مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال نهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷؛ ص ۱۰۶-۹۷

بررسی مصالح و مقایسه روش‌های اجرایی در ساخت سازه‌های مدفون بتنی در معرض انفجار

سید عظیم حسینی[۱]، عباس اکبرپور[۲*]، حسن احمدی[۳]، بابک امین‌نژاد[۴]
۱- دانشجوی دکتری ۳ و ۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.
(دریافت: ۹۶/۰۱/۲۶، پذیرش: ۹۶/۰۶/۲۸)

چکیده

ویژگی‌ها و ساختار هدف‌های زیرزمینی و برررسی مشخصات سلاح‌های نفوذگر زمینی و در نهایت اثرات اصلی، جانبی، چالش‌ها و پیامدهای تهاجم به این نوع هدف‌ها از مسائل مهم پیش‌روی هر کشوری محسوب می‌گردند. بنابراین شناخت مصالح و روش‌های اجرایی ساخت سازه‌های مدفون برای مقابله با تهدیدات متصور به لحاظ اصول مدیریت ساخت مانند زمان، هزینه و کیفیت از اهمیت بالایی برخوردار است. طبق پرسشنامه‌های تهیه‌شده و بر اساس نظرات خبرگان واجد شرایط، با استفاده از روش کمی‌سازی AHP و نرم افزارEXPERT CHOICE می‌توان وزن شاخص‌ها و گزینه‌ها را مشخص نمود. نتیجه این تحقیق بیان‌کننده آن است که مصالح بتن الیافی، بتن‌های پرمقاومت، مواد نانویی و FRP دارای بهترین عملکرد و در روش‌های اجرایی شاتکریت مسلح یا بتن الیافی، لتیس پنل و همچنین جهت مقاوم‌سازی استفاده از مواد نانویی و FRP دارای بالاترین اولویت به‌کارگیری در اجرای سازه‌های مدفون می باشد.

کلیدواژه‌ها: مصالح، ساخت، سازه‌های مدفون بتنی، انفجار

Investigation of Materials and Comparison of Practical Methods in the Construction of Buried Concrete Structures Exposed to Explosion

S. A. Hosseini, A. Akbarpour*, H. Ahmadi, B. Amin Nejad
Islamic Azad University of Roudehen
(Received: 15/04/2017; Accepted: 19/09/2017)

Abstract

The specification of underground structures, and investigation of earth-penetrating weapons, and ultimately the major and minor impacts resulted from an invasion on these structures is one of the significant issues that each country may encounter. In other word, understanding the materials and applicable methods in the construction of buried components, to defend against the potential threats, has an important role in terms of the management construction's principals, like time management, expenditure, and quality. Moreover, according to questionnaires and the experts' opinions, utilization of the quantitative methods such as AHP, and the EXPERT CHIOCE software provide the opportunity to identify such indexes and alternatives. This study shows that the fiber concrete materials, reinforced concrete, nano materials, and FRP, introduce the best efficiency and function compare to other alternatives. As such, these materials are highly applicable not only in the construction of reinforced or fiber concrete, and Lattice Panel, but also in the process of retrofitting.

Keywords: Materials, Construction, Buried Concrete Structures, Explosion

*Corresponding Author E-mail:A_akbarpour@azad.ac.ir

۱. مقدمه

امنیت بناهای مسکونی، صنعتی، نظامی و استراتژیکی در برابر شوک ایجادشده توسط انفجار، یکی از اهداف مهم در جهان امروز به شمار می‌رود. در این مقاله با مدنظر قرار دادن اهداف پدافند غیرعامل یک سازه مدفون بتن مسلح در مقابل اصابت بمب‌ها، حملات تروریستی و انفجار داخلی مصالح به کار گرفته‌شده و روش‌های اجرایی در این سازه‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد و پس از بیان ویژگی‌های هر یک با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده و سنجش آن‌ها سعی در شناخت کارآمد این عوامل داریم. به ثمر نشستن این تحقیقات می‌تواند تأثیر شایانی در پایداری ملی داشته باشد زیرا طراحی مقاوم، ساخت و مدیریت صحیح حین ساخت سازه‌های مدفون که عمدتاً در معرض انواع تهدیدات بیان شده می‌باشند یکی از مهم‌ترین نیازهای پدافند غیرعامل کشور در حوزه ساخت‌وساز است. روش مدیریتی در ساخت این نوع سازه‌ها در برابر تهدیدات انفجاری مجهول و مبهم به نظر می‌رسد. متغیرهای این مقاله شامل مشخصات و اثرات انفجار، مقاوم‌سازی سازه‌های مدفون بتنی، رویکردهای پدافند غیرعامل در ساخت‌وساز، مدیریت زمان و هزینه و کیفیت ساخت این سازه‌ها است.یکی از مهم‌ترین تهدیدهای دشمن در برابر کشور عزیزمان از منظر تهدیدهای سخت، استفاده از بمب‌های نفوذکننده و اثرگذاری برسازه‌های مدفون استراتژیک کشور از قبیل مراکز غنی‌سازی هسته‌ای، مقر موشک‌ها و تونل‌های زیرزمینی محل استقرار تأسیسات نظامی و مواردی ازاین‌دست است. دشمن گاهی به‌طور صریح کشورمان را به حمله نظامی به این مراکز تهدید می‌کند، از سوی دیگر قابلیت‌های بمب‌های نفوذکننده از جهت نفوذ در عمق زیاد و اثرگذاری بر سازه‌های مدفون، از موضوعاتی است که می‌بایست در مراکز تحقیقاتی کشور موردمطالعه جدی قرارگرفته و بر مبنای دانش به‌دست‌آمده راهکارهای مقابله با این تهدیدها تدوین، بررسی و راهکارهای عملیاتی-پیشنهادی استخراج گردد. با توجه به اهمیت عملکردهای حیاتی و راهبردی نظیر مراکز داده، مراکز مخابراتی، مراکز صنعتی بااهمیت، 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 و همچنین تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی در منابع خارجی و داخلی درزمینه مدیریت ساخت سازه‌های مدفون در معرض انفجار صورت نپذیرفته و یا در دسترس نیست، اهمیت و ضرورت موضوع این پژوهش در این راستا است که متخصصین امر ساخت سازه‌های زیرزمینی با نقطه نظرات،مصالح مناسب و انواع روش‌های ساخت موجود مطلع و به‌کارگیری شود.

