



فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست



بررسی مزایا و چالش‌های ایمنی سازه‌های زیرزمینی و شبیه‌سازی سطح ایمنی

علی نخعی امرودی^۱

^۱ استادیار، دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین علیه السلام، تهران، ایران

چکیده

با توجه به پیشرفت‌های فزاینده در فناوری‌ها، و افزایش قدرت تخریب تسلیحات مدرن، حفاظت از تأسیسات راهبردی و مراکز پژوهشی به یک چالش کلیدی در امنیت ملی تبدیل شده است. این مراکز که به دلیل نقش حیاتی در توسعه فناوری‌های نوین، اهداف اولویت‌دار در درگیری‌های نظامی محسوب می‌شوند، نیازمند راهکارهای دفاعی نوین هستند. این مقاله با اتخاذ رویکردی تحلیلی-شبیه‌سازی، ضرورت و مزایای استقرار این مراکز در اعماق زمین را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌های طبیعی پوسته زمین به عنوان سپر دفاعی، قادر به افزایش قابل‌توجه سطح ایمنی تأسیسات در برابر طیف وسیعی از تهدیدات، از جمله انفجارات هسته‌ای، بمب‌های نفوذگر پیشرفته و حملات سایبری و الکترونیک است. اگرچه چالش‌های فنی مرتبط با حفاری عمیق، مدیریت سازه در اعماق زیاد و هزینه‌های اولیه قابل‌توجه، از موانع این رویکرد محسوب می‌شوند، اما تحلیل چرخه عمر نشان می‌دهد که مزایای بلندمدت از جمله کاهش ریسک، تضمین بقای توانمندی‌های پژوهشی و عملیاتی، و افزایش بازدارندگی، این سرمایه‌گذاری را در بلندمدت توجیه‌پذیر می‌سازد. بنابراین، استقرار مراکز پژوهشی در اعماق زمین، نه تنها یک گزینه، بلکه یک الزام راهبردی برای تضمین امنیت و اقتدار در عصر حاضر محسوب می‌گردد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

*نویسنده مسئول:

kpnakhaei@ihu.ac.ir

کلید واژه‌ها:

مکان‌های پژوهشی، سازه‌های زیرزمینی

سخت، ایمنی، بمب‌های نفوذگر، بقاپذیری

(یا تاب‌آوری)



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

بایستی مراکز نظامی و تحقیقاتی و حتی مراکز راهبردی غیرنظامی مهم را در زیر زمین ساخت.

۲- تاریخچه

ساخت تأسیسات زیرزمینی برای اهداف نظامی و پژوهشی، پیشینه‌ای بیش از یک قرن دارد و ریشه در تحولات فناوری نظامی و تغییر ماهیت تهدیدات دارد. در این بخش، سیر تاریخی این سازه‌ها از جنگ جهانی اول تا امروز به صورت مختصر بررسی می‌شود.

۳- جنگ جهانی اول و دوم: آغاز حرکت به

زیر زمین

نقطه آغازین ساخت تأسیسات زیرزمینی نظامی را می‌توان به جنگ جهانی اول نسبت داد. در این دوره، افزایش قدرت آتش توپخانه‌ها و ظهور بمباران هوایی، آسیب‌پذیری تأسیسات سطحی را آشکار ساخت. اگرچه اقدام موثری در خصوص حرکت ساخت ابنیه نظامی در زیرزمین صورت نگرفت. با این حال، تحول اساسی در این زمینه به جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد. در جریان جنگ جهانی دوم، کشورهای درگیر، به تدریج به این نتیجه رسیدند که مراکز حیاتی فرماندهی، ارتباطات و تحقیقات تسلیحاتی باید در عمق زمین محافظت شوند. نمونه بارز این تفکر، تأسیسات پورتون داون^۳ در انگلستان است که در سال ۱۹۱۶ به عنوان ایستگاه آزمایشی مهندسان سلطنتی برای آزمایش سلاح‌های شیمیایی تأسیس شد. این مرکز که در جنگ جهانی اول عمدتاً به تحقیق بر روی کلر، گاز خردل و فسژن می‌پرداخت، پس از جنگ به تدریج گسترش یافت و به یکی از حساسترین مراکز تحقیقات نظامی بریتانیا در زمینه جنگ‌افزارهای شیمیایی، بیولوژیک، رادیولوژیک و هسته‌ای (CBRN)^۴ تبدیل شد. در جریان جنگ جهانی دوم، پورتون داون تحقیقات خود را به سلاح‌های بیولوژیک مانند

تحولات صحنه نبرد مدرن نشان دهنده افزایش روزافزون دقت، عمق نفوذ و قدرت تخریب مهمات تهاجمی است. از سوی دیگر، ماهیت حساس فعالیت‌های پژوهشی نظامی، از جمله توسعه سامانه‌های تسلیحاتی پیشرفته، فناوری‌های هسته‌ای، بیولوژیک و شیمیایی و سامانه‌های فرماندهی و کنترل، این مراکز را به اهدافی با اولویت نخست برای هر مهاجمی تبدیل کرده است. تجربیات جهانی حاکی از آن است که کشورهای پیشرو در عرصه فناوری نظامی، به تدریج تأسیسات راهبردی خود را به زیر زمین منتقل می‌کنند تا از گزند حملات در امان بمانند [۶، ۱]. همچنین استقرار در عمق، علاوه بر محافظت فیزیکی، مزایای راهبردی مهمی چون پنهان‌سازی^۱ و تضمین تداوم فعالیت^۲ حتی در شرایط بحران و جنگ تمام‌عیار را فراهم می‌آورد.

