

## Numerical Study on Strengthening of Weak One-Way Slabs with HSC Laminates Subjected to Blast Load

Fereydon OmidNasab<sup>1\*</sup>, Mohammad Afrooznia<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

2- M.Sc. Structural Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### ABSTRACT

High-performance reinforcement concrete due to its ductility and higher energy absorption has many applications in the field of passive defence than the normal concrete. These high-performance materials can be used in many cases, such as seismic improvement of building members. In some cases the structural capacity is increased, which is called strengthening. Strengthening can be carried out by increasing the toughness and increase of resistance. In this study, the use of Explosion Proof concrete in order to protect the structural components (in this study: Weak-one Slabs). In this paper, four weak-one way slab that were strangled in various zones have been studied. The numerical modelling is proceeding in Abaqus / explicit. For modelling the behaviour of concrete, CDMP method has been used. The results of this study show that the energy absorption in the strengthened slab in the tense region has increased to seven times compare to other zone of strengthening. The use of fiber reinforced concrete has a significant effect on the increase of bearing capacity and the ductility of a one-way slab. In other words, the use of high-performance fiber reinforced concrete as a method for the strengthening of structural elements such as slabs will be effective in improving the behaviour of them, especially in the field of passive defence. Also, the maximum tolerable explosive load in compression, tensile and compression-tensile strengthened zone specimens was 1.3, 0.85 and 1.21 times compare with the reference specimen. The results of this study show that the use of high-performance fiber concrete laminates in all zones of the slab simultaneously, increase stiffness and reduce the deflection of the specimen.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 05 March 2019

**Revise Date:** 10 July 2019

**Accept Date:** 23 July 2019

### Keywords:

One-way slab strengthening  
High-performance-fiber  
Concrete  
Strengthening with HSC  
Passive defense  
Blast load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.174081.1796

\*Corresponding author: Fereydon OmidNasab.  
Email address: omidinasab.f@lu.ac.ir

## بررسی عددی رفتار دال‌های ضعیف یک‌طرفه مقاوم‌سازی شده با استفاده از ورقه‌های

### بتن توانمند الیافی تحت بار انفجار

فریدون امیدي نسب<sup>۱\*</sup>، محمد افروزنيا<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

#### چکیده

بتن توانمند الیافی به دلیل ماهیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر نسبت به معمولی، کاربردهای زیادی در زمینه‌ی پدافند غیرعامل دارد. این مصالح توانمند می‌توانند در بسیاری موارد نظیر بهسازی لرزه‌ای اعضای ساختمانی به کار رود. مقاوم‌سازی می‌تواند با افزایش سختی و یا افزایش مقاومت انجام شود. در این بررسی کاربرد ضد انفجاری بتن توانمند الیافی در جهت حفاظت از اجزای سازه به صورت خاص دال، مورد بررسی قرار داده شده است. در این مقاله چهار نمونه دال ضعیف یک‌طرفه که در نواحی مختلف مقاوم‌سازی شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بررسی به صورت مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار *ABAQUS/Explicit* صورت گرفته است. برای تعریف رفتار غیرخطی بتن در این نرم‌افزار از مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن (*CDPM*) که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری است، استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی در ناحیه کششی تا میزان ۷ برابر جذب انرژی را نسبت به سایر روش‌های مطرح شده جهت مقاوم‌سازی، افزایش یافته است. استفاده از بتن توانمند الیافی تأثیر بسزایی در افزایش میزان ظرفیت باربری، شکل‌پذیری دال یک‌طرفه دارد. به عبارت دیگر، استفاده از بتن توانمند الیافی به عنوان یک روش در مقاوم‌سازی اجزای سازه‌ای از جمله دال‌ها، در بهبود رفتار سازه‌ای دال‌های یک‌طرفه بخصوص در زمینه پدافند غیرعامل مؤثر خواهد بود. همچنین حداکثر بار انفجار قابل تحمل در نمونه‌های مقاوم‌سازی در ناحیه فشاری، کششی و فشاری-کششی به ترتیب ۱/۳، ۰/۸۵ و ۱/۱۲ برابر نمونه مرجع بوده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی به صورت هم‌زمان در تمامی نواحی دال موجب افزایش چشم‌گیر سختی آن و کاهش خیز نمونه می‌شود.

