نشریه علمی مهندسی معدن ایران
Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

دوره ۱۷، شماره ۵۷، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱ تا ۱۲
Vol 17, No 57, 2022, pp 1-12

DOI: 10.22034/IJME.2022.122844.1795
DOR: 20.1001.1.17357616.1401.17.57.1.3

انجمن مهندسی معدن ایران
Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

مقاله پژوهشی

# به‌کارگیری تکنیک گرت در مدیریت زمان پروژه‌های احداث تونل

حسین ملکی[۱]، بیژن ملکی[۲*]، رضا شکور شهابی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشدعمران، دانشگاه آزاداسلامی، تهران غرب، malekihossein1123@gmail.com
۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، maleki@eng.ikiu.ac.ir
۳. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، shahabi@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰

**چکیده**

**اجرای پروژه‌های تونل سازی به دلیل محدود بودن محیط کار، در زمان نسبتاً طولانی انجام می‌شود. در این حالت مدیریت پروژه و بهینه‌سازی مراحل اجرا از اهمیت زیادی برخوردار است. برای کنترل و مدیریت پروژه می‌توان از روش‌های مختلف استفاده کرد. روش‌های شبکه‌ای ازجمله روش‌های کارا است. روش مسیر بحرانی و پرت پرکاربردترین و مرسوم‌ترین آن‌ها است. روش گرت نیز ازجمله روش‌های شبکه‌ای است که کارایی بالایی داشته و می‌تواند برای حالتی که علاوه بر زمان احتمالی، فعالیت‌های احتمالی نیز وجود داشته باشد، به کار رود. در تونل سازی به دلیل پیچیدگی عملیاتی و همچنین ناشناخته بودن شرایط زمین‌شناسی، علاوه بر غیرقطعی بودن زمان برخی فعالیت‌ها، لزوماً تمام فعالیت‌ها قطعی نبوده و بسته به شرایط در هر پروژه، برخی فعالیت‌ها انجام نخواهند شد. ازاین‌رو در این تحقیق کاربرد روش گرت درتونل‌سازی بررسی‌شده و مثالی برای کاربرد آن نشان داده‌شده است. در این مثال ابتدا عملیات مختلف تونل سازی برای پروژه احداث یک تونل بزرگ مقطع مشخص‌شده است. سپس بر اساس نوع هر فعالیت، احتمال انجام و همچنین بازه زمانی اجرا تعریف‌شده است. با توجه به شرایط فنی و عملیاتی، ارتباط بین فعالیت‌ها بر اساس شبکه گرت نشان داده شد. روش تحلیل شبکه به دو صورت دستی و نرم‌افزاری بیان گردید. به کمک نرم‌افزار پریماورا مثال عددی اجرا گردید و به ازای درصد احتمال‌های مختلف برای پروژه، زمان‌های اتمام مختلفی به دست آمد. همچنین بالعکس برای زمان‌های پیش‌بینی‌شده مختلف نیز می‌توان زمان‌های احتمال مربوطه را تعیین کرد. به‌عنوان‌مثال زمان اجرای پروژه ۲۹۸۱ روز با احتمال ٪۵۰ و ۳۰۸۲ روز با احتمال ٪۸۰ امکان‌پذیر است.**

**کلمات کلیدی**

**تونل سازی، مدیریت و کنترل پروژه، روش گرت، Risk Analysis Primavera**

* نویسنده مسئول مکاتبات.

## ۱- مقدمه

امروزه با توجه افزایش تراکم سازه‌های سطحی و کمبود فضاهای لازم برای حمل‌ونقل، استفاده از تونل روبه افزایش است. از آنجائی که درتونلسازی فضای کاری و بخصوص جبهه محدود است، زمان زیادی صرف اجرای پروژه می‌شود. لذا استفاده از روش‌های مدیریت زمانی اهمیت زیادی دارد. تغییردرشرایط زمین‌شناسی سبب مخاطرات زیادی در حین تونل سازی می‌گردد. این مخاطرات سبب به هم خوردن جدول زمان‌بندی انجام فعالیت‌های پروژه می‌گردند. برای پیش‌بینی مخاطرات و مقابله با آن در شرایط مختلف، کارهای مختلفی انجام‌شده است [۱، ۲]. به این منظور پروژه باید به‌گونه‌ای مدیریت شود که پیش‌بینی تغییر در زمان برخی فعالیت‌ها و همچنین اضافه یا حذف شدن فعالیت‌ها برای مقابله با مخاطرات در نظر گرفته‌شده باشند.

زمان انجام هر پروژه به زمان انجام فعالیت‌ها بستگی دارد. برای مدیریت کنترل پروژه مدل‌های شبکه‌ای مانند CPM[1]، PERT[2]، GERT[3]، PN[4] می‌توانند مورداستفاده قرار گیرند. در این رابطه فهرستی از تمام فعالیت‌های موردنیاز تهیه می‌گردد. سپس مدت‌زمان انجام هر فعالیت و رابطه آن با سایر فعالیت‌ها تعیین می‌گردد. در پروژه‌های تونل سازی فعالیت‌های زیر همواره وجود دارد [۳]. این فعالیت‌ها عبارتنداز: جابجایی وسایل، آماده‌سازی تجهیزات اصلی، استقراردرمحل، آماده‌سازی بخش‌های اداری و کارگاهی، ساخت دهانه تونل (یا چاه دسترسی)، تأمین و نصب تجهیزات و خدمات موردنیاز (تهویه، روشنایی، آبکشی)، حفر تونل و نصب همهٔ اجزای اصلی موردنیاز، حفاری‌های فرعی، خارج کردن تجهیزات اصلی، خارج کردن تجهیزات خدماتی، جداره بندی نهایی و کف‌بندی تونل، نصب تجهیزات تکمیلی، تمیز کردن تونل، تجمع کردن سایت. هریک از این فعالیت‌ها شامل چندین زیر فعالیت می‌باشند. همچنین قبل از اجرای فعالیت‌های فوق که مربوط به ساخت تونل است، فعالیت‌های دیگر جانبی از قبیل ارزیابی‌های فنی و اقتصادی نیازمی‌باشد. برای مدل‌سازی شبکه و زمان‌بندی اجرای آن نیاز به در نظر گرفتن کلیه فعالیت‌های قبلی و حین اجرا و حتی پس از اجرا می‌باشد. زمان هر فعالیت می‌بایست بر اساس کارهای مشابه قبلی، نظر متخصصین، و محدودیت‌های مختص پروژه، ارزیابی و تعیین می‌گردد. درصورتی‌که فعالیت‌ها مشخص و زمان آن‌ها قطعی باشند از شبکه‌های CPM استفاده می‌شود. این شبکه‌ها به دلیل سهولت اجرا به‌طور وسیعی به‌کاررفته می‌شوند. درتونل‌سازی به علت پیچیدگی‌ها و کامل نبودن اطلاعات مسیر و همچنین عملکرد متفاوت کارکنان و ماشین‌آلات، زمان قطعی وجود نداشته و لذا کاربرد مدل CPM چندان مناسب نیست. برای رفع این مشکل شبکه‌های PERT معرفی گردید که در آن زمان انجام فعالیت‌ها بر پایهٔ مدل‌های احتمالی می‌باشد.در این مدل خود فعالیت‌ها به‌صورت قطعی وجود دارند. ازآنجایی‌که در تونل سازی با توجه به مشکلات حین کار، نظیر ریزش دیواره و سقف، هجوم آب، خرابی دستگاه‌ها و سایر حوادث، نیاز به اجرای اقداماتی برای رفع مشکلات است. بنابراین برخی فعالیت‌ها به‌صورت احتمالی وجود دارند .از این‌رو کاربرد PERT نمی‌تواند کار آیی بالایی داشته باشد. لذا روش توسعه‌یافته GERT می‌تواند بر اساس زمان و فعالیت‌های احتمالی برنامه‌ریزی پروژه را انجام دهد و کاربردهای مختلفی در حوزه‌های مختلف دارد[۴-۷]. لذا در این تحقیق از شبکه گرت که قابلیت تغییر فعالیت‌ها و زمان در آن وجود دارد، استفاده‌شده است.

