نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۲- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۲

ارزیابی انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات ناشی از انفجار با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP

یادداشت فنی

شاهین لعل عارفی[۱]؛ مهدی بیطرفان[۲*]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران؛ گرایش سازه؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران؛ دانشگاه شمال

۲- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی عمران؛ گرایش زلزله؛ پژوهشکده‌ی عمران؛ پژوهشگاه مهندسی بحران‌های طبیعی شاخص‌پژوه

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

واژگان کلیدی

سازه‌های زیرزمینی
مقاوم‌سازی
تهدید
انفجار
AHP

چکیده

در طراحی سازه‌های زیرزمینی معمولاً یک تهدید به عنوان تهدید مبنا در نظر گرفته و بارگذاری سازه‌ها بر اساس این تهدید انجام می‌شود. با افزایش قدرت نفوذ و تخریب جنگ‌افزارهای دشمن، ممکن است سازه‌های موجود دارای مقاومت کافی در برابر این سلاح‌ها نباشند. در این حالت مقاوم‌سازی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد. در این مقاله ابتدا انواع روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی بیان و سپس شاخص‌های تاثیرگذار بر روی روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی استخراج و رتبه‌بندی شده است. در ادامه هر یک از این روش‌ها با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده با یکدیگر مقایسه و وزن تاثیرگذاری هر یک تعیین شده است. این پژوهش نشان می‌دهد ایجاد موج‌گیر و خم‌های کافی در سازه‌های زیرزمینی به عنوان بهترین گزینه برای مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی است. همچنین استفاده از الیاف پلیمری، ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری، استفاده از دال‌های انفجاری، استفاده از میراگرها و استفاده از مصالح پلی‌استایرن به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

۱- پیشگفتار

با توجه به اهمیت عملکردهای حیاتی و راهبردی نظیر مراکز داده، مراکز مخابراتی، مراکز صنعتی با اهمیت، مراکز کنترل و فرماندهی و پناهگاه‌های ویژه در ایجاد امنیت و پایداری ملی در زمان جنگ، ایجاد سازه‌های زیرزمینی برای این عملکردها امری اجتناب‌ناپذیر است. در طراحی سازه‌های مراکز زیرزمینی، معمولاً یک تهدید را به عنوان تهدید مبنا در نظر می‌گیرند و بارگذاری آن‌ها را بر اساس این تهدید انجام می‌دهند. با افزایش قدرت نفوذ و تخریب سلاح‌های دشمن، ممکن است سازه‌های موجود دارای مقاومت کافی در برابر این سلاح‌ها نباشند. در این حالت مقاوم‌سازی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد. مسئله‌ی اصلی پژوهش حاضر این است که انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های امن زیرزمینی به صورت مدون و جامع ذکر نشده و بهترین روش نیز بیان نشده است.

در این زمینه، هویدافر در سال ۱۳۸۶ به بررسی ورودی و خروجی پناهگاه‌ها، پیشگیری از ورود امواج انفجار به درون پناهگاه پرداخته و ملاحظاتی برای طراحی ورودی پناهگاه‌ها ارایه نموده است [۱]. بیطرفان در سال ۱۳۹۰، پژوهشی بر روی ورودی فضاهای امن زیرزمینی انجام و ۱۷ الگو برای ورود امن به فضاهای زیرزمینی پیشنهاد داده است [۲]. در زمینه‌ی فضاهای زیرزمینی می‌توان به تحقیقات استرلینگ (*Sterling*) اشاره نمود. در این تحقیقات بیش‌تر شاخص‌سازی ورودی‌ها مدنظر قرار گرفته و در انتها الگوهایی

* اصفهان؛ خیابان علامه امینی؛ پژوهشگاه مهندسی بحران‌های طبیعی شاخص پژوه؛ پژوهشکده‌ی عمران؛ کدپستی: ۸۱۵۸۹-۴۹۱۹۱؛ شماره‌ی تلفن و دورنگار: ۲۶۱۶۲۴۳- ۳۱۱؛ رایانامه: mb_civil90@yahoo.com

برای ورود از سطح زمین به فضای زیرزمینی ارایه شده است **[3]**. حسینی نیز در سال ۱۳۹۰ از مدل‌سازی المان محدود برای ارزیابی میزان کاهش اثر انفجار در ورودی‌ها استفاده نموده است [۴].

همان‌گونه که بیان شد در هیچ یک از پژوهش‌های گذشته به بررسی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات پرداخته نشده است؛ بنابراین هدف اصلی این تحقیق شناسایی و ارایه‌ی شاخص‌هایی برای ارزیابی تاثیرگذاری هر یک از روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای امن زیرزمینی است. در این مقاله ابتدا روش اجرای تحقیق توضیح داده شده؛ سپس شاخص‌های تاثیرگذار بر روی روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای امن زیرزمینی استخراج و رتبه‌بندی شده است. در ادامه هر یک از این روش‌ها با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده با یکدیگر مقایسه و وزن تاثیرگذاری هر یک تعیین شده است.