ایمنی در این مقاله به معنای «توانایی حفظ تمامیت فیزیکی تجهیزات و پرسنل و تداوم عملکرد در مواجهه با تهدیدات نظامی» تعریف می‌شود. سوال اصلی آن است که چه عواملی ساخت مکان‌های پژوهشی نظامی در زیر زمین را از منظر ایمنی ضروری می‌سازد؟ فرضیه این مقاله بر این اصل استوار است که عمق زمین و پوشش سنگی طبیعی، یک «ایمنی غیرعامل» فراهم می‌کند که با هیچ فناوری حفاظت سطحی قابل دستیابی نیست.

در جنگ ۱۲ روزه و در جنگ رمضان، دشمن آمریکایی-صهیونیستی با شناختی قدیمی از ابنیه نظامی، تنها راه حل ضربه به نظام مقدس جمهوری اسلامی را در نابود کردن ابنیه نظامی می‌بیند. لذا تنها اقدام چشمگیر وی، تخریب ابنیه نظامی بوده است. این تجربه برای نظام مقدس جمهوری اسلامی که همواره با تهدیدات دشمنان داخلی و خارجی مواجه بوده است، بایستی مورد توجه قرار گرفته و در ساخت ابنیه جدید استفاده شود. از این‌رو در این مقاله به صورت علمی، به بررسی این مهم پرداخته می‌شود که چرا

^۳ Porton Down

^۴ Chemical, Biological, Radiological and Nuclear

^۱ Hard-to-detect

^۲ Continuity of Operations

ب) مرکز فرماندهی کوه شاین^۵ در کلرادو^۶ که در سال ۱۹۶۶ عملیاتی شد، نمونه دیگر از تأسیسات زیرزمینی عمیق با هدف فرماندهی و کنترل هوافضای آمریکای شمالی (NORAD)^۷ است.

ت) پروژه مرکز فرماندهی دفاعی زیرزمینی (UDCC)^۸: یکی از بلندپروازانه‌ترین طرح‌های تاریخ در این زمینه، پیشنهاد ساخت مرکز فرماندهی در عمق ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ متری زیر زمین در نزدیکی پنتاگون بود [۱۵، ۱۲]. این طرح که در تاریخ ۳۱ ژانویه ۱۹۶۲ ارائه شد، برای مقاومت در برابر ضربات مستقیم چندین کلاهک هسته‌ای ۲۰۰ تا ۳۰۰ مگاتونی طراحی شده بود. گرچه کنگره آمریکا بودجه کامل این پروژه را تصویب نکرد، اما مباحث فنی و مهندسی آن تأثیر عمیقی بر دانش ساخت تأسیسات زیرزمینی سخت گذاشت [۱۲].

۳-۱-۲- اتحاد شوروی

در سوی دیگر میدان جنگ سرد، شوروی نیز دست به ساخت تأسیسات زیرزمینی عظیم زد. دژ «میشنیا گورا»^۹ در شبه‌جزیره کریمه^{۱۰}، بزرگترین مرکز فرماندهی زیرزمینی نیروی دریایی شوروی بود. این تأسیسات که در عمق ۱۸۰ متری زمین طراحی شده بود، از دو راهروی باریک و طولانی با درب‌های ضد تشعشع به سطح زمین متصل می‌شد و مجهز به سامانه‌های فیلتراسیون هوا برای محافظت در برابر گازهای سمی و غبار رادیواکتیو بود. ساخت این مرکز تا سال ۱۹۹۱ حدود ۹۰ درصد پیشرفت فیزیکی داشت اما با فروپاشی شوروی متوقف ماند.

سیاه‌زخم (آنتراکس)^۱ و سم بوتولینوم^۲ گسترش داد و آزمایش‌های میدانی در جزیره گرنادا^۳ انجام شد [۱۶].

۳-۱-۱- دوران جنگ سرد: عصر طلایی سازه‌های

زیرزمینی عمیق

با پایان جنگ جهانی دوم و آغاز جنگ سرد، تهدید هسته‌ای به عنوان انگیزه‌ای تعیین‌کننده برای ساخت تأسیسات زیرزمینی عمیق ظاهر شد. این دوره را می‌توان عصر طلایی سازه‌های زیرزمینی نظامی نامید. دو قدرت بزرگ جهان، آمریکا و شوروی، سرمایه‌گذاری عظیمی برای دفن کردن مراکز فرماندهی و تحقیقات خود در اعماق زمین آغاز کردند. در ادامه به طور مختصر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

۳-۱-۱- ایالات متحده آمریکا

در اینجا به برخی از تأسیسات ایالات متحده آمریکا که به صورت آشکار درآمده است اشاره می‌شود؛ بدیهی است بسیاری از مراکز زیرزمینی رژیم تروریستی آمریکا نیز هنوز علنی نشده است.

ا) تأسیسات کوه آب و هوا^۴ که به «پنتاگون زیرزمینی» نیز معروف است، یکی از مهم‌ترین پروژه‌های این دوره محسوب می‌شود. این تأسیسات در عمق ۷۵ تا ۹۰ متری سنگ سخت در ایالت ویرجینیا، در فاصله ۷۵ کیلومتری واشنگتن دی.سی.، بین سال‌های ۱۹۵۴ تا ۱۹۵۸ ساخته شد [۱۳]. هدف این مرکز، فراهم‌آوردن پناهگاهی امن برای رئیس‌جمهور و مقامات ارشد آمریکا در صورت وقوع جنگ هسته‌ای بود. این تأسیسات شامل ۲۰ ساختمان بتنی مسلح، تأسیسات تولید برق مستقل، مخازن آب، بیمارستان، مرکز پخش تلویزیونی و رادیویی و سامانه‌های پیشرفته ارتباطی است [۱۵، ۱۴].

