



مدرسان شریف

فصل اول

«اصول و مفاهیم مدیریت پروژه»

مقدمه

«شرکت ساختمانی برود (Broad) در سال ۲۰۱۱، یک برج مسکونی ۱۵ طبقه را ظرف ۶ شبانه‌روز در شهر «چانگشا» در جنوب شرقی چین احداث کرد. سرعت عمل احداث این سازه آنقدر بالا بوده است که بسیاری از ساکنان این شهر که تا یک هفته از محل ساخت هتل گذر نکرده بودند، با تعجب به ساختمانی نگاه کردند که تا چند روز پیش آنجا نبود! در ساخت این هتل از تکنولوژی پیشرفته فن‌آوری پیمان‌بندی (modularization) استفاده شده است. در این روش، در مصرف انرژی ساختمان تا بیشترین حد ممکن صرفه‌جویی می‌شود و ساختمان را در برابر ۹ ریشتر زلزله مقاوم می‌کند. این بالاترین میزان مقاومتی است که تاکنون یک ساختمان در برابر زلزله داشته است. پنجره‌های سه‌جداره، عایق گرما در دیوارها، سیستم بازیافت هوای گرم و رفلکس تابش خورشید ویژگی‌هایی هستند که موجب می‌شوند در این بنا تا ۸۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. در هر مترمربع از این برج ۱۵ طبقه، تنها ۵۳ کیلو فلز و ۴۳ کیلو بتن به کار رفته است، این در حالی است که در ساختمان‌های دیگر از این نوع که بدون فناوری نوین احداث شده‌اند، بیش از ۱۸۰ کیلو فلز و ۳۵۵ کیلو بتن در هر مترمربع از ساختمان به کار می‌رود. این ویژگی در کنار برخی ابتکارهای جدید دیگر از جمله پلاستیکی بودن جنس قاب پنجره‌ها موجب شده است تا ایمنی ساختمان به حداکثر ممکن برسد. جالب است که علی‌رغم سرعت بالای ساخت‌وساز، هیچ کارگری آسیب ندید، هیچ جرتقیلی در طول عملیات به سایت آورده نشد و میزان ضایعات مصالح نیز بسیار کم بوده است.»

گزارش فوق بیش از آنکه نشان‌دهنده عمق پیشرفت تکنولوژی ساخت، مصالح پیشرفته ساختمانی، استانداردهای بالا در ایمنی‌سازی ساختمان، افزایش بهره‌وری و کاهش شدید ضایعات باشد، نشان‌دهنده تبحر فوق‌العاده شرکت برود در امر برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه؛ است. به بیان دیگر، شاه‌کلید اصلی این شرکت در کسب چنین رکورد عظیمی، رعایت کامل اصول و قواعد مدیریت پروژه است.

در ادوار گذشته زندگی انسان، که پروژه‌ها به‌اندازه امروز وسیع و پیچیده نبودند، ممکن بود که صاحب پروژه، خود، همگی فعالیت‌هایی را که در اجرای پروژه لازم هستند، در فکر خود برنامه‌ریزی و مدیریت کند. امروزه نیز ممکن است در اجرای پروژه‌های کوچکی نظیر ساخت یک منزل مسکونی فعالیت لازم را بدون به‌کارگیری روش‌های تعیین‌شده و علمی در فکر، یا با نگهداری یادداشت‌های مختصر روی کاغذ، برنامه‌ریزی کرد. آن‌گونه که مشخص است با پیشرفت زمان، تقریباً انواع فعالیت‌های ساخت و تولید، یا فعالیت‌های پژوهشی و علمی در مقایسه با گذشته، در حجمی وسیع‌تر و با پیچیدگی بیشتری اجرا می‌شوند. برای برنامه‌ریزی پروژه‌هایی که به صدها و هزارها فعالیت متمایز نیاز دارند و در اجرای آنها درصد قابل توجهی از بودجه یک کشور صرف می‌شود، مسلماً کاربرد روش‌های علمی مدیریت پروژه، امری ضروری و غیرقابل اجتناب می‌باشد.

تاریخچه پیدایش مدیریت پروژه، به اوایل قرن بیستم (دهه اول) برمی‌گردد. در این سال‌ها، هنری گانت، پدر تکنیک‌های برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، با نمودار میله‌ای ابداعی خود آغازگر حرکت پرشتاب بعدی طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ شد. سال‌های دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ به‌عنوان سال‌های آغازین رشد و توسعه مدیریت پروژه در دنیای معاصر شناخته می‌شود. تقریباً غالب تکنیک‌ها و روش‌های مدیریت پروژه همچون روش مسیر بحرانی، روش نمودار پیش‌نیازی، نمودار شبکه‌ای، تسطیح منابع و روش PERT در خلال این سال‌ها ابداع و توسعه یافته‌اند و پروژه‌های بسیار بزرگی همچون پروژه فضایی آپولو و یا ساخت نیروگاه‌های اتمی نیز در این دوران اجرا شدند. در سال ۱۹۶۹، مؤسسه بین‌المللی مدیریت پروژه تاسیس شد. یکی از مهمترین دستاوردهای تاسیس این مؤسسه، تدوین استاندارد جهانی دانش مدیریت پروژه بوده است؛ از این پس بود که دگرگونی‌ها و پیشرفت‌های حوزه مدیریت پروژه، صورتی منسجم و مدون به‌خود گرفت.



تعریف پروژه

به مجموعه فعالیت‌های منحصربه‌فردی که در زمان معینی به‌منظور دستیابی به هدف مشخصی انجام می‌شود، پروژه گفته می‌شود؛ به‌عنوان مثال، اموری نظیر راه‌اندازی یک کارخانه، احداث یک سد، احداث یک نیروگاه، تشکیل یک سمینار، تالیف یک کتاب و ... مشمول تعریف پروژه می‌شوند. همچنین طراحی و تولید یک محصول جدید یا ایجاد تغییرات در محصول فعلی، پروژه تلقی می‌شود.

کدام مثال ۱: کدام یک از موارد زیر، پروژه محسوب نمی‌شود؟

- (۱) ساخت یک پالایشگاه
(۲) تولید روزانه خودرو در یک شرکت تولیدی
(۳) چاپ و نشر کتاب
(۴) طراحی سایت

پاسخ: گزینه «۲» زیرا نتیجه آن تکراری است.

لازم به ذکر است، فعالیت، کوچک‌ترین جزء تشکیل‌دهنده یک پروژه می‌باشد. چنانچه کلیه فعالیت‌های یک پروژه انجام شوند، کل آن پروژه به انجام رسیده است؛ به‌عنوان مثال، پروژه احداث یک ساختمان، شامل فعالیت‌های طراحی نقشه ساختمان، طراحی نقشه تأسیسات مکانیکی و الکتریکی، تهیه مواد ساختمانی، تهیه تأسیسات مکانیکی و الکتریکی، ساخت بنا، نصب تأسیسات مکانیکی و الکتریکی بهره‌برداری از ساختمان می‌شود. هر یک از این فعالیت‌ها می‌تواند به چند فعالیت کوچک‌تر تقسیم شود؛ مثلاً فعالیت احداث بنا می‌تواند به فعالیت‌های احداث پی، احداث اسکلت، احداث دیوارها و احداث سقف تقسیم شود. اینکه تا چه اندازه فعالیت‌ها را کوچک‌تر کنیم، به حساسیت مدیر پروژه در حیطه کنترل پروژه بستگی دارد. در هر حال، از آن‌چه گذشت می‌توان برداشت کرد که هر فعالیت به‌نوبه‌خود می‌تواند در قالب یک پروژه قرار بگیرد و لذا تمام ویژگی‌های پروژه را که در ادامه مطلب خواهد آمد، دارد.

کدام مثال ۲: بهره‌برداری از یک سد، پروژه محسوب زیرا

- (۱) می‌شود - کلیه ویژگی‌های یک پروژه را دارد.
(۲) نمی‌شود - فاقد زمان شروع و پایان مشخصی است.
(۳) نمی‌شود - فاقد هدف شفاف و روشنی است.
(۴) نمی‌شود - محصول مشخصی ندارد.

پاسخ: گزینه «۲» بهره‌برداری از یک سد، پروژه محسوب نمی‌شود؛ زیرا فاقد زمان شروع و پایان مشخصی است.

ویژگی‌های پروژه

۱- موقتی و غیرتکراری بودن

هر پروژه در زمان مشخصی آغاز می‌شود و در زمان مشخصی خاتمه می‌یابد. پروژه زمانی خاتمه می‌یابد که به اهداف (از پیش تعیین‌شده) رسیده باشد و یا هنگامی که مشخص شود اهداف پروژه قابل حصول نیستند و باید پروژه خاتمه یابد. اجرای موقتی پروژه‌ها، نه‌تنها لزوماً به معنی دوره کوتاه انجام آنها نیست، بلکه بسیاری از پروژه‌ها در طی سالیان طولانی به نتیجه می‌رسند. اما در هر حال زمان اجرای هیچ پروژه‌ای نامحدود نبوده و اجماًلاً پروژه یک تلاش مداوم نیست.

۲- منحصربه‌فرد بودن

اجرای پروژه‌ها، انجام مجموعه فعالیت‌های منحصربه‌فردی است که پیش از این انجام نشده‌اند و این نشانه یکتایی و منحصربه‌فرد بودن آنها است. پروژه تهیه و تولید یک محصول یا ارائه خدمات، اگرچه ممکن است در یک گروه مشخص (مانند طراحی نرم‌افزار) قرار گیرد، اما یکتا و منحصربه‌فرد است. پروژه‌ها با متولیان، طراحان، موقعیت‌های زمانی، مکانی، مجریان و سایر مشخصه‌های گوناگون و متفاوت از یکدیگر اجرا می‌شوند؛ لذا حتی وجوه اشتراک پروژه‌ها از برخی جهات و یا حتی همه موارد برشمرده‌شده نیز نمی‌تواند یکتایی آنها را نفی کند.

۳- تفصیل فزاینده

محصول یا نتایج پروژه‌ها یکتا و منحصربه‌فرد از آنها است و مشخصه‌های این نتایج منحصربه‌فرد باید از ابتدا تا انتها به‌طور فزاینده بسط داده شود. مفهوم فزاینده، روند صعودی مستمر و بدون بازگشت و مفهوم تفصیل، بسط توسعه‌یافته برای تکمیل تبیین می‌باشد؛ به‌عنوان نمونه در پروژه احداث یک کارخانه پتروشیمی، ابتدا مشخصه‌های فرایند کارخانه تبیین می‌شود، آن‌گاه واحدهای اصلی فرایندی با توجه به این مشخصه‌ها طراحی می‌گردد سپس این اطلاعات، مبنا و معیار مناسبی برای انجام مهندسی پروژه (اعم از طراحی مفهومی) و طراحی مشخصه‌های فرایندی و مکانیکی هر یک از دستگاه‌ها و تجهیزات می‌گردد. این تفصیل فزاینده مشخصه‌ها، در نهایت منجر به تولید نقشه‌های ساخت می‌شود.

۴- عینی بودن

پروژه برای تحقق یک نتیجه‌ی عینی انجام می‌شود که بعد از اتمام پروژه، این نتیجه در قالب یک محصول، ارائه خدمت یا تعهد باید به‌طور مشهود قابل تحویل باشد.



نکته ۱: تولید انبوه یک محصول، پروژه محسوب نمی‌شود. برای روشن شدن مطلب، فرض کنید یک شرکت تولیدی، در نظر داشته باشد محصول جدیدی را طراحی، تولید و به بازار عرضه کند. در این صورت، طراحی و تولید یک نمونه از محصول مورد نظر، یک پروژه محسوب می‌شود، اما تولید انبوه و روزانه محصول فوق، پروژه نمی‌باشد. زیرا طراحی و تولید یک نمونه از محصول، مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که یکبار انجام شده و غیرتکراری است و به همین دلیل تاریخ شروع و پایان معینی دارد، اما تولید انبوه محصول فوق، اقدامی روزانه و تکراری است و زمان شروع و پایان مشخصی ندارد.

مدیریت پروژه

مدیریت پروژه، برنامه‌ریزی و هدایت پروژه در چهارچوب زمان، هزینه و کیفیت معین به‌سوی ایجاد نتایج مشخص است. مدیریت پروژه، فعالیت‌های برنامه‌ریزی، سازمان‌دهی، کنترل و هدایت پروژه را دربرمی‌گیرد و سعی دارد تا با استفاده درست از منابع، نتایج مشخص و مورد انتظار را با هزینه توافق شده قبلی در موعد درست خود تحویل دهد؛ به‌بیان دیگر، مدیریت پروژه به‌کارگیری دانش، مهارت‌ها، ابزار و تکنیک‌های لازم در اداره جریان و اجرای فعالیت‌ها، به‌منظور رفع نیازها و انتظارات متولیان از اجرای پروژه است.

برنامه‌ریزی پروژه

به پیش‌بینی کلیه اقدامات لازم و نحوه انجام آنها برای رسیدن به هدف پروژه، برنامه‌ریزی پروژه گفته می‌شود. برنامه‌ریزی پروژه شامل سه جزء برنامه‌ریزی فعالیت‌ها، برنامه‌ریزی زمان و برنامه‌ریزی منابع است. در فصول آینده به تشریح هر یک از عناصر برنامه‌ریزی پروژه پرداخته خواهد شد.

کنترل پروژه

کنترل پروژه به‌معنای نظارت بر چگونگی انجام فعالیت‌های پروژه براساس برنامه پروژه است؛ به عبارت دیگر، نظارت بر انجام کار به‌منظور تطبیق با برنامه‌ریزی صورت‌گرفته، کنترل پروژه نامیده می‌شود.

وظایف مدیر پروژه

در هر شکلی از سازمان اجرایی پروژه، این مدیر پروژه است که به‌عنوان مسئول آن و تحویل‌دهنده کار مطرح است. در سازمان‌های پروژه‌مدار، مدیر پروژه تمام اختیارات و استقلال یک مدیر را دارد و کلیه بخش‌ها را شخصاً مدیریت می‌کند. این وضع در سازمان‌های وظیفه‌ای که بر مبنای پروژه‌ها طراحی نشده‌اند، متفاوت است و مدیر در آنها بیشتر یک هماهنگ‌کننده یا پیگیری‌کننده است.

مدیریت عمومی دربرگیرنده طیف گسترده‌ای از جنبه‌های مختلف سرپرستی فعالیت‌های مستمر است. مهارت‌های مدیریت عمومی، پایه و مبنای اصلی مهارت‌های مدیریت پروژه هستند و آگاهی کامل از آنها اغلب برای مدیران پروژه ضروریست. به‌طور کلی وظایف یک مدیر پروژه به شرح زیر است:

۱- رهبری

رهبری و مدیریت از یکدیگر متمایزند ولی نیاز توأمان به آنها در پروژه احساس می‌شود. مدیریت، توجه خاص به سازگاری بین نتایج اصلی حاصله و انتظارات متولیان و مجریان است؛ در حالی که رهبری شامل موضوعات زیر است:

- تعیین اهداف سازمانی: مشخص کردن اهداف و تبیین استراتژی دستیابی به آنها.