۲- چگونگی اجرای مدل ارزیابی و تحلیل نتایج

در این پژوهش برای ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای امن زیرزمینی ابتدا انواع روش‌های مقاوم‌سازی با استفاده از منابع کتابخانه‌ای شناسایی و سپس با مصاحبه با افراد خبره در زمینه‌ی سازه، مدیریت ساخت و تونل، تمامی محورهای مطرح برای ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات ناشی از انفجار، استخراج شده است. در ادامه برای نظرسنجی از خبرگان، پرسشنامه‌ای برای وزن‌دهی به شاخص‌های موثر و امتیازدهی به هر یک از روش‌ها برای ۳۲ کارشناس در زمینه‌های سازه، مدیریت ساخت و پدافند غیر عامل تهیه شده است (**جدول ۱**). سپس با به کارگیری روش تصمیم‌گیری گروهی بر اساس الگوی مقایسه‌ی زوجی، درجه‌ی ضرورت وجودی هر یک از شاخص‌ها و همچنین روش‌ها در قالب یک مقیاس نه‌تایی لیکرت (معادل ۱ تا ۹) بدست آمده است. سپس درخت سلسله مراتب تصمیم در سه سطح زوجی گزینه‌ها تشکیل و ضمن استخراج اولویت‌ها و تعیین وزن نهایی گزینه‌ها، شش روش مقاوم‌سازی در نرم‌افزار *Expert Choice* با یکدیگر مقایسه و گزینه‌ی بهینه تعیین شده است.

برای اعتبارسنجی پرسشنامه‌ها از آزمون آلفای کرون باخ استفاده شده است **[5]**. آلفای کرون باخ نتایج پرسشنامه‌های پر شده توسط جامعه‌ی خبرگان این پژوهش ۷۷/۶۷ درصد است که از حد ۷۵ درصد بالاتر و قابل قبول است. همچنین برای صحت‌سنجی ماتریس‌های زوجی در هر پرسشنامه، سازگاری آن‌ها محاسبه و ماتریس‌های با سازگاری بیش‌تر از ۰/۱ حذف و ماتریس‌های با سازگاری کمتر از ۰/۱ در این پژوهش به کار برده شده است.

جدول ۱- آمار جامعه‌ی خبرگان

تخصص	سطح تحصیلات	تعداد افراد
سازه	دکتری	۴
	کارشناسی‌ارشد	۸
مدیریت ساخت	دکتری	-
	کارشناسی‌ارشد	۴
پدافند غیرعامل	دکتری	۷
	کارشناسی‌ارشد	۹

روش سلسله مراتبی *AHP* اولین بار توسط ساعتی*(Saaty)* ارایه شده است **[6]**. این روش شامل سه کارکرد اصلی ساختاردهی به پیچیدگی، سنجش بر مبنای مقیاس نسبی و ترکیب است. کاربرد اصلی این روش در محاسبه‌ی اهمیت نسبی مجموعه‌ای از گزینه‌ها در یک تصمیم گیری چند معیاره است. با بهره‌گیری از این روش می‌توان معیارها و شاخص‌های کیفی را به صورت معیارهایی کمی ارایه نمود **[7]**. روش *AHP* از سه بخش اصلی ساختار مدل، داوری تطبیقی از گزینه‌ها و معیارها و در نهایت ترکیب اولویت‌ها تشکیل شده است **[8]**. از پژوهش‌های مهمی که اخیراً با این روش انجام شده است، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- مدینکینه (*Medineckiene*) و همکاران در سال ۲۰۱۰ از روش *AHP* در ارزیابی ساختمان‌های پایدار استفاده کردند **[9]**.
- پودوزکو (*Podvezko*) و همکاران از روش *AHP* برای ارزیابی قراردادهای مالی استفاده کردند **[10]**.
- سیویلویکیس (*Sivilevicius*) از این روش برای مدل‌سازی سامانه‌ی حمل و نقل و ارزیابی فناوری‌های نوین بهره گرفته است **[11]** و **[12]**.

- فولادگر و همکاران از *AHP* برای اولویت‌بندی راهبردها بهره گرفته‌اند **[13]**.

اولین مرحله در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، تجزیه مسئله به ساختار سلسله مراتبی شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها است. این عوامل تصمیم‌گیری یک ساختار سلسله مراتب شامل هدف در بالاترین نقطه، معیارها در وسط و گزینه‌ها در پایین‌ترین نقطه ایجاد می‌کند. در مرحله‌ی دوم با استفاده از ساختار ایجاد شده، مقایسه‌های زوجی بین عناصر توسط تصمیم‌گیرندگان انجام می‌شود. ساعتی برای امتیازدهی قضاوتی بین دو عنصر مقیاس ۱ تا ۹ را بر اساس **جدول ۲** پیشنهاد می‌کند. با توجه به **جدول ۲**، هر چه شدت اهمیت بیش‌تر شود، امتیاز اختصاص داده شده نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۲- مقیاس شدت اهمیت ساعتی [6]

تعریف	میزان اهمیت
اهمیت برابر	۱
اهمیت نسبتاً بیش‌تر	۳
اهمیت با شدت بیش‌تر	۵
اهمیت با شدت خیلی بیش‌تر	۷
اهمیت فوق‌العاده بیش‌تر	۹
مقادیر متوسط	۲،۴،۶،۸

در این مرحله تصمیم‌گیرندگان در هر بار قضاوت دو عنصر را نسبت به عنصر سطح بلافاصله بالاترشان مقایسه کرده و امتیازی را بر اساس **جدول ۲** برای میزان برتری گزینه‌ی اول بر دوم ارایه می‌کنند. در سومین بخش فرآیند، تشکیل ماتریس‌های توافقی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در مرحله‌ی پیشین به عنوان مقدمه‌ی محاسبه‌ی وزن‌ها انجام می‌شود.