## ۲- تاریخچه مطالعات قبلی

با توجه به ماهیت پیچیده تونل سازی، مطالعات مختلف درزمینهٔ مدیریت پروژه‌های تونل سازی صورت گرفته است که ازجمله می‌توان به ارزیابی زمان و هزینهٔ منابع موردنیاز برای تونل سازی اشاره کرد [۸]. تأثیر متقابل اقتصاد و فنّاوری در مدیریت تونل‌زنی نیز موردبررسی قرارگرفته است [۹]. به‌منظور بهبود زمان اجرای تونل، ابزار انتقال آنی اطلاعات معرفی‌شده است. [۱۰] تحقیقاتی درزمینهٔ تأثیر نحوه بارگیری و انتقال مواد کنده‌شده در مدیریت ساخت تونل انجام‌شده است [۱۱, ۱۲] تأثیر شرایط زمین‌شناسی بر هزینه‌ها و زمان اجرای تونل بررسی‌شده است [۸، ۱۳-۱۵]. در کارهای مشابه انجام‌شده، مدیریت پروژه تونل سازی با TBM عمدتاً با روش CPM انجام‌شده است [۳]. در تحقیق حاضرباتوجه فرمت کلی پروژه فوق، مدیریت زمانی تونل سازی با متد اتریشی و روش گرت انجام‌گرفته است.

## ۳- روش‌شناسی (روش GERT)

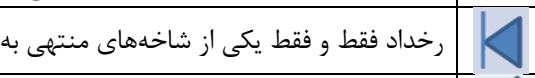
روش گرت برای اولین بار توسط پریتسکر، هاپ و وایت هاوس معرفی گردید .[۱۶, ۱۷] این روش از ادغام تئوری گراف جریان، توابع مولد گشتاور، و روش پرت به‌دست‌آمده است. در هر شبکه گرت عناصری وجود دارند که شبکه را می‌سازند. این عناصر شامل گره‌های منطقی، فعالیت‌های احتمالی، و پارامترهای احتمالی جمع پذیرانتقال‌ها، می‌باشند هر فعالیت با یک پیکان که بین گره قرار

[1] Critical Path Method
[2] Project Evaluation and Review Technique
[3] Graphical Evaluation and Review Technique
[4] Precedence Networks

دارد، نشان داده می‌شود. گره‌ها شامل دو قسمت ورودی و خروجی می‌باشند. در جدول۱مشخصات این قسمت‌ها آمده است. همچنین در جدول۲ ترکیب قسمت‌های مختلف ورودی یا خروجی نشان داده‌شده است [۱۸].

با توجه به کاربرد بیشتر شبکه‌های گرت با گره‌های یای خاص در ادامه روابط به‌کاررفته در این گره‌ها بررسی می‌گردد. با توجه به این‌که پارامترهای احتمال ضرب پذیر و پارامتر زمان جمع‌پذیر است لذا برای استفاده از سیستم گراف جریان که ضرب پذیر است، لازم است که عملیات جمع‌پذیری به ضرب پذیری تبدیل گردد. بدین منظور تعدادی مبدل برای تبدیل قابل‌استفاده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به تابع مولد گشتاور اشاره نمود. اغلب توزیع‌ها را می‌توان با مولد گشتاور زمان تعریف کرد [۱۹،۱۷]. در جدول ۳ تابع توزیع و مولد گشتاور برای توزیع‌های کاربردی و متداول نشان داده‌شده است.

**جدول ۱- قسمت‌های ورودی و خروجی گره‌ها در شبکه گرت [۱۸]**

| | نام قسمت | نشان | ویژگی |
|---|---|---|---|
| ورودی | یای خاص |  | رخداد فقط و فقط یکی از شاخه‌های منتهی به این گره سبب رخداد گره می‌شود. |
| | یای عام | | رخداد حداقل یکی از شاخه‌های منتهی به این گره سبب رخداد گره می‌شود. |
| | و | | رخداد گره هنگامی‌که تمام شاخه‌های منتهی به گره رخ دهند اتفاق می‌افتد. |
| خروجی | قطعی | | تمام شاخه‌های منشعب از این گره رخ می‌دهند. |
| | احتمالی | | فقط یکی از شاخه‌های منشعب از گره رخ می‌دهد. |

**جدول ۲- انواع گره‌های قابل استفاده در شبکه گرت [۱۸]**

| | یای خاص | یای عام | و |
|---|---|---|---|
| قطعی | | | |
| احتمالی | | | |

**جدول ۳- توابع مولد گشتاور برای توزیع‌های متداول [۲۰, ۲۱]**

| نوع توزیع | قانون احتمال | شرط | تابع مولد گشتاور $M(s)$ |
|---|---|---|---|
| دوجمله‌ای | $P(x)=\binom{n}{x}p^x q^{n-x}$ | $x=0,1,2,\ldots,n$<br>$q=1-p$ | $\left(pe^s+q\right)^n$ |
| نمایی | $f(x)=ae^{-sx}$ | $x\geq 0$ | $(1-s/a)^{-1}$ |
| گاما | $f(x)=\frac{a}{\Gamma(b)}(ax)^{b-1}e^{ax}$ | $x\geq 0$ | $(1-s/a)^{-b}$ |
| هندسی | $P(x)=pq^{x-1}$ | $x=0,1,2,3,\ldots$ | $\frac{pe^s}{1-qe^s}$ |
| نرمال | $f(x)=(1/\sigma\sqrt{2\pi})e^{-(1/2)\left(\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^2}$ | $-\infty<x<\infty$ | $e^{s\mu+(1/2)s^2\sigma^2}$ |
| پواسون | $P(x)=\frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}$ | $x=0,1,2,3,\ldots$ | $e^{\lambda\left(e^s-1\right)}$ |
| ثابت | $f(x)=\frac{1}{b-a}$ | $a<x<b$ | $\frac{e^{sa}-e^{sb}}{(b-a)s}$ |
| یکنواخت | $P(x)=1$ | $x=t$ | $e^{ts}$ |

برای مدل‌سازی زمان هر فعالیت، می‌بایست تابع توزیع مناسب زمان هر فعالیت، با توجه به تجارب و یا سوابق پروژه‌های قبلی تخمین زده شود. بر اساس انتخاب نوع توزیع، مولد گشتاور هر فعالیت مطابق رابطه ۱ تعیین می‌گردد [۱۷, ۱۹].

$$M(s)=\int_{-\infty}^{\infty} e^{sx} f(x)\,dx \qquad (۱)$$

برای در نظر گرفتن تاثیر توام زمان و احتمال فعالیت $ij$، تابع انتقال $W_{ij}(s)$ پیشنهاد شده است که حاصل‌ضرب احتمال $p_{ij}$ در مولد گشتاور زمان پیمودن فعالیت $M_{ij}(s)$ است [۲۲]. در جدول ۴ تابع انتقال معادل برای اتصالات پایه، شامل فعالیت‌های سری، موازی و حلقه‌ای در شبکه‌های گرت آمده است.