^۵ Cheyenne Mountain

^۶ Colorado

^۷ North American Aerospace Defense Command

^۸ Underground Defense Command Center

^۹ Mishnyagora Fortress

^{۱۰} Crimean Peninsula

^۱ Anthrax

^۲ Botulinum toxin

^۳ Grenada

^۴ Weather Mountain

۳-۱-۳- دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰: توسعه آزمایشگاه‌های تحقیقاتی زیرزمینی

در این دوره، صرفاً مراکز فرماندهی نبودند که به زیر زمین منتقل شدند، بلکه آزمایشگاه‌های تحقیقاتی حساس نیز در اعماق زمین جای گرفتند. فورت دریتریک^۱ در مریلند^۲، نمونه بارز این تحول است. این پایگاه که در سال ۱۹۴۳ به عنوان مرکز تحقیقات جنگافزارهای بیولوژیک ارتش آمریکا تأسیس شد، در دوران جنگ سرد به محرمانه‌ترین مرکز تحقیقاتی سیا (CIA)^۳ تبدیل گردید [۷، ۱۱]. در این مرکز، برنامه مخفی ام‌کی‌اولترا^۴ برای یافتن روش‌های کنترل ذهن اجرا می‌شد که شامل آزمایش‌های گسترده بر روی انسان‌های بی‌خبر بود. اگرچه بخش اعظم این تأسیسات سطحی بود، اما حساس‌ترین آزمایشگاه‌ها و انبارهای سموم در بخش‌های زیرزمینی و ایزوله قرار داشتند.

۳-۲- توسعه آزمایشگاه‌های زیرزمینی هسته‌ای

نیاز به انجام آزمایش‌های هسته‌ای بدون انتشار آلودگی رادیواکتیو در محیط، منجر به توسعه تأسیسات ویژه‌ای در اعماق زمین شد. آزمایشگاه اصلی زیرزمینی برای آزمایش‌های زیربحرانی^۵ PULSE در سایت امنیت ملی نوادا (NNSS)^۶ نمونه کامل این دسته از تأسیسات است. حفره‌ای در این سایت، ابتدا در دهه ۱۹۶۰ برای یک آزمایش هسته‌ای زیرزمینی حفر شد که بعداً پروژه آزمایش هسته‌ای لغو گردید. لیکن در سال ۱۹۸۸، این حفره تکمیل گردید و در سال ۱۹۹۰ آزمایش هسته‌ای «لدو»^۷ در عمق حدود ۲۹۰ متری زمین در آن انجام شد [۱۴]. امروزه این مجموعه با ۲،۲۵ کیلومتر تونل، به مرکزی برای انجام آزمایش‌های زیربحرانی با پلوتونیوم^۸ تبدیل شده که داده‌های حیاتی برای

تأمین ایمنی و قابلیت اطمینان زرادخانه هسته‌ای آمریکا فراهم می‌کند [۱۴، ۱۰].

۳-۳- دهه ۱۹۹۰ به بعد: توسعه تأسیسات

پژوهشی-تولیدی

در دهه ۱۹۹۰، کشورهای زیادی به ویژه کشورهای خاورمیانه به اهمیت تأسیسات زیرزمینی پی بردند. شهر موشکی زیرزمینی سوریه در حلب که ساخت آن در سال ۱۹۹۸ به پایان رسید، شامل ۳۰ پناهگاه بتنی مسلح، خطوط تولید موشک، آزمایشگاه‌های تحقیق و توسعه و مرکز فرماندهی بود. این مجموعه برای ذخیره موشک‌های اسکاد و مقاومت در برابر حملات هوایی دقیق طراحی شده بود و تونل‌هایی به طول چندین کیلومتر داشت که برخی از آنها مستقیماً به کاخ ریاست جمهوری در دمشق متصل می‌شد.

کشور چین نیز به تازگی برنامه گسترده‌ای برای ایجاد راهروی زیرزمینی راهبردی در غرب کشورش با هدف حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی و انرژی تصویب کرده است [۶، ۱].

۳-۴- توسعه تأسیسات غیردولتی: نمونه حزب‌الله

لبنان

نکته جالب توجه در تاریخچه این سازه‌ها، ساخت دژهای زیرزمینی توسط بازیگران غیردولتی است. حزب‌الله لبنان در دهه ۲۰۰۰، شبکه گسترده‌ای از تونل‌ها و پناهگاه‌های زیرزمینی در عمق ۳۰ تا ۵۰ متری در مرز لبنان و فلسطین اشغالی ساخت. این تأسیسات که با امکانات اولیه و حمل دستی تجهیزات از دره‌های اطراف ساخته شده بودند، در جنگ ۲۰۰۶ میلادی نشان دادند که چگونه یک نیروی نامنظم می‌تواند با بهره‌گیری از عمق زمین، با کمترین امکانات در برابر پیشرفته‌ترین فناوری‌های نظامی دشمن موفق شود.

¹ Fort Detrick

² Maryland

³ Central Intelligence Agency

⁴ MK-ULTRA

⁵ Subcritical experiments

⁶ Nevada National Security Site

⁷ Ledo nuclear test

⁸ Plutonium

۴- مبانی نظری

در ادبیات تخصصی نظامی-مهندسی، تأسیسات زیرزمینی بر اساس عمق و ماهیت سازه به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱،۵]:

(۱) سازه‌های سخت سطحی: سقف فضای عملیاتی در تراز سطح زمین یا بالاتر از آن قرار دارد (مانند پناهگاه‌های خاک‌پوش).