- همسوسازی اهداف فردی و ایجاد اهداف سازمانی.

- ایجاد انگیزش: کمک به متولیان و مجریان برای ایجاد انگیزه در آنها جهت غلبه بر مشکلات محیطی، قوانین اداری و سایر محدودیت‌های فردی.

انتظار می‌رود در پروژه‌ها، به‌خصوص پروژه‌های بزرگ، مدیر پروژه، رهبر نیز باشد. این رهبری نه‌تنها در امور پروژه، که در همه بخش‌های ارتباطی اعضای تیم پروژه جریان می‌یابد.

۲- ارتباطات

موضوع اصلی ارتباط، تبادل اطلاعات است. روش‌های ارتباطی در یک پروژه، طیف وسیعی شامل ارتباطات شفاهی، نوشتاری، شنیداری و گفتاری، رسمی و غیررسمی، داخلی و خارجی، عمودی و افقی را دربردارد. مدیر پروژه باید روش درست انتقال اطلاعات و چگونگی برقراری ارتباط در هر بخش را به‌دقت طراحی کند تا از گردش مطلوب اطلاعات در سازمان پروژه‌اش اطمینان یابد.

۳- مذاکره

مذاکره، مشاوره و رایزنی با دیگران برای کسب نتیجه و دستیابی به توافقی مشخص است. بسیاری از توافقات با حضور طرفین یا نمایندگان‌شان و با گفتگو حاصل می‌شود. میانجی‌گری، حکمیت و داوری، برخی اشکال گوناگون مذاکره هستند. مذاکرات در پروژه‌ها، به‌دفعات و در زمان‌های مختلفی انجام می‌شود.



۴- حل و فصل اختلافات

حل مشکلات پروژه، بیان مسائل روزمره و اخذ تصمیم است. حل مشکلات نیاز به ریشه‌یابی آنها و یافتن علت و معلول‌ها دارد. حل و فصل مشکلات، شامل تجزیه و تحلیل مسأله و تعیین راه‌حل‌های مناسب و سپس انتخاب یکی از آنان، از فعالیت‌های مهم مدیریت است. تصمیمات باید به‌موقع اتخاذ شوند و اجرای آنها به‌دقت پیگیری شود.

۵- تأثیر بر سازمان

توانایی سازمان، قابلیت انجام به‌موقع امور است. برای ایجاد این قابلیت باید هماهنگی مناسبی بین اجزای سازمان برقرار شود و تصمیمات اتخاذ شده مدیر به‌درستی توسط افراد اجرا شود؛ این‌جاست که مدیران به هنر اقتدار و علم سیاست نیاز دارند تا از طریق نفوذ بر افراد، توانایی‌های سازمان در اجرای به‌موقع تصمیمات را افزایش دهند.

استاندارد مدیریت پروژه

با گسترش حوزه تجاری شرکت‌ها و جهانی‌شدن پروژه‌ها، امروزه استفاده از استانداردها برای هم‌زمانی افراد درگیر در پروژه و اطمینان از اجرای درست کار ضروری است. استانداردها، علاوه بر تبیین کار و تعیین چگونگی اجرای صحیح عملیات، به‌عنوان مرجعی برای افراد گروه پروژه در اختلافات مطرح هستند. قوت استانداردها در جامع‌بودن آنها، سادگی، مقبولیت عام استفاده‌کنندگان و تضمین آن‌ها برای اجرای درست کار است. مؤسسات و کشورهای گوناگونی به تدوین استانداردهای مخصوص خود در زمینه مدیریت پروژه اقدام کرده‌اند، اما در این میان، استاندارد PMBOK، اهمیت و مقبولیت بیشتری دارد. این استاندارد در انجمن مدیریت پروژه آمریکا (PMI) تدوین شده و استفاده از آن بسیار متداول است. پس از تدوین PMBOK، مؤسسه ملی استاندارد آمریکا نیز آن را تأیید و به‌عنوان استاندارد ملی آمریکا (ANSI 99-001-2000) در زمینه مدیریت پروژه ثبت کرده است. در این میان، تفاوت‌های اندکی بین دو نسخه‌ی مؤسسه‌ی PMI و مؤسسه‌ی استاندارد وجود دارد. استاندارد PMBOK نگاهی نظری و استاندارد ANSI 99-001-2000 نگاهی اجرایی‌تر دارد. استاندارد PMBOK همانند سایر استانداردها، هر سال توسط هیات منتخبی از PMI بازبینی می‌شود و در صورت نیاز به تغییر، ویرایش جدیدی از آن به اطلاع اعضای PMI می‌رسد. در استاندارد PMBOK، دانش مدیریت پروژه در ۹ بخش بیان شده است:



بخش اول: شبکه برداری فعالیت‌ها

مقدمه

همان‌گونه که در مقدمه فصل نیز گفته شد، روش برنامه‌ریزی شبکه‌ای، متداول‌ترین روش برنامه‌ریزی پروژه می‌باشد. در این روش، ابتدا فعالیت‌های پروژه بر مبنای روش ساختار شکست کار (WBS)، شناسایی می‌شوند، سپس روابط بین این فعالیت‌ها (از نوع پیش‌نیازی و پس‌نیازی) تعیین می‌شود و در انتها، شبکه برداری مربوطه، بر مبنای یک سری قوانین مشخص رسم می‌گردد. به‌طور کلی فرایند برنامه‌ریزی شبکه فعالیت‌ها شامل سه گام می‌شود:

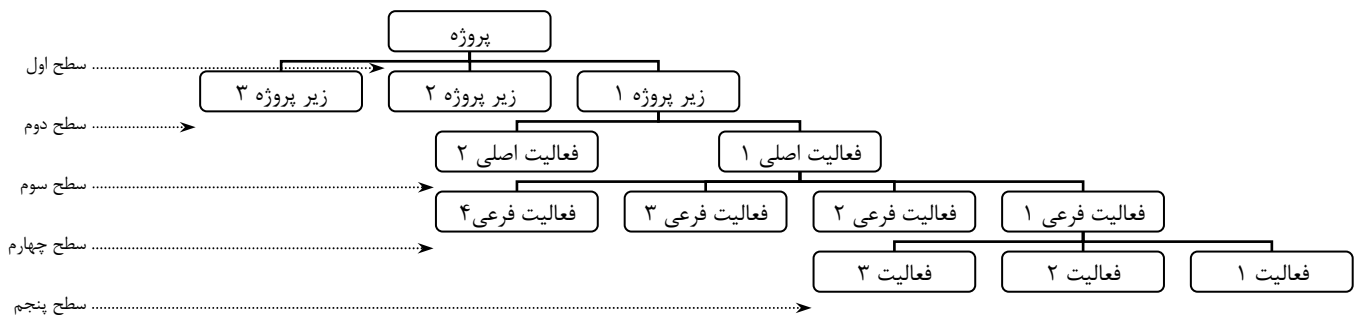
گام اول: شناسایی و تعیین فعالیت‌ها. در این گام، با به‌کارگیری روش ساختار شکست کار (WBS)، پروژه در طی چند مرحله به چند جزء کوچک‌تر تقسیم می‌شود که به هریک از آنها فعالیت گفته می‌شود.

گام دوم: تعیین روابط وابستگی بین فعالیت‌ها. در این گام، وابستگی بین فعالیت‌ها (روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی) تعیین می‌شود.

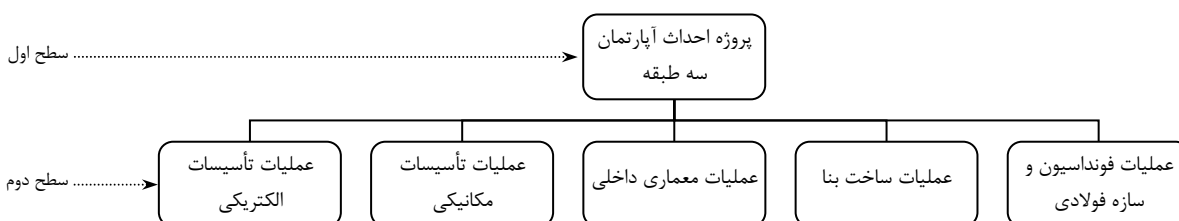
گام سوم: رسم شبکه برداری فعالیت‌ها (AOA). در این گام، بر اساس یک سری قوانین مشخص، شبکه برداری فعالیت‌ها رسم می‌شود. این شبکه روابط وابستگی بین فعالیت‌ها را به بهترین وجه نمایش می‌دهد.

ساختار شکست کار (WBS)

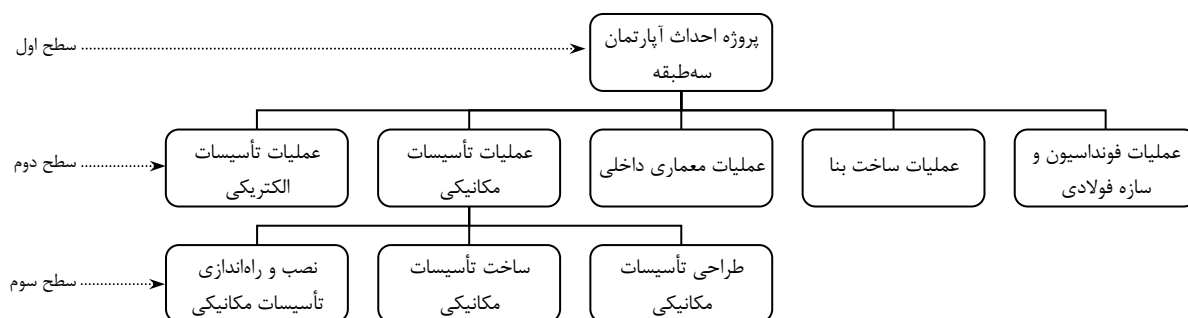
اولین قدم در برنامه‌ریزی شبکه فعالیت‌ها، شناسایی و تعیین فعالیت‌ها می‌باشد که بر پایه روش ساختار شکست کار (WBS) انجام می‌گیرد. در این روش، پروژه به صورت مرحله‌به‌مرحله و به تدریج به اجزای کوچک‌تر تقسیم می‌شود تا اینکه به کوچک‌ترین حد قابل کنترل (که اصطلاحاً فعالیت نامیده می‌شود)، برسد. به بیان دیگر، در این روش، پروژه به صورت سلسله‌مراتبی با توجه به اندازه پروژه به ترتیب زیر به سطوح مختلف تقسیم می‌شود: در سطح اول، پروژه قرار می‌گیرد که به چندین زیرپروژه در سطح دوم شکسته می‌شود، سپس هر زیرپروژه به چندین فعالیت اصلی در سطح سوم تقسیم می‌گردد. هریک از فعالیت‌های اصلی، به نوبه خود به تعدادی فعالیت‌های فرعی در سطح چهارم تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی تا حدی ادامه می‌یابد که فعالیت‌های ایجاد شده در آخرین سطح، معنی و مفهوم اجرایی و عملیاتی داشته باشند.



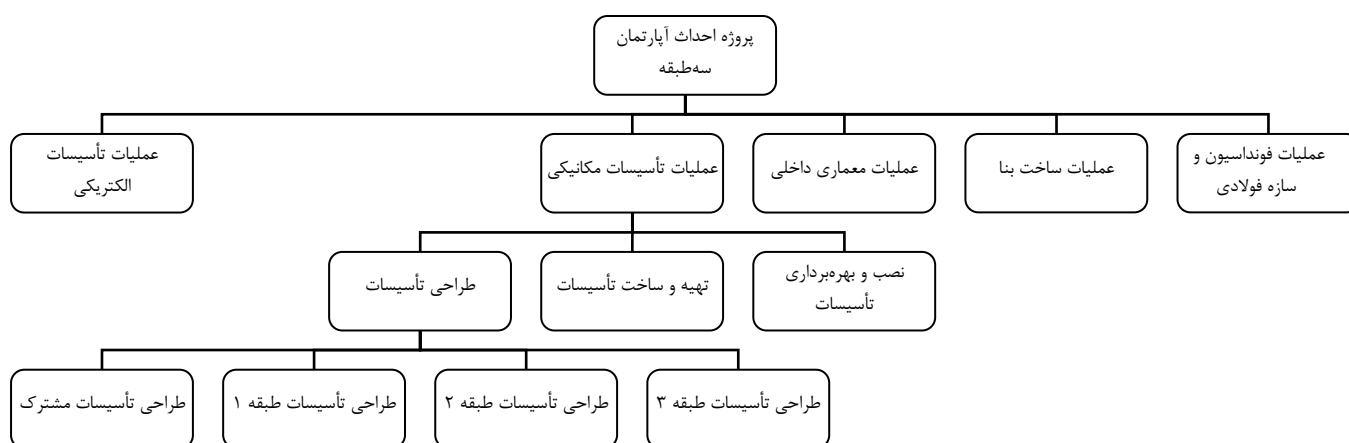
مثال ۳: با استفاده از روش ساختار شکست کار (WBS)، فعالیت‌های پروژه «احداث آپارتمان سه طبقه» به ترتیب زیر شناسایی و تعیین می‌شود. در سطح ۱، پروژه «احداث آپارتمان سه طبقه» قرار می‌گیرد که به پنج عملیات عمده (شامل: فونداسیون، ساخت بنا، معماری داخلی، تأسیسات مکانیکی و تأسیسات الکتریکی) در سطح دوم شکسته می‌شود:



هریک از عملیات‌های فوق در سطح دوم، بزرگ می‌باشد و بهتر است به فعالیت‌های کوچک‌تری تجزیه شود. به عنوان مثال، عملیات «تأسیسات مکانیکی» را می‌توان به فعالیت‌های اصلی طراحی، ساخت و نصب و راه‌اندازی تجزیه کرد. لذا با تقسیم هریک از عملیات‌های سطح دوم به چند فعالیت اصلی در سطح سوم، نمودار WBS به صورت زیر در می‌آید:



در مرحله بعد، فعالیت‌های اصلی سطح سوم را به فعالیت‌های کوچک‌تری در سطح چهارم تجزیه می‌کنیم. مثلاً، فعالیت اصلی «طراحی تأسیسات مکانیکی» به چهار فعالیت طراحی تأسیسات مکانیکی مشترک، طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه اول، طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه دوم و طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه سوم تقسیم می‌شود:



این تقسیم‌بندی می‌تواند باز هم ادامه پیدا کند و سطوح پنجم، ششم و ... نیز با فعالیت‌های کوچک و کوچک‌تر ایجاد شود. تصمیم‌گیری راجع به اینکه عمل تجزیه تا چند مرحله انجام شود و فعالیت‌ها تا چه حد کوچک شوند، به اندازه پروژه و دقت موردنظر مدیر پروژه بستگی دارد.

