}$
۲۵	۱۱-۱۲	**[6,9]**	۷.۵	۳	۰.۰۶	$7.5_{0.06}$
۲۶	۱۶-۱۸	**[9,15]**	۱۲	۶	۰.۱۲	$12_{0.12}$
۲۷	۱۵-۱۶	**[8,16]**	12	۸	۰.۱۶	$12_{0.16}$

مرحله ۴: براساس فرمول درجه خاکستری یک عدد خاکستری، درجه خاکستری مربوط به بازه هر یک از فعالیت‌های پروژه را محاسبه می‌کنیم. درجه خاکستری فعالیت‌ها در ستون ششم جدول (۴-۲) ثبت شده‌است.

$$g^0(\otimes) = \frac{\mu(\otimes)}{\mu(\Omega)} \qquad (۹-۴)$$

مرحله ۵: بر اساس تعریف فرم تنزیل شده عدد خاکستری که توسط سفینگ لیو[۱] و فارست[۲] ارائه شده‌است و با استفاده از هسته و درجه خاکستری که در مراحل قبل محاسبه شده فرم تنزیل شده هر عدد خاکستری مربوط به مدت زمان لازم برای انجام فعالیت را می‌نویسیم. فرم تنزیل‌شده هر عدد خاکستری مربوط به مدت هر فعالیت در ستون هفتم جدول (۴-۲)ثبت شده‌است.

$$[t^-, t^+] = \widehat{\otimes}_{g^0} \qquad (۹-۴)$$

مرحله ۶: اکنون با توجه به ریاضیات فرم تنزیل شده عدد خاکستری و تعریف زودترین زمان شروع و زمان پایان در حرکت پیش رو، زودترین زمان شروع (ES[۳]) و پایان (EF[۴]) هر فعالیت را محاسبه می‌کنیم.برای شروع محاسبه، یک تاریخ برای رویداد آغازین شبکه تعیین می‌شود. در این مطالعه مطابق با معمول، تاریخ رویداد آغازین را صفر تعیین کرده‌ایم.

$$ES_{Start} = 0 \qquad (۱۰-۴)$$

این محاسبات از رویداد آغازین شبکه شروع شده و به سمت رویداد پایانی ادامه می‌یابند، زودترین تاریخ وقوع رویداد پایه هر فعالیت را به مدت زمان (Duration) آن فعالیت اضافه می‌کنیم تا زودترین تاریخ وقوع رویداد پایان آن فعالیت به دست آید.

$$EF_{ACTIVITY} = ES + Duration \qquad (۱۱-۴)$$

به عنوان مثال در مورد فعالیت (۲-۱) زودترین زمان شروع فعالیت ES برابر با صفر و زودترین زمان پایان برابر با $12_{0.02}$ می‌باشد.

---

[1] Sifeng Liu
[2] Forrest
[3] Earliest Start
[4] Earliest Finish

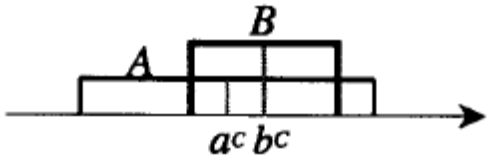
$$EF_{ACTIVITY} = ES + Duration = 0 + 12_{0.02} = 12_{0.02} \qquad (۱۲-۴)$$

اگر بیش از یک فعالیت به رویدادی می‌رسند (رویداد پوششی)، زودترین تاریخ‌ها از طریق همه فعالیت‌های که به رویداد می‌رسند، محاسبه شده و بزرگترین آنها انتخاب می‌شود. به عنوان مثال، زودترین زمان شروع فعالیت (۹-۸)، برابر است با ماکزیمم زودترین زمان پایان فعالیت های (۸-۶) و (۸-۴) و (۸-۱) و (۸-۷).

$$EF_{ACTIVITY} = ES + Duration = 0 + 12_{0.02} = 12_{0.02} \qquad (۱۳-۴)$$

در انتخاب بزرگترین فرم کاسته شده دو بازه خاکستری، با دو پارامتر هسته و درجه خاکستری روبرو هستیم. مطابق تعریف ارائه شده توسط اوکادا[1] و گنت[2][۷۲] اگر هسته (که نماینده مرکز عدد خاکستری است) عدد خاکستری B از هسته عدد خاکستری A بزرگتر و درجه خاکستری(که نماینده عرض عدد خاکستری است.) عدد خاکستری B از درجه خاکستری A کوچکتر باشد، عدد خاکستری B از عدد خاکستری A بزرگتر است . دو بازه خاکستری A, B در شکل (۴-۳) نشان داده شده‌اند.

$$A \leq_{\beta} B \leftrightarrow b^C \geq a^C, a^W \geq b^W \Leftrightarrow \widehat{\otimes}_B \geq \widehat{\otimes}_A \text{ and } g^0(A) \geq g^0(B \qquad (۱۴-۴)$$



شکل ۴-۳) رابطه $A<B$ براساس مرکز و عرض بازه خاکستری.

[1] Shinkoh Okada

[2] Mitsuo Gent

اما اگر این دو شرط همزمان برقرار نبود ، اوکادا و گنت، تعریفی در مورد درجه نسبی بزرگی بر اساس هسته و عرض بازه ارائه داده اند :

$$A \leq_{\beta} B \leftrightarrow b^{C} - a^{C} \geq (1-\beta)\,(b^{W} - a^{W}) \text{ and } b^{C} - a^{C} \geq \beta(b^{W} - a^{W}) \quad (۱۵-۴)$$

در این رابطه b^{C} و a^{C} نشان‌دهنده هسته و یا مرکز عدد خاکستری است و b^{w} و a^{w} نشان‌دهنده عرض ($\frac{\mu(a)}{2}$) عدد خاکستری و ضریب β نماینده درجه نسبی بزرگی و عددی در بازه [0,0.5] می‌باشد. با جاگزینی هسته و درجه خاکستری در رابطه (۴-۱۴) ، رابطه (۴-۱۵) حاصل می‌شود.

$$A \leq_{\beta} B \leftrightarrow \widehat{\otimes}_{B} - \widehat{\otimes}_{A} \geq (1-\beta)\frac{\mu(\Omega)}{2}(g^{0}(B) - g^{0}(A)) \text{ and } \widehat{\otimes}_{B} - \widehat{\otimes}_{A} \geq \beta\frac{\mu(\Omega)}{2}(g^{0}(B) - g^{0}(A)) \quad (۱۶-۴)$$

محاسبات مربوط به زودترین زمان شروع و زودترین زمان پایان پروژه عمرانی مورد نظر در ستون چهارم وپنجم جدول (۴-۳) ثبت شده‌است.

