

Evaluation of retrofit Methods for Concrete Slabs Against Blast Loads to Avoid Brittle damage

Seyed Ahmad Hosseini^{1*} , Alireza Gandomkar Jooshghani², Taraneh Amin Taheri³

1. Assistant Professor, Passive Defense Complex, Malek Ashtar University of Technology.

2. Master's Students, Passive Defense Complex, Malek Ashtar University of Technology.

Abstract

Concrete slabs subjected to near-field explosion loading often fail in a brittle manner. Common failure types include spalling and scabbing. Brittle failure leads to an inflexible and brittle structural response, producing small and large fragments that can be extremely dangerous due to their high velocities. Therefore, designing concrete slabs for explosive loading requires methods that either prevent or mitigate brittle failures or transform them into ductile failures. This study validates numerical models using LS-DYNA finite element software and compares them with reputable research. Simulations of concrete slabs were conducted using conventional methods, reinforced concrete slabs with steel plates, reinforced concrete slabs with wire mesh, and ultra-high-performance concrete (UHPC) slabs. The analysis of five slab types under similar explosion loading reveals that UHPC slabs exhibit less deflection and damage compared to other types, while conventional concrete slabs experience greater deflection and damage. The optimal reduction in damage for reinforced concrete slabs occurs when a steel plate measuring 2 by 4.2 meters and 0.5 centimeters thick is applied to the backside. Additionally, using wire mesh dimensions 25% larger than the initial slab damage yields the best performance. A comparative analysis of explosion-induced damage across different slab types indicates that reinforced concrete slabs with a 0.5-centimeter thick steel plate exhibit the largest damage area (8m²); whereas UHPC slabs show no damage, resulting in the smallest damage area. Further investigations into the dynamic response of these slabs demonstrate that advanced materials and reinforcement techniques significantly enhance their resilience against explosive forces. This study emphasizes the importance of innovative design strategies in civil engineering, highlighting that the adoption of UHPC slab minimizes structural damage and improves safety in high-risk environments. These findings underscore the necessity of incorporating modern materials and methodologies in protective structure design, ensuring better performance and longevity under extreme loading conditions. A comparative analysis of various methods for strengthening concrete slabs using identical materials shows that UHPC slabs outperform others in reducing deflection and failure. This illustrates their exceptional ability to withstand explosive dynamic loads. However, the primary limitation of UHPC slabs is their high cost and complexity of implementation. Reinforcement with steel sheets has proven more effective than wire mesh in minimizing deflection. In models reinforced with 0.5 cm steel sheets, deflection was reduced by 50% compared to conventional concrete slabs. The slabs reinforced with wire mesh demonstrated a significant decrease in failure rates compared to conventional slabs, with reductions ranging from 75% to 80% across various reinforcement methods using the same materials. Conversely, some models reinforced with steel sheets exhibited increased failure rates. The findings indicate that, in most cases, slabs with greater flexibility, such as those reinforced with wire mesh, sustained less damage. This can be attributed to the enhanced flexibility and ductility of wire mesh-reinforced slabs compared to those reinforced with steel sheets.

Review History

Received: Oct 26, 2024

Revised: Jan 1, 2025

Accepted: Mar 11, 2025

Keywords

concrete slab
brittle failure
near field explosion
LS- DYNA

* Corresponding Author Email: hoseini@mut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-9268-9295



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارزیابی روش‌های مقاوم‌سازی دال بتنی در برابر بار انفجار برای اجتناب از شکست ترد

سید احمد حسینی^{۱*} , علیرضا گندمکار جوشقانی^۲، ترانه امین طاهری^۲

۱. استادیار، مجتمع پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲. کارشناسی ارشد، مجتمع پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

دال‌های بتنی که تحت تأثیر انفجارهای حوزه نزدیک قرار می‌گیرند، معمولاً متحمل شکست ترد می‌شوند. ازجمله خرابی‌های ترد رایج می‌توان به شکست‌هایی مانند scabbing و spalling اشاره کرد. شکست ترد علاوه بر اینکه موجب پاسخ غیرقابل انعطاف و شکننده سازه و سبب آسیب‌های بیشتر به سازه می‌شود، می‌تواند تولید ترک‌های کوچک و بزرگ و با سرعت‌های بالا کند؛ بنابراین برای طراحی دال بتنی تحت بار انفجار، استفاده از روش‌هایی که منجر به جلوگیری یا کاهش شکست‌های ترد و یا تبدیل آن‌ها به شکست‌های انعطاف‌پذیر می‌شوند، ضروری است. پس در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA و پس از اطمینان از درستی مدل‌های عددی با مقایسه با تحقیقات معتبر، به مقاوم‌سازی دال‌های بتنی متعارف با استفاده از میلگردگذاری Lacing، تعبیه ورق فولادی، استفاده از شبکه سیمی فولادی و به کارگیری دال بتنی فوق توانمند پرداخته شده است. طبق تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به رفتار ۵ نوع دال تحت بارگذاری انفجاری مشابه، دال‌های بتن فوق توانمند نسبت به سایر دال‌های بتنی خیز و خرابی کمتری داشته و دال‌های بتنی متعارف در مقایسه با سایر دال‌های بتنی متحمل خیز و خرابی بیشتری می‌شوند. بهترین ابعاد در کاهش خرابی دال‌های بتن مسلح تقویت‌شده با ورق فولادی و شبکه سیمی، زمانی است که سطح ورق فولادی و شبکه سیمی از ابعاد سطح خرابی دال مسلح اولیه بزرگ‌تر باشد. وجود شبکه سیمی فولادی باعث کاهش محسوس خرابی دال نسبت به دال متعارف شد. این کاهش خرابی بین ۷۸٪ الی ۸۹٪ مشاهده شد. میزان اثرگذاری شبکه سیمی فولادی در کاهش خرابی، زمانی قابل ملاحظه‌تر بود که ابعاد شبکه بزرگ‌تر از ابعاد خرابی دال متعارف باشد. در این حالت، میزان کاهش خرابی بین ۸۲٪ الی ۸۹٪ به دست آمد. وجود ورق فولادی با ابعادی بزرگ‌تر از ابعاد خرابی اولیه و در وجه پشتی دال، می‌تواند باعث کاهش محسوس خرابی دال نسبت به دال متعارف، بین ۵۸٪ الی ۸۳٪ شود.

کلمات کلیدی

دال بتنی
شکست ترد
انفجار حوزه نزدیک
LS_DYNA

۱- مقدمه

خرابی‌ها مانند spalling و scabbing ممکن است رخ دهد. این خرابی‌ها می‌توانند برای کارکنان و تجهیزات خطرناک باشند، بنابراین بررسی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی در برابر بارهای انفجاری ضروری است. در سال ۲۰۲۲ رفتار دال‌های بتنی با عملکرد خیلی بالا مبتنی بر ژئوپلیمر در برابر انفجارهای تماسی

با پیشرفت تسلیحات و تنوع حملات تروریستی، خطرات ناشی از این حملات افزایش یافته است؛ بنابراین، طراحی سازه‌ها باید ایمنی لازم را در برابر بارهای انفجاری فراهم کند. سازه‌های بتنی ممکن است رفتارهای ترد یا شکل‌پذیری نشان دهند و انواع

* رایانامه نویسنده مسئول: hoseini@mut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-9268-9295

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



وقوع پیوند. مود رفتاری شکل‌پذیر و مود رفتاری ترد. در مودهای رفتاری شکل‌پذیر یک المان ممکن است تغییر شکل‌های غیرارتجاعی بزرگ را بدون آنکه به طور کامل فروپاشد، تجربه کند. درحالی‌که در مودهای رفتاری ترد، زوال جزئی یا فروپاشی کامل آن المان رخ می‌دهد [16].