**جدول۴- پارامترهای فعالیت معادل برحسب پارامترهای فعالیت‌های تشکیل‌دهنده [۷، ۱۹، ۲۱]**

| نوع اتصال | زمان پیمودن فعالیت $M(s)$ | تابع انتقال $W(s)$ |
|---|---|---|
| سری | $M_{a,b}(s)=M_a(s)M_b(s)$ | $W_{a,b}(s)=p_a p_b M_a(s)M_b(s)$ |
| موازی | $M_{a,b}(s)=\dfrac{p_a M_a(s)+p_b M_b(s)}{p_a+p_b}$ | $W_{a,b}(s)=p_a M_a(s)+p_b M_b(s)$ |
| حلقه‌ای | $M_{a,b}(s)=M_a(s)M_b(s)^i$ | $W_{a,b}(s)=\dfrac{p_a M_a(s)}{(1-p_b M_b(s))}$ |

در سیستم حلقه‌ای جدول ۴، فعالیت $a$ مستقیم و مابین دو گره ابتدا و انتها بوده و فعالیت $b$ حلقه‌ای در گره ابتدا است که $i$ دوباره تکرار می‌شود. در عمل شبکه‌های گرت ممکن است پیچیده‌تر شود و شامل حلقه‌های بازخور چندگانه و گره‌های ورودی و خروجی چندگانه باشد. برای محاسبه پارامترهای انتقال شبکه در هر مسیر می‌توان از رابطه توپولوژی فلوگراف استفاده کرد. همچنین می‌توان قاعده ماسون را مطابق رابطه ۲ به کاربرد [۱۹، ۲۰، ۲۲].

$$T_{\text{هرمسیر}}=\frac{[\sum(\text{ارزش هرمسیر})\times\sum(\text{حلقه های غیرمماس})]}{\sum\text{حلقه سیستم‌های}} \qquad (۲)$$

که در آن:

$$\sum\text{حلقه‌های غیر مماس}=1-(\sum\text{حلقه‌های غیر مماس درجه اول})+(\sum\text{حلقه‌های غیرمماس درجه دوم})-\dots \qquad (۳)$$

$$\sum\text{حلقه‌های سیستم}=1-(\sum\text{حلقه‌های درجه اول})+(\sum\text{حلقه‌های درجه دوم})-\dots \qquad (۴)$$

در رابطه ۲ حاصل‌ضرب انتقال‌ها در طول هر مسیر، از متغیرهای مستقل تا وابسته ثبت می‌شود. سپس انتقال آن در مجموع حلقه‌های غیرمماس با مسیر طبق رابطه ۳، ضرب می‌شود. این انتقال‌ها مسیر اصلاح‌شده طبق رابطه ۴، جمع شده و بر مجموع تمامی حلقه‌ها، در گراف باز تقسیم می‌شود [۶، ۱۹، ۲۱، ۲۳].

## ۴- کاربرد مدل گرت در زمان‌بندی پروژه تونل‌سازی

زمان‌بندی پروژهٔ ساخت تونل از اهمیت زیادی برخورداراست. در تونل سازی عوامل زمین‌شناسی پیچیده و ناشناختهٔ زیادی وجود دارد. این عوامل عمدتاً سبب تأخیر و حتی توقف کل پروژه می‌گردند [۲۴]. لذا روش کنترل زمان پروژه می‌بایست قابلیت در نظر گرفتن مخاطرات را داشته باشد. شبکه گرت به دلیل احتمالی بودن زمان و انجام فعالیت‌ها ، توانایی بیشتری نسبت به شبکه‌های سی‌پی‌ام و پرت دارد. مخاطرات تونل سازی را می‌توان به دودسته تقسیم کرد[۲۵،۲۶]. دسته اول سبب تأخیر در اجرای فعالیت‌ها می‌گردند. تأثیر این مخاطرات به‌صورت احتمال زمان انجام فعالیت در شبکه گرت در نظر گرفته می‌شود. ابتدا مدل توزیع آماری زمان فعالیت تعیین می‌شود. در این صورت برای هر زمان دلخواه، احتمال انجام فعالیت تعیین می‌گردد. در دسته دوم مخاطرات، احتمال رخداد پایین بوده ولی در صورت اتفاق افتادن، منجر به توقف فعالیت و یا در نظر گرفتن فعالیت جدیدی برای رفع اثرات مخاطره می‌شود. البته مخاطرات دیگری نیز وجود دارند که احتمال وقوع آن‌ها خیلی کم بوده و به‌عنوان ریسک پروژه تلقی می‌گردند. در صورت وقوع ریسک ،

پروژه با خطر توقف و یا تعطیلی مواجه خواهد بود[۲۶]. در هر پروژه تونل سازی با توجه به روش حفاری، برخی فعالیت‌ها به‌صورت قطعی انجام می‌شوند. برخی فعالیت‌ها نیز با توجه به شرایط زمین‌شناسی و اجرایی ممکن است اجرانشده و یا با فعالیت دیگری تکمیل گردند. همچنین فعالیت‌ها ممکن است جایگزین یکدیگر گردند. برای حفر تونل‌های بزرگ مقطع، روش‌های حفاری مرحله‌ای پرکاربرد هستند. روش حفاری باید پاسخگوی اهداف پروژه با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی باشد. انتخاب نوع روش مرحله‌ای، بستگی به عوامل زیادی دارد که باید با انجام تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌ها در مرحله طراحی تونل، مناسب‌ترین روش انتخاب شود[۲۷]. در مطالعه موردی این تحقیق، یک پروژه فرضی تونل سازی با سطح مقطع ۷۰مترمربع و طول ۳کیلومتر است. محیط اجرا خاکی است. روش اجرا ایرانی-اتریشی است که مشابه تونل سازی در مترو تهران در خط یک، واقع در خیابان مفتح، تقاطع خیابان طالقانی تا میدان هفت‌تیر است. در جدول ۵ داده‌های زمانی بر اساس تجربیات مستقیم نویسنده عهده‌دار مکاتبات در آن محل، و به‌صورت تقریبی است. سطح مقطع تونل به چهار قسمت تاج، میانی، و دو قسمت کناری در چپ و راست تقسیم شده است. ابتدا تاج تونل با دستگاه پائورات حفر شده و به دنبال آن قسمت میانی و سپس قسمت‌های کناری حفر می‌گردند. ازآنجایی که زمان و اجرای فعالیت‌ها غیرقطعی می‌باشند، احتمال انجام هر فعالیت بر اساس نظر متخصصان به این جدول اضافه‌شده است. بدیهی است که برای تعیین زمان هر فعالیت می‌بایست با توجه به داده‌های اخذشده کافی، مدل توزیع احتمال مطابق جدول ۳ تعیین گردد. در این تحقیق زمان انجام هر فعالیت مطابق توزیع نرمال در نظر گرفته‌شده است. معمولاً برای یک پروژه یکسان تعداد فعالیت‌ها به روش گرت بیشتر از سی پی‌ام خواهد شد زیرا فعالیت‌های جایگزین و یا اصلاحی برای تکمیل برخی فعالیت‌ها معرفی می‌گردد. مطابق جدول ۶ برای فعالیت‌های با احتمال انجام ۹۰٪و بیشتر، اصلاح فعالیت در نظر گرفته می‌شود. برای فعالیت‌هایی با احتمال انجام بین ۴۰٪ تا ۹۰٪ فعالیت‌های مکمل تعریف می‌گردد تا در صورت وقوع حادثه و توقف فعالیت، بتوان آن فعالیت را مجدداً به راه انداخت. برای فعالیت‌های بین ۲۰٪ تا ۴۰٪ فعالیت جایگزین معرفی می‌شود. فعالیت‌های با احتمال اجرای کمتر از ۲۰٪ نیز به‌عنوان ریسک تلقی شده و در محاسبات زمان‌بندی پروژه در نظر گرفته نمی‌شوند. این جدول برای تعیین فعالیت‌های مکمل و جایگزین به کارمی رود. پس از تعیین کلیه فعالیت‌های اصلی، مکمل، و جایگزین، شکل شبکه گرت و داده‌های ورودی به نرم‌افزار مشخص می‌گردد.

