

## یادداشت تحقیقاتی:

# مطالعه تحلیلی رفتار دال‌های بتنی مقاوم شده با فنس فولادی در برابر بارهای انفجاری

امیرحسین تاجور<sup>۱</sup>، کیارش ناصر اسدی<sup>۲\*</sup>، جواد مرادلو<sup>۳</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۲- استادیار دانشکده مهندسی - گروه عمران، دانشگاه زنجان

۳- استادیار دانشکده مهندسی - گروه عمران، دانشگاه زنجان

nasserasadi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۲/۲۵]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۳/۱۹]

## چکیده

کاهش خسارات جانی و مالی و خرابی‌ها و مقاوم‌سازی ساختمان‌های مهم و حیاتی در برابر بارهای انفجاری ناشی از حوادث تروریستی و حادثه‌ای، امری مهم و ضروری است. در این رابطه، یکی از مهمترین اجزایی که می‌تواند محافظ خوبی در برابر بارهای انفجاری باشد، استفاده از پل‌ها و یا دال‌های بتنی است. تاکنون روش‌های مختلفی برای بهبود رفتار این المانها مانند استفاده از ورق‌های FRP، الیاف فیبر، بتن‌های پر مقاومت و کامپوزیت‌های فولاد-بتن-فولاد و دیگر روش‌ها استفاده شده است ولی این روش‌ها یا سبب افزایش بارهای ثقلی قابل توجه به ساز بوده و یا با تکنولوژی بالا بوده که مواد اولیه آنها کم یاب بوده، هزینه اجرای زیادی داشته و نیازمند نیروی متخصص برای اجرا دارد. در این مقاله رفتار دال بتنی مسلح شده با فنس فولادی که ارزان و قابل پیاده‌سازی راحت است تحت بارهای انفجاری به صورت تحلیلی ارزیابی شده است. بدین منظور، تاثیر عواملی مانند تاثیر تعداد لایه‌های فنس، ضخامت دال‌ها و مقاومت فشاری بتن بر تغییر مکان، شعاع خرابی و عملکرد دال‌ها ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن فنس به دال با مقاومت و ضخامت‌های مختلف سبب کاهش شعاع خرابی و تغییر مکان دال‌ها شده و با افزایش تعداد لایه‌های فنس، درصد کاهش خرابی و تغییر مکان دال بیشتر می‌شود. افزودن فنس در دال‌ها با ضخامت و مقاومت فشاری کم، تاثیر بیشتری در کاهش تغییر مکان آنها و ارتقای عملکرد آنها تحت بار انفجاری دارد. همچنین دال‌ها با ضخامت و مقاومت فشاری بالا دارای سطح عملکرد ایمنی جانی و استفاده بی وقفه است و افزودن فنس، سبب بهبود نسبی سطح عملکرد آنها می‌شود.

**کلمات کلیدی:** مقاوم سازی در انفجار، فنس، دال بتنی.

## ۱- مقدمه

بتوانند با جذب انرژی از طرق مختلف سبب کاهش خرابی‌ها و آسیب دیدگی‌ها در سازه‌ها شوند، پس مواد بکار رفته در آنها باید دارای شکل پذیری و مقاومت بالایی باشند. به منظور افزایش مقاومت سازه در مقابل بارهای ناشی از انفجار، راه حل‌هایی موجود و متداول است که از جمله آنها می‌توان به

در سال‌های اخیر و با توجه به افزایش حملات تروریستی در سراسر دنیا، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر بارهای انفجاری امری ضروری است. برای مقابله با بارهای انفجاری سازه‌های مقاوم باید به گونه‌ای طراحی و ساخته شوند که

در خصوص استفاده از فنس در مقابله با انفجار تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است و تنها در خصوص تاثیر آن تحت بار ضربه‌ای مطالعاتی انجام شده است. التهاوی و کمال<sup>9</sup> روی تاثیر مقاومت در برابر سوراخ شدگی دال فنس دار تحت بار ضربه با تغییر تعداد لایه‌های شبکه فنس پژوهش کردند. نتایج نفوذ گلوله در بتن فنس دار نشان دهنده کاهش میزان نفوذ گلوله و خرابی بتن در اثر افزایش لایه‌های فنس است. مهمترین مزیت دال بتن مسلح با فنس که به وضوح قابل مشاهده است، کاهش چشمگیر آسیب دیدگی در صفحات دال بتنی است [10]. هاوا<sup>10</sup> روی دال تحت بار ضربه آزمایش انجام داد و تاثیر شکل دال‌های بتن آرمه و تعداد شبکه‌های فنس آن را بررسی کرد. نتایج نمودار نیرو-تغییر مکان دال‌ها نشان داده است که اضافه کردن شبکه‌های فنس سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری دال‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای و ناگهانی می‌شود [11].

با توجه به عدم بررسی مقاومت دال‌ها در برابر بارهای انفجاری بر اثر اضافه کردن فنس در بتن (فروسیمان)، در این پژوهش به عنوان مطالعه اولیه، تاثیر تعداد لایه‌های فنس، میزان مقاومت فشاری بتن وضخامت دال بتنی بر عواملی هم چون کاهش شعاع خرابی، عملکرد و تغییر مکان مرکز دال‌ها تحت بارهای انفجاری به صورت تحلیلی بررسی شده است.

## ۲- مدل مطالعه شده

دال‌های بتنی انتخاب شده، مربع شکل با بعد ۱۰۰۰ میلی‌متر با ضخامت‌های ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر، و به دو تکیه‌گاه گیردار در دو سمت خود متصل است. بتن استفاده شده با مقاومت‌های فشاری ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال و با مدول الاستیسیته ۳/۲۸ گیگاپاسکال است. میلگردهای مصرفی در دال‌های بتنی  $\phi 8@100\text{mm}$  در دو جهت اصلی و فرعی با مقاومت تسلیم ۶۰۰ مگاپاسکال و دارای مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال است. در شکل (۱) جزئیات کلی دال بتنی مدل شده ارائه شده است.

استفاده از فیبر در بتن و یا استفاده از FRP و نیز استفاده از کامپوزیت‌های سازه‌ای جدید مانند دیوار برشی فولادی مرکب اشاره کرد. در ادامه به بررسی بعضی از مطالعات پرداخته می‌شود.

