



Behavior of pumice hybrid-fiber reinforced concrete slabs under blast loading

M. Taghavi Parsa^{1*}, M. Tabatabaeian²

¹Civil Group, Imam Hossein University, Tehran, Iran

²Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Nowadays, the explosion phenomenon has been considered by structural engineers due to the increase in terrorist attacks and unforeseen events. Therefore, the calculation of the final dynamic loads resulting from these loadings should be considered as a criterion in order to design structures and protect military buildings. In this investigation, the behavior of pumice hybrid-fiber reinforced concrete slabs under blast loading was assessed. To evaluate the performance of pumice hybrid-fiber reinforced concrete, contact explosion test on slabs with dimensions 100×100×10 cm³ was conducted. Six slabs, including one unreinforced concrete slab and five fiber-reinforced concrete slabs, were prepared. Also, C4 explosive material was used to investigate different failure modes of slabs. The results showed that the addition of various types of fibers improved the behavior of slabs. Also, it is concluded that the replacement of cement and steel fibers with pumice and polyolefin fibers, respectively, led to a slight increment in the number and extent of cracks; however, the costs were significantly decreased.

Review History:

Received: Jun. 11, 2021

Revised: Aug. 19, 2021

Accepted: oct. 08, 2021

Available Online: Nov. 06, 2021

Keywords:

Concrete slab

Hybrid fiber

Pumice

Blast loading

Failure mode

1- Introduction

Nowadays, the explosion phenomenon has been considered by structural engineers due to the increase in terrorist attacks and unforeseen events. Therefore, the calculation of the final dynamic loads resulting from these loadings should be considered as a criterion in order to design structures and protect military buildings. The advantages of fiber-reinforced concrete under static loads, which are well known worldwide, have led to their introduction as a material resistant to dynamic loads such as impact and explosion [1-3]. In recent years, many researches have been conducted on the effect of blast load on fiber-reinforced concrete members [4-6]. However, experimental results showing the explosive behavior of fiber-reinforced concrete are limited. All of these researches highlight the need for practical action to reduce localized or global damage to concrete elements. The use of cheap materials such as polymeric fiber and pumice has been considered as an alternative to steel fiber and cement, respectively. In this study, firstly, steel fibers in the amount of 1, 1.5, 2 and 2.5% by volume were added to the mixing designs. Then, by performing mechanical tests on compression, tensile and flexural samples, the optimal percentage of steel fibers was selected. In the second phase of the research, 30%, 40% and 50% of the optimal steel fibers were replaced with polyolefin fibers, respectively, and

mechanical tests were repeated on them to determine the optimal mixing scheme for hybrid fibers. In the final stage of the research, by selecting the optimal design obtained from the first and second stages of the research, the performance of concrete slabs reinforced with hybrid fibers and pumice under explosion was investigated. For this purpose, blast test was performed on contact slabs of 100 × 100 × 10 cm³. The specimens consisted of 6 series of concrete slabs as one unreinforced slab and five slabs reinforced with fibers.

2- Methodology

In this study, C₄ explosive was used in experiments due to its low chemical sensitivity and low cost. Also, Type II cement and Khash pozzolan, which are in accordance with the criteria of ASTM C150 standard were applied. Moreover, coarse-grained has been used as a river with a specific gravity of 2.68 and fine-grained as a broken with a specific gravity of 2.64, water absorption of 1.6% and a soft modulus of 2.93. The largest coarse grain size is 19 mm. Two types of steel and polyolefin fibers were provided to investigate the differences in the behavior of fiber-reinforced concrete under blast load using different fibers with various volume percentages.

In order to achieve optimal designs containing single steel fibers and hybrid fibers (steel and polyolefin), compressive, tensile and flexural strength tests were performed on different

*Corresponding author's email: drmhparsa@gmail.com





Fig. 1. The setup of blast loading test and arrangement of the support frame

samples. A compressive strength test according to BS 1881 was performed as a load control on $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ cubic specimens. Also, to determine the tensile properties of fiber-reinforced concrete, indirect tests of splitting tensile and three-point bending were used. A blast test was performed on contact slabs of $100 \times 100 \times 10 \text{ cm}^3$. The specimens consisted of 6 series of concrete slabs as one unreinforced slab and five slabs reinforced with fibers. The setup of the blast loading test and arrangement of the support frame is shown in Figure 1.

3- Results and Discussion

Generally, replacing part of steel fibers with polyolefin fibers reduces the mechanical properties of concrete. This is due to the lower tensile strength of polyolefin fibers compared to steel fibers. In fact, polyolefin fibers have less ability to reduce the growth and development of cracks when opened due to their low tensile strength. Among the hybrid fiber reinforced designs, the design with 40% replacement of steel fibers with polyolefin fibers has the best mechanical properties, and the strengths obtained from this design are very close to the strength values of the single-fiber design. Figure 2 shows the failure types of different samples.

The dimensions of the hole (diameter and depth of the hole) created in the slab due to the explosion are one of the parameters that can show a small amount of reinforcement effect. Due to the complete collapse of the unreinforced specimen, the relative percentage of degradation is shown in Figure 3 for each of the slabs. In fact, in each sample, the percentage of surface destruction (ratio of hole diameter to the dimension of the slab in contact with the explosive (100 cm)) and the percentage of deep destruction (ratio of hole depth to slab thickness (10 cm)) are expressed.

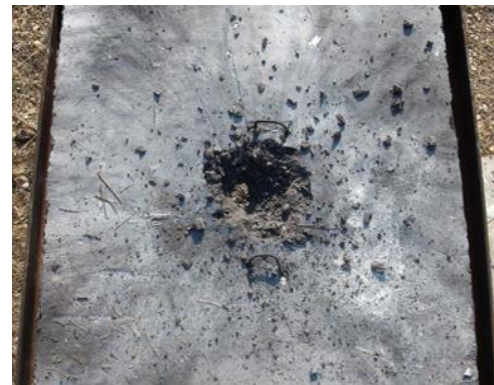
As can be seen in Figure 3, the presence of different types of fibers has significantly increased the strength of the concrete slab against the blast load. By replacing steel fibers



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Failure types for various specimens: (a) WF specimen, (b) SPF-60-40/P0 Specimen, (c) SPF-60-40/P20 Specimen

with polyolefin fibers and also moving part of the cement with pumice, although the amount of damage has increased slightly, it still retains its appearance and prevents sudden collapse.

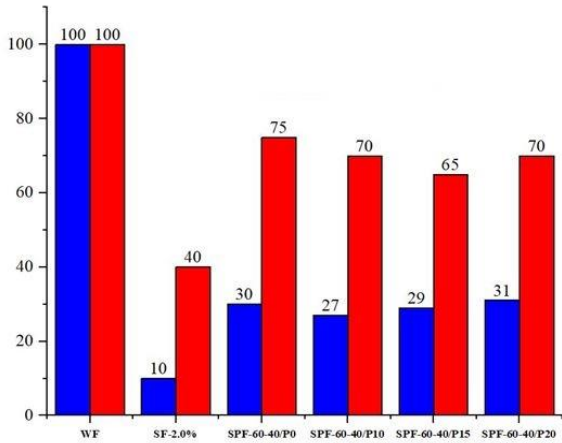


Fig. 3. Percentage of surface and deep failure

4- Conclusion

The following conclusions can be drawn:

(a) Replacing part of steel fibers with polyolefin fibers reduces the mechanical properties of concrete. This is due to the lower tensile strength of polyolefin fibers compared to steel fibers.

(b) Among the hybrid fiber reinforced designs, the design with 40% replacement of steel fibers with polyolefin fibers has the best mechanical properties

(c) The presence of different types of fibers has significantly increased the strength of the concrete slab against the blast load. By replacing steel fibers with polyolefin fibers and also moving part of the cement with pumice, although the amount of damage has increased slightly, it still retains its appearance and prevents sudden collapse.

References

- [1] M. Morishita, H. Tanaka, T. Ando, H. Hagiya, Effects of concrete strength and reinforcing clear distance on the damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations, *Concrete Research and Technology*, 15(2) (2004) 89-98.
- [2] M. Morishita, H. Tanaka, M. Ito, H. Yamaguchi, Damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations, *Journal of Structural Engineering A*, 46 (2000) 1787-1797.
- [3] H. Tanaka, M. Tsuji, Effects of reinforcing on damage of reinforced concrete slabs subjected to explosive loading, *Concrete Research and Technology*, 14(1) (2003) 1-11.
- [4] K.K. Antoniadis, T.N. Salonikios, A.J. Kappos, Evaluation of hysteretic response and strength of repaired R/C walls strengthened with FRPs, *Engineering structures*, 29(9) (2007) 2158-2171.
- [5] V.C. Rougier, B.M. Luccioni, Numerical assessment of FRP retrofitting systems for reinforced concrete elements, *Engineering structures*, 29(8) (2007) 1664-1675.
- [6] S.A. Sheikh, Y. Li, Design of FRP confinement for square concrete columns, *Engineering Structures*, 29(6) (2007) 1074-1083.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mohammad Hossein Taghavi Parsa, Mojtaba Tabatabaeian, *Behavior of pumice hybrid-fiber reinforced concrete slabs under blast loading*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 417-420.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20164.7356





عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید و پوزولان پومیس در برابر انفجار

محمدحسین تقوی پارسا^{۱*}، مجتبی طباطبائی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:

دال بتنی
الیاف هیبرید
پومیس
انفجار
مود گسیختگی

خلاصه: امروزه به علت افزایش حملات تروریستی و اتفاقات پیش‌بینی نشده، پدیده انفجار مورد توجه طراحان سازه قرار گرفته است. بنابراین محاسبه بارهای دینامیکی نهایی ناشی از این انفجارها باید به شکل معیاری به منظور طراحی سازه و محافظت از ساختمان‌های نظامی، غیرنظامی و تاسیساتی مورد توجه قرار گیرد. استفاده از مصالح ارزان قیمت مانند الیاف پلیمری و پومیس به ترتیب به عنوان جایگزین الیاف فولادی و سیمان مورد توجه قرار گرفته است. با این حال تا کنون، عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید (ترکیب فولادی و پلی‌الفین) و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی نشده است. در این تحقیق، ابتدا الیاف فولادی به مقدار ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی به طرح‌های اختلاط اضافه گردید. سپس با انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی درصد بهینه الیاف فولادی انتخاب شد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف فولادی (2.0-SF) خواص مکانیکی بهینه هستند. در مرحله دوم تحقیق، به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از الیاف فولادی بهینه با الیاف پلی‌الفین جایگزین گردید و آزمایش‌های مکانیکی بر روی آن‌ها تکرار شد تا طرح اختلاط بهینه مسلح به الیاف هیبرید تعیین شود. براساس نتایج به دست آمده طرح اختلاط SPF-۶۰-۴۰ که در آن ۴۰ درصد الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین جایگزین شده است، طرح بهینه است. در مرحله نهایی تحقیق، با انتخاب طرح بهینه به دست آمده از مرحله اول و دوم تحقیق، عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی شده است. بدین منظور آزمایش مقاومت انفجاری به صورت خرج تماسی بر روی دال‌های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب انجام گرفت. قطعات شامل ۶ سری دال بتنی به صورت یک دال غیرمسلح و پنج دال مسلح به الیاف بودند. همچنین جهت تعیین مدل‌های گسیختگی، ماده منفجره C₄ به صورت مماس بر روی دال قرار داده شد. مطابق نتایج به دست آمده وجود انواع الیاف به طور چشمگیری موجب استحکام دال بتنی در برابر بار انفجار شده است. جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین و همچنین جابه‌جایی بخشی از سیمان با پوزولان پومیس اگر چه منجر به افزایش جزئی آسیب شده است (تبدیل حفر کوچک به حفر متوسط) اما همچنان دال شکل ظاهری خود را حفظ کرده و الیاف از متلاشی شدن ناگهانی جلوگیری می‌کند. در حقیقت نتایج این مطالعه نشان داد که با جایگزینی بخشی از الیاف فولادی و سیمان مصرفی به ترتیب با الیاف پلی‌الفین و پوزولان پومیس با هزینه‌ای به مراتب کمتر از طرح‌های متداول، می‌توان اقدام به ساخت المان‌های بتنی مقاوم در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی نظیر انفجار کرد.

۱- **مقدمه**
امروزه به علت افزایش حملات تروریستی و اتفاقات پیش‌بینی نشده در کارخانجات، پدیده انفجار مورد توجه طراحان سازه قرار گرفته است. بنابراین محاسبه بارهای دینامیکی نهایی ناشی از این انفجارها باید به شکل معیاری به منظور طراحی سازه و محافظت از ساختمان‌های نظامی، غیرنظامی و تاسیساتی مورد توجه قرار گیرد. برای تشکیل یک مدل طراحی که قابلیت اعمال بارهای انفجار به المان‌های سازه‌ای داشته باشد، باید مکانیزم گسیختگی المان مطالعه گردد. در این حوزه مطالعات محدودی در رابطه با گسیختگی المان بتنی صورت گرفته است و تنها در سال‌های اخیر کشورهایمانند آمریکا و سنگاپور به صورت گسترده به این مسئله پرداخته‌اند. به تازگی موریشیتا تست‌های انفجار بتن را با قرار دادن خرج انفجاری پنتولیت در تماس با دال‌های بتنی اجرا کرده است. در این آزمایش، اثر

مقدمه
امروزه به علت افزایش حملات تروریستی و اتفاقات پیش‌بینی نشده در کارخانجات، پدیده انفجار مورد توجه طراحان سازه قرار گرفته است. بنابراین محاسبه بارهای دینامیکی نهایی ناشی از این انفجارها باید به شکل معیاری به منظور طراحی سازه و محافظت از ساختمان‌های نظامی، غیرنظامی و تاسیساتی مورد توجه قرار گیرد. برای تشکیل یک مدل طراحی که قابلیت



اسکیل با متغیرهای نوع بتن، درصد الیاف، خواص الیاف، فاصله خاموت‌ها و نسبت سطح مقطع میلگردهای طولی تهیه کردند و ستون با استفاده از لوله شوک دهنده تحت اثر بار انفجار قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده است که استفاده از الیاف و آرماتور به صورت توأم موجب عملکرد بهتری در مقایسه با ستون غیرمسلح و مسلح به آرماتور در برابر بار انفجار می‌شود. در تحقیقی دیگر که توسط لوچیونی و همکاران^۲ انجام شد، رفتار دال‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی با مقاومت بالا در برابر بار انفجار به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی گردید [۲۲]. در این پژوهش پارامترهایی نظیر طول الیاف و مقدار آن به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان داد که الیاف‌هایی با طول کوتاه‌تر و مقدار بیشتر در واحد حجم بتن عملکرد بهتری در کنترل کردن آسیب‌های موضعی و کامل دال‌های بتنی از خود نشان دادند.

تمامی این تحقیقات لزوم انجام یک اقدام عملی جهت کاهش آسیب‌های موضعی در قطعات بتنی را آشکار می‌کند. استفاده از مصالح ارزان قیمت مانند الیاف پلیمری و پومیس به ترتیب به عنوان جایگزین الیاف فولادی و سیمان مورد توجه قرار گرفته است. با این حال تاکنون، عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید (ترکیب فولادی و پلی‌الفین) و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی نشده است. در این تحقیق، ابتدا الیاف فولادی به مقدار ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی به طرح‌های اختلاط اضافه گردید. سپس با انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی درصد بهینه الیاف فولادی انتخاب شد. در مرحله دوم تحقیق، به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از الیاف فولادی بهینه با الیاف پلی‌الفین جایگزین گردید و آزمایش‌های مکانیکی بر روی آن‌ها تکرار شد تا طرح اختلاط بهینه مسلح به الیاف هیبرید تعیین شود. در مرحله نهایی تحقیق، با انتخاب طرح بهینه به دست آمده از مرحله اول و دوم تحقیق، عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی شده است. بدین منظور آزمایش مقاومت انفجاری به صورت خرج تماسی بر روی دال‌های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب انجام گرفت. قطعات شامل ۶ سری دال بتنی به صورت یک دال غیرمسلح و پنج دال مسلح به الیاف بودند. همچنین جهت تعیین مدل‌های گسیختگی، ماده منفجره C_4 به صورت تماس بر روی دال قرار داده شد.

مقاومت فشاری بتن و مقدار آرماتور بر روی عملکرد بتن مسلح در برابر انفجار بررسی گردید. در یک مطالعه تجربی، مشخص شد که مقاومت فشاری بتن و فاصله آرماتورهای تقویتی در افزایش مقاومت دال‌های بتنی در برابر آسیب‌های موضعی و خرد شدگی تاثیر زیادی ندارد [۳-۱]. جهت کاهش اثرات ناشی از بارهای انفجاری، می‌توان از روش‌های نوین مهندسی نظیر ایجاد سپر حفاظتی استفاده نمود. برخی دیگر از این موارد عبارتند از استفاده از دال‌های بتن مسلح تقویت شده با FRP [۴-۸] و یا استفاده از الیاف با عملکرد بالا.

مزایای بتن مسلح به الیاف تحت اثر بارهای استاتیکی که در سطح جهانی به خوبی شناخته شده است، منجر به معرفی آن‌ها به عنوان یک ماده مقاوم در برابر بارهای دینامیکی نظیر ضربه و انفجار شده است. نتایج در مورد عملکرد بتن‌های الیافی در برابر بارهای دینامیکی محدود است. به علاوه تعدادی از این یافته‌ها با یکدیگر در تناقض هستند. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در رابطه با تاثیر بار انفجار بر روی اعضای بتنی مسلح به الیاف انجام شده است. با این حال، نتایج آزمایشگاهی که رفتار انفجاری بتن‌های الیافی را نمایان سازد، اندک است. عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف در مقایسه با دال‌های بتنی غیرمسلح مناسب‌تر است. مطابق با تحقیقات گزارش شده، وجود الیاف در دال‌ها موجب کاهش خرد شدگی دال شده و تخریب دال را کم می‌کند. همچنین وسعت خرد شدگی دال با افزایش درصد حجمی الیاف کاهش می‌یابد [۹-۱۸]. ژو و همکاران^۱ نتایج مربوط به رفتار دال‌های بتنی مسلح به آرماتور فولادی و الیاف در برابر بار انفجار را گزارش کردند [۱۹]. آن‌ها نشان دادند که وسعت گسیختگی در دال‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی کمتر از دال‌های مسلح به آرماتور است. در تحقیق دیگر که توسط طباطبائی و همکاران [۲۰] صورت گرفت، به بررسی تاثیر استفاده از الیاف کربنی بر روی پنل‌های بتنی در برابر بار انفجار پرداخته شد. محققان به منظور بررسی رفتار پنل‌ها، ۷ سری نمونه شامل ۳ نمونه مسلح به آرماتور به عنوان نمونه شاهد و ۴ پنل مسلح به ۱/۵ درصد الیاف کربن و آرماتور تهیه کردند. همچنین جهت انجام آزمایش انفجار نیز از ۳۸/۵ کیلوگرم آمونیم نترات به عنوان ماده منفجره استفاده گردید. نتایج حاصل از این تحقیق گویای آن بود که وسعت خرابی‌ها در پنل‌های حاوی الیاف کربن و آرماتور فولادی بسیار کمتر از پنل‌های مسلح به آرماتور بوده است. آئود و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار ستون‌های بتنی فوق توانمند مسلح به الیاف تحت بار انفجار پرداختند [۲۱]. محققین در این پروژه ۹ ستون بتنی فول

1 Zhou et al.

2 Aoude et al.

3 Luccioni et al.

جدول ۱. مقادیر معادل سطح نسبی تخریب مواد منفجره مختلف

Table 1. TNT equivalents for different explosives

| ماده منفجره | سطح نسبی تخریب |
|-------------|----------------|
| Torpex 2 | ۱/۴۹ |
| HBX | ۱/۴۴ |
| Minol 2 | ۱/۳۹ |
| Tritonal | ۱/۳۴ |
| پنتولیت | ۱/۲۵ |
| ترکیب R | ۱/۲۱ |
| TNT | ۱/۰۰ |
| Aniatol | ۰/۷۷ |



(ب)



(الف)