**جدول ۵ - برآورد زمان اجرای فعالیت‌های پروژه تونل‌سازی**

| ردیف | شرح فعالیت (مسیر) | نماد فعالیت | گره ابتدایی | گره انتهایی | میانگین زمان انجام فعالیت بر حسب روز ( $\mu$ ) | انحراف معیار زمان انجام فعالیت ( $\sigma$ ) | احتمال شرطی فعالیت (درصد) | زمان انجام فعالیت (مسیر) در نظر گرفته شده ( $S$ ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ارایه طرح به کارفرما | A | ۱ | ۲ | ۲۱ | ۴٫۳ | ۱۰۰ | ۲۰ |
| ۲ | موافقت کارفرما در مورد روش انجام پروژه | $A_1$ | ۲ | ۳ | ۱۰ | ۲٫۸ | ۹۰ | ۹ |
| ۳ | انجام اصلاحات لازم و تامین نظر کارفرما | $A_2$ | ۲ | ۳ | ۱۵ | ۲٫۲ | ۱۰ | ۱۳ |
| ۴ | ارزیابی‌های تکمیلی ژئوتکنیکی | B | ۳ | ۴ | ۱۳۰ | ۱۱٫۹ | ۱۰۰ | ۱۲۷ |
| ۵ | موافقت نهایی | $B_1$ | ۴ | ۵ | ۵ | ۱٫۷ | ۱۰۰ | ۵ |
| ۶ | طرح‌ریزی پروژه | $B_2$ | ۵ | ۶ | ۲۰ | ۴٫۶ | ۱۰۰ | ۱۸ |
| ۷ | ارزیابی مجدد، برآورد و تایید نهایی کارفرما | $B_3$ | ۶ | ۷ | ۱۳ | ۲٫۹ | ۸۰ | ۱۲ |
| ۸ | نیاز به برآورد مجدد | $B_4$ | ۶ | ۷ | ۱۷ | ۰٫۹ | ۲۰ | ۱۶ |
| ۹ | نهایی کردن طرح‌ها و مشخص کردن کارهای حفاری | B5 | ۷ | ۸ | ۹ | ۲٫۷ | ۱۰۰ | ۸ |
| ۱۰ | نهایی کردن قرارداد با کارفرمای حفاری | B6 | ۸ | ۹ | ۱۹ | ۴٫۲ | ۱۰۰ | ۱۷ |
| ۱۱ | انجام حفاری‌های تکمیلی | $B_7$ | ۹ | ۱۰ | ۴۱ | ۷٫۶ | ۷۵ | ۴۰ |
| ۱۲ | عدم نیاز به حفاری تکمیلی | $B_8$ | ۹ | ۱۱ | ۰ | ۰ | ۲۵ | ۰ |
| ۱۳ | ارزیابی داده‌ها و گزارش‌ها و تایید آن‌ها | $B_9$ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۰ | ۲٫۱ | ۸۵ | ۸ |

**ادامه جدول ۵ - برآورد زمان اجرای فعالیت‌های پروژه تونل‌سازی**

| ردیف | شرح فعالیت (مسیر) | نماد فعالیت | گره ابتدایی | گره انتهایی | میانگین زمان انجام فعالیت بر حسب روز ( $\mu$ ) | انحراف معیار زمان انجام فعالیت ( $\sigma$ ) | احتمال شرطی فعالیت (درصد) | زمان انجام فعالیت (مسیر) در نظر گرفته شده $(s)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۴ | نیاز به ارزیابی مجدد و تایید آن‌ها | $B_{10}$ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۶ | ۱٫۲ | ۱۵ | ۱۴ |
| ۱۵ | طراحی و ساخت سایت اول | C | ۱۱ | ۱۲ | ۹۲ | ۲۳٫۱ | ۱۰۰ | ۹۰ |
| ۱۶ | خرید و انتقال دستگاه‌ها به سایت | $C_1$ | ۱۲ | ۱۳ | ۵۵ | ۱۱٫۲ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| ۱۷ | اجرای دهانه تونل نیمه اول | $C_2$ | ۱۳ | ۱۴ | ۲۳ | ۴٫۴ | ۱۰۰ | ۲۰ |
| ۱۸ | حفاری تاج تونل در نیمه اول | $C_3$ | ۱۴ | ۱۵ | ۶۰۸ | ۴۲٫۸ | ۸۰ | ۶۰۰ |
| ۱۹ | حفاری تاج تونل در نیمه اول با وجود مخاطرات و رفع آن | $C_4$ | ۱۴ | ۱۵ | ۶۲۶ | ۴۸٫۳ | ۲۰ | ۶۲۰ |
| ۲۰ | حفاری قسمت میانی تونل در نیمه اول | $C_5$ | ۱۵ | ۱۸ | ۷۲۸ | ۳۶٫۳ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۲۱ | آماده‌سازی مورد نیاز برای ایجاد فاصله ایمن بین حفاری قسمت‌های میانی و کناری در نیمه اول | $C_6$ | ۱۵ | ۱۶ | ۵۱ | ۸٫۴ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| ۲۲ | حفاری قسمت‌های کناری نیمه اول | $C_7$ | ۱۶ | ۱۸ | ۷۲۳ | ۳۳٫۳ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۲۳ | آماده‌سازی مورد نیاز برای ایجاد فاصله ایمن بین حفاری قسمت‌های کناری و اجرای پوشش نهایی در نیمه اول | $C_8$ | ۱۶ | ۱۷ | ۵۲ | ۶٫۵ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| ۲۴ | اجرای پوشش نهایی دیواره‌ها و سقف در نیمه اول | $C_9$ | ۱۷ | ۱۸ | ۷۱۲ | ۲۸٫۸ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۲۵ | اجرای پوشش نهایی کف در نیمه اول | $C_{10}$ | ۱۸ | ۲۵ | ۱۰۵ | ۱۴٫۱ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| ۲۶ | طراحی و ساخت سایت دوم | D | ۱۱ | ۱۹ | ۳۳ | ۶٫۳ | ۱۰۰ | ۳۰ |
| ۲۷ | اجرای دهانه تونل نیمه دوم | $D_1$ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۲ | ۴٫۳ | ۱۰۰ | ۲۰ |
| ۲۸ | حفاری تاج تونل در نیمه دوم | $D_2$ | ۲۰ | ۲۱ | ۶۱۴ | ۳۷٫۶ | ۷۵ | ۶۰۰ |
| ۲۹ | حفاری تونل در نیمه دوم با وجود مخاطرات و رفع آن | $D_3$ | ۲۰ | ۲۱ | ۶۳۴ | ۵۱٫۱ | ۲۵ | ۶۲۰ |
| ۳۰ | حفاری قسمت میانی تونل در نیمه دوم | $D_4$ | ۲۱ | ۲۴ | ۷۱۸ | ۳۴٫۵ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۳۱ | آماده‌سازی مورد نیاز برای ایجاد فاصله ایمن بین حفاری قسمت‌های میانی و کناری در نیمه دوم | $D_5$ | ۲۱ | ۲۲ | ۵۲ | ۵٫۴ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| ۳۲ | حفاری قسمت‌های کناری نیمه دوم | $D_6$ | ۲۲ | ۲۴ | ۷۱۸ | ۳۹٫۶ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۳۳ | آماده‌سازی مورد نیاز برای ایجاد فاصله ایمن بین حفاری قسمت‌های کناری و اجرای پوشش نهایی در نیمه دوم | $D_7$ | ۲۲ | ۲۳ | ۵۳ | ۷٫۸ | ۱۰۰ | ۵۰ |
| ۳۴ | اجرای پوشش نهایی دیواره‌ها و سقف در نیمه دوم | $D_8$ | ۲۳ | ۲۴ | ۷۲۴ | ۲۶٫۲ | ۱۰۰ | ۷۰۰ |
| ۳۵ | اجرای پوشش نهایی کف در نیمه دوم | $D_9$ | ۲۴ | ۲۵ | ۱۰۶ | ۱۵٫۷ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| ۳۶ | نصب تاسیسات تهویه | E | ۲۵ | ۲۷ | ۲۶ | ۴٫۱ | ۱۰۰ | ۲۵ |
| ۳۷ | نصب تاسیسات روشنایی | F | ۲۵ | ۲۷ | ۳۷ | ۵٫۳ | ۱۰۰ | ۳۵ |

**ادامه جدول ۵ - برآورد زمان اجرای فعالیت‌های پروژه تونل‌سازی**

| ردیف | شرح فعالیت (مسیر) | نماد فعالیت | گره ابتدایی | گره انتهایی | میانگین زمان انجام فعالیت بر حسب روز ( $\mu$ ) | انحراف معیار زمان انجام فعالیت ( $\sigma$ ) | احتمال شرطی فعالیت (درصد) | زمان انجام فعالیت (مسیر) در نظر گرفته شده $(s)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۸ | نصب تاسیسات زهکشی | G | ۲۵ | ۲۶ | ۲۱ | ۳/۹ | ۱۰۰ | ۲۰ |
| ۳۹ | اجرای روکش کف | H | ۲۶ | ۲۷ | ۷۹ | ۱۴/۲ | ۱۰۰ | ۷۵ |
| ۴۰ | اجرای فعالیت‌های تکمیلی | I | ۲۷ | ۲۸ | ۲۶ | ۷/۷ | ۱۰۰ | ۲۵ |
| ۴۱ | جمع‌آوری سایت‌ها | J | ۲۸ | ۲۹ | ۴۲ | ۱۲/۷ | ۱۰۰ | ۴۰ |