(۲) سازه‌های زیرزمینی کم عمق: سقف فضای عملیاتی بین سطح زمین تا عمق ۲۰ متری واقع شده است.

(۳) سازه‌های زیرزمینی عمیق: سقف فضای عملیاتی زیر ۲۰ متری سطح زمین و معمولاً در اعماق ۱۰۰ تا ۷۰۰ متری قرار دارد.

هدف اصلی این سازه‌ها، موسوم به «اهداف سخت و عمیقاً مدفون (HDBTs)»^۱، تأمین حداکثر ایمنی در برابر انفجارات هسته‌ای، بمب‌های نفوذگر و سایر جنگ‌افزارهای پیشرفته است. طبق گزارش آژانس امنیت ملی آمریکا^۲، حدود ۱۰۰۰۰ هدف HDBT در سراسر جهان شناسایی شده که حدود ۲۰ درصد آنها عملکرد راهبردی دارند [۱].

۴-۱- تهدیدات پیش روی مراکز پژوهشی

مراکز پژوهشی نظامی با طیف متنوعی از تهدیدات مواجه هستند که ضرورت استحکام و عمق‌یابی را دو چندان می‌کند. در ادامه به برخی از این تهدیدات اشاره می‌شود:

۴-۱-۱- تهدیدات هسته‌ای

اگرچه بمب‌های هسته‌ای عظیم‌الجثه امروزه کمتر مورد تهدید هستند، اما اثرات امواج ضربه‌ای، تشعشع حرارتی و امواج الکترومغناطیسی ناشی از انفجارهای هسته‌ای سطحی یا هوایی می‌تواند تأسیسات سطحی را به کلی نابود کند. تنها لایه‌های ضخیم خاک و سنگ می‌توانند تشعشعات نوترونی و گاما را تا حد ایمن کاهش دهند [۸،۱].

۴-۱-۲- بمب‌های نفوذگر^۳

پیشرفت در مهمات نفوذگر نظیر GBU-57 (معروف به بمب ۳۰،۰۰۰ پوندی) که قادر به نفوذ بیش از ۶۰ متر در خاک و ۸ متر در بتن مسلح است، امنیت سازه‌های زیرزمینی کم عمق را به شدت کاهش داده است [۱۰،۶]. برای مقابله با این تهدید، تنها عمق بسیار زیاد (بیش از ۱۰۰ متر) و استفاده از سازه‌های چندلایه^۴ کارگشا است [۱،۲].

۴-۱-۳- تهدیدات شیمیایی، میکروبی و سایبری

نشت عوامل شیمیایی یا میکروبی ناشی از بمباران یک مرکز پژوهشی، می‌تواند فاجعه‌ای زیست‌محیطی به بار آورد. انفجار در سطح زمین یا نفوذ هواپیماهای جاسوسی، ریسک افشای داده‌های محرمانه را افزایش می‌دهد. تأسیسات زیرزمینی با کنترل فیزیکی شدید ورود و خروج و ایزولاسیون کامل، ایمنی بالاتری در این زمینه دارند [۱۰،۴].

۴-۲- مزایا و چالش‌های ایمنی سازه‌های

زیرزمینی

سازه‌های زیرزمینی از مزایای بسیاری برخوردار هستند که در ادامه به برخی موارد به صورت خلاصه اشاره می‌شود.

۴-۲-۱- اصل پدافند غیرعامل و استهلاک انرژی

اصلی‌ترین مزیت ایمنی سازه‌های زیرزمینی، استفاده از لایه طبیعی زمین به عنوان سپر ضربه‌گیر است. امواج انفجار با عبور از لایه‌های مختلف زمین (خاک، سنگ‌های درشت دانه، سنگ بکر) دچار شکست، بازتاب و استهلاک انرژی می‌شوند. طراحی استاندارد برای تأسیسات راهبردی معمولاً شامل لایه‌های چندتایی است؛ یعنی لایه‌های بتنی جداگانه با فاصله هوایی یا لایه سنگ‌ریزه که هدف آنها خرد کردن کلاهک نفوذگر پیش از رسیدن به لایه اصلی حفاظتی است [۱].

³ Bunker Busters

⁴ Burster Slab

¹ Hard and Deeply Buried Targets (HDBTs)

² NSA: National Security Agency

۴-۲-۲- حفاظت در برابر انفجار هسته‌ای

در صورت وقوع انفجار هسته‌ای در فاصله نزدیک، مهم‌ترین عوامل تخریب برای تجهیزات زیرزمینی امواج ضربه‌ای زمین^۱ هستند. تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از پوشش‌های فولادی، پشت بندهای بتنی و سیستم‌های جذب شوک (مانند لایه‌های شن و ماسه) می‌توان حفره‌های زیرزمینی را در برابر تنش‌های دینامیکی ناشی از انفجار ۲۵+ مگاتنی حفظ کرد [۹].

۴-۲-۳- پنهان‌سازی^۲ و امنیت عملیاتی

ایمنی تنها به مقاومت فیزیکی محدود نمی‌شود. پنهان ماندن از دید دشمن، قدم اول برای در امان ماندن است. تأسیسات زیرزمینی به دلیل نداشتن ردپای حرارتی واضح (کاهش آسیب‌پذیری در برابر تصاویر ماهواره‌ای حرارتی) و پنهان بودن ورودی‌ها در میان عوارض طبیعی، شناسایی آن‌ها با چالش مواجه است [۴، ۸]. این ویژگی برای مراکز پژوهشی نظامی که محرمانگی آن‌ها اولویت دارد، حیاتی است.