۳- انواع روش‌های مقاوم‌سازی در سازه‌های امن زیرزمینی

روش‌هایی که برای مقاوم‌سازی سازه‌ها وجود دارند، بسیار متنوع هستند. اما برخی از این روش‌ها فقط برای سازه‌های خاص هستند؛ به عنوان مثال با توجه به اینکه مقاومت کششی و فشاری فولاد تقریباً با هم برابرند، نمی‌توان از الیاف *FRP* برای تقویت سازه‌های فولادی که اغلب دارای مقطع متقارن هستند، استفاده نمود. در این تحقیق، روش‌های مقاوم‌سازی قابل استفاده در سازه‌های زیرزمینی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- استفاده از دال‌های انفجاری (*A1*)
- ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری (*A2*)
- استفاده از موج‌گیرها و خم (*A3*)
- استفاده از میراگرها (*A4*)
- استفاده از الیاف پلیمری (*A5*)
- استفاده از مصالح پلی‌استایرن (*A6*)

۳-۱- استفاده از دال‌های انفجاری

یکی از روش‌های پرکاربرد مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی استفاده از دال‌های انفجاری است. این روش معمولاً برای سازه‌هایی که به روش کند و پوش اجرا می‌شوند، به کار برده می‌شود **[۱۴]**. در این روش دال‌های بتنی مسلح پیش‌ساخته‌ای را در عمق کم از سطح زمین (در حدود ۱ متر) قرار می‌دهند. هنگامی که موشک نفوذکننده با این دال‌ها که ممکن است در چند ردیف اجرا شده باشند، برخورد نماید به سبب مقاومت بالاتر نسبت به خاک و سنگ، نفوذ موشک را کاهش می‌دهد. در این روش به دلیل برداشت خاک از سطح زمین امکان شناسایی فضاهای زیرزمینی به شدت افزایش می‌یابد.

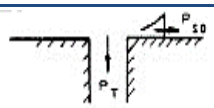
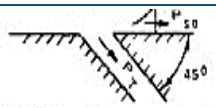
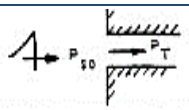
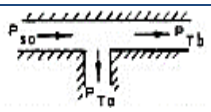
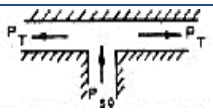
۳-۲- ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری

موشک‌های نفوذکننده، پس از نفوذ در خاک، هنگامی که به یک فضای خالی برسند، عمل می‌کنند. در این راستا می‌توان با ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله، پیش از رسیدن موشک‌ها به فضای مورد نظر سبب انفجار آن‌ها شد **[۲]**. از مهم‌ترین معایب این روش می‌توان به هزینه‌ی بالای آن اشاره نمود.

۳-۳- استفاده از موج‌گیرها و خم

برای پیشگیری از ورود امواج انفجار و کاهش اثرات آن از فضایی به فضای دیگر در سازه‌های زیرزمینی می‌توان تونل‌های را به صورت تو در تو و با زوایای مختلف ایجاد نمود که در صورت انفجار، امواج کمتری به تونل‌های قسمت‌های دیگر وارد شود. **جدول ۳**، اثر انفجار در یک تونل نسبت به تونل دیگر را نشان می‌دهد.

جدول ۳- درصد امواج انفجار انتقال‌یافته از یک تونل به تونل دیگر [15]

حالت	نسبت امواج انتقالی به امواج ماکزیمم (P_T/P_{so})
	۰٫۵
	۱٫۰
	۱٫۵
	P_{Ta}=۰٫۵ P_{Tb}=۰٫۸
	۰٫۸

۳-۴- استفاده از میراگرها

یکی از روش‌های کاهش نیروهای جانبی ناشی از زلزله یا نیروهای حاصل از انفجار استفاده از میراگرها است. در حین زلزله یا انفجار انرژی زیادی به دو صورت جنبشی و پتانسیل (کرنشی) به سازه وارد می‌شود. این انرژی به طریقی جذب یا مستهلک می‌شود. اگر سازه فاقد میرایی باشد ارتعاش آن پیوسته خواهد بود؛ اما به دلیل وجود میرایی در مصالح، ارتعاش کاهش می‌یابد. انرژی ورودی (برحسب ژول) به سازه به صورت‌های معرفی شده در گزاره‌ی (۱) تبدیل می‌شود:

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \qquad (۱)$$

در گزاره‌ی (۱)، E انرژی ورودی، E_k انرژی جنبشی، E_S انرژی کرنشی قابل برگشت در محدوده‌ی کشسان، E_h انرژی تلف شده به واسطه‌ی تغییر شکل‌های غیر کشسان و E_d انرژی مستهلک شده به واسطه‌ی میراگر الحاقی است. فلسفه‌ی استفاده از میراگرها افزایش E_d است تا انرژی که به دیگر اجزا می‌رسد، کاهش یابد [۱۶].

