

مدل سازی ائتلاف پیمانکاران در خرید تجهیزات سرمایه ای با رویکرد نظریه بازی های مشارکتی و توسعه پایدار در شرایط عدم قطعیت فازی

سید محمد مهدی موسوی^{۱*}، حانیه مؤذنی^۲.

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران Mousavi.m@qut.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران Moazeni@qut.ac.ir

خلاصه

خرید تجهیزات سرمایه ای مشترک، چالش های اساسی در پروژه های عمرانی ایجاد می کند. این پژوهش یک چارچوب مبتنی بر نظریه بازی های مشارکتی برای تشکیل ائتلاف پیمانکاران ارائه می دهد. با هدف افزایش بهره وری اقتصادی و همسو با اهداف توسعه پایدار، مدل پیشنهادی، تخصیص منافع حاصل از همکاری را در شرایط عدم قطعیت فازی بازه ای محاسبه می کند. چهار رویکرد تخصیص منافع شامل هسته، مقدار شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی با یکدیگر مقایسه شده و تحلیل حساسیت برای انتخاب پایدارترین روش انجام می شود. این رویکرد، علاوه بر صرفه جویی مالی، مزایای زیست محیطی همکاری را نیز لحاظ کرده و با کاهش هزینه های سرمایه ای و عملیاتی، به پایداری بلندمدت پروژه کمک می نماید. مطالعه موردی کارایی مدل را در ایجاد ساختارهای مشارکتی پایدار و اقتصادی تأیید می کند.

کلمات کلیدی: نظریه بازی های مشارکتی؛ عدم قطعیت فازی؛ توسعه پایدار؛ ائتلاف پیمانکاران؛ خرید تجهیزات سرمایه ای.

Modeling Contractor Alliances in Capital Equipment Procurement with a Cooperative Game Theory Approach for Sustainable Development under Fuzzy Uncertainty

ABSTRACT

Joint procurement of capital equipment presents significant challenges in construction projects. This research proposes a cooperative game theory framework for forming contractor alliances. Aiming to enhance economic efficiency and align with sustainable development goals, the proposed model calculates cooperation benefit allocation under interval fuzzy uncertainty conditions. Four allocation approaches Core, Shapley Value, Nucleolus, and Gately Point are compared, with sensitivity analysis conducted to identify the most stable and equitable method. This approach incorporates both financial savings and environmental benefits of collaboration, contributing to long-term project sustainability by reducing capital and operational costs. A case study

confirms the model's effectiveness in establishing stable and economical collaborative structures.

Keywords: Cooperative Game Theory, Fuzzy Uncertainty, Sustainable Development, Contractor Alliances, Capital Equipment Procurement.

۱. مقدمه

مدیریت پروژه همواره با چالش ایجاد تعادل میان اهداف متعارضی نظیر زمان، هزینه و کیفیت مواجه بوده است. در پروژه‌های عمرانی، تأمین و خرید تجهیزات سرمایه‌ای نظیر پمپ بتن و بچینگ پلنت به دلیل هزینه‌های بالا، عمر طولانی و تأثیر مستقیم بر بهره‌وری، یکی از حیاتی‌ترین تصمیمات مدیران پروژه محسوب می‌شود [۱، ۲]. خرید انفرادی این تجهیزات توسط هر پیمانکار، علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین اولیه، منجر به عدم استفاده بهینه از ظرفیت تجهیزات و افزایش هزینه‌های تمام‌شده پروژه می‌گردد [۳]. از این‌رو، همکاری میان پیمانکاران در قالب ائتلاف‌های خرید مشترک به‌عنوان راهکاری مؤثر برای غلبه بر این محدودیت‌ها مطرح شده است [4].

یکی از رویکردهای متداول برای توجیه و تحلیل این همکاری‌ها، نظریه بازی‌های مشارکتی است که چارچوبی ریاضی برای مدل‌سازی تعاملات جمعی و تخصیص منافع حاصل از همکاری فراهم می‌آورد [۵]. این نظریه با ارائه مفاهیمی همچون هسته، مقدار شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی امکان ارزیابی پایداری ائتلاف‌ها و توزیع عادلانه منافع را فراهم می‌کند [۶، ۷]. با وجود مزایای این رویکرد، تصمیم‌گیری در مورد تشکیل ائتلاف و انتخاب روش تخصیص منافع همواره با عدم قطعیت‌های متعددی همراه است. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند ناشی از نوسانات قیمت تجهیزات، تغییر در نیازهای پروژه، ناپایداری شرایط اقتصادی و یا عدم قطعیت در زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه باشند [8، 9].

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی ریاضی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در ائتلاف‌های خرید تجهیزات سرمایه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعات متعددی با استفاده از نظریه بازی‌های مشارکتی به تحلیل همکاری در زنجیره تأمین و مدیریت پروژه پرداخته‌اند [۱۰، ۱۱]. با این حال، بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین، تمرکز اصلی خود را بر مدل‌های قطعی معطوف کرده و کمتر به نقش عدم قطعیت در فرآیند تشکیل ائتلاف و تخصیص منافع پرداخته‌اند. این در حالی است که واقعیت پروژه‌های عمرانی سرشار از ابهام و تغییرات غیرقابل‌پیش‌بینی است.

از سوی دیگر، مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت پروژه در دهه اخیر مطرح شده است. سازمان ملل متحد در اهداف توسعه پایدار بر اهمیت کاهش ردپای کربن، بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش ضایعات در پروژه‌های عمرانی تأکید دارد [۱۲]. خرید مشترک تجهیزات سرمایه‌ای به‌طور ذاتی با اهداف توسعه پایدار همسو است، زیرا با کاهش تعداد تجهیزات خریداری‌شده، حمل‌ونقل کمتر و مصرف بهینه انرژی، به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند [۱۳]. با این وجود، مدل‌های موجود به ندرت شاخص‌های پایداری را به‌طور صریح در تابع ارزش ائتلاف‌ها لحاظ کرده‌اند و بیشتر بر صرفه‌جویی مالی خالص تمرکز داشته‌اند [14].

برای مواجهه با عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، نظریه مجموعه‌های فازی و به‌ویژه اعداد فازی ارزش‌گذاری شده بازه‌ای به‌عنوان ابزاری کارآمد معرفی شده‌اند [۱۵]. اعداد فازی ارزش‌گذاری شده بازه‌ای با تعریف یک بازه از مقادیر محتمل به جای یک مقدار قطعی، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدل‌سازی عدم قطعیت فراهم می‌کنند و برای شرایطی که داده‌های دقیق در دسترس نیست، بسیار مناسب هستند [۱۶]. تلفیق نظریه بازی‌های مشارکتی با منطق فازی در چند مطالعه محدود مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷، ۱۸]، اما استفاده از اعداد فازی ارزش‌گذاری شده بازه‌ای برای تخصیص منافع ائتلاف در خرید تجهیزات سرمایه‌ای با رویکرد توسعه پایدار، همچنان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

تحلیل حساسیت روش‌های مختلف تخصیص منافع، یکی دیگر از جنبه‌های کلیدی است که در ادبیات موضوعی به آن کمتر پرداخته شده است. مقایسه رفتار و خروجی روش‌های هسته، شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی در شرایط عدم قطعیت می‌تواند به مدیران پروژه در انتخاب پایدارترین و عادلانه‌ترین روش تخصیص منافع کمک کند [۱۹]. این مقایسه به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که پارامترهای ورودی مدل با عدم قطعیت همراه بوده و سناریوهای متعددی برای تحلیل وجود داشته باشد.

با توجه به مطالب مطرح‌شده، خلأ پژوهشی قابل‌توجهی در زمینه توسعه یک چارچوب جامع مبتنی بر نظریه بازی‌های مشارکتی برای خرید مشترک تجهیزات سرمایه‌ای وجود دارد که به‌طور همزمان: (۱) عدم قطعیت را با استفاده از اعداد فازی ارزش‌گذاری شده بازه‌ای مدل‌سازی کند، (۲) شاخص‌های توسعه پایدار و مزایای زیست‌محیطی را در تابع ارزش ائتلاف لحاظ نماید، و (۳) روش‌های مختلف تخصیص منافع را در شرایط عدم قطعیت مقایسه و تحلیل حساسیت کند. در پژوهش حاضر، با هدف پاسخ به این خلأ، یک چارچوب جامع ارائه می‌گردد که در آن پیمانکاران پروژه‌های عمرانی می‌توانند با تشکیل ائتلاف، نسبت به خرید مشترک تجهیزات سرمایه‌ای اقدام کنند. مدل پیشنهادی، ارزش هر ائتلاف را به‌صورت چندهدفه شامل صرفه‌جویی اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی تحت عدم قطعیت فازی بازه‌ای محاسبه کرده و سپس منافع حاصل را با چهار روش مختلف شامل هسته، شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی تخصیص می‌دهد. در نهایت، تحلیل حساسیت برای شناسایی پایدارترین روش تخصیص در سناریوهای مختلف انجام می‌شود. کارایی مدل از طریق یک مطالعه موردی مبتنی بر تجهیزات سرمایه‌ای در پروژه نصب و تجهیز فیبرنوری در شهر مشهد توسط چهار پیمانکار نظارتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ساختار پژوهش حاضر شامل ۵ بخش زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری و مروری بر مفاهیم نظریه بازی‌های مشارکتی، شامل تعریف بازی مشارکتی قابل انتقال و شاخص‌های پایداری ارائه می‌شود. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش شامل تعریف بازی مشارکتی، بحث عدم قطعیت و رویکرد فازی‌سازی و روش‌های تخصیص منافع تشریح می‌گردد. در بخش چهارم، مطالعه موردی و تحلیل حساسیت نتایج ارائه می‌شود. در نهایت، بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌ها، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی اختصاص دارد.