۴-۲-۴- تداوم عملیات در شرایط بحران^۳

تجربیات تاریخی به ویژه در جنگ ۱۲ روزه و جنگ رمضان نشان داده است که در جنگ‌های تمام عیار، اولین هدف مهاجمان، مراکز فرماندهی، کنترل، ارتباطات و رایانه (C4) و مراکز تحقیقات تسلیحاتی است. وجود تأسیسات زیرزمینی با ذخایر سوخت، آب، غذا و سیستم‌های تصفیه هوای مستقل، تضمین می‌کند که روند تحقیق و توسعه فناوری‌های نظامی در حین جنگ متوقف نشود [۶، ۱].

۴-۲-۵- چالش‌های فنی و راهکارهای مهندسی

با وجود مزایای ایمنی، ساخت این مراکز با چالش‌های جدی مواجه است که حل آنها مستلزم راهکارهای مهندسی خاصی است. در ادامه به برخی از این موانع اشاره می‌شود:

- (۱) تنش‌های زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی:
حفر تونل در اعماق زیاد با خطر «ریزش سنگ»^۴

و هجوم آب زیرزمینی همراه است. راهکار مدرن استفاده از روش‌های «پوشش بتنی پشت بنددار»^۵ و «پیچ‌های سنگی»^۶ برای تثبیت محیط اطراف حفره است [۳، ۹].

(۲) کنترل کیفیت هوا: با توجه به خطر حملات

شیمیایی یا میکروبی، سیستم تهویه در تأسیسات زیرزمینی نظامی باید از نوع «مدار بسته» یا مجهز به فیلترهای چندلایه (HEPA و کربن فعال) باشد تا هیچ گونه عامل آلاینده‌ای وارد فضای داخلی نشود. همچنین ورودی هوا باید به گونه‌ای طراحی شود که در برابر «موج انفجار»^۷ مقاومت کند [۸].

(۳) تاب‌آوری تجهیزات حساس: آزمایشگاه‌های

پژوهشی نظامی اغلب حاوی تجهیزات فوق حساس (مانند میکروسکوپ‌های الکترونی، سانتریفیوژها یا لیزرهای پرتوان) هستند. ارتعاشات ناشی از انفجار یا حتی رفت و آمد خودروهای سنگین در سطح زمین می‌تواند دقت این تجهیزات را مختل کند. از این رو، طراحی «سیستم‌های جداساز ارتعاش»^۸ و شناورسازی کف سالن‌های حساس در داخل محفظه‌های زیرزمینی ضروری است [۸].

(۴) سیستم روشنایی: سیستم روشنایی همواره یکی

از چالش‌های مراکز زیرزمینی بوده است. اخیراً به کمک دالان‌هایی از فیبر نوری یا آینه، نور خورشید را به ابنیه زیرزمینی انتقال می‌دهند.

۴-۲-۶- تحلیل هزینه - فایده (چرخه حیات)

یکی از استدلال‌های رایج علیه ساخت مراکز زیرزمینی، هزینه‌های بالای حفاری و استحکام‌بخشی اولیه است. اما مطالعات مهندسی نشان می‌دهد که اگر چه هزینه ساخت سازه زیرزمینی ممکن است ۲۰ تا ۳۰ درصد بیش از سازه سطحی باشد، اما «هزینه چرخه عمر»^۹ آن در بازه ۲۰ تا ۳۰ ساله کمتر است [۵، ۳]. علت این امر صرفه‌جویی قابل توجه

^۵ Backpacker Liner

^۶ Rock Bolts

^۷ Blast Wave

^۸ Vibration Isolation Systems

^۹ Life Cycle Cost

^۱ Ground Shock

^۲ Obfuscation

^۳ Survivability

^۴ Rock Burst

۴. مدل جدید سطح ایمنی:

حالا می‌توان سطح ایمنی (S) را به صورت زیر مدل کرد:

$$S = \frac{(R \times C) + (0.5 \times D)}{I_{effective}(D, I_{initial}) + 1}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح ایمنی به پارامترهای $D, I_{initial}, R, C$ بستگی دارد. در این فرمول صورت کسر یعنی عبارت

$$(R \times C) + (0.5 \times D)$$

نشان‌دهنده عوامل افزایش‌دهنده ایمنی است (مقاومت سازه، قابلیت اطمینان سیستم‌ها، و عمق). ضریب R و C نشان می‌دهد که هر دو باید بالا باشند تا ایمنی به طور قابل توجهی افزایش یابد. مخرج کسر یعنی عبارت

$$I_{effective}(D, I_{initial}) + 1$$

نیز نشان‌دهنده عوامل کاهش‌دهنده ایمنی (تأثیر حمله مؤثر) است. عدد ۱ در مخرج برای جلوگیری از تقسیم بر صفر و همچنین نشان دادن این است که حتی در صورت صفر بودن تأثیر حمله، همچنان مخرج یک مقدار پایه دارد.

۶- یافته‌ها

نتیجه یعنی سطح ایمنی S را می‌توان به صورت درصدی نرمال‌سازی کرد. در جدول ۱ کد Maple شبیه‌سازی شده آورده شده است.