نکته ۶: **تعریف فعالیت در ساختار WBS:** کوچک‌ترین واحد کنترل در نمودار WBS است که:

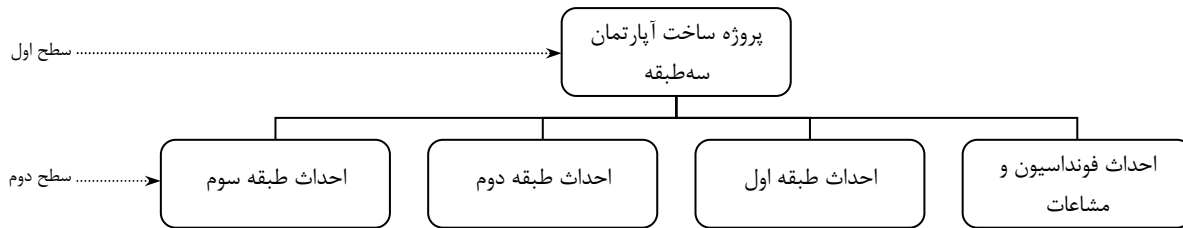
- سطح بعدی ندارد.
- حتماً دارای زمان است.
- معمولاً به منابع و هزینه نیاز دارد.
- یک نقطه‌ی شروع و یک نقطه‌ی پایان قابل تعریف دارد.

به بیان ساده‌تر، فعالیت‌ها در WBS، آخرین باکس‌ها در هر شاخه هستند که به سطح بعدی گسترش نیافته‌اند.

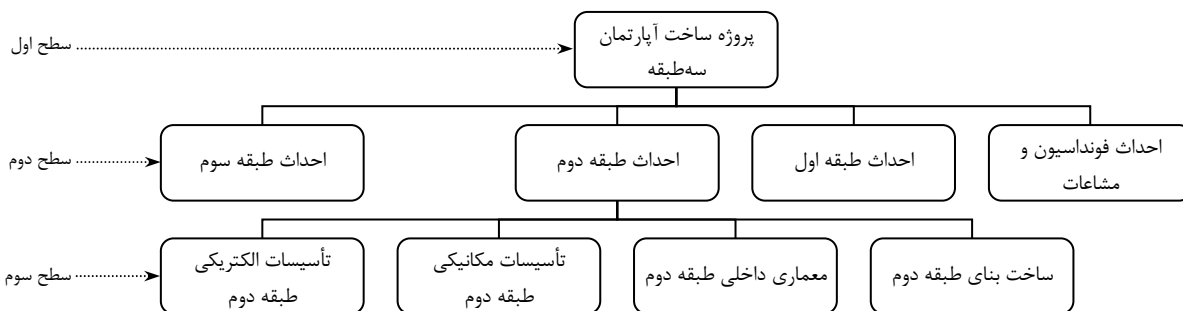
در این مثال، عمل تجزیه فعالیت‌ها را در سطح چهارم متوقف می‌کنیم. همان‌طور که قبلاً گفته شد، فعالیت‌های آخرین سطح نمودار WBS، به‌عنوان فعالیت‌های پروژه به‌منظور برنامه‌ریزی زمان و منابع مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا در این مثال نیز فعالیت‌های سطح چهارم نمودار فوق را به‌عنوان فعالیت‌های پروژه در نظر می‌گیریم و مدت زمان لازم و منابع موردنیاز برای انجام هر یک از آنها را برآورد می‌کنیم.

عموماً، روش ساختار شکست کار (WBS)، براساس دو عامل محصول و عملیات و یا ترکیبی از این دو مورد استفاده قرار می‌گیرد. می‌دانیم که هر پروژه به یک محصول مشخص منجر می‌شود و به‌منظور دستیابی به آن محصول، باید عملیات مشخصی انجام شود؛ مثلاً محصول پروژه «احداث آپارتمان سه‌طبقه» بدهاتاً، «آپارتمان سه‌طبقه» است و برای کسب نتیجه، باید یک سلسله عملیات ساخت‌وساز عمرانی انجام شود. در مثال فوق، فعالیت‌های پروژه براساس عملیات‌های کاری، مشخص شدند. به عبارت دیگر، پروژه در سطح اول براساس عملیات‌های کاری به پنج عملیات عمده (شامل فونداسیون، ساخت بنا، معماری داخلی، تأسیسات مکانیکی و تأسیسات الکتریکی) در سطح دوم تجزیه شد. همچنین، هر یک از عملیات‌های فوق‌الذکر در سطح دوم باز هم براساس عملیات‌های کاری به چندین فعالیت اصلی در سطح سوم تقسیم شدند؛ به‌عنوان مثال، عملیات «تأسیسات مکانیکی» به فعالیت‌های اصلی طراحی، ساخت و نصب و راه‌اندازی تجزیه شد که هر یک از این فعالیت‌های اصلی از نوع عملیات‌های کاری است، اما فعالیت‌های اصلی در سطح سوم براساس محصول به چندین فعالیت در سطح چهارم تقسیم گردید؛ مثلاً فعالیت اصلی «طراحی تأسیسات مکانیکی» به چهار فعالیت طراحی تأسیسات مکانیکی مشترک، طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه اول، طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه دوم و طراحی تأسیسات مکانیکی طبقه سوم تقسیم شد که همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این فعالیت‌ها براساس ویژگی محصول (طبقات ساختمانی) تجزیه شده‌اند. برای روشن شدن موضوع، پروژه «احداث آپارتمان سه‌طبقه» را براساس محصول

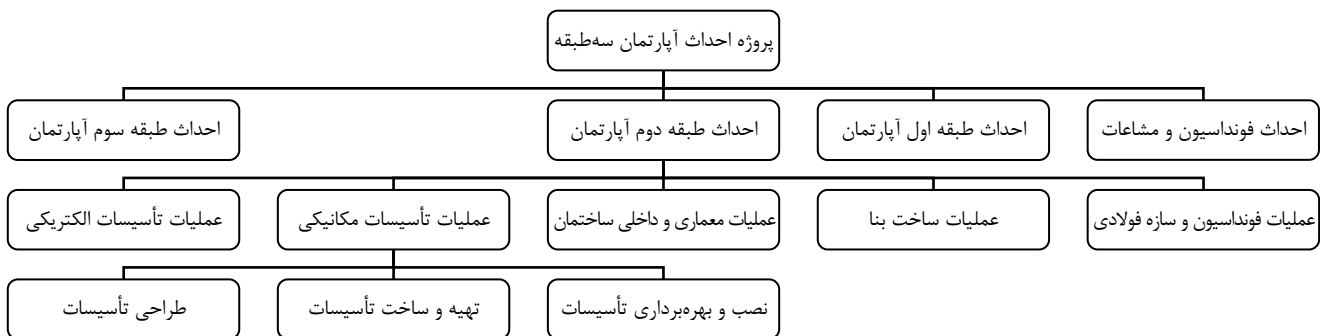
تجزیه می‌کنیم. برای این منظور، در سطح ۱، پروژه «احداث آپارتمان سه‌طبقه» قرار می‌گیرد که براساس محصول، به پنج فعالیت عمده (شامل احداث طبقه اول، احداث طبقه دوم، احداث طبقه سوم و احداث فونداسیون و مشاعات) در سطح دوم شکسته می‌شود:



هریک از فعالیت‌های فوق در سطح دوم، براساس عملیات به فعالیت‌های کوچک‌تری در سطح سوم تجزیه می‌شود؛ به‌عنوان مثال، فعالیت عمده «احداث طبقه دوم» به پنج فعالیت اصلی (شامل ساخت بنای طبقه دوم، معماری داخلی طبقه دوم، تأسیسات مکانیکی طبقه دوم و تأسیسات الکتریکی طبقه دوم) در سطح سوم تجزیه می‌شود. لذا نمودار WBS به‌صورت زیر درمی‌آید:



در مرحله بعد، فعالیت‌های اصلی سطح سوم به فعالیت‌های کوچک‌تری در سطح چهارم تقسیم می‌شوند؛ مثلاً، فعالیت اصلی «تأسیسات مکانیکی طبقه دوم» را به سه فعالیت طراحی، ساخت و نصب و راه‌اندازی تقسیم می‌کنیم. سایر فعالیت‌های این سطح نیز به‌همین ترتیب به فعالیت‌های کوچک‌تر در سطح چهارم تجزیه می‌شود:



عمل تجزیه فعالیت‌ها را در همین سطح (سطح چهارم) متوقف می‌کنیم و فعالیت‌های آن، به‌عنوان فعالیت‌های پروژه به‌منظور برنامه‌ریزی زمان و منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته ۷: مهم‌ترین ویژگی ساختار شکست کار (WBS)، حداقل‌سازی فراموش شدن کارهای پروژه می‌باشد؛ زیرا در این روش کلیه فعالیت‌های موردنیاز پروژه به‌صورت منطقی و مرتبط شناسایی می‌شوند.

نکته ۸: فعالیت‌های آخرین سطح نمودار WBS، به‌منظور برنامه‌ریزی هزینه، زمان و ... پروژه استفاده می‌شود و سایر باکس‌های سطوح دیگر، به‌منظور کنترل پروژه در سطح کلی‌تر کاربرد دارد.

نکته ۹: روابط پیش‌نیازی به‌هیچ‌عنوان در WBS، نمایش داده نمی‌شوند و در شکست WBS بی‌تأثیراند.

نکته ۱۰: در نمودار WBS لازم است نام باکس‌ها منحصر به فرد باشند و از تکرار پرهیز شود.

نکته ۱۱: نظارت بر انجام هر فعالیت به‌صرف زمان و هزینه (هر چند اندک) نیاز دارد. هرچه تعداد سطوح WBS بیشتر باشد، تعداد فعالیت‌های ایجاد شده در سطح آخر WBS بیشتر و اندازه آنها کوچک‌تر خواهد بود. لذا، با افزایش تعداد فعالیت‌ها، زمان و هزینه نظارت بر انجام آنها نیز بیشتر می‌شود.



پس می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش تعداد سطوح WBS، هزینه کنترل فعالیت‌ها نیز افزایش می‌یابد. لذا این افزایش سطوح تا اندازه مشخصی اقتصادی است؛ به عبارت دیگر، فقط تا سطح معینی می‌توان یک فعالیت را تحت ساختار WBS تجزیه کرد. فعالیت‌های ایجاد شده در این سطح را اصطلاحاً «قابل کنترل» می‌گویند؛ مثلاً در پروژه «احداث ساختمان»، «بستن یکی از پیچ‌های سیستم تهویه هوای ساختمان» را نیز می‌توان یک فعالیت به‌شمار آورد، اما این فعالیت قابل کنترل نیست؛ زیرا کنترل این فعالیت (نظارت بر انجام این فعالیت) نیازمند صرف وقت و هزینه می‌باشد که بدهاتاً در حد و اندازه پروژه «احداث ساختمان» به‌صرفه و اقتصادی نمی‌باشد. روابط وابستگی نیز تنها بین فعالیت‌ها بررسی می‌شود، نه باکس‌های سطوح دیگر.

کلمه مثال ۴: نمودار WBS هر پروژه چند سطح دارد؟

(۱) بستگی به اندازه پروژه و سطح کنترل مورد انتظار دارد. (۲) ۵

(۳) ۴ (۴) ۱۰

پاسخ: گزینه «۱» دقت کنید که معمولاً این نمودار به ۴ و یا ۵ سطح شکسته می‌شود، ولی لزوماً این تعداد سطوح برای هر پروژه کافی نیست.

نکته ۱۲: هر فعالیت به‌نوبه خود یک پروژه است و برعکس.

نکته ۱۳: تعداد سطوح ایجاد شده در هر شاخه از نمودار WBS، لزوماً با تعداد سطوح شاخه دیگر برابر نیست.

کلمه مثال ۵: تعداد فعالیت‌های هر یک از شاخه‌های نمودار WBS ... است.

(۱) برابر (۲) بستگی به نوع و طبیعت پروژه دارد.

(۳) بستگی به تعداد سطوح نمودار WBS دارد. (۴) از شاخه‌های دیگر مستقل می‌باشد.

پاسخ: گزینه «۴» هر یک از شاخه‌های نمودار WBS دارای تعداد مشخصی فعالیت نیست که بتوان آنرا با تعداد فعالیت‌های شاخه دیگر مقایسه نمود. اساساً چون تعداد فعالیت‌های هر شاخه از یکدیگر مستقلند، لذا این مسأله به نوع و طبیعت پروژه بستگی نداشته (لذا گزینه ۲ اشتباه است) و ارتباطی نیز به تعداد سطوح نمودار WBS ندارد. (گزینه ۳ اشتباه است).

تعیین روابط بین فعالیت‌ها (روابط پیش‌نیازی و پس‌نیازی)

دومین مرحله برنامه‌ریزی شبکه فعالیت‌ها، تعیین روابط بین فعالیت‌ها می‌باشد. معمولاً اکثر فعالیت‌های یک پروژه با یکدیگر رابطه داشته و انجام آنها به یکدیگر وابسته است. بدین صورت که تا یک فعالیت انجام نشود، فعالیت دیگری نمی‌تواند شروع شود. هر فعالیت براساس نوع رابطه‌اش با دیگر فعالیت‌ها، دو حالت بخود می‌گیرد: فعالیت پیش‌نیاز و فعالیت پس‌نیاز.

فعالیت پیش‌نیاز، به فعالیتی گفته می‌شود که تا انجام نشود، نمی‌توان فعالیت‌های بعد از آن را انجام داد. و فعالیت پس‌نیاز به فعالیتی گفته می‌شود که بعد از انجام فعالیت‌های قبل از آن می‌تواند شروع شود. به عبارت دیگر در صورتی فعالیت A را پیش‌نیاز فعالیت B می‌گویند که بلافاصله بعد از انجام فعالیت A، فعالیت B بتواند شروع شود. از طرفی، فعالیت B را نیز پس‌نیاز فعالیت A می‌گویند. زیرا برای شروع فعالیت B باید فعالیت A انجام شده باشد.

از جمله متداول‌ترین فعالیت‌های پیش‌نیازی و پس‌نیازی، می‌توان به رابطه بین دروس دانشگاهی اشاره کرد. به‌عنوان مثال، درس «ریاضی ۱» پیش‌نیاز درس «ریاضی ۲» می‌باشد؛ یعنی تا درس «ریاضی ۱» گذرانده نشود، نمی‌توان درس «ریاضی ۲» را اخذ نمود. برعکس، درس «ریاضی ۲» پس‌نیاز درس «ریاضی ۱» می‌باشد. یعنی اخذ درس «ریاضی ۲»، منوط به گذراندن درس «ریاضی ۱» می‌باشد.