۲-۱-۱-۲ مود رفتاری شکل‌پذیر در محدوده نزدیک به انفجار

انفجار در فواصل نزدیک، بار انفجاری شدید و یکنواختی ایجاد می‌کند که می‌تواند منجر به نابودی موضعی شود. برای حفظ یکپارچگی سازه و فراهم کردن تغییر شکل‌های لازم، استفاده از میلگردهای lacing توصیه می‌شود [17].

۲-۱-۲ مود رفتاری ترد

رفتار ترد بتن به شکست ناگهانی و بدون هشدار قبلی اشاره دارد که معمولاً در اثر تنش‌های بالا رخ می‌دهد. بتن، به دلیل مقاومت کششی پایین، تمایل به نشان دادن چنین رفتاری دارد. این مسئله به‌ویژه در بتن‌های با مقاومت بالا (بیش از ۵۰ مگاپاسکال) مشاهده می‌شود. رفتار ترد بتن مسلح در برابر انفجار در حوزه نزدیک به سه نوع scabbing, spalling و خردشدگی پس از گسیختگی تقسیم می‌شود [17].

۳- تعریف مساله و شبیه‌سازی

در این تحقیق، عوامل مختلفی که می‌تواند بر میزان خرابی و شکست دال‌های بتنی مؤثر باشد، به صورت عددی شبیه‌سازی شده و در ادامه نتایج آن به صورت تصاویر و یا نمودار نشان داده شده است. پارامترهایی که در شبیه‌سازی‌های انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است، در جدول (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که این تحقیق به بررسی خرابی‌های دال‌های بتنی تحت انفجار حوزه نزدیک می‌پردازد، $z = 0.595 \frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$ به عنوان فاصله مقیاس شده برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. طراحی اولیه‌ای برای دال بتنی متعارف و دال بتنی lacing بر اساس آیین‌نامه UFC-3-340-02 انجام شده است. مشخصات دال بتنی که در تمام شبیه‌سازی‌ها ثابت است، در جدول (۱) آمده است.

مورد بررسی قرار گرفت [1]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۲۴، توسط ژو و همکاران به منظور بررسی فرایند آسیب دال‌های پل کامپوزیتی فولاد - بتن ناشی از انفجار تماسی انجام گرفت، سه نمونه از این دال‌ها در مقیاس کوچک تحت آزمایش‌های انفجاری قرار گرفتند. در این تحقیق، تأثیر متفاوت اتصال دهنده‌های برشی و ضخامت ورق فولادی مورد ارزیابی قرار گرفت [2]. ارزیابی اثر ورقه‌های الیافی تقویتی بر عملکرد انفجاری دال‌های بتنی توسط تران و همکاران به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، پاسخ ضربه‌ای تیرهای پیش‌ساخته ساخته شده از بتن ژئوپلیمری با تسمه‌های FRP و میلگرد ارزیابی شدند [3]. در تحقیقات تجربی و مدل‌سازی عددی با مقیاس مزر که در مورد ویژگی‌های آسیب دال‌های بتنی تقویت شده با الیاف فولادی و دال‌های بتنی تقویت شده با الیاف فولادی مخلوط با خاکستر و خاکستر بادی در برابر انفجار تماسی انجام شد نتایج نشان داد که مدل‌سازی عددی با مقیاس مزر می‌تواند به طور مؤثر آسیب سازه‌ای و رفتار شکست را تحت بارهای فوق دینامیک انفجاری شبیه‌سازی نماید [4]. در آزمایش سه دال کامپوزیتی فولاد - بتن در مقیاس کوچک تحت انفجار تماسی، دوفاز پاسخ دینامیکی، شامل فاز ترکیبی و فاز جداشده، مشاهده و تجزیه و تحلیل شد [5]. همچنین تحقیقات دیگری نیز در زمینه دیوار تحت انفجار نزدیک [6]، رفتار تیرها و ستون‌های بتنی مسلح تحت بارگذاری انفجاری [7_10]، بررسی‌های تجربی و عددی در حوزه انفجار حوزه نزدیک (شکل خرج انفجاری [11]، پانل بتن مسلح معمولی تقویت شده [12]، پانل‌های کامپوزیت سیمانی با فیبر هیبریدی [13] دال بتنی دابل فولادی C شکل با اتصالات L شکل [14] و ستون‌های RC [15]) انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود راجع به روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، تحقیقات متنوعی صورت گرفته است که در این تحقیق به مقایسه هر کدام و مزیت هر کدام از این روش‌ها می‌پردازیم.

۲- مبانی علمی تحقیق

۲-۱-۲ مودهای رفتار سازه‌ای بتن

پاسخ اجزای سازه‌ای می‌تواند در دو مود رفتاری سازه‌ای به

جدول ۱. مشخصات دال و ماده منفجره

Table 1: Specifications of slab and explosive material

length	width	Support conditions	Z	The weight of the explosive	The distance of the explosive material to the surface of the slab
6m	4m	4 sides	1.5	304kg	4m

جدول ۲: مقایسه خرابی مدل تجربی و مدل عددی پیشنهادی

Table 2: Compare of experimental and proposed numerical model damage

	Simulation failure	Laboratory failure
upper face	20	22
lower face	35	33



شکل ۱. مقایسه خرابی وجه تحتانی در مدل تجربی [۱۸] و مدل عددی

پیشنهادی

Fig. 1. Comparison of the failure of lower face in the experimental model [18] and the proposed numerical model

۱-۳- شبیه‌سازی در نرم افزار

در این تحقیق از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی انفجار استفاده شده است. روش CONWEP به دلیل دقت و سهولت، برای بارگذاری انفجاری انتخاب شده است. مدل‌سازی بتن و ورقه فولادی با حالت solid و میلگردها با گزینه beam انجام شده است. مدل‌های با تقارن دو راستا به صورت یک‌چهارم مدل شده و شرایط تقارن بر آن‌ها اعمال شده است. برای شبیه‌سازی انفجار، از روش CONWEP و گزینه Load_Blast_Enhanced استفاده شده است. مدل CSCM_Concrete برای بتن معمولی با مقاومت ۲۷٫۶ مگاپاسکال و مدل الاستیک - پلاستیک - هیدرو برای بتن فوق توانمند با مقاومت ۱۷۵ مگاپاسکال به کار رفته‌اند. این مدل‌ها به دلیل در نظر گرفتن خرابی مصالح و فرسایش اجزا، گزینه‌های مناسبی برای مدل‌سازی بتن هستند.

۲-۳- درستی آزمایشی مدل‌های عددی

به منظور ارزیابی درستی شبیه‌سازی پیشنهادی دال بتنی با انواع روش‌های تقویتی در برابر بار انفجار، سه نمونه از این روش‌ها، استفاده از ورق فولادی در وجه خارجی دال، شبکه سیمی فولادی در هسته بتن و استفاده از بتن فوق توانمند، مورد بررسی و

درستی‌آزمایی قرار گرفته است.