مرحله ۷: با توجه به ریاضیات فرم تنزیل شده عدد خاکستری و تعریف دیرترین زمان شروع (LS^{1}) و دیرتین زمان پایان (LF^{2}) در حرکت پس رو، دیرترین زمان شروع و پایان هر فعالیت را محاسبه می‌کنیم. در این محاسبات که از رویداد پایانی شبکه شروع شده و به سمت رویداد آغازین ادامه می‌یابند، زمان هر فعالیت از دیرترین تاریخ وقوع رویداد پایان آن فعالیت کسر می‌شود تا دیرترین تاریخ وقوع رویداد پایه آن فعالیت محاسبه می‌شود.

$$LF_{END} = EF_{END} \quad (۱۷-۴)$$

[1] Latest Start
[2] Latest Finish

$$LS_{ACTIVITY} = LF - Duration \quad (۱۸-۴)$$

در صورتی که بیش از یک فعالیت از رویدادی خارج می‌شود (رویداد جوششی)، دیرترین تاریخ‌ها از طریق همه فعالیت‌های که به رویداد می‌رسند، محاسبه شده و کوچکترین آنها به عنوان دریرترین تاریخ وقوع رویداد انتخاب می‌شود. برای محاسبه کوچکترین نیز از رابطه (۴-۱۴) و (۴-۱۶) استفاده می‌شود. محاسبات مربوط به دیرترین زمان شروع و دیرترین زمان پایان پروژه عمرانی مورد نظر در ستون ششم وهفتم جدول (۴-۳) ثبت شده‌است.

مرحله۸: پس از محاسبه زودترین تاریخ شروع و دیرترین تاریخ شروع برای هر فعالیت، با توجه به تعریف شناوری جمعی (TF[1]) مطابق با فرمول زیر، مقدار زمانی که هر فعالیت می‌تواند به تعویق بیفتد یا به اجرای آن افزوده شود بدون آنکه در کل زمان اجرای پروژه تأثیری بگذارند محاسبه می‌شود . محاسبات مربوط به شناوری در ستون هشتم جدول (۴-۳) ثبت شده است.

$$TF = LF - EF \quad (۱۹-۴)$$

مرحله ۹: فعالیت‌هایی که شناوری جمعی آنها برابر صفر هستند مشخص می‌شود، این فعالیت‌ها، فعالیت‌های بحرانی نامیده می‌شوند. فعالیت‌های بحرانی در ستون نهم جدول (۴-۳) ثبت شده‌است.

مرحله ۱۰ مجموع فعالیت‌هایی که شناوری جمعی آنها برابر صفر است مسیری را تشکیل می‌دهند که این مسیر، مسیر بحرانی نامیده می‌شود. در مثال ذکر شده، مسیر زیر ، مسیر بحرانی است.

مسیر بحرانی = ۱-۲-۴-۶-۸-۹-۱۱-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۱۹

[1] Total Float

مرحله ۱۱ رویدادهایی که در مسیر بحرانی قرار گرفته‌اند، شناسایی می شوند، این رویدادها، رویدادهای بحرانی نامیده می‌شود. رویدادهای بحرانی در مثال به شرح زیر هستند:

رویدادهای بحرانی: ۱،۲،۴،۶،۸،۹،۱۱،۱۳،۱۵،۱۶،۱۸،۱۹

مرحله۱۲ مجموع مدت فعالیت‌هایی که در مسیر بحرانی قرار گرفته‌اند، مدت زمان مورد نیاز برای تکمیل پروژه را مشخص می‌کند. بنابراین مدت زمان لازم برای تکمیل پروژه عبارت است از :

$$205.5_{0.16}$$

جدول ۴-۳ نمایش فعالیت‌های بحرانی

ردیف	فعالیت	$\otimes_{g^0}$	ES	EF	LS	LF	شناوری	بحرانی
۱	۱-۲	$12_{0.02}$	۰	$12_{0.02}$	۰	$12_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۲	۲-۴	$11.5_{0.02}$	$12_{0.02}$	$23_{0.02}$	$12_{0.16}$	$23_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۳	۴-۶	$53.5_{0.04}$	$23_{0.02}$	$76.5_{0.04}$	$23_{0.16}$	$76.5_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۴	۶-۱۳	$8_{0.02}$	$76.5_{0.04}$	$84.5_{0.04}$	$140_{0.16}$	$148_{0.16}$	$63.5_{0.16}$	
۵	۱۳-۱۵	$11.5_{0.02}$	$148_{0.04}$	$159.5_{0.04}$	$148_{0.16}$	$159.5_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۶	۱۵-۱۷	$8_{0.02}$	$159.5_{0.04}$	$167.5_{0.04}$	$189_{0.16}$	$197_{0.16}$	$29.5_{0.16}$	
۷	۱۷-۱۹	$8.5_{0.02}$	$167.5_{0.04}$	$176_{0.04}$	$197_{0.16}$	$205.5_{0.16}$	$29.5_{0.16}$	
۸	۱-۸	$22.5_{0.06}$	۰	$22.5_{0.06}$	$69.5_{0.16}$	$92_{0.16}$	$69.5_{0.16}$	
۹	۸-۹	$16_{0.02}$	$92_{0.04}$	$108_{0.04}$	$92_{0.16}$	$108_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۱۰	۹-۱۱	$31_{0.04}$	$108_{0.04}$	$139_{0.04}$	$108_{0.16}$	$139_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۱۱	۱۱-۱۴	$7.5_{0.02}$	$139_{0.04}$	$146.5_{0.04}$	$160.25_{0.16}$	$167.75_{0.16}$	$21.25_{0.16}$	
۱۲	۱۴-۱۶	$3.75_{0.02}$	$146.5_{0.04}$	$150.25_{0.04}$	$167.75_{0.16}$	$171.5_{0.16}$	$21.25_{0.16}$	
۱۳	۱۶-۱۹	$7.5_{0.02}$	$171.5_{0.16}$	$179_{0.16}$	$198_{0.16}$	$205.5_{0.16}$	$26.5_{0.16}$	
۱۴	۱-۳	$7.5_{0.02}$	۰	$7.5_{0.02}$	$44.5_{0.16}$	$52_{0.16}$	$44.5_{0.16}$	
۱۵	۳-۵	$11_{0.02}$	$7.5_{0.02}$	$18.5_{0.02}$	$52_{0.16}$	$63_{0.16}$	$44.5_{0.16}$	