به‌عنوان مثال، در جدول زیر روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های یک پروژه آورده شده است.

کد فعالیت	فعالیت پیش‌نیاز
A	-
B	-
C	B
D	C
E	A, D
F	C

براساس این جدول، روابط پس‌نیازی پروژه مذکور استخراج و در جدول زیر درج شده است. به‌عنوان مثال، همان‌طور که در جدول فوق دیده می‌شود، فعالیت A، پیش‌نیاز فعالیت E، می‌باشد. لذا فعالیت E، پس‌نیاز فعالیت A می‌باشد. و نام آن در ستون «فعالیت‌های پس‌نیازی» مقابل نام فعالیت A درج می‌شود.



کد فعالیت	فعالیت پیش‌نیاز	فعالیت پس‌نیاز
A	-	E
B	-	C
C	B	F, D
D	C	E
E	A, D	
F	C	

به‌همین ترتیب، چون فعالیت C، پیش‌نیاز فعالیت‌های D و F می‌باشد، فعالیت‌های D و F پس‌نیاز فعالیت C است و لذا نام آنها را در ستون «فعالیت‌های پس‌نیازی» مقابل نام فعالیت B درج می‌کنیم. از سویی، فعالیت‌های E و F، پیش‌نیاز هیچ فعالیتی نیستند و در جلوی نام آنها در ستون فعالیت‌های پس‌نیازی، هیچ فعالیتی درج نمی‌شود.

نکته ۱۴: روابط پیش‌نیازی (و به‌طور کلی وابستگی) بین فعالیت‌ها توسط تیمی از مدیران و کارشناسان با تجربه در زمینه پروژه تعیین می‌شود.

مثال ۶: براساس جدول زیر که نشان‌دهنده روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌های یک پروژه می‌باشد، تعداد گره‌ها در شبکه متناظر برابر است با؟

کد فعالیت	فعالیت پیش‌نیاز
A	-
B	A
C	A
D	B, C
E	D
F	B, C
G	E, F
H	G

۶ (۴)

۹ (۳)

۷ (۲)

۸ (۱)

پاسخ: گزینه «۱» چنانچه براساس قواعد رسم شبکه و اطلاعات جدول فوق، شبکه را رسم کنیم، تعداد گره‌های آن ۸ می‌شود.

انواع وابستگی

وابستگی‌های بین فعالیت‌ها از یک لحاظ به دو دسته تقسیم می‌شود: وابستگی‌های طبیعی و وابستگی‌های امکاناتی. وابستگی‌های طبیعی به علت خواص ویژه فعالیت‌ها، ارتباطات منطقی و تکنولوژی، بین فعالیت‌ها ایجاد می‌شوند؛ برای مثال در یک ساختمان «نصب اسکلت فلزی» وابسته به «تکمیل یا ساخت فونداسیون‌ها» می‌باشد. در این‌جا بین این دو فعالیت وابستگی طبیعی وجود دارد. وابستگی‌های امکاناتی: به علت محدودیت امکانات (منابع) ایجاد می‌شوند و با رفع محدودیت امکانات (منابع)، این وابستگی از بین می‌رود.

مثال ۷: با در نظر گرفتن دو فعالیت زیر، کدام‌یک از گزینه‌های زیر صحیح است؟

فعالیت A: تهیه مصالح فعالیت B: احداث ساختمان

(۲) فعالیت A وابستگی طبیعی به فعالیت B دارد.

(۱) فعالیت A وابستگی امکاناتی به فعالیت B دارد.

(۴) گزینه‌های ۱ و ۲

(۳) این دو فعالیت از یکدیگر مستقل‌اند.

پاسخ: گزینه «۲» بدیهی است برای احداث ساختمان، لازم است مصالح تهیه شود. لذا وابستگی این دو ربطی به امکانات ندارد. به عبارتی دیگر با داشتن امکانات نمی‌توان فعالیت B را زودتر از فعالیت A انجام داد.

نکته ۱۵: در رسم نمودارهای پروژه، وابستگی‌های امکاناتی در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه این وابستگی‌ها در مرحله تخصیص منابع خود را نشان می‌دهند.

ترسیم شبکه برداری فعالیت‌ها (AOA)

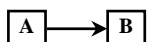
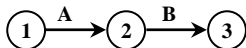
براساس روش ساختار شکست کار (WBS)، پروژه طی چند مرحله به اجزای کوچک‌تر تجزیه می‌شود و فعالیت‌های آخرین سطح نمودار WBS، به‌عنوان فعالیت‌های پروژه به‌منظور برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شوند، سپس روابط بین فعالیت‌ها براساس وابستگی‌های پیش‌نیازی تعیین می‌شود. سومین مرحله برنامه‌ریزی فعالیت‌ها، ترسیم روابط بین فعالیت‌ها می‌باشد. یکی از متداول‌ترین روش‌های ترسیم روابط بین فعالیت‌ها، شبکه برداری (AOA) می‌باشد. شبکه، نمایش گرافیکی یک پروژه است که روابط بین فعالیت‌های آن را نشان می‌دهد. در این نمایش گرافیکی، هر فعالیت با یک بردار به شکل روبه‌رو نشان داده می‌شود. (شکل ظاهری بردار از جمله طول، پهنا، زاویه و ... ارزش و معنی خاصی ندارد).



بخش سوم : شبکه گرهی (AON)

مقدمه

شبکه، نمایش گرافیکی یک پروژه است که روابط بین فعالیت‌های آن را نشان می‌دهد. در بخش دوم، نوعی از شبکه تحت‌عنوان شبکه برداری (AOA) معرفی شد. در شبکه برداری، هر فعالیت با یک بردار نشان داده می‌شود و از گره برای نمایش ابتدا و انتهای بردار استفاده می‌شود. در شکل روبه‌رو، دو فعالیت A و B به‌صورت شبکه برداری رسم شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، فعالیت A، پیش‌نیاز فعالیت B می‌باشد.



در این بخش، با نوع دیگری از شبکه با نام شبکه گرهی (AON) آشنا می‌شویم که در آن، هر فعالیت با یک گره (به‌شکل مستطیل) نمایش داده می‌شود و از بردار برای نمایش ارتباط بین فعالیت‌ها استفاده می‌کنیم. در شکل روبه‌رو، فعالیت A و فعالیت B به‌صورت گره (به‌شکل مستطیل) رسم شده است و برای نشان دادن این که فعالیت A پیش‌نیاز فعالیت B می‌باشد، یک بردار از گره A به گره B رسم شده است.

نکته ۳۴: در شبکه گرهی، تعداد گره‌ها با تعداد فعالیت‌ها برابر است ولی در شبکه برداری، تعداد بردارها با تعداد فعالیت‌ها برابر است.

مثال ۱۷: کدام گزینه صحیح است؟

- (۱) در شبکه برداری فعالیت‌ها به‌صورت گره نشان داده می‌شوند. (۲) در شبکه گرهی فعالیت‌ها به‌صورت بردار نشان داده می‌شوند.
 (۳) در شبکه گرهی روابط بین فعالیت‌ها به‌صورت بردار نشان داده می‌شوند. (۴) گزینه‌های ۱ و ۲

پاسخ: گزینه «۳» در شبکه‌های برداری، فعالیت‌ها به‌صورت بردار نشان داده می‌شوند و از گره برای نمایش ابتدا و انتهای بردار استفاده می‌شود. در شبکه‌های گرهی، فعالیت‌ها به‌صورت گره نشان داده می‌شوند و بردارها نشان‌دهنده روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها می‌باشد.

مقایسه‌ی شبکه‌های برداری و شبکه‌های گره

به‌طور کلی، شبکه‌های گره‌ای در موارد زیر با شبکه‌های برداری تفاوت دارند:

- (۱) در شبکه‌های گره‌ای فعالیت‌ها را با گره نمایش می‌دهیم، ولی در شبکه‌های برداری هر فعالیت با بردار نشان داده می‌شود و هر گره فقط نشان‌دهنده یک مقطع می‌باشد.
 (۲) بردارهای مجازی که در شبکه‌های برداری (AOA) وجود داشت، در شبکه‌های گره‌ای ظاهر نمی‌شوند و نیازی به آن‌ها نمی‌باشد.
 (۳) شبکه‌های گره‌ای، به‌خاطر ساده بودن رسم و فهم آن‌ها نسبت به شبکه‌های برداری برتری دارند، ولی سادگی محاسبات و قدرت محاسباتی در شبکه‌های برداری از شبکه‌های گره‌ای بیشتر است.
 (۴) تنوع روابط وابستگی در شبکه‌های گره‌ای نسبت به شبکه‌های برداری بیشتر است و این موضوع از مزایای شبکه‌های گره‌ای می‌باشد.

نحوه رسم شبکه گرهی (AON)

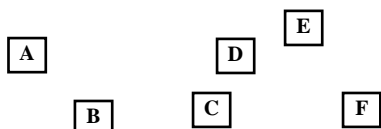
در این قسمت، نحوه رسم شبکه گرهی (AON) را با استفاده از یک مثال توضیح خواهیم داد. برای این منظور فرض کنید روابط بین فعالیت‌های یک پروژه مطابق جدول زیر می‌باشد.

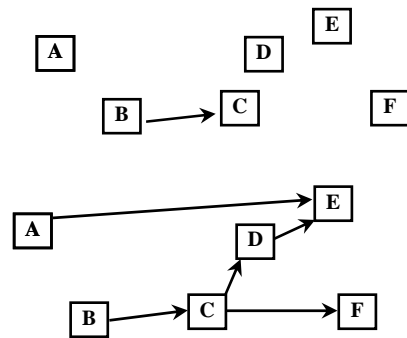
کد فعالیت	فعالیت پیش‌نیاز
A	-
B	-
C	B
D	C
E	A, D
F	C

جدول ۱

برای رسم شبکه گرهی، مطابق گام‌های زیر عمل می‌کنیم:

گام اول: کلیه فعالیت‌ها را به‌صورت گره (به‌شکل مستطیل) رسم می‌کنیم که ماحصل آن چنین می‌شود:

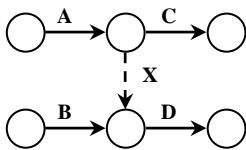




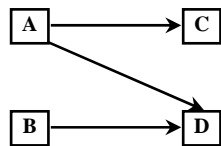
گام دوم: براساس روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها، گره‌هایی را که رابطه پیش‌نیازی با یکدیگر دارند، با بردار به هم وصل می‌کنیم. براساس روابط پیش‌نیازی مندرج در جدول ۱، فعالیت B، پیش‌نیاز فعالیت C می‌باشد. لذا بین این دو گره در شکل روبه‌رو، یک بردار رسم می‌کنیم.

به‌همین ترتیب، براساس روابط پیش‌نیازی مندرج در (جدول ۱)، شبکه گرهی به‌صورت شکل روبه‌رو رسم می‌شود:

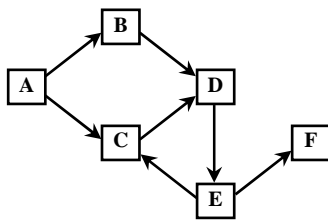
نکته ۳۵: تعداد گره‌های آغازین و پایانی در شبکه گرهی منحصربه‌فرد نمی‌باشد، به‌عنوان مثال، شبکه گرهی بالا دارای دو گره آغازین A و B می‌باشد.



نکته ۳۶: شبکه گرهی نیازی به ترسیم بردار موهومی ندارد، به‌عنوان مثال، شبکه‌برداری روبه‌رو را در نظر بگیرید. در این شبکه، بردار موهومی X در رسم شبکه به‌کارگیری شده است.

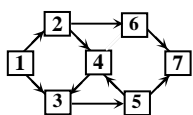


اما شبکه گرهی متناظر این شبکه برداری (شکل روبه‌رو) نیازی به بردار موهومی ندارد.

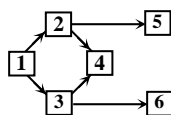


نکته ۳۷: ایجاد حلقه در شبکه گرهی مجاز نیست. در شبکه روبه‌رو حلقه C-D-E مجاز نیست و نشان‌دهنده اشتباه در رسم شبکه می‌باشد.

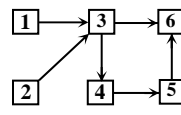
مثال ۱۸: کدام‌یک از شبکه‌های زیر نادرست رسم شده است؟



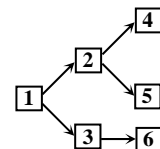
(۴)



(۳)



(۲)



(۱)

پاسخ: گزینه «۴» به‌دلیل وجود حلقه ۴ - ۵ - ۳ در گزینه (۴).

برنامه‌ریزی زمان

برنامه‌ریزی زمان شبکه‌های گرهی، شامل محاسبه زودترین و دیرترین زمان و زمان شناوری مشابه برنامه‌ریزی زمان شبکه‌های برداری می‌باشد. در ادامه این مطلب، نحوه محاسبات زمان‌بندی شبکه گرهی را به‌طور دقیق بیان خواهیم کرد. به‌منظور نمایش بهتر محاسبات زمان در شبکه گرهی، از گره نمونه در شکل مقابل می‌توان استفاده کرد. در این گره، مقادیر زودترین زمان‌های شروع و پایان، دیرترین زمان‌های شروع و پایان و زمان شناوری درج شده است.