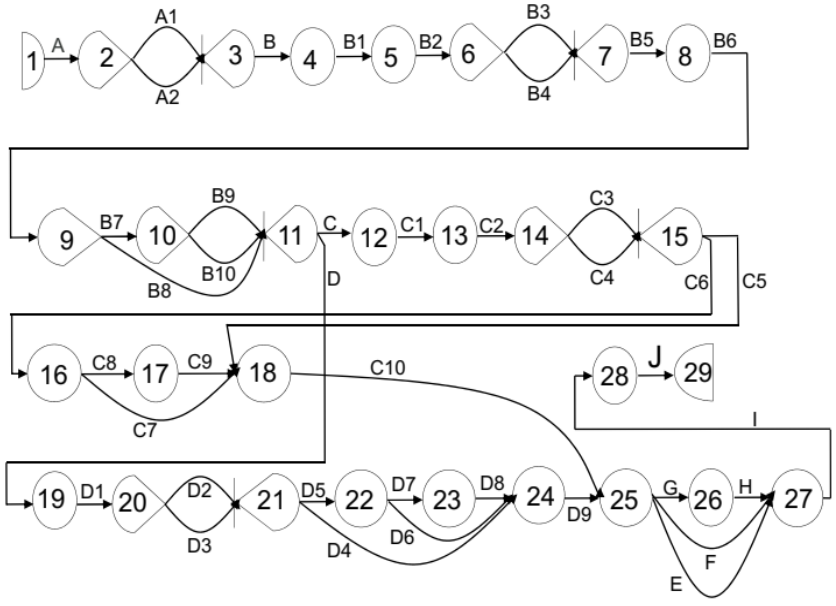
**جدول ۶- تقسیم‌بندی فعالیت‌های اولیه بر اساس احتمال وقوع آن‌ها**

| احتمال رخداد فعالیت | ۲۰ تا ۴۰ درصد | ۴۰ درصد تا ۹۰ درصد | ۹۰ درصد و بالاتر |
|---|---|---|---|
| شماره فعالیت‌ها | - | B3, B7, B9, C3, D2 | A, A1, B, B1, B2, B5, B6, C, C1, C2, C5, C6, C7, C8, C9, C10, D, D1,D4, D5, D6, D7, D8, D9, E, F, G, H, I, J |
| نوع فعالیت‌های مورد نیاز | جایگزین | مکمل | بدون نیاز (اصلاح فعالیت موجود) |

## ۵- روابط شبکه گرت در تونل‌سازی

به‌منظور تعیین معادلات، ابتدا مطابق جدول ۵ ، شبکه ترسیم‌شده و بر اساس روابط جدول ۴، شبکه ساده‌سازی می‌شود ( مطابق شکل۱). سپس قاعده ماسون برای مسیر به کارمی‌رود (معادلات ۲ الی ۴). برای تعیین زمان کل پروژه می‌توان از روش‌های دستی و یا نرم‌افزاری استفاده کرد. در صورت استفاده از روش دستی، بهتر است حتی‌الامکان ساده‌سازی در بخش‌های مختلف صورت گیرد.

به کمک معادلات ۱ تا ۴ می‌توان مولد گشتاور و ضریب انتقال معادل را برای بخش‌های مختلف و در نتیجه کل پروژه به دست آورد. در ادامه، روابط این شبکه آمده است.




**شکل ۱- شبکه گرت پروژه تونل‌سازی**

$$M_{1\text{-}8}=M_A\times M_{A2}\times M_{A1}\times M_B\times M_{B1}\times M_{B2}\times M_{B4}\times M_{B3}\times M_{B5}$$

$$W_{1\text{-}8}=\frac{p_A M_A}{\left(1-p_{A2}M_{A2}\right)}\times W_{A1}\times W_B\times W_{B1}\times\frac{p_{B2}M_{B2}}{\left(1-p_{B4}M_{B4}\right)}\times W_{B3}\times W_{B5}$$

از آنجا که مسیر ۸-۱۱ سری یا موازی نیست از قاعده ماسون استفاده می‌شود. با توجه به این‌که نمودار بین این دو گره، شامل دو مسیر است، ارزش آن خواهد شد:

$$W_{8\text{-}11}=\frac{W_{8-9-11}(1-0)+W_{8-9-10-11}(1-0)}{1-W_{B7}\times W_{B10}}$$

در ادامه برای بقیه مسیر روابط مربوطه به شرح زیر آمده است.

$$M_{11\text{-}25U}=M_C\times M_{C1}\times M_{C2}\times\frac{p_{C3}M_{C3}+p_{C4}M_{C4}}{p_{C3}+p_{C4}}\times\frac{p_{C5}M_{C5}+p_{15-16-18}M_{15-16-18}}{p_{C5}+p_{15-16-18}}\times M_{C10}$$

$$W_{11\text{-}25U}=W_C\times W_{C1}\times W_{C2}\times\left(p_{C3}M_{C3}+p_{C4}M_{C4}\right)\times\left(p_{C5}M_{c5}+p_{15-16-18}M_{15-16-18}\right)\times W_{C10}$$

$$M_{11\text{-}25D}=M_D\times M_{D1}\times\frac{p_{D2}M_{D2}+p_{D3}M_{D3}}{p_{D2}+p_{D3}}\times\frac{p_{D4}M_{D4}+p_{21-22-24}M_{21-22-24}}{p_{D4}+p_{21-22-24}}\times M_{D9}$$

$$W_{11\text{-}25D}=W_D\times W_{D1}\times\left(p_{D2}M_{D2}+p_{D3}M_{D3}\right)\times\left(p_{D4}M_{D4}+p_{21-22-24}M_{21-22-24}\right)\times W_{D9}$$

معادلات مشابه برای هریک از فعالیت‌های شبکه بسته به نوع ارتباط آن با سایر فعالیت‌ها تعریف می‌گردد. پس از حل این معادلات امکان تعیین احتمال تحقق هر یک از فعالیت‌های شبکه و زمان‌بندی کل پروژه فراهم می‌گردد.

## ۶- محاسبات شبکه گرت با Primavera Risk Analysis

محاسبات این تحقیق با ابزار Pert Master در نرم‌افزار پریماورا و بر مبنای تکنیک گرت انجام‌شده است. نرم‌افزار Primavera Risk Analysis یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای مدیریت ریسک پروژه است. این نرم‌افزار برای انجام آنالیز ریسک بر روی پروژه‌ها، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت بهره‌گیری از ابزارهای مناسب جهت ورود ریسک و رتبه‌بندی آن در پروژه، امکان برنامه‌ریزی پروژه به‌وسیله PERT و GERT در شرایط عدم قطعیت نیز وجود دارد. مدیران پروژه می‌توانند به‌وسیله آن تصمیم‌های مناسبی در مورد نحوه ادامه پروژه اتخاذ نمایند. علاوه بر اینکه این نرم‌افزار قابلیت برنامه‌ریزی کامل یک پروژه در شرایط قطعی یا غیرقطعی و اجرای آنالیز ریسک را دارد، از آن می‌توان به‌عنوان یک نرم‌افزار کمکی در کنار سایر نرم‌افزارهای مدیریت پروژه نظیر Primavera یا Microsoft Office Project برای انجام آنالیز ریسک و انتقال اطلاعات بین آن‌ها استفاده کرد [۲۸]. در جدول ۷ خروجی برنامه شامل نتایج نهایی زمان شروع و پایان هر فعالیت داده‌شده است. در شکل ۲ مدت‌زمان انجام پروژه به ازای احتمال‌های متفاوت، آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حداقل زمان اجرای پروژه ۲۶۶۰روزمی باشد و در شرایطی رخ می‌دهد که حداقل

