

انتخاب روش حفاری تونل، به کمک "فرآیند تحلیل شبکه‌ای"

بارویکرد زیست‌محیطی (مطالعه موردی: خط ۲ متروی مشهد)

علی غفاری سرجامی*، عضو هیات علمی، گروه عمران، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، مشهد، ایران
محمدحسن ده باشی، دانش آموخته کارشناسی، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: A.ghafari@eqbal.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۸ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۹۵-۷۷

چکیده

در اکثر رشته‌های کاربردی و صنعتی به خصوص رشته مهندسی عمران، تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری مهم، تأثیر اساسی بر بازده خروجی مورد نظر دارند. یکی از روشهای مطرح، برای تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری، روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) می‌باشد. در این مقاله سعی شده‌است تا با استفاده از روش مذکور و با توجه اساسی به معیارهای زیست‌محیطی، اقدام به انتخاب تکنولوژی حفاری از میان سه گزینه کند و پوش (Cut & Cover)، روش جدید تونل‌زنی اتریشی (NATM) و دستگاه حفاری تونل (TBM)، جهت مطالعه خط دو متروی مشهد صورت پذیرد. نتایج این تجزیه و تحلیل نشانگر این است که روش‌های مدیریتی و تصمیم‌گیری مانند ANP می‌توانند با توجه به رویکردهای مدنظر (مانند محیط زیست)، نتایج منطقی و قابل اطمینانی ارائه دهند. همچنین نتایج نشانگر این است که روش TBM در میان سه روش مذکور دارای ارجحیت بوده و تحت اکثر معیارها به جز معیارهای مالی، عملکرد قابل قبولی دارد.

واژه‌های کلیدی: ANP، AHP، تکنولوژی حفاری تونل، محیط زیست، خط دو مترو مشهد

۱- مقدمه

تدابیر می‌باشد. از دیرباز تصمیم‌گیری‌های مهم، در سرنوشت صنایع مختلف مؤثر بوده‌اند و صنعت ساختمان از این قاعده مستثنا نیست. این تصمیمات عمدتاً پیچیده، چندمعیاره و نیازمند تحلیل دقیق می‌باشند. انتخاب روش حفاری تونل مترو را می‌توان جزء این دسته تصمیمات مهم دانست و الزام به مد نظر قرار دادن معیارهای زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و دیگر معیارها را مسبب چند معیاری و پیچیده شدن این تصمیم‌گیری عنوان نمود. از این رو، نیاز به روشی مطمئن و نظام‌مند، برای ارزیابی چنین تصمیم‌گیری‌هایی و انتخاب بهینه روش حفاری تونل، احساس می‌گردد. یکی از مهمترین شاخه‌هایی که امروزه بشر باید توجه بیش‌ازپیش به آن داشته‌باشد، محیط زیست است. تقریباً تمام عوامل تشکیل

در دهه‌های اخیر، با افزایش حجم مهاجرت از روستاها و شهرهای کوچک به شهرهای بزرگ و افزایش جمعیت کلان شهرها، بافت شهرها متراکم تر شده و اهمیت استفاده از زمین مهم تر و بحرانی تر شده است. این مشکل که نه تنها مشهد، بلکه تمام کلان شهرهای دنیا با آن روبرو هستند، باعث ایجاد نیاز روز افزون به توسعه عمودی شهرها و در پی آن، گسترش سازه‌ها و فضاهای زیرزمینی شهری (UUS) می‌شود. حمل و نقل، عبور تأسیسات، دفع فاضلاب، آب رسانی و مسائل کاربردی دیگر از جمله اهداف ساخت این سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. در پی این نیاز، اجرای بهینه این زیرساخت‌ها نیاز به تدابیر مدیریتی دارد، که انتخاب بهترین روش برای تجزیه تحلیل و در گام بعد ساخت، از جمله این

محیط زیست، رابطه تنگاتنگی بین مهندسی عمران و محیط زیست می‌بایست وجود داشته باشد. بسیاری از پروژه‌های عمرانی، به صورت بالقوه، تأثیرات بزرگی بر محیط زیست دارند و می‌توانند خطرات جبران ناپذیری را، از آلوده ساختن مستقیم آب‌های سطحی و خاک گرفته، تا تأثیرات غیر مستقیم بر چشم انداز شهری، ایجاد نمایند (Bobylev, 2011). پس می‌توان از مباحث محیط زیستی، به عنوان یکی از مهم ترین دسته معیارها برای طراحی و تصمیم‌گیری در حوزه ساخت و ساز شهری یاد نمود؛ و پس از بهره‌گیری از روش مناسب برای ارزیابی و انتخاب (مانند روش ANP)، به توسعه اصولی فضاهای شهری کمک نمود. جدول ۱ نشانگر دلایل اهمیت ارزیابی‌های زیست محیطی برای انتخاب روش ساخت و ساز زیرزمینی است (Triantaphyllou, et al., 1999).

دهنده محیط زیست، تحت تأثیر فعالیت‌های انسان قرار گرفته‌اند، که این تأثیرات عموماً جنبه منفی داشته‌اند (OECD, 2012). هرچند در سالیان اخیر، توجه به محیط زیست، بیش از پیش بوده و سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در این زمینه صورت پذیرفته است، اما همچنان این موضوع جزء اولویت‌های اصلی توسعه در کشورهای پیشرفته و همچنین از نگرانی‌های دولت ایران است؛ از این رو فعالیت‌های صنعتی باید همواره نگاهی به معیارهای زیست محیطی داشته باشند، تا از حجم سهل‌انگاری‌ها کاسته و محیطی بهبود یافته و سالم را برای نسل‌های آینده فراهم آورد (Moynihan, et al., 1995). همانطور که گفته شد، در توسعه‌های صنعتی، به خصوص ساخت و ساز شهری، باید توجه ویژه‌ای به محیط زیست شود (Li, et al., 2015). هدف اصلی مهندسی عمران و تمام زیر شاخه‌های آن، آبادانی و بهبود شرایط زندگی بشر است؛ از این رو، باتوجه به اهمیت

جدول ۱. دلایل احتیاج به یک روش، جهت ارزیابی ملاحظات زیست محیطی و انتخاب تکنولوژی حفاری (Bobylev, 2011)

| علل | شرح |
|---|--|
| پیشرفت در توسعه فضاهای زیرزمینی شهری | نیاز به توانایی ایجاد UUS، باعث افزایش روز به روز ساخت و ساز در مناطق شهری شده است. |
| تعدد UCT های موجود | پیشرفت‌های اخیر صنعتی باعث به وجود آمدن بازه بزرگی از تکنولوژی‌ها شده است؛ مثل: تونل زنی اتوماتیک، دیوارهای دیافراگمی و حفاری‌افقی جهت‌دار و غیره |
| ملاحظات زیست محیطی مهم برای استفاده از UCTها در بافت‌های شهری | جدی‌ترین تأثیرات ناسازگار زیست محیطی شامل: اختلال در لیتوسفر (نشست سازه‌های مجاور محل عملیات) و هیدروسفر (آلودگی آب، تغییر سطح آب زیرزمینی و تغییر رویه) می‌شوند. |
| تعدد تأثیرات زیست محیطی | استفاده از گزینه‌های UCT، ممکن است دارای اثرات مثبت (مثل بهبود وضع) و تأثیرات منفی (مثل آلودگی هوا) باشد. از اینرو آنالیز مقایسه‌ای فواید و هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم زیست محیطی لازم است. |
| عدم اطمینان از رابطه بین انتخاب UCT، هزینه ساخت و تأثیرات محیطی | هر پروژه توسعه UUS منحصر به فرد است، و عملکرد فنی، اقتصادی و زیست محیطی آن باید به شکل سیستماتیک و دقیق مدنظر قرار گیرد. |

بهبود محیط شهری به
تعداد پروژه‌های توسعه شهری روز به روز در حال افزایش است، این موارد شامل پروژه‌های
عنوان هدف اصلی توسعه
سازه‌های زیرزمینی، که متمرکز بر بهبود وضعیت و تحمل پذیری محیط زیست هستند می‌شود.
مثلاً: جایگزینی پارکینگ‌های زیرزمینی و فضاهای سبز در مرکز شهرها به جای پارکینگ‌های روباز؛
UUS
نصب محفظه‌های زیرزمینی برای جمع‌آوری آب باران جهت سیستم زهکشی مرکب