کد فعالیت		
ES	D	EF
LS	TF	LF

حرکت رفت

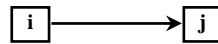
این روش، از اولین گره شبکه آغاز می‌شود و گره به گره، به سمت آخرین گره شبکه پیش می‌رود. این روش، براساس گام‌های زیر زودترین زمان شروع هریک از گره‌های شبکه را محاسبه می‌کند:



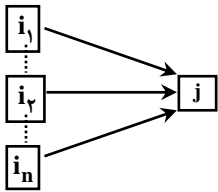
گام ۱. زودترین زمان شروع اولین گره شبکه، لحظه صفر است. لذا: $E_1 = 0$

گام ۲. اگر به گره j همانند شکل زیر، فقط یک بردار وارد شده باشد، آن‌گاه زودترین زمان شروع گره j برابر است با مجموع مقادیر زودترین زمان شروع و

$$ES_j = ES_i + D_i$$



زمان اجرای گره i به عبارت دیگر:

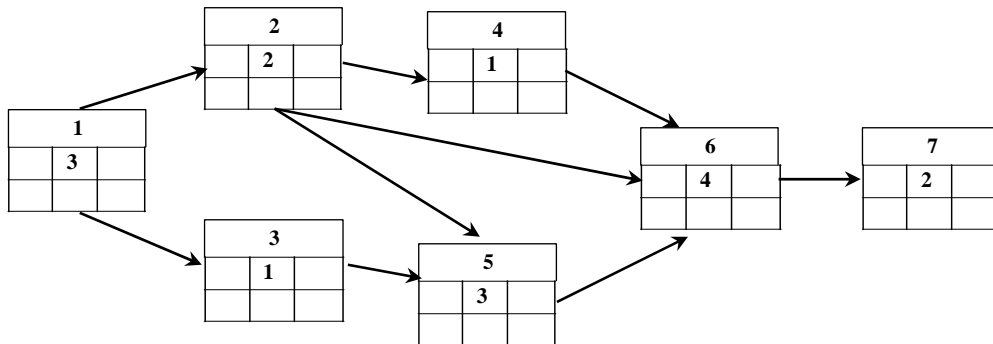


اما اگر به گره j همانند شکل روبه‌رو، چند بردار وارد شده باشد، آن‌گاه زودترین زمان شروع گره j

برابر است با حداکثر مقادیر مجموع زودترین زمان شروع و زمان اجرای گره‌های i به عبارت دیگر:

$$ES_j = \max \begin{cases} ES_{i_1} + D_{i_1} \\ \vdots \\ ES_{i_n} + D_{i_n} \end{cases} \quad \forall j$$

مثال ۱۹: شبکه زیر را در نظر بگیرید. زودترین زمان شروع هر یک از گره‌های آن به صورت زیر محاسبه می‌شود.



زودترین زمان شروع گره ۱، برابر صفر است؛ زیرا اولین گره شبکه است. $E_1 = 0$

گره‌های ۲، ۳ و ۴ فقط یک بردار به آن‌ها وارد شده است و لذا مقدار زودترین زمان شروع آنها براساس رابطه روبه‌رو محاسبه می‌شود: $ES_j = ES_i + D_i$

زودترین زمان شروع گره ۲، برابر است با مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۱ که حاصل آن ۳ می‌شود. $ES_2 = ES_1 + D_1 = 0 + 3 = 3$

زودترین زمان شروع گره ۳، برابر است با مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۱ که حاصل آن ۳ می‌شود. $ES_3 = ES_1 + D_1 = 0 + 3 = 3$

زودترین زمان شروع گره ۴، برابر است با مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۲ که حاصل آن ۵ می‌شود. $ES_4 = ES_2 + D_2 = 3 + 2 = 5$

زودترین زمان شروع گره ۵، برابر است با ۵؛ زیرا دو بردار به آن وارد شده است و لذا مقدار زودترین زمان آن براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. به این

صورت که ابتدا، مقدار مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۳ و همچنین مقدار مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۲ محاسبه می‌شود

که حاصل آنها به ترتیب برابر است با ۴ و ۵. در نتیجه مقدار زودترین زمان شروع گره، برابر است با حداکثر مقادیر ۴ و ۵ که بداهتاً برابر است با ۵.

$$ES_5 = \max \begin{cases} ES_2 + D_2 \\ ES_3 + D_3 \end{cases} = \max \begin{cases} 3 + 2 = 5 \\ 3 + 1 = 4 \end{cases} = \max(5, 4) = 5$$

زودترین زمان شروع گره ۶، برابر است با ۸؛ زیرا سه بردار به آن وارد شده است و لذا مقدار زودترین زمان آن براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. به این

صورت که ابتدا، مقدار مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۲، مقدار مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۴ و همچنین مقدار مجموع

زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۵ محاسبه می‌شود که حاصل آنها به ترتیب برابر است با ۵، ۶ و ۸. در نتیجه مقدار زودترین زمان شروع گره، برابر است

با حداکثر مقادیر ۵، ۶ و ۸ که بداهتاً برابر است با ۸.

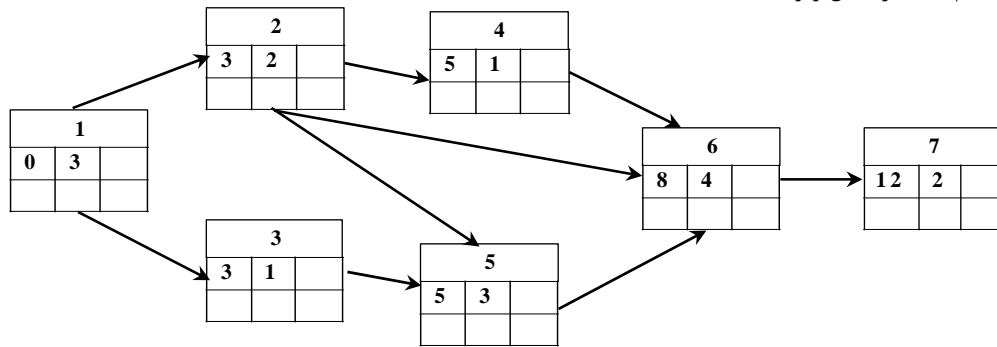
$$ES_6 = \max \begin{cases} ES_2 + D_2 \\ ES_4 + D_4 \\ ES_5 + D_5 \end{cases} = \max \begin{cases} 3 + 2 = 5 \\ 5 + 1 = 6 \\ 5 + 3 = 8 \end{cases} = \max(5, 6, 8) = 8$$

به گره ۷ فقط یک بردار وارد شده است و لذا مقدار زودترین زمان شروع آن براساس رابطه زیر برابر است با مجموع زمان اجرا و زودترین زمان شروع گره ۶

که حاصل آن ۱۲ می‌شود.

$$ES_7 = ES_6 + D_6 = 8 + 4 = 12$$

خلاصه محاسبات انجام شده در شکل زیر آمده است.



شکل ۱

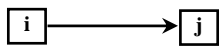
حرکت برگشت

روش حرکت برگشت، مشابه روش حرکت رفت است و به منظور محاسبه دیرترین زمان شروع گره‌های شبکه استفاده می‌شود. این روش، از آخرین گره شبکه آغاز می‌شود و گره به گره، به سمت اولین گره شبکه پیش می‌رود. گام‌های این روش عبارت‌اند از:

گام ۱. دیرترین زمان شروع گره پایانی شبکه برابر است با زودترین زمان شروع آن. به عبارت دیگر چنانچه شماره گره پایانی شبکه n باشد، آن‌گاه داریم:

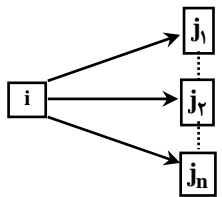
$$LS_n = ES_n$$

گام ۲. اگر از گره i همانند شکل زیر، فقط یک بردار خارج شده باشد، آن‌گاه دیرترین زمان شروع گره i برابر است با تفاضل دیرترین زمان شروع گره j از زمان اجرای گره i به عبارت دیگر:



$$LS_i = LS_j - D_i$$

اما اگر گره i مطابق شکل روبه‌رو، چند فعالیت از آن خارج شده باشند، آن‌گاه زودترین زمان وقوع گره i برابر است با حداقل مقادیر تفاضل دیرترین زمان شروع گره j و زمان اجرای گره‌های i به عبارت دیگر:

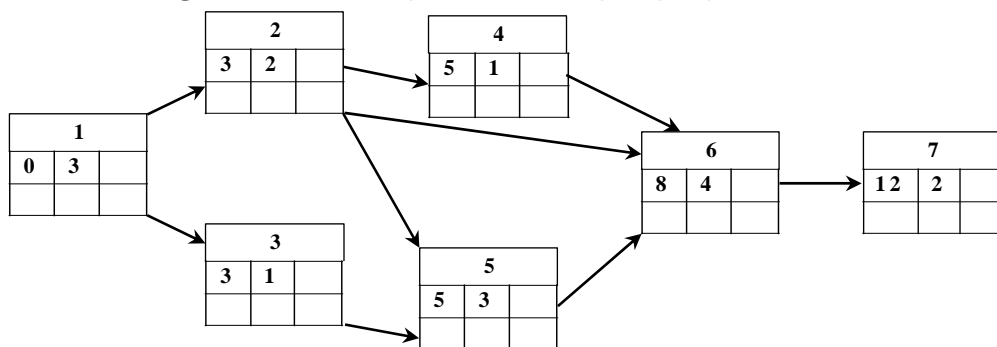


$$LS_i = \min \begin{cases} LS_{j_1} - D_i \\ \vdots \\ LS_{j_n} - D_i \end{cases} \quad \forall i$$

$$LS_1 = 0$$

گام ۳. دیرترین زمان شروع اولین گره شبکه برابر است با صفر. به عبارت دیگر:

مثال ۲۰: شبکه زیر را در نظر بگیرید. دیرترین زمان شروع هریک از گره‌های آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۲

لازم به ذکر است که زودترین زمان شروع هریک از فعالیت‌های این شبکه در مثال ۱۹ محاسبه شده و نتایج آن در (شکل ۱) آمده است.

دیرترین زمان گره ۷، براساس گام ۳، برابر است با زودترین زمان شروع آن گره که طبق شکل بالا، برابر است با ۱۲؛ زیرا گره ۷، گره پایانی شبکه است.

$$LS_7 = ES_7 = 12$$

از گره‌های ۴، ۵، ۶، ۳ و ۲، فقط یک بردار خارج شده است و لذا مقدار دیرترین زمان شروع آنها براساس رابطه روبه‌رو محاسبه می‌شود.

$$LS_6 = LS_7 - D_6 = 12 - 4 = 8$$

دیرترین زمان گره ۶، برابر است با تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۷ که حاصل آن ۸ می‌شود.

$$LS_5 = LS_6 - D_5 = 8 - 3 = 5$$

دیرترین زمان گره ۵، برابر است با تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۶ که حاصل آن ۵ می‌شود.

$$LS_4 = LS_5 - D_4 = 5 - 1 = 4$$

دیرترین زمان گره ۴، برابر است با تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۵ که حاصل آن ۴ می‌شود.

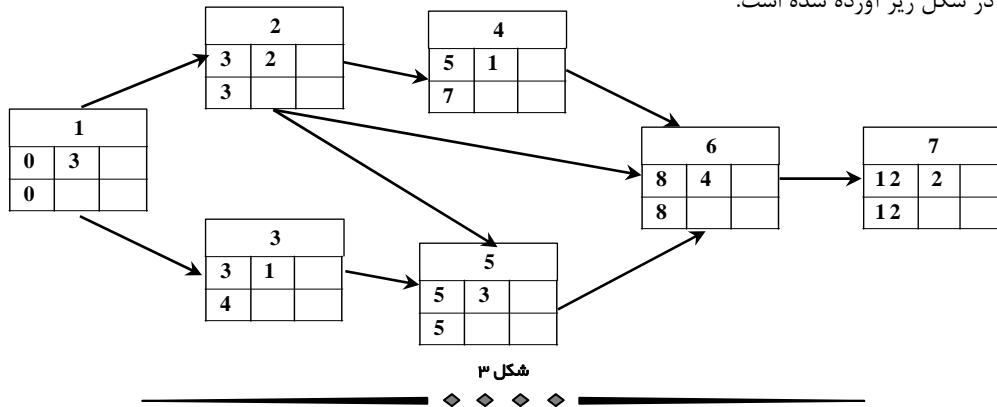


دیرترین زمان گره ۳، برابر است با تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۵ که حاصل آن ۴ می‌شود. $LS_3 = LS_5 - D_3 = 5 - 1 = 4$
 دیرترین زمان گره ۲، برابر است با ۳؛ زیرا سه بردار از آن خارج شده است و در نتیجه مقدار دیرترین زمان شروع آن براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود. به این صورت که ابتدا، مقدار تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۴، مقدار تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۵ و همچنین مقدار تفاضل زمان اجرا و دیرترین زمان شروع گره ۶ محاسبه می‌شود که حاصل آنها به ترتیب برابر است با ۳، ۵ و ۶. در نتیجه، مقدار دیرترین زمان شروع گره ۳، برابر

$$LS_3 = \min \begin{cases} LS_6 - D_3 \\ LS_5 - D_3 \\ LS_4 - D_3 \end{cases} = \min \begin{cases} 8 - 2 = 6 \\ 7 - 2 = 5 = \min(6, 5, 3) = 3 \\ 5 - 2 = 3 \end{cases}$$

است با حداقل مقادیر ۵، ۳ و ۶ که بدهتاً برابر است با ۳.

دیرترین زمان شروع گره ۱، برابر است با صفر (براساس گام ۳).
 $LS_1 = 0$
 خلاصه محاسبات بالا در شکل زیر آورده شده است.



کلمه مثال ۲۱: بردار $i-j$ بین گره i و j وجود دارد. زودترین زمان شروع فعالیت i ، ۶ و زمان اجرای فعالیت i ، ۵ و زمان اجرای فعالیت j ، ۴ می‌باشد. زودترین زمان شروع فعالیت j کدام است؟

(۴) اطلاعات مسأله کافی نیست.

(۳) ۹

(۲) ۱۰

(۱) ۱۱

پاسخ: گزینه «۴» در سؤال مطرح نشده است که چه تعداد بردار به گره j وارد می‌شود. اگر فقط بردار $j-i$ به گره j وارد شود، زودترین زمان شروع فعالیت j برابر $6 + 5 = 11$ می‌باشد ولی اگر چند بردار به گره j وارد شود، آن‌گاه باید اطلاعات مربوط به سایر فعالیت‌ها را نیز داشته باشیم تا بتوانیم جواب را به دست آوریم. بنابراین اطلاعات مسأله کافی نمی‌باشد.

زمان شناوری

زمان شناوری گره در شبکه AON به مفهوم میزان تأخیر در شروع و یا مدت زمان اجرای گره است و مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TF_i = LS_i - ES_i$$

نکته ۳۸: چنانچه زمان شناوری یک فعالیت صفر باشد، آن‌گاه آن فعالیت، بحرانی است.