۳-۲-۱- درستی آزمایشی دال بتنی مسلح تقویت شده با ورقه

فولادی

کاستدو و همکاران در مطالعه‌ای ۸ نوع دال بتنی را به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در برابر بار انفجار بررسی کردند. نمونه S6 با ابعاد $4.4 \times 1.46 \times 0.15$ متر به عنوان نمونه مرجع انتخاب شد. میلگردها دارای قطر ۱۲ میلی‌متر و فاصله‌گذاری ۱۵۰ میلی‌متر هستند. یک ورقه فولادی $1.5 \times 1.46 \times 0.01$ متر در مرکز دال قرار دارد و با رزین اپوکسی متصل شده است. ۱۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۰٫۵ متری از سطح دال قرار گرفته است [18]. در شکل (۱)، شبیه‌سازی با مدل CSCM و روش کانوپ انجام شده و مش‌بندی بتن و ورق‌های فولادی با المان‌های مناسب صورت گرفته است. مقایسه نتایج نشان می‌دهند که روش شبیه‌سازی پیشنهادی با دقت قابل قبولی خرابی را مدل‌سازی کرده است.

۳-۲-۲- درستی آزمایشی دال بتن مسلح تقویت شده با شبکه

سیمی فولادی

جان لی و همکاران تأثیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ لایه شبکه سیمی فولادی را در بتن مسلح برای مقاومت در برابر بار انفجار به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. دال بتنی با ابعاد $0.8 \times 0.12 \times 0.1$ متر و میلگردهای طولی ۱۲ میلی‌متری و خاموت‌های ۱۰ میلی‌متری استفاده شده است. دال دارای ۲۰ میلی‌متر پوشش و مقاومت فشاری ۸۵ مگاپاسکال است. شبکه‌ی سیمی فولادی در ناحیه‌ای به طول ۰٫۶ متر و عرض ۰٫۵ متر در وسط دال قرار دارد [19].

نمونه دال تحت انفجار ۱ کیلوگرم TNT قرار گرفت. فاصله خطوط شبکه سیمی 6.35×6.35 میلی‌متر و قطر سیم ۱ میلی‌متر است. دال بتنی با ۱۰ لایه شبکه سیمی فولادی برای درستی‌آزمایی شبیه‌سازی شد. نتایج خرابی وجه رو و پشت دال به ترتیب در شکل‌های (۲ و ۳) آمده است. این نتایج نشان‌دهنده هماهنگی خوب مدل درستی‌آزمایی با مدل مقاله [19] می‌باشد.

۳-۲-۳- درستی آزمایشی مدل دال بتن فوق توانمند

جان لی و همکاران در تحقیقی به مطالعه آزمایشگاهی و عددی دال بتنی متعارف و دال بتنی فوق توانمند تحت بار انفجار تماسی پرداختند. ابعاد دال بتنی فوق توانمند این تحقیق، $100 \times 100 \times 2000$ میلی متر است و از هیچ گونه میلگردی برای تقویتی استفاده نشده است. ۱ کیلوگرم ماده منفجره روی سطح دال قرار گرفته است، برای شبیه سازی بتن UHPC از مدل Elastic-Plastic-Hydro استفاده شده است [20].

خرابی وجه فوقانی و تحتانی دال بتنی فوق توانمند تحت بار انفجار در شکل (۵) قابل مشاهده است. همانطور که از شکل (۲) مشخص است نتایج شبیه سازی عددی پیشنهادی با نتایج آزمایش و مدل عددی مقاله هماهنگی قابل قبولی دارد.

۳-۳- شبیه سازی دال های بتنی با استفاده از روش های مختلف مسلح سازی

۳-۳-۱- معرفی انواع روش ها برای افزایش مقاومت دال های بتنی در برابر انفجار

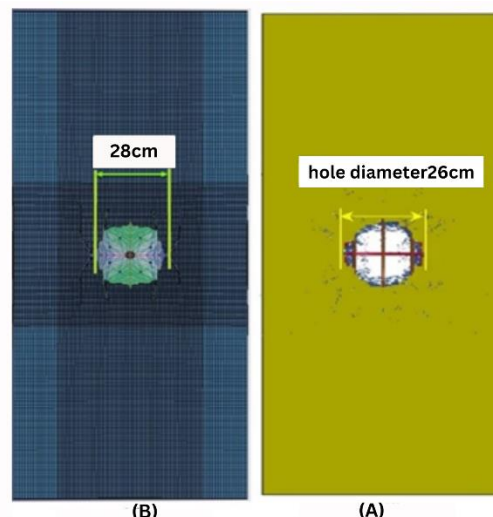
در این بخش به شبیه سازی دال های بتنی مسلح متعارف تقویت شده با شبکه سیمی و ورق فولادی، دال بتنی مسلح با میلگردگذاری Lacing و دال بتنی فوق توانمند در برابر انفجار پرداخته می شود. ابعاد همه این دال ها یکسان و برابر ۴ در ۶ متر و به صورت چهار طرف گیردار در نظر گرفته شدند و تحت انفجار هوایی با ۳۰۰ کیلوگرم TNT و فاصله ۴ متری قرار گرفتند.

۳-۲-۲- دال بتن مسلح متعارف

طراحی دال بتن مسلح متعارف تحت بارگذاری و شرایط مرزی بیان شده با استفاده از دستورالعمل UFC 3-340-02 انجام شد. پس از طراحی دال و تعیین مشخصات دال مینا، در ادامه تاثیر ورق فولادی و شبکه سیمی در افزایش مقاومت دال مینا مورد بررسی قرار می گیرد.

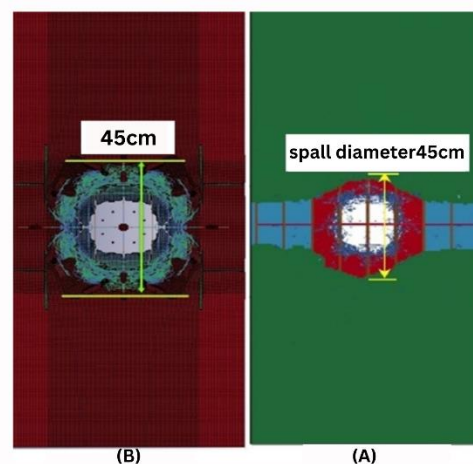
۳-۲-۳-۱- دال بتنی مسلح متعارف تقویت شده با ورق فولادی

به منظور بررسی اثر ابعاد ورق فولادی، ورق با طول $3/3$ متر و عرض $1/6$ متر که به طور تقریبی خرابی دال بتنی مسلح متعارف را پوشش می داد، مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر ورق های بزرگتر و کوچکتر از ورق مینا نیز بررسی شد.



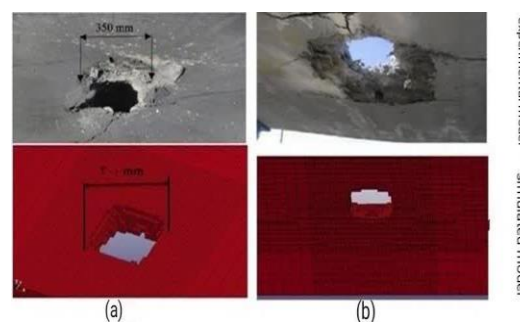
شکل ۳. خرابی وجه فوقانی نمونه. (الف): شبیه سازی مقاله [۱۹]، (ب): مدل پیشنهادی این تحقیق

Fig. 3. Failure of the upper surface of the specimen. (a): Simulation from reference [19], (b): Proposed model of this study.



شکل ۴. خرابی وجه تحتانی نمونه. (الف): شبیه سازی مقاله، (ب): مدل پیشنهادی این تحقیق

Fig. 4. Failure of the bottom surface of the specimen. (a): Simulation from reference [19], (b): Proposed model of this research.