۲- فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

دو دویی، عناصر موجود در مسئله، به وزن‌دهی نهایی
گزینه‌ها می‌پردازد. تعداد این مقایسات، بسیار زیاد و در نتیجه
دقت آن نسبت به سایر روش‌ها چون وزن دهی ساده، بیشتر
است (Ghodusi, et al., 2007). روش ANP شامل مفاهیم
متعددی است که در روش AHP نیز استفاده می‌گردد، مانند
مقایسات دودویی و ساختار هرمی؛ اما علاوه بر اشتراکات،
ویژگی‌های منحصر به فردی نیز وجود دارد، مانند
وابستگی‌های درونی و بیرونی، بازخوردها، معیارهای کنترلی
و استراتژیک و همچنین گره‌های کیفی (محاسن، موقعیت‌ها،
هزینه‌ها و ریسک‌ها) که در شبکه‌های غیر ساده، مانند دو
سطحی یا پیچیده استفاده می‌شوند؛ در مدل این مقاله از تمام
ویژگی‌های مزبور بهره گرفته شده است. این مدل با استفاده
از نرم افزار شبیه‌ساز روش ANP، به نام SuperDecisions
ساخته شده و جزئیات آن در ادامه نمایش داده خواهد شد.
چارچوب کلی فرآیند‌های تحلیلی AHP و ANP از سه
قسمت اصلی تشکیل می‌شود. قسمت اول، مربوط به هدف
کلی ارزیابی است که تمام شبکه، با عنایت به این هدف
قضاوت می‌شود؛ قسمت دوم، معیارها هستند که ابزار
سنجش گزینه‌ها می‌باشند. معیارها خود می‌توانند دارای
سطوح متعددی باشند؛ قسمت سوم و نهایی فرآیند،
گزینه‌هایی هستند که هدف فرآیند، انتخاب بهترین مورد از
بین آنها می‌باشد. در ادامه ابتدا به هدف و گزینه‌ها و سپس
به معیارها و مدلسازی پرداخته خواهد شد (Noritomi, et al.,
1994).

یکی از روش‌های مرسوم برای تصمیم‌گیری‌های چند
معیاره، فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) بوده که توسط توماس
ال. ساتی بنا نهاده شده است. ANP یک نظریه اندازه‌گیری
چند معیاره است، که با استفاده از تخصیص اعداد براساس
قضاوت‌های متخصصین، یا اندازه‌های عددی واقعی، اولویت
بندی مناسبی را به وجود خواهد آورد. این نظریات به تعیین
تأثیر منطقی دو عنصر به صورت مقایسه دودویی بر روی
عنصر سوم، با در نظر گرفتن معیارهای از پیش تعیین شده
صورت می‌پذیرد (Saaty, 2005). در روش ANP مبنای
اندازه‌گیری، مقایسات دودویی است. در تصمیماتی که
معیارهای زیادی دارند، تحلیل و مقایسه به صورت کلی
بسیار دشوار است، پس استفاده از ترفند تقسیم این مقایسات
به تعداد زیادی مقایسه کوچکتر، منطقی به نظر می‌رسد. در
ANP، یک نظریه در مقیاس کلی با پاسخ دادن به دو نوع
سوال بوجود خواهد آمد:

۱) با توجه به یک معیار خاص، کدام یک از دو عنصر
اهمیت، قوت و ارجحیت بیشتری دارد؟
۲) کدام یک از این دو عنصر، عنصر سوم را، با توجه به
معیاری خاص، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ (Bobylyev,
2011) روش ANP، شاخص تخصصی‌تر AHP یا همان
"فرآیند تحلیل هرمی" است. این روش نیز یکی از روشهای
تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. فرآیند تحلیل هرمی، رابطه
میان هدف تصمیم‌گیری، معیارهای انتخاب و گزینه‌ها را در
یک ساختار سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد و از طریق مقایسات



شکل ۱. نمودار طریقه ارزیابی و ساخت یک مدل ANP (Bobylev, 2011)

۲-۱- هدف

هدف فرآیند می‌تواند به شکل یک سؤال باشد؛ به عنوان مثال کدام گزینه کمترین اختلال و بیشترین محاسن را برای محیط شهری به ارمغان می‌آورد؟ نکته مهم، شفافیت ساختار هدف می‌باشد، تا بتوان مدل را به خوبی ارزیابی و قضاوت نمود. هدف این تحقیق، انتخاب بهترین روش حفاری تونل برای خط دو متروی شهری مشهد، با توجه به معیارهای تعیین شده می‌باشد. مباحث مربوط به این تونل، از مطالعات و برنامه ریزی تا اجرا، از اهمیت زیادی به ویژه برای محیط زیست مشهد برخوردار بوده است. تعدادی از این ملاحظات به شرح زیر می‌باشد:

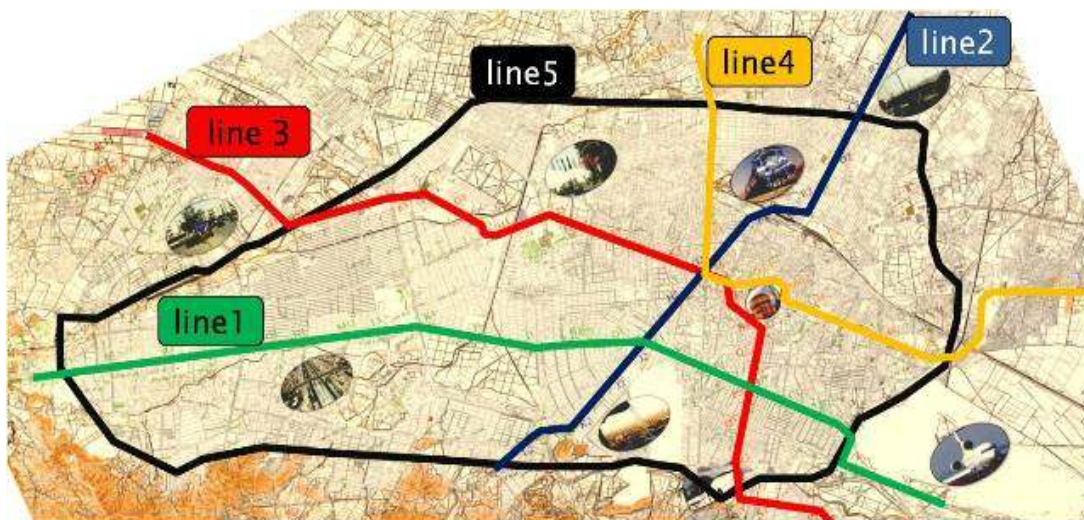
- ۱) تراکم بالای شهری روی مسیر تونل (جمعیت، منازل مسکونی و غیره)
- ۲) حجم بالای ترافیک وسایل نقلیه و حتی انسانها به خصوص در ساعات اوج در مسیرهای روی تونل
- ۳) بالا بودن سطح آبهای زیرزمینی در برخی مناطق
- ۴) وجود سازه‌های عظیم و حساس (مانند برج آلتون و موزه کوهسنگی) بر روی مسیر تونل

۵) بالا بودن هزینه تأمین و نگهداری ماشین آلات و کارمزد نیروهای متخصص

۶) آسیب پذیر بودن محیط زیست مشهد، به خصوص در برابر آلودگی هوا، خاک و آبهای زیرزمینی

۲-۱-۱- معرفی پروژه خط دو متروی مشهد

پروژه ساخت خط دو مترو مشهد که شامل حفاری و احداث سازه‌های زیرزمینی می‌شود، از اوایل دهه ۲۰۱۰ شروع شده و پس از گذراندن مرحله مطالعات و برنامه‌ریزی‌ها، حفاری آن آغاز گردید و در فوریه ۲۰۱۶ به پایان رسیده است. تاریخ بهره برداری از این خط، نیمه اول سال ۲۰۱۷ پیش بینی گردیده است. این پروژه، زیر ساخت اتصال شمال شرقی مشهد به جنوب شهر را فراهم می‌آورد (Host, 2015). مسیر خط دو و همچنین سایر خطوط متروی مشهد، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. مسیر خطوط مترو مشهد

مکانیزه رو به افزایش است. در کنار این پیشرفت‌ها، لزوم توجه به ملاحظات زیست محیطی و رعایت استانداردهای موجود به منظور کاهش صدمات احتمالی به ساکنین و کارکنان پروژه در محیط‌های شهری نیز افزایش می‌یابد. همواره همراه با عملیات حفاری سنتی، مسائلی وجود دارند که اثرات محیط زیستی را تحت تاثیر قرار میدهند و به عبارت دیگر اکولوژی و ویژگیهای پایدار نواحی مجاور را به خطر میاندازند. به منظور بررسی کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی این گونه از فعالیتهای عمرانی، توجه به عواملی چون میزان گرد و غبار تولید شده، لرزش زمین، آلودگی هوا، آلودگی ناشی از صدای ایجاد شده، ارتعاش،... می باشد. مجموعه‌ای از معیارهای زیست محیطی مرتبط با محیط شهری، توسط ارگان‌های بین‌المللی همچون World Bank، UNDP، UNEP، OECD و Eurostat تدوین شده است. معیارهای مرتبط با سازه‌های زیرزمینی نیز بر اساس مروری بر تأثیرات تکنولوژی‌های ساخت‌وساز زیرزمینی (UCT) بر محیط، و عملکرد آنها در پروژه های شهری متعدد، بدست آمده است. اکثر معیارهای فرآیند حاضر، حاصل گردآوری‌ها و مطالعات Nikolai Bobylev می‌باشد، که به صورت مجزا برای زیرشبکه های محاسن، موقعیت‌ها، هزینه‌ها و ریسک‌ها تعبیه گردیده اند (Bobylev، 2011) قابل ذکر است علاوه بر دیدگاه ساخت از لحاظ آلودگی هوا به لحاظ ترافیک شهری و آلودگی در آبهای زیرزمینی و توده خاک پرداخته شده است.