کلمه مثال ۲۲: شکل ۳ را در نظر بگیرید. زودترین و دیرترین زمان شروع کلیه گره‌ها در مثال‌های ۱۹ و ۲۰ محاسبه شدند که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. به عنوان مثال، زمان شناوری گره ۱ براساس رابطه بالا، بدین ترتیب محاسبه می‌شود:

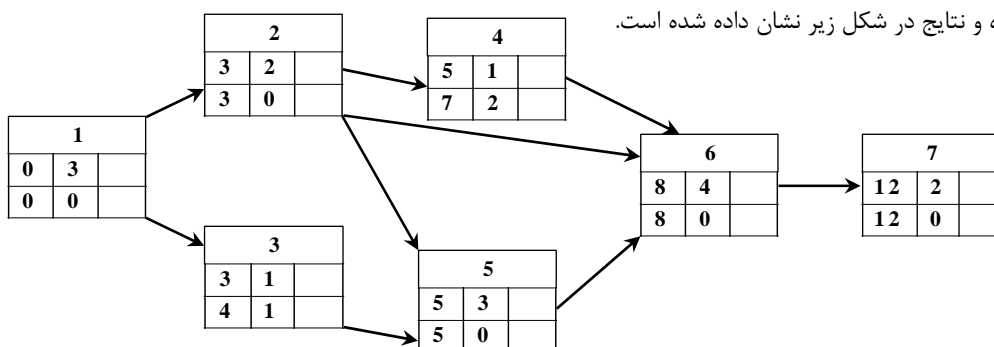
$$TF_1 = LS_1 - ES_1 = 0 - 0 = 0$$

به همین ترتیب، زمان شناوری گره‌های ۲ و ۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TF_2 = LS_2 - ES_2 = 3 - 3 = 0$$

$$TF_3 = LS_3 - ES_3 = 4 - 3 = 1$$

زمان شناوری سایر فعالیت‌ها، محاسبه شده و نتایج در شکل زیر نشان داده شده است.



بخش دوم: شبکه کرت (GERT)

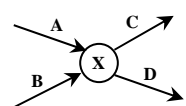
مقدمه

در دنیای واقعی، تمام فعالیت‌های یک پروژه لزوماً انجام نمی‌شوند. در این حالت، شبکه خاصی از فعالیت‌ها به وجود می‌آید که به شبکه GERT معروف است. شبکه GERT، به شبکه‌هایی گفته می‌شود که اجرای فعالیت‌های آن احتمالی است؛ یعنی احتمال دارد که برخی فعالیت‌های شبکه اصلاً اجرا نشوند؛ برای مثال، اگر یک دانش‌آموز در کنکور سراسری رتبه لازم را کسب کند، می‌تواند به دانشگاه راه یابد، در غیر این صورت باید با همان مدرک تحصیلی وارد بازار کار شود. لذا فقط یکی از مسیرهای پیش‌روی این دانش‌آموز اتفاق خواهند افتاد و مسیرهای دیگر اصلاً اجرا نخواهند شد. به عنوان مثال دیگر، در یک پروژه صنعتی، اگر نتیجه تست عملکرد محصول تا تاریخ معینی مثبت باشد، محصول قابل‌ارائه به بازار خواهد شد، در غیر این صورت، پروژه باید متوقف شود؛ زیرا بعد از این تاریخ، محصولات رقبای دیگر وارد بازار می‌شوند و فرصت ورود به بازار از بین خواهد رفت. لذا بعد از تاریخ مشخص‌شده، فقط یکی از این دو حالت اتفاق خواهد افتاد: ۱- محصول وارد بازار می‌شود. ۲- محصول وارد بازار نمی‌شود. به عنوان مثال دیگر، فردی را در نظر بگیرید که برای مسافرت به یک شهر، باید از بین هواپیما، اتوبوس و قطار یکی را انتخاب کند و بدیهی است که نمی‌تواند همزمان بر روی صندلی هواپیما، اتوبوس و قطار بنشیند! در هر یک از مثال‌های فوق، وضعیتی پیش می‌آید که اجرای هر یک از فعالیت‌های پیش‌رو را احتمالی می‌کند؛ یعنی احتمال دارد که اصلاً انجام نشوند.

لازم به ذکر است، در شبکه PERT، اجرای فعالیت‌ها قطعی است، ولی زمان اجرای آنها احتمالی است. بدین معنی که کلیه فعالیت‌های شبکه حتماً اجرا خواهند شد، ولی زمان اجرای فعالیت‌ها قطعی نیست؛ اما در شبکه GERT، انجام فعالیت‌ها احتمالی است و ممکن است برخی فعالیت‌ها، هیچ‌گاه انجام نشوند.

تحقق‌گره

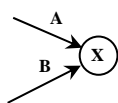
وقتی که فعالیت‌های خارج‌شونده از یک گره بتوانند شروع شوند، اصطلاحاً گفته می‌شود که گره مذکور محقق شده است. در شبکه‌های CPM و PERT، برای این که یک گره محقق شود (فعالیت‌های خارج‌شونده از گره بتوانند شروع شوند)، باید همه فعالیت‌های واردشونده به گره اجرا شوند و پایان یابند. به بیان دیگر، در این حالت بین فعالیت‌های واردشونده رابطه منطقی AND قرار دارد.



شبکه روبه‌رو را در نظر بگیرید. زمانی فعالیت‌های بعد از گره X، می‌توانند شروع شوند که همه فعالیت‌های قبل از گره انجام شوند و پایان یابند؛ لذا تا وقتی که هر دو فعالیت A و B انجام نشوند، هیچ‌یک از فعالیت‌های C و D نمی‌توانند شروع شوند ولی به محض خاتمه اجرای فعالیت‌های A و B، هر دو فعالیت C و D می‌توانند شروع شوند.

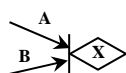
در شبکه GERT، برای تحقق یک گره (فعالیت‌های خارج‌شونده از گره بتوانند شروع شوند)، سه حالت وجود دارد:

حالت ۱. (رابطه AND) در این حالت، مشابه گره شبکه‌های CPM و PERT، لازم است که همه فعالیت‌های واردشونده به گره، اجرا شوند و پایان یابند که اصطلاحاً گفته می‌شود، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی AND وجود دارد. در شبکه روبه‌رو، برای تحقق گره X، لازم است هر دو فعالیت A و B انجام شوند. لذا به محض خاتمه اجرای هر دو فعالیت A و B، گره X محقق می‌شود.



به عنوان مثال، فرض کنید در پروژه احداث یک ساختمان، برای ساخت سقف، نیاز به ساخت دیوار، تهیه تیرچه و بلوک باشد. حال، اگر تیرچه و بلوک مورد نیاز تهیه شود ولی ساخت دیوارها پایان نیافته باشد، احداث سقف نمی‌تواند شروع شود. به عبارت دیگر، برای انجام عملیات احداث سقف، نیاز به خاتمه هر دو فعالیت «ساخت دیوارها» و «تهیه تیرچه و بلوک» می‌باشد.

حالت ۲. (رابطه OR خاص) در این حالت، لازم است که فقط یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره، شروع شود و خاتمه یابد (سایر فعالیت‌ها نمی‌توانند شروع شوند)، که اصطلاحاً گفته می‌شود بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR خاص وجود دارد. در شبکه روبه‌رو، برای تحقق گره X لازم است فقط یکی از فعالیت‌های A و B شروع شود و خاتمه یابد؛ مثلاً اگر فعالیت A شروع شود، فعالیت B نمی‌تواند شروع شود.



به عنوان مثال، برای حمل یک دستگاه بتن‌ساز جهت یک پروژه ساختمانی، سه فعالیت ۱- حمل با کامیون ۲- حمل با قطار ۳- حمل با کشتی وجود دارد. حال، اگر یکی از سه فعالیت مذکور انجام شود، آن‌گاه دو تای دیگر انجام نخواهند شد؛ مثلاً اگر فعالیت «حمل با قطار» انجام شود، آنگاه فعالیت‌های «حمل با کامیون» و «حمل با کشتی» انجام نخواهند شد؛ زیرا نمی‌توان یک دستگاه را همزمان با سه وسیله نقلیه حمل کرد.



حالت ۳. (رابطه OR عام) در این حالت، لازم است که یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره، خاتمه یابد. (سایر فعالیت‌ها می‌توانند شروع شوند ولی به محض این‌که هر یک از آن‌ها خاتمه یابد، گره موردنظر، تحقق یافته است) که اصطلاحاً گفته می‌شود بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR عام وجود دارد.

به‌عنوان مثال در شبکه مقابل، برای تحقق گره X، لازم است یکی از فعالیت‌های A و B خاتمه یابد؛ البته هر دو فعالیت A و B می‌توانند شروع شوند ولی به محض این‌که هر کدام از این دو فعالیت خاتمه یابد، گره X، تحقق یافته است.

به‌عنوان یک مثال واقعی، فرض کنید برای خرید یک کالای کمیاب، سه مأمور خرید به سه نقطه شهر می‌روند. در هر زمان که یکی از این مأموران موفق به خرید کالا شود، فعالیت دو مأمور دیگر متوقف می‌شود.

کج مثال ۱۳: در شبکه‌ای اگر هر دو فعالیت A و B اجرا شوند، گره X نیز محقق شده و در این صورت فقط یکی از سه فعالیت D، E و F شروع می‌شوند. این شبکه از نوع شبکه‌های است.

(۴) هیچ کدام

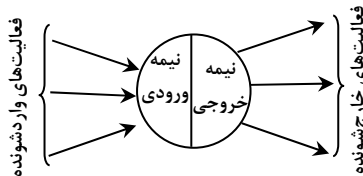
GERT (۳)

PERT (۲)

CPM (۱)

پاسخ: گزینه «۳» روابط شرطی، مختص شبکه‌های GERT است و در شبکه‌های CPM و PERT معنا و مفهومی ندارد.

رسم شبکه گرت (GERT)

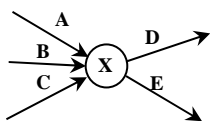


در شبکه GERT، هر گره به دو ناحیه ورودی و خروجی تقسیم می‌شود. ناحیه ورودی، مربوط به فعالیت‌های واردشونده به گره و ناحیه خروجی، مربوط به فعالیت‌های خارج‌شونده از گره می‌شود.

ناحیه ورودی دارای سه نوع رابطه منطقی AND، OR (عام) و OR (خاص) می‌باشد و ناحیه خروجی شامل دو حالت قطعی و احتمالی است. ترکیب سه رابطه ورودی و دو حالت خروجی، باعث ایجاد شش نوع گره در شبکه GERT می‌شود که در ادامه این گره‌ها را معرفی خواهیم کرد.

نوع اول. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی & و در ناحیه خروجی حالت قطعی برقرار است.

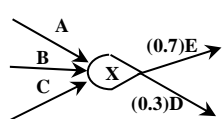
در این حالت، گره کاملاً شبیه گره شبکه‌های CPM و PERT می‌باشد. بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی AND وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد که برای تحقق گره، همه فعالیت‌های واردشونده به گره باید اجرا شوند و خاتمه یابند. بنابراین اگر حتی یک فعالیت واردشونده به گره، پایان نیابد، گره مذکور محقق نمی‌شود. برای نمایش این رابطه از شکل C استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است که نشان می‌دهد همه فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعاً اجرا می‌شوند. برای نمایش این حالت از شکل D استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل O می‌باشد.



به‌عنوان مثال در شکل روبه‌رو، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی AND و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است. لذا برای تحقق گره X، باید فعالیت‌های A، B و C اجرا شوند و خاتمه یابند. حتی اگر یکی از سه فعالیت A، B و C پایان نیابد، گره X تحقق نمی‌یابد؛ ضمناً، پس از تحقق گره X، هر دو فعالیت D و E به‌طور قطعی اجرا می‌شوند.

نوع دوم. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی AND و در ناحیه خروجی حالت احتمالی برقرار است.

بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی AND وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد که برای تحقق گره، همه فعالیت‌های واردشونده به گره باید اجرا شوند و خاتمه یابند؛ بنابراین، اگر حتی یک فعالیت واردشونده به گره پایان نیابد، گره مذکور محقق نمی‌شود. برای نمایش این رابطه از شکل C استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است که نشان می‌دهد، اجرای فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعی نیست و احتمالی است. برای نمایش این حالت از شکل > استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل O می‌باشد.

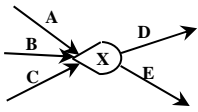


به‌عنوان مثال در شکل روبه‌رو، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی AND و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است. لذا برای تحقق گره X، باید فعالیت‌های A، B و C اجرا شوند و خاتمه یابند، حتی اگر یکی از سه فعالیت A، B و C پایان نیابد، گره X تحقق نمی‌یابد. ضمناً، پس از تحقق گره X، اجرای فعالیت‌های D و E احتمالی است. احتمال اجرای فعالیت E، ۰/۷ و احتمال اجرای فعالیت D، ۰/۳ می‌باشد.

نوع سوم. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی OR (عام) و در ناحیه خروجی حالت قطعی برقرار است.

بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (عام) وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد که برای تحقق گره، کافی است یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره، خاتمه یابد؛ البته همه فعالیت‌ها می‌توانند شروع شوند، ولی به محض این‌که یکی از فعالیت‌ها خاتمه یابد، گره موردنظر، تحقق می‌یابد.

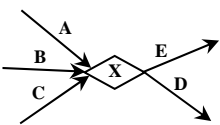
برای نمایش این رابطه از شکل < استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است که نشان می‌دهد همه فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعاً اجرا می‌شوند. برای نمایش این حالت از شکل > استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل < می‌باشد.



در شکل روبه‌رو، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (عام) و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است؛ لذا برای تحقق گره X، کافی است یکی از فعالیت‌های A، B و C خاتمه یابند. البته هر سه فعالیت A، B و C می‌توانند شروع شوند، ولی به محض این‌که یکی از فعالیت‌ها خاتمه یابد، گره X تحقق می‌یابد. ضمناً، پس از تحقق گره X، هر دو فعالیت D و E به‌طور قطعی اجرا می‌شوند.

نوع چهارم. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی OR (عام) و در ناحیه خروجی حالت احتمالی برقرار است.

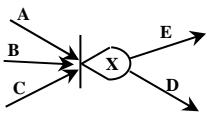
بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (عام) وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد که برای تحقق گره، کافی است یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره، خاتمه یابد. البته همه فعالیت‌ها می‌توانند شروع شوند، ولی به محض این‌که یکی از فعالیت‌ها خاتمه یابد، گره موردنظر تحقق می‌یابد. برای نمایش این رابطه از شکل < استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است که نشان می‌دهد اجرای فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعی نیست و احتمالی است. برای نمایش این حالت از شکل > استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل < می‌باشد.



در شکل روبه‌رو، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (عام) و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است؛ لذا برای تحقق گره X، کافی است یکی از فعالیت‌های A، B و C خاتمه یابند. البته هر سه فعالیت A، B و C می‌توانند شروع شوند، ولی به محض این‌که یکی از فعالیت‌ها خاتمه یابد، گره X تحقق می‌یابد. ضمناً، پس از تحقق گره X، اجرای فعالیت‌های D و E احتمالی است. احتمال اجرای فعالیت E، $0/7$ و احتمال اجرای فعالیت D، $0/3$ می‌باشد.

نوع پنجم. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی OR (خاص) و در ناحیه خروجی حالت قطعی برقرار است.