شکل ۱. مصالح سیمانی مصرفی در تحقیق: (الف) سیمان، (ب) پوزولان

Fig. 1. Cementitious materials used in the study: (a) cement, (b) pozzolan

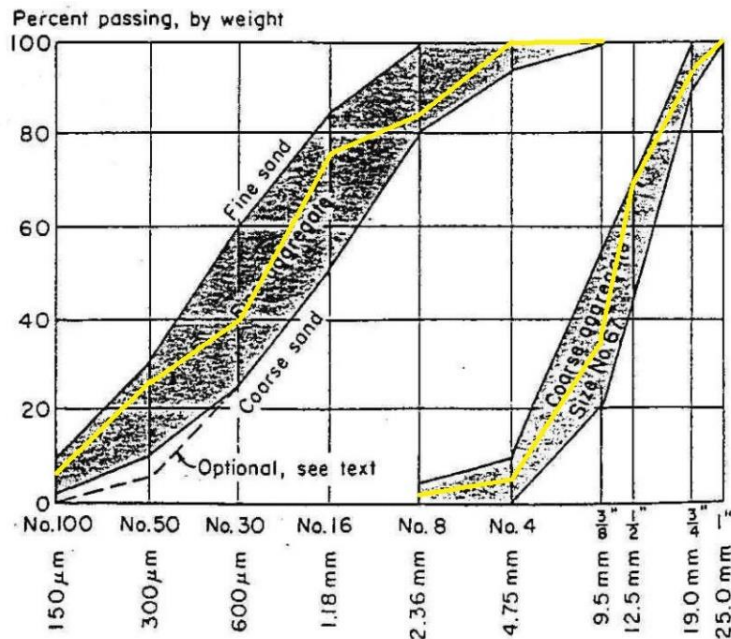
۲-۲- مصالح ساخت بتن

در انجام این تحقیق از سیمان تیپ دو و پوزولان خاش که مطابق با ضوابط استاندارد ASTM C150 [۲۵] می‌باشد، استفاده شده است. از آنجا که کیفیت سیمان بر کیفیت بتن تولیدی تاثیر به سزایی دارد، لذا تولید سیمان نیاز به دقت زیاد در کنترل دارد و آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه‌های کارخانجات سیمان انجام می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که سیمان دارای کیفیت مورد نظر بوده و با الزامات استانداردهای مربوطه سازگار می‌باشد. در شکل ۱ سیمان و پوزولان مصرفی در تحقیق نشان داده شده است. همچنین در این پژوهش از درشت‌دانه (شن) به صورت رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲/۶۸ و ریزدانه به صورت شکسته با وزن مخصوص ۲/۶۴، جذب آب ۱/۶٪ و مدول نرمی ۲/۹۳ استفاده شده است. بزرگ‌ترین اندازه

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱- ماده منفجره

TNT و یا ماده منفجره پنتولیت در آزمایش‌های انفجار به شکل گسترده به کار رفته است. در این تحقیق از ماده منفجره C_4 به دلیل حساسیت شیمیایی اندک و هزینه کم در آزمایش‌ها استفاده شده است. انرژی گرمایی به دست آمده از آزمایش‌های انفجار ماده منفجره TNT حدود ۴۵۲۱ کیلوژول بر کیلوگرم و انرژی ماده منفجره C_4 حدود ۵۶۵۱ کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد. بنابراین نسبت انرژی گرمایی بین این دو ماده باید مقدار ۱/۲۵ در نظر گرفته شود [۲۳ و ۲۴] که با استفاده از این نسبت (TNT معادل) ماده منفجره C_4 می‌تواند به ماده TNT تبدیل گردد. در جدول ۱ مقادیر معادل سطح نسبی تخریب انواع مواد منفجره گزارش شده است.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مصرفی و مقایسه با حدود مجاز ASTM C33 [۲۶]

Fig. 2. Gradation of fine and coarse aggregates

۳- مراحل آزمایش

۳-۱- آزمایش‌های مکانیکی

به منظور دستیابی به طرح‌های بهینه حاوی الیاف فولادی تک و الیاف هیبرید (فولادی و پلی‌الفین) آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی نمونه‌های مختلف انجام گرفت. آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881 [۲۷] به صورت بار کنترل بر روی نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب صورت گرفت. همچنین جهت تعیین خواص کششی بتن الیافی از آزمایش‌های غیرمستقیم کشش دو نیم شدن و خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. برای این منظور مطابق استاندارد ASTM C496 [۲۸] نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر مربع به صورت افقی در داخل دستگاه آزمایش مقاومت فشاری قرار و تحت بارگذاری قرار گرفت. همچنین بر اساس استاندارد ASTM C78 [۲۹] از نمونه‌های منشوری $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مکعب به منظور تعیین مقاومت خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها استفاده شد. در شکل ۳ نحوه انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی نشان داده شده است.

درشت‌دانه نیز ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در تحقیق با خط توپر زرد و حدود مجاز تعیین شده از سوی استاندارد ASTM C33 [۲۶] نشان داده شده است.

۳-۲- الیاف مصرفی

در این پژوهش برای بررسی تفاوت رفتار بتن الیافی در برابر بار انفجار با استفاده از الیاف مختلف با درصد حجمی‌های متفاوت از دو نوع الیاف فولادی و پلی‌الفین استفاده شد. دلیل انتخاب الیاف پلی‌الفین، بهینه‌سازی هزینه‌های ساخت و توجیه جایگزینی الیاف فولادی قلاب‌دار با الیاف پلی‌الفین است. الیاف فولادی قلاب‌دار تولید شرکت صنایع فولاد عرفان بوده و شرکت نانو نخ سیرجان نیز تأمین‌کننده الیاف پلی‌الفین این تحقیق می‌باشد. این نوع الیاف پلی‌الفین با نام تجاری الیاف امباس کورتا شناخته می‌شود که مواد سازنده آن پلیمر و کوپلیمر اصلاح شده است که مدول و مقاومت نسبتاً بالایی دارد. مشخصات الیاف فولادی و پلی‌الفین به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ مشهود است.

جدول ۲. خواص الیاف فولادی

Table 2. Properties of steel fiber

| مشخصات الیاف | مقدار |
|-----------------------|-------|
| طول (mm) | ۳۵ |
| قطر (mm) | ۰/۸ |
| نسبت طول به قطر معادل | ۴۳ |
| مدول الاستیسیته (MPa) | ۲۰۰ |
| وزن مخصوص | ۷/۸۵ |
| مقاومت کششی (MPa) | ۱۴۰۰ |



جدول ۳. خواص الیاف پلی‌الین

Table 3. Properties of polyolefin fiber

| مشخصات الیاف | مقدار |
|-----------------------|-------|
| طول (mm) | ۴۵ |
| قطر (mm) | ۰/۵ |
| نسبت طول به قطر معادل | ۹۰ |
| مدول الاستیسیته (MPa) | ۱۰ |
| وزن مخصوص | ۰/۹۱ |
| مقاومت کششی (MPa) | ۸۰۰ |

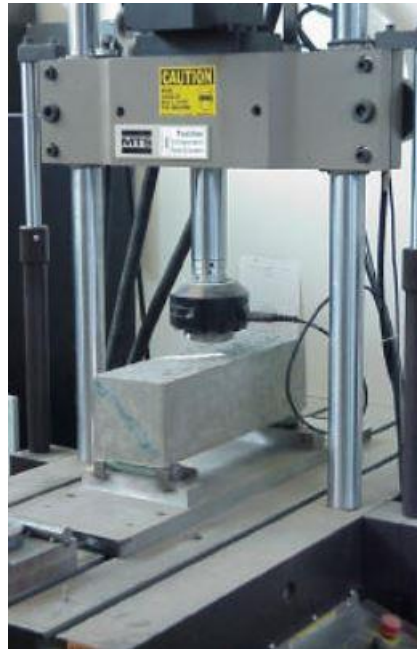




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳. نحوه انجام آزمایش‌های: (الف) مقاومت فشاری، (ب) مقاومت کششی، (ج) مقاومت خمشی

Fig. 3. Test setup for: (a) compressive strength, (b) tensile strength, (c) flexural strength

۱۵٪ و ۲۰٪ پومیس به عنوان جایگزین سیمان مصرفی در نظر گرفته شد. جهت انجام مقاومت انفجاری ابتدا تحقیقاتی در خصوص انواع مواد منفجره به عمل آمد. جهت تست انفجار ابتدا سعی شد شرایط تکیه‌گاهی به گونه‌ای باشد که به شرایط حقیقی نزدیک باشد. جهت این کار ابتدا با استفاده از تیرآهن نبشی نمره ۱۲۰ تعداد ۸ عدد تکیه‌گاه به ابعاد ۱۱۰×۱۱۰ سانتی‌متر مربع با ۴ پایه به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر متصل شده در چهار طرف تهیه

۳-۲- آزمایش انفجار

تست مقاومت انفجاری به صورت خرج تماسی بر روی دال‌های ۱۰۰×۱۰۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب انجام گرفت. قطعات شامل ۶ سری دال بتنی بودند به طوری که یک دال بتنی به صورت غیرمسلح و پنج دال دیگر مسلح به الیاف (SPF-60-40/P0، SPF-60-40، SF-2.0%)، SPF-60-40/P10، SPF-60-40/P15 و SPF-60-40/P20) و همچنین ۱۰٪.



شکل ۴. نحوه انجام آزمایش انفجار: (الف) تکیه‌گاه مورد استفاده جهت تست انفجار، (ب) جزئیات خرج انفجاری (ماده منفجره)

Fig. 4. Setup of blast test: (a) arrangement of supports, (b) details of explosive material

اثر را داشته باشند، باید ضخامت مصالح پوششی خرج انفجاری با شعاع نفوذ یکسان باشد [۳۰].

۳-۲-۳- محاسبات خرج انفجاری

برای تمام پل‌های بتنی با تکیه‌گاه ساده، حذف بخشی از پل بتنی به مقدار بیشتر از طول موثر منجر به فروپاشی خواهد شد. برای دهانه‌های تیرها، دال‌ها و پل‌ها، میزان خرج‌های انفجاری به طور جداگانه محاسبه می‌شود. با استفاده از رابطه ۱ می‌توان میزان خرج انفجاری برای دهانه‌های با تکیه‌گاه ساده را تعیین نمود [۳۰].

$$P = (3.3h + 0.5)^3 \times 3.3 \quad (1)$$

در این رابطه P میزان خرج لازم بر حسب پوند TNT در هر متر طول دهانه و h عمق تیر یا دال بر حسب متر می‌باشد.