طول خط دو متروی مشهد، ۱۴/۳ کیلومتر می‌باشد، که ۰/۳ کیلومتر آن (در دو انتها) به صورت روش حفاری کند و پوش بوده و ۱۴ کیلومتر میانی آن به صورت روش حفاری تمام مکانیزه با استفاده از دستگاه TBM صورت گرفته است. عمق این تونل به صورت تابعی از موقعیت ایستگاه های مترو، از ۱۰ تا ۲۳ متر متغیر می‌باشد (Sedghiani, et al., 2008).

۲-۱-۲- اطلاعات لازم برای ارزیابی

نظرسنجی از افراد واقف بر شرایط محیط زیست مشهد و آگاه به پروژه‌های اجرای تونل، و همچنین دسترسی به برخی از اطلاعات و تجربیات اجرایی این پروژه، ما را در تحلیل، امکان سنجی و مدلسازی دقیق تریاری نمود.

۲-۲- معیارها

معیارهای تصمیم‌گیری، که پل ارتباطی بین هدف و گزینه‌ها می‌باشند، نقش اساسی را در خروجی فرآیندهای تحلیلی ایفا می‌نمایند. ابتدا این معیارها، با توجه به هدف سنجیده شده و ضریب تاثیر پیدا می‌کنند، سپس این گزینه‌ها با عنایت به معیار های مزبور، قضاوت شده و بهترین آنها انتخاب می‌گردد. شروع و توسعه ساخت تونلهای شهری به منظور کاهش ترافیک، بالابردن سطح رفاه شهروندان و ایجاد ارتباط بین نقاط مختلف شهر، استفاده از حفاریهای سنتی و

۳-۲- گزینه ها

گزینه ها آخرین سطح از هرم فرآیند را تشکیل می‌دهد و هدف را می‌توان به گونه ای، انتخاب بهترین از این میان دانست. جهت حفاری تونل مورد نظر، سه روش مرسوم تونل‌زنی، به عنوان گزینه‌های ارزیابی ANP انتخاب نموده ایم که در ادامه معرفی خواهد شد. روش حفاری کند و پوش (Cut & Cover)، روشی نسبتاً ساده است که برای ساخت تونل‌های کم عمق منطقی می‌باشد. ساخت این تونل به صورت چند مرحله‌ای و شامل حفاری کانال (ترانشه) و سپس اجرای پوشش مستحکم بر روی آن می‌باشد، که این پوشش، بستر مقاوم را برای بارهای اعمال شده بر روی تونل فراهم می‌آورد. از آنجا که این روش در عمق کم و نزدیک به سطح زمین اجرا می‌شود، مزاحمت چندانی برای آب‌های زیرزمینی ایجاد نخواهد نمود، اما از طرفی برای سطح زمین مشکل ایجاد می‌نماید. نکته ای که در اجرای این روش حائز اهمیت می‌باشد، مقاوم سازی دیواره های تونل یا همان پوشش اولیه است (Di, et al., 2016). روش جدید تونل‌زنی اتریشی (NATM)، روشی مناسب در میان روش‌های حفاری می‌باشد؛ تمایز بنیادین این روش نسبت به روش‌های پیشین، نهایت استفاده از مقاومت ژئوتکنیکی حجم عظیم سنگ‌های زمین، در راستای پایدارسازی تونل است (Ozdemir, 2006). این روش، با کمی دقت و انتخاب مقطع مناسب، امکان دسترسی به حداکثر پایداری را به ما می‌دهد، اما برای تونل‌های سطحی کارایی ندارد. انتخاب مقاطع متنوع و امکان تقویت‌های احتمالی، از امتیازات این روش است، اما دقت در حفاری و بازرسی‌های ژئوتکنیکی همواره باید مدنظر باشد (Cuia, et al., 2017). روش حفاری به کمک ماشین حفاری تونل (TBM)، یکی از مدرن‌ترین روش‌های موجود در حفاری تونل‌ها می‌باشد. این روش کاملاً مکانیزه می‌باشد و با استفاده از ماشین آلات گول‌پیکر و با سرعت بالا به صورت خودکار اقدام به حفاری و پایدار سازی همزمان تونل می‌نماید؛ از این روش برای تونل‌ها در عمق زیاد استفاده می‌شود. در کنار فرآیند خودکار، دقیق، اصولی و نسبتاً راحت این روش، هزینه اولیه و ثانویه بالا، نگهداری‌های پیچیده و مقطع ثابت نیز غیر قابل انکار می‌باشند (Repetto, et al., 2017).

۳- مدلسازی در ANP

پس از مشخص شدن ترکیب هدف، معیارها و دسته بندی آنها و گزینه‌های موجود، می‌توان اقدام به مدلسازی نمود. انتخاب بین ANP یا AHP بستگی به نوع وابستگی‌ها میان معیارها، بازخورد گزینه‌ها و ماهیت شبکه‌ای یا هرمی مدل دارد. ما برای این کار از هر دو مدل ارزیابی ANP و AHP استفاده کرده و از نرم افزار شبیه ساز SuperDecisions بهره برده ایم (Saaty, et al., 2004).

گام اول برای مدلسازی نرم افزاری انتخاب نوع شبکه است؛ برای این کار می‌توان از شبکه های ساده یا پیچیده استفاده نمود. شبکه های ساده به صورت تک لایه هستند و تمام مدل، از هدف تا گزینه‌ها، در یک صفحه قرار دارند. اما اگر از مؤلفه های کیفی BOCR (محاسن، موقعیت‌ها، هزینه‌ها و ریسک‌ها) و معیارهای کنترلی استفاده گردد، نیاز به شبکه های پیچیده بوجود خواهد آورد. شبکه های پیچیده در دو لایه یا بیشتر تعریف می‌شوند. لایه اول، شامل هدف و گره‌های BOCR که هر کدام از این گره ها دارای زیرشبکه مربوط به خود می‌باشند، تشکیل می‌شود. در لایه دوم، یا همان زیرشبکه‌های BOCR، معیار های کنترلی وجود دارند که هر کدام در زیر شبکه خود می‌توانند دارای معیار و سپس زیر معیار باشند. محدودیتی برای تعداد لایه ها وجود ندارد و تعداد لایه ها تابعی از معیار ها می‌باشد. در آخرین لایه از شبکه نیز گزینه‌ها قرار دارند. پس از تعیین نوع شبکه، گام بعدی را می‌توان تبدیل هدف، معیارها و گزینه‌ها، به مؤلفه‌های نرم افزاری دانست. برای این امر، هدف، تک تک معیارها و گزینه‌ها به صورت گره (Node) تعریف می‌شوند. گره ها براساس تقسیم بندی و ماهیتشان درون خوشه‌ها (Cluster) قرار می‌گیرند. در صورت ساده بودن شبکه، تمام خوشه ها در یک صفحه و در صورت پیچیده بودن شبکه، در زیرشبکه تعیین شده قرار خواهند گرفت. پس از ساخت خوشه‌ها و قراردادن گره‌ها درونشان، نیاز به اعمال مفاهیم موجود در ANP و AHP وجود دارد؛ یعنی اعمال وابستگی‌ها، درون وابستگی‌ها و بازخوردها در نرم‌افزار؛ براین اساس می‌توان وابستگی‌های موجود را به سه دسته زیر تقسیم نمود:

۱) پیکان‌های یک طرفه، از گره مؤثر به گره وابسته،

۲) پیکان‌های دوطرفه، که نشان دهنده تأثیر متقابل اند و

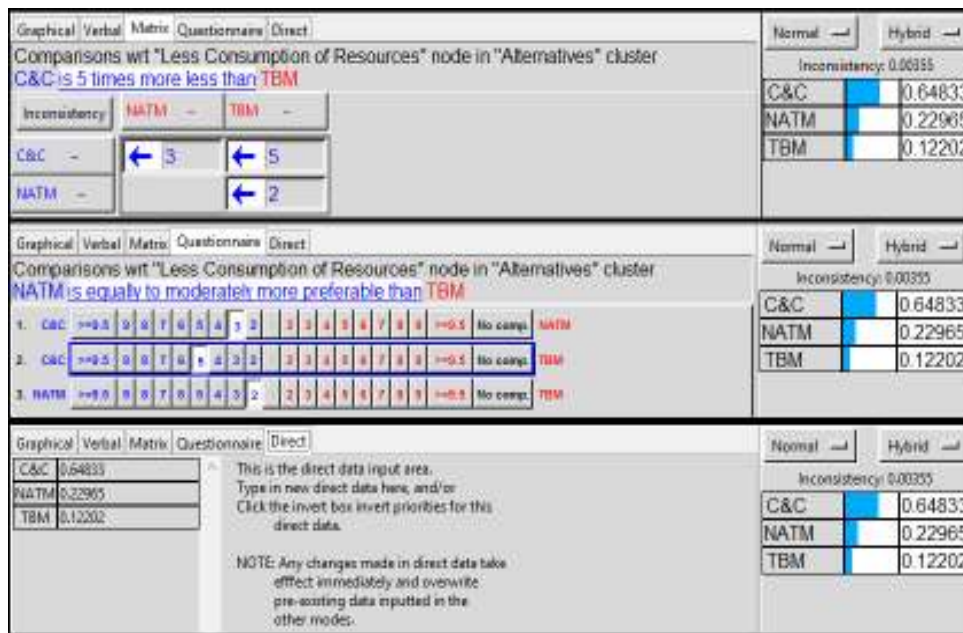
مشخص می‌نمایند؛ مانند میزان استفاده از منابع طبیعی توسط روش TBM در مقایسه با NATM. نرم افزار، روش‌ها و اشکال مختلفی را برای ورود قضاوت‌ها تعبیه نموده است، که عبارت‌اند از گرافیکی، شفاهی، ماتریسی، پاسخنانه ای و مستقیم. تصویر سه نمونه از ورودی ماتریسی، پاسخنانه ای و مستقیم در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

به طور کلی مراحل ساخت مدل ANP را می‌توان با گام‌های زیر تعیین نمود:

- داشتن تعریف و تحلیل شفاف از هدف، معیارها و گزینه‌ها
- انتخاب نوع شبکه (اعم از ساده و پیچیده) با توجه به BOCR
- ساخت خوشه‌ها در لایه‌های مدنظر و ایجاد گره‌ها درون خوشه‌های مربوط
- ایجاد وابستگی‌های بیرونی، درونی و بازخورد‌ها در صورت نیاز
- وارد نمودن اطلاعات و قضاوت‌ها در مقایسات دودویی

۳) پیکان‌های دایروی، که نشان دهنده ارتباط بین گره‌های یک خوشه یا همان درون وابستگی می‌باشد، نشان می‌دهد.

در حالت معمول یا در مدل AHP تمام پیکان‌ها از طرف هدف به معیارها و سپس به گزینه‌ها ختم می‌شوند، اما در ANP این امکان وجود دارد که معیارها براساس گزینه‌ها سنجیده شوند تا نقاط قوت و ضعف گزینه‌ها از بین معیارها مشخص شوند، که به آن در اصطلاح بازخورد می‌گویند. پس از انجام مراحل فوق الذکر، مدل آماده دریافت اطلاعات ورودی و قضاوت خبرگان از طریق مقایسات دودویی می‌شود. اطلاعات ورودی به نرم افزار می‌تواند دارای ماهیت کمی، کیفی یا هر دو باشد. ورودی کمی، ارقام واقعی هستند که به صورت دقیق به نرم‌افزار داده می‌شوند، مانند مقدار هزینه مستقیم روش Cut & Cover؛ نرم افزار در نهایت این نوع ورودی را نرمال‌سازی و با توجه به معیارها، گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند. ورودی‌های کیفی، نسبت‌هایی هستند که حاصل قضاوت خبرگان در مقایسات دودویی‌اند و نسبت ارجحیت یک معیار یا یک گزینه را نسبت به دیگری



شکل ۳. مقایسات دودویی به روش‌های ماتریسی، پاسخنانه ای و مستقیم، نرم افزار SuperDecisions

Inconsistency عددی است که از فرمول ماتریسی معینی به دست می‌آید (Saaty, 2004). نرخ ناسازگاری، اشتباهات احتمالی در اعمال قضاوت‌ها را آشکار می‌سازد، به عنوان

یکی از مفاهیمی که هنگام اعمال قضاوت‌ها با آن برخورد می‌نماییم و نیاز توجه به آن احساس می‌شود، مفهوم نرخ ناسازگاری است. نرخ ناسازگاری یا همان

و چگونگی سنجش گزینه‌ها و نتایج زیرشبکه در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین اولویت بندی سه معیار این مجموعه نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

۳-۱-۱- تحلیل نتایج میانی در زیرشبکه "محاسن"

با توجه به جداول می‌توان دریافت که مهم‌ترین معیار از میان سه معیار این بخش، ساخت یک زیرساخت به روز است؛ البته باید نیم‌نگاهی به چگونگی استفاده از منابع و همچنین تهویه مناسب تونل داشته باشیم. منظور از تهویه مناسب، شرایط و وجود بستر مناسب برای تهویه هوا، چه در طول حفاری و ساخت و چه در هنگام بهره‌برداری است؛ نتایج نشان می‌دهد که در مجموع، TBM با توجه به معیارهای مربوط به "محاسن"، می‌تواند بهترین انتخاب باشد و دو روش دیگر اولیوی مشابه دارند.

مثال فرض کنید که موضوع الف (مثلاً TBM)، در قضاوت ها، سه برابر بهتر از موضوع ب (مثلاً NATM) شناخته شده است، همچنین موضوع ب از موضوع پ (مثلاً Cut & Cover) دو برابر ارجح است، در اینجا طبیعتاً موضوع الف از موضوع پ باید شش برابر برتری داشته باشد و هرچه قضاوت اعمالی در مقایسه بین موضوعات الف و پ، از این عدد دور تر باشد، رأی، غیر دقیق تر خواهد بود. اگر عدد نرخ ناسازگاری از ۰/۱ بیشتر باشد، قضاوت دارای دقت معقولی نبوده و باید اصلاح گردد.

۳-۱-۳ ساخت مجموعه معیار برای "محاسن"

اولین زیرشبکه و مجموعه معیار در این مدل، "محاسن" می‌باشد. منظور از این مؤلفه، فوایدی است که این پروژه برای محیط زیست شهری به ارمغان می‌آورد. این مجموعه به صورت هرمی تک‌لایه و شامل سه معیار می‌باشد. معیارها

جدول ۲. اولویت گزینه‌ها با توجه به معیارهای همراه با "محاسن" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار | معیار اندازه‌گیری | گزینه‌ها | | |
|-----------------------|-------------------|-------------|------|------|
| | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| استفاده کمتر از منابع | قضاوت خبرگان | 0.64 | 0.22 | 0.12 |
| تهویه مناسب | قضاوت خبرگان | 0.50 | 0.25 | 0.25 |
| زیرساخت به روز | قضاوت خبرگان | 0.06 | 0.21 | 0.71 |
| زیر شبکه "محاسن" | محاسبات نرم افزار | 0.29 | 0.22 | 0.48 |

جدول ۳. اولویت معیار های همراه "محاسن" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار اندازه‌گیری | معیارها | | |
|-------------------|----------------|-------------|-----------------------|
| | زیرساخت به روز | تهویه مناسب | استفاده کمتر از منابع |
| زیرشبکه "محاسن" | 0.58 | 0.10 | 0.30 |

۳-۲- ساخت مجموعه معیار برای "موقعیت‌ها"

"موقعیت‌ها" فواید بالقوه برای محیط شهری‌اند
 (Bobylev, 2011). معیارهای مربوط به "موقعیت‌ها"، که
 حاصل مطالعات N. Bobylev می‌باشد (Bobylev, 2007)،
 چشم اندازی از آینده عملکرد زیرساخت را تعریف
 می‌نمایند. توضیحی از این معیارهای شش‌گانه، در جدول ۴
 ذکر شده است (Bobylev, 2008).