۲. نظریه بازی‌های همکارانه

نظریه بازی‌ها یک چارچوب ریاضی برای مدل‌سازی و تحلیل تعاملات راهبردی میان تصمیم‌گیرندگان عقلایی در شرایط تعارض و/یا همکاری فراهم می‌کند. در این چارچوب، هر بازیگر با آگاهی از قواعد بازی و با در نظر گرفتن رفتار سایر بازیگران، راهبردهایی را انتخاب می‌کند که پیامد او را بیشینه سازد. به‌طور کلی، رویکردهای نظریه بازی‌ها به دو دسته اصلی بازی‌های غیرهمکارانه و بازی‌های همکارانه تقسیم می‌شوند.

در نظریه بازی‌های غیرهمکارانه، تصمیم‌گیرندگان عمدتاً بر مبنای منافع فردی خود اقدام کرده و با پیش‌بینی سناریوهای رقابتی و واکنش سایرین، راهبرد بهینه را انتخاب می‌کنند. راه‌حل‌های متداول در این رویکرد معمولاً مبتنی بر مفهوم تعادل مانند تعادل نش هستند و وضعیت‌هایی را معرفی می‌کنند که در آن هیچ بازیگری انگیزه‌ای برای تغییر یک‌جانبه راهبرد خود ندارد. با این حال، در بسیاری از مسائل واقعی، به‌ویژه در پروژه‌ها و زنجیره‌های تأمین، ممکن است راهبردهای غیرتعادلی وجود داشته باشند که برای همه بازیگران بهتر از تعادل باشند؛ اما تحقق آن‌ها بدون سازوکارهای همکاری مانند مذاکره، قرارداد، یا ساختارهای رسمی همکاری ممکن نیست. در چنین مواردی، رفتار غیرهمکارانه معمولاً ناشی از خودبهبودسازی بازیگران است، حتی اگر همکاری جمعی برای همه طرف‌ها سودمندتر باشد.

در مقابل، نظریه بازی‌های همکارانه بر این تمرکز دارد که بازیگران چگونه با تشکیل ائتلاف‌ها می‌توانند منفعت بیشتری نسبت به حالت انفرادی کسب کنند و سپس این منافع افزوده ناشی از همکاری را به شکلی کارا و منصفانه میان اعضای ائتلاف تخصیص دهند. نظریه بازی‌های همکارانه از منظر کاربردی برای مسئله حاضر اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا پیمانکاران با منافع و اولویت‌های متفاوت می‌توانند با هماهنگ‌سازی تصمیمات خود در خرید تجهیزات سرمایه‌ای، از صرفه‌های ناشی از مقیاس، کاهش هزینه‌های مبادله و همچنین بهبود شاخص‌های پایداری بهره‌مند شوند. نظریه بازی‌های همکارانه به‌طور معمول به دو زیرشاخه تقسیم می‌شود: چانه‌زنی همکارانه و بازی‌های ائتلافی.

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی همکاری بین پیمانکاران در خرید تجهیزات سرمایه‌ای، از زیرشاخه دوم استفاده می‌شود؛ زیرا مسئله اصلی پژوهش، ارزیابی ارزش ائتلاف‌های ممکن و سپس تخصیص منافع همکاری میان اعضای ائتلاف است.

مدل بازی مورد استفاده از نوع بازی‌های ائتلافی با مطلوبیت قابل انتقال است. یک بازی ائتلافی با مطلوبیت قابل انتقال به‌صورت یک زوج مرتب (N, v) تعریف می‌شود که در آن $N = \{1, 2, \dots, n\}$ مجموعه بازیگران و پیمانکاران را نشان می‌دهد و $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$ تابع مشخصه است که به هر ائتلاف $S \subset N$ یک مقدار حقیقی $v(S)$ نسبت می‌دهد. این مقدار، ارزش و یا عایدی خالص همکاری ائتلاف را نمایش می‌دهد.

تفسیر $v(S)$ می‌تواند بسته به نوع مدل، سود حاصل از همکاری و یا هزینه پرداختی در صورت همکاری باشد. در پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت خرید مشترک تجهیزات و هدف‌گذاری همزمان اقتصادی و پایداری، $v(S)$ به‌عنوان ارزش خالص همکاری تعریف می‌شود؛ به‌گونه‌ای که هم صرفه‌جویی‌های اقتصادی و هم منافع مرتبط با توسعه پایدار را پوشش دهد و تعریف دقیق تابع ارزش در بخش تابع عایدی ارائه می‌شود.

پس از تعیین ارزش هر ائتلاف از طریق تابع $v(\cdot)$ ، مسئله کلیدی این است که ارزش ائتلاف بزرگ یعنی N چگونه باید میان پیمانکاران توزیع شود. بردار تخصیص پرداختی‌ها به صورت $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ تعریف می‌شود که x_i عایدی تخصیص یافته به پیمانکار i است. یک بردار تخصیص بازی ائتلافی با مطلوبیت قابل انتقال زمانی انتساب نامیده می‌شود که دو شرط پایه زیر را برآورده کند:

$$x_i \geq v(\{i\}) \quad \forall i \in N \quad (1)$$

شرط عقلانیت فردی بیان می‌کند هر پیمانکار باید از حضور در ائتلاف و یا حداقل از پذیرش تخصیص پیشنهادی نسبت به حالت انفرادی بدتر نشود؛ در غیر این صورت، انگیزه‌ای برای همکاری نخواهد داشت.

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad (2)$$

شرط کارایی بیان می‌کند کل ارزش تولیدشده توسط ائتلاف بزرگ باید به‌طور کامل میان اعضا توزیع شود. با وجود آنکه تحقق این دو شرط لازم است، اما کافی نیست؛ زیرا ممکن است یک زیرائتلاف $S \subset N$ با مشاهده یک تخصیص x انگیزه پیدا کند که از ائتلاف بزرگ خارج شود و به‌صورت مستقل ائتلاف کوچک‌تری تشکیل دهد، اگر بتواند برای اعضای خود منفعت بیشتری ایجاد کند.

برخی ویژگی‌های ساختاری بازی می‌توانند تشکیل ائتلاف بزرگ و پایداری آن را توجیه کنند. دو مفهوم مهم در این زمینه عبارت‌اند از:

۱. بازی فوق جمع‌پذیر: یک بازی ائتلافی با مطلوبیت قابل انتقال به صورت (N, v) فوق جمع‌پذیر است هرگاه برای هر دو ائتلاف جدا از هم S و T به‌گونه‌ای که $S \cap T = \emptyset$ داشته باشیم:

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \quad (3)$$

رابطه فوق بیان می‌کند ادغام دو ائتلاف جداگانه حداقل به اندازه مجموع ارزش جداگانه آن‌ها ارزش ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، تشکیل ائتلاف بزرگ معمولاً رفاه اجتماعی را افزایش داده و می‌تواند بیانگر وجود صرفه‌های ناشی از مقیاس در خرید و بهره‌برداری از تجهیزات سرمایه‌ای باشد.

۲. بازی محدب: بازی (N, v) محدب است اگر برای هر دو ائتلاف S و T داشته باشیم:

$$v(S \cup T) + v(S \cap T) \geq v(S) + v(T) \quad (4)$$

محدب بودن نشان می‌دهد ارزش افزوده پیوستن به ائتلاف‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد و این ویژگی در بسیاری از مسائل مشارکتی موجب می‌شود راه‌حل‌هایی مانند هسته غیرتهی بوده و پایداری همکاری افزایش یابد.

بر این اساس، مسئله همکاری پیمانکاران در خرید تجهیزات سرمایه‌ای در این پژوهش به‌صورت یک بازی ائتلافی قابل انتقال مدل‌سازی می‌شود که در آن: مجموعه پیمانکاران به‌عنوان بازیگران تعریف می‌شوند، ارزش هر ائتلاف با تابع مشخصه $v(S)$ محاسبه می‌شود، ارزش ائتلاف بزرگ $v(N)$ با استفاده از مفاهیم راه‌حل

منتخب بین اعضا تخصیص می‌یابد و در نهایت قیود عقلانیت فردی، کارایی و ملاحظات پایداری ائتلاف مینای ارزیابی تخصیص‌ها قرار می‌گیرد.

در بازی‌های ائتلافی با مطلوبیت قابل انتقال، مهم‌ترین جزء مدل، تابع مشخصه یا تابع ارزش ائتلاف‌ها است که ارزش خالص ایجادشده توسط هر ائتلاف را در قالب یک عدد و یا در توسعه‌های بعدی، یک مقدار فازی بیان می‌کند. در مسئله حاضر، پیمانکاران می‌توانند با تشکیل ائتلاف برای خرید و بهره‌برداری مشترک از تجهیزات سرمایه‌ای، از صرفه‌های ناشی از مقیاس، کاهش هزینه‌های سربار، بهبود بهره‌برداری و نیز ارتقای شاخص‌های توسعه پایدار منتفع شوند. بنابراین، برخلاف مدل‌های صرفاً هزینه‌محور، تابع ارزش در این پژوهش به گونه‌ای تعریف می‌شود که هم‌زمان منافع اقتصادی و منافع پایداری را پوشش دهد.

برای هر پیمانکار $i \in S$ دو وضعیت قابل تصور است:

۱. وضعیت غیرهمکارانه و انفرادی: پیمانکار i تجهیز را مستقل از سایرین تأمین کرده یا از راه‌حل‌های جایگزین مانند اجاره، برون‌سپاری، میزان خرید کوچک‌تر و... استفاده می‌کند. هزینه متناظر با این وضعیت با C_i نشان داده می‌شود.

۲. وضعیت همکارانه و ائتلافی: ائتلاف S تجهیز را به صورت مشترک تهیه کرده و سازوکار بهره‌برداری و تخصیص استفاده را هماهنگ می‌کند. هزینه متناظر با سهم پیمانکار i در این وضعیت را با C_i^S نشان داده می‌شود. علاوه بر هزینه، در وضعیت ائتلافی ممکن است منافع پایداری مانند کاهش مصرف انرژی، کاهش ضایعات، کاهش ریسک زمانی و عملیاتی و دیگر منافع نیز حاصل شود.