راه‌های مقابله با خرابی بتن تحت اثر بارگذاری انفجاری بدون شناخت انفجار و انواع آن و همچنین سایر روش‌هایی که می‌توان توسط آن به سازه‌های بتنی صدمه وارد نمود مانند پرتابه‌ها، ترکش‌ها و غیره امکان پذیر نیست. تقسیم بندی بارهای انفجار در جدول (۱) ارائه گردیده است. انفجار در حالت کلی می‌تواند به سه بخش تقسیم شود: شیمیایی، هسته‌ای و فیزیکی. مواد منفجره ماده‌ایی هستند که از نظر شیمیایی ناپایدار هستند و در صورت آغاز فرآیند انفجار با سرعت زیاد منبسط می‌شوند و حجم زیادی گاز و گاهی نور و صدای زیاد تولید می‌کنند این آزاد شدن گاز به نوبه خود می‌تواند باعث پرتاب شدن قطعات و اشیا اطراف و تبدیل شدن آن‌ها به ترکش شود. انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود که در نتیجه دما و فشار بسیار بالایی ایجاد و موج انفجار بلافاصله تولید و با سرعت بسیار زیادی منتشر می‌شود بر حسب منشا انفجار موج‌های ناشی از آن به دو شکل موج ضربه و موج فشار تقسیم می‌گردند. سازه‌های موجود در داخل خاک به علت انتشار امواج ناشی از انفجار در داخل زمین می‌توانند آسیب ببینند. بمب‌های هدایت‌شونده معمولاً مجهز به خرج گود و کلاهک ساخته‌شده از آلیاژهای بسیار مقاوم می‌باشند، توانایی نفوذ در اعماق زیاد زمین و انهدام اهداف مدفون با سرباره بسیار زیاد است. معروف‌ترین این سلاح‌ها که در جنگ دوم امریکا علیه عراق (سال ۲۰۰۳) استفاده گردید، موشک‌های کروز مجهز به کلاهک مخصوص نفوذ در اعماق زمین و بمب‌های سری (GBU) است. این سلاح‌ها با دقت بسیار زیاد، توانایی نفوذ تا عمق حدود ۴۰ متر از زمین معمولی یا ضخامتی در حدود ۶-۸ متر از بتن مسلح را دارا می‌باشند [۱].

همچنین برای بمب GBU ۲۸ با سیستم جنگ‌افزار BLU-۱۱۳ ۱ با طول ۳/۸۸ متر وزن ۴۴۰۰ پوند، عمق نفوذ بیش از ۶ متر در بتن مسلح و برای بمب GBU ۵۷ با طول ۶ متر و وزن ۱۳۶۰۰ کیلوگرم و ۲۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره، عمق نفوذ ۸ متر در بتن با مقاومت ۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع ، ۴۰ متر نفوذ در صخره و سنگ با سختی متوسط و ۶۰ متر نفوذ در بتن مسلح با مقاومت ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع ادعاشده است. چنانچه بمب بتواند به سازه مدفون موردنظر برسد و بعد منفجر شود، آسیب بسیار زیادی را ایجاد می‌کند و چنانچه در عمق زمین و در فاصله‌ای از سازه مدفون منفجر شود، موج شوک ناشی از انفجار از لایه‌های زمین عبور کرده و پس از رسیدن به سازه مدفون می‌تواند به آن آسیب برساند. در طراحی سازه‌های مدفون مقاوم می‌بایست اثرات بارگذاری ناشی از انفجار ناشی از تهدیدهای خاص از قبیل بمب‌های GBU لحاظ گردد و پیش‌بینی لازم در طراحی انجام شود [۲].

مصالح مورد استفاده در مقاوم‌سازی سازه‌ها به شرح زیر هستند.

الیاف FRP: یکی از روش‌های جدیدی که در سال‌های اخیر موردتوجه پژوهشگران و صنعتگران قرارگرفته، مقاوم‌سازی سازه‌ها با استفاده از مصالح کامپوزیت است. از کاربردهای متداول FRP، چسباندن صفحات FRP با استفاده از چسب‌هایی مانند اپوکسی به مقاطع بتنی است. به‌طورکلی مقاوم‌سازی سازه‌های موجود یا مرمت آن‌ها به‌منظور تحمل بارهای مضاعف طراحی، بهبود نارسایی‌های ناشی از فرسایش، افزایش شکل‌پذیری سازه یا سایر موارد با استفاده از مصالح مناسب و شیوه‌های اجرایی صحیح به‌طور متعارف انجام می‌گردد[۳]. به عملکرد FRP در اعضای سازه‌ای در جدول (۲) اشاره شده است. استفاده از FRP به دلیل وزن کم، سرعت اجرای بالا، مقاومت بالا و عدم ایجاد محدودیت معماری در بهسازی سازه‌های بتنی توجیه‌پذیر است. سیستم FRP بدین‌صورت تعریف می‌شود که الیاف و رزین‌ها برای ساخت چندلایه مرکب مورداستفاده قرار می‌گیرند، به‌نحوی‌که رزین‌های مصرفی (رزین اپوکسی) به‌منظور چسباندن چندلایه مرکب به سطح بتن زیرین و پوشش‌ها به‌منظور محافظت مصالح ترکیب‌شده استفاده می‌شوند [۴].

جدول ۱. تقسیم‌بندی‌های بارهای انفجار[۲]

موقعیت انفجار	نوع انفجار	نوع بارهای وارده
انفجار خارجی	انفجار در هوا	امواج مستقیم، ترکش ها
	انفجار در سطح زمین	امواج مستقیم، امواج بازتابی، ترکش‌ها، شوک زمین(حرکت امواج در زمین)
	انفجار در داخل زمین	شوک زمین (حرکت امواج در زمین سرعت ذرات)
انفجار داخلی	محبوس	ضربه داخلی
	نیمه محبوس	ضربه داخلی

از کاربردهای دیگر این مصالح استفاده از میلگردهای FRP به صورت آرماتور خارجی چسبیده است .در این روش که به NSM یا نصب در نزدیک سطح معروف است، با قرار دادن آرماتورها و یا نوارهای FRP در شیارهایی که از قبل بر روی سطح بتن ایجادشده است و پر کردن آن‌ها به‌وسیله موادی مانند اپوکسی، می‌توان به مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت خمشی مقطع کمک کرد [۵].

بتن مسلح: به دلیل مقاومت و جرم قابل‌توجه سازه‌های بتن مسلح، این مصالح به‌طورکلی در برابر بارهای انفجاری، مناسب هستند. همچنین بتن، مقاومت مؤثری در برابر آتش و نفوذ ترکش دارد. روش‌های ساده‌شده جهت طراحی انفجاری بتن مسلح بر اساس پاسخ خمشی بوده و مشروط به حذف مودهای شکست تردشکن می‌باشند. برای رسیدن به پاسخ شکل‌پذیر برای بتن، جزئیات‌بندی مناسبی از میلگردها نیاز است. با افزایش تنش و کرنش در مقطعی از عضو، میلگردها به تسلیم می‌رسند و اجازه شکل‌گیری مفصل پلاستیک می‌یابند. بتن در این نواحی در سطح کششی دچار ترک می‌شود و متعاقباً به حد کرنش فشرده شدن در سطح فشاری می‌رسد. اگر دوران مفصل این نقطه افزایش یابد، بتن فشاری خرد و مقاومت خمشی از بین می‌رود [۶].