جدول ۴. تشریح معیارهای مربوط به "موقعیت‌ها"

| معیارها | شرح |
|-----------------|---|
| عملکرد | معیار عملکرد برای دانستن اینکه آیا عناصر زیرساخت می‌توانند چند کاره باشند یا خیر، مهم است، و در صورت چندکاره بودن، امکانات موردنیاز برای عملکردهای آینده را می‌توان فراهم کرد. به عنوان مثال: تونل‌های تاسیساتی باید توانایی گنجاندن کابل‌های جدید و با تعداد افزایشی را داشته باشند؛ یا پارکینگ‌ها توانایی گنجاندن انواع مختلف وسایل نقلیه را داشته باشند. |
| استفاده از زمین | معیار استفاده از زمین برای این سوال باید مدنظر باشد که: آیا یک عنصر زیرساخت، به فضای بیشتر یا کمتری در آینده نیاز پیدا می‌کند یا خیر؟ و اینکه چگونه کمبود فضا در آینده حل خواهد شد؟ |
| یکپارچگی | معیار یکپارچگی برای قضاوت میزان پیوستگی داخلی و خارجی زیرساخت و میزان یکپارچگی آن با دیگر ساختارهای شهر، استفاده میشود. پیاده‌روهای مجزای زیرزمینی و روزمینی یک مثال ساختاری غیر یکپارچه‌اند. آنها دچار مشکلات نگهداری میشوند، از جمله مشکلات امنیت عمومی و عدم وجود آسایش برای افراد. از آنسو، مسیرهای رو یا زیرزمینی که به ساختمان‌های مجاور متصل‌اند، باعث صرفه‌جویی در وقت سفر و آسایش افراد و بوجود آمدن محیطی چند منظوره می‌شوند. |
| انعطاف پذیری | معیار انعطاف پذیری نشان دهنده پتانسیل نوسازی و به روز رسانی عناصر زیرساخت است. به عنوان مثال برای انعطاف پذیری می‌توان به نصب وسایل جدید درون ساختار و تغییر طراحی فضای داخلی آنها اشاره کرد. |
| منطقی بودن | معیار معقولیت باتوجه به استفاده از منابع طبیعی، از جمله فضای شهری، بسیار مهم است. این معیار همچنین نشان دهنده فشار یک عنصر زیرساخت بر مولفه‌های طبیعی یا مصنوعی محیط شهری نیز هست. مثلاً: توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل ممکن است باعث افزایش بیش از حد توریست شود و فشار ناخواسته‌ای بر مناطق تاریخی و فرهنگی شهر قرار دهد، و دارایی‌های پنهان شهر را به خطر بیناندازد. |
| آسیب پذیری | معیار آسیب پذیری، در ارتباط با یک چشم انداز کلی از محیط شهری و اصول امنیت محیط زیست است. زیرساخت‌های آسیب پذیر مهم، باعث افزایش چشم گیر آسیب پذیری کلی شهر می‌شوند. مثلاً: زیرساختهای زیرزمینی درمقابل سیل آسیب پذیرند، پس اگر تاسیسات مهم شهری مثل حمل و نقل و مسیرهای اضطراری در زیر زمین مستقر شوند، باعث آسیب پذیری شهر به خصوص درمناطق در معرض سیل می‌شود. |

- معیارهای مزبور دارای ویژگی‌های زیر می‌باشند:
- بیانگر مفاهیم پیچیده‌اند
 - به سختی قابل اندازه‌گیری هستند
 - ذهنی و سلیقه‌ای می‌باشند
 - با توجه به هدف ارزیابی، به سختی قابل مقایسه خواهند بود.
- بهترین راه برای ارزیابی معیارهای این دسته و سپس ارزیابی گزینه‌ها، استفاده از بازخورد می‌باشد. با این کار نقاط قوت و ضعف گزینه‌ها نیز به سادگی مشخص می‌شوند. اشکال ۴، ۵، ۶ و جدول ۵ نشانگر نتیجه قضاوت‌ها در بازخورد گزینه‌ها و ویژگی‌های UCTها می‌باشند.

| Inconsistency: 0.00730 | | |
|------------------------|--|---------|
| Flexibili~ | | 0.15076 |
| Functiona~ | | 0.21574 |
| Integrati~ | | 0.24068 |
| Land Use | | 0.07607 |
| Rationali~ | | 0.07607 |
| Vulnerabi~ | | 0.24068 |

شکل ۴. مقایسات بازخوردی برای Cut & Cover

| Inconsistency: 0.02071 | | |
|------------------------|--|---------|
| Flexibili~ | | 0.28898 |
| Functiona~ | | 0.27748 |
| Integrati~ | | 0.16630 |
| Land Use | | 0.08797 |
| Rationali~ | | 0.08345 |
| Vulnerabi~ | | 0.09583 |

شکل ۵. مقایسات بازخوردی برای NATM

| Inconsistency: 0.02631 | | |
|------------------------|--|---------|
| Flexibili~ | | 0.05864 |
| Functiona~ | | 0.08526 |
| Integrati~ | | 0.10291 |
| Land Use | | 0.12740 |
| Rationali~ | | 0.30931 |
| Vulnerabi~ | | 0.31649 |

شکل ۶. مقایسات بازخوردی برای TBM

جدول ۵. نتایج کلی بازخورد برای "موقعیت‌ها"

| ویژگی | گزینه‌ها | | |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | Cut & Cover | NATM | TBM |
| نقاط قوت UCT | آسیب پذیری | انعطاف پذیری | آسیب پذیری |
| | یکپارچگی | عملکرد | منطقی بودن |
| نقاط ضعف UCT | منطقی بودن | منطقی بودن | انعطاف پذیری |
| | استفاده از زمین | استفاده از زمین | عملکرد |

بنا به وابستگی‌هایی که بین معیارهای مربوط به "موقعیت‌ها" وجود دارد، از مفهوم وابستگی درونی در این دسته معیار نیز استفاده گردید. این امکان وجود دارد که تمام معیارها به یک معیار یا بالعکس وابسته نباشند، اما به عنوان مثال، معیار "منطقی بودن" به پنج معیار دیگر وابسته است و همچنین معیار "استفاده از زمین"

می‌تواند به سایر معیارها وابسته باشد. این وابستگی‌ها و قضاوت‌های مربوط به آن، به حصول نتیجه دقیق‌تر، کمک بسزایی می‌نماید. شکل ۷ نشانگر نتیجه قضاوت‌های وابستگی درونی مربوط به معیار "منطقی بودن" می‌باشد. نتایج ارزیابی مربوط به زیرشبکه "موقعیت‌ها" نیز در جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

Inconsistency: 0.02607

| | | |
|------------|--|---------|
| Flexibili~ | | 0.24464 |
| Functiona~ | | 0.14349 |
| Integrati~ | | 0.28697 |
| Land Use | | 0.10830 |
| Vulnerabi~ | | 0.21660 |

شکل ۷. مقایسات وابستگی درونی "منطقی بودن"

جدول ۶. اولویت گزینه‌ها با توجه به معیارهای همراه با "موقعیت‌ها" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیارها | معیار اندازه‌گیری | گزینه‌ها | | |
|---------------------|-------------------|-------------|------|------|
| | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| انعطاف پذیری | قضاوت خبرگان | 0.29 | 0.53 | 0.16 |
| عملکرد | قضاوت خبرگان | 0.31 | 0.49 | 0.19 |
| یکپارچگی | قضاوت خبرگان | 0.49 | 0.31 | 0.19 |
| استفاده از زمین | قضاوت خبرگان | 0.12 | 0.22 | 0.64 |
| منطقی بودن | قضاوت خبرگان | 0.08 | 0.13 | 0.78 |
| آسیب پذیری | قضاوت خبرگان | 0.30 | 0.10 | 0.60 |
| زیرشبکه "موقعیت‌ها" | محاسبات نرم افزار | 0.26 | 0.30 | 0.42 |

- ۱) هزینه‌های مستقیم ساخت
 - ۲) هزینه‌های غیرمستقیم به سبب ایجاد اختلال در محیط شهری
 - ۳) هزینه‌های زیست‌محیطی
 - ۴) هزینه‌های مربوط به دارایی‌های غیرملموس (Bobylev, 2011)
- نکته بسیار مهم در مورد اعمال قضاوت‌ها با توجه به معیارهای مربوط به هزینه‌ها، احتمال نیاز به تغییراتی در نوع سؤال است، زیرا این دسته معیارها برخلاف دو دسته قبلی، ماهیتی منفی دارند. به عنوان توضیح بیشتر، همانطور که در بخش ۳ اشاره شد، مدل تحلیلی می‌تواند پیچیده و چند سطحی یا ساده و تک سطحی باشد؛ همینطور اشاره شد که در شبکه‌های پیچیده، زیرشبکه‌های اصلی BOCR وجود دارند که این امر به ما اجازه استفاده از فرمول‌های استاندارد را خواهد داد. فرمول‌های استاندارد نیز این امکان را فراهم می‌نمایند تا ماهیت منفی معیارهایی نظیر "هزینه‌ها"، در محاسبات اعمال شوند؛ پس در قضاوت‌ها باید هزینه‌برترین گزینه انتخاب گردد؛ اما اگر مدل تک سطحی بوده و از فرمول‌های استاندارد استفاده نگردد، روشی که کمترین هزینه را تحمیل می‌کند می‌بایست بیشترین امتیاز را بگیرد، پس نوع شبکه، مؤثر بر نوع قضاوت می‌باشد. تفاوت مذکور، در جدول ۷ نمایش داده شده است (Saaty, et al., 2003).