در خصوص تاثیر افزودن انواع فیبرها در بهبود عملکرد پل‌های بتنی تحت اثر ضربه، سوآمی و جوجا<sup>1</sup> [1]، گارسیا و مانولی<sup>2</sup> [2]، لوک و جیسی<sup>3</sup> [3] نشان دادند که استفاده از فیبرها سبب افزایش مقاومت و جذب انرژی پل‌ها در انفجار شده و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند. زهرا طباطبایی<sup>4</sup> [4] و جی هیونگ‌ها<sup>5</sup> [5] به ترتیب روی فیبرهای بلند و فیبرهای منحنی در دال‌های بتنی تحت بار انفجار مطالعه کردند و نشان دادند که فیبرها سبب افزایش مقاومت و جذب انرژی دال‌ها می‌شود و سطح خرابی و ترک‌های ایجاد شده در دال‌ها کاهش می‌یابد. ناهيون ای<sup>6</sup> [6] و ژانگ<sup>7</sup> [7] روی دال‌های بتنی پرمقاومت تحت اثر ضربه بار انفجار مطالعه کردند و نشان دادند که این دال‌ها انرژی بیشتری را جذب می‌کنند و در نتیجه باعث کاهش عمق و قطر سوراخ شدگی، تغییر مکان شده و ترک‌های کمتری در دال ایجاد می‌شوند.

در خصوص تاثیر انواع ورق‌های FRP، رزاقپور و تولبا<sup>8</sup> [8]، سهرابی [9] نشان دادند که استفاده از انواع ورق‌های FRP سبب کاهش چشمگیر سطح آسیب دیدگی در پل‌های بتنی شده و هرچه تعداد لایه‌ها و سطح پراکندگی آنها بیشتر باشد، میزان تاثیر آنها نیز بیشتر می‌شود. استفاده از ورق‌های فولادی با ضخامت‌های متفاوت و کامپوزیت‌های فولادی در پل‌های بتنی روش دیگری برای افزایش مقاومت پل‌ها تحت اثر انفجار است.

از جمله معایب این روش‌ها میتوان به افزایش بارهای ثقلی قابل توجه به سازه، صرف زمان و هزینه زیاد، کمیاب بودن مواد اولیه و نیاز به نیروی متخصص برای اجرا است.

1 Swamy RN, Jojagha AH

2 Manolis GD, Gareis PJ

3 Lok TS, Pei JS

4 Zahra S. Tabatabaei

5 Ju-Hyung Ha

6 Na-Hyun Yi

7 M.H. Zhanga

8 Ghani Razaqpur, Ahmed Tolba

9 kamal

10 HAO

نمودارهای تنش- کرنش کششی و فشاری بتن، پارامترهای خسارت بتن و نمودار تنش-کرنش فولاد است که داده‌های استفاده شده در مدل‌سازی در ادامه ارائه شده است.

### ۳-۱ مدل آسیب دیدگی پلاستیک بتن

در شکل (۲) نمودارهای تنش-کرنش بتن در کشش و فشار تک‌محوره ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در اثر کشش تک‌محوره منحنی تنش-کرنش تا نقطه تنش خرابی  $\sigma_{t0}$  به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به صورت ترک‌های قابل مشاهده درمی‌آیند که به صورت منحنی نرم شوندگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می‌شود.

شکل ۲. پاسخ بتن تحت بارگذاری تک محوره در: (a) کشش و (b) فشاری [۱۳]

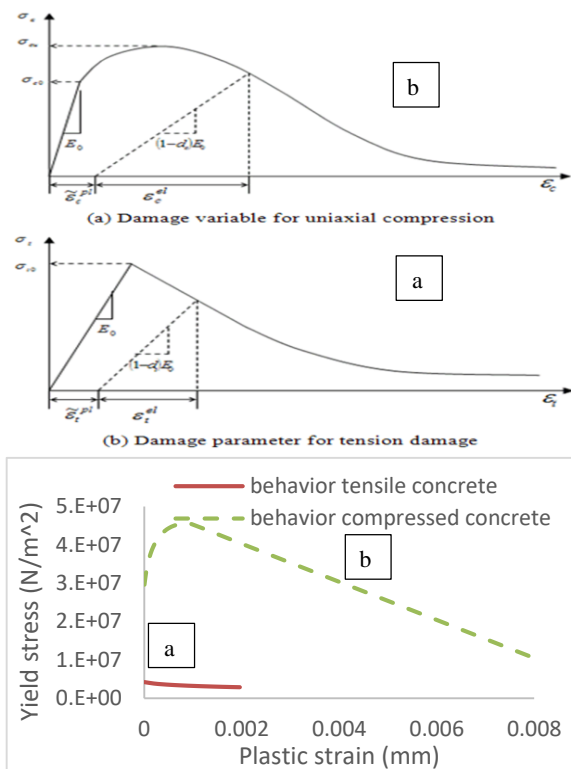


Fig. 2. The concrete constitution behavior under uniaxial load. a) tensile b) compression

### 3 Concrete plasticity damage model

شکل ۱. جزئیات دال بتنی مدل شده

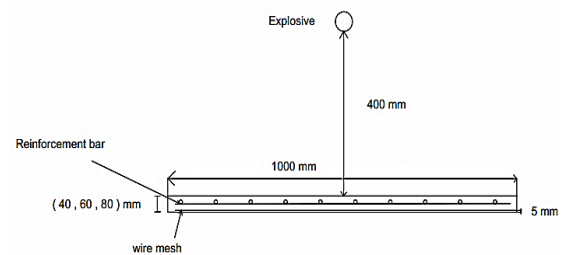


Fig. 1. Detail of modeled RC Slab (mm)

به منظور بررسی تاثیر لایه‌های فنس فولادی در دال‌های ارزیابی شده، علاوه بر حالت بدون فنس، ۱، ۲ و ۳ لایه فنس در تمامی دال‌ها قرار گرفته است. فنس‌های استفاده شده از جنس گالوانیزه مربع شکل جوش داده شده که دارای قطر ۱/۰۷ میلی‌متر و ابعاد بازشو ۱۲/۷ میلی‌متر است، استفاده شده است. لایه‌های فنس در سطح دور از منبع انفجاری و در قسمت کشش دال قرار داده شده است. با توجه به ۳ ضخامت استفاده شده و ۳ مقدار مقاومت و ۴ حالت وجود فنس، ۳۶ مدل دال بتنی تحلیل شده است.

برای مدل‌سازی انفجار، سطح خطر انفجاری نوع ۱ بر اساس مبحث ۲۱ مقررات ملی [12] که در آن سطح فشار بیش از  $1 \text{ kg/cm}^2$  با فاصله مقیاس شده  $(Z = \frac{R}{w^{1/3}} (m/kg)^{1/3})$  کمتر از  $2/65 \text{ m/kg}^{1/3}$  در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در این پژوهش ماده منفجره در فاصله ۴۰۰ میلی‌متری از دال و با وزن‌های ۲۰۰، ۳۱۰، ۴۶۰، ۵۵۰ و ۸۰۰ گرمی (با فاصله‌های مقیاس شده به ترتیب ۰/۴۳۱، ۰/۵۱۸، ۰/۶۸۴، ۰/۸۳۱ و ۰/۹۸۴  $(m/kg)^{1/3}$ ) استفاده شده است.