۳-۲-۴- محاسبه عرض حفره ایجاد شده بر اثر انفجار

ماده منفجره پس از انفجار یک حفره در سرتاسر پل ایجاد خواهد نمود. به منظور تعیین عرض این حفره از رابطه ۲ استفاده می‌شود [۳۰]:

$$W_d = 2h + 0.3 \quad (2)$$

گردید. سپس به جهت آن که شرایط به واقعیت نزدیک‌تر باشد، مطابق شکل ۴-الف، تعداد ۴ عدد نشی نمره ۱۰۰ در قسمت داخلی تکیه‌گاه تعبیه گردید. همچنین جزئیات ماده منفجره C_4 که به شکل استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۱ است، در شکل ۴-ب نشان داده شده است. یک عدد چاشنی الکتریکی بر روی قسمت بالایی ماده منفجره قرار دارد. جرم خرج انفجاری برابر با ۰/۵ پوند در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۱- اهمیت موقعیت خرج انفجاری

موقعیت محل خرج با سایز، شکل و پیکربندی هدف بستگی دارد. وجود هوا یا آب میان ماده منفجره و هدف انفجاری نیروی موج انفجار را کاهش می‌دهد. انفجار مناسب زمانی است که خرج انفجاری نسبت به هدف دارای کوچک‌ترین نسبت باشد بدین صورت که با حداقل خرج ممکن بتوان قطعه را منفجر کرد. احاطه نمودن خرج‌های داخلی اثرات تخریب را افزایش می‌دهد [۳۰].

۳-۲-۲- انواع خرج‌های انفجاری

به طور کلی خرج‌های انفجاری به دو دسته خرج‌های داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند. خرج‌های داخلی خرج‌هایی هستند که با مته یا دریل بر روی سطح سوراخ یا حفره‌ای ایجاد می‌شود و خرج داخل حفره قرار می‌گیرد؛ سپس با مصالح خاص نظیر ماسه یا گل در سر جای خود مستحکم می‌شوند. در مقابل خرج‌های خارجی بر روی سطح قرار گرفته و برای اینکه بیشترین

جدول ۴. نسبت وزن معادل برای اثرات فضای باز [۳۰]

Table 4. Equivalence ratio for air effects

| K | R | مصالح |
|------|------------------|--|
| ۰/۰۷ | کلیه مقادیر | زمین |
| ۰/۳۲ | کمتر از ۱/۵ متر | مصالح نامرغوب، کلوخه رسی، زمین |
| ۰/۲۹ | ۱/۵ متر یا بیشتر | سخت، الوار ساختمانی، سازه خاکی |
| ۰/۸۸ | ۰/۳ متر یا کمتر | مصالح بنایی مرغوب، بلوک بتنی، سنگ معمولی |
| ۰/۴۸ | ۰/۳ تا ۰/۹ متر | |
| ۰/۴۰ | ۰/۹ تا ۱/۵ متر | |
| ۰/۳۲ | ۱/۵ تا ۲/۱ متر | |
| ۰/۲۷ | ۲/۱ متر به بالا | |
| ۱/۱۴ | ۰/۳ متر یا کمتر | بتن ، مصالح مناسب و درجه یک از نظر مرغوبیت |
| ۰/۶۲ | ۰/۳ تا ۰/۹ متر | |
| ۰/۵۲ | ۰/۹ تا ۱/۵ متر | |
| ۰/۴۱ | ۱/۵ تا ۲/۱ متر | |
| ۰/۳۵ | ۲/۱ متر به بالا | بتن مسلح (بدون در نظر گرفتن برش میلگردها) |
| ۱/۷۶ | ۰/۳ متر یا کمتر | |
| ۰/۹۶ | ۰/۳ تا ۰/۹ متر | |
| ۰/۸۰ | ۰/۹ تا ۱/۵ متر | |
| ۰/۶۳ | ۱/۵ تا ۲/۱ متر | |
| ۰/۵۴ | ۲/۱ متر به بالا | |

در این رابطه h عمق تیر یا دال و W_d عرض حفره بر حسب متر می‌باشند. (۳)

$$P = R^3 KC$$

در این رابطه P مقدار TNT معادل برحسب پوند، R شعاع نفوذ بر حسب فوت، K ضریب سختی مصالح و C ضریب نفوذ می‌باشد. گفتنی است مقدار ضریب سختی مصالح به مقاومت، سختی و جرم حجمی مصالح و ضریب نفوذ به موقعیت پوشش خرج انفجاری بستگی دارد. در جدول ۴ مقادیر شعاع نفوذ و ضریب سختی و در شکل ۵ مقدار ضریب نفوذ بر حسب شرایط مختلف نشان داده شده است.

در خرج‌گذاری روی قطعه بتنی موارد ذیل باید در نظر گرفته شوند:
 - اگر طول موثر بزرگ‌تر از عرض حفره و کمتر از دو برابر آن باشد، میزان خرج به اندازه ۱۰٪ افزایش یابد.
 - اگر طول موثر بیشتر از دو برابر عرض حفره باشد، خرج به مقدار دو برابر افزایش یافته و در دو خط پهلو به پهلو قرار می‌گیرد.
 خرج‌های انفجاری در یک خط ممتد در سرتاسر عرض پل در نقاط مورد نظر قرار داده می‌شوند و سطح مقطع خرج باید به گونه‌ای باشد که عرض آن بین ۱ تا ۳ برابر ارتفاع آن باشد [۳۰].

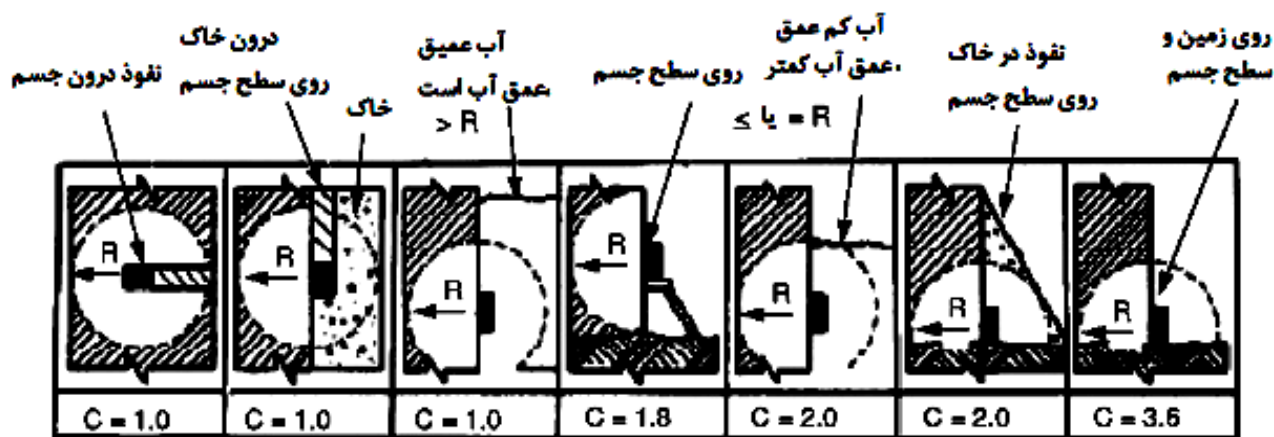
۴- نتایج و تفسیر

۴-۱- آزمایش‌های مکانیکی

در مرحله اول تحقیق، ابتدا الیاف فولادی به مقدار ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی به طرح اختلاط شاهد اضافه گردید. سپس آزمایش‌های

۳-۲-۵- محاسبات خرج انفجاری در بتن و سایر مصالح بنایی

تعیین میزان خرج انفجاری برای بتن، مصالح بنایی، سنگ‌ها و سایر مصالح مشابه با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید [۳۰]:



شکل ۵. ضریب C برای خرج انفجاری [۳۰]

Fig. 5. C factor for explosive materials

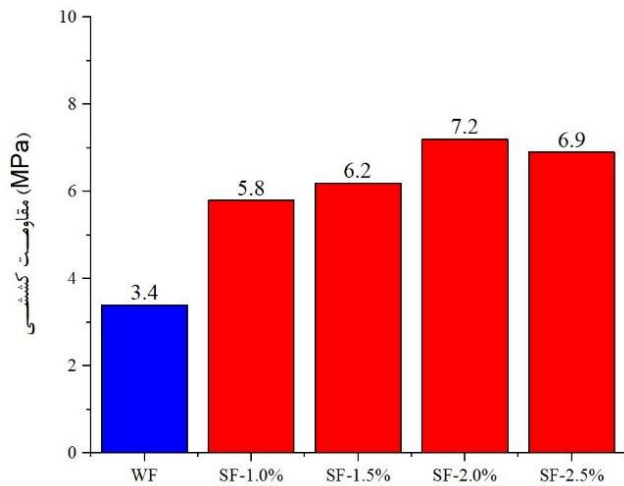
آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده در کل جایگزینی بخشی از الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین موجب کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. این موضوع به علت مقاومت کششی کمتر الیاف پلی‌الفین در مقایسه با الیاف فولادی است. در حقیقت الیاف پلی‌الفین به دلیل مقاومت کششی پایین، توانایی کمتری در کاهش رشد و توسعه ترک‌ها هنگام باز شدگی دارد. با این حال، در میان طرح‌های مسلح به الیاف هیبرید، طرحی که دارای ۴۰٪ جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین است، بهترین خواص مکانیکی را داراست و مقاومت‌های حاصل از این طرح، بسیار به مقادیر مقاومت طرح تک الیاف نزدیک است. بنابراین در مرحله سوم تحقیق، این طرح به عنوان طرح بهینه در ساخت دال‌ها استفاده شده است.