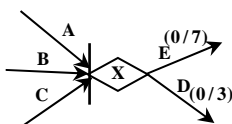
بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (خاص) وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد، برای تحقق گره، کافی است فقط یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره شروع شود و خاتمه یابد و سایر فعالیت‌ها مجاز به شروع و اجرا شدن نیستند. ضمناً برای نمایش این رابطه از شکل < استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است که نشان می‌دهد که همه فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعاً اجرا می‌شوند. برای نمایش این حالت از شکل > استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل < می‌باشد.



به‌عنوان مثال در شکل روبه‌رو، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (عام) و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت قطعی برقرار است؛ لذا برای تحقق گره X، کافی است فقط یکی از فعالیت‌های A، B و C شروع شود و خاتمه یابد؛ مثلاً اگر فعالیت A شروع شود، فعالیت‌های B و C مجاز به شروع نیستند. ضمناً، پس از تحقق گره X، هر دو فعالیت D و E، به‌طور قطعی اجرا می‌شوند.

نوع ششم. در ناحیه ورودی، رابطه منطقی OR (خاص) و در ناحیه خروجی حالت احتمالی برقرار است.

بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (خاص) وجود دارد. این رابطه نشان می‌دهد که برای تحقق گره، کافی است فقط یکی از فعالیت‌های واردشونده به گره، شروع شود و خاتمه یابد و سایر فعالیت‌ها مجاز به شروع و اجرا شدن نیستند. ضمناً برای نمایش این رابطه از شکل < استفاده می‌شود. از سوی دیگر، بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است که نشان می‌دهد، اجرای فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، قطعی نیست و احتمالی است. برای نمایش این حالت از شکل > استفاده می‌شود. در این حالت، گره به شکل < می‌باشد.



به‌عنوان مثال در شکل مقابل، بین فعالیت‌های واردشونده به گره، رابطه منطقی OR (خاص) و بین فعالیت‌های خارج‌شونده از گره، حالت احتمالی برقرار است؛ لذا برای تحقق گره X، کافی است فقط یکی از فعالیت‌های A، B و C شروع شود و خاتمه یابد. مثلاً اگر فعالیت A شروع شود، فعالیت‌های B و C مجاز به شروع نیستند. ضمناً، پس از تحقق گره X، اجرای فعالیت‌های D و E، احتمالی است. احتمال اجرای فعالیت E، $0/7$ و احتمال اجرای فعالیت D، $0/3$ می‌باشد.

در جدول زیر، انواع گره‌ها براساس ناحیه ورودی و خروجی آمده است.

گره ورودی \ گره خروجی	قطعی (غیر احتمالی)	احتمالی
K «OR خاص»	<	<
< «OR عام»	<	<
C «AND»	O	<

بخش دوم: موازنه زمان - هزینه

مقدمه

وقتی با استفاده از روش CPM زمان انجام و تاریخ تکمیل پروژه را محاسبه می‌کنیم، فرض بر این است که فعالیت‌ها در زمان‌های معمول خود انجام می‌شوند، ولی در مواقع بسیاری به دلایلی لازم است پروژه در مدت کمتری انجام شود و در موعد زودتری تحویل داده شود. مثلاً ممکن است وقتی پایان زودتر از موعد پروژه، سود بیشتری داشته باشد، صاحبان پروژه بخواهند که پروژه زودتر از زمان محاسبه شده تحویل داده شود و یا در شرایط اقتصادی، سیاسی و اجتماعی خاص نیاز به اتمام پیش از موعد پروژه باشد. در این گونه موارد باید فعالیت‌های پروژه در زمان کوتاه‌تری انجام شوند. برای کاهش زمان فعالیت‌ها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد؛ مثلاً می‌توان منابع مورد نیاز برای انجام فعالیت را افزایش داد تا فعالیت در مدت زمان کمتری انجام شود و همچنین می‌توان با تغییر در روش‌های فنی انجام فعالیت، زمان انجام آن را کاهش داد. به عبارتی، برای انجام فعالیت در زمان کمتر از زمان معمولی نیاز به منابع بیشتر نظیر نیروی انسانی، تجهیزات، ماشین‌آلات و همچنین تغییر در روش‌های فنی اجرای فعالیت، بهره‌برداری از نیروی انسانی متخصص‌تر و ... می‌باشد؛ بنابراین کاهش زمان فعالیت‌ها نیاز به صرف هزینه اضافی دارد، از طرف دیگر کاهش در زمان فعالیت‌ها صرفه‌جویی‌هایی نیز به همراه دارد؛ مثلاً اگر یک کارخانه بتواند محصولات جدید خود را زودتر به بازار تحویل دهد، سهم بیشتری از بازار را به خود اختصاص خواهد داد و سود بیشتری نصیب خود خواهد کرد. در این گونه موارد باید دید که سود حاصل شده از اتمام زودتر پروژه، هزینه‌های اضافی را پوشش می‌دهد یا نه؟ زمان فعالیت‌ها تا چه اندازه کاهش یابد؟ اقتصادی‌ترین ترکیب کاهش در زمان فعالیت‌ها کدام است؟ این پرسش‌ها در مبحث موازنه زمان - هزینه مطرح می‌شود که در این فصل به این موضوع خواهیم پرداخت.

هزینه‌های پروژه

هزینه‌های پروژه به دو دسته هزینه‌های مستقیم که صرف اجرای فعالیت‌ها می‌شوند و هزینه‌های غیرمستقیم که در اجرای پروژه صرف می‌شوند، تقسیم می‌شود و کل هزینه‌های پروژه از مجموع این دو هزینه به دست می‌آید.

هزینه‌های مستقیم

برای انجام هر فعالیت نیاز به مواد و مصالح، نیروی انسانی، تجهیزات، انرژی و ... است که مستقیماً در انجام فعالیت به کار گرفته می‌شوند. هزینه‌های لازم برای تأمین منابع، مواد و مصالح، نیروی انسانی، انرژی و هزینه تجهیزاتی که مستقیماً برای انجام فعالیت‌ها به کار گرفته می‌شوند، هزینه‌های مستقیم پروژه می‌باشند؛ مثلاً در تولید یک محصول جدید در یک کارخانه، هزینه مواد اولیه، هزینه کارگر، هزینه ماشین‌آلات و تجهیزات تولیدی و هزینه انرژی مورد نیاز برای تولید محصول جزء هزینه‌های مستقیم می‌باشند.

نکته ۷: وقتی انجام فعالیتی به پیمانکار سپرده می‌شود، کل مبلغی که به پیمانکار داده می‌شود به عنوان هزینه مستقیم فعالیت در نظر گرفته می‌شود.

ارائه روش هزینه‌یابی فعالیت محور جهت برآورد هزینه‌های مستقیم:

روش هزینه‌یابی فعالیت محور، دقیق‌ترین روش برآورد هزینه‌های مستقیم است. در این روش فعالیت‌ها (پایین‌ترین سطح WBS) مبنای محاسبه قرار می‌گیرند. بر مبنای هزینه‌یابی فعالیت محور هزینه‌ها به اجزای زیر تقسیم می‌شوند:

– هزینه‌ی مواد مصرفی – هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی – هزینه‌ی به کارگیری منبع (نفر - زمان) – هزینه‌های ثابت فعالیت

در مورد هزینه‌های ثابت، باید توضیح داد که بدون توجه به این که فعالیت چه قدر طول می‌کشد، یک مقدار ثابت هزینه برای فعالیت تعریف می‌شود. حال می‌توان رابطه‌ای برای محاسبه‌ی هزینه‌های مستقیم پروژه ارائه داد:

هزینه‌ی به کارگیری منابع (نفر - زمان) + هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی + هزینه‌ی مواد مصرفی + هزینه‌های ثابت = مجموع هزینه‌های مستقیم پروژه

نکته ۸: هنگام محاسبه‌ی هزینه‌ها باید به نکات زیر توجه کرد:

۱- هزینه‌ی منبع، هم به نوع و هم به تعداد منبع به کار رفته ارتباط دارد.

۲- هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی، هم به نوع و هم به تعداد منبع به کار رفته مربوط است.

۳- هزینه‌ی راه‌اندازی فقط یکبار و در هنگام شروع فعالیت اتفاق می‌افتد.

۴- هزینه‌ی مواد مصرفی برای کل فعالیت تعریف می‌شود.

هزینه‌های غیر مستقیم

علاوه بر هزینه‌هایی که به‌طور مستقیم در اجرای فعالیت‌ها صرف می‌شوند، هزینه‌های دیگری نیز وجود دارند که به کل پروژه مربوط می‌شوند و به یک فعالیت خاص اختصاص ندارند که به آنها هزینه‌های بالاسری گفته می‌شود. هزینه‌های مربوط به اجاره، آب، برق، گاز، تلفن، حقوق و دستمزد نیروهای ستادی (امور مدیریتی، مهندسی، کنترل و نظارت و ...) و هزینه‌های مشابه جزو هزینه‌های غیرمستقیم می‌باشند.

نکته ۹: جریمه دیرکرد در انجام پروژه با موعد تحویل مشخص، جزو هزینه‌های غیرمستقیم به شمار می‌آید که از نوع هزینه‌های غیرمستقیم مشهود است.

نکته ۱۰: هزینه پاداش تحویل زودتر از موعد در پروژه‌هایی که به پیمانکار سپرده می‌شود، جزء هزینه‌های غیرمستقیم می‌باشد که از نوع هزینه‌های غیرمستقیم نامشهود است.

نکته ۱۱: هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم را می‌توان در قالب جدول زیر مقایسه کرد:

هزینه‌های غیر مستقیم	هزینه‌های مستقیم
قابل تفکیک نمی‌باشند.	قابل تفکیک به تک‌تک فعالیت‌ها هستند.
با افزایش زمان پروژه افزایش می‌یابند.	با کاهش زمان پروژه افزایش می‌یابند.

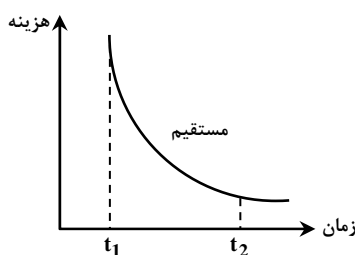
هزینه کل پروژه

هزینه کل پروژه از مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم به‌دست می‌آید. محاسبه هزینه کل پروژه به‌علت سختی در محاسبه هزینه‌های غیرمستقیم، به‌طور کلی امر آسانی نیست.

رابطه هزینه و زمان

وقتی نیاز به کاهش زمان فعالیت‌ها باشد، هزینه‌های پروژه نیز تغییر می‌کنند. با کاهش زمان فعالیت‌ها هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، دو رفتار متفاوت از خود نشان می‌دهند.

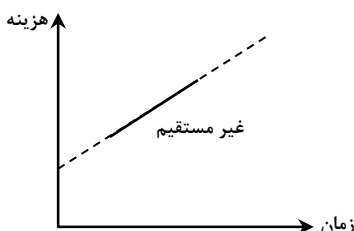
رابطه هزینه مستقیم با زمان



وقتی بخواهیم زمان فعالیت را کاهش دهیم، باید از مواد و مصالح با کیفیت بالاتر و یا نیروی انسانی بیشتر یا ماهرتر و یا از یک روش متفاوت برای اجرای فعالیت استفاده کنیم که باعث افزایش هزینه‌های مستقیم فعالیت می‌شود. شکل مقابل نمودار تقریبی تغییرات هزینه‌های مستقیم براساس زمان را نشان می‌دهد. این نمودار کاملاً تخمینی است و حتی برای یک فعالیت خاص با شرایط مشخص نیز نمی‌توان منحنی را دقیق رسم کرد. همان‌طور که در منحنی دیده می‌شود، هزینه‌های مستقیم با زمان اجرا نسبت عکس دارد.

اگر زمان اجرا از یک حد مشخص (t_1 در منحنی) کمتر شود، هزینه‌های مستقیم بی‌نهایت افزایش می‌یابد و این بدان معنا است که این کاهش امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، طولانی‌تر شدن از زمان‌های معمول (t_2 در منحنی) نیز معمولاً باعث کاهش هزینه‌های مستقیم نمی‌شود و حتی ممکن است باعث بالا رفتن هزینه‌ها شود. به عبارتی، حداقل هزینه‌ای است که باید برای انجام فعالیت صرف شود. بنابراین افزایش زمان بیشتر از زمان معمول غیر منطقی است.

رابطه هزینه غیر مستقیم با زمان



همان‌طور که گفته شد، هزینه‌های غیرمستقیم شامل هزینه‌های اجاره، آب و برق و گاز و تلفن، دستمزد نیروهای ستادی و مشابه آن می‌باشد. بنابراین وقتی زمان فعالیت‌ها کاهش یابد، هزینه کمتری برای آنها پرداخته می‌شود و لذا هزینه‌های بالاسری یا غیرمستقیم کاهش می‌یابد. رابطه بین هزینه‌های غیرمستقیم و زمان تقریباً خطی است. شکل مقابل نشان‌دهنده روند افزایش هزینه‌های غیر مستقیم در مقابل تغییرات زمان اجرای پروژه را نشان می‌دهد.

زمان‌های معمولی و فشرده اجرای فعالیت‌ها

زمان معمولی

زمان معمولی برای اجرای یک فعالیت، مدت زمانی است که اجرای فعالیت در آن مدت با حداقل هزینه‌های مستقیم ممکن می‌باشد. در شکل زیر نقطه D_n زمان معمولی اجرای فعالیت می‌باشد.

نکته ۱۲: با توجه به نمودار، اجرای فعالیت در زمان بیشتر از زمان معمولی ممکن است ولی اگر زمان اجرای فعالیت از زمان معمولی بیشتر شود، هزینه‌های مستقیم کمتر نمی‌شود و تنها مدت پروژه افزایش می‌یابد.

زمان فشرده

کمترین زمان لازم که در آن اجرای فعالیت در شرایط اجرای پروژه امکان‌پذیر باشد را زمان فشرده یا تعجیلی فعالیت می‌نامیم. در شکل زیر نقطه D_f زمان فشرده اجرای فعالیت می‌باشد.

نکته ۱۳: با توجه به نمودار، اجرای فعالیت در زمان کمتر از زمان فشرده ممکن نیست و هزینه آن بی‌نهایت می‌باشد.

هزینه‌های معمولی

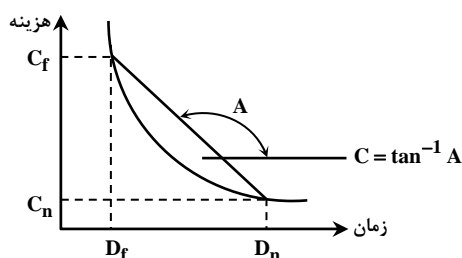
هزینه‌های مستقیم یک فعالیت، وقتی فعالیت در زمان معمولی خود انجام می‌شود، هزینه‌های معمولی نامیده می‌شود که در شکل مقابل با C_n نشان داده شده است.