شکل ۵. مقایسه خرابی دال بتنی UHPC در مدل تجربی [20] و شبیه سازی عددی پیشنهادی در (الف) وجه فوقانی (ب) وجه تحتانی

Fig. 5. Comparison of failure of UHPC concrete slab in experimental model [20] and proposed numerical simulation in (a) upper face (b) lower face.

جدول ۳. مشخصات دال بتن مسلح متعارف

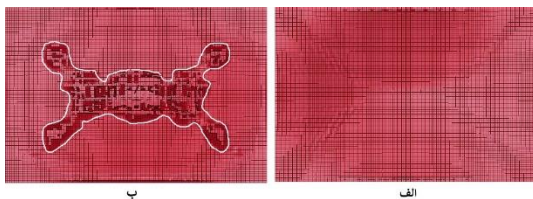
Table 3. Specifications conventional reinforced concrete slab

Shear bar	Transverse bending bar	Longitudinal bending bar	f_u	f_y	f'_c	slab thickness	concrete cover
$\Phi 13$	$\Phi 13@310\text{mm}$	$\Phi 13@101\text{mm}$	620 mpa	455 mpa	27.6 mpa	230 mm	38 mm

جدول ۴. مشخصات دال بتن مسلح Lacing

Table 4. Specifications of lacing reinforced concrete slab

Transverse bending bar	Longitudinal bending bar	f_u	f_y	f'_c	slab thickness	concrete cover
$\Phi 3@102\text{mm}$	$\Phi 3@303\text{mm}$	650 mpa	455 mpa	27.6 mpa	381 mm	38 mm



شکل ۶. وضعیت (الف) وجه فوقانی و

(ب) وجه تحتانی دال متعارف پس از انفجار

Fig. 6. The state of (a) the upper face and (b) the lower face of the ordinary slab after the explosion

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- چگونگی خرابی ایجاد شده در دال بتنی مسلح متعارف تقویت شده با ورق فولادی و شبکه سیمی فولادی

۴-۱-۱- چگونگی خرابی ایجاد شده در دال بتنی مسلح متعارف

در طراحی دال بتن مسلح متعارف طبق دستورالعمل UFC، محل تلاقی خطوط تسلیم مورب و افقی دهانه دال، به فاصله ۱۷۸ سانتی متر، از لبه مجاور می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی طبق روش پیشنهادی در بخش قبل با نرم‌افزار LS-DYNA این مقدار برابر با ۱۸۵ سانتی متر بوده است که هماهنگی خوبی بین نتایج طراحی به روش دستورالعمل UFC و نتایج شبیه‌سازی کانتور تغییر شکل و خرابی دال بتنی متعارف (در وجوه فوقانی و تحتانی) نشان داده شده است. وضعیت دال متعارف پس از اعمال بار انفجار در شکل (۳) نمایش داده شده است. طبق شکل (۶)، ابعاد خرابی برای استفاده در روش‌های مختلف تقویتی برابر $۱,۶ \times ۳,۳$ متر لحاظ می‌شود.

۴-۱-۲- چگونگی خرابی در دال بتن مسلح متعارف تقویت شده با ورق فولادی

تأثیر ابعاد (کوچک‌تر، مساوی و بزرگ‌تر از سطح خرابی دال)،

علاوه بر تأثیر ابعاد، اثر وجه دال بتنی برای نصب ورق فولادی و همچنین اثر ضخامت ورق مطالعه شد.

۳-۲-۲- دال بتنی مسلح متعارف تقویت شده با شبکه سیمی فولادی

برای بررسی تأثیر شبکه سیمی فولادی در کاهش خرابی دال بتنی ۳ پارامتر تعداد لایه‌های شبکه سیمی، ابعاد شبکه سیمی فولادی و همچنین قطر الیاف شبکه‌های سیمی فولادی به‌عنوان متغیر انتخاب شد. فاصله بین خطوط شبکه سیمی ۱۵ در ۱۵ میلی‌متر انتخاب شد. ابعادی که برای شبیه‌سازی شبکه سیمی تعیین شد با ابعاد انتخاب شده برای ورقه‌های فولادی یکسان بود. همچنین شبکه سیمی در تعداد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لایه مورد بررسی قرار گرفت تا میزان تأثیر تعداد لایه‌ها نیز مشخص شود. آخرین متغیر نیز قطر شبکه سیمی بود که سه حالت ۰،۵، ۱ و ۱،۵ میلی‌متر برای سیم‌ها در نظر گرفته شد.

۳-۳-۳- دال بتن مسلح Lacing

دال بتن مسلح Lacing نیز مشابه دال بتن مسلح متعارف تحت انفجار مبنا و با ابعاد و شرایط مرزی ثابت قرار گرفت. نتایج طراحی دال مذکور با استفاده از دستورالعمل UFC 3-340-02، در جدول (۴) ارائه شده است.

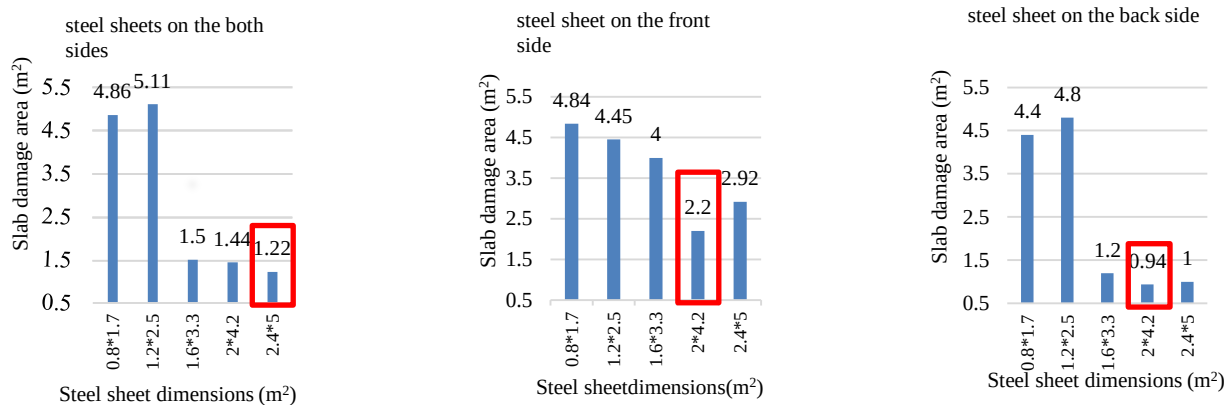
۳-۳-۴- دال بتن فوق توانمند

در شبیه‌سازی دال بتنی فوق توانمند، ضخامت دال به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. ضخامت ۲۳ سانتی‌متر که برابر با ضخامت دال متعارف است انتخاب شد؛ دیگر ضخامت‌ها با ۲۵ و ۵۰ درصد کاهش و ۲۵ درصد افزایش نسبت به ضخامت مبنا تعیین شد. مشخصات بتن فوق توانمند، از مرجع [20] انتخاب شده است.

ابعاد اولیه خرابی دال مبنا بدست آید و سپس ورق فولادی با ابعاد بزرگتر از ابعاد اولیه خرابی برای افزایش مقاومت و کاهش خرابی استفاده شود. در شکل (۸)، تاثیر محل تعبیه ورق فولادی (با ابعاد بهینه ۲ در ۴٫۲ متر) در کاهش میزان خرابی نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است استفاده از ورق فولادی در وجه پشتی میزان خرابی ها را به شدت نسبت به ورق جلویی کاهش داده است؛ به نحوی که، در ورق فولادی با ضخامت ۰٫۵ سانت، میزان خرابی در حالت تعبیه ورق در وجه جلویی و پشتی، به ترتیب برابر ۸ و ۰٫۹۲ متر مربع بوده است که حدود ۸ برابر اختلاف دارند.