جدول ۱. کد شبیه‌سازی شده سطح ایمنی

```
restart;
with(plots):

# تعریف تابع شدت مؤثر ۱.
EffectiveIntensity := proc(Depth, InitialIntensity)
    local DecayRate;
    DecayRate := 0.05;
    return InitialIntensity * exp(-DecayRate * Depth);
end proc;

# تعریف تابع اصلی محاسباتی (بدون تغییر) ۲.
SafetyLevelComplex := proc(D, InitialI, R, C)
    local EffectiveI, SafetyScore, NormalizedSafety, MaxR,
    MaxC, MaxD, MaxPossibleSafetyScore;
    EffectiveI := EffectiveIntensity(D, InitialI);
    SafetyScore := (R*C + 0.5*D)/(EffectiveI + 1);
    MaxR := 10; MaxC := 1; MaxD := 100;
    MaxPossibleSafetyScore := MaxR*MaxC + 0.5*MaxD;
    NormalizedSafety :=
    100*SafetyScore/MaxPossibleSafetyScore;
    return max(0, min(NormalizedSafety, 100));
end proc;

# استفاده از آرگومان‌های صریح در دستور رسم ۳.
```

در مصرف انرژی (ایزولاسیون حرارتی طبیعی زمین) و کاهش هزینه‌های بیمه و نگهداری به دلیل آسیب‌پذیری کمتر در برابر بلایای طبیعی و حملات است. همچنین از منظر ایمنی راهبردی، هزینه از دست دادن کل توانمندی پژوهشی یک کشور در اثر یک حمله هوایی موفق، به مراتب بیشتر از سرمایه‌گذاری اولیه برای دفن کردن آن مرکز است.

۵- روش تحقیق

در بخش‌های مختلف قبلی، به صورت مروری به بررسی مزایا و چالش‌های ایمنی سازه‌های زیرزمینی پرداخته شد. اکنون برای مشاهده تأثیر پارامترهای مختلف، از مدل‌سازی ریاضی استفاده کرده و سپس مدل ساخته شده، با نرم‌افزار Maple پیاده‌سازی می‌گردد. فرض کنید سطح ایمنی (S) به عمق (D) و شدت حمله (I)، به مقاومت سازه (R) و قابلیت اطمینان سیستم‌های حیاتی (C) مانند تهویه، برق اضطراری نیز بستگی دارد. همچنین، شدت حمله خود می‌تواند تحت تأثیر عمق قرار گیرد (مثلاً حملات سطحی اثر کمتری در عمق دارند).

۱. تأثیر عمق بر شدت حمله:

فرض کنید شدت حمله مؤثر در عمق D ، با تابعی کاهشی نسبت به شدت حمله اولیه $I_{initial}$ به صورت زیر باشد:

$$I_{effective}(D, I_{initial}) = I_{initial} \times e^{-0.05 \times D}$$

در اینجا e پایه لگاریتم طبیعی است و ضریب ۰.۰۵ نشان‌دهنده نرخ کاهش تأثیر حمله با افزایش عمق است.

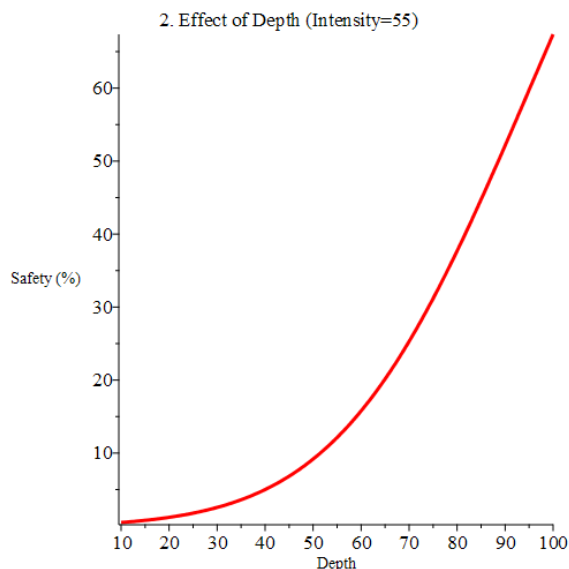
۲. مقاومت سازه (R):

فرض کنید مقاومت سازه به جنس مصالح، ضخامت و طراحی آن بستگی دارد. در اینجا برای سادگی، آن را یک پارامتر مستقل در نظر می‌گیریم. بدیهی است که مقاومت بالاتر، ایمنی را افزایش می‌دهد.

۳. قابلیت اطمینان سیستم‌های حیاتی (C):

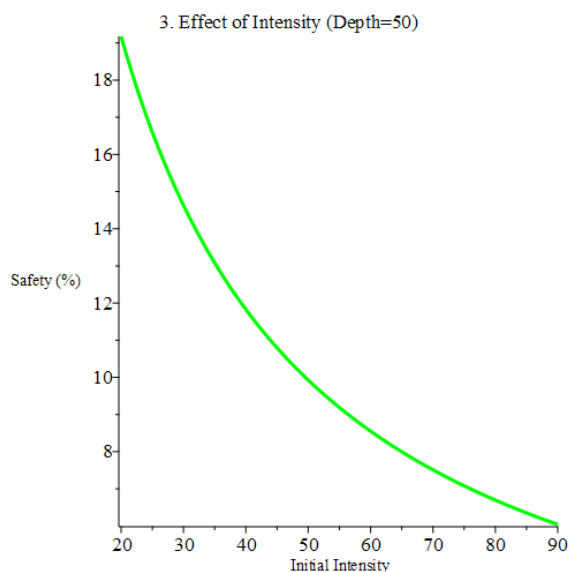
این پارامتر نشان‌دهنده درصد احتمال کارکرد صحیح سیستم‌های پشتیبانی است. بدیهی است که اطمینان بالاتر، ایمنی را افزایش می‌دهد.