۴-۲- صحت‌سنجی طرح بهینه با استفاده از آنالیز آماری مبتنی بر فاصله (DBA)

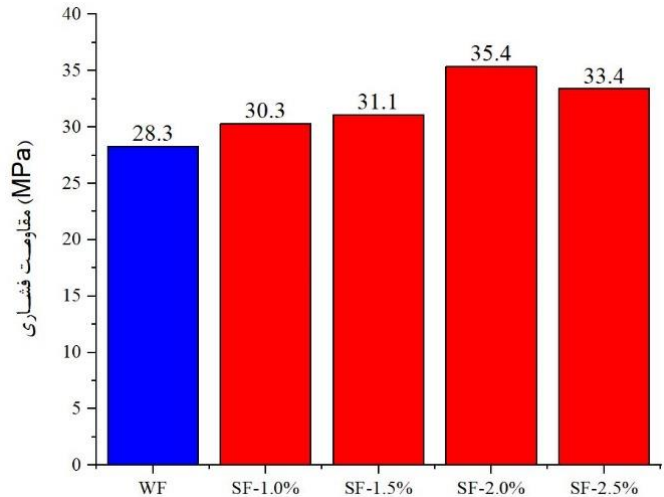
روش مبتنی بر فاصله (DBA) یک روش آماری به منظور یافتن یک گزینه بهینه در میان تمام گزینه‌های موجود در یک تحقیق می‌باشد. به منظور پیاده‌سازی روش DBA، فرض کنیم که مجموعه‌ای از n گزینه در یک مطالعه آماری در دسترس هستند. هر کدام از این گزینه‌ها دارای m ویژگی می‌باشند که بر اساس این ویژگی‌ها می‌بایست یک گزینه در میان تمام n گزینه به عنوان بهینه انتخاب شود. این گزینه‌ها و ویژگی‌های مورد

مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی ۵ سری نمونه (یک طرح شاهد و چهار طرح مسلح به ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد الیاف فولادی) انجام گرفت. نتایج آزمایش‌های مکانیکی در شکل ۶ ارائه شده است. همانگونه که مشخص است، با افزودن الیاف فولادی خواص مکانیکی بتن ارتقا می‌یابد. با این حال، تاثیر الیاف بر روی افزایش مقاومت‌های کششی و خمشی بیشتر از مقاومت فشاری است. علت این موضوع به نقش بیشتر ترک‌ها در گسیختگی کششی و خمشی مربوط می‌شود. در حقیقت نقش حضور الیاف در مخلوط و نمونه‌ها زمانی پر رنگ خواهد شد که ترک‌ها توسعه یابند. در چنین حالتی الیاف شروع به فعالیت کرده و با پل زدن بر روی ترک‌ها مقاومت‌های کششی و خمشی را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج حاصل شده نشان می‌دهد، که با افزایش درصد الیاف تا مقدار ۲ درصد حجمی خواص مکانیکی افزایش می‌یابد اما پس از این درصد بهینه، با افزودن درصد الیاف فولادی، به دلیل عدم پخش یکنواخت الیاف در داخل مخلوط و همچنین افزایش خلل و فرج بتن، مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به نوع الیاف فولادی و طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق، استفاده از ۲ درصد حجمی الیاف فولادی بهینه است و بیشترین ارتقا خواص مکانیکی را به همراه دارد.

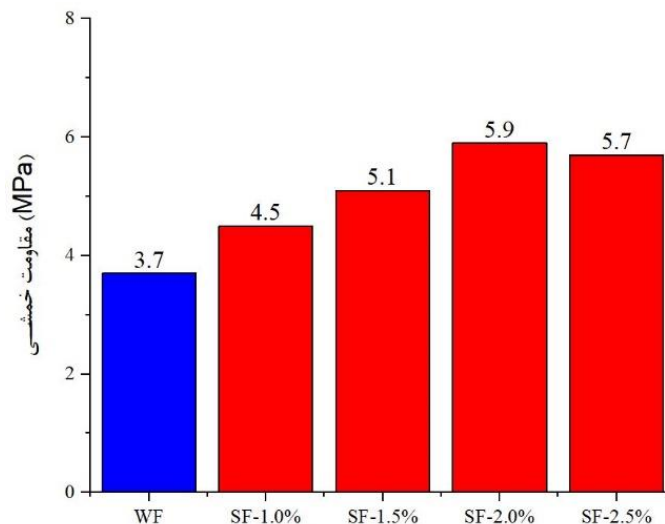
با توجه به نتایج به دست آمده از مرحله اول و یافتن درصد بهینه الیاف فولادی (۲ درصد حجمی)، به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از الیاف فولادی بهینه با الیاف پلی‌الفین جایگزین گردید و آزمایش‌های مکانیکی بر روی آن‌ها تکرار شد تا طرح اختلاط بهینه مسلح به الیاف هیبرید تعیین شود. نتایج



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶. نتایج آزمایش‌های: (الف) مقاومت فشاری، (ب) مقاومت کششی، (ج) مقاومت خمشی

Fig. 6. Test results: (a) compressive strength, (b) tensile strength, (c) flexural strength

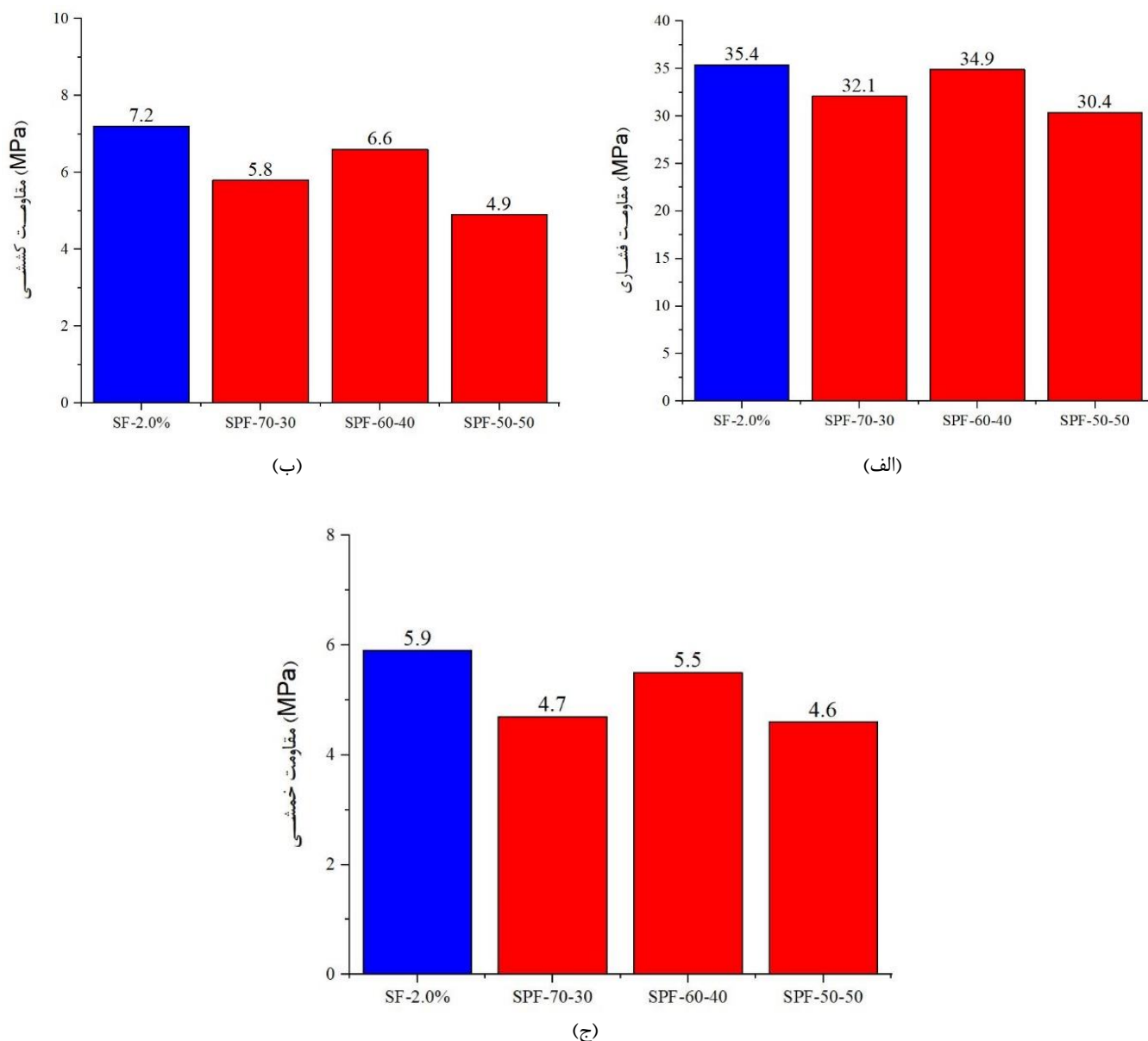
قابل بررسی را معرفی می‌نماید. این نکته باید اشاره شود که در هر یک از m ویژگی (خصوصیت) یک گزینه در بدترین وضعیت قرار دارد که برای تشکیل ماتریس معیار این خصوصیت برای آن گزینه صفر در نظر گرفته شده و مقدار عددی آن ویژگی برای سایر گزینه‌ها از قدر مطلق تفاضل بدترین وضعیت از مقدار ویژگی موجود در هر گزینه به دست می‌آید.

در مرحله بعد ماتریس استاندارد شده به صورت $n \times m$ با استفاده از روابط زیر برای حذف تاثیر واحد اندازه‌گیری هر کدام از ویژگی‌ها به دست می‌آید:

مطالعه، تحت عنوان ماتریس معیار به صورت زیر قابل توصیف هستند [۳۱].

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

بنابراین یک بردار در فضای m بعدی تشکیل می‌شود که تمام n گزینه



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های: (الف) مقاومت فشاری، (ب) مقاومت کششی، (ج) مقاومت خمشی

Fig. 7. Test results: (a) compressive strength, (b) tensile strength, (c) flexural strength

$$S_j = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (5)$$

که در آن i همان تعداد گزینه‌های موجود مورد بررسی، X_{ij} مقادیر موجود در ماتریس معیار و S_j انحراف از معیار ویژگی j ام می‌باشد. بنابراین ماتریس استاندارد شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (6)$$

جدول ۵. مقادیر معیار برای طرح‌های مختلف

Table 5. Benchmark values for different mix designs

| نام طرح | خواص مکانیکی (MPa) | | |
|-----------|--------------------|-------------|-------------|
| | مقاومت فشاری | مقاومت کششی | مقاومت خمشی |
| SF-2.0% | ۳/۱۳ | ۰/۷۶ | ۰/۲۶ |
| SPF-70-30 | ۲/۵۵ | ۰/۳۳ | ۰/۱۲ |
| SPF-60-40 | ۱/۴۴ | ۰/۲۶ | ۰/۳۸ |
| SPF-50-50 | ۰/۵۶ | ۰/۱۷ | ۱/۳۶ |

که در آن CD_i فاصله مرکب هر گزینه تا وضعیت بهینه با توجه به خصوصیات معرفی شده برای آن می‌باشد. گزینه‌ای در میان تمام n گزینه بهترین (بهینه) است که کمترین عدد فاصله مرکب را داشته باشد.