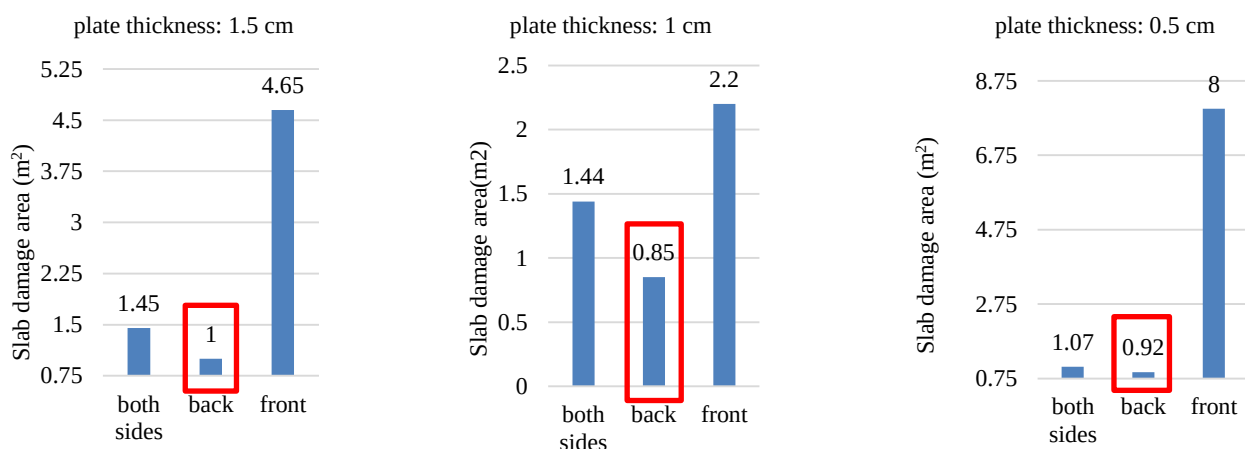
تاثیر ضخامت ورق فولادی در کاهش خرابی دال بتن مسلح متعارف، در شکل (۹) ارائه شده است (تعبیه در وجه پشتی و با ابعاد ورق بهینه ۲ در ۴٫۲).

ضخامت (۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ سانتی متر) و محل قرارگیری ورق فولادی (وجه فوقانی، تحتانی و هر دو وجه دال) در کاهش میزان خرابی دال بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۷)، تاثیر ابعاد ورق فولادی در افزایش مقاومت و کاهش خرابی دال بتن مسلح متعارف، در ضخامت ثابت ورق ۱ سانتی متر، نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است، با افزایش اندازه ورق فولادی میزان خرابی ها کاهش می یابد، منتهی بهترین نتیجه برای ورق با ابعاد ۲ در ۴٫۲ متر تعبیه شده در وجه پشت دال بدست آمده است. با مقایسه ابعاد ورق تقویتی با ابعاد خرابی دال مشخص می شود استفاده از ورق های تقویتی کوچکتر از ابعاد محل خرابی، نه تنها منجر به کاهش خرابی نمی شود بلکه خرابی را افزایش هم خواهد داد. پس به عنوان یک نتیجه کاربردی برای کاهش خرابی دال بتن مسلح متعارف با استفاده از ورق فولادی، ابتدا لازم است



شکل ۷. میزان تاثیر ابعاد ورق فولادی (با ضخامت ۱ سانتی متر) در کاهش خرابی دال های بتن مسلح متعارف

Fig. 7. The effectiveness of steel sheets (with a thickness of 1 cm) in reducing the damage of conventional reinforced concrete slabs



شکل ۸. میزان خرابی دال های بتن مسلح با ورقه فولادی با متغیر گرفتن وجه انتخابی در نصب ورق فولادی

Fig. 8. Damage levels of reinforced concrete slabs with steel plates by varying the selected face in the installation of the steel plate.

حالت، میزان کاهش خرابی بین ۸۲٪ الی ۸۹٪ می‌باشد. شبکه سیمی فولادی در بدترین حالت، میزان خرابی را حدود ۸۰٪ کاهش می‌دهد؛ دلیل این امر، این است که شبکه سیمی فولادی، دال را در هر دو جهت صفحات خمشی اصلی و فرعی تقویت می‌کند و مقاومت برشی دال را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [21]. همان‌طور که از شکل (۱۰ و ۱۱) مشخص شده است با افزایش قطر سیم شبکه سیمی و همچنین افزایش تعداد لایه‌های شبکه سیمی، میزان خرابی‌ها کاهش می‌یابد.

۴-۲- چگونگی خرابی در دال lacing

استفاده از هر ۴ نوع میلگرد گذاری lacing در دال باعث کاهش خرابی‌ها نسبت به دال متعارف می‌شود (حدود ۳۰٪ کاهش خرابی). خطوط تسلیم در دال‌های lacing نیز قابل مشاهده هستند و خرابی‌های رخ داده پیرامون این خطوط تسلیم است.

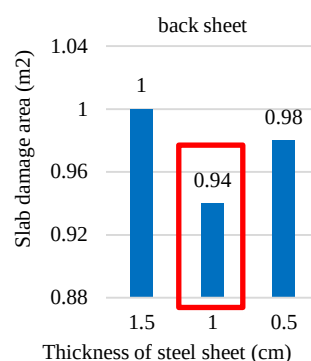
۴-۳- چگونگی خرابی در دال بتنی فوق توانمند

طبق تحلیل‌های انجام شده دال‌های بتن فوق توانمند در ضخامت‌های مختلف، پاسخ بسیار مناسبی در برابر انفجار داشته است. و هیچگونه خرابی در آن‌ها مشاهده نشده است.

۴-۴- مقایسه انواع روش‌های تقویت دال

۴-۴-۱- مقایسه کم‌ترین خرابی حاصل از هر روش

جدول (۶) شامل پنج نوع دال مختلف است: برای هر نوع دال، آسیب‌ها در دو سمت (پشت و جلو) و همچنین در نواحی مختلف دال ثبت شده است. همان‌طور که از این جدول قابل مشاهده است دال بتن مسلح متعارف با میزان خرابی به مساحت ۳٫۸۷ متر مربع دارای بیشترین میزان خرابی و دال بتنی فوق توانمند با نداشتن هیچ قسمت خرابی، دارای کمترین میزان خرابی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش‌های تقویتی با شبکه سیمی فولادی و ورق فولادی در دال بتنی متعارف، به ترتیب میزان خرابی را ۸۹٪ و ۷۸٪ کاهش داده است. استفاده از دال بتن فوق توانمند و دال lacing نیز در کاهش خرابی موثر بوده است منتها به علت هزینه بسیار بالای دال بتن فوق توانمند و همچنین روش اجرای دشوار دال lacing، لازم است در بکارگیری این دال‌ها در کاهش میزان خرابی، مقوله اقتصادی و سهولت اجرا مورد بررسی جدی قرار گیرد.