در معماری فضاهای امن زیرزمینی با توجه به اصل پراکندگی، فضاها را به صورت مجزا (اما متصل به هم) در نظر می‌گیرند. در این حالت اگر در یک بخش به سبب انفجار بمب‌های نفوذی، تخریبی صورت گیرد، این خرابی به قسمت‌های دیگر نیز سرایت می‌کند. بدین منظور از درز انقطاع بین بخش‌های مختلف استفاده می‌شود. این انفجار می‌تواند از طریق خاک یا سنگ‌های پیرامون به بخش‌های دیگر سازه‌ی زیرزمینی انتقال یابد. برای حل این مشکل نیز می‌توان از میراگرها در بین سازه و دیوارهای سنگی تونل استفاده نمود یا این‌که درون تونل یک سازه‌ی فلزی دیگر احداث نمود و آن را با استفاده از میراگرها به بدنه‌ی اصلی تونل متصل نمود. این روش در مرکز کنترل و فرماندهی نوراد استفاده شده است (**شکل ۱**). میراگرها بر اساس عملکرد آن‌ها به انواع اصطکاکی، فلزی (جاری‌شونده)، ویسکوز، ویسکوالاستیک، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (*SMA*) و میراگرهای جرمی دسته‌بندی می‌شوند [۱۶].

شکل ۱- نمایی از فنرهای میراگر در مرکز کنترل و فرماندهی نوراد [۴]

۳-۵- استفاده از الیاف پلیمری

الیاف پلیمری به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- **الیاف کربن:** این الیاف در سازه‌های دارای محدودیت وزن و نیازمند مقاومت بالا به کار برده می‌شود. به همین سبب، الیاف کربن در صنعت هوافضا بیش‌ترین استفاده را دارد.
- **الیاف شیشه:** سیلیکا اساس انواع شیشه‌های تجاری است. این الیاف دارای انواع مختلفی است که هر کدام خصوصیات مربوط به خود را دارد؛ اما در هر صورت دارای مقاومت و مدول کشسانی پایین‌تری نسبت به الیاف کربنی است.
- **الیاف آرامید (پلیمری):** این نوع مواد برای دست‌یابی به

الیافی با مقامت بالا پایه‌گذاری شده و به آرامید معروف است. این الیاف به علت داشتن مقاومت بالا و سختی کم، دارای سطح زیر منحنی تنش-کرنش بزرگ و قدرت جذب انرژی بالا هستند. به همین دلیل از آن‌ها در سازه‌های در معرض بارهای ضربه‌ای همانند جلیقه‌های ضدگلوله استفاده می‌شود [۱۶]. از جمله مزایای استفاده از الیاف پلیمری (*FRP*) وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی، اتصال تقویت به صورت خارجی، حمل و نقل آسان و سرعت اجرای بالا به دلیل وزن کم است. با چسباندن این نوع الیاف، به خصوص الیاف آرامیدی (به دلیل داشتن مقاومت بسیار زیاد)، توسط رزین به سطح بتن سازه‌ی زیرزمینی، می‌توان برای مقاوم‌سازی از این مواد کامپوزیتی استفاده نمود؛ اما در برابر نفوذ موشک‌های دشمن در سازه‌های زیرزمینی تاثیر بسزایی ندارد.

۳-۶- استفاده از مصالح پلی‌استایرن

پلی‌استایرن‌ها موادی مصنوعی هستند که از فرآیندهای پلیمری به دست می‌آیند. فوم‌های پلی‌استایرن مصالحی بسیار سبک و سفیدرنگ هستند و از دانه‌های پلی استایرن ساخته می‌شوند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، پلی‌استایرن‌های منبسط شده در کاهش تنش‌های ناشی از امواج کوبشی کارایی مناسبی از خود نشان می‌دهند. استفاده از بازدارنده‌هایی نظیر حفره و بلوک علاوه بر کاهش بیشینه‌ی تنش‌ها، موجب تاخیر در زمان رسیدن موج کوبشی شده و محتوای فرکانسی را کاهش می‌دهد. بنابراین در استفاده از سازه‌های زیرزمینی، این کاهش باید در نظر گرفته شود [۱۷].

۴- تعیین شاخص‌های تاثیرگذار

شاخص‌های تاثیرگذار بر انتخاب روش‌های مقاوم‌سازی فضاهای امن زیرزمینی با مصاحبه و نظرخواهی از خبرگان امر شناسایی شده‌اند. شاخص‌ها تصمیم‌گیری شامل مجموعه‌ای از خصوصیات اقتصادی و اجرایی است.

۱- مقاومت در برابر امواج انفجار(X_1)

۲- مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده (X_2)

۳- پیچیدگی اجرا (X_3)

۴- هزینه‌ی اجرا (X_4)

۵- سرعت اجرا (X_5)

درخت سلسله مراتب انتخاب بهترین روش‌ها در **شکل ۲** نشان داده شده است. این درخت شامل هدف، معیارها و گزینه‌های انتخاب است **[18]**.