$$M_{25\text{-}29}=M_{25\text{-}27}\times M_I\times M_J$$

$$W_{25\text{-}29}=W_{25\text{-}27}\times W_I\times W_J$$

که در آن:

$$M_{16\text{-}17\text{-}18}=M_{C8}\times M_{C9}$$

$$M_{16\text{-}18}=\frac{p_{C7}M_{C7}+p_{16-17-18}M_{16-17-18}}{p_{C7}+p_{16-17-18}}$$

$$M_{15\text{-}16\text{-}18}=M_{C6}\times M_{16-18}$$

$$M_{15\text{-}18}=\frac{p_{C5}M_{C5}+p_{15-16-18}M_{15-16-18}}{p_{C5}+p_{15-16-18}}$$

$$M_{E,F}=\frac{p_EM_E+p_FM_F}{p_E+p_F}$$

$$M_{G,H}=M_G\times M_H$$

$$M_{25\text{-}27}=\frac{p_{E,F}M_{E,F}+p_{G,H}M_{G,H}}{p_{E,F}+p_{G,H}}$$

$$W_{16\text{-}17\text{-}18}=W_{C8}\times W_{C9}$$

$$W_{16\text{-}18}=p_{C7}M_{C7}+p_{16-17-18}M_{16-17-18}$$

$$W_{15\text{-}16\text{-}18}=W_{C6}\times W_{16-18}$$

$$W_{15\text{-}18}=p_{C5}M_{C5}+p_{15-16-18}M_{15-16-18}$$

$$W_{E,F}=p_EM_E+p_FM_F$$

$$W_{G,H}=W_G\times W_H$$

$$W_{25\text{-}27}=p_{E,F}M_{E,F}+p_{G,H}M_{G,H}$$

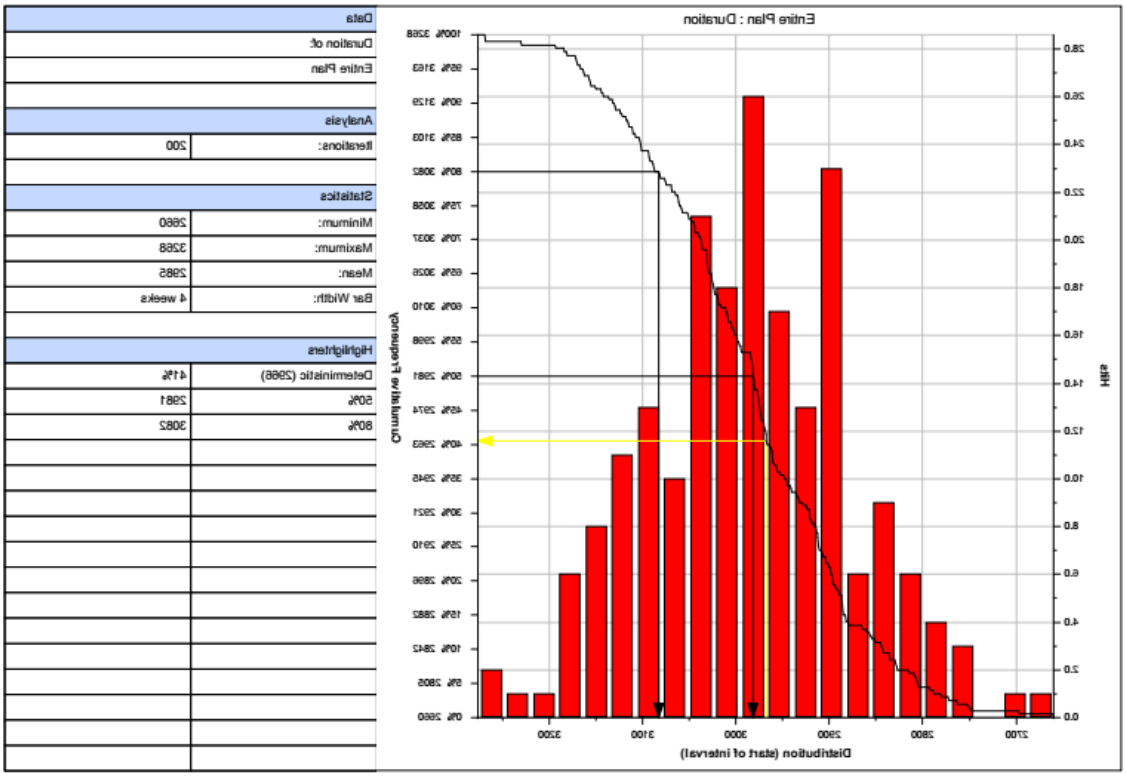
زمان برای فعالیت‌ها درنظرگرفته شود. معمولاً این زمان با توجه به محدودیت‌های فنی و اجرائی تعیین می‌گردد. حداکثر زمان پروژه ۳۲۶۸روزاست. این زمان با احتمال نزدیک به۱۰۰٪ تعیین می‌شود و به ازای زمان‌های انجام فعالیت‌ها در بدترین شرایط محاسبه می‌گردد. به‌طورکلی در روش گرت بیان زمان انجام پروژه، به تنهایی صورت نگرفته بلکه احتمال اتمام پروژه درزمان مورد نظر نیز بیان می‌گردد. شکل۳ نیز نشانگر فرم استاندارد نمایش گره‌ای شبکه است و مسیر بحرانی پروژه با رنگ قرمز نشان داده‌شده است.