در این تحقیق ۴ نوع طرح اختلاط که عبارتند از: یک طرح حاوی ۲ درصد حجمی الیاف فولادی و سه طرح هیبرید با ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جایگزینی الیاف فولادی بهینه با الیاف پلی‌الفین در نظر گرفته شده‌اند تا با استفاده از روش DBA طرح بهینه به دست آمده صحت‌سنجی شود. برای این منظور در ابتدا ضوابط و خصوصیت‌های تعیین شده در این تحقیق برای تمامی طرح‌های اختلاط تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی به همراه هزینه مصرفی جهت تهیه انواع الیاف (فولادی و پلی‌الفین) برای یک متر مکعب بتن به عنوان ویژگی‌های طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۵ مقادیر معیار برای تمامی طرح‌ها ارائه شده است.

در مرحله بعد با استفاده از میانگین و انحراف معیار به دست آمده در مورد هر ویژگی که در روابط ۵ تا ۷ مطرح شد، مقادیر استاندارد شده به دست می‌آید. در جدول ۶ این مقادیر ارائه شده است.

در نهایت فاصله مرکب برای کلیه طرح‌های اختلاط مطابق رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. نتایج روش DBA در جدول ۷ ارائه شده است.

مطابق نتایج به دست آمده از روش مبتنی بر فاصله، به دلیل کاهش شدید هزینه مصالح با به کار بردن الیاف پلی‌الفین به جای بخشی از الیاف فولادی بهینه بودن طرح اختلاط SPF-60-40 تایید گردید. در مرحله نهایی تحقیق، با انتخاب طرح بهینه به دست آمده از مرحله اول و دوم،

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

در مرحله بعد می‌بایست فاصله بین مقادیر یک خصوصیت در تمام گزینه‌ها با بیشترین مقدار آن خصوصیت (مقدار بهینه) به دست آید. این کار منجر به تشکیل ماتریس دیگری به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} Z_{op1} - Z_{11} & Z_{op2} - Z_{12} & \dots & Z_{opm} - Z_{1m} \\ Z_{op1} - Z_{21} & Z_{op2} - Z_{22} & \dots & Z_{opm} - Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{op1} - Z_{n1} & Z_{op2} - Z_{n2} & \dots & Z_{opm} - Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن Z_{opj} ها بیشترین مقادیر عددی Z_{ij} در هر خصوصیت می‌باشند. در نهایت فاصله مرکب (Composite distance) برای هر گزینه تا وضعیت بهینه از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$CD_i = \left[\sum_{j=1}^m (Z_{opj} - Z_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

جدول ۶. مقادیر استاندارد شده برای طرح‌های مختلف

Table 6. Standardized values for different mix designs

| نام طرح | خواص مکانیکی (MPa) | | | هزینه برای یک متر مکعب بتن (تومان) |
|-----------|--------------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| | مقاومت فشاری | مقاومت کششی | مقاومت خمشی | |
| SF-2.0% | ۱/۳۶ | ۱/۸۴ | -۰/۶۱ | -۱/۷۴ |
| SPF-70-30 | ۰/۸۶ | ۰/۱۲ | -۰/۳۳ | -۰/۵ |
| SPF-60-40 | -۰/۰۸۵ | -۰/۱۶ | -۰/۰۸۲ | ۰/۷۴ |
| SPF-50-50 | -۰/۸۴ | -۰/۵۲ | ۱/۹۲ | ۰/۷۵ |

جدول ۷. نتایج روش مبتنی بر فاصله برای طرح‌های مختلف

Table 7. The results of DBA method for different mix designs

| نام طرح | SUM | CD | Rank |
|-----------|-------|------|------|
| SF-2.0% | ۱۲/۶۵ | ۳/۵۶ | ۴ |
| SPF-70-30 | ۱۰/۱۰ | ۳/۱۸ | ۲ |
| SPF-60-40 | ۹/۸۵ | ۳/۱۴ | ۱ |
| SPF-50-50 | ۱۰/۴۰ | ۳/۲۲ | ۳ |

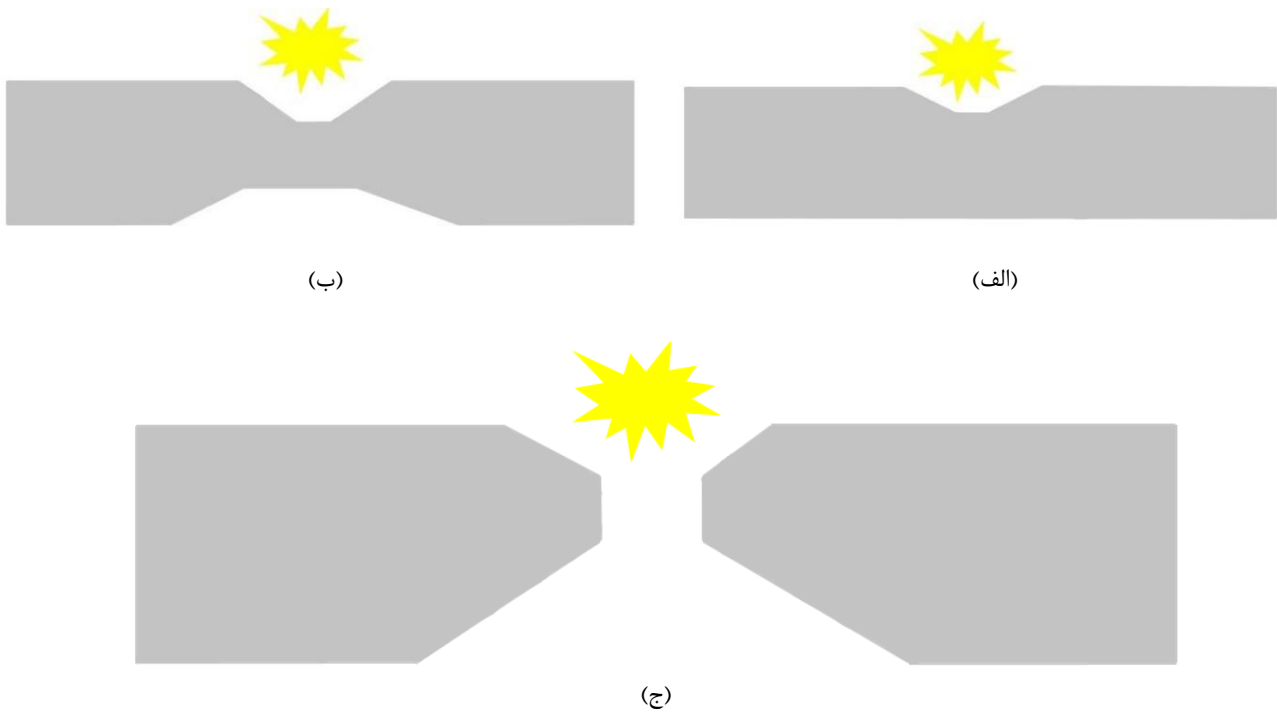
دال که ماده منفجره بر روی آن قرار دارد دچار آسیب شده در حالی که وجه زیرین سالم باقی می‌ماند. در حفره متوسط (خردشدگی) وجه بالایی و پایینی هر دو آسیب می‌بینند اما این آسیب به گونه‌ای نیست که حفره سرتاسری (کامل) در ضخامت دال ایجاد نمایند. بر این اساس مود گسیختگی دال‌های بتنی تحت اثر انفجار قابل بررسی است.

در شکل ۹ نحوه گسیختگی تمامی نمونه‌های این تحقیق و در جدول ۸ توضیحات آن (عمق و عرض حفره) ارائه شده است. ابعاد حفره (قطر و عمق حفره) ایجاد شده در دال بر اثر انفجار یکی از پارامترهایی است که می‌تواند به صورت کمی تاثیر تقویت را نشان دهد. به دلیل فروپاشی کامل نمونه غیرمسلح، درصد نسبی تخریب در شکل ۱۰ برای هریک از دال‌ها نمایش داده شده است. در حقیقت در هر نمونه درصد

عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی شده است.

۳-۴- آزمایش انفجار

مطابق آیین‌نامه TM5-855-1 [۳۲] انفجارها از نظر موقعیت نسبت به سازه به دو دسته انفجار خارجی (با فاصله از المان سازه‌ای) و انفجار داخلی (در تماس با المان سازه‌ای) تقسیم می‌شوند. به طور کلی در اثر انفجار تماسی (داخلی) ۳ نوع حفره که عبارتند از حفره کوچک، حفره متوسط و حفره کامل در دال‌های بتنی ایجاد می‌شود که انواع حفره‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است که بر اساس آن می‌توان نحوه گسیختگی دال‌های مسلح شده به الیاف و تاثیر الیاف بر روی آن‌ها را بیان کرد. در حفره کوچک (اسپال) وجهی از



شکل ۸. انواع گسیختگی دال‌ها تحت اثر انفجار تماسی: (الف) حفره کوچک، (ب) حفره متوسط، (ج) حفره کامل

Fig. 8. Different types of slab failure under blast loading: (a) small hole, (b) medium hole, (c) large hole



(ب)



(الف)

شکل ۹. نحوه گسیختگی نمونه‌های مختلف: (الف) قبل انفجار، (ب) نمونه WF، (ج) نمونه SF-2.0%، (د) نمونه SPF-60-40/P0، (ه) نمونه SPF-60-40/P10، (و) نمونه SPF-60-40/P15، (ز) نمونه SPF-60-40/P20 (ادامه دارد)

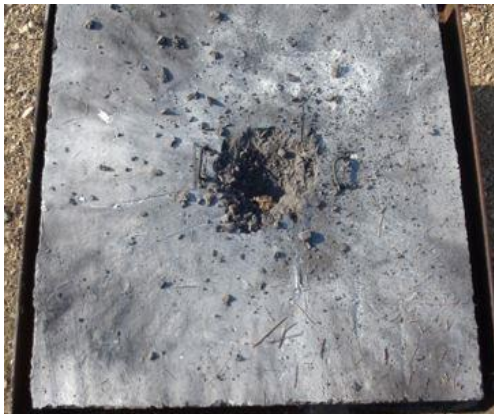
Fig. 5. Failure types for various specimens: (a) before blast test, (b) WF specimen, (c) SF-2.0% Specimen, (d) SPF-60-40/P0 Specimen, (e) SPF-60-40/P10 Specimen, (f) SPF-60-40/P15 Specimen, (g) SPF-60-40/P20 Specimen(Continue)



(ا)