۵- تحلیل سلسله مراتبی *AHP*

در این مرحله با استفاده از وزن‌های بدست آمده از نتایج حاصل از پرسش‌نامه‌های تکمیل شده توسط کارشناسان، ماتریس داوری مقایسه‌ای جفتی شاخص‌ها (**جدول ۴**) در نرم افزار *Expert Choice* تشکیل شده است و در نهایت وزن نهایی هر شاخص به ترتیب اولویت بدست آمده است. بر این اساس شاخص مقاومت در برابر انفجار بهترین و شاخص‌های مقاومت در برابر موشک‌های نفوذ کننده، هزینه‌ی اجرا، پیچیدگی اجرا و سرعت اجرا به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

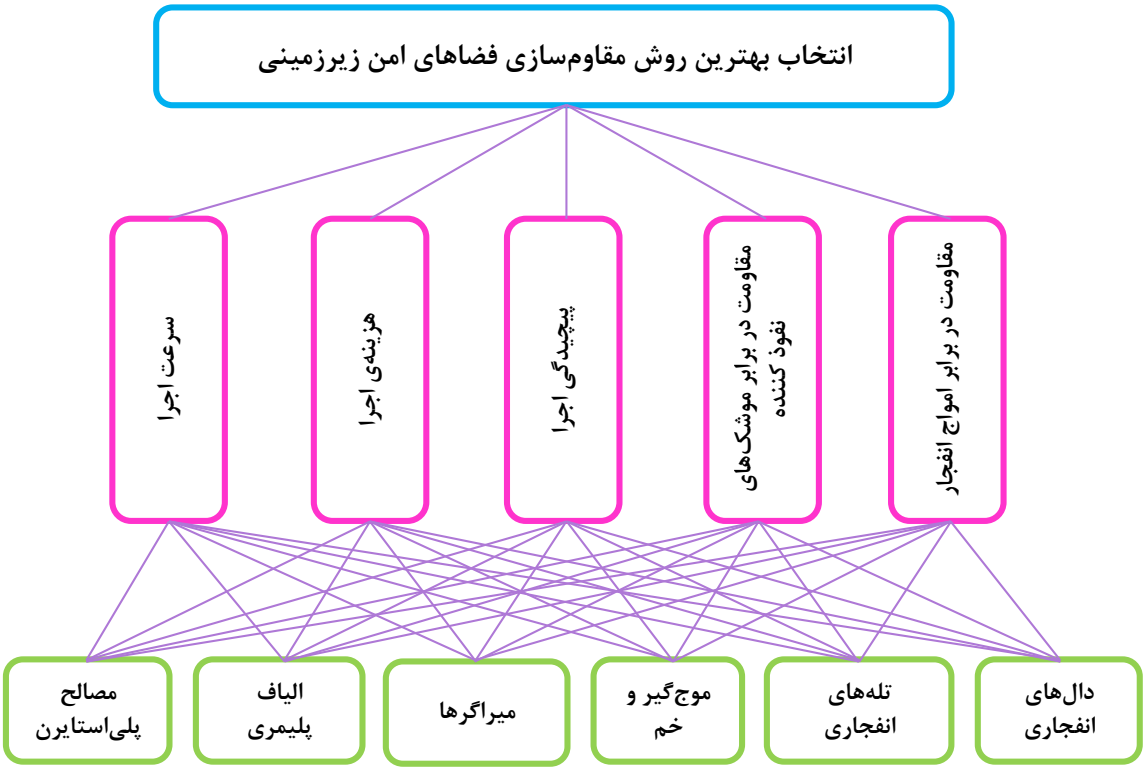
جدول ۴- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی شاخص‌ها و معیارهای تاثیرگذار بر انتخاب انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی: IR=۰٫۰۲

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	وزن نهایی
X_1	۱	۲٫۵	۵٫۱۲	۴٫۰۲	۷٫۲۳	۰٫۴۸۲
X_2		۱	۳٫۱۳	۱٫۹۶	۵٫۱۱	۰٫۲۴۵
X_3			۱	۱٫۳۲	۲٫۱۴	۰٫۱۰۶
X_4				۱	۳٫۳۲	۰٫۱۱۹
X_5					۱	۰٫۰۴۹

در ادامه ماتریس های داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از روش‌های مقاوم سازی فضاهای امن زیرزمینی نیز برای هر یک از شاخص‌ها استخراج شده است. در شاخص مقاومت در برابر انفجار، بهترین روش مقاوم‌سازی، استفاده از موج‌گیر و خم است و روش‌های استفاده از میراگرها، مصالح پلی‌استایرن، الیاف پلیمری، دال‌های انفجاری و ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند (**جدول ۵**).

در شاخص مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده، بهترین روش مقاوم‌سازی، ایجاد تله‌ی انفجاری است. استفاده از دال‌های انفجاری، الیاف‌های پلیمری، مصالح پلی‌استایرن،

میراگرها و موج‌گیر و خم در رتبه‌های بعدی در این شاخص قرار گرفته‌اند (**جدول ۶**).