برای اینکه تاثیر عمق به طور مشخص‌تری بیان شود، نمودار ایمنی در برابر عمق نیز در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. نمودار سطح ایمنی در برابر عمق

همان طوری که مشاهده می‌شود، تحت تاثیر شدت اولیه ۵۵، هر چه عمق افزایش می‌یابد سطح ایمنی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که هر چه شدت اولیه بیشتر باشد، سطح ایمنی نیز پایین‌تر می‌آید. شکل ۳ نمودار ایمنی در برابر شدت حمله را در عمق ۵۰ متری نشان می‌دهد.



همان طوری که انتظار داریم، سطح ایمنی با افزایش شدت حمله، به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

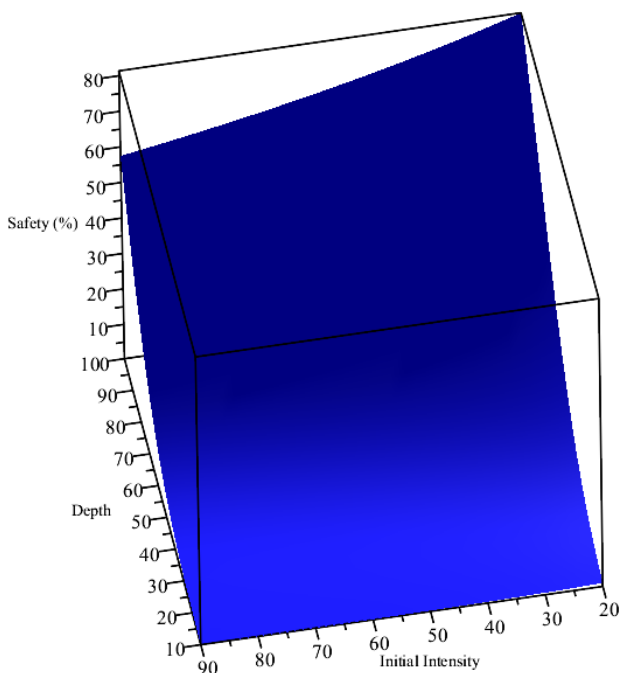
```
# نمودار سه‌بعدی
Plot3D := plot3d(proc(x, y) SafetyLevelComplex(x, y, 6, 0.9)
end proc, 10..100, 20..90,
axes = boxed, labels = ["Depth", "Initial Intensity", "Safety (%)"],
title = "1. 3D Safety Surface", style = surface, grid = [25, 25], color = blue);

# نمودار دوبعدی عمق
PlotDepth := plot(proc(x) SafetyLevelComplex(x, 55, 6, 0.9)
end proc, 10..100,
labels = ["Depth", "Safety (%)"],
title = "2. Effect of Depth (Intensity=55)", color = red,
thickness = 3);

# نمودار دوبعدی شدت
PlotIntensity := plot(proc(y) SafetyLevelComplex(50, y, 6, 0.9)
end proc, 20..90,
labels = ["Initial Intensity", "Safety (%)"],
title = "3. Effect of Intensity (Depth=50)", color = green,
thickness = 3);

# نمایش خروجی‌ها
print(Plot3D);
print(PlotDepth);
print(PlotIntensity);;
```

شبیه‌سازی سطح ایمنی نشان می‌دهد که با افزایش عمق، سطح ایمنی افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱ ارائه شده است. در این شبیه‌سازی، سطح ایمنی در برابر دو محور شدت اولیه و عمق نشان داده شده است.



شکل ۱. شبیه‌سازی سه بعدی سطح ایمنی

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، ملاحظات تفوریک و تحلیل‌های صورت‌گرفته پیرامون تهدیدات مدرن و ظرفیت‌های پدافند غیرعامل، استقرار سازه‌های نظامی و تحقیقاتی در لایه‌های عمیق‌تر زمین، به عنوان یک استراتژی قابل‌تأمل در جهت ارتقای سطح بازدارندگی و تضمین تداوم عملیاتی مطرح می‌گردد. یافته‌های این پژوهش، به‌ویژه با در نظر گرفتن الگوهای درگیری‌های اخیر (مانند جنگ ۱۲ روزه و جنگ رمضان)، بر اهمیت حیاتی تدابیر حفاظتی پیشرفته تأکید می‌ورزد.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پوسته زمین به عنوان یک سپر فیزیکی، پتانسیل قابل‌توجهی در مقابله با چالش‌های ناشی از تسلیحات پیشرفته، از جمله بمب‌های نفوذگر با قدرت تخریب بالا و اثرات مخرب سلاح‌های هسته‌ای، ایفا می‌نماید. با این حال، صرف انتقال تأسیسات به زیر زمین، بدون در نظر گرفتن ملاحظات دقیق مهندسی، راه‌حل کاملی نخواهد بود. مطالعات نشانگر آن است که سطح ایمنی و تاب‌آوری یک سازه زیرزمینی، تابعی پیچیده از متغیرهای متعدد از جمله عمق استقرار، خصوصیات ژئوتکنیکی محل، مقاومت مصالح سازه‌ای (مانند بتن‌های نانوپودر با استحکام فوق‌العاده)، طراحی معماری مقاوم در برابر امواج ضربه‌ای (Blast waves)، و همچنین کارایی سامانه‌های پشتیبان حیات و عملیاتی (مانند سیستم‌های تهویه هوشمند و مدیریت ترافیک پرسنل) است.