کلمات کلیدی: مقاوم‌سازی دال یک‌طرفه، بتن توانمند الیافی، مقاوم‌سازی، پدافند غیرعامل، بار انفجار.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.174081.1796	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.174081.1796">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.174081.1796</a>	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۳۹۸/۰۴/۱۹	۱۳۹۷/۱۲/۱۴
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				فریدون امیدي نسب		
				omidinasab.f@lu.ac.ir		

## ۱- مقدمه

استفاده از بتن‌های توانمند الیافی (HPFRC<sup>۱</sup>) با توجه به ویژگی‌های آن‌ها که در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت، در چند دهه‌ی اخیر بشدت مورد توجه و استفاده قرار گرفته شده است. در سال‌های اخیر و با بررسی دوام سازه‌های بتنی مسلح به‌ویژه در مناطق خورنده و سخت برای بتن این نکته را ثابت می‌کند که مقاومت به‌تنهایی نمی‌تواند جوابگوی کلیه خواص مربوط به بتن از جمله دوام، بتن با مقاومت زیاد، بتن‌های با کارایی بسیار زیاد و ... باشد. در این راستا موضوع بتن‌های با عملکرد بالا (HPC<sup>۲</sup>) مطرح شد که سه خصیصه مهم بتن: مقاومت فشاری<sup>۳</sup>، کارایی (روانی)<sup>۴</sup> و دوام (پایداری)<sup>۵</sup> بتن را تأمین می‌کند. در بتن با عملکرد بالا علاوه بر افزایش مقاومت نسبت به بتن معمولی، کارایی و مقاومت در برابر عوامل خارجی نیز افزایش می‌یابد و ظاهر بتن بهتر می‌شود؛ اما از سوی دیگر، شکنندگی زیاد و مقاومت کششی پایین و مقاومت کم در برابر بازشدگی و انتشار ترک، عیوب عمده بتن می‌باشند [۱].

امروزه سازه‌های بتنی به دلایل زیادی آسیب‌دیده‌اند و تقویت و مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها به‌عنوان راهکاری درست و به‌صرفه برای استفاده بهینه و حداکثری از آن‌ها مطرح می‌گردد. هدف از مقاوم‌سازی این است که حداقل شرایط ساختمان و سازه به پایین‌تر از سطح وظیفه تنزل نیابد و غیرقابل بهره‌برداری نگردد. یکی از روش‌های مقاوم‌سازی می‌تواند رویکرد استفاده از بتن‌های ویژه با توانمندی و عملکرد بالا باشد. رفتار سخت‌شوندگی کرنش در بتن توانمند الیافی مهم‌ترین خصیصه این نوع بتن است، باعث جذب بالای انرژی این نوع بتن هنگام اعمال نیرو به آن می‌شود و این خود به معنی شکل‌پذیری بالای بتن توانمند الیافی است. به‌این ترتیب از بتن توانمند الیافی می‌توان انتظار داشت که بحث مقاوم‌سازی نقش استهلاک‌کننده انرژی را ایفا کند. همچنین با توجه با مطالعات گذشته انجام‌شده بر روی این نوع خاص بتن، به‌راحتی می‌توان طرح اختلاط بهینه را انتخاب و تمرکز اصلی را به‌جای موضوع فناوری بتن این نوع بتن به سمت سازه‌ای کردن کشاند.

رفتار ضد انفجاری بتن توانمند الیافی و قابلیت جذب انرژی بالای این نوع بتن خاص به‌راحتی می‌تواند اهمیت استفاده از این نوع بتن در بحث پدافند غیرعامل<sup>۶</sup> را آشکار سازد.

کامپوزیت‌های سیمانی یا بتنی مسلح الیافی به‌صورت موادی مرکب با دو مؤلفه اصلی شامل الیاف و ملات تعریف می‌شوند. ملات، صرف‌نظر از اینکه خمیر یا بتن باشد، شامل سنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی ویژه است. الیاف نیز دومین مؤلفه اصلی تشکیل کامپوزیت است. الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی با یکدیگر کار می‌کنند که منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌گردد. نقش اصلی الیاف کوتاه پراکنده در کامپوزیت، کنترل بازشدگی و گسترش ترک در ماتریکس است. در شکل (۱) رفتار انواع مختلف بتن تحت کشش مشاهده می‌شود که رفتار سخت‌شوندگی بتن توانمند الیافی، وجه تمایز آن نسبت به سایر بتن‌ها است.

