**Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University**

**Summer 2025, Vol. 42**

*Original Research*

# Technological Analysis, Performance Evaluation, and Underground Defense Strategies Against Bunker-Buster Bombs: A Systematic Review of Advancements, Challenges, and Research Gaps

**Dr. AmirMahdi Heydari Tafreshi** [1 *]

**Amirhossein Arefipoor** [2]

[1] Assistant Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

## ARTICLE INFO

**Received**: 2025.06.25

**Accepted**: 2025.08.04

**Published**: 2025.09.05

**Keyword**:

Underground defense,
bunker-buster bombs,
penetrators,
advanced materials,
numerical modeling

***Corresponding Author:**

Amir Mahdi Heidari Tafreshi

Email:
heydari.am@iamu.ac.ir

## ABSTRACT

With the advancement of modern weapon technologies, bunker-busting bombs have emerged as strategic threats against underground military and critical infrastructures. These high-penetration munitions can breach soil, concrete, and rock to destroy buried targets, posing complex defense challenges. This study systematically analyzes the technology of bunker-buster bombs, penetration mechanisms, influencing parameters, and the role of environmental conditions on penetration depth. Various underground defense strategies are reviewed, including advanced materials (such as UHPC, FGCC, and FRP), numerical methods, and high-fidelity modeling. Furthermore, experimental research, simulation data, and analytical models are examined to provide a comprehensive overview of current advancements and existing research gaps in hardening underground structures against penetrator threats. Key deficiencies—such as the lack of real-world data, limitations in modeling oblique penetration and coupled blast scenarios, and the need for smart protective materials—are highlighted. The study aims to support the development of resilient underground defense systems against deep-penetration threats.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

تابستان 1404 ، دوره 42

*مقاله پژوهشی*

# تحلیل فناوری، عملکرد و راهبردهای پدافند زیرزمینی در برابر بمب‌های سنگرشکن: مروری نظام‌مند بر پیشرفت‌ها، چالش‌ها و خلأهای پژوهشی

**امیر مهدی حیدری تفرشی[1*]، امیرحسین عارفی پور[2]**

[1] استادیار دانشکده مهندسی و پرواز، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام علی علیه السلام، تهران، ایران

[2] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد ، مشهد، ایران

**اطلاعات مقاله**

**دریافت مقاله:** 1404/04/06

**پذیرش مقاله:** 1404/05/13

**انتشار مقاله:** 1404/06/14

**کلید واژگان:**

پدافند زیرزمینی،

بمب سنگرشکن،

نفوذگرها،

مصالح پیشرفته،

مدل‌سازی عددی

**نویسنده مسئول***

**امیرمهدی حیدری تفرشی**

**پست الکترونیکی:**

heydari.am@iamu.ac.ir

**چکیده**

با توسعه فناوری‌های نوین تسلیحاتی، بمب‌های سنگرشکن به یکی از تهدیدات راهبردی علیه زیرساخت‌های زیرزمینی نظامی و حیاتی تبدیل شده‌اند. این تسلیحات با قابلیت نفوذ بالا در خاک، بتن و صخره، امکان تخریب هدفمند سازه‌های مدفون را فراهم می‌کنند و پدافند مؤثر در برابر آن‌ها به چالشی پیچیده بدل شده است. در این مقاله، با رویکردی نظام‌مند، به تحلیل فناوری بمب‌های سنگرشکن، سازوکارهای نفوذ، عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها، و تأثیر شرایط محیطی بر عمق نفوذ پرداخته شده است. سپس، راهبردهای متنوع پدافند زیرزمینی شامل مصالح پیشرفته (نظیر UHPC، FGCC، FRP) روش‌های عددی و مدل‌سازی‌های پیشرفته بررسی شده‌اند. همچنین، مطالعات تجربی، داده‌های عددی و مدل‌های تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا تصویری جامع از پیشرفت‌های صورت‌گرفته و خلأهای موجود در حوزه مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات سنگرشکن ارائه شود. در پایان، خلأهای پژوهشی همچون کمبود داده‌های واقعی، ضعف مدل‌سازی نفوذ مورب و انفجار همزمان، و لزوم توسعه مصالح هوشمند، مورد تأکید قرار گرفته‌اند. هدف این پژوهش، ایجاد بستری علمی برای ارتقای سامانه‌های دفاعی زیرزمینی در برابر تهدیدات پیشرفته نفوذگر است.

## 1- مقدمه

تحولات راهبردی در ساختارهای دفاعی طی دهه‌های اخیر، به‌ویژه با گسترش تهدیدات فناورانه نوین، موجب تغییرات اساسی در معماری سازه‌های نظامی شده است. به‌دنبال پیشرفت سامانه‌های تهاجمی، مراکز فرماندهی، انبارهای مهمات و زیرساخت‌های حیاتی به عمق زمین منتقل شده‌اند تا از آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر حملات مستقیم کاسته شود. با این حال، ظهور نسل جدیدی از مهمات نفوذگر موسوم به بمب‌های سنگرشکن که قادرند به اعماق خاک و بتن نفوذ کرده و در موقعیت‌های تاخیری یا هدفمند منفجر شوند، چالشی جدی در برابر مفاهیم سنتی استحکامات زیرزمینی ایجاد کرده است. این تسلیحات، به‌ویژه با طراحی‌های پیچیده و سامانه‌های هدایتی دقیق، قادرند ساختارهای مدفون را با دقت بالا منهدم کنند. در نتیجه، رویکردهای دفاعی صرفا مبتنی بر افزایش ضخامت یا عمق دفن، دیگر پاسخگوی این تهدیدات نیست و نیاز به طراحی چندلایه، بهره‌گیری از مصالح نوین و توسعه راهبردهای پدافند زیرزمینی پیچیده‌تر احساس می‌شود. در این میان، تحقیقات متعددی در زمینه تحلیل عملکرد بمب‌های سنگرشکن، مدل‌سازی عددی نفوذ، بررسی مقاومت مصالح، و ارزیابی راهکارهای مقابله‌ای انجام شده است. استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته مانند LS-DYNA و AUTODYN در شبیه‌سازی نفوذ، انفجار و شکست سازه‌ها، امکان تحلیل شرایط مختلف را فراهم کرده، اما هم‌چنان اختلافاتی در روش‌ها، نتایج و معیارهای ارزیابی وجود دارد که نیازمند مرور منسجم و نظام‌مند است.

مقاله حاضر با هدف تحلیل جامع فناوری بمب‌های سنگرشکن، مکانیزم‌های نفوذ، عوامل مؤثر بر عملکرد و ارزیابی راهبردهای مقابله‌ای، تدوین شده است. همچنین تلاش شده با مرور پژوهش‌های موجود، شکاف‌ها و نیازهای تحقیقاتی در حوزه پدافند زیرزمینی شناسایی و دسته‌بندی شوند. این تحلیل، بستری علمی برای ارتقای کارایی سامانه‌های مقاوم‌سازی در برابر تهدیدات نفوذگر فراهم می‌سازد.

## 2- طبقه بندی و تحلیل فناوری بمب های سنگرشکن

در ادبیات نظامی نوین، تسلیحات موسوم به بمب‌های سنگرشکن به دسته‌ای از مهمات هوشمند اطلاق می‌شود که برای نفوذ در اعماق زمین یا سازه‌های مستحکم زیرزمینی و انهدام اهداف راهبردی پنهان‌شده در لایه‌های مقاوم خاک، بتن و سنگ طراحی شده‌اند. این اهداف عمدتا شامل پناهگاه‌های فرماندهی، مراکز کنترل عملیات هسته‌ای، انبارهای تسلیحات و تأسیسات غنی‌سازی زیرزمینی هستند که با روش‌های متعارف هوایی یا زمینی، آسیب‌پذیری اندکی دارند. ظهور و توسعه‌ی این نوع از مهمات، پاسخی مستقیم به تغییر ماهیت تهدیدات مدرن و رشد فناوری‌های تدافعی زیرزمینی در دهه‌های پایانی قرن بیستم و آغاز قرن بیست‌ویکم است؛ جایی که کشورها به‌منظور حفظ ظرفیت بازدارندگی و استمرار فرماندهی در شرایط جنگی، به سمت استقرار زیرزمینی دارایی‌های حیاتی خود حرکت کرده‌اند. مقابله با این تهدیدات مستلزم بهره‌گیری از سلاح‌هایی با قابلیت نفوذ فیزیکی بالا، دقت هدف‌گیری پیشرفته و مکانیسم‌های انفجاری ویژه‌ای است که بتوانند ضمن عبور از لایه‌های محافظتی، در عمق بهینه منفجر شده و اثرگذاری حداکثری داشته باشند.