شکل ۹. میزان تاثیر ضخامت ورق فولادی در کاهش میزان خرابی

Fig. 9. The effect of the thickness of the steel sheet in reducing the damage amount

همان‌طور که از شکل (۹) مشخص است استفاده از ورق تقویتی با ضخامت ۰٫۵ سانتی‌متر در وجه پشتی بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد. هرچند عملکرد این ورق نسبت به سایر ورق‌ها تنها کمی بهتر است، اما نشان می‌دهد که ضخامت بیشتر لزوماً منجر به افزایش مقاومت و کاهش خرابی دال نمی‌شود.

۴-۱-۳- چگونگی خرابی در دال بتن مسلح متعارف همراه با

شبکه سیمی فولادی

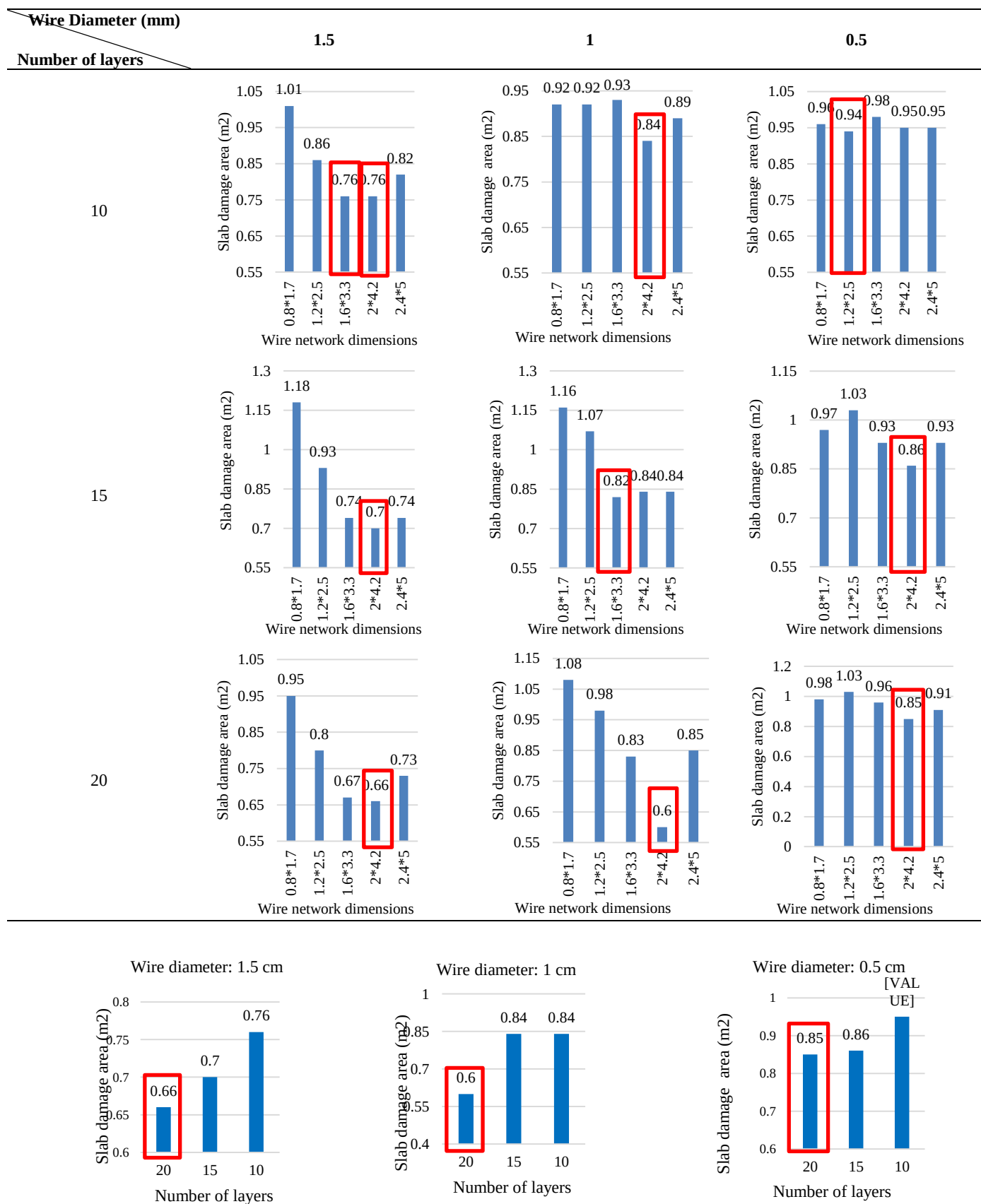
در جدول (۷)، میزان خرابی دال‌های بتن مسلح مقاوم شده با شبکه سیمی در حالت‌های مختلف شبکه سیمی ارائه شده است. با توجه به جدول (۵) می‌توان گفت که بهینه‌ترین حالت برای انتخاب ابعاد شبکه سیمی حالتی است که ابعاد شبکه ۲۵ درصد بزرگ‌تر از طول و عرض خرابی دال اولیه (متعارف) در نظر گرفته شود (۴٫۲×۲ متر). همچنین مشاهده می‌شود که انتخاب ابعادی کوچک‌تر از خرابی اولیه دال متعارف، خرابی بیشتری نسبت به سایر ابعاد می‌دهد.

با استفاده از جدول (۵) و مشخص شدن ابعاد بهینه شبکه سیمی (۴٫۲×۲ متر)، تاثیر تعداد لایه‌ها در این ابعاد بهینه، در شکل (۱۰ و ۱۱) بررسی شده است.

مطابق جدول (۵)، وجود شبکه سیمی فولادی (در حالت‌هایی که ابعاد شبکه از میزان خرابی دال متعارف (۳٫۳×۱٫۶ متر) کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر است)، باعث کاهش خرابی می‌شود. این کاهش خرابی بین ۷۸٪ الی ۸۹٪ متغیر می‌باشد. میزان اثرگذاری شبکه سیمی فولادی در کاهش خرابی، زمانی قابل ملاحظه‌تر است که ابعاد شبکه بزرگ‌تر از ابعاد خرابی دال متعارف باشد. در این

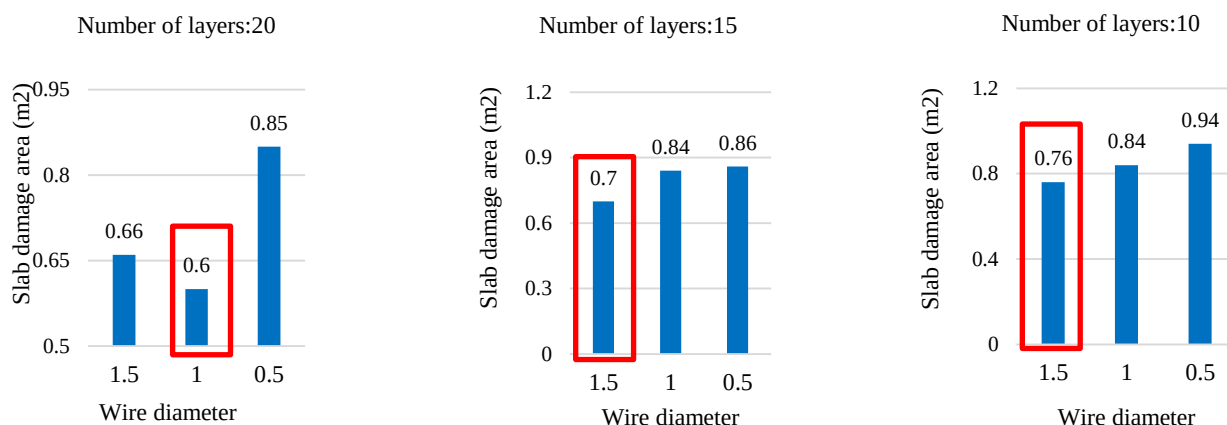
جدول ۵. میزان خرابی دال‌های بتن مسلح با شبکه سیمی فولادی