بر این اساس، صرفه‌جویی اقتصادی پیمانکار i از حضور در ائتلاف S به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CS_i(S) = C_i - C_i^S \quad (5)$$

هرچه $CS_i(S)$ بزرگ‌تر باشد، منفعت اقتصادی پیمانکار i از مشارکت در ائتلاف S بیشتر است.

از آنجا که هدف پژوهش حاضر صرفاً کمینه‌سازی هزینه نیست و توسعه پایدار نیز باید در ارزش‌گذاری ائتلاف‌ها لحاظ شود، یک مؤلفه منافع پایداری برای هر پیمانکار تعریف می‌شود. این مؤلفه شامل کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری انرژی تجهیز در بهره‌برداری مشترک می‌شود. این منافع را برای پیمانکار i در ائتلاف S به صورت یک شاخص تجمیع‌شده با نماد $SB_i(S)$ نمایش داده می‌شود.

تشکیل ائتلاف علاوه بر ایجاد منافع، هزینه‌هایی نیز تحمیل می‌کند؛ مانند هزینه‌های هماهنگی مدیریتی، هزینه‌های حقوقی و قراردادی، هزینه‌های لجستیکی و هزینه‌های ناشی از محدودیت‌های برنامه‌ریزی مشترک. این هزینه‌ها برای ائتلاف S با نماد $JC(S)$ نمایش داده می‌شود.

با توجه به سه جزء فوق یعنی صرفه‌جویی اقتصادی، منافع پایداری، و هزینه‌های همکاری، تابع ارزش ائتلاف S به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v(S) = \sum_{i \in S} (C_i^S + \Phi \times SB_i(S)) - JC(S) \quad (6)$$

که در این معادله ضریب $\Phi \geq 0$ ضریب وزن دهی که میزان اهمیت مؤلفه پایداری در ارزش گذاری ائتلاف ها را نسبت به صرفه جویی اقتصادی تنظیم می کند می باشد.

در بسیاری از پروژه های واقعی، مقادیر C_i^S ، $SB_i(S)$ ، C_i و $JC(S)$ با عدم قطعیت مواجه اند و برآورد آن ها مبتنی بر داده های ناقص، قضاوت خبرگان یا شرایط متغیر بازار انجام می شود. از این رو، در گام بعدی پژوهش، این پارامترها به صورت اعداد فازی بازه ای مدل می شوند و تابع ارزش به شکل فازی $\tilde{v}(S)$ توسعه می یابد. سپس، مقادیر حاصل به عنوان ورودی مفاهیم تخصیص مانند هسته، مقدار شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی به کار گرفته می شوند و تحلیل حساسیت برای ارزیابی پایداری و عدالت تخصیص ها انجام می گردد

۳. عدم قطعیت و روش های توزیع سود حاصل از همکاری و ائتلاف

در مسائل واقعی خرید تجهیزات سرمایه ای، به ویژه هنگامی که چند پیمانکار در قالب یک ائتلاف برای تصمیم گیری مشترک اقدام می کنند، تعیین دقیق بسیاری از پارامترهای مدل عملاً با ابهام و عدم قطعیت همراه است. این عدم قطعیت می تواند ناشی از نوسانات قیمت تجهیزات، تغییر در هزینه های حمل و نصب، تفاوت در شرایط بهره برداری، تغییر پذیری منافع اقتصادی حاصل از خرید مشترک و همچنین دشواری در برآورد دقیق منافع مرتبط با توسعه پایدار باشد. افزون بر این، هزینه های همکاری و هماهنگی بین اعضای ائتلاف نیز معمولاً ماهیتی قطعی نداشته و به عوامل رفتاری، قراردادی و اجرایی وابسته هستند. از این رو، استفاده از رویکردهای قطعی برای نمایش این پارامترها ممکن است تصویر ساده شده ای از واقعیت ارائه دهد و نتواند ماهیت مبهم مسئله را به طور مناسب منعکس کند.

در چنین شرایطی، به کارگیری نظریه مجموعه های فازی، به ویژه اعداد فازی مثلثی بازه ای ارزش گذاری شده، ابزار مناسبی برای مدل سازی عدم قطعیت محسوب می شود. مزیت اصلی این نوع نمایش آن است که علاوه بر حفظ سادگی محاسباتی اعداد فازی مثلثی، امکان انعکاس دامنه ای از قضاوت های خوش بینانه و بدبینانه را نیز فراهم می آورد. به بیان دیگر، به جای نسبت دادن یک عدد قطعی به هر پارامتر، می توان بازه ای از مقادیر محتمل را در قالب کران پایین و کران بالا در نظر گرفت تا انعطاف پذیری مدل در مواجهه با شرایط واقعی افزایش یابد. بر این اساس، در این پژوهش پارامترهای اصلی مدل، شامل صرفه جویی اقتصادی ائتلاف، منافع پایداری، و هزینه های همکاری، به صورت اعداد فازی مثلثی بازه ای مدل سازی می شوند. برای این منظور، یک عدد فازی مثلثی بازه ای ارزش گذاری شده $\tilde{A}$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tilde{A} = [\tilde{A}^L, \tilde{A}^U] = [(a_1^L, a_2^L, a_3^L), (a_1^U, a_2^U, a_3^U)] \quad (7)$$

که در آن، (a_1^L, a_2^L, a_3^L) و (a_1^U, a_2^U, a_3^U) به ترتیب بیانگر کران پایین و کران بالای عدد فازی مثلثی هستند و شرایط $a_1^L \leq a_2^L < a_3^L$ و $a_1^U \leq a_2^U < a_3^U$ را برآورده می کنند. تابع عضویت کران پایین و کران بالای $\tilde{A}$ به ترتیب به صورت روابط زیر تعریف می شود:

$$\mu_{\tilde{A}^L} = \begin{cases} \frac{x - a_1^L}{a_2^L - a_1^L} & a_1^L \leq x < a_2^L \\ 1 & x = a_2^L \\ \frac{a_3^L - x}{a_3^L - a_2^L} & a_2^L \leq x < a_3^L \\ 0 & x < a_1^L \text{ or } x > a_3^L \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{\tilde{A}^U} = \begin{cases} \frac{x - a_1^U}{a_2^U - a_1^U} & a_1^U \leq x < a_2^U \\ 1 & x = a_2^U \\ \frac{a_3^U - x}{a_3^U - a_2^U} & a_2^U \leq x < a_3^U \\ 0 & x < a_1^U \text{ or } x > a_3^U \end{cases} \quad (9)$$

به منظور تبدیل مدل فازی به یک معادل قطعی قابل حل، از رویکرد برش آلفا استفاده می شود. این روش با بهره گیری از مفاهیم امید ریاضی و بازه امید برای اعداد فازی بازه ای، امکان تعیین یک مدل پارامتریک قطعی را فراهم می کند و در عین حال، ترجیحات تصمیم گیرنده را نیز از طریق سطح α وارد مدل می سازد. این ویژگی باعث می شود مدل نهایی علاوه بر واقع گرایی بیشتر، از نظر تصمیم گیری نیز انعطاف پذیر باشد.

بر این اساس، امید ریاضی و بازه امید برای کران پایین و کران بالای $\tilde{A}$ به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند:

$$EV(\tilde{A}^L) = \frac{1}{4}(a_1^L + 2a_2^L + a_3^L) \quad (10)$$

$$EI(\tilde{A}^L) = [E_1^L, E_2^L] = \left[\frac{1}{2}(a_1^L + a_2^L), \frac{1}{2}(a_2^L + a_3^L) \right] \quad (11)$$

$$EV(\tilde{A}^U) = \frac{1}{4}(a_1^U + 2a_2^U + a_3^U) \quad (12)$$

$$EI(\tilde{A}^U) = [E_1^U, E_2^U] = \left[\frac{1}{2}(a_1^U + a_2^U), \frac{1}{2}(a_2^U + a_3^U) \right] \quad (13)$$

در این پژوهش، هر یک از پارامترهای اصلی تابع ارزش ائتلاف، از جمله $\tilde{C}_i(S)$ ، $\tilde{B}_i(S)$ و $\tilde{C}(S)$ به صورت عدد فازی مثلثی بازه ای ارزش گذاری شده بیان می شوند. در نتیجه، تابع ارزش ائتلاف نیز ماهیتی فازی خواهد داشت و لازم است پیش از به کارگیری در روش های تخصیص منافع، معادل قطعی آن استخراج شود. برای این منظور، پس از تعریف تابع عایدی فازی، با استفاده از روابط امید ریاضی و بازه امید و سطح اطمینان α مقدار قطعی متناظر برای هر ائتلاف محاسبه خواهد شد.

با توجه به اینکه منافع و هزینه های مرتبط با تشکیل ائتلاف در محیط واقعی با عدم قطعیت همراه هستند، تابع عایدی ائتلاف نیز به صورت فازی بازتعریف می شود. در نسخه قطعی مدل، ارزش هر ائتلاف S از تفاوت میان مجموع صرفه جویی های اقتصادی و منافع پایداری اعضای ائتلاف با هزینه های همکاری حاصل می شد. اکنون با در نظر گرفتن عدم قطعیت، این تابع به صورت زیر ارائه می شود:

$$\tilde{v}(S) = \sum_{i \in S} (\tilde{CS}_i(S) + \Phi \times \tilde{SB}_i(S)) - \tilde{JC}(S) \quad (14)$$

هر یک از مؤلفه‌های فوق به صورت عدد فازی مثلثی بازه‌ای ارزش گذاری شده تعریف می‌شوند:

$$\tilde{CS}_i(S) = [(CS_{1i}^L, CS_{2i}^L, CS_{3i}^L), (CS_{1i}^U, CS_{2i}^U, CS_{3i}^U)] \quad (15)$$

$$\tilde{SB}_i(S) = [(SB_{1i}^L, SB_{2i}^L, SB_{3i}^L), (SB_{1i}^U, SB_{2i}^U, SB_{3i}^U)] \quad (16)$$

$$\tilde{JC}_i(S) = [(JC_{1i}^L, JC_{2i}^L, JC_{3i}^L), (JC_{1i}^U, JC_{2i}^U, JC_{3i}^U)] \quad (17)$$

بنابراین، ارزش فازی ائتلاف S نیز خود یک عدد فازی مثلثی بازه‌ای خواهد بود که اطلاعات مربوط به برآورد بدبینانه و خوش‌بینانه منافع خالص ائتلاف را به صورت هم‌زمان در بر می‌گیرد. برای استفاده از این تابع در تحلیل‌های بعدی، از جمله بررسی پایداری ائتلاف و مقایسه روش‌های تخصیص منافع، لازم است مقدار قطعی متناظر با $\tilde{v}(S)$ محاسبه شود.