فناوری‌های مورد استفاده در بمب‌های سنگرشکن بسیار متنوع‌اند و شامل مهمات با بدنه‌ی فولادی تقویت‌شده، سرجنگی‌های چندمرحله‌ای، سامانه‌های هدایت لیزری یا ماهواره‌ای و فیوزهای انفجار تاخیری

هوشمند می‌شود. انرژی جنبشی بالا هنگام برخورد که از جرم زیاد و سرعت سقوط زیاد ناشی می‌شود به بمب این امکان را می‌دهد که با عبور از لایه‌های مقاوم سازه یا زمین، درست در مجاورت هدف فعال شود. از جمله مهم‌ترین مصادیق عملیاتی این نوع تسلیحات می‌توان به بمب‌های BLU-109، GBU-28، و نمونه پیشرفته‌تر GBU-57 Massive Ordnance Penetrator (MOP) اشاره کرد. هرکدام از این نمونه‌ها در پاسخ به نیازهای عملیاتی خاص توسعه یافته‌اند و در عملیات‌های واقعی همچون جنگ خلیج فارس، حملات ناتو به صربستان و تهدیدهای احتمالی علیه تأسیسات زیرزمینی کشورها به‌کار گرفته شده‌اند. در این مقاله، با تمرکز بر فناوری‌های موجود در این حوزه، عملکرد فنی، سازوکار نفوذ و انفجار، و ویژگی‌های متمایزکننده‌ی مهمات سنگرشکن، به تحلیل تخصصی و مقایسه‌ای بین چند نمونه‌ی شاخص پرداخته خواهد شد. این تحلیل، بنیان شناختی لازم را برای بررسی راهبردهای مقابله با این تهدید پیچیده فراهم می‌آورد.

در مقایسه با بمب‌های متعارف هوایی که عمدتا برای انهدام اهداف سطحی مانند باندهای فرود، انبارهای باز، کاروان‌های نظامی و استحکامات سبک استفاده می‌شوند، بمب‌های سنگرشکن دارای ساختاری تقویت‌شده، طراحی آیرودینامیک خاص و سرجنگی با توان نفوذ در عمق بالا هستند. بمب‌های متعارف در لحظه برخورد یا با اندکی تأخیر منفجر می‌شوند و به‌ندرت قادر به آسیب رساندن به اهداف مدفون در لایه‌های مقاوم خاک یا بتن هستند. در مقابل، سنگرشکن‌ها با استفاده از بدنه‌های آلیاژی سخت‌شده، فیوزهای تاخیری هوشمند و قدرت حرکتی فوق‌العاده، به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند پس از نفوذ به عمق چندین متر در خاک یا بتن مسلح، در مکان مورد نظر منفجر شوند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که در شرایطی که دشمن زیرساخت‌های حیاتی خود را در عمق زمین مستقر کرده یا با لایه‌های حفاظتی مهندسی‌شده پوشانده است، بمب‌های متعارف عملاً ناکارآمد باشند و تنها گزینه‌های مؤثر، مهمات نفوذگر باشند که با دقت بالا و انرژی جنبشی عظیم، ساختارهای زیرزمینی را منهدم سازند.

یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی و توسعه‌ی بمب‌های سنگرشکن، نابودی مراکز راهبردی و بازدارنده‌ای است که از منظر نظامی حیاتی تلقی می‌شوند و معمولا در عمق زمین یا درون سازه‌های مستحکم و چندلایه مستقر هستند. این اهداف شامل مراکز فرماندهی و کنترل می‌شود که نقش کلیدی در برنامه‌ریزی، صدور فرمان و هدایت عملیات‌های راهبردی دارند و نابودی آن‌ها می‌تواند توان مدیریتی یک کشور را به‌شدت مختل کند. همچنین، انبارهای مهمات و تسلیحات سنگین مانند موشک‌های بالستیک که در پناهگاه‌های تقویت‌شده و زیرزمینی نگهداری می‌شوند، از دیگر اهداف این تسلیحات هستند. پناهگاه‌ها و تأسیسات هسته‌ای نیز که با لایه‌های حفاظتی پیشرفته و پوشش‌های ضدانفجار محافظت می‌شوند، تنها با استفاده از بمب‌های نفوذگر قابلیت تخریب مؤثر دارند. وجود چنین اهدافی در اعماق زمین باعث شده است که توسعه‌ی سلاح‌های سنگرشکن، جایگاهی محوری در دکترین نظامی مدرن و راهبردهای حمله پیش‌دستانه کشورهایی با فناوری پیشرفته پیدا کند.

## 2-1- طبقه بندی بمب های سنگرشکن بر اساس ساز و کار نفوذ

بمب‌های سنگرشکن را می‌توان بر مبنای مکانیسم یا سازوکار نفوذ آن‌ها در اهداف مستحکم زیرزمینی، به

دسته‌های متمایزی تقسیم کرد. این طبقه‌بندی از منظر تحلیل فنی و همچنین بررسی روش‌های مقابله دفاعی اهمیت بسزایی دارد، چرا که هر دسته، از فناوری خاصی برای غلبه بر مقاومت مصالح هدف استفاده می‌کند. مدل‌های مهندسی مختلفی جهت پیش‌بینی عمق نفوذ پرتابه‌های صلب در اهداف بتنی ارائه شده‌اند که برخی مبتنی بر معادلات انرژی، برخی دیگر بر پایه تحلیل دینامیک شکست توسعه یافته‌اند (Ben-Dor et al., 2015; Rosenberg & Kositski, 2016) در یک دسته‌بندی کلی، چهار نوع مکانیسم اصلی برای نفوذ در اهداف را به‌صورت زیر می‌توان برشمرد:

### 2-1-1- نفوذگرهای انرژی جنبشی

این دسته رایج‌ترین و ابتدایی‌ترین نوع بمب‌های سنگرشکن را شامل می‌شود. سازوکار عملکرد آن‌ها مبتنی بر جرم زیاد و سرعت سقوط بالا است که موجب ایجاد انرژی جنبشی عظیم در لحظه برخورد می‌گردد. با بهره‌گیری از بدنه‌ای فوق‌العاده سخت‌شده که معمولا از فولاد آلیاژی با مقاومت بالا می‌باشد، بمب می‌تواند پس از رهاسازی از ارتفاع بالا، با شتاب گرانشی و بدون استفاده از پیشران اضافی، لایه‌های مقاوم خاک، بتن یا سنگ را شکافته و تا عمق چند متری نفوذ کند. از نمونه های بارز این دسته می‌توان به GBU-28 با بدنه فولادی از لوله توپ 8 اینچی M110 و BLU-109 که قادر به نفوذ در بیش از 2 متر بتن مسلح است اشاره کرد. این نوع از بمب‌ها اغلب از فیوزهای انفجار تاخیری بهره می‌برند تا پس از نفوذ به عمق مناسب، انفجار صورت گیرد.

### 2-1-2- نفوذگرهای هدایت‌شونده با سامانه انفجار ثانویه

این گروه، بمب‌ها علاوه بر سازوکار نفوذ مکانیکی، از سرجنگی دومرحله‌ای برای تخریب لایه‌های مقاوم استفاده می‌کنند. در مرحله اول، یک بار انفجاری پیش‌نفوذگر لایه بیرونی هدف را تخریب یا تضعیف می‌کند؛ و در مرحله دوم، سرجنگی اصلی وارد عمق شده و در محل اصلی هدف منفجر می‌شود. این فناوری عموماً در موشک‌های ضدزره استفاده شده، اما در نسخه‌های پیشرفته بمب‌های سنگرشکن نیز به‌کار رفته است. از جمله ویژگی کلیدی این دسته به توان نفوذ بیشتر در اهداف دارای لایه‌های چندگانه حفاظتی می‌شود اشاره کرد.

### 2-1-3- نفوذگرهای حرارتی-شیمیایی

در این مدل، سازوکار نفوذ نه بر اساس انرژی جنبشی صرف، بلکه با تکیه بر ایجاد فشار انفجاری متمرکز با دمای بالا انجام می‌شود. این بمب‌ها ابتدا وارد منافذ یا حفرات سازه می‌شوند و سپس با انفجار ترکیبات حرارتی (نظیر سوخت‌های آلومینیومی یا پودری)، موج شوک گرمایی شدیدی ایجاد می‌کنند که ساختار هدف را از درون منهدم می‌کند. این نوع سلاح‌ها برای تخریب پناهگاه‌های انسانی، تونل‌ها یا اتاقک‌های تقویت‌شده با فضای بسته بسیار مؤثرند. همچنین تفاوت کلیدی آن در نفوذ انفجاری به‌جای مکانیکی که معمولا دارای اثر کشنده بیشتر در فضای بسته است.

### 2-1-4- نفوذگرهای فوق‌سنگین با پیشران داخلی

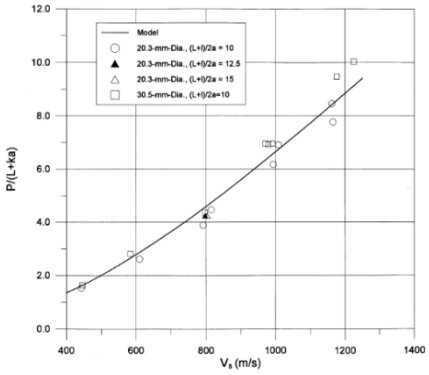
این نوع پیشرفته‌ترین دسته از مهمات سنگرشکن است. برخلاف مدل‌های سنتی که صرفاً با اتکا به شتاب گرانشی عمل می‌کنند، این بمب‌ها دارای موتورهای راکتی یا جت داخلی برای افزایش شتاب در مرحله نفوذ هستند. وزن بسیار زیاد، سامانه‌های هدایت ترکیبی و کنترل دقیق عمق انفجار، آن‌ها را به تسلیحاتی با توان تخریبی استثنایی در برابر اهداف با عمق بالا تبدیل می‌کند. از جمله نمونه شاخص آن می‌توان به GBU-57A/B Massive Ordnance Penetrator (MOP) که قادر به نفوذ در بیش از 60 متر خاک متراکم یا 18 متر بتن مسلح است اشاره کرد. جدول 1 به جمع بندی طبقه بندی بمب های سنگر شکن می‌پردازد.