Table 5. The damage amount of reinforced concrete slabs with steel wire mesh



شکل ۱۰. میزان خرابی دال‌های بتن مسلح با شبکه سیمی فولادی با متغیر گرفتن قطر شبکه سیمی

Fig. 10. The damage amount of reinforced concrete slabs with steel wire mesh with varying dimensions of the wire diameter



شکل ۱۱. میزان خرابی دال‌های بتن مسلح با شبکه سیمی فولادی با متغیر گرفتن تعداد لایه‌ها

Fig. 11. The damage amount of reinforced concrete slabs with steel wire mesh with the variable number of layers

جدول ۶. مقایسه کمترین خرابی حاصل از هر روش

Table 6. Comparison of the lowest damage of each method

slab type	Damage area (m ²)		Figure	
	front side	back side	Front side	Back side
conventional slab	0.07	3.8		
Lacing slab	0.8	2.1		
Use of steel sheet	0.09	0.85		
Use of steel wire mesh	0	0.6		
High performance concrete	0	0		

خیز و خرابی در جدول (۷) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که از جدول (۷) مشخص است. در مقایسه بین انواع روش‌های تقویت دال متعارف با ورق فولادی و شبکه سیمی (با میزان مصالح تقریباً یکسان)، تاثیر تقویت با ورق فولادی در کاهش خیز بیشتر از شبکه سیمی می‌باشد؛ به گونه‌ای که در نمونه با ورق

۴-۴-۲- مقایسه مقدار خیز و خرابی مدل‌های دارای مصالح

یکسان

از آنجایی که هدف، مقایسه پاسخ دال بتن مسلح متعارف با سایر دال‌های تقویت شده می‌باشد، در این بخش، مدل‌هایی که دارای میزان مصالح حدوداً یکسان با دال متعارف می‌باشند، از نظر میزان

۰,۵ سانتی و در وجه پشتی، میزان خیز نسبت به دال بتنی متعارف ۵۰٪ کاهش داشته است. با این وجود، در مقایسه میزان اثرگذاری این دو روش مذکور در کاهش خرابی، نتیجه‌ای متفاوت حاصل شده است و دال تقویت شده با شبکه سیمی توانسته است میزان خرابی را نسبت به دال متعارف به میزان ۷۵٪ - ۸۰٪ کاهش دهد؛ در بیشتر نمونه‌هایی که دارای خیز بالا بوده‌اند میزان خرابی کمتری ثبت شده است و برعکس. علت این پدیده، انعطاف پذیری و شکل پذیری زیاد دال با شبکه سیمی نسبت به دال با ورق فولادی و استهلاک انرژی انفجاری با استفاده از تغییر شکل به جای خرابی و گسیختگی می‌باشد. پس به عنوان یک نتیجه‌گیری می‌توان گفت که دال با شبکه سیمی در اغلب موارد رفتاری شکل‌پذیرتر از دال با ورق فولادی دارد و بنابراین، در کاهش میزان خرابی مؤثرتر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر انواع روش‌های مقاوم‌سازی دال‌های بتنی برای مقابله با شکست ترد ناشی از انفجار مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مذکور شامل استفاده از میلگردگذاری lacing، استفاده از ورق فولادی، استفاده از شبکه سیمی فولادی و بتن فوق توانمند می‌باشد. برای انجام این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA (پس از اطمینان از درستی مدل‌سازی) استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده شامل موارد ذیل می‌باشد:

- استفاده از دال lacing نسبت به دال متعارف در انفجار حوزه نزدیک، باعث بروز خرابی و خیز کمتری در وجه پشتی دال می‌شود. دال lacing در هر ۴ آرایش میلگردگذاری توانسته

است خرابی را به میزان ۲۵٪ کاهش دهد.

- بهترین ابعاد در کاهش خرابی دال‌های بتن مسلح تقویت‌شده با ورق فولادی و شبکه سیمی، زمانی است که سطح ورق فولادی و شبکه سیمی از ابعاد سطح خرابی دال مسلح اولیه (۲,۸×۱,۴) بزرگتر باشد؛ این سطح بهینه برای هر دو روش تقویتی، به میزان ۴,۲×۲ متر به دست آمده است.
- در مورد ورق فولادی:

- بهترین وجه برای استفاده از ورق فولادی، وجه پشتی دال می‌باشد؛ استفاده از ورق در وجه پشتی توانسته است میزان خرابی را بین ۶۹٪ الی ۷۸٪ نسبت به خرابی دال متعارف کاهش دهد. علت این امر به دلیل تأثیر مثبت ورق فولادی در جلوگیری از ایجاد ترک و تغییر شکل‌های زیاد و ممانعت از خرابی spalling می‌باشد.
- استفاده از ورق فولادی در وجه جلویی باتوجه‌به ابعاد و ضخامت ورق، نتایج متفاوتی داشته است و در چند حالت منجر به کاهش خرابی تا ۴۳٪ و در چند نمونه دیگر افزایش خرابی تا ۱۰۶٪ گزارش شده است. بنابراین، استفاده از تقویت صرفاً در وجه جلویی توصیه نمی‌شود.
- استفاده از ورق‌های تقویتی کوچک‌تر از ابعاد خرابی اولیه دال متعارف، نه‌تنها منجر به کاهش خرابی نمی‌شود؛ بلکه خرابی را افزایش هم خواهد داد؛ خرابی به‌دست‌آمده در این حالت نسبت به دال بتنی بدون تقویتی، بین ۱۳٪ الی ۳۲٪ افزایش داشته است.

جدول ۷. مقایسه میزان خیز و خرابی در انواع مدل‌های تقویت دال با مصالح یکسان

Table 7. Comparison of the deflection and damage amount of various strengthened slab models with the same materials

Strengthened method	Description	Volume of materials (m ³)		Deflection (cm)	Damage area (m ²)
		Steel	Concrete		
Conventional slab	Without use of additional strength method	0.1	5.41	18.6	3.87
Use of steel sheet	Sheet 1 cm - front side - dimensions 1.6 x 3.3 (m ²)	0.11	5.41	19	4
Use of steel sheet	Sheet 1 cm - back side - dimensions 1.6 x 3.3 (m ²)	0.11	5.41	16.6	1.2
Use of steel sheet	Sheet 1 cm - both sides - dimensions 1.2 x 2.5 (m ²)	0.12	5.41	17.5	5.11
Use of steel sheet	Sheet 0.5 cm - front side - dimensions 2 x 4.2 (m ²)	0.1	5.41	10	8
Use of steel sheet	Sheet 0.5 cm - back side - dimensions 2 x 4.2 (m ²)	0.1	5.41	9.3	0.93
Use of seel wire mesh	Wire 0.5 mm - 10 layers - dimensions 0.8 x 1.7 (m ²)	0.1	5.41	24.9	0.96
Use of seel wire mesh	Wire 0.5 mm - 10 layers - dimensions 1.2 x 2.5 (m ²)	0.1	5.41	24.8	0.94
Use of seel wire mesh	Wire 1.5 mm - 15 layers - dimensions 2.4 x 5 (m ²)	0.11	5.41	20	0.74
Use of seel wire mesh	Wire 1.5 mm - 20 layers - dimensions 2.4 x 5 (m ²)	0.12	5.42	19	0.73
High performance slab	The thickness of the slab is 23 cm	0	5.52	4.7	0

ورق فولادی در برخی نمونه‌ها افزایش خرابی را نشان داده‌اند.