جدول ۷. انواع بررسی قضاوت‌ها با توجه به نوع شبکه

| نوع شبکه و استفاده از فرمول | نمونه سؤال مقایسه دودویی |
|---|---|
| شبکه ساده، بدون استفاده از فرمول | کدام گزینه (TBM یا NATM) با توجه به معیار (استفاده از زمان) عملکرد بهتر و منطقی‌تری دارد؟ |
| شبکه پیچیده BOCR، با استفاده از فرمول مانند Additive (negative) | کدام گزینه (TBM یا NATM) با توجه به معیار (استفاده از زمان) سهم و مقدار بیشتری دارد؟ |

مربوط به محیط زیست، اولویت بالاتری کسب نموده اند. نتایج کامل مربوط به "هزینه‌ها" در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که ابزار تحلیل، قضاوت خبرگان آگاه بوده و از مقادیر کمیته استفاده نگردیده است.

۳-۲-۱- تحلیل نتایج میانی در زیرشبکه "موقعیت‌ها"

نتایج میانی زیرشبکه "موقعیت‌ها"، روش TBM را به عنوان بهترین گزینه، با توجه به دسته معیارهای مربوط، نشان می‌دهد. دلیل این انتخاب، میزان آسیب پذیری کم این روش و ایجاد حداقلی مزاحمت برای محیط شهری، باتوجه به اصول مهندسی است. البته نتایج در این زیرشبکه نمایانگر نزدیکی امتیاز بین گزینه‌ها نیز می‌باشد، زیرا هر UCT طبق جدول ۵، دارای نقاط قوت قابل توجهی است که باعث سختی در انتخاب بین UCTها می‌گردد.

۳-۳- ساخت مجموعه معیار برای "هزینه‌ها"

زیرشبکه هزینه‌ها، شامل یک مدل تک سطحی AHP است که متشکل از هدف ارزیابی، معیارها و گزینه‌ها می‌باشد. تعداد معیارهای این مجموعه کمی بیشتر از سایر مجموعه‌ها و حدود ۲۲ عدد است، اما با قراردادن این تعداد معیار در یک لایه، پیچیدگی و چند سطحی بودن زیرشبکه کنترل شده است. این معیارها به طور کلی نشانگر هزینه‌هایی می‌باشند که ممکن است پروژه به محیط شهری تحمیل نماید. این ۲۲ معیار به صورت کلی می‌توانند در چهار گروه تقسیم‌بندی شوند:

در این مدل، از شبکه پیچیده BOCR و فرمول‌های استاندارد بهره برده شد، و به همین دلیل، در قضاوت‌ها هزینه‌برترین گزینه انتخاب شده است. همچنین، معیارها با توجه به خصوصیات محیطی شهر، سنجیده شده و هزینه‌های

جدول ۸ اولویت گزینه ها و معیارها در زیر شبکه "هزینه‌ها" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار | اولویت | معیار اندازه گیری | گزینه ها | | |
|--------------------------------|--------|-------------------|-------------|------|------|
| | | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| آلودگی هوا حاصل از ساخت | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.76 | 0.14 | 0.08 |
| آلودگی هوا حاصل از ترافیک شهری | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.81 | 0.09 | 0.09 |
| استفاده از مصالح ساختمانی | 0.02 | فضاوت خبرگان | 0.07 | 0.17 | 0.75 |
| هزینه های مستقیم ساخت | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.16 | 0.06 | 0.77 |
| مصرف انرژی ماشین آلات | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.07 | 0.18 | 0.74 |
| خاکبرداری مصالح حفر شده | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.12 | 0.27 | 0.59 |
| لرزش زمین | 0.02 | فضاوت خبرگان | 0.13 | 0.20 | 0.66 |
| تغییرات در آب زیرزمینی | 0.10 | فضاوت خبرگان | 0.08 | 0.31 | 0.60 |
| ارزشهای زیبایی ظاهری | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.70 | 0.20 | 0.08 |
| سر و صدا | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.76 | 0.14 | 0.08 |
| جمع آوری آب باران/زیرزمینی | 0.07 | فضاوت خبرگان | 0.53 | 0.29 | 0.16 |
| افت قیمت املاک | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.73 | 0.18 | 0.08 |
| تغییر مسیر در ترافیک خیابان ها | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.81 | 0.09 | 0.09 |
| افت درآمد زایی | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.70 | 0.17 | 0.17 |
| روسازی مجدد سطح | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.80 | 0.10 | 0.10 |
| برداشت سطح خیابان ها | 0.01 | فضاوت خبرگان | 0.80 | 0.10 | 0.10 |
| خاک برای پر نمودن مجدد حفره‌ها | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.57 | 0.28 | 0.14 |
| آلوده سازی خاک | 0.13 | فضاوت خبرگان | 0.13 | 0.33 | 0.52 |
| پایداری سازی خاک | 0.11 | فضاوت خبرگان | 0.62 | 0.23 | 0.13 |
| زمانبر بودن | 0.03 | فضاوت خبرگان | 0.59 | 0.34 | 0.06 |
| مصرف آب در ساخت | 0.08 | فضاوت خبرگان | 0.16 | 0.29 | 0.53 |
| آب هدر رفته توسط ماشین آلات | 0.08 | فضاوت خبرگان | 0.16 | 0.29 | 0.53 |

جدول ۹. اولویت گزینه‌ها در "هزینه‌ها" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار اندازه‌گیری | گزینه‌ها | | |
|--------------------------------------|-------------|------|------|
| | Cut & Cover | NATM | TBM |
| محاسبات نرم افزار زیرشبکه "هزینه‌ها" | 0.35 | 0.25 | 0.39 |

وسائل و یا شکست های مشابه اند. ارزیابی ریسک و مدیریت آن یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت پروژه‌های عمرانی می‌باشد و بر روی پیشرفت اصولی، دقیق و بی‌خطر پروژه تأثیر بسزایی دارد. زیرشبکه "ریسک‌ها"، به صورت AHP مدل‌سازی شده است. هدف ارزیابی در این بخش می‌تواند درک تأثیرات منفی احتمالی حاصل از یک UCT بر محیط شهری باشد (Bobylev, 2011). زیرشبکه "ریسک‌ها" خود دارای دو سطح، که متشکل از معیارهای کنترلی و زیرمعیارها هستند، می‌باشد. جدول ۱۰، اولیاتی از معیارهای کنترلی و گزینه‌ها را، با توجه به هدف ارزیابی و براساس نتایج زیرشبکه های معیارها، نمایش می‌دهد؛ جدول ۱۱ نیز نتایج مربوط به زیرشبکه "زمین" و جدول ۱۲، نتایج مربوط به زیرشبکه "حوادث جزئی" را ارائه می‌دهند. معیار کنترلی "کیفیت تونل ساخته شده"، فاقد زیرشبکه است و نتایج مربوط به آن در جدول ۱۰ ذکر گردیده است.

۳-۳-۱- تحلیل نتایج میانی در زیرشبکه "هزینه‌ها"

قضاوت‌های مربوط به زیرشبکه "هزینه‌ها"، روش TBM را پرهزینه‌ترین روش دانسته است. ایجاد آلودگی‌های آبی و خاکی و همچنین هزینه‌های بالای دستگاه، از جمله دلایل اصلی این نتیجه اند. دومین روش پرهزینه با اختلاف کم، Cut & Cover می‌باشد؛ زیرا باعث ایجاد آلودگی هوا و مزاحمت برای محیط شهری میگردد. در نهایت NATM با اختلاف نه‌چندان محسوس نسبت به Cut & Cover، کمترین هزینه را برای محیط شهری بوجود می‌آورد. نتیجه کلی این ارزیابی نشان می‌دهد که انتخاب روش حفاری، صرفاً بر پایه "هزینه‌ها" امکان پذیر نیست، زیرا UCTها با توجه به این دسته معیار، رفتار تقریباً مشابهی دارند.