**جدول 1 -جمع بندی طبقه بندی بمب های سنگرشکن**

| نوع بمب | ساز و کار نفوذ | نمونه های برجسته | عمق نفوذ معمول | کاربرد اصلی |
|---|---|---|---|---|
| انرژی جنبشی | انرژی جنبشی | GBU-28 , GBU-72 | ۲ تا ٦ متر در بتن | اهداف مستحکم رایج |
| انفجار ثانویه | بار دو مرحله‌ای | BLU-118/B | ۳ تا ۷ متر در بتن | اهداف لایه دار و حفاظت شده |
| حرارتی - شیمیایی | موج حرارتی/فشار | BLU-118/B | نفوذ موضعی | تونل ها و فضای بسته |
| فوق سنگین | موتور نفوذگر | GBU-57 MOP | تا ۱۸ متر در بتن | اهداف فوق عمیق راهبردی |

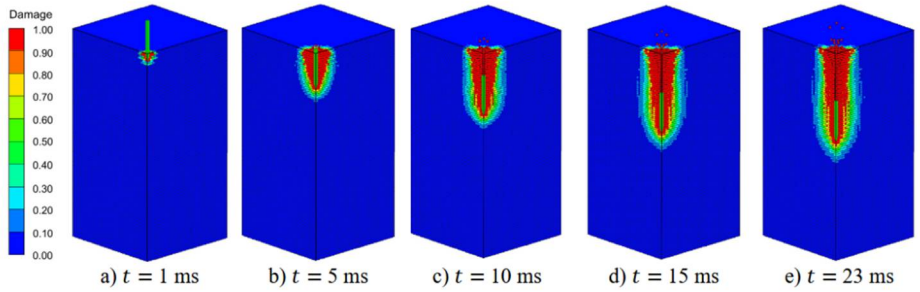
## 2-2- ویژگی‌های فنی تعیین‌کننده در قدرت نفوذ بمب‌های سنگرشکن

برای تحلیل توانایی نفوذ بمب‌های سنگرشکن و مقایسه عملکرد آن‌ها، لازم است مهم‌ترین ویژگی‌های فنی آن‌ها شناسایی شود. این پارامترها که بر مبنای اصول فیزیکی و مهندسی طراحی سلاح تعیین می‌شوند، شامل موارد متفاوتی می‌شوند. اولین عامل، جرم بزرگ یک بمب سنگرشکن است که نقش عمده‌ای در تأمین انرژی جنبشی بالا هنگام برخورد دارد؛ این انرژی تعیین‌کننده نفوذ اولیه به داخل زمین یا بتن است (Forrestal et al., 2003). برای مثال، GBU-57 MOP با وزن حدود 13.600 کیلوگرم (30.000 پوند)، بیش از ده برابر جرم GBU-28 و تقریباً شش‌برابر مدل‌های قبلی مثل BLU-109 است. این اختلاف فاحش در جرم، عامل اصلی افزایش نفوذ تا حدود 60 متر بتن یا 18 متر بتن فوق‌فشرده است. دومین عامل، سرعت بمب در لحظه برخورد است که تابعی از ارتفاع پرتاب و سبک طراحی بدنه می‌باشد. هرچقدر ارتفاع رهاسازی بیشتر باشد، سرعت نهایی بمب افزایش یافته و در نتیجه، انرژی جنبشی و توان نفوذ آن افزایش می‌یابد. برای نمونه، آزمایش‌های اولیه GBU-28 از باند پرواز بلند (F-111F) انجام شدند تا به نفوذ بیش از 5 متر بتن برسند. همچنین در شبیه سازی برخورد پرتابه‌های مختلف به بتن مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت پرتابه نفوذ آن در بتن پرمقاومت نیز بیشتر می‌شود (Liu et al., 2015). شکل 1 نتایج عمق نفوذ (بدون بعد) پرتابه با افزایش سرعت را نشان می دهد.




**شکل 1 - مقایسه عمق نفوذ بی بعد در مقابل سرعت پرتابه (Frew et al., 1998)**

عامل سوم بدنه‌ی مقاوم‌شده بمب، که عمدتا از فولاد با آلیاژ پرچگالی مانند ES-1 ساخته می‌شود است. این بدنه باید تحمل فشار شدید برخورد را داشته باشد و نه‌تنها خنثی نشود بلکه به عمق فرو رود (Yankelevsky et al., 2017). GBU-57 MOP از فولاد اگلین با چگالی بالا ساخته شده که توان استحکام در برابر فشار بالای ضربه و نفوذ را تأمین می‌کند. پس از نفوذ، عناصر انفجاری مانند AFX-757 و PBXN-114 در GBU-57 (حدود 2420 کیلوگرم) برای انفجار مؤثر در عمق هدف فعال می‌شوند. این ترکیبات به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در فضای محدود زیرسطح، بیشترین خسارت داخلی را ایجاد کنند (Wang et al., 2019). همچنین دقت هدف‌گیری، به‌ویژه برای اهداف زیرزمینی با دهانه محدود، اهمیت حیاتی دارد. سامانه‌های هدایت لیزری و ماهواره‌ای با بالاترین دقت در GBU-57 به همراه باله‌های شبکه‌ای برای کنترل مسیر، تضمین کننده اصابت دقیق به هدف هستند. دقت لازم برای جلوگیری از جابجایی انفجار از نقطه مورد نظر نیز حیاتی است. مطالعه (Kong et al., 2016) بیان کرده که دقت هدف‌گیری، با قطعیت بیشتر در مسیر و کاهش انحراف، منجر به تمرکز انرژی بیشتر شده و عمق نفوذ را افزایش می‌دهد. آخرین عامل، فیوز هوشمند بمب‌های سنگرشکن است که می‌تواند بر اساس عمق نفوذ تشخیص دهد چه زمانی باید انفجار صورت گیرد. برخی نسخه‌ها فیوزهایی با قابلیت تشخیص فضای خالی دارند که انفجار را پس از رسیدن به فضای داخلی پر از حفره فعال می‌کنند (Yang et al., 2018). این فیوزها در زمان انفجار تاخیری نیز قابل برنامه‌ریزی هستند. در همین ارتباط شکل 2 نحوه آسیب در بتن در زمان های مختلف ناشی از برخورد یک پرتابه را نشان می‌دهد. همچنین جمع بندی ویژگی‌های فنی تعیین‌کننده نفوذ بمب‌های سنگرشکن در جدول 2 به صورت خلاصه آورده شده است.



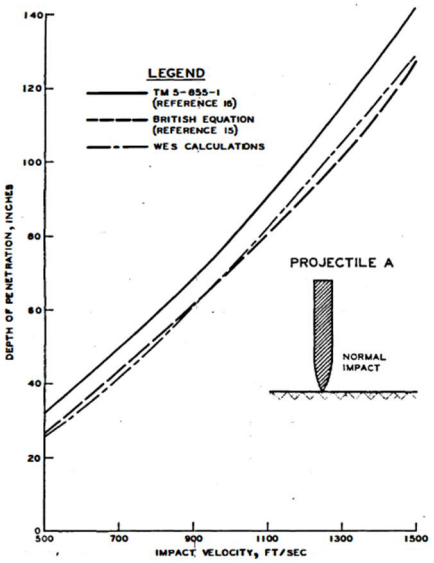

**شکل 2 – نحوه آسیب در هدف بتن حجیم (با مقاومت معمولی) تحت نفوذ پرسرعت (Yang et al., 2018)**

**جدول 2 -جمع بندی ویژگی های فنی تعیین کننده در نفوذ بمب های سنگرشکن**

| ویژگی فنی | توضیح و نقش مهم | نمونه برجسته |
|---|---|---|
| جرم کل بمب | افزایش انرژی جنبشی نفوذ | GBU-57 |
| سرعت برخورد/ ارتفاع | افزایش نفوذ با بزرگ‌نمایی $m v^2$ | آزمایش GBU-28 |
| جنس وسختی بدنه | حفظ ساختار در برابر فشار بالا | فولاد Eglin در GBU-57 |
| طراحی سر جنگی و ماده منفجره | حداکثر تخریب داخلی پس از نفوذ | ترکیب AFX-757/PBXN-114 در GBU-57 |
| هدایت دقیق | جلوگیری از انفجار خارج از هدف | GPS/INS و بالچه‌های شبکه‌ای |
| فیوز هوشمند / تاخیری | کنترل زمان انفجار در عمق مطلوب | LPSF و تشخیص فضای خالی |

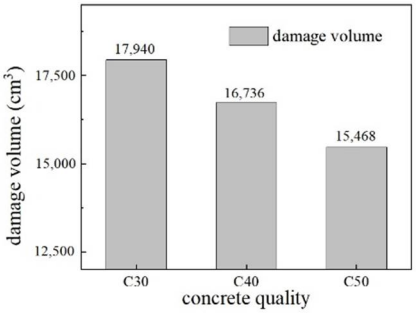
## 3-2- تأثیر محیط برخورد بر عمق نفوذ در بمب‌های سنگرشکن

بسیاری از تحقیقات فنی نشان می‌دهند که توان نفوذ یک بمب سنگرشکن به‌شدت تحت تأثیر نوع ماده هدف (خاک، سنگ، بتن)، مقاومت مصالح و عمق دفن قرار دارد. این عوامل، پارامترهای مؤثر در طراحی سامانه‌های دفاعی زیرزمینی و تحلیل تهدید را شکل می‌دهند. در خاک‌های نرم مانند رس سیلیتی، نفوذ تا حدود 100 متر قابل پیش‌بینی است، در حالی که در سنگ سخت عمق نفوذ به حدود 12 متر کاهش می‌یابد. برای خاک‌های متوسط، کاهش عمق تا حدود 30 متر مشاهده می‌شود . این تفاوت بیانگر مقاومت بسیار بالاتر سنگ نسبت به خاک نرم است. تحلیل عددی بر روی تونل‌هایی مدفون در خاک سیلتی نشان داد که عمق نفوذ در خاک نرم می‌تواند به بیش از 100 متر برسد، در حالی که در خاک با چگالی بیشتر (قابل مقایسه با خاک متوسط)، عمق نفوذ تا حدود 30 متر کاهش می‌یابد (Sarmah et al., 2024). در سنگ با مقاومت متوسط (حدود 5000 psi)، عمق نفوذ به 30 متر، و در سنگ مقاوم‌تر تا حدود 12 متر کاهش می‌یابد؛ حتی در سنگ فوق سخت، نفوذ بیشتر از اینها نامحتمل است (Rohani, 1975). شکل 3 نمودار عمق نفوذ در مقابل سرعت پرتابه را نشان می‌دهد.