لذا، پیشنهاد می‌شود در چارچوب برنامه‌ریزی‌های آتی پدافند غیرعامل، رویکردی جامع‌نگر اتخاذ گردد که شامل موارد زیر باشد:

۱. **اولویت‌بندی انتقال سازه‌های نظامی و تحقیقاتی حساس به زیر زمین:** به‌ویژه تأسیسات پژوهشی راهبردی و آزمایشگاه‌های مرجع، که نیازمند حفاظت در برابر طیف وسیعی از تهدیدات هستند، باید در عمق‌های بیشتر (فراتر از ۱۰۰ متر) جانمایی و طراحی شوند.

۲. توسعه تحقیقات کاربردی در حوزه مصالح و فناوری‌های نوین:

تمرکز بر پژوهش بر روی موادی نظیر بتن‌های نانوپودر با استحکام فوق‌العاده برای مقابله با نسل جدید بمب‌های نفوذگر چندمرحله‌ای، ضروری است.

۳. طراحی سیستم‌های یکپارچه و هوشمند:

تأکید بر طراحی معماری هوشمند، توسعه سامانه‌های کنترلی پیشرفته برای تهویه و حفاظت از سازه، و بهینه‌سازی مسیرهای دسترسی و تخلیه برای پرسنل. در نهایت، این پژوهش اذعان می‌دارد که مفهوم ایمنی زیرزمینی یک مفهوم چندبعدی است و دستیابی به آن مستلزم نگاهی سیستمی و تلفیقی از عمق، مقاومت سازه‌ای، و هوشمندی عملیاتی است.

۸- مراجع

- [1] National Research Council, Division on Engineering, Physical Sciences, Committee on the Effects of Nuclear Earth-Penetrator, & Other Weapons. (2005). Effects of nuclear earth-penetrator and other weapons. National Academies Press.
- [2] Bagge, C. F. (1972). Design Consideration For Deep Underground Protective Facilities.
- [3] Kao, A. (1985). Literature Survey of Underground Construction Methods for Application to Hardened Facilities.
- [4] Zhang, H., Wang, Q., Wang, Z., Wan, Z., Fan, X., Zhang, A., & Zheng, W. (2026). Dynamic cooling load prediction for underground buildings considering soil thermal effects. Journal of Building Engineering, 115224.
- [5] Cui, Z. D., Zhang, Z. L., Yuan, L., Zhan, Z. X., & Zhang, W. K. (2020). Design of underground structures (pp. 493-552). Springer Singapore.
- [6] Wang, H. F. (2018). Underground Structure and Surface Structure. Earthquakes: Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction, 249.
- [7] Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). Underground infrastructures: planning, design, and construction. butterworth-heinemann.
- [8] Vinnichenko, M. V. (2007). A system-structural view on the use of underground space by troops. Military Thought, 16(3-4), 172-178.

- [9] Eastler, T. E. (2004). Military Use of Underground Terrain: A brief historical perspective. In Studies in military geography and geology (pp. 21-37). Dordrecht: Springer Netherlands.
- [10] Sepp, E. M. (2000). Deeply buried facilities: Implications for military operations (No. 14). Center for Strategy and Technology, Air War College, Air University.
- [11] Sinha, R. S. (Ed.). (2012). Underground structures: design and instrumentation. Elsevier.
- [12] Melillos, G., Themistocleous, K., Agapiou, A., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. (2020). Detecting Underground Military Structures Using Field. Military Engineering, 91.
- [13] Base, M. A. F. (2000). Deeply Buried Facilities. Occasional Paper.
- [14] Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). Underground infrastructures: planning, design, and construction. butterworth-heinemann.
- [15] Oktenli, B. (2026). Strategic Subterranean Domain Awareness: A Comprehensive Technical and Operational Evaluation of Next-Generation AI-Fused Counter-Tunnel Architectures. Available at SSRN 6046594.
- [16] Linger, D. A., Baker, G. H., & Little, R. G. (2021). Applications of underground structures for the physical protection of critical infrastructure. In North American Tunneling 2002 (pp. 333-339). CRC Press.

Investigation of the Safety Advantages and Challenges of Underground Structures and Simulation of Safety Levels

Ali Nakhaei Amroudi¹

¹ Associate Professor, Department of Passive Defense, University of Imam Hussein, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 October 2021

Received in revised form: 7 December 2021

Accepted: 8 December 2021

Available online: 13 December 2021

*Correspondence:

kpnakhaei@ihu.ac.ir

Keywords:

Research facilities, hardened underground structures, Safety, penetrator bombs, survivability.

ABSTRACT

Given the escalating advancements in technologies and the increased destructive power of modern weaponry, safeguarding strategic facilities and military research centers has become a critical challenge for national security. These centers, due to their pivotal role in developing cutting-edge technologies, are considered priority targets in military conflicts and thus necessitate novel defense solutions. This paper, adopting an analytical-simulation approach, investigates the necessity and advantages of establishing these facilities deep underground. The simulation results indicate that utilizing the Earth's natural geological layers as a defensive shield can significantly enhance facility safety against a broad spectrum of threats, including nuclear explosions, advanced penetration bombs, and cyber-electronic attacks. Although technical challenges associated with deep excavation, managing structures at great depths, and considerable initial costs pose obstacles to this approach, life cycle analysis reveals that the long-term benefits, such as risk reduction, ensuring the survival of research and operational capabilities, and enhanced deterrence, justify this investment in the long run. Therefore, the deployment of military research centers deep underground is not merely an option, but a strategic imperative for ensuring security and sovereignty in the present era.