جدول ۲. FRP و عملکردهای آن در اعضای سازه‌ای [۸]

FRP	دال	در سطوح رو و زیر دال (عملکرد کششی)، در دو وجه عملکرد بهتر، ازنظر اقتصادی کم صرفه
		به‌صورت نوار داخل شیارهایی که در دال ایجاد می‌گردد
	تیر	در وجه کششی برای خمش، در کناره‌ها برای برش، به‌صورت دور پیچی برای پیچش و برش
		کربن سختی بالا و تغییر شکل کم، ترکیب پلی اوره و کربن نتیجه بهتر. علت شکل‌پذیری پلی اوره
	ستون	به‌صورت نوار دور پیچی شده برای دورگیری، امکان پیش‌تنیدگی
	دیوار، روی سطوح دیوار برای عملکرد برشی - کششی	
	مواد شامل کربن، آرامید، شیشه، پلی اوره، فولاد و... کربن گران، پلی اوره شکل‌پذیر،	
	در صورت پیش‌تنیدگی در تیر یا دال امکان برگشت خیز موجود در تیر وجود دارد	

بتن پر مقاومت: ناحیون یی و همکاران خصوصیات مقاومتی بتن پر مقاومت و بتن پرمقاومت با پودر فعال‌کننده را تحت اثر بار انفجار بررسی کرده‌اند. بتن با کارایی فوق بالا[1] در انواع مختلفی در بازار موجود است ولی مهم‌ترین آن‌ها بتن با مقاومت فشاری فوق بالا و بتن با پودر فعال‌کننده[2] است. آن‌ها مقاومت فشاری را تا حدود ۱۵۰ مگاپاسگال و مقاومت کششی آن‌ها را تا حدود ۸ مگاپاسگال ذکر کرده‌اند. از مزایایی که این نوع بتن‌ها ایجاد کرده اند توانایی ایجاد سازه‌های لاغر است. به دلیل مقاومت بالا و جذب انرژی بالای RPC و UHSC آن ها مصالح بهینه‌ای هستند برای استفاده در مقابل اهداف احتمالی، حملات تروریستی و یا برخوردهای تصادفی. ترکیب UHSC شامل سنگدانه‌های همگن سیلیکا و چسب گازی سیلیکای جایگزین سیمان است که باعث افزایش مقاومت باورنکردنی بتن می شود. البته هر دوی RPC و UHSC نیاز به عمل‌آوری در دمای بالا دارند. کارهای زیادی برای افزایش مقاومت UHSC ها و RPC ها تاکنون انجام شده است که نتیجه آن‌ها مقاومت فشاری بین۱۲۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی بین ۸ تا ۳۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته بین۶۰ تا ۱۰۰ گیگا پاسکال شده است. سه عامل در سازه‌های بتنی برای مقاومت در مقابل انفجار مورد نیاز می باشد:

۱- مقاومت کافی سازه‌ای، ۲- سختی کافی، ۳- ظرفیت جذب

[1] Ultra High Performance Concrete: UHPC
[2] Reactive powder Concrete: RPC

انرژی بالا.

مقاومت فشاری UHSC و RPC حدودا ۷/۹ برابر بتن معمولی(NSC) است و مدول الاستیسیته ی آن ها در حدود ۳/۰۹ تا ۳/۲۶ برابر مدول الاستیسیته ی NSC است. UHSC به دو دلیل مدول الاستیسیته بالاتری نسبت به RPC دارد: ۱- چگال تر است، ۲- وجود الیاف کوتاه فولادی باعث شکل پذیری بیشتر می شود. به طور کلی باید دو عامل را تقویت نمود:

۱- سختی افزایش یابد تا ترک خوردگی به تعویق افتد.

۲- ظرفیت جذب انرژی بالا رود تا ضربه ی قوی تری تحمل شود.

با توجه به مقاومت بالای قابل حصول توسط بتن های UHPSC و RPC توصیه می شود در برابر انفجار در طراحی و ساخت سازه های جدید از این نوع بتن ها استفاده شود [۷].

بتن الیافی: سیلوا و لو افزایش مقاومت در مقابل انفجار دال‌های بتنی مسلح را با کمک مصالح مرکب جدید که همان پلیمر کامپوزیت‌های الیافی هستند بررسی کرده‌اند

یکی از انواع پلیمر کامپوزیت‌ها، "پلیمر مسلح با الیاف فولادی" است .در آزمایش‌ها انجام‌شده توسط سیلوا و لو، آن‌ها ترکیبات مختلف از این مصالح را موردبررسی در دال خود در مقابل بار انفجار قرار داده‌اند. در مورد تقویت دال و تیرها هر چند که استفاده نوارها و ورق‌های پلیمر کامپوزیتی در هر دو وجه توجیه اقتصادی ندارد اما با توجه به ماهیت دینامیکی بار انفجار کاربرد آن ها در هر دو وجه توصیه می گردد [۹-۸].

از اثرات استفاده از الیاف به‌منظور مسلح کردن بتن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. افزایش مقاومت خمشی
۲. افزایش مقاومت برشی
۳. افزایش مقاومت کششی
۴. افزایش در میزان جذب انرژی
۵. کاهش نفوذ اجسام
۶. افزایش مقاومت مقطع در ترک‌خوردگی

تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که بین مقاومت کششی الیاف در واحد سطح همبستگی وجود دارد. البته ضریب همبستگی رابطه مقاومت کششی و تعداد الیاف‌ها در واحد سطح بیشتر از رابطه مقاومت کششی و فاصله بین الیاف‌ها است[۱۱-۱۰].

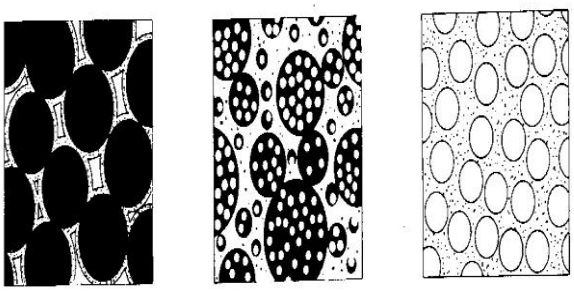
بتن سبک: در بتن معمولی پایین بودن مقاومت بـه وزن بـتن در مقایسه با فولاد برای ساخت سازه‌های بزرگ مثل پل‌ها و برج‌ها و وزن زیاد آن در سازه‌های غیر باربر و حائل به‌عنوان یـک مشـکل فنی و اقتصادی مطرح می شود و تلاش برای کاهش آن ها منجـر به نوآوری در ساخت بتن های مخصـوص شـده اسـت؛ کـه انـواع مختلف بتن سبک از دستاوردهای این نوآوری‌ها است.

۱. با استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک و متخلخل که توده ویژه ظاهری آن‌ها کمتر از ۲/۶ است و جایگزینی آن با سنگ‌دانه‌های سنگین، این نوع بتن به‌عنوان "بتن سبک دانه" شناخته می‌شود.

۲. با حذف ریزدانه‌ها از دانه‌بندی مخلوط، بطوریکه تعداد زیادی فضا و حفره خالی در بین سنگ‌دانه‌های بتن ایجاد شود، این بتن را "بتن بدون ریزدانه" می‌نامند.