۱۶	**۵–۷**	$14_{0.02}$	$18.5_{0.02}$	$32.5_{0.02}$	$63_{0.04}$	$77_{0.16}$	$44.5_{0.16}$	
۱۷	**۷–۱۰**	$11.5_{0.02}$	$32.5_{0.02}$	$44_{0.02}$	$154_{0.16}$	$165.5_{0.16}$	$121.5_{0.16}$	
۱۸	**۱۰–۱۲**	$10.5_{0.02}$	$44_{0.02}$	$54.5_{0.02}$	$165.5_{0.16}$	$176_{0.16}$	$121.5_{0.16}$	
۱۹	**۱۲–۱۸**	$7.5_{0.02}$	$146.5_{0.06}$	$154_{0.06}$	$176_{0.16}$	$183.5_{0.16}$	$29.5_{0.16}$	
۲۰	**۱۸–۱۹**	$22_{0.04}$	$183.5_{0.16}$	$205.5_{0.16}$	$183.5_{0.16}$	$205.5_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۲۱	**۷–۸**	$15_{0.06}$	$32.5_{0.02}$	$47.5_{0.06}$	$77_{0.16}$	$92_{0.16}$	$44.5_{0.16}$	
۲۲	**۶–۸**	$15.5_{0.02}$	$76.5_{0.04}$	$92_{0.04}$	$76.5_{0.16}$	$92_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۲۳	**۱۱–۱۳**	$9_{0.00}$	$139_{0.04}$	$148_{0.04}$	$139_{0.16}$	$148_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۲۴	**۴–۸**	$4.5_{0.02}$	$23_{0.02}$	$27.5_{0.02}$	$87.5_{0.16}$	$92_{0.16}$	$64.5_{0.16}$	
۲۵	**۱۱–۱۲**	$7.5_{0.06}$	$139_{0.04}$	$146.5_{0.06}$	$168.5_{0.16}$	$176_{0.16}$	$29.5_{0.16}$	
۲۶	**۱۶–۱۸**	$12_{0.12}$	$171.5_{0.16}$	$183.5_{0.16}$	$171.5_{0.16}$	$183.5_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی
۲۷	**۱۵–۱۶**	$12_{0.16}$	$159.5_{0.04}$	$171.5_{0.16}$	$159.5_{0.16}$	$171.5_{0.16}$	$0_{0.16}$	بحرانی

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱) مقدمه

شبکه‌های فعالیت[1] که به منظور مدلسازی پروژه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد کاربرد وسیعی در تولید، برنامه‌ریزی و کنترل دارند.[21] بر اساس پارامترهایی که در این شبکه‌ها به‌کار می رود می‌توان آنها را به شبکه‌های قطعی، تصادفی، فازی و خاکستری دسته‌بندی کرد[37].

شبکه‌های قطعی، شبکه‌هایی هستند که در آن پارامترهای پروژه مانند زمان انجام فعالیت‌ها با اعداد قطعی و دقیق مشخص شده‌اند، در این شبکه‌ها جهت تعیین زمان تکمیل پروژه، کنترل و زمانبندی آن می توان از متد مسیر بحرانی که یکی از بهترین ابزارهای کنترل زمانی پروژه می‌باشد استفاده کرد. کلی[2] یکی از نخستین افرادی بود که مفهوم مسیر بحرانی(CPM) ، فعالیت‌های بحرانی و رویدادهای بحرانی واهمیت آنها در کنترل و زمانبندی پروژه را معرفی کرد، در این روش، مسیر بحرانی پروژه از طریق حرکات پیش‌رو و پس‌رو تعیین می‌شود، در این شبکه‌های قطعی همچنین می‌توان از روش‌های ریاضی مانند مدل‌های برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین زمان تکمیل پروژه و مسیر بحرانی استفاده کرد. [74]

در شرایط واقعی، به دلیل وجود فاکتورهای مختلف ریسک، پروژه‌های فراوانی وجود دارد که زمان انجام فعالیت‌هاو سایر پارامترهای آنها اعداد دقیق، قطعی و در دسترسی نیست، در این موارد متدهای متفاوتی جهت رویارویی با این عدم‌قطعیت وجود دارد. به طور کلی این متدها را در سه گروه احتمالات، فازی و خاکستری می‌توان دسته‌بندی کرد، که به ترتیب در شبکه‌هایی به همین نام مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در اولین گروه، عدم قطعیت احتمالی که در شبکه‌های احتمالی یا تصادفی وجود دارد، یک تابع توزیع اولیه مانند نرمال، نمایی، ارلنگ و ...جهت تعیین زمان تکمیل پروژه و مسیر بحرانی مورد نیاز

---

[1] Activity Network
[2] Kelley

است،رایج ترین شیوه تعیین مسیر بحرانی و زمان تکمیل پروژه در این نوع از شبکه‌ها تکنیک مرور وارزیابی برنامه[1] می‌باشد. در این تکنیک زمان انجام فعالیت‌ها از یک توزیع بتا پیروی می‌کند و مسیر بحرانی پروژه با تخمین سه زمان خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل تعیین می‌شود. [56]