بر این اساس، کران پایین و کران بالای تابع ارزش فازی ائتلاف به ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \tilde{v}^L(S) = \sum_{i \in S} & \left(\left(\frac{CS_{1i}^L(S) + 2 * CS_{2i}^L(S) + CS_{3i}^L(S)}{4} \right) \right. \\ & \left. + \Phi \times \left(\frac{SB_{1i}^L(S) + 2 * SB_{2i}^L(S) + SB_{3i}^L(S)}{4} \right) \right) \\ & - \left(\frac{JC_{1i}^L(S) + 2 * JC_{2i}^L(S) + JC_{3i}^L(S)}{4} \right) \\ \tilde{v}^U(S) = \sum_{i \in S} & \left(\left(\frac{CS_{1i}^U(S) + 2 * CS_{2i}^U(S) + CS_{3i}^U(S)}{4} \right) \right. \\ & \left. + \Phi \times \left(\frac{SB_{1i}^U(S) + 2 * SB_{2i}^U(S) + SB_{3i}^U(S)}{4} \right) \right) \\ & - \left(\frac{JC_{1i}^U(S) + 2 * JC_{2i}^U(S) + JC_{3i}^U(S)}{4} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

در نهایت، با استفاده از سطح α که بیانگر درجه خوش‌بینی یا محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده است، می‌توان یک مقدار قطعی معادل برای ارزش هر ائتلاف استخراج کرد. این مقدار قطعی، مبنای ورود به مرحله تخصیص منافع در بازی مشارکتی خواهد بود.

در نتیجه، مقدار قطعی معادل تابع ارزش ائتلاف را می‌توان به صورت پارامتریک به صورت زیر نمایش داد:

$$\tilde{v}_\alpha(S) = (1 - \alpha) \times \tilde{v}^L(S) + \alpha \times \tilde{v}^U(S) \quad (20)$$

که در آن $\tilde{v}_\alpha(S)$ ارزش قطعی شده ائتلاف S در سطح A است. بدیهی است هرچه A به سمت ۱ نزدیک تر باشد، ارزیابی به سمت برآوردهای خوش بینانه تر متمایل شده و هرچه A به سمت صفر نزدیک تر باشد، دیدگاه محافظه کارانه تری در تحلیل لحاظ می شود.

بر این اساس، بازی ائتلافی فازی اولیه به یک بازی ائتلافی قطعی وابسته به پارامتر α بدیل می شود $G_\alpha = (N, v_\alpha)$ که در آن N مجموعه پیمانکاران و $v_\alpha(S)$ تابع ارزش قطعی شده هر ائتلاف است. این بازی قطعی شده مبنای استفاده از روش های مختلف تخصیص منافع، از جمله هسته، مقدار شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی، قرار خواهد گرفت.

پس از محاسبه تابع ارزش هر ائتلاف $v(S)$ گام بعدی تعیین نحوه تخصیص منافع همکاری بین اعضای ائتلاف بزرگ N است. در چارچوب بازی های ائتلافی با منفعت قابل انتقال، بحث تقسیم سود و منافع را با استفاده از مفاهیم راه حل انجام می شود که هر کدام از منظر خاصی مانند فردگرایی، انصاف، کمینه سازی نارضایتی و پایداری در برابر خروج، یک بردار پرداخت $x = (x_1, \dots, x_n)$ را پیشنهاد می کنند.

در ادامه، چهار روش اصلی مورد استفاده در پژوهش حاضر معرفی می شوند:

۱. راه حل هسته یک مفهوم راه حل مجموعه ارزشی است که تمام بردارهای تخصیص را شامل می شود که در آن هیچ ائتلافی انگیزه ای برای ترک ائتلاف بزرگ ندارد. به عبارت دیگر، هسته تخصیص هایی را جمع آوری می کند که هم کارا باشند و تمام ارزش ائتلاف بزرگ توزیع شود و هم ائتلاف پایدار باشند یعنی هیچ زیرائتلافی با خروج نتواند وضعیت بهتری برای اعضای خودش ایجاد کند.

برای یک بازی سود محور، هسته به صورت زیر تعریف می شود:

$$C(v_\alpha) = \{x \in R^n \mid \sum_{i \in N} x_i = v_\alpha(N), \sum_{i \in S} x_i \geq v_\alpha(S) \quad \forall S \subset N\} \quad (21)$$

و برای یک بازی هزینه محور، جهت نداشتن انگیزه خروج، شرط های ائتلافی به صورت زیر خواهد بود:

$$C(v_\alpha) = \{x \in R^n \mid \sum_{i \in N} x_i = v_\alpha(N), \sum_{i \in S} x_i \leq v_\alpha(S) \quad \forall S \subset N\} \quad (22)$$

در پژوهش حاضر با توجه به اینکه $v_\alpha(S)$ ارزش خالص ائتلاف را بیان میکند، تفسیر غالب از جنس بازی سود است و از رابطه (۲۱) برای ارزیابی پایداری تخصیص ها استفاده می شود. اگر $C(v_\alpha)$ تهی نباشد، وجود هسته نشان می دهد که می توان یک تخصیص کارا و بدون انگیزه خروج یافت.

۲. نوکلئولوس یک راه حل نقطه ارزشی و تک برداری است که با هدف کمینه کردن نارضایتی ناراضی ترین ائتلاف تعریف می شود. برای اندازه گیری نارضایتی هر ائتلاف S نسبت به یک تخصیص x ، مفهوم مازاد به کار می رود. در بازی سود، مازاد ائتلاف S برابر است با:

$$e(S, x) = v_\alpha(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (23)$$

هرچه $e(S, x)$ بزرگتر باشد، یعنی ائتلاف S ادعا می کند که با توجه به ارزش خودش، کمتر از حقتش دریافت کرده و بنابراین نارضایتی بیشتری دارد. ویژگی مهم آن است که اگر هسته غیر تهی باشد، نوکلئولوس درون هسته قرار می گیرد؛ در نتیجه هم از دید عدالت مبتنی بر نارضایتی و هم از نظر پایداری ائتلافی جذاب است.

۳. مقدار شاپلی یک راه حل نقطه ارزشی مشهور بر مبنای ایده انصاف است و سهم هر بازیگر را بر اساس میانگین مشارکت نهایی در تمام ترتیب های ممکن پیوستن به ائتلاف بزرگ تعیین می کند. مشارکت نهایی بازیگر i در ائتلاف $S \subseteq N/\{i\}$ چنین تعریف می شود:

$$MC(i, s) = v_a(S \cup \{i\}) - v_a(S) \quad (24)$$

سپس مقدار شاپلی برای بازیگر i برابر میانگین وزنی مشارکت های نهایی او در تمام ائتلاف های ممکن است:

$$x_i^{sh} = \sum_{S \subseteq N/\{i\}} \frac{|S|!(n - |S| - 1)!}{n!} MC(i, s) \quad (25)$$

مقدار شاپلی به طور خودکار کارا است و در بازی های محدب درون هسته قرار می گیرد به همین دلیل، در مسائل مشارکتی پیمانکاران معمولاً به عنوان یک معیار استاندارد انصاف مبتنی بر مشارکت گزارش می شود.

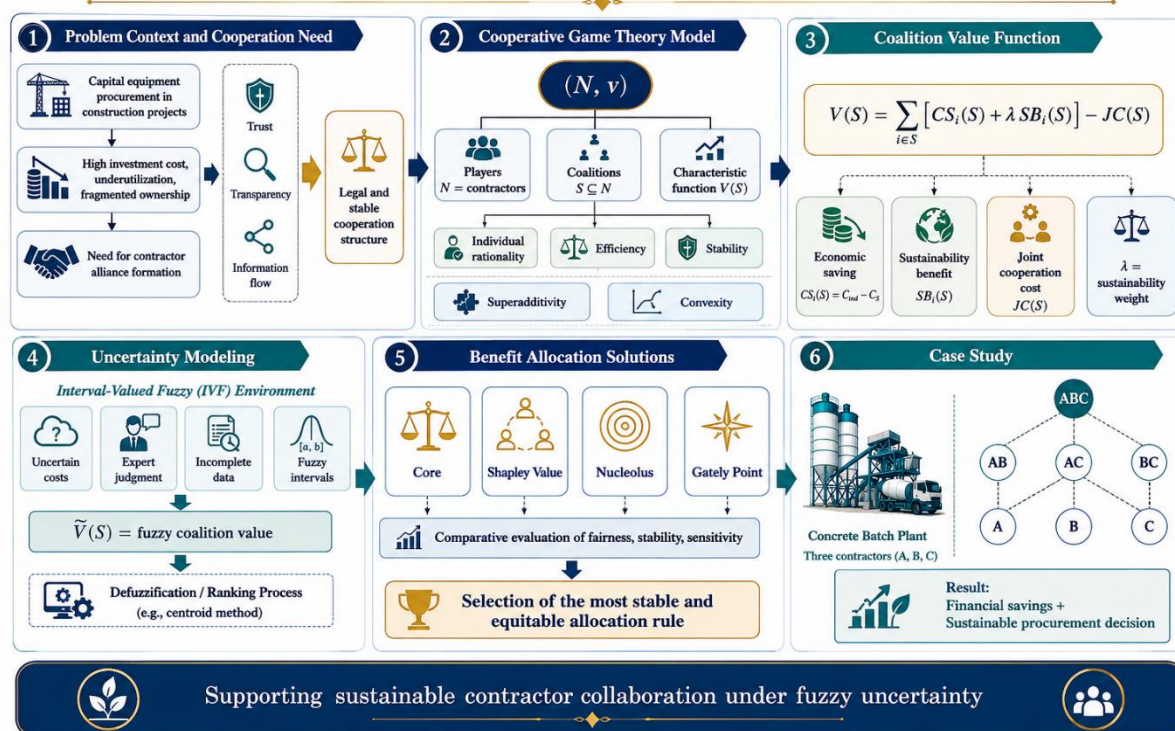
۴. نقطه گیتلی با تمرکز بر پایداری عملی ائتلاف و کنترل انگیزه خروج تعریف می شود. ایده اصلی این است که برای هر بازیگر i زیان کمی می بیند و یا حتی چیزی برای از دست دادن ندارد؛ بنابراین بازیگر i اگر او ائتلاف بزرگ را ترک کند، خودش و سایرین متحمل زیان می شوند. گیتلی میل به برهم زدن ائتلاف را به صورت نسبتی از زیان دیگران به زیان خود فرد اندازه گیری می کند. برای یک تخصیص x میل به برهم زدن بازیگر i به صورت زیر تعریف می شود:

$$d_i(x) = \frac{\sum_{j \neq i} x_j - v_a(N/\{i\})}{x_i - v_a(\{i\})} \quad (26)$$