**جدول ۷- زمان شروع و پایان برآورد شده فعالیت‌های تونل‌سازی بر مبنای خروجی Primavera Risk Analysis**

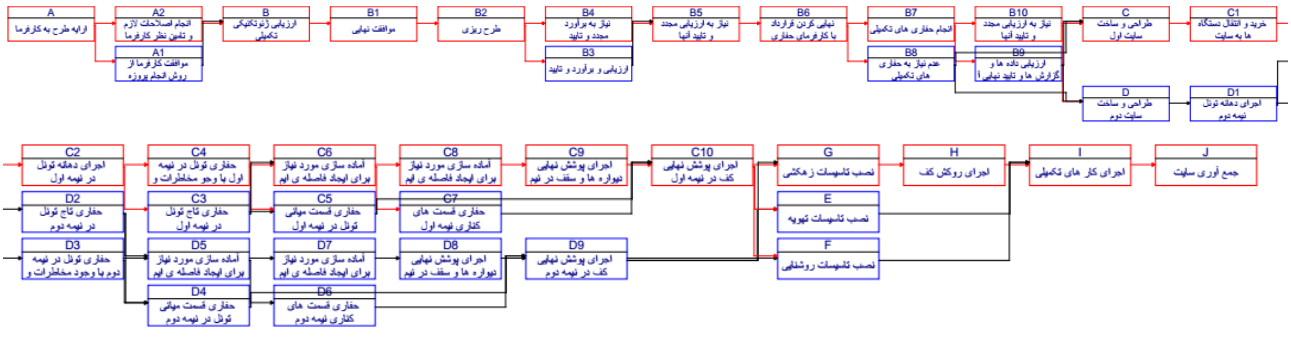
| ردیف | نماد فعالیت | حداقل زمان | زمان میانگین | حداکثر زمان | زمان موردنظر | زمان شروع (روز/ماه/سال) | زمان پایان (روز/ماه/سال) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | A | ۱۵ | ۲۱ | ۲۵ | ۲۰ | ۲۰۲۰/۰۱/۲۳ | ۲۰۲۰/۰۲/۱۹ |
| ۲ | A1 | ۷ | ۱۰ | ۱۱ | ۹ | ۲۰۲۰/۰۲/۲۰ | ۲۰۲۰/۰۳/۰۳ |
| ۳ | A2 | ۱۳ | ۱۵ | ۱۷ | ۱۳ | ۲۰۲۰/۰۲/۲۰ | ۲۰۲۰/۰۳/۰۹ |
| ۴ | B | ۹۵ | ۱۳۰ | ۱۵۹ | ۱۲۷ | ۲۰۲۰/۰۳/۱۰ | ۲۰۲۰/۰۹/۰۲ |
| ۵ | B1 | ۴ | ۵ | ۶ | ۵ | ۲۰۲۰/۰۹/۰۳ | ۲۰۲۰/۰۹/۰۹ |
| ۶ | B2 | ۱۴ | ۲۰ | ۲۳ | ۱۸ | ۲۰۲۰/۰۹/۱۰ | ۲۰۲۰/۱۰/۰۵ |
| ۷ | B3 | ۹ | ۱۳ | ۱۵ | ۱۲ | ۲۰۲۰/۱۰/۰۶ | ۲۰۲۰/۱۰/۲۱ |
| ۸ | B4 | ۱۳ | ۱۷ | ۱۹ | ۱۶ | ۲۰۲۰/۱۰/۰۶ | ۲۰۲۰/۱۰/۲۷ |
| ۹ | B5 | ۶ | ۹ | ۱۰ | ۸ | ۲۰۲۰/۱۰/۲۸ | ۲۰۲۰/۱۱/۰۶ |
| ۱۰ | B6 | ۱۳ | ۱۹ | ۲۱ | ۱۷ | ۲۰۲۰/۱۱/۰۹ | ۲۰۲۰/۱۲/۰۱ |
| ۱۱ | B7 | ۳۰ | ۴۱ | ۵۰ | ۴۰ | ۲۰۲۰/۱۲/۰۲ | ۲۰۲۱/۰۱/۲۶ |
| ۱۲ | B8 | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۰۲۰/۱۲/۰۲ | ۲۰۲۰/۱۲/۰۱ |
| ۱۳ | B9 | ۶ | ۱۰ | ۱۰ | ۸ | ۲۰۲۱/۰۱/۲۷ | ۲۰۲۱/۰۲/۰۵ |
| ۱۴ | B10 | ۱۴ | ۱۶ | ۱۸ | ۱۴ | ۲۰۲۱/۰۱/۲۷ | ۲۰۲۱/۰۲/۱۵ |
| ۱۵ | C | ۶۸ | ۹۲ | ۱۱۳ | ۹۰ | ۲۰۲۱/۰۲/۱۶ | ۲۰۲۱/۰۶/۲۱ |
| ۱۶ | C1 | ۳۸ | ۵۵ | ۶۳ | ۵۰ | ۲۰۲۱/۰۶/۲۲ | ۲۰۲۱/۰۸/۳۰ |
| ۱۷ | C2 | ۱۵ | ۲۳ | ۲۵ | ۲۰ | ۲۰۲۱/۰۸/۳۱ | ۲۰۲۱/۰۹/۲۷ |
| ۱۸ | C3 | ۴۵۰ | ۶۰۸ | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۲۰۲۱/۰۹/۲۸ | ۲۰۲۴/۰۱/۱۵ |
| ۱۹ | C4 | ۴۶۵ | ۶۲۶ | ۷۷۵ | ۶۲۰ | ۲۰۲۱/۰۹/۲۸ | ۲۰۲۴/۰۲/۱۲ |
| ۲۰ | C5 | ۵۲۵ | ۷۲۸ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۴/۰۲/۱۳ | ۲۰۲۶/۱۰/۱۹ |
| ۲۱ | C6 | ۳۸ | ۵۱ | ۶۳ | ۵۰ | ۲۰۲۴/۰۲/۱۳ | ۲۰۲۴/۰۴/۲۲ |
| ۲۲ | C7 | ۵۲۵ | ۷۲۳ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۴/۰۴/۲۳ | ۲۰۲۶/۱۲/۲۸ |
| ۲۳ | C8 | ۳۸ | ۵۲ | ۶۳ | ۵۰ | ۲۰۲۴/۰۴/۲۳ | ۲۰۲۴/۰۷/۰۱ |
| ۲۴ | C9 | ۵۲۵ | ۷۱۲ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۴/۰۷/۰۲ | ۲۰۲۷/۰۳/۰۸ |
| ۲۵ | C10 | ۷۵ | ۱۰۵ | ۱۲۵ | ۱۰۰ | ۲۰۲۷/۰۳/۰۹ | ۲۰۲۷/۰۷/۲۶ |
| ۲۶ | D | ۲۳ | ۳۳ | ۳۸ | ۳۰ | ۲۰۲۱/۰۲/۱۶ | ۲۰۲۱/۰۳/۲۹ |
| ۲۷ | D1 | ۱۵ | ۲۲ | ۲۵ | ۲۰ | ۲۰۲۱/۰۳/۳۰ | ۲۰۲۱/۰۴/۲۶ |
| ۲۸ | D2 | ۴۵۰ | ۶۱۴ | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۲۰۲۱/۰۴/۲۷ | ۲۰۲۳/۰۸/۱۴ |
| ۲۹ | D3 | ۴۶۵ | ۶۳۴ | ۷۷۵ | ۶۲۰ | ۲۰۲۱/۰۴/۲۷ | ۲۰۲۳/۰۹/۱۱ |
| ۳۰ | D4 | ۵۲۵ | ۷۱۸ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۳/۰۹/۱۲ | ۲۰۲۶/۰۵/۱۸ |
| ۳۱ | D5 | ۳۸ | ۵۲ | ۶۳ | ۵۰ | ۲۰۲۳/۰۹/۱۲ | ۲۰۲۳/۱۱/۲۰ |
| ۳۲ | D6 | ۵۲۵ | ۷۱۸ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۳/۱۱/۲۱ | ۲۰۲۶/۰۷/۲۷ |

ادامه جدول ۷- زمان شروع و پایان برآورد شده فعالیت‌های تونل‌سازی بر مبنای خروجی Primavera Risk Analysis

| ردیف | نماد فعالیت | حداقل زمان | زمان میانگین | حداکثر زمان | زمان موردنظر | زمان شروع (روز/ماه/سال) | زمان پایان (روز/ماه/سال) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۳ | D7 | ۳۸ | ۵۳ | ۶۳ | ۵۰ | ۲۰۲۳/۱۱/۲۱ | ۲۰۲۴/۰۱/۲۹ |
| ۳۴ | D8 | ۵۲۵ | ۷۲۴ | ۸۷۵ | ۷۰۰ | ۲۰۲۴/۰۱/۳۰ | ۲۰۲۶/۱۰/۰۵ |
| ۳۵ | D9 | ۷۵ | ۱۰۶ | ۱۲۵ | ۱۰۰ | ۲۰۲۶/۱۰/۰۶ | ۲۰۲۷/۰۲/۲۲ |
| ۳۶ | E | ۱۹ | ۲۶ | ۳۱ | ۲۵ | ۲۰۲۷/۰۷/۲۷ | ۲۰۲۷/۰۸/۳۰ |
| ۳۷ | F | ۲۶ | ۳۷ | ۴۴ | ۳۵ | ۲۰۲۷/۰۷/۲۷ | ۲۰۲۷/۰۹/۱۳ |
| ۳۸ | G | ۱۵ | ۲۱ | ۲۵ | ۲۰ | ۲۰۲۷/۰۷/۲۷ | ۲۰۲۷/۰۸/۲۳ |
| ۳۹ | H | ۵۶ | ۷۹ | ۹۴ | ۷۵ | ۲۰۲۷/۰۸/۲۴ | ۲۰۲۷/۱۲/۰۶ |
| ۴۰ | I | ۱۹ | ۲۶ | ۳۱ | ۲۵ | ۲۰۲۷/۱۲/۰۷ | ۲۰۲۸/۰۱/۱۰ |
| ۴۱ | J | ۳۰ | ۴۲ | ۵۰ | ۴۰ | ۲۰۲۸/۰۱/۱۱ | ۲۰۲۸/۰۳/۰۶ |