شکل ۲- تصویر گرافیکی درخت سلسله مراتب انتخاب بهترین روش مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی

جدول ۵- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از روش‌های مقاوم‌سازی برای شاخص مقاومت در برابر امواج انفجار

***IR*=۰/۰۱**

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	وزن نهایی
A_1	۱	۲/۱	۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۰۶۶
A_2		۱	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۰۳۷
A_3			۱	۱/۷۳	۳/۸۵	۳/۵	۰/۴۰۲
A_4				۱	۲/۲۸	۱/۸۴	۰/۲۴۲
A_5					۱	۱/۱	۰/۱۲۲
A_6						۱	۰/۱۳۰

جدول ۶- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از روش‌های مقاوم‌سازی در شاخص مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده

***IR*=۰/۰۲**

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	وزن نهایی
A_1	۱	۰/۵۱	۷/۲	۷/۴	۶/۴۱	۶/۵	۰/۳۲۴
A_2		۱	۹/۱	۸/۸۳	۸/۱	۷/۹	۰/۴۶۶
A_3			۱	۱/۲	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۰۳۹
A_4				۱	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۰۳۸
A_5					۱	۱/۱	۰/۰۶۹
A_6						۱	۰/۰۶۴

در شاخص پیچیدگی اجرا، بهترین روش مقاوم‌سازی استفاده از موج‌گیر و خم است. روش‌های استفاده از الیاف پلیمری، مصالح پلی‌استایرن و دال‌های انفجاری، ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری و استفاده از میراگرها در رتبه‌های بعدی در این شاخص قرار گرفته‌اند (**جدول ۷**).

در شاخص هزینه‌ی اجرا نیز، بهترین روش مقاوم‌سازی استفاده از موج‌گیر و خم است. روش‌های استفاده از الیاف پلیمری، مصالح پلی‌استایرن و دال‌های انفجاری، ایجاد

حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری و استفاده از میراگرها در رتبه‌های بعدی در این شاخص قرار گرفته‌اند (**جدول ۸**).

جدول ۷- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی برای شاخص پیچیدگی اجرا

***IR*=۰/۰۳**

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	وزن نهایی
A_1	۱	۴/۲۲	۰/۲۵	۶/۳۴	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۱۰۸
A_2		۱	۰/۱۲	۲/۲۳	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۰۳۷
A_3			۱	۹/۲۱	۱/۱۴	۱/۹۶	۰/۳۲۶
A_4				۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۰۲۵
A_5					۱	۲/۰۴	۰/۳۰۶
A_6						۱	۰/۱۸۹

جدول ۸- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی هر یک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی در شاخص هزینه‌ی اجرا

***IR*=۰/۰۳**

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	وزن نهایی
A_1	۱	۲/۱۵	۰/۱۶	۴/۲۳	۰/۲۴	۰/۵۴	۰/۰۸۳
A_2		۱	۰/۱۳	۲/۲۴	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۰۴۶
A_3			۱	۸/۸۲	۲/۴۱	۴/۱۲	۰/۴۴۵
A_4				۱	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۰۲۹
A_5					۱	۲/۱۶	۰/۲۵۵
A_6						۱	۰/۱۴۳

در شاخص سرعت اجرا، بهترین روش مقاوم‌سازی استفاده از موج‌گیر و خم است. روش‌های استفاده از الیاف پلیمری، دال‌های انفجاری، مصالح پلی‌استایرن و میراگرها و ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری در رتبه‌های بعدی در این شاخص قرار گرفته‌اند (**جدول ۹**).

رتبه‌بندی روش‌های مقاوم‌سازی بر مبنای هر شاخص به طور خلاصه در **جدول ۱۰** آورده شده است. در نهایت وزن نهایی شاخص‌های بدست آمده که بیانگر ضریب اهمیت هر شاخص است، در وزن‌های بدست آمده برای هر یک از روش مقاوم‌سازی ضرب شده و امتیاز نهایی هر روش مقاوم‌سازی از مجموع حاصل ضرب‌ها بدست آمده است (**جدول ۱۱**).

جدول ۹- ماتریس داوری مقایسه‌ای زوجی شاخص هر یک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی برای شاخص سرعت اجرا

***IR*=۰/۰۱**

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	وزن نهایی
A_1	۱	۴/۲۱	۰/۴۳	۳/۱۵	۰/۴۳	۱/۳۱	۰/۱۵۸
A_2		۱	۰/۱۸	۰/۵۵	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۰۴۲
A_3			۱	۵/۱۲	۱/۱۶	۲/۱۸	۰/۳۰۶
A_4				۱	۰/۱۸	۰/۴۷	۰/۰۶۰
A_5					۱	۲/۶۸	۰/۳۰۵
A_6						۱	۰/۱۲۹

جدول ۱۰- رتبه‌بندی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی بر مبنای هر شاخص

شاخص / رتبه	مقاومت در برابر امواج انفجار	مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده	پیچیدگی اجرا	هزینه اجرا	سرعت اجرا
۱	موج‌گیر و خم	تله‌ی انفجاری	موج‌گیر و خم	موج‌گیر و خم	موج‌گیر و خم
۲	میراگر	دال‌های انفجاری	الیاف پلیمری	الیاف پلیمری	الیاف پلیمری
۳	مصالح پلی‌استایرن	الیاف پلیمری	مصالح پلی‌استایرن	مصالح پلی‌استایرن	دال‌های انفجاری
۴	الیاف پلیمری	مصالح پلی‌استایرن	دال‌های انفجاری	دال‌های انفجاری	مصالح پلی‌استایرن
۵	دال‌های انفجاری	موج‌گیر و خم	تله‌ی انفجاری	تله‌ی انفجاری	میراگر
۶	تله‌ی انفجاری	میراگر	میراگر	میراگر	تله‌ی انفجاری

با توجه به نتایج **جدول ۱۱**، رتبه‌بندی نهایی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی عبارت است از:

۱- موج‌گیر و خم
۲- الیاف پلیمری
۳- تله‌ی انفجاری
۴- دال‌های انفجاری
۵- میراگر
۶- مصالح پلی‌استایرن

جدول ۱۱- وزن نهایی هر یک از انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی

معیار	ضریب اهمیت	امتیازات حاصل از نظرات کارشناسان					
		دال‌های انفجاری	تله‌ی انفجاری	موج‌گیر و خم	میراگر	الیاف پلیمری	مصالح پلی‌استایرن
مقاومت در برابر امواج انفجار	۰٫۴۸۲	۰٫۰۶۶	۰٫۰۳۷	۰٫۴۰۲	۰٫۲۴۲	۰٫۱۲۲	۰٫۱۳۰
حاصل‌ضرب مقاومت در برابر امواج در میانگین نمرات		۰٫۰۳۲	۰٫۰۱۸	۰٫۱۹۴	۰٫۱۱۷	۰٫۰۵۹	۰٫۰۶۳
مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده	۰٫۲۴۵	۰٫۳۲۴	۰٫۴۶۶	۰٫۰۳۹	۰٫۰۳۸	۰٫۰۶۹	۰٫۰۶۴
حاصل‌ضرب مقاومت در برابر موشک در میانگین نمرات		۰٫۰۷۹	۰٫۱۱۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱۷	۰٫۰۱۶
پیچیدگی اجرا	۰٫۱۰۶	۰٫۱۰۸	۰٫۰۳۷	۰٫۳۲۶	۰٫۰۲۵	۰٫۳۱۶	۰٫۱۸۹
حاصل‌ضرب پیچیدگی اجرا در میانگین نمرات		۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۴	۰٫۰۳۴	۰٫۰۰۳	۰٫۰۳۳	۰٫۰۲۰
هزینه‌ی اجرا	۰٫۱۱۹	۰٫۰۸۳	۰٫۰۴۶	۰٫۴۴۵	۰٫۰۲۹	۰٫۲۵۵	۰٫۱۴۳
حاصل‌ضرب هزینه‌ی اجرا در میانگین نمرات		۰٫۰۱	۰٫۰۰۵	۰٫۰۵۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۳۰	۰٫۰۱۷
سرعت اجرا	۰٫۰۴۹	۰٫۱۵۸	۰٫۰۴۲	۰٫۳۰۶	۰٫۰۶۰	۰٫۳۰۵	۰٫۱۲۹
حاصل‌ضرب سرعت اجرا در میانگین نمرات		۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۲	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۶
امتیاز نهایی هر یک از روش‌ها		۰٫۱۴۰	۰٫۱۴۳	۰٫۳۰۶	۰٫۱۳۲	۰٫۱۵۴	۰٫۱۲۲

۶- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که اشاره شد، پیشرفت سلاح‌های دشمن و افزایش نفوذ و قدرت انفجار آن‌ها، سبب افزایش آسیب‌پذیری فضاهای زیرزمینی امن موجود در کشور شده است. به همین دلیل، کاهش آسیب‌پذیری فضاهای زیرزمینی حیاتی و حساس نیازمند مقاوم‌سازی این فضاها در برابر سلاح‌های ذکر شده است. در این تحقیق روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی شامل استفاده از دال‌های انفجاری، ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله انفجاری، استفاده از موج‌گیرها و خم، استفاده از میراگرها، استفاده از الیاف پلیمری و استفاده از مصالح پلی‌استایرن شناسایی شده است. سپس شاخص‌های مقاومت در برابر امواج انفجار، مقاومت در برابر موشک‌های نفوذکننده، پیچیدگی اجرا، هزینه‌ی اجرا و سرعت اجرا برای ارزیابی روش‌ها به کار گرفته شده است.

در ادامه با استفاده از روش سلسله مراتبی *AHP* به عنوان یک ابزار کار آمد، کم هزینه و با دقت بالا در تعیین و انتخاب بهترین گزینه‌ی مناسب در تصمیم‌گیری‌ها، بهره گرفته شده است. بدیهی است، در اختیار داشتن اطلاعات مناسب، صحت و دقت این روش را بیش‌تر می‌کند. اما به دلیل دقیق بودن روش *AHP*، با داشتن اطلاعات کلی گزینه‌ها و نظرسنجی از خبرگان، گزینه‌ی بهینه انتخاب شده است. در نهایت، ایجاد موج‌گیر و خم‌های کافی در سازه‌های زیرزمینی به عنوان بهترین گزینه برای مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی تشخیص داده شده است و به ترتیب روش‌های

استفاده از الیاف پلیمری، ایجاد حفره‌هایی به عنوان تله‌ی انفجاری، استفاده از دال‌های انفجاری، استفاده از میراگرها و استفاده از مصالح پلی‌استایرن در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

۷- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
E_k	J	انرژی جنبشی	E_h	J	انرژی تلف شده در اثر تغییر شکل غیر کشسان
E_s	J	انرژی بازگشت‌پذیر کشسان	E_d	J	انرژی مستهلک در اثر میراگر الحاقی

۸- منبع‌ها

[۱] هویدافر، ب. (۱۳۸۶). *مبانی نظری ورودی و خروجی پناهگاه‌ها با دیدگاه پدافند غیر عامل*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه مالک اشتر.