هرچه $d_i(x)$ بزرگتر باشد، تفسیر این است که خروج i برای دیگران زیان زیادی ایجاد می کند در حالی که خود i زیان کمی می بیند و یا حتی چیزی برای از دست دادن ندارد؛ بنابراین بازیگر بالقوه مستعدتر برای خروج است. نقطه گیتلی تخصیصی است که در آن این میل به خروج برای همه بازیگران یکسان شود یعنی $d_1(x) = d_n(x)$ و در عین حال شرط کارایی نیز برقرار باشد. به این ترتیب، نقطه گیتلی تلاش می کند یک تخصیص ارائه دهد که ریسک فروپاشی ائتلاف به دلیل نارضایتی نامتقارن اعضا کاهش یابد.

شکل ۱ نمایی کلی از چارچوب مفهومی و فرایند تحلیلی پژوهش را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی از مجموعه‌ای از ورودی‌های اصلی شامل پارامترهای اقتصادی پروژه، شاخص‌های مرتبط با توسعه پایدار و ویژگی‌های عملیاتی پیمانکاران آغاز می‌شود. در ادامه، موانع همکاری و هزینه‌های ناشی از هماهنگی و مشارکت میان پیمانکاران به‌عنوان عوامل محدودکننده تشکیل ائتلاف در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، مسئله در قالب یک بازی ائتلافی با منفعت قابل انتقال صورت‌بندی می‌شود تا امکان بررسی تشکیل ائتلاف‌های مختلف و ارزیابی منافع حاصل از همکاری مشترک فراهم گردد.

Framework of Contractor Coalition Modeling for Capital Equipment Procurement

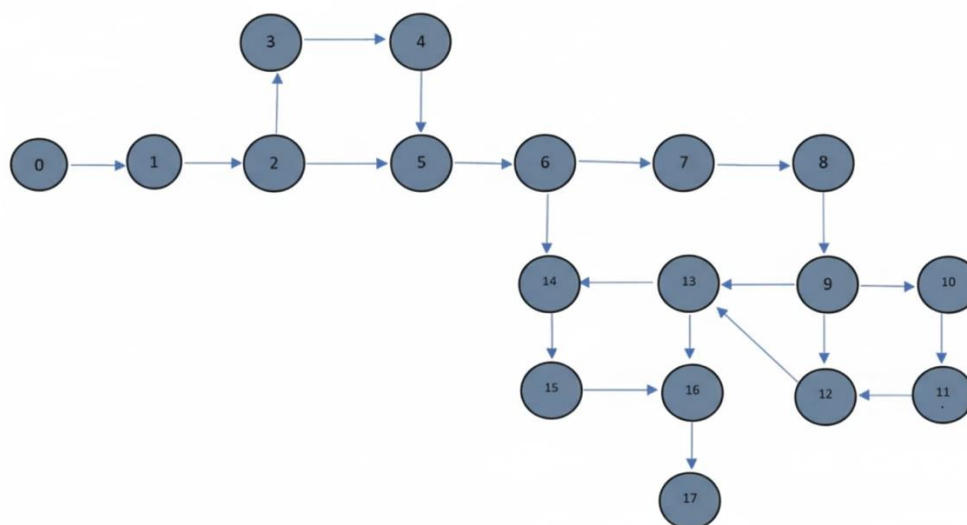


شکل ۱: اینفوگرافیک چارچوب پیشنهادی پژوهش برای مدل‌سازی ائتلاف پیمانکاران در خرید تجهیزات سرمایه‌ای تحت عدم قطعیت فازی

۴. مورد مطالعاتی

برای ارزیابی قابلیت کاربرد عملی و نیز کارایی محاسباتی چارچوب پیشنهادی پژوهش، یک پروژه واقعی زیرساخت مخابراتی به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. این پروژه مربوط به احداث، نصب و راه‌اندازی شبکه فیبر نوری در استان خراسان رضوی است و شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های اجرایی و راه‌اندازی از جمله حفاری، نصب کابل، مفصل‌بندی، آزمایش و تست شبکه و فعال‌سازی و راه‌اندازی سیستم می‌باشد. ماهیت این فعالیت‌ها به گونه‌ای است که اجرای آن‌ها نیازمند هماهنگی منابع انسانی و تجهیزات اجرایی مرتبط بوده و هم‌زمان تحت محدودیت‌های سخت‌گیرانه زمان و بودجه انجام

می‌گیرد. به همین دلیل، پروژه حاضر بستر مناسبی برای آزمون هم‌زمان مدل‌سازی عدم قطعیت به کمک رویکرد فازی و سازوکار ائتلاف و همکاری بین اجزای اجرایی پروژه و نحوه تخصیص منافع و هزینه‌های ناشی از همکاری فراهم می‌کند. شبکه ارائه‌شده در شکل ۲، یک شبکه گره‌ای از روابط تقدم-تأخر بین فعالیت‌های پروژه جهت راه‌اندازی سیستم فیبر نوری شرکت مخابرات را نمایش می‌دهد. این شبکه شامل ۱۶ فعالیت است. مطابق رویه استاندارد در مدل‌سازی شبکه پروژه، فعالیت‌های ابتدایی و انتهایی شبکه به‌صورت فعالیت‌های مجازی در نظر گرفته شده‌اند که هیچ زمان و منبعی به آن‌ها تخصیص داده نمی‌شود و صرفاً برای نمایش منطقی شروع و پایان و نیز ساختار وابستگی‌ها استفاده می‌شوند.



شکل ۲: شبکه پروژه نصب و تجهیز فیبر نوری

اطلاعات مربوط به مطالعه موردی پروژه فیبر نوری، شامل مشخصات فعالیت‌ها، روابط ائتلافی، پارامترهای هزینه‌ای به صورت جداگانه و با در نظرگیری ائتلاف و نیز داده‌های مرتبط با شاخص‌های پایداری شامل مصرف برق محاسبه شده، به صورت مثلث درونی (بازه متقارن) در جدول ۱ ارائه شده است. ($\Phi = 0.3$ و $\alpha = 0.5$).

جدول ۱. مروری بر ادبیات

ائتلاف‌ها	فعالیت‌های پروژه	هزینه‌های استفاده از منابع (ملیون)	میزان مصرف برق (کلیووات بر ساعت)	هزینه مصرف برق (ملیون)	هزینه نهایی (هزینه فعالیت‌ها و هزینه مصرف برق)	هزینه‌های ناشی از همکاری (ملیون)	سود حاصل از ائتلاف (ملیون)
A	حفاری و	۵۲۸	۱۸۰۰	۳۷	۵۶۵	-	-

زیرساخت‌های فیزیکی							
کابل کشی و اتصالات						B	
-	-	۴۶۴	۲۱	۲۲۰۰	۴۴۳		
نصب و راه اندازی تجهیزات						C	
-	-	۴۷۰	۱۳	۱۴۰۰	۴۵۷		
۱۲۴.۰۵	۶.۴۵	۹۰۰	۵۳	۶۰۰۰	۸۴۷	-	{A,B}
۸۱.۹۵	۴.۲۵	۹۵۰	۴۷	۵۲۰۰	۹۰۳	-	{A,C}
۱۰۵.۳۵	۵.۴۵	۸۲۵	۳۱	۳۶۰۰	۷۹۴	-	{B,C}
۳۱۱.۱۵	۱۶.۲۵	۱۱۷۴	۵۹	۷۴۰۰	۱۱۴۵	-	{A,B,C}

اطلاعات و مسئله حاضر را می‌توان به صورت یک مسئله یک بازی ائتلافی با سود قابل انتقال به صورت زیر مدل کرد:

$$N=\{A,B,C\}$$

$$v(A)=0, \quad v(B)=0, \quad v(C)=0$$

$$v(AB)=124.05, \quad v(AC)=81.95, \quad v(BC)=105.35$$

$$v(N)=v(ABC)=311.15$$

با توجه به مسئله بیان شده، بازی سود با مطلوبیت قابل انتقال (N, v) به منظور تعیین نحوه تخصیص سود ناشی از همکاری میان پیمانکاران مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف، شناسایی تخصیص‌هایی است که از نظر اقتصادی پایدار بوده و هیچ زیرائلافی انگیزه خروج از ائتلاف بزرگ را نداشته باشد.