### ۳- مدل سازی

برای مدل کردن بتن و فولاد در نرم‌افزار المان محدود و بدست آوردن نتایج و داده‌های دلخواه در نرم‌افزار، نیازمند

#### 1 Scaled distance

۲ لازم به ذکر است در این مقاله در تمامی نمودارها از قدرت بار انفجاری  $(Z = R/w^{1/3})$  به‌جای متغیر بودن وزن و فاصله ماده منفجره از مانع در سایر مقالات و ملموس بودن آن استفاده شده است که معادل آن با وزن و فاصله مواد منفجره از دال در متن مقاله ارائه شده است.

بر اساس آیین‌نامه ACI 549 [۱۵] فنس‌ها دارای مقاومت کششی ۳۹۰ مگاپاسکال است. نمودار نیرو و تغییر مکان آن مطابق شکل (۴) است.

#### ۴- درستی آزمایشی دال بتنی

برای اطمینان از نتایج بدست آمده در مدل‌سازی، ابتدا، مدل استفاده شده با یک مطالعه آزمایشگاهی-تحلیلی راستی آزمایی شده، سپس رفتار دال بتنی فنس‌دار با ضخامت‌ها و مقاومت‌های فشاری مختلف تحت بار انفجار ارزیابی شده و میزان خرابی و تغییر مکان دال بدست آمده و مقایسه می‌شود.

#### ۴-۱- درستی آزمایشی دال بتنی مسلح تحت بار

##### انفجار

برای درستی آزمایشی مدل‌سازی دال‌ها، از یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی که در آن رفتار دال تقویت شده‌ای تحت بارگذاری انفجاری ارزیابی شده است، استفاده می‌شود شکل (۵) [۱۶]. در این مطالعه، خرابی و تغییر مکان دال بتنی از طریق آزمایش و تحلیلی توسط نرم‌افزار المان محدود ارزیابی شده است. مش‌بندی یکی از عوامل مهم در تحلیل‌های عددی و درستی آزمایشی میزان اختلاف بین واقعیت و نرم‌افزارها است. برای مطالعه روی مش‌ها ابتدا مسئله را با المان‌های درشت تحلیل، سپس المان‌ها را ریزتر کرده و سپس مسئله را دوباره تحلیل می‌کنیم تا جایی که اختلاف میان نتایج نرم‌افزار و آزمایشگاهی تا حد قابل قبولی یکسان باشد. مدل مورد اشاره، دال بتنی مربع به ابعاد ۱۰۰۰ میلی‌متر به ضخامت ۴۰ میلی‌متر است که از دو طرف در تکیه‌گاه‌گیر دار قرار گرفته است و در شکل (۵) نشان داده شده است. پس از سعی و خطای فراوان، مش به ابعاد ۶/۶۷\*۲۴\*۲۴ بهترین نتیجه با مطالعه کارگاهی داده است. میلگردهای استفاده شده  $\phi 6@75\text{mm}$  در دو جهت اصلی و فرعی است. برای مدل‌سازی بار انفجار در آباکوس از برنامه جانبی conwep که توسط ارتش آمریکا بر اساس نمودار موجود در آیین‌نامه UFC [۱۷] برای محاسبه فشار ناشی از انفجار نوشته شده است، استفاده می‌شود. مواد منفجره (از نوع TNT) در فاصله ۴۰۰ میلی‌متر از دال بتنی در

تحت فشار تک محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری‌شدگی  $\sigma_{t0}$  به صورت الاستیک خواهد بود و رفتار در ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت‌شوندگی بیان می‌شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی  $\sigma_{t0}$  منحنی به صورت نرم شونده درمی‌آید. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، ویژگی‌های اصلی بتن را ارضا می‌کند.

پارامتر آسیب کششی تک‌محوره  $d_t$  را می‌توان به صورت تابعی از جابه‌جایی ترک و یا به صورت تابعی از کرنش ترک در نرم‌افزار تعریف نمود. در صورت برابر ۱ به معنی خرابی کامل و ۰ به معنای آسیب ندیدن ماده است. در شکل (۳) نمودار پارامتر خسارت بتن در حالت کشش و فشار برای بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال ارائه شده است.

شکل ۳. نمودار پارامتر خسارت بتن در حالت کشش و فشار [۱۴]

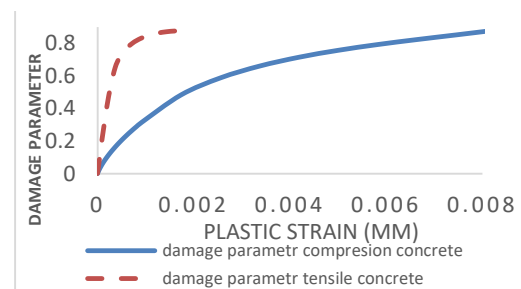


Fig. 3. Typical damage parameter of concrete under tensile and compression loads.

#### ۲-۳- ماده فولاد و فنس

برای معرفی فولاد و فنس از مدل سخت‌شوندگی همگن استفاده شده است. این مدل شامل یک ناحیه الاستیک، یک ناحیه پلاستیک مسطح و یک ناحیه پلاستیک سخت‌شوندگی مجدد است. فولاد به کاررفته از نوع ST37 و با مقاومت ۶۰۰ mpa است.

شکل ۴. نمودار تنش-کرنش فنس [۱۵]

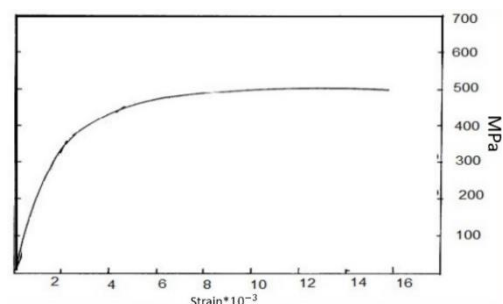


Fig. 4. Typical stress-strain curves for steel meshes

در شکل (۶)، چگونگی بار وارد شده بر دال و شکست دال تحت بار را در کارگاه نشان می‌دهد. برای تقویت دال در این مطالعه، در گروه‌های A و B از فنس با تعداد لایه (۰ و ۱ و ۲ و ۳) به همراه ۴ میلگرد طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۷) جزئیات دال بتنی مسلح ارائه شده است.