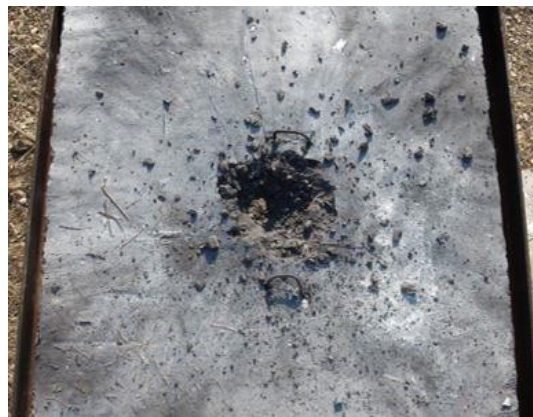
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

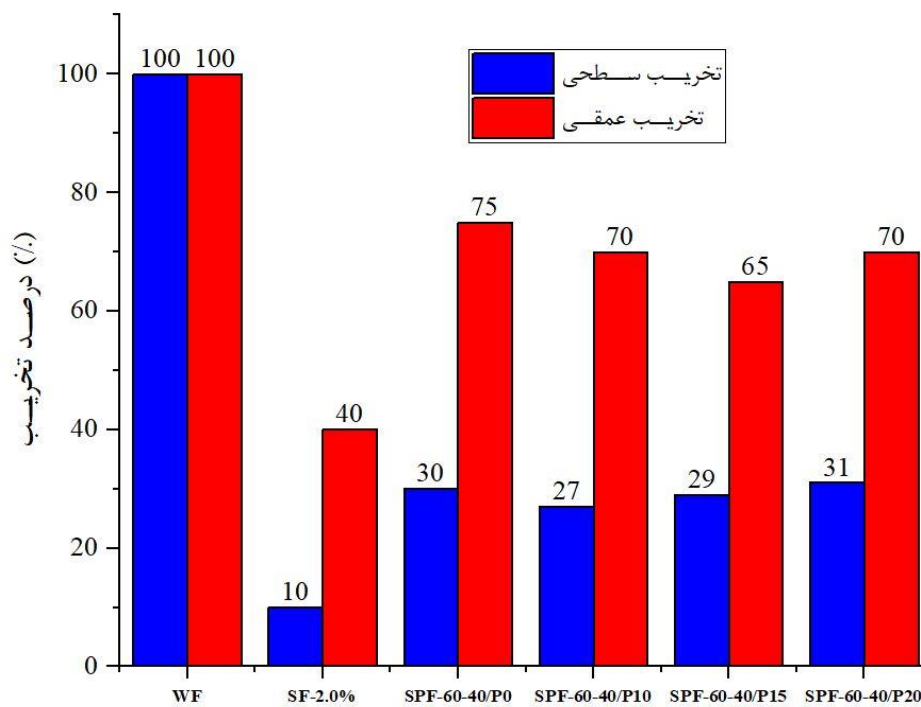
شکل ۹. نحوه گسیختگی نمونه‌های مختلف: (الف) قبل انفجار، (ب) نمونه WF، (ج) نمونه SF-2.0%، (د) نمونه SPF-60-40/P0، (ه) نمونه SPF-60-40/P10، (و) نمونه SPF-60-40/P15، (ز) نمونه SPF-60-40/P20

Fig. 5. Failure types for various specimens: (a) before blast test, (b) WF specimen, (c) SF-2.0% Specimen, (d) SPF-60-40/P0 Specimen, (e) SPF-60-40/P10 Specimen, (f) SPF-60-40/P15 Specimen, (g) SPF-60-40/P20 Specimen

جدول ۸. وضعیت گسیختگی نمونه‌های مختلف

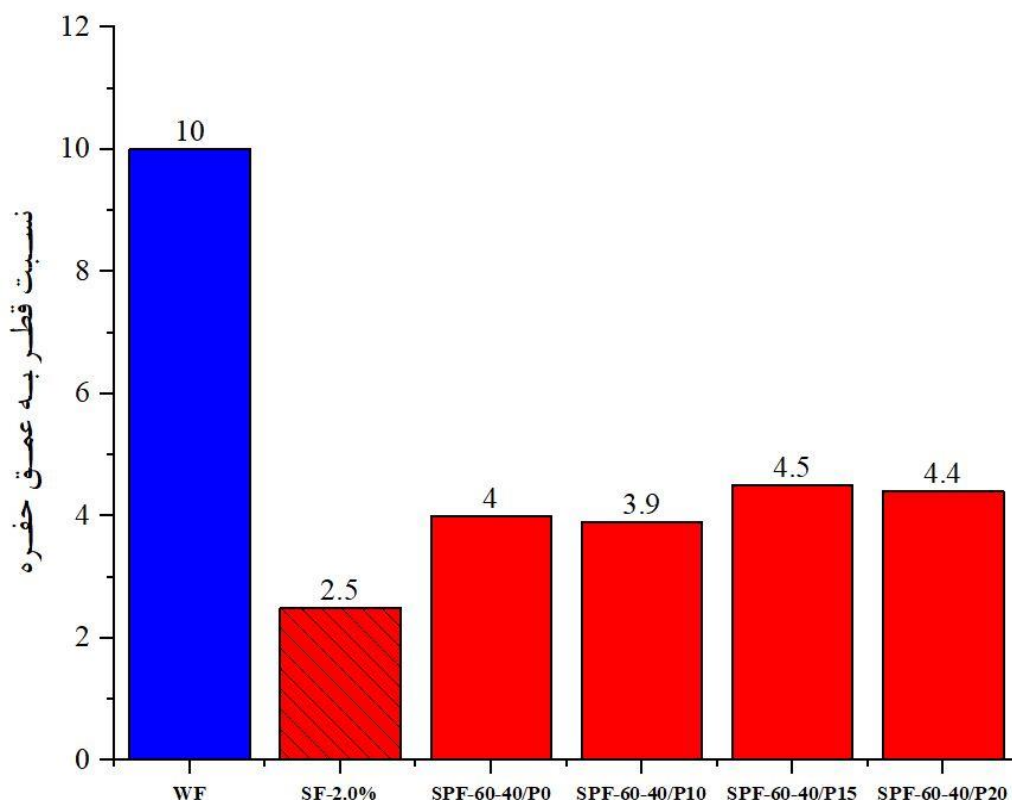
Table 8. Failure types for various specimens

| نمونه | مود گسیختگی |
|---------------|---|
| WF | به دلیل عدم وجود الیاف، دال بتنی به طور انفجاری دچار فروپاشی گردید (حفر کامل). |
| SF-2.0% | حفره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۴ سانتی‌متر بر روی وجه بالایی ایجاد گردید اما به وجه پایینی آسیبی وارد نشد (حفر کوچک). |
| SPF-60-40/P0 | حفره‌ای به قطر ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۷ سانتی‌متر بر روی وجه بالایی و حفره کوچکی به قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر در وجه پایینی ایجاد گردید (حفر متوسط) |
| SPF-60-40/P10 | حفره‌ای به قطر ۲۲ سانتی‌متر و ضخامت ۶ سانتی‌متر بر روی وجه بالایی و حفره کوچکی به قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر در وجه پایینی ایجاد گردید (حفر متوسط) |
| SPF-60-40/P15 | حفره‌ای به قطر ۲۳ سانتی‌متر و ضخامت ۶ سانتی‌متر بر روی وجه بالایی و حفره کوچکی به قطر ۶ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر در وجه پایینی ایجاد گردید (حفر متوسط) |
| SPF-60-40/P20 | حفره‌ای به قطر ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۶ سانتی‌متر بر روی وجه بالایی و حفره کوچکی به قطر ۶ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر در وجه پایینی ایجاد گردید (حفر متوسط) |



شکل ۱۰. درصد تخریب سطحی و عمقی ایجاد شده در اثر انفجار در انواع دال‌ها

Fig. 10. Percentage of surface and deep failure under blast loading



شکل ۱۱. نسبت قطر به عمق حفره ایجاد شده در اثر انفجار در انواع دال‌ها

Fig. 11. Diameter to hole depth ratio under blast loading

قطر حفره به ضخامت آن می‌باشد. این امر از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد موج انفجار چه مقدار توانایی تخریب در عرض المان را داراست. در شکل ۱۱ نسبت قطر به عمق حفره برای هر یک از انواع دال‌های این تحقیق نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۱ در نمونه غیرمسلح نسبت قطر به عمق آسیب به دلیل تخریب کامل برابر با نسبت بعد به ضخامت دال می‌باشد. با افزودن الیاف نسبت قطر به ضخامت حفره به طور قابل ملاحظه کاهش پیدا کرده است که نشان می‌دهد توانایی تخریب موج انفجار در جهت عرضی به شدت کاهش پیدا کرده است. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که با جایگزینی الیاف فولادی با پلی‌الفین تخریب عرضی کمی افزایش داشته است. علت این موضوع آن است که همانطور که در جدول‌های ۲ و ۳ اشاره شد، جرم واحد سطح و سختی الیاف فولادی به ترتیب ۹ و ۲ برابر بزرگ‌تر از الیاف پلی‌الفین

تخریب سطحی (نسبت قطر حفره به بعدی از دال که در تماس با ماده منفجره است (۱۰۰ سانتی‌متر)) و درصد تخریب عمقی (نسبت عمق حفره به ضخامت دال (۱۰ سانتی‌متر)) بیان شده است.

همانگونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ و همچنین جدول ۸ دیده می‌شود، وجود انواع الیاف به طور چشمگیری موجب استحکام دال بتنی در برابر بار انفجار شده است. با جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین و همچنین جابه‌جایی بخشی از سیمان با پوزولان پومیس اگر چه مقدار آسیب کمی بیشتر شده است (تبدیل حفر کوچک به حفر متوسط) اما همچنان دال شکل ظاهری خود را حفظ کرده و از متلاشی شدن ناگهانی جلوگیری شده است. این در حالیست که با هزینه‌ای به مراتب کمتر از نمونه SF-2.0% می‌توان به همان مقاصد در برابر بار انفجار دست یافت.

پارامتر مهم دیگر که معمولاً در بحث انفجار حائز اهمیت است نسبت

۴- ابعاد حفره (قطر و عمق حفره) ایجاد شده در دال بر اثر انفجار یکی از پارامترهایی است که می‌تواند به صورت کمی تاثیر تقویت را نشان دهد. وجود انواع الیاف به طور چشمگیری موجب استحکام دال بتنی در برابر بار انفجار شده است. جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین و همچنین جابه‌جایی بخشی از سیمان با پوزولان پومیس اگر چه منجر به افزایش جزئی آسیب شده است (تبدیل حفر کوچک به حفر متوسط) اما همچنان دال شکل ظاهری خود را حفظ کرده و الیاف از متلاشی شدن ناگهانی جلوگیری می‌کند. این در حالیست که با هزینه‌ای به مراتب کمتر از نمونه SF-2.0% می‌توان به همان مقاصد در برابر بار انفجار دست یافت.