۳. با ایجاد حفره‌های هوا در داخل بتن و ملات سیمان؛ که پس از گیرش یک ساختار متخلخل یکنواخت در بتن ایجاد می‌شود. انواع این بتن بانام‌های بتن هوادار (گازی) و بتن اسفنجی (بتن فومی) شناخته می‌شود[۱۲].

این سه نوع مختلف بتن سبک به‌طور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است:



بتن هوادار بتن سبک دانه بتن بدون ریزدانه

شکل ۱. سه نوع پایه‌ای انواع مختلف بتن سبک.

مصالح نانو(بتن): مواد نانو به‌عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض، ضخامت) زیرnm ۱۰۰ باشد تعریف شده‌اند. در یک تقسیم‌بندی عمومی، محصولات نانو مواد را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

فیلم‌های نانو لایه[1] برای کاربرد عمدتاً الکترونیکی، نانو پوشش‌های حفاظتی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی، حفاظت در مقابل عوامل مخرب محیطی و نانو ذرات به عنوان پیش سازنده[2] یا اصلاح ساز پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی.

در صنعت بتن، سیلیس یکی از معروف‌ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکنندگی بتن با عملکرد بالا[3] ایفا می‌کند. محصول معمولی همان سلیکیافیوم یا میکرو سیلیکا است

[1] Nano Layer Thin Films
[2] Precursor
[3] High Performance Concrete (HPC)

که دارای قطری در حدود ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر بوده و دارای اکسید سیلیس حدود ۹۰٪ است. می‌توان گفت که میکرو سیلیکا محصولی است که برای افزایش عملکرد کامپوزیت مواد سیمانی به‌کاربرده می‌شود. محصولات نانو سیلیس متشکل از ذراتی هستند که گلوله‌ای شکل بوده و با قطر کمتر از nm ۱۰۰ یا به‌صورت ذرات خشک پودر یا به‌صورت معلق در مایع محلول قابل‌انتشار می‌باشند که مایع آن معمول‌ترین نوع محلول نانو سیلیس است، این نوع محلول آزمایش‌ها مشخص در بتن خود تراکم به کار گرفته‌شده است. نانو سیلیس معلق کاربردهای چندمنظوره از خود نشان می‌دهد مانند:

- خاصیت ضد سایش
- ضد لغزش
- ضد حریق
- ضد انعکاس سطوح

از اسپری کردن پلی اوره نیز بر روی سطوح خارجی اعضا استفاده شده است که ترکیب اسپری پلی اوره با کربن به عنوان بهترین نوع مقاوم سازی در برابر انفجار پیشنهاد می‌گردد. در این روش کربن نقش افزایش سختی و کاهش تغییر شکل ها را بر عهده دارد و پلی اوره نقش افزایش جذب انرژی را بر عهده دارد.

- ژئوسینتتیک‌ها: ژئوسینتتیک‌ها منحصراً شامل محصولات پلیمری مصنوعی ساخته‌شده از الیاف تولیدشده از مشتقات نفتی هستند که خاصیت اصلی آن‌ها فسادناپذیری در مقابل عوامل درون خاک است.

ازجمله فواید دیگر این مواد، مقاوم‌سازی خاک در برابر نفوذ پرتابه به درون خاک بوده و از این جنبه در این تحقیق، کاربرد دارد. بیشترین استفاده از مصالح ژئوسنتتیکی برای مسلح کردن خاک‌ها به‌منظور افزایش مقاومت برشی، کاهش نشست، افزایش پایداری است به همین دلیل بررسی خاک مسلح به این مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

روش استفاده از بتن الیافی در لاینینگ تونل ها اجرای یک تونل امکانات و تجهیزات بسیاری لازم است که متناسب با نوع عملیات تقسیم‌بندی می‌شوند عملیات تونل سازی شامل نقشه‌برداری، حفاری، آتشکاری، تهویه، تخلیه، تحکیم موقت و دائم می شود. نقشه‌برداران اولین اکیپ اجرایی هستند که جهت تحویل پروژه به محل اعزام می شوند. در حال حاضر عملیات حفاری تونل‌ها با دو نوع فنّاوری چال زنی وآتشکاری و یا با استفاده از ماشین‌های مکانیکی انجام می‌شود. فنّاوری دوم به شدت در حال گسترش است و به همان نسبت استفاده از مواد ناریه و انفجار در حال کاهش است. تجهیزات تخلیه مورداستفاده در تونل‌سازی عبارت‌اند از انواع لودرها و بیل مکانیکی‌ها برای بارگیری انواع کمپرسی‌ها و دام تراک‌ها برای حمل که در تونل مورد استفاده هستند. در بسیاری از تونل‌ها عملیات تخلیه، تحکیم، لاینینگ و تأمین تجهیزات و امکانات موردنیاز در حداقل فضای ناامن یا لاینینگ نشده و بدون حضور نیروی انسانی و به‌صورت کنترل از راه دور انجام می‌شود. در حقیقت موقعِی که تا سینه کار تمام عملیات تونل‌سازی به طور خودکار انجام شود دستگاه مربوطه یک دستگاه حفاری، سیستم بارکشی، تحکیم یا لاینینگ صرف نیست بلکه یک دستگاه تونل‌ساز است یعنی بجای ماشین‌های حفاری تونل[1] قدیم می‌بایست به دنبال ماشین‌های تونل ساز جدید بود. [۱۳].

روش‌های اجرایی در عملیات ساخت گالری‌ها و تونل‌ها به‌سرعت در حال تغییر است .با توجه به سیستم خاص بارگذاری در تونل‌ها، استفاده از یک‌لایه پوشش اولیه جهت پایداری اولیه و ممانعت از ریزش گوه‌های سنگی ناپایدار و بالطبع ناپایداری در سازه‌های حفاری‌شده، ضروری به نظر می‌رسد. سیستم نگهدارندهِ اولیه شامل تمام نگهدارنده هایی که جهت حصول پایداری در حین حفاری تعبیه می‌شوند نگه‌دارنده اولیه نام دارد. هم‌زمان با حفر تونل که به روش‌های چال زنی، آتشباری (روش سنتی) و یا مکانیزه انجام می‌شود، باید قسمت‌های حفاری‌شده بلافاصله با روش‌هایی مانند راک بولت یا شاتکریت نگهداری شوند. تحکیم موقت شامل عملیات بتن پاشی (شاتکریت) و مش گذاری و نصب انکر بولت‌ها می‌باشد. از دیگر تجهیزات تحکیم موقت انواع بولت‌ها و انکر بولت‌ها با طول‌ها و قطرهای متفاوت و مشها با ابعاد چشمه‌ای و اقطار میلگردی مختلف می‌باشد. در تحکیم ثانویه از لاینینگ بتنی استفاده می‌گردد که می‌توان به‌صورت درجا یا پیش‌ساخته با مصالح مناسب مثل بتن معمولی، بتن پر مقاومت و یا بتن الیافی به‌کار برد. ضخامت این لایه رابطه مستقیمی با روش حفاری، نوع خاک یا سنگ، سرعت حفاری و امکانات موجود دارد [۱۴].