[۲] بیطرفان، م. (۱۳۹۰). *طراحی و مستندسازی ورودی‌ها و اجزای مربوطه در فضاهای امن*. پایان‌نامه‌ی کسر خدمت. دانشگاه مالک اشتر.

[3] Sterling, R. L. & Carmody, J. (1993). Overview of Subsurface Space Utilization. *Underground Space Design*. United States of America: Wiley. ISBN: 978-0-471-28548-9.

[۴] حسینی، س. ع. (۱۳۹۰). *ارایه‌ی راهکارهای کاهش اثر انفجار بر ورودی‌های سازه‌های زیرزمینی*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین.

[5] Carver, R. H., & Gradwohl Nash, J. G. (2009). *Doing Data Analysis with SPSS Version 18*. United States of America: Cengage Learning. ISBN: 0840049161.

[6] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 0070543712.

[7] Badri, M. A. (2001). A Combined AHP-GP Model for quality Control Systems. *International Journal of Production Economics*, *72*(1), 27-40. http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00077-3.

[8] Dagdeviren, M. (2008). Decision Making in Equipment Selection: An Integrated Approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *19*(4), 397-406. http://dx.doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7.

[9] Medineckiene, M., Turskis, Z., & Zavadskas, E. K. (2010). Sustainable Construction Taking into Account The Building Impact on the Environment. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *18*(2), 118-127. http://dx.doi.org/10.3846/jeelm.2010.14.

[10] Podvezko, V., Mitkus, S., & Trinkuniene, E. (2010). Complex Evaluation of Contracts for Construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, *16*(2), 287-297. http://dx.doi.org/10.3846/jcem.2010.33.

[11] Sivilevicius, H. (2011). Modeling the Interaction of Transport System Elements. *Transport*, *26*(1), 20-34. http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2011.560366.

[12] Sivilevicius, H. (2011). Application of Expert Evaluation Method to Determine the Importance of Operating Asphalt Mixing Plant Quality Criteria and Rank Correlation. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *6*(1), 48-58.

[13] Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., & Zavadskas, E. K. (2011). An Integrated Model for Prioritizing Strategies of The Iranian Mining Sector. *Technological and Economic Development of Economy*, *17*(3), 459-483. http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2011.603173.

[۱۴] هاشمی فشارکی، س. (۱۳۸۷). *آشنایی با پدافند غیر عامل*. جزوه‌ی درسی دانشگاه مالک اشتر.

[15] NIBS. (2008). *Unified Facilities Criteria (UFC) - DoD Security Engineering Facilities Planning Manual*. USA: National Institute of Building Sciences, Department of Defense (DOD). http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_4_020_01.pdf.

[۱۶] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. (۱۳۸۹). *راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی*. تهران: نشریه‌ی شماره‌ی ۵۲۴. http://bpms.mporg.ir/tecfiles/code524.pdf.

[۱۷] نادری، ی. (۱۳۸۹). *بررسی کاربرد پلی‌استایرن‌های منبسط شده بر سازه‌های زیرزمینی مقاوم در برابر انفجار*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه ارومیه.

[18] Saaty, L. T., & Vargas, L. G. (2001). *Models, Methods, Concepst & Applications of Analytic Hierarchy Process.* Boston: Kluwer Academic Publishers Group. ISBN: 978-1-4614-3597-6.

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

Volume 2-Issue 1\Summer 2013

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Evaluation of Retrofitting Methods for Underground Structures against Explosion Threats Using the Analytical Hierarchy Process (AHP) Method

Technical Note

S. Lale Arefi[1]; M. Bitarafan[2]

1- M.Sc. in Structure Engineering; Department of Civil Engineering; Shomal University

2- Ph.D. Candidate in Earthquake Engineering; Department of Civil Engineering; Engineering Research Institution of Natural Disaster Shakhes Pajouh

Received: 22 Aug 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Underground structures
Retrofitting
Threat
Explosion
AHP

Extended Abstract

In this research, to evaluate proper retrofitting methods for underground structures against explosion threats, some methods including the use of polymer fibers, creating empty tunnel as explosive traps, use of explosive slabs, dampers, and polystyrene materials, and creating pocket and ample curves are identified using library resources. Then, by interviewing with experts in the field of civil, tunneling and construction management, all the issues for assessing differences and influencing methods on retrofitting methods for underground structures have been extracted.

Introduction

For the structural design of underground facilities, a threat is usually considered and loading is made on this basis. These designed structures do not have the sufficient strength due to changing enemy's weapon, increasing leverage, and destruction of these weapons. Retrofitting can be used as an appropriate option for increasing the resistance of underground structures.

Methodology and Approaches

After doing the above-mentioned process, to conduct a survey, a questionnaire has been filled by 32 experts for weighting the indicators. By applying the group decision method based on the paired comparison models, the degree of necessity of each indicator and method in the form has been obtained by using a 9-point Likret scale. In this paper, the method of research has been described and then the influencing parameters on retrofitting the secure underground spaces have been ranked, and the investigated methods have been compared with each other according to the considered indicators, and finally, the effectiveness of each method has been determined.

Results and Conclusions

The findings of this research indicate that the creating pocket and ample curves in underground structures are the best options for retrofitting. As a result, use of polymer fibers, creating empty tunnel as explosive traps, use of explosive slabs, dampers, and polystyrene materials have been placed in the next ranks.