به منظور استفاده از عدم قطعیت احتمالی برای زمان انجام فعالیت‌ها، نیاز داریم توزیع و پارامترهای منطبق با آن را به درستی تخمین بزنیم به این منظور دسترسی به داده‌های تاریخی برای یک مدت زمانی مشخص ضروری است. اما، در بسیاری از شرایط دنیای واقعی، داده‌های تاریخی کافی و یک تقریب مناسب برای پارامترها نمی‌تواند حاصل شود. در این موقعیت‌ها، روش جایگزین استفاده از رویکرد فازی مطرح شده توسط زاده است که زمان انجام فعالیت‌ها توسط اعداد فازی مدل می‌شود [14]

در این رویکرد، مدت زمان هر فعالیت توسط کارشناسان به صورت متغیرهای زبانی مطرح می‌شود و با استفاده از تئوری فازی، این متغیرهای زبانی در قالب اعداد فازی نمایش داده می‌شود، ایده اساسی متد اعداد فازی، استفاده از مجموعه cut- و تبدیل اعداد فازی به اعداد بازه‌ای می‌باشد، از این رو چه از زاویه تئوری و چه از زاویه عملی، مطالعه متد مسیر بحرانی در شرایطی که با اعداد بازه‌ای روبرو هستیم بسیار اهمیت دارد.[19]

۵-۲) نتیجه‌گیری

روش CPM یکی از روش‌ها و تکنیک‌های پرکاربرد مدیریت، برنامه‌ریزی، زمانبندی و کنترل پروژه‌ها می‌باشد. فرض اصلی در این روش، قطعی و دقیق بودن زمان فعالیت‌هاست.[55] در عمل، مدت زمان مورد نیاز برای تکمیل فعالیت‌های پروژه به خصوص پروژه‌های عمرانی را به دلیل وجود عدم قطعیت

[1] Program Evaluation and Review Technique

در مورد پارامترهای ورودی و موثر بر پروژه مانند شرایط آب‌وهوایی و یا میزان در دسترس بودن منابع، نمی‌توان به طور قطعی و دقیق عنوان کرد. [61]در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی قطعی برای پروژه‌ها باعث افزایش ریسک پروژه می‌شود[34]

تئوری خاکستری، اعداد خاکستری و تصمیم‌گیری خاکستری مفاهیمی هستند که می توانند انتخاب خوب و ابزار ریاضی مناسبی را جهت حل مسئله عدم قطعیت در مورد مدت زمان مورد نیاز برای تکمیل فعالیت‌های پروژه و تکمیل پروژه فراهم کنند.

در این پژوهش، روشی جهت تعیین مسیر بحرانی خاکستری GCPM پیشنهاد شده‌است و در عمل در برنامه‌ریزی یک پروژه عمرانی به کار رفته است. در روش پیشنهادی در این پژوهش داده‌ها واطلاعات ناقص در شرایط عدم‌قطعیت به صورت بازه‌های عددی مشخص شده‌اند، و به این ترتیب روش‌های تحلیل شبکه بهبود یافتند، علاوه‌برآن، در این مدل نیازی به داده های توزیع احتمالی برای پارامترهای غیرقطعی نیست و در فرایند تعیین مسیر بحرانی، این مدل، تبدیل به مدل‌های واسطه پیچیده‌تر نخواهد شد و نسبت به سایر مدل‌های عدم قطعیت دارای پیچیدگی‌های محاسباتی کمتر و در عمل کاربردی‌تر است.

در این مدل با استفاده از تعریف هسته و درجه خاکستری اعداد خاکستری، فرم تنزیل شده[1] اعداد خاکستری نوشته شده و جایگزین بازه‌های عددی در محاسبات مربوط به حرکات پیش‌رو و پس‌رو و تعیین زودترین و دیرترین زمان های شروع و پایان،فعالیت های بحرانی و مسیر بحرانی شده‌است.

یک تناظر یک‌به‌یک بینن فرم تنزیل‌شده و بازه‌های عددی وجود دارد و این فرم تنزیل شده کلیه اطلاعات مربوط به بازه را داراست [23]، استفاده از فرم تنزیل شده بازه‌های عددی، محاسبات مربوط به تعیین مسیر بحرانی را تسهیل و تسریع کرده‌است، همچنین استفاده از روش حرکات پیش‌رو و

[1] Reduced Form

پس‌رو جهت تعیین مسیر بحرانی، نیاز به تعیین تمامی مسیرهای موجود در یک شبکه را(که در عمل در مورد پروژه های بزرگ بسیار زمان‌بر خواهد بود) و مقایسه آنها (رتبه‌بندی اعداد خاکستری دارای پیچیدگی‌های فراوانی است) را جهت انتخاب بزرگترین مسیر که در حقیقت همان مسیر بحرانی خواهد بود را رفع کرده است.

مقایسه نتایج حاصل از این روش با دستاوردهای سایر روش‌ها و نتایج واقعی مطالعه پروژه عمرانی، ارائه‌شده اعتبار این روش در دنیای واقعی را نشان داد. در مقایسه با نتایج حاصل از متد مسیر بحرانی قطعی، متد مسیر بحرانی خاکستری می‌تواند به طور کامل و جامع عدم قطعیت مربوط تحلیل شبکه‌های عمرانی را منعکس کند و راه‌حل‌هایی خاکستری برای مدیریت پروژه‌ها فراهم کند.

متد تحلیلی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند ابزار اثربخشی را جهت حل مسائل مربوط به عدم قطعیت در پروژه‌ها به ویژه پروژه‌های عمرانی فراهم کند.

۵-۳) محدودیت‌های تحقیق

همواره در مراحل انجام تحقیق محدودیت‌هایی وجود دارد که باعث کندی مراحل انجام تحقیق می‌شود. یکی از مشکلات این تحقیق عدم وجود منابع فارسی وتحقیقات مشابه در زمینه متد مسیر بحرانی در شرایط خاکستری بود. همچنین جمع‌آوری داده‌های مربوط به فعالیت‌های پروژه، توالی و تقدم و تأخر و استفاده از نظرات کارشناسان برای تعیین زمان انجام فعالیت‌ها با دشواری‌هایی همراه بود که می‌توان از آن به عنوان مشکلی دیگر در انجام این پژوهش اشاره کرد .