شکل ۷. جزئیات دال بتنی فنس‌دار تحت بار ضربه [۱۸]

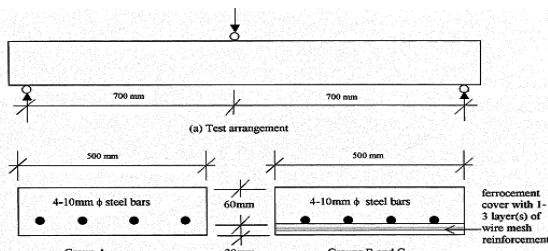


Fig. 7. Detail of the slab with wiremesh under impact load

مقاومت فشاری دال‌های بتنی ۴۰ مگاپاسکال و دارای ۴ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر با مقاومت گسیختگی ۴۶۰ مگاپاسکال و با لایه‌های مختلف فنس و دارای دو تکیه‌گاه مفصلی به فاصله ۱/۴ متر از یکدیگر است که تحت بار ضربه قرار گرفته‌اند. برای مدل‌سازی فنس‌ها در نرم‌افزار مطابق نمودار تنش-کرنش فنس‌ها در شکل (۴) در حالت الاستیک و پلاستیک مدل‌سازی شده است. در شکل (۸)، دال بتنی فنس‌دار مسلح و شکل (۹)، شکست دال بتنی فنس‌دار مدل شده در آباکوس ارائه شده است.

شکل ۸. دال بتنی مدل شده در آباکوس با فنس تحت ضربه

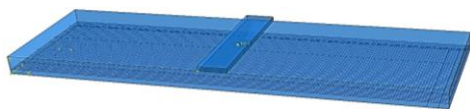


Fig. 8. Simulation of slab WM<sup>r</sup> under impact loading using the ABAQUS code

شکل ۹. شکست دال بتنی فنس‌دار مدل شده در آباکوس

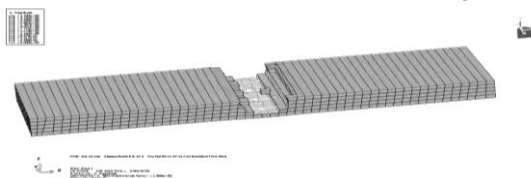


Fig. 9. Damage of the slab WM simulation using the ABAQUS code

مرکز دال قرار گرفته است و وزن آنها ۰/۲ و ۰/۳۱ و ۰/۴۶ و ۰/۵۵ کیلوگرم (با فاصله‌های مقیاس شده به ترتیب ۰/۶۸۴، ۰/۵۹۱، ۰/۵۱۸، ۰/۴۸۸، و ۰/۴۳۱  $m/kg^{1/3}$ ) است.

شکل ۵. دال بتنی آزمایش شده تحت بار انفجار [۱۶]



Fig. 5. Test setup slab under blast load

در جدول (۱) مقایسه میزان آسیب دیدگی و تغییر مکان دال تحت آزمایش و مدل‌سازی انجام شده در مطالعه اصلی که با نرم‌افزار اتوداین انجام شده است و همچنین نتایج مدل‌سازی که با آباکوس در این مقاله انجام شده ارائه شده است. همانگونه که مشخص است تغییر مکان و شعاع خرابی بدست آمده در دال‌های بتنی مدل شده در این مطالعه با نتایج مطالعات آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و دقت آن از مدل‌سازی انجام شده توسط مرجع بیشتر است.

#### ۲-۴ درستی آزمایشی دال بتنی فنس‌دار تحت ضربه

برای درستی از چگونگی مدل‌سازی صحیح فنس، با توجه به اینکه مطالعاتی در زمینه استفاده از فنس در بار انفجاری موجود نبود، از مدل و آزمایش استفاده شده در مطالعه الکویسی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این مطالعه، دالی تقویت‌شده با میلگرد و انواع لایه‌بندی فنس در کارگاه تحت آزمایش ضربه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک دال بتنی به ابعاد ۸۰\*۵۰\*۱۵۰۰ میلی‌متر تحت بار ضربه‌ای به اندازه ۵۰ تن قرار گرفته است.

شکل ۶. دال بتنی فنس‌دار تحت آزمایش بار ضربه [۱۸]



Fig. 6. Test setup slab wiremesh slab under impact load

جدول ۱. درستی آزمایشی و مقایسه نتایج مدل‌سازی نرم‌افزار آباکوس با نتایج بدست آمده از آزمایش و مدل‌سازی نرم‌افزار اتوداین در مطالعه Zhang و Wang, (درصدهای خطا در پرانتز ارائه شده است) [۱۶]

Explosive mass (kg)	Experiment result of article (Experimental study and...)		Numerical result of article (Experimental study and...)		numerical result of this article	
	deflection (mm)	damage radius (mm)	deflection (mm) (error percentage)	spall radius (mm) (error percentage)	deflection (mm)	spall radius (mm)
0.2	۱۰	۰	8 (20%)	0	8.16(18.4%)	0
۰.۳۱	۱۵	۹۰	13(13.3%)	100(11.1%)	16.13(7.5%)	90(0%)
۰.۴۶	۳۵	۱۲۰	32(9.37%)	140(16.6%)	30.4(13.1%)	126(4.7%)
۰.۵۵	-	۱۵۰	-	160(6.67%)	-	141(6%)

**Table 1.** Validation and Comparison result of the numerical simulation software autodyne and abaqus with experimental zahang study (show the error as a percentage in Parenthesis)

جدول ۲. درستی آزمایشی و مقایسه نتایج مدل‌سازی تحلیل دال بتنی فنس‌دار تحت ضربه از نرم‌افزار آباکوس و آزمایش دال بتنی فنس‌دار تحت ضربه (در پرانتز درصد خطا مدل‌سازی با مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده است) [۱۸]

name	number of wiremesh layer	concrete compressive strength (n/mm <sup>2</sup> )	Experimental result Al-Kubaisya	Numerical result of this study		
			Ultimate load (KN)	Deflection (mm)	Ultimate load (KN) (error percentage)	Deflection(mm) (error percentage)
A3	۰	41/2	22/4	14/5	(20%) 26/9	(25%)10/8
25%B1	1	40/9	23/8	10/7	22/7(4%)	(0%)10/7
B2	2	43/1	29/4	10	(10%) 26/5	(10%)11
B3	3	42/7	28	11/2	(1/5%) 28/4	(2/5%)11/5

**Table 2.** Validation and Comparison of the abaqus numerical result with the experimental result and analytical study of using Ferrocement slab RC with impact load (the error are shown as a percentage of the numerical and experimental in Parenthesis)

تعدادی دال بتن مسلح با ضخامت و مقاومت‌های مختلف بررسی شده و عملکرد آن از نظر میزان تغییر مکان و شعاع خرابی در شدت‌های بار انفجاری مختلف و تعداد لایه فنس متفاوت ارزیابی می‌شود.