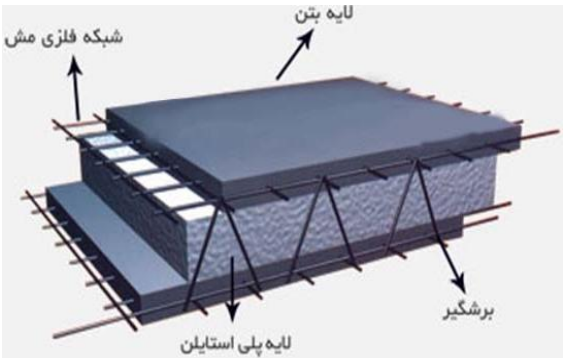
بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است. این ترکیب کامپوزیتی یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن و یا شاتکریت را به عنوان ماده شکل‌پذیر جهت تولید سطوح مقاوم و پر انحنا را فراهم می‌آورد الیاف به‌کاررفته در بتن به جنس‌های مختلف شیشه، فولاد، کربن، آرمید، پرو پرو پیلن و... است. نمونه‌ای از بتن الیافی در شکل (۲) مشاهده می‌شود. بتن الیافی در جاده‌ها، سرریزها و محافظت از پایداری شیب‌های صخره‌ها، لاینینگ تونل‌ها و سازه‌های پوسته‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرد.

[1] Tunnel Boring Machine: TBM

شکل ۲. بتن الیافی

استفاده از فنّاوری Lattice Panel در بهسازی سازه‌های زیرزمینی، اولین بار سیستم پانل‌های پیش‌ساخته سبک در سال ۱۹۶۱ میلادی در ایالت کالیفرنیای آمریکا به ثبت رسید. با توجه به اهمیت سبک‌سازی، بهینه‌سازی و صرفه‌جویی مصرف سوخت استفاده از این نوع پانل‌ها در حال افزایش است. تری دی پانل سازه‌ای lattice panel نوع تکامل‌یافته سیستم‌های قدیم‌تر Form Insulating Concrete است. شکل (۳) نشان دهنده اجزای تشکیل‌دهنده‌تری دی‌پنل می‌باشد.

سیستم‌های ابتدایی ICF دیوارهایی است که از چیدن بلوک‌های توخالی پلی استایرن و قرار دادن میلگردهای قائم و افقی به‌صورت محدود در آن و بتن‌ریزی در فضاهای خالی داخل بلوک‌ها ساخته می‌شدند. صفحات پلی استایرن به ضخامت حداقل ۵ سانتی‌متر توسط رابط‌هایی از جنس پلاستیک یا فلز به همدیگر متصل و از اتصال آن بلوک‌هایی توخالی حاصل‌شده که در فضای خالی آن میلگرد قرار داده و بتن‌ریزی می‌شود. نوع عملیات اجرایی آن شبیه به چیدن بلوک است که مستلزم صرف زمان و محدودیت‌های سازه‌ای می‌شود.



شکل ۳. اجزای تشکیل‌دهنده تری دی پنل سازه‌ای

تری‌دی پنل سازه‌ای خواصی رادار است که به شرح زیر است:

به‌طورکلی سیستم تری‌دی پانل سازه‌ای (Lattice Panel) شامل پانل‌های تولیدشده به‌صورت شبکه خرپای فضایی جوشی سه‌بعدی می‌باشند که با EPS (پلی استایرین) پرشده اند. هر طرف این پانل با ۴۵-۸۰ mm ضخامت از بتن به روش بتن پاشی پوشیده شده است .در اطراف بازشوها و ورودی‌ها از خروجی‌های میلگردهای جوشی فابریک استفاده می‌گردد. این شبکه‌های اضافی و میلگردهای مسطح در المان‌های ساختمانی، مقاومت لازم را در نواحی بازشو و اتصالات فراهم می‌کنند [۱۵].

یک عضو تری دی پانل، مقاومت خمشی خارج از صفحه و صلبیت خود را با مکانیزم مقطع کامپوزیت کامل که توسط عمل خر پای دو شبکه آرماتورگذاری و بتن لایه فشاری شبیه یک مقطع بتن‌آرمه تأمین می‌کند.

استفاده از سیستم لاینینگ دوپوسته: درروش لاینینگ دوپوسته، با تثبیت اولیه شاتکریت یا راک بلت لایه‌ای دیگر اضافه‌شده و درواقع پوسته دوم اجرا می‌گردد. که همان لاینینگ نهایی است که می‌توان هرکدام از لایه‌ها را مانند لتیس پنل یا لاینینگ بتنی با بتن پر مقاومت، بتن معمولی و یا بتن الیافی باشد. روش دیگری می‌توان در لاینینگ دوپوسته پیشنهاد نمود که در پوسته دوم خود به‌صورت دوجداره اجرا تا در فضای خالی بین جداره‌ها باعث کاهش و میرایی موج حاصل از انفجار گردد[۱۶]. شکل (۴) به استفاده تری‌دی پانل سازه‌ای در احداث لاینینگ تونل‌ها اشاره می‌کند.

شکل ۴. نمایی از استفاده تری‌دی پانل سازه‌ای در احداث لاینینگ تونل‌ها

۲. روش تحقیق

تصمیم‌سازی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های انسانی است و هر فرد در طول شبانه روز تصمیم‌های فراوانی اتخاذ می‌کند. از آنجا که اتخاذ تصمیم صحیح و به موقع می‌تواند تاثیر به سزایی در زندگی شخصی و اجتماعی انسان‌ها داشته باشد، ضرورت وجود یک روش قوی که بتواند یاری نماید کاملاً ضروری است. یکی از کارآمدترین این روش‌ها فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP است که برای اولین بار توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۸۰ مطرح شد.

اصول چهارگانه توماس ال ساعتی عبارتند از:

اصل۱. شرط معکوسی[1]: اگر ترجیح عنصرA بر عنصر B برابر n باشد ترجیح عنصر B بر عنصر A برابر $\frac{1}{n}$ خواهد بود.

[1] Reciprocal Condition

اصل۲. همگنی[1]: عنصر A با عنصر B باید همگن و قابل قیاس باشند و به بیان دیگر برتری عنصر A بر عنصر B نمی‌تواند بی‌نهایت یا صفر باشد.

اصل۳. وابستگی[2]: هر عنصر سلسله مراتبی به عنصر سطح بالاتر خود می‌تواند وابسته باشد و به‌صورت خطی این وابستگی تا بالاترین سطح می‌تواند ادامه داشته باشد.

اصل۴. انتظارات[3]: هرگاه تغییری در ساختمان سلسله مراتبی رخ دهد فرآیند ارزیابی مجدداً انجام گیرد.