۵-۴) پیشنهادات

۵-۴-۱) پیشنهادات کاربردی

در عمل، در بسیاری از پروژه‌ها به ویژه پروژه‌های عمرانی، پارامترهای یک پروژه مانند مدت زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها، میزان هزینه موردنیاز و...به دلیل وجود شرایط ناپایدار و غیرقابل پیش‌بینی مانند شرایط آب‌وهوایی و یا میزان درسترس بودن منابع پروژه به‌طور دقیق و قطعی قابل بیان نیست و به عنوان مثال به این صورت عنوان می‌شود: هزینه مستقیم برای پروژه بین ۱۰۰۰۰۰دلار تا ۱۲۰۰۰۰۰ دلار خواهد بود، مدت زمان لازم برای انجام فعالیت به طور تقریبی بین ۱۵ تا ۲۰ ساعت خواهد بودو یا پروژه به طور کلی بین ۲۲ تا ۲۴ ماه طول خواهد کشید و مانند این. طبعاً جنانچه بخواهیم این سیستم‌ها را با متد مسیر بحرانی قطعی CPM مدلسازی کنیم، از آنجایی که فرض اولیه روش CPM برقرار نیست با مشکل روبرو خواهیم شد و استفاده از آن منجر به برآوردهای ضعیف و خطا در مدیریت پروژه خواهد شد.

در این شرایط که زمان انجام فعالیت‌ها به صورت قطعی و دقیق مشخص نیست با بیان زمان انجام فعالیت‌ها به صورت بازه می‌توانیم فاکتورهای ریسک را در یک پروژه لحاظ کنیم، علاوه بر آن برای استفاده از بازه‌ها و اعداد خاکستری نسبت به روش های احتمالی نیاز به پیش فرض‌های کمتری داریم.

بنابراین به مدیران پروژه‌ها پیشنهاد می‌شود به جای استفاده از اعداد قطعی و نرم‌افزارهای مربوط به CPM قطعی در برنامه ریزی پروژه و اصلاحات و تجدید نظرهای متعدد در مورد زمان تکمیل پروژه در فاز اجرایی آن (برنامه‌ریزی واکنشی[1]) ، در فاز برنامه‌ریزی از اعداد خاکستری استفاده کنند

[1] Reactive Scheduling

(برنامه‌ریزی پیش‌بینی کننده[1]). بدین ترتیب خروجی‌های منتج، توانایی انعکاس بی‌ثباتی بالقوه شرایط سیستم را که به دلیل وجود عدم اطمینان در ورودی‌های سیستم حاصل شده‌است دارند.

۵-۴-۲) پیشنهادات برای تحقیقات آتی

به سایر محققین جهت تحقیقات آتی پیشنهاد می شود که:

۱- از آنجایی که هدف اساسی برنامه‌ریزی، کنترل و زمانبندی پروژه‌ها، تکمیل پروژه طی زمانبندی مشخص‌شده با حداقل هزینه می‌باشد و هزینه یکی از سه ضلع مثلث پروژه را تشکیل می‌دهد- سه ضلع مثلث پروژه عبارتند از زمان، هزینه و قلمرو- و با توجه به اینکه برای هر پروژه، بودجه‌ای از پیش تعیین شده وجود دارد و در نتیجه هزینه فعالیت‌ها، یکی از معیارهای تأثیرگذار بر ریسک فعالیت‌هاست. استفاده از متد مسیر بحرانی خاکستری جهت تعیین نوع و سطح تبادل هزینه-زمان برای هر فعالیت ،به شیوه‌ای که پروژه با استفاده از اطلاعات ناقص داده‌شده و تحت شرایط عدم‌قطعیت موجود، طی زمانبندی مشخص شده با حداقل هزینه تکمیل شود، می تواند یکی از موضوعات تحقیق در آینده باشد.

۲- پروژه‌ای را در نظر بگیرید که فعالیت‌ها دارای ماهیت احتمالی هستند و پارامترهای توزیع به جای اینکه اعداد قطعی و مشخصی باشند دارای ماهیت خاکستری هستند. تعیین روشی جهت تعیین مسیر بحرانی در شرایطی که با ترکیبی از عدم‌قطعیت احتمالی و خاکستری روبرو هستیم، نیز می تواند یکی از موضوعات تحقیق آتی باشد.

۳- ازآنجایی که مدت زمان فعالیت‌های پروژه در شرایط عدم‌قطعیت خاکستری بر اساس نظر کارشناسان و با استفاده از یک جدول خاکستری به‌صورت بازه‌های خاکستری بیان می شود، تعیین

[1] Proactive Scheduling

زمان انجام فعالیت به صورت یک عدد خاکستری در شرایطی که جدول خاکستری دارای داده سیاه باشد، می تواند یکی دیگر از موضوعات تحقیقات آتی باشد.

منابع

[1]. اصغری ا، سکاکی ح، یاوری م، سلطانی ف، (1383)، "برنامه‌ریزی کنترل پروژه و موازنه زمان هزینه با روش مسیر بحرانی (CPM) مطالعه موردی: پیجوئی و اکتشاف کانسار (انگوران)"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، ص1، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

[2]. Zielinski P., Chanas S., (2002), "The computational complexity of the criticality problems in a network with interval activity times", **European Journal of Operation Research**, 136, pp 541-550

[3]. شهسواری‌پور ن، فلاح م، نجفی ا، (1388)، "معرفی یک الگوریتم جدید برای محاسبه مسیر بحرانی فازی شبکه پروژه"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، ص1، بابلسر، ایران.

[4]. Williams T., (1995), "A Classified bibliography of research relating to project risk management", **European Journal of Operation Research**, 85, pp 18-35

[5]. امیری م، (1392)، "ارائه روشی برای رتبه‌بندی ریسک فعالیت‌های پروژه با استفاده از شبکه CPM و روش TOPSIS در حالت فازی"، **چشم‌انداز مدیریت صنعتی**، شماره 10، ص 169-183.