### ۵-۱ ارزیابی تغییر مکان دال‌ها

فشار وارد شده ناشی از مواد منفجره در دال‌های بتنی سبب تغییر مکان در دال‌ها شده که بیشترین آن در مرکز دال رخ می‌دهد. به منظور بررسی اثر عوامل مختلف، میزان تغییر مکان بیشینه دال در مدل‌های مختلف محاسبه می‌شود. در شکل (۱۰) تغییر مکان دال‌های بتنی با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و ضخامت‌های ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر با تعداد لایه‌های فنس متفاوت تحت بارهای انفجاری با ماده منفجره در فاصله ۴۰۰

به منظور مقایسه نتایج، در جدول (۲) بار نهایی وارد بر دال و تغییر مکان دال‌های بتنی در آزمایشگاه و نتایج مدل‌سازی تحلیل دال بتنی فنس‌دار تحت ضربه از نرم‌افزار آباکوس در این پژوهش ارائه شده است. با مشاهده مقادیر ارائه شده در جدول می‌توان نتیجه گرفت که نیروی قابل تحمل در دال و تغییر مکان بدست آمده از تحلیل عددی بسیار به نتایج مطالعه مرجع نزدیک بوده و مدل‌سازی صحیح است.

### ۵-۲ مدل‌سازی دال بتنی فنس‌دار تحت بار انفجار

در این مقاله به بررسی تاثیر افزودن فنس با تعداد لایه مختلف در دال بتنی با ضخامت و مقاومت‌های فشاری مختلف تحت بارهای انفجاری در سطح خطر نوع ۱ بر تغییر مکان، شعاع خرابی و سطح عملکرد دال‌ها پرداخته می‌شود. بدین منظور،



شکل ۱۱. میانگین درصد کاهش تغییر مکان دال بتنی فنس‌دار تحت بارهای

انفجاری مختلف

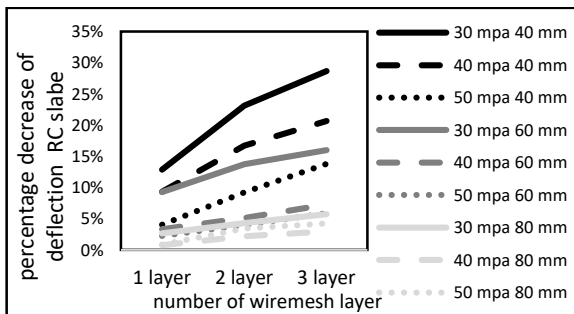


Fig. 11. The average reduction percentage of deflection RC slab with wiremesh under different blast load

## ۵-۲ شعاع خرابی دال تحت بارهای منفجره

بخشی از انرژی ناشی از انفجار بازتاب پیدا کرده و قسمتی از آن در بتن جذب شده و سبب خرابی آن میشود. خرابی بتن مسلح بعلت تسلیم کششی در سطح بتن بوده و با تغییر مکان زیاد همراه میشود. این خرابی‌ها میتواند بصورت ترک یا خردشدگی و تکه تکه شدن و حتی پرتاب قسمتی از بتن به سمت بیرون شود. [۱۹].

در شکل (۱۲)، خرابی دال بتنی با سه لایه فنس و با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و ضخامت ۶۰ میلی متر تحت بار انفجار با قدرت  $0.488 m/kg^{1/3}$  (ماده منفجره با وزن ۵۵۰ گرم در فاصله ۴۰۰ مم) ارائه شده است.

شکل ۱۲. شعاع خرابی دال بتنی مدل شده در آباکوس با سه لایه فنس و

مقاومت فشاری ۳۰ mpa و ضخامت ۶۰ mm

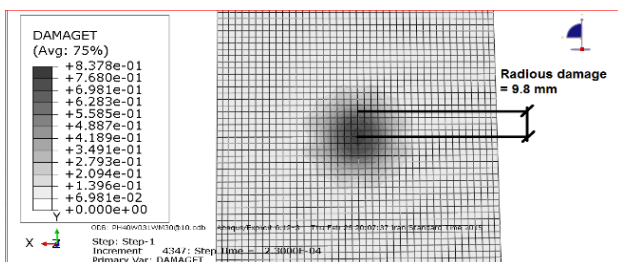


Fig. 12. The numerical simulation of damage radius of slab with 3layer WM, 30 Mpa, 60mm by using abaqus software.

به منظور بررسی میزان تاثیر عوامل مختلف بر میزان خرابی دالهای بتنی، شعاع خرابی تمام دالهای تحلیل شده و با هم مقایسه شده است. در شکل (۱۳) نمونه ای از شعاع خرابی دال های بتنی با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و ضخامتهای مختلف با تعداد لایه های فنس و بارهای انفجاری متفاوت ارائه

میلی متری از دال و با وزن های ۲۰۰ و ۳۱۰ و ۴۶۰ و ۵۵۰ و ۸۰۰ گرمی (با فاصله های مقیاس شده به ترتیب ۰/۶۸۴، ۰/۵۹۱، ۰/۴۸۸، ۰/۴۳۱ و  $(m/kg)^{1/3}$ ) ارائه شده است. همان گونه که انتظار می رود، با افزودن فنس و تعداد لایه های آن، تغییر مکان ماکسیمم کمتر شده است و تاثیر ضخامت دال در کاهش تغییر مکان، بیشتر است.

به منظور بررسی کارایی هریک از عوامل در کاهش تغییر مکان، در شکل (۱۱) نمودار میانگین درصد کاهش تغییر مکان دال بتنی تحت بارهای انفجاری با قدرت انفجاری ۰/۶۸۴، ۰/۵۹۱ و  $0.488 m/kg^{1/3}$  (ماده منفجره با وزن های ۲۰۰ و ۳۱۰ و ۴۶۰ گرم در فاصله ۴۰۰ مم) و با ضخامت ها و مقاومت فشاری مختلف در اثر افزودن ۱، ۲ و ۳ لایه فنس نسبت به دال بدون فنس ارائه شده است. همانگونه که در شکل (۱۱) مشاهده می شود، با اضافه کردن و افزایش تعداد لایه های فنس به دال های بتنی تحت بار انفجار میزان تاثیر آنها در کاهش تغییر مکان دال بیشتر می شود. میزان تاثیر فنس به ترتیب در دال ها با ضخامت ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی متر و مقاومت فشاری ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال بیشتر است. به عبارت دیگر، اضافه کردن فنس ها به دال با ضخامت و مقاومت فشاری کم، تاثیر بیشتری نسبت به دال با ضخامت یا مقاومت فشاری بیشتر دارد. به طور کلی نمودارها نشان می دهند که تغییر مکان دال ها با ضخامت ۴۰ و ۶۰ میلی متر با اضافه کردن ۲ یا ۳ لایه فنس برابر تغییر مکان همان دال با یک رده مقاومت فشاری بتن بالاتر است.