با توجه به اهداف پروژه و شاخص‌ها و گزینه‌های استخراج شده از رساله دکتری، برای کسب نظرات خبرگان، اقدام به طراحی پرسشنامه بر اساس روش AHP شده است.خبرگان شامل متخصصین صنعت ساخت و دارای تحصیلات عالیه، سوابق و مسئولیت اجرایی در زمینه پروژه های پدافند غیرعامل و همچنین صاحب نظر وتاثیرگذار در این شاخه می باشند. در ادامه با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و اصول مدیریت ساخت، مصالح و روش‌های ساخت مناسب از دید خبرگان به دست می‌آید. با توجه به نیاز این تحقیق به استفاده از شاخص‌های کیفی و کمی، وزن دهی به شاخص‌ها و مقایسه انواع روش‌ها و مصالح الزامی است. نظر به اینکه برای وزن دهی و دستیابی به نتایج تحقیق، روش AHP (مقایسه زوجی) انتخاب گردیده است، از نرم‌افزار Expert choice جهت نیل به اهداف کلی تحقیق استفاده می‌گردد و جهت صحت سنجی از نرم افزار SPSS و فرمول کوکران استفاده نموده که تعداد ۶۰ نفر جامعه آماری تحقیق را تشکیل می‌دهند. از این میان فقط تعداد ۳۶ پرسشنامه قابل‌قبول بوده بنابراین تعداد جامعه نمونه آماری۳۶ نفر گردیده است. از آنجایی که عدد به‌دست آمده (آلفای کرونباخ) برای پرسشنامه ها، بزرگ‌تر از ۰/۷ است (۰/۸۸۷ < ۰/۷)، اعتبار یا پایایی پرسشنامه‌ها مورد تأیید می باشد همچنین پارامتر d دقت احتمال در فرمول کوکران می تواند بین۰/۰۵ تا ۰/۴ قرار گیرد که در این تحقیق d= ۰/۱ بوده و قابل قبول می باشد. لازم به ذکر است به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، شاخص‌هایی که تأثیرگذار در مدیریت ساخت سازه‌های مدفون بوده و در راستای سیاست‌ها و اهداف کلی پدافند غیرعامل هستند، ارائه گردیده‌اند[۱۷].

- صرفه اقتصادی
- کاهش زمان ساخت
- افزایش کیفیت مصالح و بهبود روش اجرا (مقابله در ب رابر نفوذ)
- فراهم شدن امکان استتار و اختفا در زمان تجهیز کارگاه و در طول ساخت
- کاهش نخاله‌ها و ضایعات ناشی از حفاری
- سازگاری مکان ساخت با ماهیت پروژه
- مقاومت در برابر آتش و ضربه انفجار
- مستهلک کردن موج انفجار
- قابلیت تعمیر، نگهداری و مرمت‌پذیری
- قابلیت مقاوم‌سازی

گزینه‌های مورد استفاده در ساخت لاینینگ سازه‌های زیرزمینی به‌صورت زیر است :

- شاتکریت مسلح با الیاف FRCS
- لتیس پنل
- راک بلت و بتن مسلح درجا
- قطعات پیش‌ساخته در لاینینگ نهایی
- شاتکریت و بتن مسلح درجا
- شاتکریت و بتن مسلح با تقویت FRP
- شاتکریت و بتن الیافی مسلح
- شاتکریت و بتن‌های پر مقاومت مسلح
- مواد نانویی جهت افزایش مقاومت لاینینگ بتنی

۳. نتایج و بحث

پس از بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته در خصوص مصالح و ارکان اصلی مدیریت ساخت، همچنین انتخاب روش تحقیق مناسب، تعیین جامعه آماری و طراحی پرسشنامه‌ها بر اساس روش AHP، نتایج حاصله که خروجی پرسشنامه‌ها بوده که در نرم‌افزار Expert Choice مدل‌سازی شده است، با توجه به کاربری‌های سازه‌های زیرزمینی و تهدیدات متوجه آن‌ها، قابلیت مقاوم‌سازی، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است که قطعاً در طراحی سازه‌های معمولی و با کاربری‌های عادی، توجه خاصی به آن نشده و یا در طراحی در مقابل بار زلزله مدنظر قرار می‌گیرد.

قابلیت مستهلک کردن انرژی با توجه به تأثیر مستقیمی که بر کاهش آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات دارد، در رتبه دوم قرارگرفته است. قابلیت نگهداری و ترمیم‌پذیری به‌عنوان شاخصی تأثیرگذار در افزایش تاب‌آوری و فراهم کردن امکان تداوم فعالیت‌های اصلی سازه، در رتبه سوم قرارگرفته است (جدول۳). با توجه به تهدیدات سازه‌های زیرزمینی و بررسی آثار بمب‌های نفوذکننده، مقاومت در برابر موج انفجار و آتش یکی از پارامترهای

[1] Homogeneity
[2] Dependency
[3] Expectation

اصلی در طراحی سازه زیرزمینی است که وزن بالایی را نیز به خود اختصاص داده است. کاهش نخاله‌ها و ضایعات جدای از صرفه اقتصادی و افزایش زمان، عاملی مثبت در عدم شناسایی پروژه است. البته به نظر می‌رسد با توجه به این‌که این امر در هر پروژه‌ای شاید عملی نباشد، اما با توجه به نیاز آن در زمان اجرای سازه‌های خاص زیرزمینی، امتیاز بالایی را کسب نموده است. سازگاری مکان ساخت با ماهیت پروژه نیز علی‌رغم پیش‌بینی نگارنده؛ امتیاز بالایی را به خود اختصاص داد که شاید اصلی‌ترین عامل آن تعدد سازه‌هایی است که در مکان‌های نامناسب و ناسازگار احداث می‌گردند که از هم از جهت افزایش هزینه و هم از جهت مشکلات بصری و شناسایی، تبعاتی به همراه دارند.

حتی در دو پروژه با مشخصات و الزامات مکان‌یابی پدافند غیرعامل، نهایتاً صرفه اقتصادی تأثیرگذار در انتخاب کی از آن‌ها خواهد بود. با پیشرفت فنّاوری ماهواره‌ها و روش‌های شناسایی، امکان تشخیص ماهیت پروژه در زمان ساخت، به‌شدت افزایش‌یافته است. لذا در پروژه‌ای خاص، قطعاً باید از شناسایی ماهیت و کاربری سازه آن‌هم با استفاده از روش‌های ساخت و توجه به اصول مربوطه در زمان تجهیز کارگاه، جلوگیری نمود. یکی از روش‌های اجرایی سازه های مدفون، روش کند و پوش می باشد که سنجیده‌ها قادر به شناسایی آن می‌باشند. برای محافظت از برخورد پرتابه‌ها به سازه می‌بایست آن را در عمق مناسب زمین اجرا نموده و بر روی آن چند لایه خاک ریخته شود. یکی از این لایه‌ها می‌تواند دال انفجاری با ضخامت مناسب بوده و لایه‌های فوقانی آن با دانسیته بالا و لایه‌های زیرین دال با دانسیته کم تر اجراگردد. علت این امر این است که برای جلوگیری از نفوذ بمب نیاز به لایه‌های متراکم و برای میرایی موج، لایه‌های سست تر مناسب است. قطعاً این شاخص، اهمیت بسزایی دارد اما با توجه به عدم سهولت تحقق آن و فنّاوری بالای دشمن، ترجیح اصلی بر مقاوم‌سازی و کاهش آسیب‌پذیری‌های ناشی از تحقق تهدید بر این سازه‌ها در پاسخ‌های پرسشنامه‌ها، بوده است. علی‌رغم تأکید بر دو اصل کاهش هزینه‌ها و زمان ساخت پروژه در مدیریت بحران؛ نتایج پرسشنامه‌ها مبین این نکته است که نمی‌توان هزینه و زمان را فدای هدف اصلی یعنی مقاومت سازه زیرزمینی در مقابل تهدیدات و یا کاهش آسیب‌های ثانویه پس‌ازآن کرد. حتی شاخص‌های مربوط به استتار و اختفا سازه نیز امتیاز بالاتری از صرفه اقتصادی و کاهش زمان ساخت کسب کرده‌اند که تأمل‌برانگیز است. در پایان می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که ترتیب و رتبه شاخص‌ها با سه رویکرد اصلی زیر در پرسشنامه‌ها دنبال شده است:

- کاهش آسیب‌ها و تلفات اولیه با فرض تحقق تهدید و عدم امکان پیشگیری از آن
- کاهش آسیب‌های ثانویه و بهبود شرایط بازگشت‌پذیری و تاب‌آوری سازه زیرزمینی
- جلوگیری از شناسایی کاربری و مشخصات اصلی سازه پس از نیل به اهداف اصلی دفاعی در سازه‌های زیرزمینی، اصول اصلی مدیریت پروژه یعنی صرفه اقتصادی با افزایش کیفیت مصالح و روش‌های اجرایی مناسب به همراه کاهش زمان ساخت.

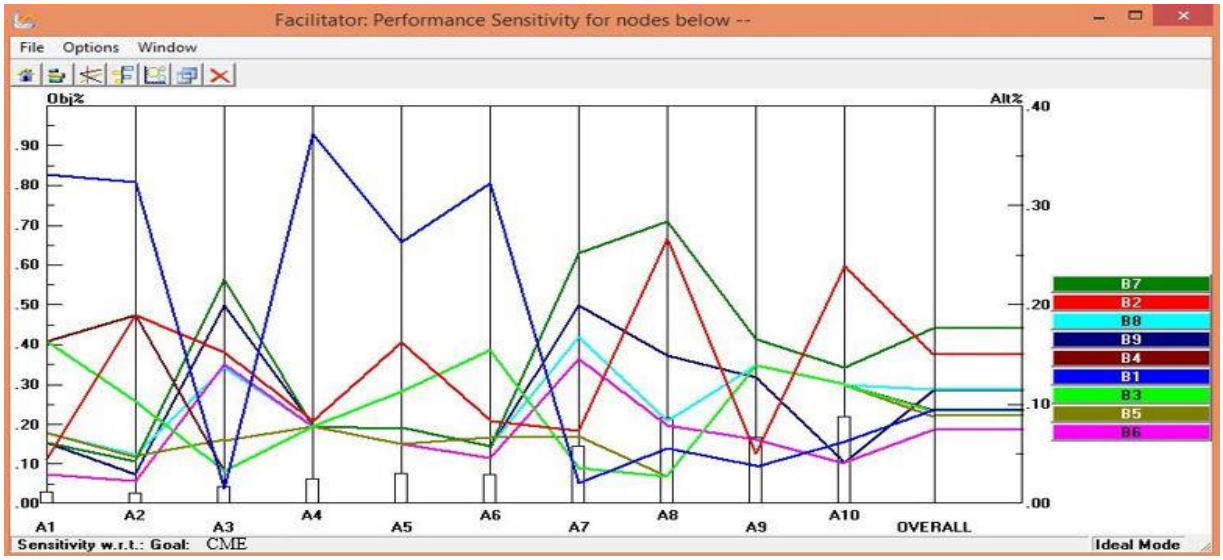
جدول ۳. وزن و اولویت هر یک از شاخص‌ها

ردیف	کد شاخص	شاخص	وزن	اولویت
۱	A_1	صرفه اقتصادی	۰/۰۲۴	۹
۲	A_2	کاهش زمان ساخت	۰/۰۲۱	۱۰
۳	A_3	افزایش کیفیت مصالح و بهبود روش اجرا (مقابله در برابر نفوذ)	۰/۰۳۸	۸
۴	A_4	فراهم شدن امکان استتار و اختفا در زمان تجهیز کارگاه و در طول ساخت	۰/۰۵۶	۷
۵	A_5	کاهش نخاله‌ها و ضایعات ناشی از حفاری	۰/۰۶۹	۵
۶	A_6	سازگاری مکان ساخت با ماهیت پروژه	۰/۰۶۸	۶
۷	A_7	مقاومت در برابر آتش و ضربه انفجار	۰/۱۳۹	۴
۸	A_8	مستهلک کردن موج انفجار	۰/۲۱۰	۲
۹	A_9	قابلیت تعمیر، نگهداری و مرمت‌پذیری	۰/۱۶۱	۳
۱۰	A_{10}	قابلیت مقاوم‌سازی	۰/۲۱۳	۱

از طرفی برای روش‌های اجرا و مصالح ەطورکلی لاینینگ‌های دوپوسته امتیازات بیشتری را به خود اختصاص داده و اولویت‌های اصلی استفاده در سازه‌های زیرزمینی می‌باشند که دلیل اصلی آن امتیازآوری در شاخص‌های مهمی چون قابلیت مقاوم‌سازی، قابلیت مستهلک‌سازی موج انفجار و مقاومت در برابر آتش و ضربه می‌باشد [۱۸]. لتیس پنل (Lattice Panel) نیز در رتبه دوم روش‌های اجرایی قرارگرفته که علی‌رغم تک پوسته بودن انعطاف‌پذیری و مقاومت بالایی دارد (جدول ۴) [۱۹]. بتن‌های الیافی، بتن های نانویی و بتن های پر مقاومت با توجه به رفتار مناسب در برابر انفجار، بهترین مصالح برای استفاده دروازه های زیرزمینی هستند که البته هزینه بالاتری نسبت به مصالح عادی و بتن‌های معمولی در بر خواهد داشت. [۲۰]. از نکات حائز اهمیت امتیاز پایین ورق‌های تقویتی FRP است که دلیل آن را می‌توان محدودیت کاربرد آن در اجرا دانست [۲۱]. همچنین قطعات پیش‌ساخته به نسبت استفاده از روش راک بلت‌ها و بتن درجا، امتیاز بالاتری کسب کرده‌اند که دلیل آن را می‌توان در شاخص کاهش نخاله و فراهم شدن امکان استتار و اختفا دانست. نمودار مقایسه گزینه‌ها با توجه به هر شاخص در شکل (۵) ارائه گردیده است.