[6]. Li L., and Jianjun W. (2015), "Uncertain engineering critical path solving method based on interval number theory", International Conference on Mechatronics, Electronics, Industerial and Control Emgineering, pp 1409-1412

[7]. Khalaf w (2015), "Solving the fuzzy scheduling problems based on a ranking function", **Australian Journal of Basic and Applied Science**, 7(8), pp 1409-1412

[8]. Yi L., and Liu S. (2004), "A historical introduction to grey systems theory", International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp 2403-2409

[9]. Lawrence F. P., Cochran J. K., (1995), "A new computational approach for project management networks", **Computers ind. Engng**, 29(1-4), pp 339-343

[10]. Bin H., Ren L., Xinjie L., (2013), "Value reduction algorithm based on incomplete grey decision table", **International Journal of Advancements in Computing Technology**, 5(8), pp 116-128

[11]. Yousefi A., Ghazanfari M., Shahangahi K., Heydari M., (2007), "A new heuristic model for fully fuzzy project scheduling", **Journal of Uncertain Systems**, 2(1), pp 75-61

[12]. Kuo Y., Yang T., Huang G., (2008), "The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems", **Computers & Industerial Engineering**, 55, pp 80-93

[13]. Sadjadi S. J., Pourmoayed R., Aryanezhad M. B., (2012), "A robust critical path in an environment with hybrid uncertainty", **Applied Soft Computing**, 12, pp 1087-1100

[14]. Chanas S, Kamburowsli J., (1981), "The use of fuzzy variabes in pert", **Fuzzy Sets and Systems**, 5, pp 11-19

[15]. Desmond, C., (2004). "**Project Management for Telecommunications Managers**", Kluwer Academic Publishers, New York, pp.361.

[16]. Harold, K., (2004), "**Project Management: A System Approach to Planning, Scheduling, and Controlling**", Vol. 1, John wiley & Sons, Inc., New York, pp 385, ISBN 0-471-39342-8.

[17]. Berkun, S., (2005), "**The Art of Project Management**", Publisher OReily, ISBN 0-596-00786-8.

[۱۶]. دباغی، آ. و ملک، ا. م.، (1392)، "ارایه ی روشی برای ارزیابی و رتبه‌بندی چشم‌انداز سازمان با استفاده از پژوهش آمیخته"، **چشم انداز *مدیریت اقتصادی***، شمار10،دوره۴، ص 183-169.

[17]. Williams T. (1995)." **A Classified Bibliography of Recent Research Relating to Project Risk management**". European Journal of Operation Research, 85, pp 18-38.

[18]. Krajewski, L.J., Ritzman, L.P. (2005). Operations Managemnt: Process and Value Chains. Prentice-Hall, NewJersey.

[19]. Zhao, Q., Chen, H., Yu, B., (2009). "**Study on a New Grey CPM under Incomplete Information**." IEEE International Conference on Systems and Intelligent Services, November 10-12, pp. 373-377.

[20]. Song, Z., Yan, X., Yu, B., (2009). "Critical path for a grey interval project network." IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS 2009), IEEE Computer Society Press, November, pp. 697-701

[۲۱]. شهسواری پور، ن، فلاح، م. و نجفی، ا، (۱۳۸۸)، کاربرد برنامه ریزی خطی فازی در یافتن مسیر بحرانی پروژه با زمان های فازی، بابلسر-ایران.

[22] .Chanas, S., Dubois, D. (2008), Criticality Analysis in Activity Networks under Incomplete Information, IEEE Transactions on Engineering Management 40, pp. 146-153

[23]. Maravas, A., Pantouvakis, J. (2010), A Study of Cash Flows in Projects with Fuzzy Activity Durations, Nottingham University Press, Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering.

[۲۴]. دباغی، آ، ملک، ا. م. و شفیعی، س.، (۱۳۸۹)، "معرفی ابزار خاکستری ارزیابی فرهنگ سازمانی و پیاده‌سازی آن در معاونت مهندسی ساختار و بهره‌وری شرکت ملی نفت ایران"، **فصلنامه علمی-پژوهشی مدیریت و منابع انسانی در صنعت نفت، سال چهارم**، شماره ۱۳، ص ص ۶۱-۸۴

[25]. Chen, C.T., Huang, S.F., (2007), "Applying fuzzy method for measuring criticality in project network", Information Sciences 177 pp2448–2458

[26]. Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1975). "Probability conceps in engineering planning and design", analutical models ofrandom phenomena, vol. 1, Wiley, New York, 80-169.

[27]. Deo. E. (1974). Grey theory with application .erengineering and computrr science Prentice-Hall, Inc., Englewood CIiW, N. J.

[28]. Crandall, C.K. (1977). "Analysis of schedule simulation", J.Constr. Div., Am. Soc. Civ. Eng 103(3), 387-394

[29].Budnick, F. S., McLeavey, D. and Mojena, R. (1988). "Principles of operations resenrclrfor nranogemorr", Richard D. Irwin, Inc. Homewood, Illinois

[30].Hartley. R. V. (1976). Operation Research: Managerial Analysis. Goodyear Publishing Company, Inc., Pacific Palisades, California.

[31].Hillier, F. S, and Lieberman, G. J. (1986). "Introduction to operations research, project managemtn with pert/cpm, simulation", 4th ed., holden-day, Oakland, calif, 468-527, 1084-1153

[32]. Huang, G. H. Baetz, R. W. and Patry. G. G. (1992). "A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainly". Civil Engineering Systems, 9, 319-335.

[33]. 1.Moder, J. J., Phillips, C. R. and Davis, E. W. (1983). Project managemen1 with C P M, PERTand precedencc diagramnling. Van Nostrand Company Inc., New York, N.Y.

[34]. 1.Fataneh, t-d. (2002), lecture note: designing with uncertain activity. (http://som.umflint.edu/fataneh/bus313/lecture%20notes/pert.ppt) (feb. 5, 2003)

[35] Feng-TES, L., Jing-Shing, Y., (2003) " Fuzzy critical path method based on singned-distance ranking and statistical confidence-interval estimates", The journal of supercomputing, 24,3305-325

[36] AbouRizk, S. M., and Haplin, D. W. (1992). Statistical properties of construction duration data, J. CONSTR. Eng. Manage., 118(3), pp 525-544.