هسته بازی (N, v) مجموعه‌ای از بردارهای تخصیص است که شرایط کارایی و عقلانیت فردی و ائتلافی را به طور هم‌زمان برآورده می‌کنند. به صورت رسمی، هسته بازی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$C(N) = \left\{ \begin{array}{l} x_A \geq 0 \\ x_B \geq 0 \\ x_C \geq 0 \\ x_A + x_B \geq 124.05 \\ x_A + x_C \geq 81.95 \\ x_B + x_C \geq 105.35 \\ x_A + x_B + x_C = 311.15 \end{array} \right\}$$

به منظور تعیین یک سازوکار منصفانه و پایدار برای تخصیص منافع حاصل از همکاری میان پیمانکاران، از سه مفهوم شناخته شده در نظریه بازی‌های مشارکتی شامل ارزش شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی استفاده شد. هر یک از این روش‌ها توزیع منفعت کل ائتلاف را از منظر متفاوتی ارزیابی می‌کنند. ارزش شاپلی سهم هر پیمانکار را بر اساس میانگین مشارکت نهایی آن در تمامی حالت‌های ممکن تشکیل ائتلاف تعیین می‌کند. روش نوکلئولوس با تمرکز بر کمینه‌سازی بیشترین میزان نارضایتی میان ائتلاف‌ها، پایدارترین تخصیص را در محدوده هسته بازی ارائه می‌دهد. در مقابل، نقطه گیتلی با برابر کردن

شاخص تمایل به گسست بازیکنان، تخصیصی را ارائه می‌کند که در آن انگیزه خروج از ائتلاف بزرگ برای اعضا به حداقل می‌رسد.

جدول ۲. تقسیم سود حاصل از ارزش شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی در مثلث درونی (مقارن)

روش	پیمانکار A	پیمانکار B	پیمانکار C
ارزش شاپلی	۱۰۲.۹۳	۱۱۴.۶۳	۹۳.۵۸
نوکلئولوس	۹۳.۵۵	۱۲۴.۰۵	۹۳.۵۵
نقطه گیتلی	۱۰۲.۹۳	۱۱۴.۶۳	۹۳.۵۸

نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که هر سه روش تخصیص، با وجود تفاوت در مبانی نظری، الگوی نسبتاً مشابهی از توزیع منافع میان پیمانکاران ارائه می‌کنند. در هر سه رویکرد، پیمانکار B بیشترین سهم از منفعت ائتلاف بزرگ را دریافت می‌کند، در حالی که پیمانکار C کمترین سهم را به دست می‌آورد و پیمانکار A در موقعیتی میانی قرار می‌گیرد. این الگو بیانگر آن است که نقش پیمانکار B در ایجاد ارزش افزوده در ائتلاف‌های مختلف نسبت به سایر پیمانکاران برجسته‌تر است.

در روش ارزش شاپلی، سهم هر پیمانکار بر اساس میانگین مشارکت نهایی وی در تمامی ترتیب‌های ممکن شکل‌گیری ائتلاف‌ها تعیین می‌شود. نتایج این روش نشان می‌دهد که پیمانکاران A، B و C به ترتیب مقادیر ۱۰۲.۹۳، ۱۱۴.۶۳ و ۹۳.۵۸ واحد از سود کل را دریافت می‌کنند. این تخصیص نشان‌دهنده توزیعی نسبتاً متوازن از منافع است و بیان می‌کند که اگرچه پیمانکار B بیشترین مشارکت نهایی را در تشکیل ائتلاف‌ها دارد، اما اختلاف سهم آن با سایر پیمانکاران در حدی نیست که تعادل کلی سیستم را بر هم بزند. در واقع، ارزش شاپلی تصویری میانگین از قدرت مشارکتی بازیگران ارائه می‌دهد و به همین دلیل اغلب به عنوان یکی از معیارهای منصفانه در تخصیص سود در بازی‌های مشارکتی شناخته می‌شود. در مقابل، روش نوکلئولوس با تمرکز بر کمینه‌سازی بیشترین میزان نارضایتی میان ائتلاف‌ها، رویکردی متفاوت اتخاذ می‌کند. نتایج این روش نشان می‌دهد که سهم پیمانکار B به مقدار ۱۲۴.۰۵ افزایش یافته، در حالی که سهم پیمانکار C به ۹۳.۵۵ کاهش می‌یابد و پیمانکار A مقدار ۹۳.۵۵ را دریافت می‌کند. این تفاوت نشان می‌دهد که برای حفظ پایداری ائتلاف بزرگ و جلوگیری از شکل‌گیری ائتلاف‌های جایگزین، لازم است سهم بیشتری به پیمانکار B اختصاص یابد. به بیان دیگر، نوکلئولوس با در نظر گرفتن محدودیت‌های هسته بازی و ساختار ائتلاف‌های دوتایی، تلاش می‌کند بیشترین نارضایتی احتمالی میان زیرائتلاف‌ها را کاهش دهد. از آنجا که پیمانکار B در ترکیب با هر دو پیمانکار دیگر ائتلاف‌هایی با ارزش قابل توجه ایجاد می‌کند، افزایش سهم آن در این روش به عنوان مکانیزمی برای حفظ پایداری ساختار همکاری قابل تفسیر است. از سوی دیگر، نتایج حاصل از نقطه گیتلی بسیار نزدیک به نتایج ارزش شاپلی است. در این روش، سهم پیمانکاران A، B و C به ترتیب برابر با ۱۰۲.۹۳، ۱۱۴.۶۳ و ۹۳.۵۸ به دست آمده است. نزدیکی این مقادیر به نتایج ارزش شاپلی نشان می‌دهد که در این مسئله، شاخص تمایل به جدایی پیمانکاران ساختاری نسبتاً متعادل دارد و هیچ یک از پیمانکاران انگیزه نامتعارفی برای ترک ائتلاف بزرگ ندارند. به عبارت دیگر، توزیع منافع به گونه‌ای است که زیان ناشی از فروپاشی ائتلاف برای تمامی بازیگران نسبتاً قابل توجه بوده و همین موضوع باعث همگرایی نتایج این دو روش شده است.

پس از اعمال مدل فازی ارزشگذاری شده بازه‌ای (مثلث بیرونی و بازه نامتقارن) انتخاب سطح برش $\alpha = 0.5$ و $\Phi = 0.3$ ، اطلاعات و مسئله را می‌توان به صورت یک مسئله بازی ائتلافی با سود قابل انتقال به صورت زیر مدل کرد:

$$N=\{A,B,C\}$$

$$\begin{aligned}
 v(A) &= 0, & v(B) &= 0, & v(C) &= 0 \\
 v(AB) &= 127.05, & v(AC) &= 84.35, & v(BC) &= 108.95 \\
 v(N) &= v(ABC) = 315.95
 \end{aligned}$$

با توجه به مقادیر به دست آمده، هسته بازی $(N, \tilde{v}_\alpha)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$C(N) = \left\{ \begin{array}{l} x_A \geq 0 \\ x_B \geq 0 \\ x_C \geq 0 \\ x_A + x_B \geq 127.05 \\ x_A + x_C \geq 84.35 \\ x_B + x_C \geq 108.95 \\ x_A + x_B + x_C = 315.95 \end{array} \right\}$$

حل مدل نشان داد که هسته بازی غیر تهی است. این نتیجه بیانگر آن است که حتی با لحاظ عدم قطعیت پارامترها، همکاری سه جانبه میان پیمانکاران پایدار باقی می ماند.

برای تعیین سازوکار منصفانه و پایدار تخصیص منافع، سه مفهوم کلاسیک نظریه بازی های مشارکتی شامل ارزش شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی بکار گرفته شده است و نتایج عددی به دست آمده در جدول ۳ نمایش داده می شود.

جدول ۳. تقسیم سود حاصل از ارزش شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی در مثلث بیرونی (نامتقارن)

روش	پیمانکار A	پیمانکار B	پیمانکار C
ارزش شاپلی	۱۰۴.۲۳	۱۱۶.۵۳	۹۵.۱۸
نوکلئولوس	۹۴.۴۵	۱۲۷.۰۵	۹۴.۴۵
نقطه گیتلی	۱۰۴.۲۳	۱۱۶.۶۱	۹۵.۱۱

برای بررسی اثر در نظرگیری عدم قطعیت در پارامترهای مسئله، نتایج حاصل از دو نوع مدل سازی فازی شامل مثلث درونی (بازه متقارن) و مثلث بیرونی (بازه نامتقارن) با یکدیگر مقایسه شد. در حالت مثلث درونی که بیانگر سطح محافظه کارانه تری از عدم قطعیت است، ارزش ائتلافها مقادیر کمتری نسبت به حالت مثلث بیرونی دارند. به طور مشخص، ارزش ائتلاف بزرگ از ۳۱۱.۱۵ در حالت متقارن به ۳۱۵.۹۵ در حالت نامتقارن افزایش می یابد که نشان دهنده در نظرگیری دامنه وسیع تری از عدم قطعیت در پارامترهای هزینه و مصرف انرژی است.