شکل ۲- مدت‌زمان انجام پروژه به ازای احتمال‌های متفاوت




شکل ۳- فرم استاندارد نمایش گره‌ای شبکه

## ۷- بحث

جدول ۵ نشان‌دهنده مدت‌زمان فعالیت‌ها، زمان شروع و اتمام هر فعالیت با در نظر گرفتن ۷ روز کاری در هفته و همچنین ۱۶ ساعت کار حفاری در هرروز با در نظر گرفتن شبکه فعالیت‌ها است. در جدول ۶ تقسیم‌بندی فعالیت‌ها بر اساس درصد احتمال صورت گرفته است. احتمال انجام هر فعالیت با توجه به شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی که ناشی از خطاهای انسانی و یا نقص ماشین‌آلات است، مشخص می‌گردد. در این رابطه تقسیم‌بندی‌های متفاوت دیگری را نیز می‌توان انجام داد. به‌طورکلی درصد احتمال هر فعالیت بر اساس تجربیات قبلی و نظر متخصصان و خبرگان، تعیین می‌گردد[۲۱]. بر اساس جداول۵ و ۶ ، شکل ۱ نمودار گرت فعالیت‌ها با در نظر گرفتن شرایط احتمالی هر فعالیت با روش دستی ترسیم‌شده است. بر اساس این شکل، معادلات شبکه ارائه شده است که می‌تواند برای حل شبکه به روش دستی به کار گرفته شود. در این تحقیق به‌منظور سهولت انجام محاسبات و همچنین نشان دادن کاربرد نرم‌افزار پریماورا، از استفاده گردید. داده‌های ورودی به نرم‌افزار بر اساس جداول ۵ و ۶ و همچنین شکل۱ ارائه شده است. در جدول ۷ نتایج اجرای نرم‌افزار آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شروع پروژه ۲۰۲۰/۰۱/۲۳ و زمان اتمام آن ۲۰۲۸/۰۳/۰۶ معادل ۲۹۶۶ روز است. احتمال انجام پروژه در این زمان با توجه به شکل ۲، ۴۱ درصد است. قابلیت این برنامه به‌گونه‌ای است که می‌توان به ازای احتمال‌های مختلف، زمان‌های متفاوتی برای اتمام پروژه به دست آورد. بالعکس می‌توان به ازای زمان‌های مورد انتظار، احتمال انجام پروژه در هر یک از این زمان‌ها را تعیین نمود. خروجی دیگر نرم‌افزار شکل۳ می‌باشد که نشان‌دهنده فرم استاندارد نمایش گره‌ای شبکه است. در این شکل مسیر حساس پروژه با رنگ قرمز نشان داده شده است. این مسیر مشابه مسیر بحرانی در روش CPM بوده و می‌توان به کمک آن فعالیت‌های مهم‌تر را بیشتر مورد توجه قرار داد. قابلیت‌های روش گرت سبب می‌شود که کارفرمایان و پیمانکاران پروژه‌ها بتوانند با شناخت تقریباً مناسبی از زمان و احتمال انجام پروژه، قراردادهای دقیق‌تری منعقد نمایند.

## ۸- نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌منظور تخمین زمان خاتمه پروژه با توجه به عدم قطعیت‌ها درزمان انجام فعالیت‌ها، با استفاده از قابلیت‌های موجود در شبکه گرت انجام شد. مدل شبکه‌ای این تحقیق، دید روشنی برای مدیران پروژه جهت اتخاذ تصمیم‌های به‌موقع فراهم می‌آورد تا در مرحله اجرا ، طبق برنامه پیش‌بینی‌شده، حرکت کنند و پروژه را با زمان و هزینه مطلوب به اتمام برسانند. محاسبات شبکه گرت با استفاده از نرم‌افزار پریماورا ریسک آنالیز صورت پذیرفت. پروژه شامل ۲۹ گره و۴۱ فعالیت بود. برای زمان‌های موردنظر برای هر فعالیت (جدول ۵ )و همچنین احتمال هر فعالیت (جدول ۶)، زمان کل پروژه ۲۹۶۶ روز با احتمال ۴۱ درصد تعیین گردید. به کمک این روش ، به ازای درصد احتمالات مختلف، زمان‌های مختلف اجرای پروژه به دست می‌آید.

## منابع

1. Kim, Y.-G., *Guidelines for Improved Risk Management on Tunnel and Underground Construction Projects in USA*. Magazine of korean Tunneling and Underground Space Association, 2019. 21(2): p. 10-24.
2. Liu, W., et al., *Safety risk factors of metro tunnel construction in China: an integrated study with EFA and SEM*. Safety science, 2018. 105: p. 98-113.
3. Brox, D., *Practical Guide to Rock Tunneling*. 2017: CRC Press.
4. Kosugi, T., et al., *Time to realization: Evaluation of CO2 capture technology R&Ds by GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) analyses.* Energy, 2004. 29(9-10): p. 1297-1308.
5. Nelson, R.G., A. Azaron, and S. Aref, *The use of a GERT based method to model concurrent product development processes.* European journal of operational research, 2016. 250(2): p. 566-578.
6. Tao, L., et al., *Schedule risk analysis for new-product development: The GERT method extended by a characteristic function.* Reliability Engineering & System Safety, 2017. 167: p. 464-473.
7. Zhou, L., et al., *Forecasting return of used products for remanufacturing using Graphical Evaluation and Review Technique (GERT).* International Journal of Production Economics, 2016. 181: p. 315-324.
8. Mahmoodzadeh, A. and S. Zare, *Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016. 8(5): p. 734-745.
9. Loprencipe, G., G. Cantisani, and P. Di Mascio. *Global assessment method of road distresses*. In *Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE*. 2014.
10. Xie, X., et al., *A real-time interaction platform for settlement control during shield tunnelling construction.* Automation in Construction, 2018.

94: p. 154-167.

11. Kollarou, C., *Excavation materials handling in the Loetschberg Base Tunnel using Decision Aids for Tunneling (DAT).* 2002, Massachusetts Institute of Technology.
12. Ritter, S., H. Einstein, and R. Galler, *Planning the handling of tunnel excavation material–A process of decision making under uncertainty*. Tunnelling and underground space technology, 2013. 33: p. 193-201.
13. Ioannou, P.G., *The economic value of geologic exploration as a risk reduction strategy in underground construction*. 1984, Massachusetts Institute of Technology.
14. Mahmoodzadeh, A., et al., *Updating ground conditions and time-cost scatter-gram in tunnels during excavation.* Automation in Construction, 2019. 105: p. 102822.
15. Guan, Z., et al., *Probabilistic estimation of ground condition and construction cost for mountain tunnels.* Tunnelling and underground space technology, 2014. 42: p. 175-183.
16. Pritsker, A.A.B., *GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part I. Fundamental.* J. of Industrial Eng., 1996. 17(5): p. 267-274.
17. Pritsker, A.A.B., *GERT: Graphical Evaluation and Review Technique, Part II. Probabilistic and Industrial Engineering.* J. Ind. Eng., 1966(6): p. 293-301.
18. Pillai, P.S., *A comprehensive study of project scheduling techniques and the introduction of new techniques.* 2015.
19. Kannan, R., *Graphical Evaluation and Review Technique (GERT).* 2014.
20. Whitehouse, G.E., *Systems analysis and design using network techniques.* 1973.
21. Whitehouse, G.E. and A.A.B. Pritsker, *GERT: part III—further statistical results; counters, renewal times, and correlations.* AIIE Transactions, 1969. 1(1): p. 45-50.
22. Robichaud, L.P., M. Boisvert, and J. Robert, *Signal flow graphs and applications*. 1962: London: Prentice-Hall International.
23. Lin, K.-P., et al., *Developing a Tω (the weakest t-norm) fuzzy GERT for evaluating uncertain process reliability in semiconductor manufacturing.* Applied soft computing, 2011. 11(8): p. 5165-5180.
24. Li, M., H. Yu, and P. Liu, *An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM.* Automation in Construction, 2018. 91: p. 284-292.
25. Eskesen, S., P. Tengborg, and J. Kampmann, *TH and Veicherts, ".* Guidelines for Tunneling Risk Management. Tunneling and Underground Space Technology, 2004. 19: p. 217-237.
26. Wagner, H. and M. Knights. *Risk management of tunneling works*. In *Workshop on safety in Tunnels and Underground Structures, Riyadh*. 2006.
27. Parker, H.W. and J. Reilly. *Life cycle cost considerations using risk management techniques*. In *World tunneling conference, Budapest*. 2009.
28. Mhetre, K., et al., *Risk Management of Construction Projects by using Primavera Risk Analysis.* 2019.