شکل ۱۰. تغییر مکان دال بتنی فنس دار تحت بار انفجار

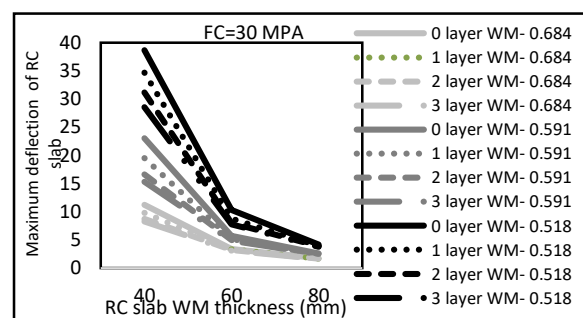


Fig. 10. Deflection of RC slab wm under blast load

بخاطر ثابت بودن میزان کاهش شعاع خرابی و کمتر بودن شعاع خرابی در دالهای ضخیم و مقاومت فشاری بالا می باشد.

### ۳-۵ بررسی سطح عملکرد دالها

در طراحی های متعارف سازه ها در حالت خطی، تنش ایجاد شده در اعضا با تنش مجاز مقایسه و کنترل میشوند. در زمانی که تنش عضو از حدود تسلیم بیشتر شود، با توجه به ثابت بودن میزان تنش، تغییر مکان که با میزان خرابی رابطه مستقیم دارد، به عنوان پارامتر مناسب تعیین عملکرد استفاده می شود. بطور کلی هر چقدر سازه و یا عضو مورد نظر بتواند تغییر شکل بیشتری را بدون گسیختگی تحمل کند، انرژی بیشتری جذب شده و آسیب بیشتری وارد می شود [۱۲].

برای کنترل آسیب ها، آیین نامه UFC-3-340-2 و مبحث ۲۱ مقرارت ملی محدودیت تغییر شکل بر اساس مفاهیم ایمنی و ضوابط مربوط به حفاظت انفجاری و بر اساس سطح عملکرد سازه در نظر گرفته است که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته شده است. دوران مفصل معیاری از پاسخ عضو است که پاسخ تغییر شکل حداکثر را تابعی از طول دهانه عضو مینماید و نشان دهنده درصد ناپایداری در نواحی بحرانی عضو و نشانگر درجه ناپایداری موجود در نواحی بحرانی عضو میباشد. این فاکتور با علامت  $\theta$  نشان داده میشود که از رابطه ۱، مطابق شکل (۱۵) به دو روش تعیین میشود [۱۷].

$$\theta = \arctan(\Delta/L/2) \quad (1)$$

$\theta$ : دوران مفصل،  $\Delta$ : تغییر مکان ماکسیمم عضو،  $L$ : طول عضو جهت بدست آوردن میزان ناپایداری عضو در نواحی بحرانی، از دو روش میتوان استفاده کرد، روش اول دوران مفصل در تکیه گاه (دوران  $\theta^1$ ) و روش دوم دوران مفصل در وسط دهانه (دوران  $\theta^2$ ) است. در آیین نامه UFC-3-340-2 از روش دوران تکیه گاهها استفاده شده است و مقادیر مجاز آن با توجه به سطح عملکرد مورد نیاز در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر دوران تکیه گاه دال ها با توجه به عملکرد مورد نظر نباید از حدود مجاز آن بیشتر شود.

شده است. همانطور که پیش بینی می شود، افزودن فنس سبب کاهش شعاع خرابی دال های بتنی میشود. بطور کلی، میزان کاهش شعاع خرابی در اثر اضافه کردن فنس در تمامی حالات تقریباً یکسان می باشد. برای مقایسه بقیه حالات، در شکل (۱۴) نمودار میانگین درصد کاهش شعاع خرابی دال بتنی تحت بارهای انفجاری با ماده منفجره در فاصله ۴۰۰ میلی متری از دال و با وزن های ۲۰۰ و ۳۱۰ و ۴۶۰ و ۵۵۰ و ۸۰۰ گرم (با فاصله های مقیاس شده به ترتیب ۰/۶۷۴، ۰/۵۹۱، ۰/۸۱۵، ۰/۴۸۸ و ۰/۴۳۱)  $(\text{mkg})^{1/3}$  با ضخامت ها و مقاومت فشاری مختلف در اثر افزودن ۱ و ۲ و ۳ لایه فنس نسبت به دال بدون فنس ارائه شده است.

شکل ۱۳. نمودار شعاع خرابی دال بتنی تحت بارهای انفجاری

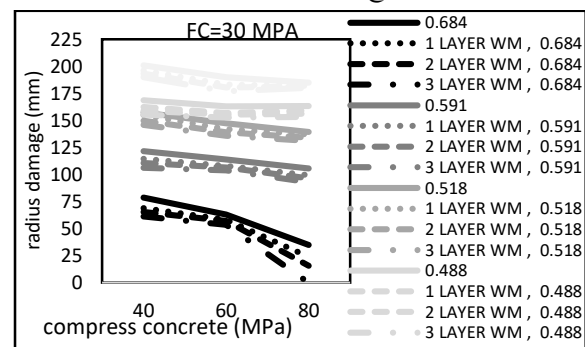


Fig. 13. The damage radius of slab WM under blast load

شکل ۱۴. میانگین درصد کاهش شعاع خرابی دال بتنی تحت بارهای انفجاری مختلف

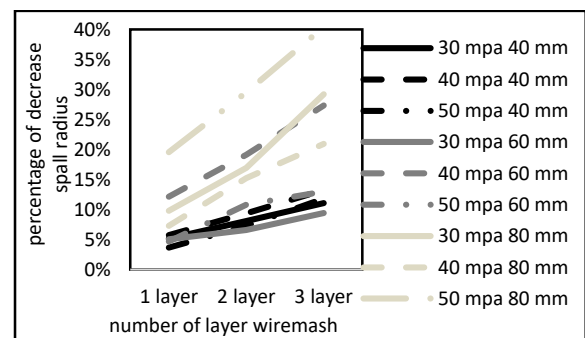


Fig. 14. The average decrease percentage of damaged radius of slab under various blast load

با بررسی شکل (۱۴) مشاهده میشود اضافه کردن فنس در دال با ضخامت بالا و مقاومت فشاری زیاد تاثیر بیشتری در دالها با ضخامت کمتر و مقاومت فشاری پایین تر دارد. علت این امر،



افزایش سطح عملکرد سازه در برابر بارهای انفجاری می‌شود و افزایش ضخامت دال تاثیر زیادی در افزایش سطح عملکرد سازه در برابر بارهای انفجاری دارد. در دال با ضخامت ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر با مقاومت‌های فشاری مختلف و در بیشتر بارهای انفجاری در ناحیه استفاده بی‌وقفه قرار گرفته است. دال با ضخامت ۴۰ میلی‌متر با مقاومت‌های فشاری مختلف تحت بارهای انفجاری قوی دارای عملکرد مناسبی نیست و در مقاومت‌های کم در محدوده ایمنی جانی و آستانه ریزش قرار گرفته است؛ بنابراین در ادامه به بررسی تاثیر تعداد لایه فنس در دال به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و مقاومت ۳۰ مگاپاسکال در سطح عملکرد دال پرداخته خواهد شد.