۳- نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد، دال‌هایی که خیز بیشتری دارند (مثل دال‌های تقویت شده با شبکه سیمی)، خرابی کمتری را تجربه کرده‌اند. این پدیده به علت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری بالای دال‌های تقویت شده با شبکه سیمی نسبت به دال‌های تقویت شده با ورق فولادی است.

قدردانی نویسندگان

برای انجام این تحقیق، حمایت مادی یا معنوی از سوی دانشگاه و مراکز دیگر انجام نشده است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافع مالی یا غیرمالی که بر نتایج تحقیق تأثیر بگذارد، وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان در مقاله به میزان یکسان می‌باشد.

منابع مالی

برای انجام این تحقیق، از منابع مالی خاصی استفاده نشده است.

References

1. Liu, J., Peng, Y., Xu, S., Yuan, P., Qu, K., Yu, X., Li, J. & Su, Y. 2022. Investigation of geopolymers-based ultra-high performance concrete slabs against contact explosions. *Construction and Building Materials*, 315, 125727.
2. Zhu, W., Xiao, Y., Yu, J., Jia, J. & Li, Z. 2024. Damage modes and mechanism of steel-concrete composite bridge slabs under contact explosion. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108223.
3. Tran, D.T., Pham, T.M., Hao, H., San Ha, N., Vo, N.H. & Chen, W. 2023. Precast segmental beams made of fibre-reinforced geopolymer concrete and FRP tendons against impact loads. *Engineering Structures*, 295, 116862.
4. Zhao, X., Sun, J., Zhao, H., Jia, Y., Fang, H., Wang, J., Feng, S. & Wei, D. 2024. Experimental and

۴- بهترین حالت استفاده از ورق فولادی، تعبیه در وجه پشتی و با ابعادی بزرگ‌تر از ابعاد خرابی دال متعارف می‌باشد؛ این کاهش خرابی بین ۷۵٪ الی ۷۹٪ مشاهده شده است.

■ در مورد شبکه سیمی فولادی:

۱- وجود شبکه سیمی فولادی باعث کاهش خرابی بین ۷۸٪ الی ۸۹٪ می‌شود. میزان اثرگذاری شبکه سیمی فولادی در کاهش خرابی، زمانی قابل ملاحظه تر بود که ابعاد شبکه بزرگتر از ابعاد خرابی دال متعارف باشد. در این حالت، میزان کاهش خرابی بین ۸۲٪ الی ۸۹٪ بدست آمد.

■ مقایسه بین انواع روش‌های تقویت دال بتنی دارای مصالح یکسان، نشان داد که:

۱- دال بتن فوق توانمند به‌وضوح در کاهش خیز و خرابی نسبت به سایر روش‌های تقویت دال عملکرد بهتری دارد که نشان‌دهنده توانایی بالای این نوع دال‌ها در مواجهه با بارهای دینامیکی شدید انفجاری است. البته بزرگ‌ترین ضعف دال بتن فوق توانمند، قیمت بسیار بالای این بتن‌ها و روش اجرای دشوار آنها است.

۲- دال تقویت شده با شبکه سیمی در مقایسه با انواع روش‌های تقویتی با مصالح یکسان به طور قابل‌توجهی میزان خرابی را نسبت به دال متعارف (۷۵٪ - ۸۰٪) کاهش داده است، در حالی که دال‌های تقویت شده با

mesoscopic modeling numerical researches on steel fiber reinforced concrete slabs under contact explosion. In: *Structures* (Vol. 61), 106114. Elsevier.

5. Zhu, W., Xiao, Y., Yu, J., Jia, J. & Li, Z. 2024. Damage modes and mechanism of steel-concrete composite bridge slabs under contact explosion. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108223.
6. Gao, Z., Chen, Y., Wang, Z., Li, S., Wei, W. & Huang, C. 2024. Study on the failure effect of aramid reinforced concrete slab under localized blast loading. In: *Structures* (Vol. 63), 106292. Elsevier.
7. Chen, D., Wu, H. & Cheng, Y. 2024. Dynamic behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted brick masonry infill walls under blast loads: Shock tube test and analyses. *International Journal of Impact Engineering*, 190, 104975.
8. Li, C. & Aoude, H. 2024. Effects of UHPFRC

- jacketing and axial loading on the blast behaviour of reinforced concrete beams and columns. *Journal of Building Engineering*, 84, 108416.
9. Gangolu, J., Kishore, K.B. & Sharma, H. 2023. Probabilistic demand models and reliability based code calibration for reinforced concrete column and beam subjected to blast loading. *Reliability Engineering & System Safety*, 240, 109577.
 10. Ma, L.L., Wu, H. & Fang, Q. 2023. A unified performance-based blast-resistant design approach for RC beams/columns. *International Journal of Impact Engineering*, 173, 104459.
 11. Kishore, K.B., Gangolu, J., Ramancha, M.K., Bhuyan, K. & Sharma, H. 2022. Performance-based probabilistic deflection capacity models and fragility estimation for reinforced concrete column and beam subjected to blast loading. *Reliability Engineering & System Safety*, 227, 108729.
 12. Shi, Y., Wang, N., Cui, J., Li, C. & Zhang, X. 2022. Experimental and numerical investigation of charge shape effect on blast load induced by near-field explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 165, 266-277.
 13. Wu, J., Liu, Z., Yu, J. & Xu, S. 2022. Experimental and numerical investigation of normal reinforced concrete panel strengthened with polyurea under near-field explosion. *Journal of Building Engineering*, 46, 103763.
 14. Zhang, Y.X., Chilvers, J., Yang, L. & Lin, X. 2022. Experimental and Numerical Investigations of Hybrid-Fibre Engineered Cementitious Composite Panels Under Contact Explosions.
 15. Zhao, C., Zhang, L., He, K., Chen, Y. & Li, X. 2023. Experimental and numerical study on the blast resistance of C-shaped doubled steel concrete slab (C-DSCS) with L-shaped connectors. *Engineering Structures*, 295, 116900.
 16. Mejía, N., Peralta, R., Tapia, R., Durán, R. & Sarango, A. 2022. Damage assessment of RC columns under the combined effects of contact explosion and axial loads by experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 254, 113776.
 17. U.S. Department of Defense. 2008. *UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions*. U.S. Department of Defense.
 18. Castedo, R., Segarra, P., Alañon, A., Lopez, L.M., Santos, A.P. & Sanchidrian, J.A. 2015. Air blast resistance of full-scale slabs with different compositions: Numerical modeling and field validation. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 145-156.
 19. Li, J., Wu, C., Hao, H. & Su, Y. 2017. Experimental and numerical study on steel wire mesh reinforced concrete slab under contact explosion. *Materials & Design*, 116, 77-91.
 20. Li, J., Wu, C. & Hao, H. 2015. Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Engineering Structures*, 102, 395-408.
 21. Tejehman, J. & Bobiński, J. 2013. Continuous and Discontinuous Modelling of Fracture in Concrete Using FEM.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Hosseini, S. A., Gandomkar Josheghani, A., Amin Taheri, T. 2026. Evaluation of retrofit Methods for Concrete Slabs Against Blast Loads to Avoid Brittle damage, *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp. 69-81.

DOI: [10.48311/mcej.2026.12723](https://doi.org/10.48311/mcej.2026.12723)