هزینه‌های فشرده

هزینه‌های مستقیم یک فعالیت، وقتی فعالیت در زمان فشرده خود انجام می‌شود، هزینه‌های فشرده نامیده می‌شود که در شکل فوق با C_f نشان داده شده است.

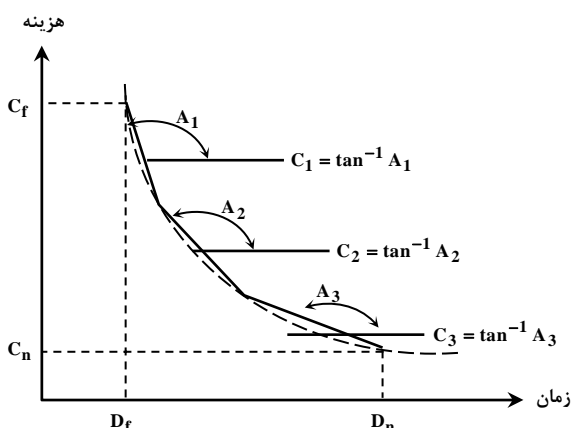
شیب هزینه

وقتی لازم باشد زمان فعالیت کاهش یابد، باید برای آن هزینه اضافی پرداخت. به میزان هزینه مستقیم اضافی که به‌ازای کاهش یک واحد زمانی از مدت زمان اجرای فعالیت باید پرداخت شود، شیب هزینه گفته می‌شود. از آن‌جا که منحنی تغییرات هزینه مستقیم در مقابل زمان خطی نیست، بنابراین شیب هزینه در همه زمان‌ها یکسان نمی‌باشد. با توجه به این‌که این منحنی به‌صورت تقریبی رسم می‌شود، می‌توانیم برای سادگی محاسبات آن را خطی فرض کنیم.



نمودار تقریبی خطی تغییرات هزینه‌های مستقیم در برابر زمان به‌صورت شکل مقابل به‌دست می‌آید؛ چون با افزایش زمان، هزینه‌های مستقیم کاهش می‌یابد بنابراین شیب هزینه منفی است ولی در محاسبات از مقدار قدر مطلق آن استفاده می‌شود. شیب هزینه از رابطه مقابل به‌دست می‌آید:

$$C = \left| \frac{C_f - C_n}{D_f - D_n} \right|$$



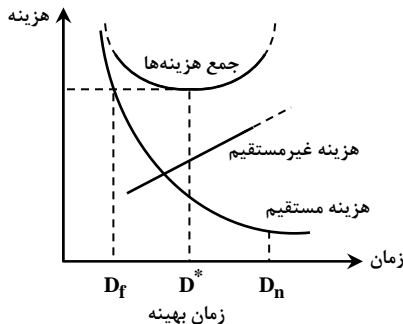
نکته ۱۴: اگر نیاز به دقت بیشتری باشد، می‌توانیم به‌جای این‌که منحنی را به‌صورت یک پاره‌خط مستقیم در نظر بگیریم، مطابق شکل مقابل به چند پاره‌خط تقسیم کنیم و شیب‌های مختلفی در نقاط مختلف به‌دست آوریم.



تغییرات هزینه کل پروژه بر اساس زمان

همان طور که گفته شد، هزینه‌های مستقیم با افزایش زمان فعالیت‌ها و در نتیجه افزایش زمان اجرای پروژه کاهش می‌یابد. از طرفی، هزینه‌های غیرمستقیم با افزایش زمان اجرای پروژه افزایش می‌یابد؛ بنابراین وقتی فعالیت‌ها در زمان معمولی خود انجام می‌شوند و زمان اجرای پروژه حداکثر می‌شود، هزینه‌های مستقیم نیز در حداقل مقدار و هزینه‌های غیرمستقیم در حداکثر ممکن قرار می‌گیرد. از طرف دیگر وقتی فعالیت‌ها در کمترین زمان ممکن، یعنی زمان فشرده، انجام می‌شوند و زمان اجرای پروژه حداقل است، هزینه‌های مستقیم در حداکثر مقدار و هزینه‌های غیرمستقیم در حداقل مقدار قرار می‌گیرد. این دو زمان، کران‌های بالا و پایین زمان اجرای پروژه می‌باشند. بین این دو کران، زمانی وجود دارد که هزینه کل پروژه، که از مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم به دست می‌آید، در آن نقطه حداقل می‌شود. بنابراین این نقطه اقتصادی‌ترین زمان اجرای پروژه را نشان می‌دهد. منحنی هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم و هزینه کل در شکل زیر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات هزینه در اطراف نقطه بهینه بسیار کم است. اهمیت این مطلب در این است که اگر مجری پروژه به دلایلی زمان اجرای پروژه را تا حدی کمتر یا بیشتر از زمان بهینه قرار دهد، تغییر محسوسی در هزینه‌ها به وجود نمی‌آید.

نکته ۱۵: زمان بهینه لزوماً در محل تلاقی هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم پروژه قرار ندارد.



حالت‌های ممکن در بررسی زمان - هزینه

موازنه زمان - هزینه در حالات و شرایط مختلفی می‌تواند بررسی شود. در این بخش سه حالت معمول را شرح می‌دهیم:

حالت ۱. محدودیتی از لحاظ هزینه و زمان وجود ندارد.

در این حالت، هیچ حدی برای زمان اتمام پروژه و هزینه لازم برای آن وجود ندارد و انتخاب زمان اتمام پروژه به عهده برنامه‌ریز پروژه می‌باشد. برنامه‌ریز باید زمان اتمام پروژه را به گونه‌ای انتخاب کند که هزینه‌های پروژه حداقل شود. اگر زمان پروژه خیلی کوتاه در نظر گرفته شود، هزینه‌های مستقیم افزایش می‌یابد و وقتی زمان پروژه خیلی طولانی باشد، هزینه‌های غیرمستقیم پروژه افزایش می‌یابد. بنابراین برنامه‌ریز باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی زمانی کند که مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم حداقل شود. به عبارتی در این حالت هدف، تعیین زمان اقتصادی پروژه است؛ به گونه‌ای که هزینه‌های پروژه حداقل شود.

حالت ۲. تاریخ تکمیل پروژه مشخص است.

در این حالت، تاریخ تکمیل و تحویل پروژه از سوی صاحبان پروژه یا افراد دیگر مشخص است. اگر این زمان کمتر از زمان معمول پروژه باشد، باید فعالیت‌های پروژه تا حدی فشرده شوند تا پروژه در موعد مقرر تکمیل شود. ترکیبات مختلفی از فعالیت‌ها می‌توانند فشرده شوند که در هر یک از آنها زمان اتمام پروژه برابر با زمان تعیین شده می‌باشد. هر یک از این ترکیبات باعث افزایش هزینه معمول پروژه می‌شود که این افزایش‌ها با یکدیگر متفاوتند. برنامه‌ریز باید ترکیبی از فشرده‌سازی‌ها را انتخاب کند که کمترین افزایش در هزینه‌های پروژه را به همراه داشته باشد. به عبارتی هدف، یافتن اقتصادی‌ترین ترکیب کاهش زمان فعالیت‌ها می‌باشد؛ به گونه‌ای که پروژه در زمان مقرر تکمیل و هزینه‌های پروژه حداقل شود.

حالت ۳. بودجه معینی برای کاهش زمان تکمیل پروژه تعیین شده است.

در این حالت، زمانی برای اتمام پروژه تعیین نشده است، ولی بودجه مشخصی برای کاهش زمان پروژه تعیین شده است که برنامه‌ریز باید با توجه به این حد، فعالیت‌ها را به گونه‌ای زمان‌بندی کند که با صرف هزینه مشخص شده، پروژه در کمترین زمان ممکن تکمیل شود. به عبارتی هدف، یافتن بهترین ترکیب کاهش زمان فعالیت‌هاست؛ به گونه‌ای که پروژه در کمترین زمان ممکن پایان یابد، با این شرط که هزینه افزایش یافته‌ی آن از بودجه تعیین شده تجاوز نکند.

روش‌های حل مسائل موازنه زمان - هزینه

مسائل موازنه زمان - هزینه را با روش‌های مختلفی می‌توان حل کرد. این روش‌ها به دو دسته روش‌های ابتکاری و برنامه‌ریزی ریاضی تقسیم‌بندی می‌شوند.

روش‌های ابتکاری مسائل موازنه زمان - هزینه

در الگوریتم‌های ابتکاری فرض می‌شود که دو شرط زیر برقرار است:

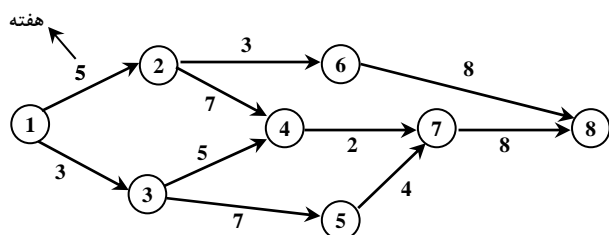
۱- زمان فعالیت‌ها به صورت مقادیر صحیح از زمان کاهش می‌یابد. برای مثال اگر واحد زمان، روز باشد، زمان فعالیت‌ها به اندازه یک یا چند روز می‌تواند کاهش یابد و مثلاً امکان کاهش ۱/۵ روز وجود ندارد.

۲- هزینه فعالیت‌ها با کاهش زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد.

در منحنی هزینه، کل زمان‌های نزدیک به زمان بهینه که در نقطه تقعر منحنی قرار می‌گیرد، هزینه‌های تقریباً نزدیک به هم دارند و با تغییر زمان، تغییر کمی در هزینه به وجود می‌آید. وقتی از روش‌های ریاضی استفاده می‌شود، جواب بهینه به صورت دقیق محاسبه می‌شود. این جواب ممکن است یک مضرب اعشاری از واحد زمان باشد ولی وقتی از روش‌های ابتکاری استفاده کنیم با توجه به فرضیات جوابی که به دست می‌آید، یک مضرب صحیح از واحد زمان است؛ بنابراین جواب دقیق به دست نمی‌آید ولی در اکثر مواقع این جواب به جواب بهینه بسیار نزدیک است. اهمیت روش‌های ابتکاری، زمانی مشخص می‌شود که ابعاد مسئله بزرگ و تعداد مسیرهای موازی و بحرانی زیاد باشد. در این حالت به دست آوردن جواب دقیق دشوار است و از روش‌های ابتکاری استفاده می‌شود.

نوعی روش ابتکاری وجود دارد که بر مبنای سعی و خطا است و در آن تقریباً کلیه ترکیبات مختلف کاهش زمان فعالیت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای توضیح این روش بهتر است از مثال زیر استفاده کنیم.

مثال ۶: پروژه‌ای با شبکه نشان داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید. زمان‌های معمولی و فشرده هر فعالیت و شیب‌های هزینه در جدول مشخص شده است. اقتصادی‌ترین زمان برای تکمیل پروژه و هزینه آن کدام است؟



(۱) ۱۸ و ۵۵۱

(۲) ۱۹ و ۵۴۳

(۳) ۲۰ و ۵۳۵

(۴) ۲۱ و ۵۳۷

فعالیت	زمان معمولی (هفته)	هزینه معمولی	زمان فشرده (هفته)	شیب هزینه
۱-۲	۵	۳۰	۴	۵
۱-۳	۳	۲۴	۲	۴
۲-۴	۷	۳۹	۴	۷
۲-۶	۳	۲۱	۳	۱۰
۳-۴	۵	۳۶	۴	۹
۳-۵	۷	۴۵	۵	۵
۴-۷	۲	۱۵	۲	۶
۵-۷	۴	۳۵	۳	۷
۶-۸	۸	۴۲	۸	۸
۷-۸	۸	۴۵	۶	۶

هزینه‌های بالاسری = ۱۰ واحد پولی در هر هفته

پاسخ: گزینه «۲»

با توجه به اطلاعات جدول به سراغ کاهش زمان فعالیت‌ها و یافتن زمان بهینه اجرای پروژه می‌رویم. از آنجا که مسیر بحرانی، طولانی‌ترین مسیر در شبکه می‌باشد، ابتدا به فعالیت‌های مسیر بحرانی مراجعه می‌کنیم. مسیرهای پروژه و زمان آنها به این صورت می‌باشد:



مسیر	زمان
۱-۲-۶-۸	۱۶
۱-۲-۴-۷-۸	۲۲
۱-۳-۴-۷-۸	۱۸
۱-۳-۵-۷-۸	۲۲

هزینه‌های پروژه برابر است با:

(مجموع هزینه‌های زمان معمولی فعالیت‌ها) هزینه‌های مستقیم = ۳۳۲

هزینه‌های غیرمستقیم = $۲۲ \times ۱۰ = ۲۲۰$ هزینه کل = ۵۵۲

دو مسیر بحرانی ۱-۲-۴-۷-۸ و ۱-۳-۵-۷-۸ در شبکه وجود دارد. برای کاهش زمان پروژه باید زمان فعالیت‌هایی را کاهش دهیم که باعث کاهش هم‌زمان زمان هر دو مسیر بحرانی شود. در جدول زیر زمان‌های قابل کاهش فعالیت‌ها، که از تفاضل زمان معمولی و فشرده به دست می‌آید، آمده است.

فعالیت	زمان قابل کاهش
۱-۲	۱
۱-۳	۱
۲-۴	۳
۲-۶	۰
۳-۴	۱
۳-۵	۲
۴-۷	۰
۵-۷	۱
۶-۸	۰
۷-۸	۲

در جدول زیر، ترکیبات ممکن برای کاهش فعالیت‌های این دو مسیر و هزینه افزایش یافته به‌ازای یک هفته کاهش آورده شده است.

ترکیبات ممکن	افزایش هزینه مستقیم
۱-۲ و ۱-۳	۹
۱-۲ و ۳-۵	۱۰
۱-۲ و ۵-۷	۱۲
۱-۳ و ۲-۴	۱۱
۲-۴ و ۳-۵	۱۲
۲-۴ و ۵-۷	۱۴
۷-۸	۶

با توجه به جدول، بهترین انتخاب برای کاهش ۱ هفته از زمان اجرای پروژه، کاهش ۱ واحد زمان فعالیت ۸-۷ می‌باشد که باعث کاهش ۱ هفته از زمان هر

دو مسیر بحرانی می‌شود. بدین ترتیب، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم و طول جدید مسیرهای شبکه برابرند با: هزینه مستقیم = $۳۳۲ + ۶ = ۳۳۸$

هزینه غیرمستقیم = $۲۱ \times ۱۰ = ۲۱۰$

هزینه کل = ۵۴۸

مسیر	زمان
۱-۲-۶-۸	۱۶
۱-۲-۴-۷-۸	۲۱
۱-۳-۴-۷-۸	۱۷
۱-۳-۵-۷-۸	۲۱