**شکل 3 – نمودار عمق نفوذ در مقابل سرعت پرتابه در لحظه برخورد (Rohani, 1975)**

علاوه بر مصالح گفته شده، BLU-109 قادر به نفوذ در حدود 1.8 متر بتن مسلح است، در حالی که این مقدار برای (Advanced Unitary Penetrator) BLU-116 حدود 3.4 متر، برای GBU-28 و BLU-113 حدود 6 متر یا بیشتر و برای GBU-57 / BLU-127 (MOP) به ترتیب 18 متر بتن مسلح را می‌توانند نفوذ کنند. همچنین هرچه میزان تقویت بتن با میلگرد بیشتر باشد به طور طبیعی مقدار نفوذ نیز کاهش می‌یابد(Zhu et al., 2024). شکل 4 نشان می‌دهد که هرچه کیفیت بتن بالاتر باشد میزان حجم خسارت ناشی از برخورد پرتابه کمتر است.




**شکل 4 – حجم خسارت بتن با رده‌های مقاومتی مختلف در اثر برخورد مشخص (Zhu et al., 2024)**

مطالعات نشان داده‌اند که عمق دفن علاوه بر کاهش نفوذ، موجب انتقال امواج انفجاری به سازه شده و افزایش تخریب سازه هدف را ممکن می‌سازد؛ اما تنش مؤثر به‌طور فزاینده در عمق‌های بیشتر انتقال

می‌یابد(Sarmah et al., 2024). همگن نبودن ژئولوژی زیر سطحی باعث نوسان 20% در عمق نفوذهای تخمینی می‌شود. هرچقدر مقاومت مصالح هدف بیشتر باشد، توان تخریبی موج انفجار به سازه‌های مدفون منتقل‌شده بیشتر است، اگرچه عمق نفوذ کاهش می‌یابد . بمب‌ها معمولا در خاک نرم عمق بیشتری طی می‌کنند و قدرت تخریب در لایه بالای هدف کمتر است ولی موج انفجاری گسترده‌تری تولید می‌کنند (Rohani, 1975).

## 2-4- پژوهش های انجام شده در زمینه تحلیل برخورد

اگرچه شبیه‌سازی مستقیم GBU-28 در منابع آزاد کمیاب است، اما مشابهت بالایی با مطالعات مربوط به مدل‌سازی انفجار و ضربه بر روی سازه‌های زیرزمینی با LS-DYNA دارد. مطالعه‌ای از IIT Guwahati (2024) نشان داده یک تونل بتنی مدفون با ضخامت 30 سانتی‌متر و بتن C40 در عمق 2 متری، تحت تأثیر انفجار تی ان تی و ضربه جسم فولادی تا سرعت 270 متر بر ثانیه مورد تحلیل دقیق قرار گرفته است. نتایج شامل توزیع تنش، کرنش و تغییر شکل است. این نوع تحلیل با GBU-28 قابل تعمیم است، چون این بمب هم با برخورد با سرعت بالا و انرژی جنبشی زیاد، مشابه شرایط بررسی‌شده را ایجاد می‌کند.

مطالعه‌ای عددی (Lin & Tang, 2025) به بررسی رفتار تونل‌های بتنی مدفون تحت بار انفجار سطحی تی ان تی پرداخت. در این تحقیق، تونل‌هایی با پوشش بتنی به ضخامت‌های مختلف (300 تا 500 میلی‌متر) و از جمله بتن C40 در خاک‌های ماسه‌ای-رسی و سیلیتی تحلیل شدند. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت بتن و ضخامت پوشش باعث کاهش تغییرمکان و توزیع تنش بهتر در جداره تونل می‌شود، به‌طوری که تونل‌های با بتن C40 و ضخامت بیشتر، عملکرد پایدارتری در برابر انفجارهای مشابه با وزن تی‌ان‌تی بین 100 تا 1000 کیلوگرم دارند. همچنین پژوهش دیگری توسط (Goel et al., 2021) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی غیرخطی در ABAQUS/Explicit نشان داد که تونل‌های با شکل دایره‌ای و بتن با مقاومت بالاتر مانند C40 نسبت به شکل‌های دیگر، مقاومت بیشتری در برابر انفجار داخلی 100 کیلوگرمی تی‌ان‌تی در عمق حدود 15 متری دارند. این مطالعه انواع تنش، کرنش و جابجایی تونل را شبیه‌سازی کرده و اثر شرایط اشباع خاک و شکل تونل را نیز بررسی نمود. شکل 5 هندسه‌های مختلف تونل‌های مدل‌سازی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



**شکل 5 – هندسه مختلف تونل های مدل شده توسط (Goel et al., 2021)**

تحلیل‌های متعددی با استفاده از مدل‌سازی المان محدود و روش SPH در LS-DYNA نشان داده‌اند که زاویه برخورد تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ دارد. مقاله‌ای درباره موشک‌های دوار با شبیه‌سازی در این نرم افزار نشان می‌دهد که هرگونه انحراف زاویه تا چند درجه می‌تواند سرعت نفوذ و عمق نهایی را کاهش دهد. تغییر سرعت برخورد از 100 تا 270 متر بر ثانیه باعث افزایش چشمگیر تنش‌ها و عمق نفوذ تونل یا دیواره بتن در

شبیه‌سازی تونل مدفون شده با ضخامت 300 میلی‌متر شده است، آن‌قدر که در سرعت‌های بالاتر از 240 متر بر ثانیه تنش‌ها به شدت افزایش یافته‌اند . مدل‌سازی‌هایی که سرعت‌های بین 100 تا 300 متر بر ثانیه را بررسی کرده‌اند به خوبی نشان می‌دهند که عمق نفوذ تقریباً با مربع سرعت ($v^2$) ارتباط خطی دارد (Gautam & Sharma, 2024). زاویه برخورد هر چند کوچک به‌ویژه در برخورد با سطوح شیبدار یا تونلی، می‌تواند گرادیان تنش را تغییر داده و عمق نفوذ را کاهش دهد. استفاده از روش SPH در LS-DYNA در مواردی که تغییر شکل شدید وجود دارد، مشکل اعوجاج شبکه را برطرف کرده و تحلیل دقیق‌تری ارائه می‌دهد. اگرچه هنوز مدل دقیقی درباره GBU-28 یا GBU-57 در دست نیست، اما نتایج این مطالعات نشان‌دهنده ضریب‌های مهم هستند که در ارزیابی اکثریت بمب‌های سنگرشکن قابل بسط هستند. مدل‌سازی برخورد پرتابه با زوایای مختلف نشان داده است که تغییر زاویه تنها چند درجه (مثلاً از 90° به 75°) می‌تواند نفوذ نهایی را 15–20% کاهش دهد. همچنین استفاده از مدل RHT بتن همراه با LS-DYNA به دقت مناسبی در پیش‌بینی نتایج برخورد منجر می‌شود (Jurecs & Tabei, 2021).

## 3- مکانیزم‌های تخریب سازه‌های زیرزمینی در برابر بمب‌های نفوذگر

بمب‌های نفوذگر با ترکیب نفوذ مکانیکی پرانرژی و انفجار داخلی، می‌توانند آثار تخریبی گسترده‌ای بر سازه‌های مستتر در عمق زمین داشته باشند. نوع مصالح اطراف سازه (مانند خاک، سنگ یا بتن)، عمق استقرار، و ویژگی‌های سازه‌ای مانند سختی و شکل هندسی، به‌شدت در شدت تخریب مؤثرند. درک دقیق از مکانیزم‌های تخریب سازه‌های زیرزمینی در برابر این نوع تهدیدها برای طراحی مؤثر سامانه‌های دفاعی، بهسازی ساختارهای موجود و توسعه مدل‌های عددی پیش‌بینی‌پذیر حیاتی است. این مکانیزم‌ها عمدتا شامل انتشار امواج شوک در محیط اطراف، ایجاد ناحیه‌های تمرکز تنش، تغییر شکل‌های شدید پلاستیک، گسیختگی موضعی، ترک‌خوردگی، و در برخی موارد، فروپاشی کلی سازه هستند. در ادامه، مهم‌ترین مکانیسم‌های آسیب‌پذیری سازه‌های زیرزمینی در برابر بمب‌های نفوذگر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