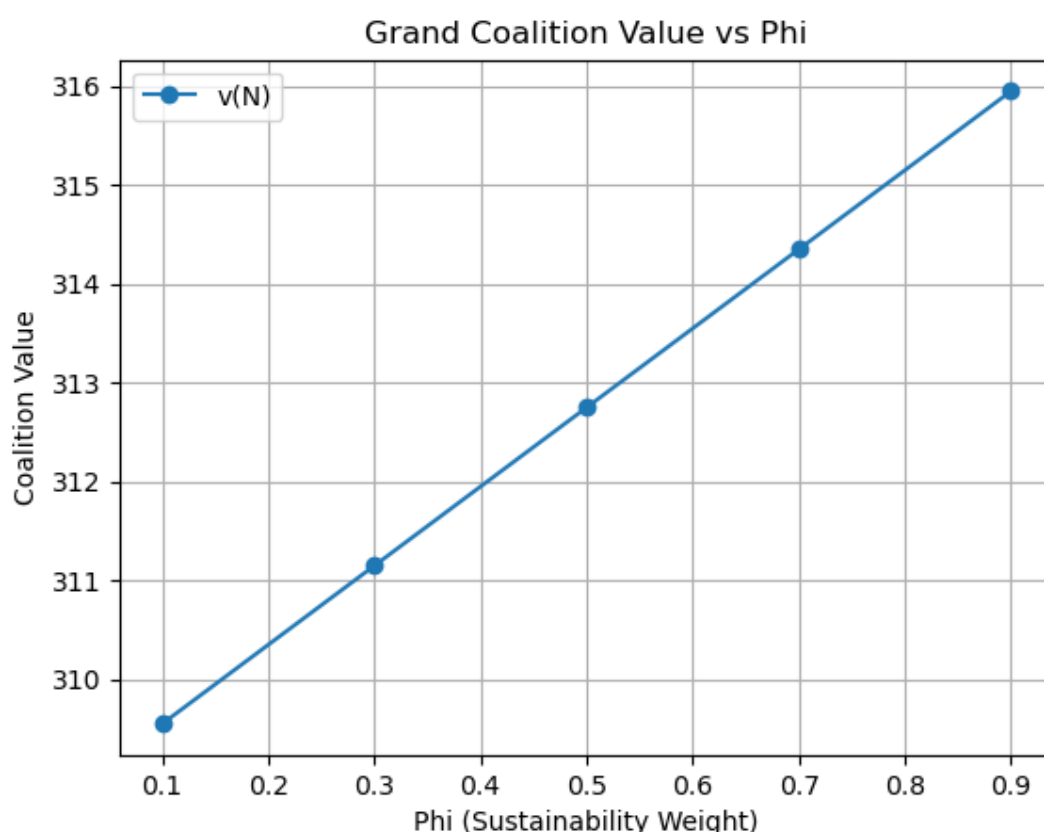
با وجود این تغییر در مقادیر تابع مشخصه، ساختار کلی بازی و ترتیب قدرت بازیگران تغییر محسوسی پیدا نمی کند. در هر دو حالت، پیمانکار B بیشترین سهم از منفعت ائتلاف بزرگ را دریافت می کند، در حالی که پیمانکار C کمترین سهم را به دست می آورد و پیمانکار A در موقعیتی میانی قرار دارد ($B > A > C$). این موضوع نشان می دهد که نقش پیمانکار B در ایجاد ارزش افزوده در ائتلافها، حتی در شرایط عدم قطعیت گسترده تر، همچنان غالب باقی می ماند.

از منظر روش های تخصیص نیز الگوی مشابهی مشاهده می شود. در هر دو حالت فازی، نتایج ارزش شاپلی و نقطه گیتلی بسیار نزدیک به یکدیگر هستند، در حالی که روش نوکلئولوس سهم بیشتری به پیمانکار B اختصاص می دهد تا بیشترین نارضایتی بالقوه میان زیرائلافها کاهش یابد و پایداری ائتلاف بزرگ حفظ شود. همچنین مشاهده می شود که با انتقال از

مثلت درونی به مثلت بیرونی، مقادیر تخصیص برای تمامی پیمانکاران اندکی افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش ارزش کل ائتلاف بزرگ در مدل نامتقارن است.

در مجموع، نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که اگرچه در نظرگیری مدل فازی بازه‌ای نامتقارن موجب افزایش مقادیر ارزش ائتلاف‌ها و تخصیص‌ها می‌شود، اما ساختار بنیادی بازی، ترتیب قدرت بازیگران و پایداری ائتلاف بزرگ تغییر نمی‌کند. این یافته بیانگر استحکام ساختار همکاری میان پیمانکاران در برابر عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی و انرژی در پروژه مورد مطالعه است.

شکل ۳، روند تغییرات ارزش ائتلاف بزرگ $V(N)$ را در بازه $\Phi \in [0.1, 0.9]$ نشان می‌دهد. ضریب Φ بیانگر وزن تخصیص داده شده به شاخص‌های پایداری مانند کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی منابع در تابع هدف ائتلاف است.



شکل ۳: تغییرات تابع عایدی بر اساس تغییرات Φ

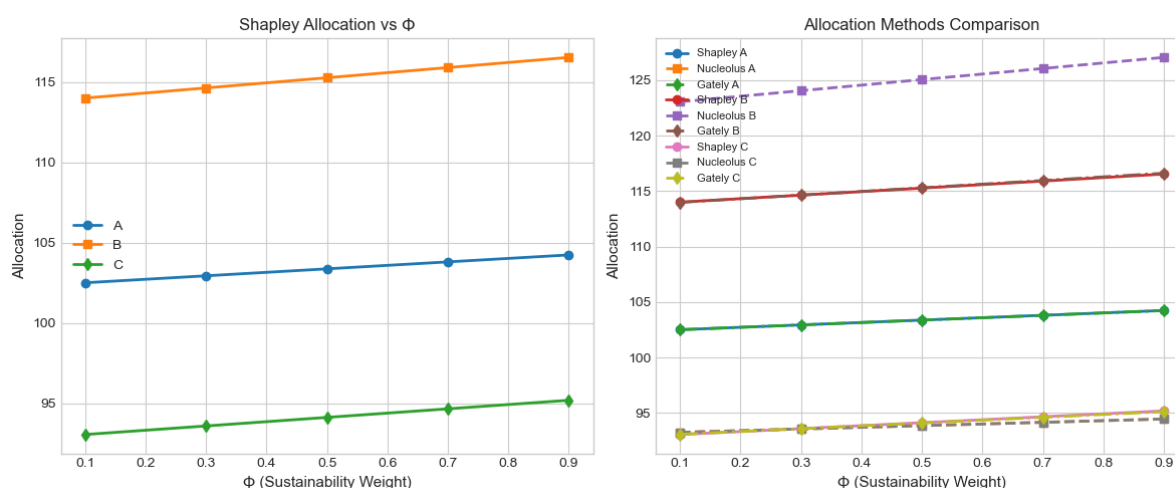
همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار Φ ارزش کل ائتلاف بزرگ به صورت خطی و صعودی افزایش می‌یابد. این روند صعودی از مقدار تقریبی 309.05 در $\Phi = 0.1$ آغاز شده و در نهایت به مقدار ۳۱۶ در $\Phi = 0.9$ می‌رسد. از نمودار ۲ میتوان نتایج زیر را بدست آورد.

۱. هم‌افزایی پایدار: صعودی بودن نمودار اثبات می‌کند که همکاری میان پیمانکاران در پروژه فیبر نوری، فراتر از کاهش هزینه‌های عملیاتی، منجر به بهبود قابل توجه در شاخص‌های پایداری می‌شود. به عبارت دیگر، پیمانکاران

در ائتلاف بزرگ، پتانسیل بالاتری برای مدیریت مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی نسبت به فعالیت های انفرادی دارند.

۲. مشوق های همکاری: افزایش ارزش ائتلاف با افزایش Φ شان می دهد که اگر سیاست گذار یا کارفرما، استانداردهای سخت گیرانه تری برای پایداری وضع کند، انگیزه اقتصادی پیمانکاران برای باقی ماندن در ائتلاف بزرگ و اشتراک منابع تقویت می شود. این یافته، تایید کننده این فرضیه است که مدیریت پایدار پروژه، کاتالیزور پایداری ائتلاف های استراتژیک است

شکل ۴، نتایج تخصیص سود را در دو بخش ارائه می دهد: بخش (الف) روند تغییرات ارزش شاپلی برای هر پیمانکار و بخش (ب) مقایسه عملکرد سه روش تخصیص ارزش شاپلی، نوکلئوس و نقطه گیتلی را نسبت به تغییرات ضریب پایداری Φ نمایش می دهد.



شکل ۴: تغییرات تقسیم سود بر اساس تغییرات Φ

با افزایش وزن پایداری از ۰.۱ به ۰.۹، سهم هر سه پیمانکار به صورت صعودی تغییر می کند. این امر نشان دهنده خصلت برد-برد در ائتلاف پایدار است؛ یعنی با تمرکز بیشتر بر شاخص های زیست محیطی، نه تنها سود کل ائتلاف افزایش می یابد، بلکه این سود مازاد به گونه ای توزیع می شود که انگیزه تمامی اعضا برای مشارکت تقویت گردد. در این میان، پیمانکار B همواره بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است که نشان دهنده قدرت چانه زنی بالا و نقش کلیدی وی در بهبود شاخص های پایداری پروژه است.

در مقایسه متدولوژی های مختلف تخصیص سود، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. همگرایی شاپلی و گیتلی: مشاهده می شود که مقادیر حاصل از روش ارزش شاپلی و نقطه گیتلی برای تمامی بازیکنان تقریباً بر هم منطبق هستند. این همگرایی نشان دهنده تعادل در ساختار بازی است؛ چرا که هر دو روش بر مبنای عدالت توزیعی و مشارکت نهایی عمل می کنند.

۲. رویکرد متفاوت نوکلئوس: روش نوکلئوس رفتار متمایزی نشان می دهد. این روش سهم بیشتری را به پیمانکار B و سهم کمتری را به پیمانکاران A و C نسبت به سایر روش ها اختصاص داده است. از آنجا که هدف نوکلئوس

کمینه سازی حداکثر نارضایتی است، برای حفظ پایداری هسته بازی در شرایطی که وزن پایداری بالا می رود، امتیاز بیشتری به پیمانکار B می دهد تا از خروج احتمالی وی از ائتلاف جلوگیری نماید. ثبات رتبه بندی پیمانکاران یعنی $B > A > C$ در تمامی سطوح Φ و در تمامی روش های تخصیص، نشان دهنده پایداری ساختاری مدل طراحی شده است. مدیران پروژه می توانند اطمینان حاصل کنند که تشویق پیمانکاران به رفتارهای پایدار، تضاد منافع شدیدی میان اعضا ایجاد نکرده و پایداری ائتلاف را تهدید نمی کند.