گروه‌های اصلی الیافی که در بتن سازه‌ای استفاده می‌شوند، بر اساس جنس به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الیاف فولادی با اشکال و قطرهای مختلف و نیز میکرو الیاف فولادی

الیاف شیشه‌ای

الیاف مصنوعی ساخته‌شده با مواد مختلف مثل پلی‌پروپیلن (PP<sup>۷</sup>)، پلی‌اتیلن، پلی‌وینیل‌الکل (PVA<sup>۸</sup>) و ...

الیاف کربن، کریلونیتریل و ... [۱].

<sup>۱</sup> High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC)

<sup>۲</sup> High Performance Concrete (HPC)

<sup>۳</sup> High Strength

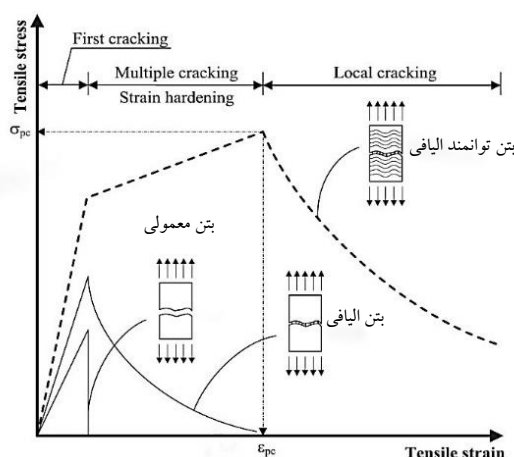
<sup>۴</sup> High Workability

<sup>۵</sup> Durability

<sup>۶</sup> Passive Defence

<sup>۷</sup> Polypropylene

<sup>۸</sup> Polyvinyl Alcohol



شکل ۱: مقایسه رفتار کششی بتن‌های مختلف

انواع دیگری از الیاف نیز وجود دارد که امروزه در کامپوزیت‌های الیافی به کار نمی‌روند. از جمله آن‌ها می‌توان به الیاف گیاهی اشاره کرد که در بتن سازه‌ای با عملکرد بالا مؤثر نمی‌باشند. همچنین الیاف آزیست که به دلیل تأثیر منفی بر سلامت انسان، به‌طور کلی ممنوع شده است [۱].

در ادامه این بخش، خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با بتن الیافی و توانمند و همچنین تحقیقات مرتبط با دال‌های تحت بار انفجار پرداخته شده است.

آگراه، به بررسی مدل اجزا محدود دال‌های بتن‌آرمه الیافی تحت بار انفجار پرداخت. وی بررسی عددی ۱۵ دال دوطرفه تحت مقدار مختلف مواد انفجاری را با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و مدل‌سازی بتن در آن به روش "Brittle Crack" و نرم‌افزار LS-Dyna که در آن مدل‌سازی بتن با استفاده از روش "Winfrith" انجام داد. نتایج بررسی وی نشان می‌دهد که این نوع مدل‌سازی رفتار بتن دقت کافی با مشاهدات آزمایشگاهی دارد [۲].

کوریاج و جسی و نعمان، رینهارت و همکاران، نوع جدیدی از بتن الیافی با الیاف به‌هم‌پیوسته، تحت عنوان بتن مسلح بافته‌شده (TRC<sup>۹</sup>) را ارائه نمودند [۳ و ۴]. نعمان و رینهارت مصالحی را معرفی نمودند که جدا از بتن‌های الیافی (FRC<sup>۱۰</sup>) طبقه‌بندی می‌شدند و شامل یک بخش سخت‌شوندگی کرنش در منحنی تنش-کرنش خود بودند. این مصالح در رده مصالح توانمند با نام کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC<sup>۱۱</sup>) قرار گرفتند. بیشتر اعضای ساخته‌شده با این مصالح، شامل ملات سیمانی بدون درشت‌دانه هستند و به همین دلیل، ملات یا خمیر سیمانی مسلح شده توسط الیاف نام‌گرفته‌اند. در طول رفتار نرم‌شوندگی، تغییر شکل سازه متشکل از بازشدگی ترک-های ریز چندگانه و کشیدگی الاستیک مصالح بین این ترک‌ها است [۵].