انفجار زیرسطحی و انفجار نفوذگر در خاک یا بتن باعث انتشار موج شوک در محیط اطراف هدف می‌شود که به سازه زیرزمینی منتقل می‌گردد و می‌تواند تغییر شکل پلاستیک یا تخریب سازه را ایجاد کند. تنش‌های بالا در محیط اطراف می‌تواند به شکل‌دهی پیچشی یا خمشی در اجزاء سازه منجر شود. آسیب شدید معمولا در نتیجهٔ کمانش الاستیک یا پلاستیک یا شکست موضعی رخ می‌دهد؛ مثلاً در تاسیسات مدفون، تنش بالاتر از حد تسلیم بتن یا آلیاژ، باعث تخریب جزئی یا گسیختگی کل سازه می‌شود(Xia et al., 2022). سازه‌های جعبه‌ای فولادی به‌دلیل ظرفیت بالای باربری، عملکرد مناسب در برابر تنش‌های ترکیبی و هندسه ساده، به‌طور گسترده در زیرساخت‌های مدفون و محافظت‌شده مانند پناهگاه‌های زیرزمینی و کانال‌های ارتباطی نظامی به‌کار می‌روند. با این حال، این سازه‌ها در مواجهه با بارهای شدید ناشی از انفجار، به‌ویژه انفجارهای داخلی یا نزدیک، ممکن است دچار انواع مختلفی از آسیب‌های مکانیکی شوند. بر پایه مطالعات عددی و تجربی انجام‌شده توسط (L.-M. Li et al., 2022) آسیب‌های وارده به این سازه‌ها معمولاً شامل تغییر شکل پلاستیک شدید در دیواره‌ها یا سقف است که بدون شکست کامل، منجر به خمیدگی دائمی می‌شود، همچنین در اثر فشار کششی متمرکز، ممکن است پارگی‌هایی در مرکز دیواره‌های فوقانی یا تحتانی ایجاد گردد که کارایی سازه را به‌شدت کاهش می‌دهد.

افزون بر این، نواحی اتصال صفحات به‌ویژه در گوشه‌ها، به‌علت تمرکز تنش و ضعف طراحی، مستعد گسیختگی هستند، و در شرایط شدیدتر، شکست‌های ناشی از برش در لبه‌ها یا نواحی تقویت‌نشده نیز مشاهده می‌شود که معمولاً به‌صورت ترک‌های مستقیم در امتداد خطوط تنش غالب پدیدار می‌گردند. تحلیل این الگوهای آسیب برای درک دقیق عملکرد سازه‌های جعبه‌ای در برابر انفجار و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها نقش کلیدی دارد.

نتایج شبیه‌سازی (Duan et al., 2024) نشان داد که زاویه و موقعیت انفجار نسبت به تونل مدفون تأثیر مستقیمی بر شدت و محل آسیب دارد. در انفجارهای عمودی، بیشترین آسیب در ناحیه بالای سازه مدفون مشاهده می‌شود در حالی‌که انفجارهای جانبی باعث تخریب دیواره‌ها و گسیختگی برشی می‌گردد. همچنین شدت فشار، کرنش و سرعت ذرات در نزدیکی تونل به‌طور غیرخطی با فاصله انفجار تغییر می‌کند، و شکل هندسی تونل نیز در الگوی شکست نقش کلیدی دارد. انفجار در نزدیکی یا داخل سازه زیرزمینی باعث جدایش قطعات از سطح داخلی یا خارجی بتن می‌شود و در صورت عمق زیاد آسیب ممکن است فروپاشی کامل رخ دهد. این پدیده در تونل‌ها یا سالن‌های مدفون به ویژه مشاهده شده است . مطالعات آزمایشگاهی و عددی مانند (Duan et al., 2024; L.-M. Li et al., 2022) نشان داده‌اند که بمب‌های نفوذگر ابتدا خسارت نفوذی به بتن وارد می‌کنند و سپس انفجار در داخل آن سبب گسترش ترک‌ها، افزایش فشار داخلی و در نهایت فروپاشی ساختار می‌شود. بتن‌های با مقاومت بالا در برابر این فرآیند عملکرد بهتری دارند . (Zhang et al., 2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی مبتنی بر روش عناصر مجزا و تحلیل توپولوژیکی، رفتار تونل‌های مدفون را تحت اثر انفجارهای پی‌درپی بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که هر بار انفجار، تنش‌های باقیمانده و تغییراتی در ساختار خاک و دیواره‌های تونل ایجاد می‌کند که به مرور زمان تجمع یافته و احتمال ناپایداری سازه را افزایش می‌دهد. برای پایش این تغییرات، از تکنیکی استفاده شد که به‌جای تمرکز فقط بر تنش و کرنش، به الگوهای توپولوژیکی (شکل و ساختار شبکه ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها) نگاه می‌کند. این روش می‌تواند به کمک یادگیری ماشین، نقاط شروع تخریب یا ضعف در تونل را قبل از فروپاشی کامل شناسایی کند.

## 4- رویکردها و راهبردهای افزایش مقاومت سازه‌های زیرزمینی

تهدیدهای ناشی از انفجارهای با انرژی بالا مانند بمب‌های سنگرشکن با تولید امواج شوک شدید، نفوذ موضعی و اعمال فشارهای جانبی گسترده، می‌توانند موجب بروز گسیختگی موضعی، ترک‌خوردگی، تغییرشکل‌های بزرگ، یا حتی فروپاشی کلی در بخش‌هایی از سازه شوند. شدت تأثیر این تهدیدها، وابسته به عواملی چون انرژی انفجار، فاصله بارگذاری، هندسه سازه، نوع مصالح، شرایط خاک اطراف، و عمق دفن سازه است. در پاسخ به این چالش‌ها، جامعه مهندسی عمران و مکانیک سازه، به‌ویژه در دو دهه گذشته، تمرکز فزاینده‌ای بر توسعه فناوری‌ها و راهبردهایی معطوف به افزایش تاب‌آوری و پایداری سازه‌های مدفون تحت بارهای انفجاری داشته‌اند. این تلاش‌ها، حوزه‌هایی چون مصالح نوین با عملکرد بالا، تقویت‌های داخلی و خارجی، طراحی عملکردی چندلایه، و بهره‌گیری از تحلیل‌های عددی پیشرفته را دربر می‌گیرد. هدف این بخش، ارائه مروری جامع بر مهم‌ترین راهبردهای تقویتی، مصالح مهندسی‌شده و سیستم‌های حفاظتی است که تاکنون در مطالعات علمی و پروژه‌های واقعی برای مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر بارهای انفجاری به‌کار گرفته شده‌اند. این راهکارها شامل استفاده از بتن‌های فوق‌مقاوم تقویت‌شده با الیاف، پوشش‌های جذب انرژی،

سیستم‌های انکرینگ پیش‌تنیده، ترکیبات ژئوسنتتیک، و روش‌های مهار موج انفجار در محیط پیرامونی است. انتخاب مناسب هر راهکار نیازمند تحلیل دقیق تهدید، شرایط ژئوتکنیکی محل، و الزامات عملکردی سازه می‌باشد. برخی از این راهکارها در این بخش اشاره شده است.

بتن با عملکرد بسیاربالا با مقاومت فشاری تا 200 مگاپاسکال و مقاومت کششی تا 40 مگاپاسکال، همراه با وجود الیاف فلزی یا پلیمری در بتن، توان جذب انرژی ناشی از انفجار و جلوگیری از گسیختگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. پژوهش‌های اخیر چین درباره لایه‌بندی عملکردی (Lai, Zhou, et al., 2021; Yoo & Banthia, 2017)، نوعی بتن لایه‌دار تکامل‌یافته از UHPC، نشان داده‌اند که لایه خارجی سخت، لایه میانی با ظرفیت جذب انرژی و لایه داخلی ضد شکنندگی می‌تواند نفوذ را به‌صورت معنی‌دار کاهش دهد و تخریب ناشی از انفجار را محدود کند. مطالعات(Yu et al., 2016) نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌های فولادی تقویتی با قطر مناسب و فاصله‌بندی بهینه در سازه‌های بتنی زیرزمینی، نفوذ و تخریب ناشی از بمب‌های نفوذگر را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. طراحی پارامتریک شبکه، با افزایش قطر میلگرد و کاهش فاصله‌بندی، عمق نفوذ را کم و دامنه آسیب انفجاری را محدود می‌سازد. همچنین تحقیقات نشان‌دهنده آن است که پوشش FRP یا پلی‌اوره روی سطح داخلی یا خارجی سازه‌های زیرزمینی می‌تواند ترک‌خوردگی و خزش ناشی از انفجار را کاهش دهد (Mosalam & Mosallam, 2001; Wang et al., 2024). به‌طور خاص در قوس‌های بتن مسلح، ضخامت بهینه حدود 5 میلی‌متر پوشش پلی‌اوره عملکرد ضدانفجاری و میراسازی ارتعاش را بهبود می‌بخشد. مطالعه‌ای که بر روی انبارهای مهمات زیرزمینی توسط (Ashrafpour et al., 2024) منتشر شده‌است نشان دهنده آن است که ترکیب بهینه‌ی ژئوفوم در خاک اطراف سازه، FRP و مدارهای پیش‌تنیده موجب کاهش 81% آسیب و 50% تنش نسبت به حالت بدون تقویت، و افزایش 83% پایداری سازه شده است. همچنین در پژوهش دیگری نشان داده شده‌است که موانع ساخته‌شده از فوم پلی‌یورتان فشرده قرار داده‌شده در مسیر موج انفجار سطحی می‌توانند شوک موج را خنثی کنند و بار وارده به سازه مدفون را کاهش دهند (Wu et al., 2009). این موانع خورنده انرژی موج هستند و فشار وارده بر تونل یا لوله‌سازی زیرزمینی را به‌صورت قابل توجه کاهش می‌دهند.(De et al., 2016).