۵. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر نظریه بازی های مشارکتی برای مدل سازی و تخصیص منافع حاصل از همکاری میان پیمانکاران در پروژه های زیرساختی ارائه شد. در این چارچوب، مسئله مشارکت میان پیمانکاران به صورت یک بازی سود با مطلوبیت قابل انتقال مدل سازی گردید تا نحوه توزیع منافع ناشی از تشکیل ائتلاف ها به صورت نظام مند مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به وجود عدم قطعیت در پارامترهای اقتصادی و عملیاتی پروژه ها، در مدل پیشنهادی از رویکرد اعداد فازی بازهای استفاده شد تا دامنه عدم قطعیت در ارزش ائتلاف ها به طور واقع بینانه منعکس گردد. سپس با بهره گیری از برش آلفا، مقادیر فازی به فرم قطعی تبدیل شده و تابع عایدی ائتلاف ها برای تحلیل بازی مشارکتی استخراج گردید. به منظور تحلیل پایداری ائتلاف و تعیین سازوکارهای مناسب برای تقسیم منافع میان پیمانکاران، از چهار مفهوم مهم در نظریه بازی های مشارکتی شامل هسته بازی، ارزش شاپلی، نوکلئولوس و نقطه گیتلی استفاده شد. هسته بازی به عنوان مجموعه ای از تخصیص های پایدار مورد بررسی قرار گرفت تا مشخص شود چه بردارهایی از تخصیص سود می توانند شرایط کارایی و عقلانیت ائتلافی را به طور هم زمان برآورده کنند. در ادامه، سه روش تخصیص مبتنی بر اصول عدالت و پایداری مورد استفاده قرار گرفتند تا سهم هر یک از پیمانکاران از سود ائتلاف بزرگ تعیین شود. ارزش شاپلی توزیع منافع را بر اساس مشارکت نهایی متوسط هر پیمانکار در تمامی ساختارهای ممکن ائتلاف محاسبه می کند، در حالی که نوکلئولوس با تمرکز بر حداقل سازی بیشترین نارضایتی میان ائتلاف ها، پادارترین تخصیص ممکن را در فضای هسته ارائه می دهد. همچنین، نقطه گیتلی با در نظر گرفتن شاخص تمایل به گسست بازیکنان، تخصیصی را تعیین می کند که در آن انگیزه خروج از ائتلاف بزرگ برای تمامی اعضا به حداقل می رسد.

کارایی چارچوب پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی در پروژه توسعه شبکه فیبر نوری در استان خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که همکاری میان پیمانکاران می تواند ارزش اقتصادی قابل توجهی نسبت به فعالیت های منفرد ایجاد کند و تشکیل ائتلاف بزرگ منجر به بیشینه شدن منفعت کل سیستم می شود. همچنین، نتایج روش های تخصیص نشان داد که پیمانکار B در تمامی رویکردهای مورد بررسی سهم بیشتری از منافع ائتلاف دریافت می کند که این موضوع بیانگر نقش کلیدی این پیمانکار در ایجاد هم افزایی میان اعضای ائتلاف است. علاوه بر این، نزدیکی نتایج حاصل از ارزش شاپلی و نقطه گیتلی نشان دهنده تعادل نسبی در ساختار مشارکت میان پیمانکاران بوده و بیانگر آن است که توزیع قدرت مشارکتی در این بازی از الگوی نسبتاً متعادلی برخوردار است. در مقابل، روش نوکلئولوس با هدف حفظ پایداری ائتلاف، سهم بیشتری برای پیمانکار دارای نقش محوری در ائتلاف های دوتایی در نظر می گیرد.

از منظر مدیریتی، چارچوب ارائه شده می تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی برای تصمیم گیران و مدیران پروژه های زیرساختی مورد استفاده قرار گیرد. این چارچوب امکان ارزیابی ساختارهای مختلف همکاری میان پیمانکاران و تحلیل سازوکارهای عادلانه تخصیص منافع را فراهم می کند و می تواند به کاهش تعارضات قراردادی، افزایش شفافیت در تقسیم

منافع و تقویت انگیزه همکاری میان ذی‌نفعان پروژه کمک نماید. به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس مانند توسعه زیرساخت‌های مخابراتی، انرژی و حمل‌ونقل که مشارکت چندین پیمانکار و سازمان مختلف اجتناب‌ناپذیر است، استفاده از ابزارهای تحلیلی مبتنی بر نظریه بازی‌ها می‌تواند به بهبود کیفیت تصمیم‌گیری و افزایش پایداری همکاری‌ها منجر شود.

با وجود نتایج امیدوارکننده، پژوهش حاضر با برخی محدودیت‌ها نیز همراه است. نخست، اگرچه عدم‌قطعیت پارامترها با استفاده از مدل‌های فازی بازه‌ای در نظر گرفته شده است، اما برخی عدم‌قطعیت‌های پویا و رفتاری که در تعاملات واقعی میان پیمانکاران شکل می‌گیرد به‌طور کامل در مدل لحاظ نشده‌اند. دوم، مطالعه موردی این تحقیق بر یک پروژه خاص در حوزه زیرساخت‌های مخابراتی متمرکز بوده است و تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع ممکن است نیازمند تنظیم پارامترها و بازکالیبراسیون مدل متناسب با ویژگی‌های هر حوزه باشد. علاوه بر این، با افزایش تعداد بازیگران و پیچیدگی ساختار ائتلاف‌ها، ابعاد محاسباتی مدل به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و محاسبه دقیق برخی مفاهیم راه‌حل می‌تواند با چالش‌های محاسباتی همراه شود.

بر این اساس، مسیرهای متعددی برای پژوهش‌های آینده قابل پیشنهاد است. نخست، توسعه مدل با استفاده از رویکردهای پیشرفته‌تر عدم‌قطعیت مانند بازی‌های فازی تعمیم‌یافته، مدل‌های احتمالاتی و تحلیل سناریو می‌تواند دقت تحلیل‌ها را افزایش دهد. دوم، ترکیب چارچوب پیشنهادی با الگوریتم‌های فراابتکاری یا روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند به حل مسائل با مقیاس بزرگ و تعداد زیاد بازیگران کمک کند. سوم، گسترش مدل به بازی‌های مشارکتی پویا و چندمرحله‌ای می‌تواند امکان تحلیل تغییرات ساختار ائتلاف‌ها در طول چرخه عمر پروژه را فراهم سازد. در نهایت، ادغام شاخص‌های پایداری مانند اثرات زیست‌محیطی و معیارهای اجتماعی در مدل‌های بازی مشارکتی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری جامع‌تر برای مدیریت پروژه‌های زیرساختی در محیط‌های پیچیده و نامطمئن باشد.

مراجع

1. Rouhparvar, M., Babaei, F., & Navidi, H. (2025). Cooperative game theory approach towards capital equipment procurement in construction projects: a concrete batch plant case study. *International Journal of Construction Management*, 25(8), 899-910.
2. Shehadeh, A., & Alshboul, O. (2025). Game theory integration in construction management: a comprehensive approach to cost, risk, and coordination under uncertainty. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(5), 04025039.
3. Xirouchakis, I. E. (2025). Prosumer games & contracts-A review of the economic feasibility and legal challenges of energy communities post Greek law 5037/2023 considering coalition games theory (Master's thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς).
4. Chen, R., & Yang, Z. (2022). A cooperative merging strategy for connected and automated vehicles based on game theory with transferable utility. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 19213-19223.
5. Zhang, X., Cui, W., & Li, J. (2024). A TRIPARTITE COOPERATION GAME BASED STUDY FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT AGENCIES AND CLIENTS. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 23(4).
6. Shandilya, S., Szymanski, Z., Shandilya, S. K., Izonin, I., & Singh, K. K. (2022). Modeling and comparative analysis of multi-agent cost allocation strategies using cooperative game theory for the modern electricity market. *Energies*, 15(7), 2352.

7. Yu, J., Liu, S., Zou, Y., Wang, G., & Hu, C. (2025). Auction theory and game theory based pricing of edge computing resources: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*.
8. Zheng, Y., Zhao, H., & He, C. (2022). Robust control design with optimization for uncertain mechanical systems: Fuzzy set theory and cooperative game theory. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 20(4), 1377-1392.
9. Alizadeh, A., Esfahani, M., Dinar, F., Kamwa, I., Moeini, A., Mohseni-Bonab, S. M., & Busvelle, E. (2024). A cooperative transactive multi-carrier energy control mechanism with P2P energy+ reserve trading using Nash bargaining game theory under renewables uncertainty. *Applied Energy*, 353, 122162.
10. Narbaev, T., Hazır, Ö., & Agi, M. (2022). A review of the use of game theory in project management. *Journal of management in engineering*, 38(6), 03122002.
11. Ho, E., Rajagopalan, A., Skvortsov, A., Arulampalam, S., & Piraveenan, M. (2022). Game theory in defence applications: A review. *Sensors*, 22(3), 1032.
12. Gupta, S. K., & Mishra, V. K. (2025). Sustainable competition and cooperation: a game-theoretical analysis of substitutable green products. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 16(1), 234-253.
13. Mirzaei-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2022). Evaluation of cooperative and non-cooperative game theoretic approaches for water allocation of transboundary rivers. *Scientific Reports*, 12(1), 3991.
14. Liu, Y., & Ren, J. (2022). Developing a sustainability-oriented multi-criteria game theoretical decision analysis framework: A case study of sludge management. *Journal of cleaner production*, 354, 131807.
15. Patoghi, A., & Mousavi, S. M. (2021). A new approach for material ordering and multi-mode resource constraint project scheduling problem in a multi-site context under interval-valued fuzzy uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121137.
16. Choucair, Z., Zaibidi, N. Z., & Ahmad, N. (2026). Fuzzy cooperative games with coalition values based on Gaussian fuzzy numbers and their application to energy sharing in residential communities. *International Journal of Fuzzy Systems*, 28(3), 905-919.
17. Gök, S. Z. A., Ergün, S., Kirlar, B. B., Özcan, İ., & Tayman, A. (2023). Fuzzy perspective of online games by using cryptography and cooperative game theory. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 31(06), 891-915.
18. Zhang, J., Zhang, Z., Zhang, D., Ni, C., Zhang, T., & Jiang, X. (2024). Novel approach of vehicular cooperative communication based on strategy of interval type-2 fuzzy logic and cooperative game. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 10(3), 588-600.
19. Meng, F., Li, Z., & Wang, Z. (2023). Cooperative game theory based consistency and consensus reaching process for group decision making with fuzzy preference relations. *Journal of the Operational Research Society*, 74(10), 2261-2276.