۳-۴- ساخت مجموعه معیار برای "ریسک‌ها"

ریسک‌ها، شامل هزینه‌های بالقوه پروژه در موارد اتفاقات تصادفی، شرایط ناشناخته ژئوتکنیکی، عملکرد ضعیف

جدول ۱۰. اولویت‌های مربوط به زیرشبکه "ریسک‌ها" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار کنترلی | اولویت معیار کنترلی | معیار اندازه‌گیری | گزینه‌ها | | |
|----------------------|---------------------|-------------------|-------------|------|------|
| | | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| زمین | 0.60 | قضاوت خبرگان | 0.57 | 0.28 | 0.14 |
| اتفاقات جزئی | 0.10 | قضاوت خبرگان | 0.62 | 0.13 | 0.23 |
| کیفیت تونل ساخته شده | 0.30 | قضاوت خبرگان | 0.57 | 0.28 | 0.14 |
| زیرشبکه "ریسک‌ها" | | محاسبات نرم افزار | 0.51 | 0.28 | 0.19 |

جدول ۱۱. اولویت های مربوط به زیرشبکه "زمین" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار | اولویت معیار | معیار اندازه گیری | گزینه ها | | |
|--------------------------|--------------|-------------------|-------------|------|------|
| | | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| تصادفات اتفاقی حین حفاری | 0.11 | قضاوت خبرگان | 0.64 | 0.22 | 0.12 |
| ریزش چشم گیر زمین | 0.68 | قضاوت خبرگان | 0.64 | 0.22 | 0.12 |
| نشست جزئی زمین | 0.19 | قضاوت خبرگان | 0.10 | 0.58 | 0.30 |
| زیرشبکه "زمین" | | محاسبات نرم افزار | 0.54 | 0.29 | 0.15 |

جدول ۱۲. اولویت های مربوط به زیرشبکه "اتفاقات جزئی" (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار | اولویت معیار | معیار اندازه گیری | گزینه ها | | |
|---------------------------|--------------|-------------------|-------------|------|------|
| | | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| آلودگی هوا | 0.18 | قضاوت خبرگان | 0.78 | 0.10 | 0.10 |
| سقوط اجسام | 0.09 | قضاوت خبرگان | 0.77 | 0.14 | 0.07 |
| آبگونه شدن از آب باران | 0.16 | قضاوت خبرگان | 0.71 | 0.21 | 0.06 |
| آبگونه شدن از آب زیرزمینی | 0.18 | قضاوت خبرگان | 0.14 | 0.28 | 0.57 |
| آلوده سازی آب و خاک زمین | 0.37 | قضاوت خبرگان | 0.14 | 0.28 | 0.57 |
| زیرشبکه "اتفاقات جزئی" | | محاسبات نرم افزار | 0.41 | 0.22 | 0.35 |

۳-۵- معیار های استراتژیک و امتیازدهی BOCR

نیاز به امتیازدهی و تعیین ضریب BOCR، زمانی احساس خواهد شد که برای ارزیابی نهایی، از فرمول استاندارد "افزاینده-کاهنده" استفاده شود (در بخش بعدی، فرمول های استاندارد بررسی خواهند شد). امتیازدهی به BOCR و قضاوت مقایسه ای آنها امری دشوار است، به همین منظور از معیارهای کمکی، به نام "معیارهای استراتژیک"، برای ضریب دهی به BOCR استفاده می شود. این معیارها، چشم اندازی از عملکرد گزینه ها را از جهات مختلف ارائه می دهند و خود نیز با عنایت به هدف، به صورت زوجی

۳-۴-۱- تحلیل نتایج میانی در زیرشبکه "ریسک ها"

نتایج این قسمت، حاکی از عملکرد ضعیف روش Cut & Cover تحت ریسک ها می باشد. بهترین گزینه با عنایت به معیارهای مختلف مربوط به ریسک، روش TBM است، زیرا به صورت مکانیزه و بادقت بالا انجام می گیرد. عملکرد NATM ضعف حدود ۱۰ درصدی نسبت به TBM را نشان می دهد، اما این مقدار کافی نیست و انتخاب قطعی روش حفاری از بین این دو، صرفاً باتوجه به "ریسک ها"، منطقی نخواهد بود.

"موقعیت‌ها"، "هزینه‌ها" و "ریسک‌ها" انجام شده است. نتایج مذکور در جدول ۱۴ نمایش داده شده است. شکل ۸، صفحه ارزیابی معیارهای استراتژیک و BOCR را ارائه می‌دهد.

مقایسه می‌شوند. در این تحقیق، از معیارهای استراتژیک مقاله N. Bobylev (2011) استفاده شده است. جدول ۱۳، نام و اولویت این معیارها را ذکر نموده است. ارزیابی و امتیازدهی BOCR با توجه به معیارهای استراتژیک و با استفاده از سه نمره بالا، متوسط و پایین (Medium.High) و صورت پذیرفته است، که این ارزیابی نیز با نیم نگاهی به نتایج عملکرد UCTها با توجه به "محاسن"،

جدول ۱۳. اولویت معیارهای استراتژیک (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| معیار | اولویت |
|--|--------|
| عملکرد مطمئن زیرساخت | 0.55 |
| کمترین اختلال در محیط شهری در طول ساخت | 0.31 |
| بازسازی مناطق شهری | 0.12 |

جدول ۱۴. عملکرد UCT تحت "محاسن"، "موقعیت‌ها"، "هزینه‌ها" و "ریسک‌ها"

| مؤلفه تصمیم‌گیری | بهترین روش | عملکرد گزینه‌های تکنولوژی | | |
|------------------|------------|---------------------------|------|------|
| | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| محاسن | TBM | 0.29 | 0.22 | 0.48 |
| موقعیت‌ها | TBM | 0.26 | 0.30 | 0.42 |
| هزینه‌ها | NATM | 0.35 | 0.25 | 0.39 |
| ریسک‌ها | TBM | 0.51 | 0.28 | 0.19 |

| | Priorities | Totals | Minimum City Disrup | Extrended Urban A | Relaiable Performa |
|---------------|------------|----------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | | | 0.319618 | 0.121958 | 0.558424 |
| Benefits | 0.229733 | 0.840191 | Low | High | High |
| Opportunities | 0.256756 | 0.939021 | High | Low | High |
| Costs | 0.256756 | 0.939021 | High | Low | High |
| Risks | 0.256756 | 0.939021 | High | Low | High |

شکل ۸. صفحه امتیازدهی BOCR

۳-۵- فرمول‌های استاندارد برای ارزیابی نتایج نهایی

نتایج ارزیابی، انتخاب گردد. ما در این مدل از دو فرمول "افزاینده-کاهنده" و "ضربی" بهره بردیم. فرمول‌ها و ویژگی‌های آنها به همراه نتایج، در جدول ۱۵ نمایش داده شده است.

پس از اعمال قضاوت‌ها در زیرشبکه‌های مربوط به BOCR، می‌توان اقدام به درهم آمیختن نتایج یا به اصطلاح نرم‌افزاری Synthesize نمودن کل مدل، برای بدست آوردن نتایج نهایی، نماییم. قبل از درهم آمیختن نتایج، می‌بایست فرمولی از فرمول‌های استاندارد برای تعیین شیوه محاسبه

جدول ۱۵. نتایج نهایی ارزیابی (نرمال شده در بازه ۰ تا ۱)

| فرمول‌ها | بهترین گزینه | گزینه‌ها | | |
|--|--------------|-------------|------|------|
| | | Cut & Cover | NATM | TBM |
| "افزاینده کاهنده" Bb+Oo-Cc-Rr ضرائب b, o, c و r با توجه به معیارهای استراتژیک تعیین می‌شوند. | TBM | 0.08 | 0.28 | 0.62 |
| O, B, C و R نتایج زیرشبکه‌های BOCR اند. | | | | |
| "ضربی BO/CR" نیازی به ضرایب و معیارهای استراتژیک وجود ندارد. | TBM | 0.10 | 0.23 | 0.66 |

۴- نتایج و بحث

مشابه تحقیق حاضر، پژوهش نیکولای بابیلف (Bobylev, 2011) می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از روش مشابه و معیارهای مشترک بسیار، اقدام به انتخاب روش حفاری، در مرکز یکی از شهرهای آلمان، از میان سه روش حفاری رویاز، گالری و میکروتونلیگ می‌گردد. طبق نظر خبرگان و محاسبات در مقاله مزبور، روش گالری با برتری ۷۸ درصدی (و ۸۶ درصدی با استفاده از فرمول استاندارد ضربی) روش مناسب برای حفاری تونل ذکر شده، در کشور آلمان انتخاب گردیده است. نویسنده این مقاله، به عنوان نتیجه‌گیری، روش ANP را راه حلی مناسب برای تصمیم‌گیری‌های چندمعیاری مهم می‌داند و قائل بر این است که این روش می‌تواند نتایج معقول و قابل اعتمادی، در راستای تحلیل تأثیرات زیست محیطی تکنولوژی‌های مختلف حفاری ارائه دهد. در تحقیق حاضر، روند مطالعات، بر اساس مبانی نظریه ارزشمند ANP

به طور کلی، با توجه به آنالیزهای حساسیت، می‌توان دریافت که روش TBM بیشترین محاسن و موقعیت‌ها را برای محیط شهری به ارمغان خواهد آورد و همچنین ریسک کمتری نسبت به سایر روشها دارد، اما روشی پر هزینه است. نکته بعد این است که اگر "هزینه‌ها" و "ریسک‌ها" وزن بالایی داشته باشند، اجرای پروژه در حد غیر منطقی گران و خطرناک خواهد بود و نباید اجرا شود. نکته نهایی و مهم این است که تصمیم‌گیری براساس هریک از BOCR به تنهایی، به خاطر شباهت تقریبی در رفتار روش‌ها، ممکن نخواهد بود و به همین دلیل به درهم آمیختن نتایج BOCR نیاز است. تنها تعداد معدودی از مقالات معتبر بین المللی، پیرامون مباحث مطرح شده در این تحقیق یعنی انتخاب روش حفاری تونل به کمک روش "فرآیند تحلیل شبکه‌ای"، با توجه ویژه به معیارهای محیطی، ارائه شده است. یکی از مقالات معتبر و