جدول۴. وزن نهایی گزینه ها

ردیف	کد گزینه ها	گزینه	وزن برحسب درصد	اولویت
۱	B_1	شاتکریت مسلح با الیاف FRCS	۱۱	۵
۲	B_2	لتیس پنل(Lattice panel)	۱۵/۸	۲
۳	B_3	راک بلت و بتن مسلح درجا	۸/۹	۷
۴	B_4	قطعات پیش‌ساخته در لاینینگ نهایی	۹/۱	۶
۵	B_5	شاتکریت و بتن مسلح درجا	۸/۲	۸
۶	B_6	شاتکریت و بتن مسلح با تقویت FRP	۷/۴	۹
۷	B_7	شاتکریت و بتن الیافی مسلح	۱۷/۵	۱
۸	B_8	شاتکریت و بتن‌های پر مقاومت مسلح	۱۱/۱	۴
۹	B_9	مواد نانویی جهت افزایش مقاومت لاینینگ بتنی	۱۱/۲	۳



شـــکل ۵. نمـودار مقایسـه گزینـه‌هـا بـا توجـه بـه هـر شـاخص

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به‌تمامی مطالب ارائه‌شده و نتایج کسب‌شده از پرسشنامه‌ها و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار Expert choice، درنهایت در این مقاله، مصالح و روش ساخت لاینینگ سازه‌های مدفون با نگاه مدیریت ساخت و پدافند غیرعامل بیان می‌شود. از منظر پدافند غیرعامل به‌طورکلی شاخص‌هایی که مرتبط با افزایش مقاومت و کاهش آسیب‌پذیری‌های ناشی از تحقق تهدیدات فیزیکی (که انفجار مدنظر است)، اولویت بالاتری داشته و پس‌ازآن شاخص‌هایی که امکان بازگشت به شرایط عادی و جبران خسارات را داشته قرار می‌گیرند. (شاخص امکان ترمیم،

تعمیر و نگهداری) پس‌ازآن شاخص‌هایی که در شناخت و کشف ماهیت پروژه دخیل هستند اولویت داشته و در انتها نیز شاخص‌های هزینه و زمان قرار دارند که علی‌رغم تأکید مدیریت ساخت بر این دو شاخص؛ می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در سازه‌ها با کاربری خاص، هزینه لازم برای ساخت و زمان موردنظر برای اتمام پروژه فدای افزایش مقاومت سازه و توجه به پارامترهای دفاعی آن می‌شود، گرچه در انتخاب نوع روش‌های اجرایی گزینه‌های انتخاب می‌گردد که صرفه اقتصادی و زمان مناسب اجرا دیده می‌شود. در حال حاضر با توجه به مواد و فنّاوری‌های موجود، می توان از این مقاله نتیجه گرفت که قطعاً استفاده از مصالح بتن الیافی FRCS، مواد FRP، مواد نانویی به‌عنوان مصالح هوشمند، مواد افزودنی مانند پودر واکنش‌پذیر و فوق روان کننده و روش‌های خاص افزایش مقاومت بتن، ارجحیت بر سایر مواد معمولی و رایج در ساخت سازه‌ها دارند و استفاده از هرکدام از مصالح بیان‌شده در روش‌های اجرایی حالات متفاوت و کاربری‌های خاصی را به وجود می‌آورد. به‌عنوان نتیجه‌گیری نهایی می‌توان گزینه‌ها را به ترتیب زیر اولویت‌بندی نمود: (البته همان‌طور که بیان شد مصالح نیز تأثیر بسزایی در انتخاب روش اجرایی بر عهده دارند)

۱. شاتکریت و بتن الیافی FRCS
۲. لتیس پنل
۳. شاتکریت با بتن مسلح و مواد نانویی
۴. شاتکریت با بتن‌های پر مقاومت
۵. شاتکریت مسلح با الیاف FRCS
۶. قطعات پیش‌ساخته در لاینینگ نهایی
۷. راک بلت و بتن مسلح درجا
۸. شاتکریت و بتن مسلح درجا
۹. شاتکریت و بتن مسلح با تقویت FRP

نتایج حاصله گویای این است که خبرگان این رشته تمایل به تلفیق مصالح نوین و روش‌های سنتی دارند. به لحاظ پاسخگویی روش لتیس پنل در برابر انفجار عملکرد بسیار مناسبی را از خود نشان داده است. لاینینگ دو پوسته به‌خصوص با تلفیق مواد و مصالح مناسب مانند بتن پودری فعال پر مقاومت با الیاف فولادی بهترین عملکرد سازه‌ای و مقاوم‌سازی را از خود در برابر انفجار و مباحث پدافندی از خود نشان می‌دهند.

۵. مراجع

[1] Meena, R. S. “Analysis of Building Collapse under Blast Load”; National Institute of Technology Rourkela, 2009.

[2] US Army Engineers Waterways Experimental Station. “TM5-855-1 Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons”; US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC, 1986.

[3] ACI “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”; American Concrete Institute, 2002, 440.

[4] ACI “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”; American Concrete Institute, 2007,440.

[5] Crowl, W. K. “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300”; US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC . 1969.

[6] Yi, N. H.; Kim, S. B.; JayKim, J.; Cho, Y. G. “Blast-Resistant Characteristics of Ultra-High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete”; Construction and Building Materials 2012, 28, 694-707.

[7] Silva, P. F.; Lu, B. “Improving the Blast Resistance Capacity of RC Slabs with Innovative Composite Materials”; Composites Part B: Engineering 2007, 38, 523-534.

[8] ACI “Fiber Reinforced Concrete: Properties and Applications”; American Institute, 1987, 141-158.

[9] Debicki, G.; Shekarchi, M.; Houari, H. “Contribution à la caractérisation du béton armé de fibres métalliques- résultats d’étude rhéologique. Les bétons renforcés de fibres métalliques”; Centre de Coopération Interuniversitaire Franco-Québécoise, Béthune, France, 1994, 23-36.

[10] Soroushian, P.; Lee, C. D. “Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete: Correlation with Some Measures of Fiber Spacing”; Materials Journal 1990, 87, 542-546.

[11] ACI “Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete”; American Concrete Institute, 2003, 213.

[12] Hung, C. J.; Monsees, J. “Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels–Civil Elements”; US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, New York, 2009.

[13] International Tunneling Association, Working Group No. 2. “Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining”; Tunneling and Underground Space Technology 2000, 15, 303-331.

[14] ACI “Building code requirements for structural concrete and commentary”; American Concrete Institute, 2008, 318-08.

[15] Whittaker, B. N.; Frith, R .C. “Tunneling: Design, Stability and Construction”; Institute of Mining and Metallurgy, 1990.

[16] Hosseini, S. A. “Providing an Applied Model for Construction Management of Buried RC Structures Exposed to Penetrating Bombs, with the Approach of Providing Passive Defence Platforms”; Ph.D Thesis, Islamic Azad University, Roudehen, 2017.

[17] Szuladzinski, G. “Formulas for Mechanical and Structural Shock and Impact”; CRC Press. 2009.

[18] Pfeifer, D. W.; Hanson, J. A. “Precast Concrete Wall Panels: Flexural Stiffness of Sandwich Panels”; ACI Publication, 1965, 11, 67-86.

[19] Buchan, P. A.; Chen, F. J. “Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures – A State-of-the-Art Review”; Composites Part B: Engineering 2007, 38, 509-522.