در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، اجرای انکرهای پیش‌تنیده در کنار لاینینگ بتنی منسجم، باعث جلوگیری از تغییر شکل‌های مخرب و تسهیل انتقال بار انفجار به محیط پیرامونی می‌شود . تحقیقات با نرم‌افزار ANSYS و LS-DYNA نشان داده‌اند که ترکیب انکر با پوشش دو یا سه‌لایه حفاظتی می‌تواند مقاومت انفجاری را به‌طور چشمگیری بالا ببرد. استفاده از انکرها با نسبت طول به عرض حدود یک‌سوم عملکرد پایداری مطلوبی ایجاد می‌کند(Luccioni et al., 2004). ترکیب این راهکارها مثلاً بتن لایه‌ای UHPC همراه با لایه مش فولادی داخلی و پوشش FRP یا پلی‌اوره می‌تواند سطحی بسیار مقاوم در برابر تهدیدات بمب نفوذی ایجاد کند. برای طراحی یک سیستم مؤثر دفاع زیرزمینی، نیاز به تحلیل ترکیبی این فناوری‌ها با توجه به نوع تهدید، مصالح محلی و عمق دفن است (Nawar et al., 2021).

## 5- مفاهیم نوین پدافند غیرعامل برای حفاظت سازه‌های زیرزمینی

کاربرد بمب‌های سنگرشکن و موشک‌های دوربرد با قابلیت نفوذ عمیق، اهمیت رویکردهای نوین در حفاظت

از سازه‌های زیرزمینی را دوچندان کرده است. این دسته از تهدیدات، با بهره‌گیری از انرژی بالا، قابلیت عبور از لایه‌های مقاوم سطحی و هدف‌گیری مستقیم سازه‌های دفن‌شده را دارند، امری که روش‌های سنتی مقاوم‌سازی مانند تقویت مصالح یا افزایش ضخامت دیواره‌ها را به‌تنهایی ناکارآمد می‌سازد. از این رو، نگاه مدرن به حفاظت زیرزمینی باید از چارچوب محدود مقاومت سازه‌ای فراتر رفته و به سمت بهره‌گیری از مفاهیم پدافند غیرعامل ترکیبی، چندلایه و توزیع‌شده حرکت کند. پدافند غیرعامل در این سطح، شامل اقداماتی است که با بهره‌گیری از طراحی معماری هوشمند، فناوری‌های نوین مواد، سنسورهای پیش‌هشدار و اختفاء تاکتیکی، توان شناسایی، نفوذ و اثربخشی تهدید را کاهش می‌دهد؛ بدون آن‌که الزاما وارد کنش‌های مسلحانه یا دفاع فعال شود. مفاهیمی مانند استتار تطبیقی، متامواد جاذب موج، شبکه‌های توزیع‌شده با ماژولاریت بالا و معماری محیطی دفاعی از جمله مولفه‌های نوظهوری هستند که در این رویکرد جدید نقش کلیدی ایفا می‌کنند. این رویکرد به‌ویژه در برابر تهدیدات آینده‌نگرانه، مانند سلاح‌های هوشمند دارای الگوریتم‌های شناسایی خودکار، اهمیت استراتژیک بالایی دارد.

بر خلاف تمرکز صرف بر پایداری سازه‌ای در برابر بار انفجار، در این بخش تلاش شده است تا مفاهیمی معرفی شوند که به صورت مکمل، از منظر کاهش هدف‌پذیری، قابلیت کشف، امکان نفوذ مستقیم و اثرگذاری موج انفجار، سطح دفاع را ارتقاء دهند. مفاهیمی که معرفی می‌شوند، عمدتا بر پایه یافته‌های جدید در حوزه‌های میان‌رشته‌ای نظیر مواد هوشمند، مهندسی زلزله، طراحی نظامی، فیزیک موج، و تحلیل داده‌های حسگری توسعه یافته‌اند و می‌توانند به‌عنوان مکمل یا جایگزین راهکارهای سازه‌ای سنتی، برای افزایش تاب‌آوری در برابر تهدیدات نفوذی به‌کار گرفته شوند. در ادامه، مهم‌ترین مفاهیم پدافند غیرعامل نوین برای حفاظت زیرزمینی، شامل پوشش‌های تاکتیکی، متامواد، سامانه‌های حسگری، شبکه‌های جذب انرژی، معماری پراکنده و جانمایی پنهان‌شده بررسی و تحلیل خواهند شد.

استفاده از مواد و فناوری‌های پوششی که می‌توانند رنگ، بافت یا تابش حرارتی سطح را به‌صورت پویا تغییر دهند، باعث می‌شوند سازه‌های زیرزمینی برای ماهواره‌ها و حسگرهای حرارتی، غیرقابل تشخیص شوند. این روش با کاهش شناسایی هدف از طریق تغییر تطبیقی در رنگ، الگو، بازتاب نور یا حرارت سطح، باعث استتار سازه در برابر شناسایی توسط ماهواره‌ها، هواپیماها یا حسگرهای فروسرخ شده و در مراحل اولیه حمله، توانایی تهدیدگر را کاهش می‌دهد (Qiao et al., 2021). بر اساس پژوهش (Kim & Das, 2013)، استفاده از متامواد آکوستیکی در پیرامون سازه می‌تواند امواج زلزله یا انفجار در زمین را به میزان قابل توجه کاهش دهد . ساختارهایی مانند جعبه‌های خالی با سیستم فرکانس تنظیم‌شده، موج انفجار را تبدیل به انرژی صوتی یا حرارت می‌کنند و ناحیه‌ای به‌عنوان سایه زلزله مصنوعی ایجاد می‌کنند. این فناوری برای کاهش انتقال شوک انفجار به سازه قابل استفاده است.

چیدمان سنسورهای لرزه‌ای، صوتی و راداری در پیرامون ساختار زیرزمینی امکان شناسایی فعالیت‌های نفوذ یا انفجار پیش از برخورد مستقیم را فراهم می‌آورد. این سیستم‌ها با تحلیل زمان‌بندی امواج می‌توانند محل دقیق حمله را پیش‌بینی کرده و فرمان تخلیه یا فعال‌سازی سازه‌ای را صادر کنند. استفاده از این سیستم‌ها در تسلیحات ضدزره و نیز رایج شده‌اند. با استفاده از سنسورهای راداری، لرزه‌ای و صوتی در اطراف سازه، امکان

شناسایی حرکت، نفوذ یا موج اولیه انفجار فراهم می‌شود. ترکیب این اطلاعات با هوش مصنوعی و الگوریتم‌های تشخیص می‌تواند هشدار پیش‌دستانه برای تخلیه یا فعال‌سازی حفاظت سازه صادر کند(M. Li & Liu, 2007). همچنین مطالعات بین‌رشته‌ای در طراحی شبکه‌های ساختاری پرشده با ذرات گرانولی نشان داده‌اند این ساختارها با کنترل استحکام قابل تنظیم و جذب انرژی بالا می‌توانند تا 40% از تنش انفجار را نسبت به سازه‌های خشک کاهش دهند. این فناوری باعث کاهش انتقال شوک به سازه زیرین و کاهش آسیب‌دیدگی می‌شود (Wang et al., 2019).

پدافند غیرعامل مدرن بر طراحی مبتنی بر پراکندگی هدف یعنی ایجاد سازه‌های کوچکتر، پراکنده و اتصال آن‌ها با شبکه زیر زمینی مشترک است. این رویکرد با کاهش تمرکز هدف و تبدیل ساختار به مجموعه‌ای از نیمه‌مستقلها، ریسک تخریب همه‌جانبه را کاهش می‌دهد. همچنین امکان ساخت سریع و مستقرسازی پویاتر فراهم می‌آید (Shadabfar et al., 2022). در طراحی ورودی‌ها و پیرامون سازه، استفاده از حائل‌های مصنوعی نظیر درخت‌کاری، خاک‌ریزهای متغیر، ورودی‌های بینشی مخفی و مسیرهای ورود چندگانه باعث می‌شود نفوذ دشمن پردازش‌شده و زمان‌بر شود. این وارونه‌سازی کانال‌های ورود، پتانسیل شناسایی شلیک یا تخریب غیرهدفمند را افزایش می‌دهد(Dümpelmann, 2016). مفاهیم پدافند غیرعامل مدرن، از اختفاء فعال، پیش‌بینی و خنثی‌سازی تهدیدات، تا طراحی شبکه‌ای و تقسیم‌پذیری هدف را شامل می‌شوند. این ترکیب از تدابیر می‌تواند به‌طور قابل توجهی اثربخشی بمب‌های سنگرشکن را کاهش دهد و زمان پاسخ یا تخریب برابر با زمان ساختار برای حمله افزایش یابد.