گسترش آسیب‌های غیرقابل بازگشت حاکی هستند. باتوجه به رابطه تنگاتنگ میان مهندسی عمران و محیط زیست، توجه بیش از پیش به معیارهای زیست محیطی، می‌بایست جزء اولویت‌های اصلی در برنامه‌ریزی پروژه‌های عمرانی باشد. پژوهش حاضر، اقدام به انتخاب روش حفاری تونل خط دو متروی مشهد، با توجه به معیارهای متعدد زیست‌محیطی و با بهره‌گیری از روش "فرآیند تحلیل شبکه‌ای" (ANP)، نموده است. نتایج این ارزیابی حاکی از برتری ۶۲ درصدی روش TBM (و ۶۶ درصدی با استفاده از فرمول استاندارد ضریبی) نسبت به دو گزینه دیگر است. علت اصلی این برتری، عملکرد مطلوب این روش تحت موضوعات "محاسن" و "موقعیت‌ها" است؛ همچنین ریسک‌های حداقلی TBM برای محیط زیست را می‌توان جزء دلایل افزایش امتیاز این روش دانست. به طور کلی، نتایج این پژوهش، نمایانگر این مهم است که روش ANP می‌تواند در بدست آمدن نتایج قابل اعتماد برای تصمیم‌گیری‌های مهم و چندمعیاره، باتوجه به رویکرد زیست محیطی، مؤثر باشد. این روش همچنین عملکرد منحصر به فرد و قابل قبولی در ارائه ساختاری شفاف و منظم برای ارزیابی کلیه معیارها و دخالت دادن تمامی آن‌ها در تصمیم‌گیری‌ها دارد.

۶-سپاسگزاری

توماس ساتی، نیکولای بایلیف، رزان ساتی و الناروکو بابت راهنمایی‌های ارزشمندشان در راستای آموزش، طراحی و مدل‌سازی ANP قدردانی می‌شود؛ همچنین از بنیاد "تصمیمات خلاق" و سازندگان نرم افزار SuperDecisions سپاسگزاریم. در پایان، قدردانی از همکاران عزیز که با ارائه نظرات کارشناسانه شان، ما را در ارزیابی هرچه دقیق‌تر یاری نمودند را بر خود لازم می‌دانیم.

۷-مراجع

- Bobylev Nikolai, (2011), "Comparative analysis of environmental impacts of selected underground Automation in Construction.
- Bobylev Nikolai, (2007), "Sustainability and Vulnerability Analysis of Critical Underground Infrastructure"[Book Section], Managing Critical Infrastructure Risks, Springer Netherlands.

صورت پذیرفته است. در مبانی این تئوری، قضاوت خبرگان به نتایج اعتبار می‌بخشد. بنابر اصول این تئوری و نظر تئوری‌پرداز آن، یعنی پروفیسور ساتی، افراد متخصص می‌بایست در حوزه مورد تحقیق، صاحب نظر و دارای اطلاعات کافی باشند. هرچند این نظریه، حداقلی برای تعداد خبرگان قائل نیست اما افرادی که تحصیلات مرتبط، تجربه مناسب و آگاهی نسبت به پروژه یا تصمیم‌گیری مورد تحقیق دارند، صاحب نظر خواهند بود، حتی اگر تعداد آنها بسیار کم باشد. این مقاله، با اتکا بر روش تصمیم‌گیری ANP، معطوف به معیارهای زیست محیطی و با بهره‌گیری از دانش گروه پنج نفره، متشکل از کارشناسان و متخصصین دانشگاهی و افرادی که سابقه اجرایی در پروژه خط دو متروی مشهد را داشته اند، نتایج تحلیلی معقولی را ارائه می‌دهد. نتایج، حاکی از اولویت روش TBM به عنوان تکنولوژی مناسب حفاری برای پروژه مذکور است.

۵-نتیجه‌گیری

با نگاهی اجمالی به تغییرات چندسال اخیر در ارتباط با صنایع مختلف، گسترش شهرنشینی و تکامل پروژه‌های عمرانی، می‌توان به سه نکته مهم پی برد. اول، افزایش مهاجرت به کلان‌شهرها و افزایش جمعیت این مناطق، که در نتیجه نیاز به گسترش فضاهای زیرزمینی را فراهم می‌سازد. این فضاها، امکانات لازم در راستای بالابردن کیفیت زندگی شهرنشینی را ایجاد می‌نماید و اجرای آن‌ها نیازمند تحلیل، طراحی و اجرای بی‌نقص می‌باشد. اجرای تونل‌های حمل و نقل زیرزمینی، از جمله این امکانات هستند. دوم، با گسترش تکنولوژی و رشد کیفی پروژه‌های عمرانی، تصمیمات مهم، نقش پررنگی در بالا رفتن استاندارد نتایج دارند. این تصمیمات عموماً پیچیده و با عنایت به معیارهای متعدد هستند. برای تأثیرپذیری نتایج تصمیم‌گیری از تمامی این معیارها و ارائه چارچوبی واضح از انتخاب موردنظر، نیاز به روشی قابل اعتماد برای این تصمیم‌گیری‌ها احساس می‌گردد. "فرآیند تحلیل شبکه‌ای" یکی از معتبرترین روش‌ها برای تصمیم‌گیری‌های چند معیاره می‌باشد. سوم، تغییرات زیست محیطی و سلامت عناصر حیاتی و طبیعی، همواره از نگرانی‌های دولت‌ها و فعالین در این حوزه است. گزارشات متعدد زیست محیطی (OECD, 2012)، از

- “Özdemir Levent North American Tunneling” (2006), Washington, DC: Taylor & Francis, Washington, D.C.
- Repetto L. and Fidelibus C., (2016), “Decision Plots for preliminary design of single-shield TBMs Engineering Geology”. Vol.5, pp. 134-139.
- Saaty Thomas L. and Niemira Michael P. (2004), “An Analytic Network Process model for financial-crisis forecasting International Journal of Forecasting, 4: Vol. 20, pp. 573-587.
- Saaty Thomas L. and Ozdemir M., (2003), “Negative priorities in the analytic hierarchy process Mathematical and Computer Modelling”. 9-10 : Vol. 37. - pp. 1063-1075.
- Saaty Thomas, L., (2005), “Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making With Benefits, Opportunities, Costs, and Risks, RWS Publications”.
- Saaty Thomas, (2004), “The Analytic Network Process Systems Science and Systems Engineering, Vol. 13. p. 3.
- Sedghiani A., Hamedmirjafari M. H. and Mollahasani B., (2008), “The tunnel excavation impact of Mashhad's 2nd metro line on the adjacent structures in different circumstances, 5th national civil engineering congress of Iran.
- Triantaphyllou Evangelos and Evans W., (1999), “Gerald Multi-criteria decision making in industrial engineering Computers & Industrial Engineering”, Vol. 37, pp. 505-506.
- Bobilev Nikolai, (2008), “Urbanization and Environmental Security [Book Section], Environmental Change and Human Security: Recognizing and Acting on Hazard Impacts”, Springer Netherlands.
- Cuia Ying, Kishidab Kiyoshi and Kimura (2017), “Makoto Prevention of the ground subsidence by using the foot reinforcement side pile during the shallow overburden tunnel excavation in unconsolidated ground, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 63. - pp. 194-204.
- Honggui Di, Shunhua Zhou, Junhua Xiao, (2016), “Quanmei Gong and Zhe Luo Investigation of the long-term settlement of a cut-and-cover metro tunnel in a soft deposit [Journal]// Engineering Geology. Vol. 204. - pp. 33-40.
- Ghodusi Azadeh, (2007), “Eshtehardian Parviz and Bizhanpour Ehsan Introducing a supporting system for choosing hte best provider with the methods AHP and ANP.
- Host Mashhad Urban Railway Corporation [Online].
- Li Jingyuan and Yang Tongjin China's Eco, (2015), “city Construction, Springer Berlin Heidelberg”.
- Moynihan Gary P. and Jethi J. Rashesh, (1995), “A decision support system for multiattribute evaluation of automation alternatives, Computers & Industrial Engineering, 1-4 : Vol. 29. - pp. 417-419.
- Noritomi You, Yasuhiko Kato and Masatoshi Kitaoka Numerous, (1994), “date in hierarchy for knowledge concentrated in decision tree Computers & Industrial Engineering. 1-4 : Vol. 27, pp. 535-538.
- (2012), “OECD OECD Environmental Outlook to 2050 The Consequences of Inaction” - Paris : OECD.