شکل ۱۷. چرخش مفصل تکیه‌گاه و سطح عملکرد دال‌های بدون فنس با

مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال

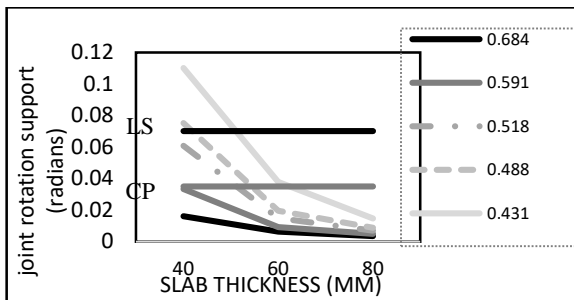


Fig. 16. Rotation of support's plastic hinges and performance level of slabs without WM, 40MPa

شکل ۱۸. چرخش مفصل تکیه‌گاه و مقایسه با سطح عملکرد دال‌های بدون

فنس با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال

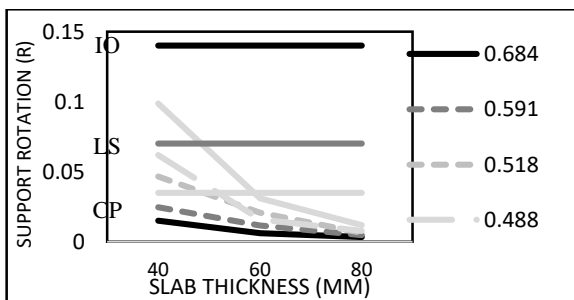


Fig. 18. Rotation of support's plastic hinges and performance level of slabs without WM, 50MPa

در شکل (۱۹) سطح عملکرد دال بتنی به ضخامت ۴۰ میلی‌متر و مقاومت ۳۰ مگاپاسکال با تعداد لایه‌های فنس متفاوت مشاهده می‌شود، می‌بینیم که اضافه کردن فنس‌ها سبب کاهش نسبی چرخش پلاستیک دال بتنی و بهبود عملکرد دال بتنی شده و در مواردی که دال بتنی بدون فنس در نزدیک یک

شکل ۱۵. دوران مفصل پلاستیک در تیرها و یا دالها [۱۲]

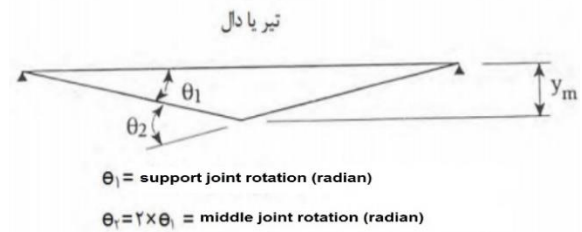


Fig. 15. Rotation of plastic hing in beams and slabs

جهت بررسی سطح آسیب دیدگی، محدودیت‌های تغییر شکل در سه سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) طبقه‌بندی می‌شود [۱۲]. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نمودار چرخش مفصل پلاستیک و مقایسه آن با سطح عملکرد دال بتنی با مقاومت ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ مگاپاسکال و ضخامت‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۳. سطح عملکرد ساختمان‌ها برای مناطق باپهنه‌بندی خطر شدید

[۱۲]

Element type	rotation support (radian)		
	Performance levels		
slab	Immediate occupancy	Life safety	Collapse prevention
	0.035	0.07	0.14

Table 3. Structural performance levels for highest risks blast zoning

شکل ۱۶. چرخش مفصل تکیه‌گاه و سطح عملکرد دال‌های بدون فنس با

مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال

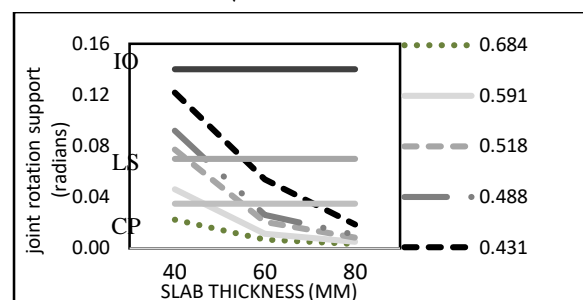


Fig. 16. Rotation of support's plastic hinges and performance level of slabs without WM, 30MPa

همان‌گونه که مشاهده می‌شود و انتظار داریم، افزایش ضخامت دال باعث افزایش ایمنی، کاهش آسیب‌دیدگی و

- 1 Immediate occupancy
- 2 Life safety
- 3 Collapse prevention

دال (دال با ضخامت کم تحت بارهای انفجاری با قدرت  $Z \geq 0.591m/kg^{1/3}$  می شود.

ناحیه سطح عملکرد باشد، اضافه کردن فنس سبب بهبود عملکرد آن شده است.

REFERENCES

مراجع ۶

- Swamy RN, Jojagha AH. "Impact resistance of steel fibre reinforced light weight concrete". Hkie transaction ,Volume 4, Issue 4, November 1982, Pages 209-220
- Manolis GD, Gareis PJ, Tsonos AD, Neal JA. "Dynamic properties of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs". Cement and Concrete Composites, Volume 19, Issue 4, 1997, Pages 341-349
- Lok TS, Pei JS. Impact resistance and ductility of steel fibre reinforced concrete panels. HKIE Transactions , Volume 3, Issue 3, 1996 pages 7-16
- Tabatabaei Zahra , Jeffery S. Volz, "Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading" International Journal of Impact Engineering 57 (2013)
- Ju-Hyung Ha, Na-Hyun Yi, Jong-Kwon Choi, Jang-Ho Jay Kim "Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading" Composite Structures 93 (2011) 2070
- Na-Hyun Yi, Jang-Ho Jay Kim, Tong-Seok Han, "Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete," Construction and Building Materials 28 (2012) 694
- Zhanga, M.H, Shimb V.P.W., G. Lua, C.W. Chew "Resistance of high-strength concrete to projectile impact" International Journal of Impact Engineering 34 (2007) 1768-1779
- Razaqpur Ani, Tolba Amed, Ettore Contestabile, "Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates" Composites: Part B38(2007)535
- Karimlou M.J. and Sohrabi M. 2010. Evaluation of reinforced salbs with FRP fibers under unusall load. First Civil Defence Conference, University of Noshiravan, Babol (in Persian).
- N. A0nandavallia., Nagesh R. iyer c, G. M. Anovel modelling teqnique for blast analysis of steel-concrete composite panel, Rocedia Engineering14,2011
- Y. Hao, H. Hao , Dynamic compressive behaviour of spiral steel fibre reinforced concrete in split Hopkinson pressure bar tests, Construction and Building Materials 48 ,2013
- Draft of Civil Defence Standard 2009, Building and Housing Research Center.
- Shahrul Niza Mokhtar, Redzuan Abdullah "Computational Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loads International" Journal of Integrated Engineering, Vol. 4 No. 2 (2012) p.70-76 .
- Abbdollahi J. 2013, Evaluation of Nonlinear Dynamic Behavior of concrete Beam under Blast, M.S. thesis, Engineering Faculty, University of Zanjan, Zanjan, Iran (in persian).