[37]. Bowman, R.A. "Stochastic gradient-based time–cost trade-offs in PERT etworks"

[38]. Chanas P., Zielinski., (2001), " Critical path analysis in the network with fuzzy activity times", Fuzzy Sets ,Syst. 122, pp 195- 204.

[۳۹]. تقوی فرد, محمدتقی و شقایق خضری، ۱۳۹۳، الگوریتم جدیدی برای تحلیل حساسیت مسیر بحرانی در شبکه های پرت با درنظر گرفتن ریسک های موجود در پروژه، فصلنامه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید ۲۵ (۱)

[40]. Chanas, S., Kamburowski, J., (1981) " The use of fuzzy variables in PERT, Fuzzy Sets andSystems" 5 pp11–19.

[41]. Chen, S.P., (2007) , "Analysis of critical paths in a project network with fuzzy activity times", European Journal of Operational Research 183 pp442–459.

[۴۲]. پورموید، رضا، حبیبی‌نژاد وحید، قریشی محمد، کاربرد برنامه‌ریزی خطی فازی در یافتن مسیر بحرانی پروژه با زمان‌های فازی، دومین کنفرانس بین‌المللی تحقیق در عملیات ایران، خرداد، بابلسر، ایران.

[۴۳]. جعفریان مقدم, احمدرضا؛ سیدغلامرضا جلالی نائینی؛ محمد فتحیان و کیوان قیصیری، ۱۳۹۰، رویکرد جدید به منظور تعیین مسیر بحرانی در شبکه فعالیت ها، هفتمین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه، تهران، انجمن مدیریت پروژه ایران

[44]. Chen, S.P., Hsueh Y.J., (2008) A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks, Applied Mathematical Modelling 32 pp1289–1297

[45]. Dubois, D., Fargier, H., Galvagnon, V., (2003) , "On latest starting times and floats in activity networks with ill-known durations" , Eur. J. Oper.Res.147, pp 266 280.

[46].Elmaghraby S.E., (2000) On criticality and sensitivity in activity networks, InternationalJournal of Production Research 127 220–238

[۴۷]. سوخکیان, محمدعلی و روح اله بحرانی، ۱۳۸۷، محاسبه احتمالی بحرانی بودن مسیر و فعالیت ها در شبکه های PERT با در نظر گرفتن میزان ریسک،ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، تهران، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی شریف

[۴۸]. شبیه سازی زمان و هزینه پروژه با آنالیز مونت‌کارلو، مهدی شهبازنیا، سیدعلی طالقانی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، داشنگاه سمنان، سمنان، ایران

[۴۹]. شهبازنیا مهدی، طالقانی سید علی، شبیه‌سازی زمان و هزینه پروژه با آنالیز مونت‌کارلو، ششمین کنگره ملی مهندسی عمرات، اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه سمنان، سمنانف ایران

[50] Fente, J., Knutson, K., and Schexnayder, c. (1999). Defining a beta distribution function for construction simulation, proc., 1999 winter simulation conf. p. a. farrington, h. b. nembhard, d. t. sturrock, and G. W. Evans, eds., IEEE., Piscataway, N.J., 110-1015

[51].صادقیه، احمد. اخوان، آفرین. روشی برای تحلیل مسیر بحرانی شبکه پروژه‌ها در شرایط فازی مطالعه موردی- احداث پست ۶۳ کیلو ولت برق، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع-۱۳۸۷

[52]. Hapke, M., Slowinski, v, (1996) , "Fuzzy priority heuristics for project scheduling, Fuzzy Sets Systems", 83 pp 291–299.

[53]. Kelley J. E., (1961), "Critical path planning and scheduling-mathematical basis", Operations research :9 296-320

[54] اشتهاردیان، احسان‌اله؛ عباس‌نیا، رضا؛ افشار، عباس، ۱۳۸۷، روش مسیر بحرانی فازی براساس ریسک‌پذیری و خوش‌بینی مدیر پروژه، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه، تهران، گروه پژوهشی آریانا

[55] افشارنجفی, بهروز و پریسا جنتی فرد، ۱۳۹۱، روشی جهت محاسبه زمان شروع و پایان فعالیت هااتمام پروژه و درجه بحرانی بودن مسیرها درپروژه با زمان انجام فعالیت های احتمالی، اولین کنفرانس ملی مهندسی صنایع و سیستم ها، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گروه مهندسی صنایع،

[56] سجادی, سیدجعفر و رضا پورموید، ۱۳۸۹، یافتن مسیر بحرانی پروژه در محیطی با عدم قطعیت دوگانه، هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، اصفهان، انجمن مهندسی صنایع ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان

[57]. Krajewski L.J., Ritzman L.P. (2005). "Operations Managemnt: Process and Value Chains" Prentice-Hall, NewJersey.

[58]. Lawrence, F.P., Cochran, J.K., "A new computational approach for project management"

[59]. MacCrimmon, K. R., and Ryavec, C. A.(1962). “An analytical study of the PERT assumptions. Memorandum.” RM-3408-PR, Rand Corp., Santa Monica, Calif

[60] Malcom D. G., and Roseboom J.H., (1959), "Application of a technique for research and development project evaluation, Operation Research: 7, PP 646-669.

[61] Okada, S., Gent, M., 1993. “Order relation between intervals and its application to shortest path problem” , Computers and Industrial Engineering, Nov 1-4, 25, pp. 147-150

[62] R. M Van Slyke, Monte Carlo method and the PERT problem, Operation Research 11, pp 839-860

[63] Roseboom, C.E. Clark, W. Fazar, Application of a technique for research and development project evaluation, Operation Research 7 (1959), 646-669(

[64] Sifeng Liu Zhigeng Fang Yingije Jeffrey Forrest (2012), General grey numbers and their operations" grey systems: theory and application, vol.2 Iss 3 pp.341-349

[65] using simulation, Annals of Operations Research 53 (1994) 533–551.