## 6- روش‌های عددی و مدل‌سازی‌های رایج در مطالعات انفجار و نفوذ بمب‌های سنگرشکن

در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی با استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند LS-DYNA، ANSYS/AUTODYN، ABAQUS و روش‌های SPH، DEM و AEM برای شبیه‌سازی تاثیر انفجار و نفوذ اجسام سخت بر سازه‌های زیرزمینی انجام شده است. مطالعه روی صفحات سنگی نشان داده که با استفاده از تابع Load_Blast_Enhanced در LS-DYNA می‌توان بار انفجار تی‌ان‌تی را به‌صورت دقیق وارد کرد و تاثیر مواد مختلف سنگی (مثل سنگ آهک، ماسه‌سنگ) بر تنش و آسیب ناشی از انفجار را بررسی نمود. استفاده از معیار موهر-کولمب همراه با آسیب‌پذیری وابسته به کرنش و نرخ کرنش، امکان پیش‌بینی دقیق ترک‌خوردگی و شکست مصالح را فراهم می‌آورد (Rigby et al., 2014; Wilson et al., 2018). مطالعه (Mandal et al., 2020) که تونل بتنی مدفون تحت بار انفجار سطحی را با روش MM-ALE شبیه‌سازی کرده است نشان دهنده اثربخشی لایه فومی در کاهش آسیب ناشی از انفجار و تاثیر ضخامت پوشش بر پاسخ دینامیک سازه است. در مطالعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D و ABAQUS، تحلیل رفتار دینامیکی تونل‌های بتنی و پاسخ شتاب ناشی از انفجار نزدیک زیر سطح صورت پذیرفت. همچنین نتایج با داده‌های تجربی تکمیل شده‌اند تا اعتبار عددی مدل تضمین گردد(Zhou et al., 2008). پژوهش (De, 2012; Esmaeili & Tavakoli, 2019) نشان می‌دهد که با استفاده از ANSYS AUTODYN 2D می‌توان فرآیند ایجاد حفره در خاک با ترکیب ضریب JWL تخریب را شبیه‌سازی کرد. نتایج تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند، و نشان‌دهنده تاثیر جنس خاک و جرم انفجار بر عمق حفره است. روش Applied Element Method یا همان روش المان کاربردی برای

تحلیل کامل مراحل تخریب (از کرنش پلاستیک تا گسست و برخورد عناصر) در سازه‌های پیچیده کاربرد دارد. این روش خصوصاً در تحلیل فروپاشی تدریجی سازه‌های بتنی پس از انفجار عمیق موثر است.

## 7- خلأهای پژوهشی و مسیرهای تحقیقاتی آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات نفوذگر، همچنان چالش‌های متعددی در درک دقیق رفتار مصالح، اعتبارسنجی مدل‌های عددی، و توسعه راهکارهای دفاعی مؤثر وجود دارد. ادبیات موجود گرچه دستاوردهای مهمی را در زمینه‌های تحلیل عددی، مصالح پیشرفته و عملکرد سازه‌ای به ثبت رسانده، اما در مواجهه با سناریوهای واقعی و پیچیده، همچون نفوذ مورب، انفجار ترکیبی، و شرایط زمین‌لرزه‌ای همراه با نفوذ، محدودیت‌هایی اساسی دارد. همچنین، فاصله بین مدل‌های آزمایشگاهی و مقیاس واقعی، و همچنین کاستی در داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی، مانع از توسعه راهبردهای پدافندی جامع شده است. در این راستا، شناسایی خلأهای کلیدی موجود در پژوهش‌های پیشین می‌تواند زمینه‌ساز تعریف مسیرهای پژوهشی آینده و ارتقای سطح ایمنی و کارایی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات نوین باشد. با آنکه مطالعات آزمایشگاهی کوچک یا میدانی متعددی انجام شده‌اند، اما آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در شرایط شبیه‌سازی‌شده بمب‌های نفوذگر بسیار محدود است. اغلب نتایج برای سازه‌های بتنی روی سطح گزارش شده‌اند و داده‌های مرتبط با دفن در عمق، خاک واقعی و بارگذاری پیچیده وجود ندارد. برای مثال پژوهش (Tao et al., 2024) نشان می‌دهد که نتایج ناشی از آزمایش‌های کوچک ممکن است قابل تعمیم به سازه‌های واقعی نباشند و اعتبار مدل‌سازی عددی بدون اعتبارسنجی کامل کاهش می‌یابد. بنابراین تحقیقات میدانی یا فراهم کردن داده‌های تجربی متناظر در مقیاس بزرگ، یک نیاز اساسی است. بسیاری از مدل‌سازی‌ها روی برخورد عمودی تمرکز دارند (Lai et al., 2019)؛ در حالی که در میدان واقعی، زاویه برخورد بمب با سطح هدف می‌تواند بسیار متفاوت باشد و شکل شکست مصالح را تغییر دهد. نفوذ مورب باعث کاهش عمق نفوذ و تغییر الگوی ترک‌خوردگی می‌شود، اما هنوز مطالعات فعالی درباره پرتابه‌ها مانند GBU-28 در زوایای مختلف منتشر نشده است. همچنین ساخت مصالح لایه‌دار (FGCC) یا UHPC برای مقابله با انفجار، بررسی عملکرد آن‌ها در شرایط نفوذ بمب‌های سرعت بالا و انفجار داخلی ترکیبی بسیار محدود است. مطالعات نشان داده که FGCC عملکرد بهتری نسبت به UHPC و بتن معمولی تحت نفوذ با سرعت 850–1300 m/s دارد، ولی نیاز به آزمایش‌های متعدد نوع انفجار و شبیه‌سازی با مواد متفاوت احساس می‌شود(Lai, Li, et al., 2021). از طرفی، اکثر مدل‌سازی‌ها به یک روش عددی محدود هستند (مثلا LS-DYNA یا SPH). اما تحقیقات اشاره دارد که انتخاب مناسب بین کنترل حجم (CEL)، ALE و SPH–FEM نقش کلیدی در دقت نتایج دارد، و ترکیب روش‌ها برای مدلسازی‌های دقیق‌تر هنوز کم‌اطلاع باقی‌مانده است . بنابراین، توسعه چارچوب‌های چند روشی که مزایای هر یک را ترکیب کنند، ضرورت پژوهش های بیشتر را داراست.(Dumakor-Dupey et al., 2021). با وجود اهمیت مکانیک شکست در تحلیل انفجار، داده‌های تجربی و مدل‌های دقیق برای پراکندگی ترک‌خوردگی در مصالح ترکیبی یا بتن‌هایی با ساختار خاص مانند بتن های نانوساختاری بسیار محدودند. بررسی های (Swaddiwudhipong et al., 2010) نشان می‌دهد که مکانیک شکست در سازه‌های بتنی مغفول مانده و نیاز به مدل‌سازی انرژی شکست در مقیاس خردپوسته وجود دارد.

با پیشرفت یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، سیستم‌هایی برای تحلیل ارتعاش یا توسعه ترک در سازه‌های زلزله‌زده توسعه یافته‌اند؛ اما کاربرد مشابه در پیش‌بینی رفتار سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار بسیار اندک است. در تحلیل لرزه‌ای اشاره می‌کنند که روش یادگیری ماشین برای تشخیص خرابی سازه‌ای مؤثر است، اما کاربرد آن زیرزمینی و برای تحلیل انفجار هنوز مرسوم نشده است . این یک مسیر تحقیقاتی رو به رشد احتمالی محسوب می‌شود. عمده تحقیقات انجام شده مبتنی بر پاسخ فوری انفجار متمرکز است؛ اما رفتار طولانی‌مدت مانند خزش، زوال پلیمرها (مثل FRP یا پلی‌اوره)، یا تغییر خواص UHPC در طول زمان در محیط دفن زیرزمین هنوز مشخص نیست.

## 8- نتیجه گیری

بررسی جامع پژوهش‌های صورت‌گرفته پیرامون عملکرد سازه‌های زیرزمینی در برابر بمب‌های سنگرشکن نشان می‌دهد که پیشرفت‌های قابل‌توجهی در حوزه‌های طراحی مهندسی، توسعه مصالح نوین، و شبیه‌سازی عددی حاصل شده است. ادبیات موجود گویای تلاش گسترده‌ای برای درک عمیق‌تر از مکانیزم‌های تخریب، توسعه مدل‌های عددی پیشرفته نظیر LS-DYNA، SPH، ALE و استفاده از مصالحی نظیر بتن‌های فوق‌مقاوم (UHPC)، پلی‌یورتان‌ها، و لایه‌های جاذب انرژی همچون کولار می‌باشد. همچنین، تمرکز بر مدل‌سازی نفوذ، تحلیل زوایای برخورد، و اثر محیط هدف (خاک، بتن، صخره) بر رفتار سازه‌های زیرزمینی، گام‌های ارزشمندی را در جهت طراحی امن‌تر و مقاوم‌تر سازه‌های زیرزمینی برداشته است.

با این حال، چالش‌های متعددی همچنان پابرجاست. کمبود داده‌های میدانی در مقیاس واقعی، نبود مطالعات کافی درباره نفوذ مورب و برخوردهای چندمرحله‌ای، محدودیت در مدل‌سازی دقیق شکست مصالح پیشرفته، و خلأ پژوهشی در حوزه دوام بلندمدت مصالح تحت شرایط چندبارگذاری، از مهم‌ترین موانع توسعه رویکردهای دقیق و کارآمد پدافند زیرزمینی به شمار می‌روند. همچنین، عدم استفاده کافی از ظرفیت‌های نوین همچون یادگیری ماشین، مدل‌سازی چندمقیاسی، و ترکیب رویکردهای عددی با داده‌های آزمایشگاهی، موجب شده بخش‌هایی از رفتار واقعی سازه‌ها همچنان ناشناخته باقی بماند.