شکل ۱۹. سطح عملکرد دال بتنی با ضخامت ۴۰ میلیمتر با مقاومت ۳۰

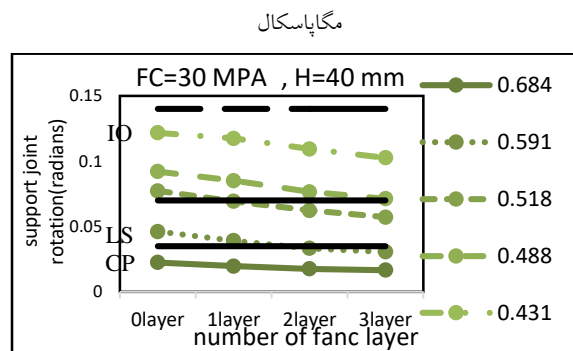


Fig. 19. Performance levels 40 mm slab ,30Mpa

خلاصه و نتیجه گیری ۵

در این مقاله به بررسی میزان مقاومت دال‌های بتنی فنس‌دار تحت بارهای انفجاری پرداخته شده است. بدین منظور، رفتار و میزان خرابی دال‌های بتنی فنس دار با ضخامت و مقاومت فشاری مختلف تحت بارهای انفجاری سطح نزدیک و با خطر نوع ۱ ارزیابی شده که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد:

- بطور کلی وجود فنس و افزایش تعداد لایه‌ها سبب کاهش شعاع خرابی و تغییر مکان دال‌ها می‌شود. افزایش تعداد لایه‌های فنس درصد کاهش بیشتر می‌شود.
- اضافه کردن فنس‌ها به دال‌ها در بیشترین حالت سبب کاهش ۲۵ درصدی تغییر مکان دال‌ها می‌شوند. اضافه کردن فنس در دال‌ها با ضخامت کم و مقاومت فشاری پایین، تاثیر بیشتر دارد.
- افزودن فنس در دال ضخیم با مقاومت فشاری بالا تاثیر بیشتری در کاهش شعاع خرابی دال‌ها نسبت به سایر حالات دارد.
- دال با ضخامت ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر بدون فنس و با مقاومت متفاوت تحت بارهای انفجاری با سطح خطر نوع ۱ و برای ساختمان‌ها با درجه اهمیت حیاتی، دارای عملکرد استفاده بی‌وقفه و یا ایمنی جانی است ولی در دال با ضخامت کم (۴۰ میلی‌متر) دارای عملکرد مطلوبی نبوده که با افزودن فنس در آنها عملکرد نسبی آنها بهتر می‌شود.
- استفاده از فنس در بتن با توجه به نسبت هزینه به عملکرد آن دارای توجیه اقتصادی و عملکرد مطلوب در حالت‌های بهینه

15. ACI Committee 549. *Guide for design construction and repair of ferrocement ACI 549 IR-88*. ACI Struct J 1988;85
16. Wei Wang, Do Zhang, "Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion" *Engineering Failure Analysis* 27(2013)
17. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02. Structures to resist the effects of accidental explosions. Washington D.C.: U.S. Department of Defense; 2008. p. 50e70
18. M.A. Al-Kubaisya, Mohd Zamin Jumaat, "Flexural behaviour of reinforced concrete slabs with ferrocement tension zone cover" *Construction and Building Materials* 14 (2000) 245-252
19. Najafi Jilani A. 2011, *Design of Blast Resistant Structure in Insuterial Facilities*. Jahad Daneshghahi University of Amir Kabir.

# Analytical study of reinforced concrete slabs with Ferrocement under blast load

Amir hussain tajvar<sup>1</sup>, Kiarash Nasseradi<sup>2</sup> and Javad Moradlou<sup>2</sup>

- 1- M.S. Student, Faculty of Engineering, University of Zanjan
- 2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Zanjan

nasseradi@znu.ac.ir

## Abstract

Reduction of social and financial losses and rehabilitation in important buildings as a result of terrorist attacks and accidental blast is vital. In this regards, using concrete slabs as a protective shield is one of the main methods of protection. Currently, many methods have been used for improve the behavior of this element such as FRP sheets, fibers, high strength concrete and composite concretes. But these methods either increase the dead load of structure or are costly and use high-tech methodology and needed very high skilled worker for implementation. In this paper, the behavior of RC slabs reinforced with steel wire mesh which is easy to implement and cheap was studied analytically under blast loads.

To this goal, effect of different parameters such as number of wire meshes, slab thinness and concrete strength on maximum slab displacement, damage areas and performance of slabs were studied analytically under the various blast loads. First the model was calibrated to an existing experimental and analytical study of blast and impact modeling of slabs with wire mesh. The crack in concrete was modeled by the smeared crack methodology in which the radios of damaged concrete under the blast load can be identified. Then numerous slabs with different thickness (40, 60 and 80 mm), concrete strength (30, 40 and 50 MP), different layers of wire mesh (0, 1, 2, 3) where considered. The selected slabs were analyzed with a general FEM software under a various range of blast loads ( $Z=D/W^{1/3}$  equal to 0.431, 0.488, 0.518, 0.591 and 0.648).

The results have shown that increasing of slab thickness, concrete strength and adding different layers of wire mesh reduces the slab displacement and the damage area. Due to higher damage in thin slabs (40 mm) and low concrete strength (30 MP), the effect of adding wire were higher in these slabs. The wire mesh reduces the damage ratio by 5 to 35 %. The most reduction occur in the three-layer mesh. The increase in the compression strength of the concrete also has significant effect on the reduction of damage radios. In general, adding the wire mesh reduce the displacement of the slabs by 25% and the reduction is more efficient in the thinner slabs with lower concrete strength. From the viewpoint of slab performance, which is defined by the amount of displacement and plastic rotation of hinges in the middle of slabs and its supports (limited to the 0.035, 0.07 and 0.14 radian for immediate occupancy, life safety and Collapse prevention respectively), it is observed that the performance of thicker slabs (60 and 80 mm) under the highest blast zone risk were in the life safety or immediate occupancy state. Using wire improved the performance of these slabs. In the thinner slab (40 mm) the performance of slab was lower than the life-safety state which was improved by adding the wire mesh.

**Key Words:** rehabilitation, explosion, steel wire mesh, panel, .