[66] Zielinski, (2005) On computing the latest starting times and floats of activities in a network with imprecise durations, Fuzzy Sets and Systems 150 pp 53–76

[67] مروت دار, رضا و عبداله اقایی، ۱۳۹۰، زمانبندی فازی پروژه با استفاده از اعداد خطی تکه ای، هفتمین کنفرانس بین المللی مدیریت پروژه، تهران، انجمن مدیریت پروژه ایران

[68] نادرپور, عباس؛ مسعود مفید و جواد مجروحی سردرود، ۱۳۹۳، بکارگیری منطق فازی در محاسبات روش مسیر بحرانی با لحاظ عدم قطعیت غیرتصادفی جهت بهینه سازی زمان انجام فعالیت های پروژه، کنفرانس بین المللی مدیریت و مهندسی صنایع، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا،

[69] نادرپور, عباس؛ مسعود مفید و جواد مجروحی سردرود، ۱۳۹۴، مروری جامع بر تحقیقات انجام شده در خصوص محاسبات شبکه زمانبندی و مسیربحرانی فعالیت های پروژه با رویکرد فازی (FCPM)، دومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در علوم، مهندسی وتکنولوژی، ترکیه - استانبول، موسسه پندار

[70] یکدل, حسین و رضا کیا، ۱۳۹۲، یک روش ابتکاری بهبود یافته مبتنی بر اولویت برای مسأله زمانبندی پروژه محدود با پارامترهای فازی، دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع و سیستم ها، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، گروه مهندسی صنایع

[71]. Xu, Z. S., (2004), Goal programming models for obtaining the priority vector of incomplete fuzzy preference relation, *International Journal of Approximate Reasoning*, 36(3), pp 261-270.

[72]. Xu, Z., (2005), A Procedure for Decision Making Based on Incomplete Fuzzy Preference Relation, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 4(3), pp 175-189.

[73]. Fedrizzi, M., & Giove, S., (2007), Incomplete pairwise comparison and consistency optimization, *European Journal of Operational Research*, 183(1), pp 303-313.

[74]. Herrera-Viedma, E., Chiclana, F., Herrera, F., & Alonso, S., (2007), Group Decision-Making Model with Incomplete Fuzzy Preference Relations Based on Additive Consistency, *IEEE Transactions on systems,man,and cybernetics- part B: cybernetics*, 37(9), pp 176-189.

[75]. Zhang, G., Dong, Y., & Xu, Y., (2012), Linear optimization modeling of consistency issues in group decision making based on fuzzy preference relations, *Expert Systems with Applications*, 39(3), pp 2415-2420.

[76]. Xu, Y., & Wang, H., (2013), Eigenvector method, consistency test and inconsistency repairing for an incomplete fuzzy preference relation, *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), pp 5171-5183.

[77]. Xu, Y., Patnayakuni, R., & Wang, H., (2013), Logarithmic least squares method to priority for group decision making with incomplete fuzzy preference relations. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), pp 2139-2152.

[78]. Chen, S.-M., Lin, T.-E., & Lee, L.-W., (2014), Group decision making using incomplete fuzzy preference relations based on the additive consistency and the order consistency, *Information Sciences*, 259, pp 1-15.

[79]. Xun, J., & Reynolds, J., (2010), Applying netnography to market research: The case of the online forum, *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 18(1), pp 17-31.

[80]. Kulmala, M., (2011), master, Electronic word-of-mouth in consumer fashion blogs. A netnogrphic study, school of management.

[81]. Steinmetz, K. F., (2012), Message Received: Virtual Ethnography in Online Message Boards, *International Journal of Qualitative Methods*, 11(1), pp 26-39.

[82]. Nelson, M. R., & Otnes, C. C., (2005), Exploring cross-cultural ambivalence: a netnography of intercultural wedding message boards, *Journal of Business Research*, 58(1), pp 89-95.

[83]. Seraj, M., (2012), We Create, We Connect, We Respect, Therefore We Are: Intellectual, Social, and Cultural Value in Online Communities, *Journal of Interactive Marketing*, 26(4), pp 209-222.

[84]. Weijo, H., Hietanen, J., & Mattila, P, (2014), New insights into online consumption communities and netnography, *Journal of Business Research*, 67(10), pp 2072-2078.

[85]. Kwiesielewicz, M., (1996), The logarithmic least squares and the generalized pseudoinverse in estimating ratios, *European Journal of Operational Research*, 93, pp 611-619.

[86]. Chen, Q., (2000), Estimating data for multicriteria decision making problems optimization techniques, *Industrial and Manufacturing Systems Engin*.

[87]. Saaty, T. L., (1990), Eigenvector and logarithmic least squares, *European Journal of Operational Research*, 48, pp 156-160.

[88]. Brunelli, M., Fedrizzi, M., & Giove, S., (2007), Reconstruction Methods for Incomplete Fuzzy Preference Relations: A Numerical Comparison, *Applications of Fuzzy Sets Theory Lecture Notes in Computer Science*, 4578, pp 86-93.

[89]. Xu, Z., & Chen, J., (2007), Group decision-making procedure based on incomplete reciprocal relations. Soft Computing, 12(6), pp 515-521.

[90]. Lee, L.-W., (2012), Group decision making with incomplete fuzzy preference relations based on the additive consistency and the order consistency, *Expert Systems with Applications*, 39(14), pp 11666-11676.

[91]. Harker, P. T., (1987), Alternative modes of questioning in the analytic hierarchy process, *Mathematical Modelling*, 9(3-5), pp 353-360.

Abstract:

In systems analysis, uncertainties may exist in model parameters and input data. Those uncertainties can propagate through the analysis and generate uncertainties in systems analysis. Grey systems theory offers a method for incorporating uncertainties of interval plan network. In this study, a grey critical path method has been developed and applied to a case study of construction project planning. The developed method allows uncertain information presented as interval numbers, to be effectively communicated into the model formulation and the resulting solutions. The output reults are capable of refelcting potential system condition variations caused by the existence of input uncertainties. Results from the case study application indicate that reasonable solutions have been generated.

Keywords: Project Management, Critical Path Method, Grey Numbers.

Faculty of Industrial Engineering and Management

MSc Thesis in MBA

Critical Path Method Analysis under Uncertainty Circumstances with Incomplete Information

By: Farzaneh Hallaji

Supervisor:

Dr Mohammad Ali Molaei

February 2016