۵- پارامتر مهم دیگر که معمولاً در بحث انفجار حائز اهمیت است نسبت قطر حفره به ضخامت آن می‌باشد. این امر از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد موج انفجار چه مقدار توانایی تخریب در عرض المان را داراست.

۶- در نمونه غیرمسلح نسبت قطر به عمق آسیب به دلیل تخریب کامل برابر با نسبت بعد به ضخامت دال می‌باشد. با افزودن الیاف نسبت قطر به ضخامت حفره به طور قابل ملاحظه کاهش پیدا کرده است که نشان می‌دهد توانایی تخریب موج انفجار در جهت عرضی به شدت کاهش پیدا کرده است. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که با جایگزینی الیاف فولادی با پلی‌الفین تخریب عرضی کمی افزایش داشته است. علت این موضوع بیشتر بودن جرم واحد سطح و سختی الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌الفین است.

۷- درصد افزایش آسیب سطحی با جایگزینی الیاف پلی‌الفین خیلی کوچک است و در مقایسه با کاهش هزینه‌ها در کل قابل صرف نظر کردن است. همچنین، جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان پومیس تاثیر چندانی در آسیب عرضی نداشته است که نشان از خاصیت سیمانی بالای پومیس دارد.

۸- در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با جایگزینی بخشی از الیاف فولادی و سیمان مصرفی به ترتیب با الیاف پلی‌الفین و پوزولان پومیس با هزینه‌ای به مراتب کمتر از طرح‌های متداول، می‌توان اقدام به ساخت دیوار پروژه انسداد مرزی کرد به گونه‌ای که این دیوار نه تنها در برابر بارهای استاتیکی از مقاومت بالایی برخوردار است بلکه در طولانی مدت دوام بسیار بالایی در برابر شرایط محیطی داشته و مقاومت خوبی در مقابل انفجار دارد.

منابع

[1] M. Morishita, H. Tanaka, M. Ito, H. Yamaguchi, Damage of reinforced concrete slabs subjected to contact

است و همین امر موجب کاهش آسیب‌های سطحی می‌گردد. البته همانگونه که اشاره شد درصد افزایش آسیب سطحی با جایگزینی الیاف پلی‌الفین خیلی کوچک است و در مقایسه با کاهش هزینه‌ها در کل قابل صرف نظر کردن است. از سوی دیگر همانطور که دیده می‌شود، جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان پومیس تاثیر چندانی در آسیب عرضی نداشته است که نشان از خاصیت سیمانی بالای پومیس دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا الیاف فولادی به مقدار ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی به طرح‌های اختلاط اضافه گردید. سپس با انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی درصد بهینه الیاف فولادی انتخاب شد. در مرحله دوم تحقیق، به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از الیاف فولادی بهینه با الیاف پلی‌الفین جایگزین گردید و آزمایش‌های مکانیکی بر روی آن‌ها تکرار شد تا طرح اختلاط بهینه مسلح به الیاف هیبرید تعیین شود. در مرحله نهایی تحقیق، با انتخاب طرح بهینه به دست آمده از مرحله اول و دوم تحقیق، عملکرد دال‌های بتنی مسلح به الیاف هیبرید و پوزولان پومیس در برابر انفجار بررسی شد.

۱- با افزایش درصد الیاف تا مقدار ۲ درصد حجمی، خواص مکانیکی افزایش می‌یابند اما پس از این درصد بهینه، با افزودن درصد الیاف فولادی، به دلیل عدم پخش یکنواخت الیاف در داخل مخلوط و همچنین افزایش خلل و فرج بتن، مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به نوع الیاف فولادی و طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق، استفاده از ۲ درصد حجمی الیاف فولادی بهینه است و بیشترین ارتقا خواص مکانیکی را به همراه دارد.

۲- در میان طرح‌های مسلح به الیاف هیبرید، طرحی که دارای ۴۰٪ جایگزینی الیاف فولادی با الیاف پلی‌الفین است، بهترین خواص مکانیکی را داراست و مقاومت‌های حاصل از این طرح، بسیار به مقادیر مقاومت طرح تک الیاف نزدیک است.

۳- مطابق آیین‌نامه TM5-855-1 انفجارها از نظر موقعیت نسبت به سازه به دو دسته انفجار خارجی (با فاصله از المان سازه‌ای) و انفجار داخلی (در تماس با المان سازه‌ای) تقسیم می‌شوند. به طور کلی در اثر انفجار تماسی (داخلی) ۳ نوع حفره که عبارتند از حفره کوچک، حفره متوسط و حفره کامل به وجود می‌آید. بر این اساس می‌توان نحوه گسیختگی دال‌های مسلح شده به الیاف و تاثیر الیاف بر روی آن‌ها را بیان کرد.

- concrete subjected to impact and blast, *Construction and building materials*, 149 (2017) 416-431.
- [11] L. Mao, S.J. Barnett, A. Tyas, J. Warren, G. Schleyer, S. Zaini, Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading, *Construction and building materials*, 93 (2015) 822-830.
- [12] M. Ohtsu, F.A. Uddin, W. Tong, K. Murakami, Dynamics of spall failure in fiber reinforced concrete due to blasting, *Construction and Building Materials*, 21(3) (2007) 511-518.
- [13] C. Pantelides, T. Garfield, W. Richins, T. Larson, J. Blakeley, Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests, *Engineering structures*, 76 (2014) 24-33.
- [14] J.-W. Nam, H.-J. Kim, S.-B. Kim, N.-H. Yi, J.-H.J. Kim, Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure, *Composite Structures*, 92(5) (2010) 1212-1222.
- [15] H. Sadraie, A. Khaloo, H. Soltani, Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading, *Engineering Structures*, 191 (2019) 62-81.
- [16] H. Soltani, A. Khaloo, H. Sadraie, Dynamic performance enhancement of RC slabs by steel fibers vs. externally bonded GFRP sheets under impact loading, *Engineering Structures*, 213 (2020) 110539.
- [17] J. Li, C. Wu, H. Hao, Y. Su, Z. Liu, Blast resistance of concrete slab reinforced with high performance fibre material, *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(2) (2016) 51-59.
- [18] X. Yu, B. Zhou, F. Hu, Y. Zhang, X. Xu, C. Fan, W. Zhang, H. Jiang, P. Liu, Experimental investigation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bar reinforced detonations, *Journal of Structural Engineering A*, 46 (2000) 1787-1797.
- [2] H. Tanaka, M. Tsuji, Effects of reinforcing on damage of reinforced concrete slabs subjected to explosive loading, *Concrete Research and Technology*, 14(1) (2003) 1-11.
- [3] M. Morishita, H. Tanaka, T. Ando, H. Hagiya, Effects of concrete strength and reinforcing clear distance on the damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations, *Concrete Research and Technology*, 15(2) (2004) 89-98.
- [4] K.K. Antoniadis, T.N. Salonikios, A.J. Kappos, Evaluation of hysteretic response and strength of repaired R/C walls strengthened with FRPs, *Engineering structures*, 29(9) (2007) 2158-2171.
- [5] M.M. Ali, D. Oehlers, M. Griffith, R. Seracino, Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints, *Engineering structures*, 30(7) (2008) 1861-1868.
- [6] S.A. Sheikh, Y. Li, Design of FRP confinement for square concrete columns, *Engineering Structures*, 29(6) (2007) 1074-1083.
- [7] V.C. Rougier, B.M. Luccioni, Numerical assessment of FRP retrofitting systems for reinforced concrete elements, *Engineering structures*, 29(8) (2007) 1664-1675.
- [8] G.-J. Ha, Y.-Y. Kim, C.-G. Cho, Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars for strengthening of concrete structures, *Engineering structures*, 30(4) (2008) 1067-1078.
- [9] C. Wu, D. Oehlers, M. Rebstrost, J. Leach, A. Whittaker, Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs, *Engineering structures*, 31(9) (2009) 2060-2069.
- [10] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced

- [25] A. C150, Standard specification for Portland Cement, in, American Standards for Testing and Materials, 2012.
- [26] A. C33, Standard specification for concrete aggregates, in, American Standards for Testing and Materials, 2003.
- [27] B. 1881, Testing Concrete. Methods for analysis of hardened concrete, in, British Standards, 2015.
- [28] A. C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, American Standards for Testing and Materials, 2017.
- [29] A. C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), in, American Standards for Testing and Materials, 2021.
- [30] H.J. Reimer D., Explosive and Demolitions, Department of the Army, Headquarters 1998.
- [31] F. Moodi, A. Kashi, A.A. Ramezani pour, M. Pourebrahimi, Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes, *Construction and Building Materials*, 191 (2018) 145-154.
- [32] U.A.E.W.E. Station, TM5-855-1 Fundamentals of protective design for conventional weapons, US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC, (1986).
- concrete slabs under contact explosions, *International Journal of Impact Engineering*, 144 (2020) 103632.
- [19] X. Zhou, V. Kuznetsov, H. Hao, J. Waschl, Numerical prediction of concrete slab response to blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 35(10) (2008) 1186-1200.
- [20] Z.S. Tabatabaei, J.S. Volz, J. Baird, B.P. Gliha, D.I. Keener, Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading, *International journal of impact engineering*, 57 (2013) 70-80.
- [21] H. Aoude, F.P. Dagenais, R.P. Burrell, M. Saatcioglu, Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 80 (2015) 185-202.
- [22] B. Luccioni, F. Isla, R. Codina, D. Ambrosini, R. Zerbino, G. Giaccio, M.C. Torrijos, Experimental and numerical analysis of blast response of High Strength Fiber Reinforced Concrete slabs, *Engineering structures*, 175 (2018) 113-122.
- [23] P.W. Cooper, *Explosives engineering*, John Wiley & Sons, 2018.
- [24] K. shuppan, *Energy Material Handbook Explosives Society*, Tokyo: Japan 1993.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Taghavi Parsa, M. Tabatabaeian, Behavior of pumice hybrid-fiber reinforced concrete slabs under blast loading, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) (2022) 2081-2100.

DOI: [10.22060/ceej.2021.20164.7356](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.20164.7356)