بنابینا به بررسی مناسب بودن بتن الیافی برای استفاده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه پرداخت. وی با انجام آزمایش‌های متعدد، با توجه به دلایل زیر، بتن الیافی را برای مصارف مقاوم‌سازی مناسب دانست.

مقاومت در برابر حملات شیمیایی

اتصال مناسب به بتن موجود

دوام مناسب در شرایط آب و هوایی نامناسب

انطباق شیمیایی، الکتریکی و ابعادی و ... با بتن موجود [۶].

<sup>۹</sup> Textile Reinforced Concrete (TRC)

<sup>۱۰</sup> Fiber Reinforced Concrete (FRC)

<sup>۱۱</sup> High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC)

چی با به‌کارگیری سناریوی بارگذاری چند جهتی، مدلی برای منحنی تنش-کرنش بتن یافی تحت بارگذاری چند جهتی ارائه کرد [۷]. حسین تأثیر نوع، اندازه و درصد یاف و ترکیب یاف بر خواص بتن تازه (کارایی و ...) و بتن سخت شده (انرژی شکست، مقاومت کششی، مقاومت فشاری و ...) را بررسی کرد. [۸].

یو و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار دینامیکی دال‌های بتن‌آرمه تحت بار انفجار پرداختند. در بررسی آن‌ها تأثیر میزان مواد منفجره و میزان آرماتور موجود در دال مورد مطالعه قرار گرفته شد؛ که نتایج حاکی از این است که میزان شکت و تخریب دال با میزان مواد منفجره رابطه مستقیم و میزان آرماتور با تخریب دال رابطه معکوس دارد [۹].

فنگ و همکاران به بررسی آزمایشگاهی دال‌های یک‌طرفه بتنی مقاوم‌سازی شده در برابر انفجار با استفاده از میلگردهای BFRP تحت بار انفجار در نزدیکی دال‌ها پرداختند [۱۰].

هدف از این تحقیق، تمرکز بر روی رفتار دال‌های یک‌طرفه دارای میلگردهای BFRP ضعیف مقاوم‌سازی شده با ورقه‌های بتن توانمند یافی تحت بار انفجار است. به این منظور، استفاده از ورقه‌های بتن توانمند یافی در نواحی مختلف (کششی، فشاری، جوانب) دال یک‌طرفه ضعیف جهت بررسی تأثیر محل قرارگیری ورقه‌ها در رفتار دال تحت بار انفجار مدنظر است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- نرم‌افزار مورد استفاده

در این بررسی از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit که یک نرم‌افزار غیرخطی المان محدود است استفاده می‌شود که قابلیت انجام تحلیل‌های خاص دینامیکی خطی و غیرخطی مانند تحلیل‌های انفجار و ضربه را دارا است. این نرم‌افزار به علت داشتن المان‌های متعدد، قابلیت مدل‌سازی بتن، میلگردهای فولادی، بتن مسلح، بتن توانمند یافی و ... را دارد.

برای تعریف رفتار غیرخطی بتن در این نرم‌افزار از مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن (CDPM)<sup>۱۲</sup> که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری است، استفاده شده است. نکته قابل توجه در این نوع مدل‌سازی این است که دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر گرفته می‌شود: ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری [۱۱].