از منظر راهبردی، آینده پدافند غیرعامل زیرزمینی در برابر بمب‌های نفوذگر مستلزم نگاهی ترکیبی و چندبعدی است؛ بدین معنا که طراحی مؤثر تنها با اتکای بر یک حوزه تخصصی – اعم از مصالح، عددی یا ساختاری – پاسخ‌گوی پیچیدگی تهدیدات نوین نخواهد بود. تقویت همگرایی میان مطالعات عددی، آزمایش‌های تجربی، و توسعه مصالح ترکیبیِ چندکارکردی، باید به‌عنوان مسیر کلیدی توسعه در نظر گرفته شود. همچنین، ورود فناوری‌های نوظهور مانند مصالح هوشمند، سازه‌های واکنش‌پذیر، الگوریتم‌های پیش‌بینی خرابی، و طراحی تطبیقی در محیط‌های متغیر، می‌تواند سطح حفاظت سازه‌های زیرزمینی را به‌طور چشمگیری ارتقا بخشد.

در نهایت، با توجه به افزایش احتمال درگیری‌های غیرمتقارن و تهدیدات زیرزمینی در آینده، بازتعریف دکترین پدافند زیرزمینی بر مبنای داده‌محوری، فناوری‌محوری، و انعطاف‌پذیری ساختاری، ضرورتی انکارناپذیر برای ارتقاء سطح تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی در برابر بمب‌های نفوذگر خواهد بود.

## 9- منابع


Ashrafpour, A., Javaherzadeh, S., & Rasouli, A. (2024). Designing and Retrofitting of Buried Concrete Structures Against Surface Explosion. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48(3), 1515–1531.

Ben-Dor, G., Dubinsky, A., & Elperin, T. (2015). Analytical engineering models for predicting high speed penetration of hard projectiles into concrete shields: A review. International Journal of Damage Mechanics, 24(1), 76–94.

De, A. (2012). Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. Computers and Geotechnics, 43, 72–79.

De, A., Morgante, A. N., & Zimmie, T. F. (2016). Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels. Geotextiles and Geomembranes, 44(1), 1–12.

Duan, J., Zong, Q., Wang, H., Cheng, B., & Gao, P. (2024). Study on stress wave propagation and failure characteristics of key parts in tunnel under blasting load. Scientific Reports, 14(1), 29034.

Dumakor-Dupey, N. K., Arya, S., & Jha, A. (2021). Advances in blast-induced impact prediction—A review of machine learning applications. Minerals, 11(6), 601.

Dümpelmann, S. (2016). The Art and Science of Invisible Landscapes: Camouflage for War and Peace. In Ordnance: War+ Architecture & Space (pp. 139–158). Routledge.

Esmaeili, M., & Tavakoli, B. (2019). Finite element method simulation of explosive compaction in saturated loose sandy soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 116, 446–459.

Forrestal, M., Frew, D., Hickerson, J., & Rohwer, T. (2003). Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. International Journal of Impact Engineering, 28(5), 479–497.

Frew, D., Hanchak, S., Green, M. L., & Forrestal, M. (1998). Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. International Journal of Impact Engineering, 21(6), 489–497.

Gautam, P., & Sharma, H. (2024). SPH Coupled Simulation for Blast and Impact study on Reinforced Concrete Bunker buried under Soil.

Goel, M., Verma, S., & Panchal, S. (2021). Effect of internal blast on tunnel lining and surrounding soil. Indian Geotechnical Journal, 51(2), 359–368.

Jurecs, S. P., & Tabei, A. (2021). Simulation of the Effects of Angle of Attack and Projectile Contour in Damage Development in Reinforced Concrete. Designs, 5(3), 49.

Kim, S.-H., & Das, M. P. (2013). Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials. Modern Physics Letters B, 27(20), 1350140.

Lai, J., Li, H., Yin, X., Zhou, J., Zheng, X., & Yang, H. (2021). Properties and simulation of UHPC and FGCC subjected to the coupling of penetration and explosion. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(6), 04021109.

Lai, J., Yang, H., Wang, H., Zheng, X., & Wang, Q. (2019). Penetration experiments and simulation of three-layer functionally graded cementitious composite subjected to multiple projectile impacts. Construction and Building Materials, 196, 499–511.

Lai, J., Zhou, J., Yin, X., & Zheng, X. (2021). Dynamic behavior of functional graded cementitious composite under the coupling of high speed penetration and explosion. Composite Structures, 274, 114326.

Li, L.-M., Zhang, D., & Yao, S.-J. (2022). Damage Mode Analysis of Steel Box Structures Subjected to Internal Blast Loading. Applied Sciences, 12(21), 10974.

Li, M., & Liu, Y. (2007). Underground structure monitoring with wireless sensor networks. 69–78.

Lin, Y., & Tang, B. (2025). Performance of Composite Precast Assembled Concrete Utility Tunnels Subjected to Internal Gas Explosions: A Numerical Parametric Study. Processes, 13(6), 1621.

Liu, J., Pi, A., & Huang, F. (2015). Penetration performance of double-ogive-nose projectiles. International Journal of Impact Engineering, 84, 13–23.

Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., & Danesi, R. F. (2004). Analysis of building collapse under blast loads. Engineering Structures, 26(1), 63–71.

Mandal, J., Agarwal, A., & Goel, M. (2020). Numerical modeling of shallow buried tunnel subject to surface blast loading. Journal of Performance of Constructed Facilities, 34(6), 04020106.

Mosalam, K. M., & Mosallam, A. S. (2001). Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slabs subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites. Composites Part B: Engineering, 32(8), 623–636.

Nawar, M., Ata, A., Nabil, M., & Hassan, S. (2021). Numerical analysis of underground tunnels subjected to surface blast loads. Fracture and Structural Integrity, 15(55), 159–173.

Qiao, Y., Meng, Z., Wang, P., & Yan, D. (2021). Research progress of bionic adaptive camouflage materials. Frontiers in Materials, 8, 637664.

Rigby, S. E., Tyas, A., Bennett, T., Fay, S. D., Clarke, S. D., & Warren, J. A. (2014). A numerical investigation of blast loading and clearing on small targets. International Journal of Protective Structures, 5(3), 253–274.

Rohani, B. (1975). Analysis of projectile penetration into concrete and rock targets. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavement Laboratory.

Rosenberg, Z., & Kositski, R. (2016). Modeling the penetration and perforation of concrete targets by rigid projectiles. International Journal of Protective Structures, 7(2), 157–178.

Sarmah, R., Dutta, T. T., & Rao, K. S. (2024). Numerical analysis of a high-velocity projectile's impact on shallow steel tunnels in soft sandstone. Infrastructures, 9(3), 49.

Shadabfar, M., Mahsuli, M., Zhang, Y., Xue, Y., Ayyub, B. M., Huang, H., & Medina, R. A. (2022). Resilience-based design of infrastructure: Review of models, methodologies, and computational tools. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 8(1), 03121004.

Swaddiwudhipong, S., Islam, M., & Liu, Z. (2010). High velocity penetration/perforation using coupled smooth particle hydrodynamics-finite element method. International Journal of Protective Structures, 1(4), 489–506.

Tao, Y., Chen, Q., Xiao, C., Zhu, M., & Qiu, J. (2024). Artificial Intelligence Models for Predicting Ground Vibrations in Deep Underground Mines to Ensure the Safety of Their Surroundings. Applied Sciences, 14(11), 4771.

Wang, Y., Ding, L., Lin, J., Qiu, X., Wu, C., Liu, C., Tian, Y., Zhang, R., Huang, W., & Ma, M. (2024). Recent developments in polyurea research for enhanced impact penetration resistance and blast mitigation. Polymers, 16(3), 440.

Wang, Y., Ramirez, B., Carpenter, K., Naify, C., Hofmann, D. C., & Daraio, C. (2019). Architected lattices with adaptive energy absorption. Extreme Mechanics Letters, 33, 100557.

Wilson, D., Blass, D., & Noli, S. (2018). Implementation of MCEER TR 14-0006 blast load curves in LS-DYNA and benchmark to commonly practiced blast loading application methods. 15th International LS-DYNA Users Conference.

Wu, C., Oehlers, D., Rebentrost, M., Leach, J., & Whittaker, A. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. Engineering Structures, 31(9), 2060–2069.

Xia, C., Chen, L., Xu, R., Cao, M., Chen, D., & Fang, Q. (2022). Experimental and Numerical Studies on Ground Shock Generated by Large Equivalent Surface Explosions. Applied Sciences, 12(16), 7987.

Yang, G., Wang, G., Lu, W., Yan, P., & Chen, M. (2018). Combined effects of penetration and explosion on damage characteristics of a mass concrete target. Journal of Vibroengineering, 20(4), 1632–1651.

Yankelevsky, D., Feldgun, V., & Karinski, Y. (2017). Rigid projectile penetration into a concrete medium: A new model. International Journal of Protective Structures, 8(3), 473–499.

Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2017). Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. Construction and Building Materials, 149, 416–431.

Yu, H., Wang, Z., Yuan, Y., & Li, W. (2016). Numerical analysis of internal blast effects on underground tunnel in soils. Structure and Infrastructure Engineering, 12(9), 1090–1105.

Zhang, S., You, S., Chen, L., & Liu, X. (2020). Analysis of tunnel failure characteristics under multiple explosion loads based on persistent homology-based machine learning. arXiv Preprint arXiv:2009.10069.

Zhou, X., Kuznetsov, V., Hao, H., & Waschl, J. (2008). Numerical prediction of concrete slab response to blast loading. International Journal of Impact Engineering, 35(10), 1186–1200.

Zhu, X., Zhao, C., Xu, L., Wang, Y., Lin, S., & Zhao, G. (2024). Numerical integration study of penetration and blasting damage for composite underground protective structure with reinforcement layers. Buildings, 14(6), 1848.