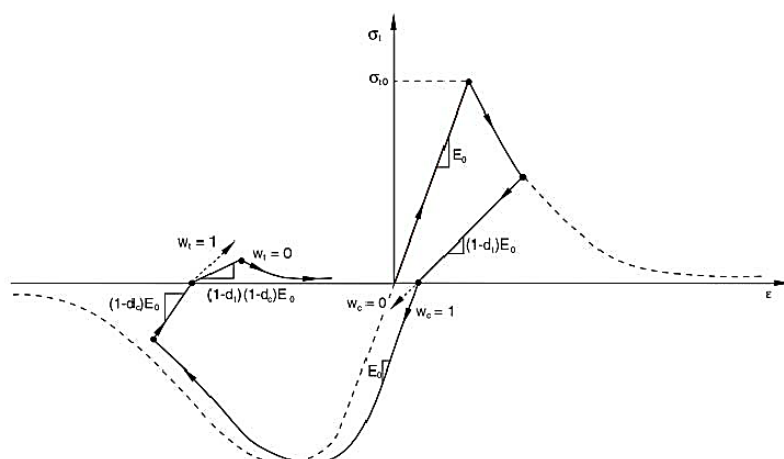
منحنی تنش-کرنش بتن تحت کشش از یک رابطه‌ی خطی تا رسیدن به تنش  $\sigma_{t0}$  (مقاومت کششی نهایی) پیروی می‌کند. از این نقطه به بعد با شروع ترک خوردگی‌ها در بتن، شاخه نرم شونده<sup>۱۳</sup> منحنی آغاز می‌شود که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است. منحنی تنش-کرنش بتن در فشار نیز تا تنش  $\sigma_{c0}$  (تسلیم اولیه) به صورت خطی پیش می‌رود، سپس مرحله غیرخطی و افزاینده منحنی<sup>۱۴</sup> شروع می‌شود و تا نقطه مربوط به تنش  $\sigma_{cu}$  (تنش نهایی) ادامه می‌یابد که همان نقطه‌ی مقاومت فشاری بتن است. از این نقطه به بعد شاخه‌ی نرم شونده‌ی منحنی آغاز می‌شود و بتن تحت فشار، خرد می‌شود (شکل ۲).

پارامترهای  $d_t$  و  $d_c$  پارامترهایی هستند که کاهش سختی بتن را در اثر باربرداری در شاخه‌ی نرم شونده نشان می‌دهند که به علت ترک خوردگی و یا انهدام بخشی از بتن اتفاق می‌افتد. در هنگام باربرداری نمونه‌های بتنی که در شکل با خط چین نشان داده شده است، این کاهش در سختی (مدول کشسانی) بتن رخ می‌دهد. این دو پارامتر مقادیری بین صفر و یک دارند که صفر نشان‌دهنده بتن بدون خسارت و یک نشان‌دهنده از دست رفتن تمام مقاومت بتن است.  $E_0$  نیز نشان‌دهنده‌ی مدول کشسانی بتن قبل از تحمل خسارت است [۱۲].

<sup>12</sup> Concrete Damage Plasticity Method (CDPM)

<sup>13</sup> Strain Softening

<sup>14</sup> Strain Hardening



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش بتن معمولی و بتن توانمند الیافی تحت بارهای کششی و فشاری

منحنی تنش-کرنش بتن توانمند الیافی در فشار و کشش همانند بتن معمولی است. معادله‌های (۱) و (۲) مربوط به تنش و کرنش بتن

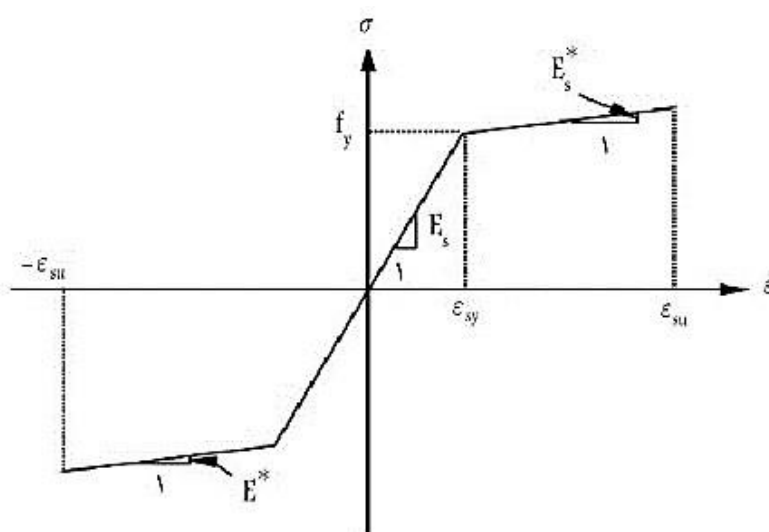
هستند:

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (1)$$

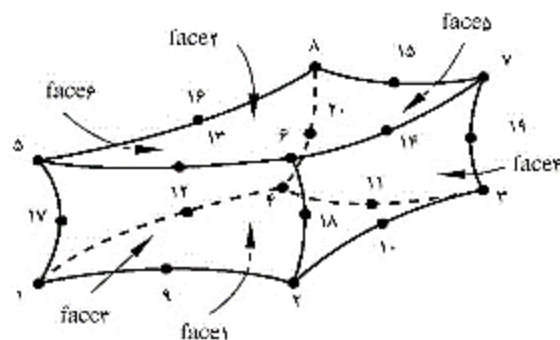
$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $d_t$  و  $d_c$  ضرایب کاهش مدول کشسانی بتن تحت فشار و کشش،  $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$  و  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$  کرنش خمیری بتن تحت کشش و فشار،  $\sigma_t$  و  $\sigma_c$  کرنش کل بتن تحت فشار و کشش است.

منحنی تنش-کرنش استفاده شده برای میلگردها نیز به صورت دوخطی مطابق شکل (۳) معرفی می‌گردد. برای مدل‌سازی بتن معمولی و بتن توانمند الیافی از المان Solid و برای مدل‌سازی میلگردها از المان Truss استفاده می‌شود. در این مقاله از المان مکعبی ۲۰ گرهی انتگرال کاهش یافته Solid که در نرم‌افزار آباکوس به صورت C3D8R معرفی می‌گردد استفاده شده است (شکل ۴). همچنین المان Truss جهت مدل‌سازی میلگرد که در شکل (۵) نشان داده است که در نرم‌افزار به صورت T3D2 نام‌گذاری می‌شود [۱۳].



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش میلگرد مدل‌سازی شده



المان ۲۰ گرهی

شکل ۴: المان مکعبی Solid ۲۰ گرهی



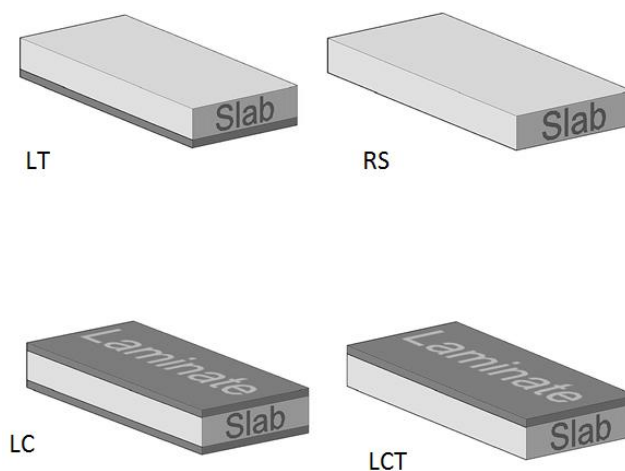
شکل ۵: المان دوبعدی Truss

## ۲-۲- معرفی نمونه‌های مورد بررسی و نحوه مدل سازی

نام گذاری نمونه‌های مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است. ابعاد تمامی نمونه‌ها  $1 \times 0.4 \times 0.1$  متر است [۱۴]. در شکل (۶) نمای سه بعدی نمونه‌ها نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی مصالح و مواد مورد استفاده در این دال‌ها در جدول‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) آورده شده است [۱۵]. جهت مدل سازی رفتار فشاری و کششی بتن توانمند الیافی در نرم افزار آباکوس، از تحقیقات مرتبط انجام شده نمودارهای شکل‌های (۷) و (۸) اقتباس شده‌اند [۱۵].

جدول ۱: معرفی نمونه‌های مورد بررسی [۱۴]

نمونه	نماد	توضیحات
۱	RS	دال شماره یک (نمونه مرجع)
۲	L <sub>C</sub>	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری
۳	L <sub>T</sub>	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه کششی
۴	L <sub>CT</sub>	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه کششی و فشاری



شکل ۶: نمای سه بعدی نمونه‌های مورد بررسی [۱۴]

جدول ۱: مشخصات بتن معمولی مورد استفاده در دال [۱۵]

$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (GPa)	$\nu$
۱۸/۲	۱/۸	۲۳۵۰	۲۰	۰/۲

جدول ۲: مشخصات بتن توانمند الیافی [۱۵]

$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (GPa)	$\nu$
۸۳/۱۰	۴/۵۱	۲۵۴۰	۳۰/۲۰	۰/۲

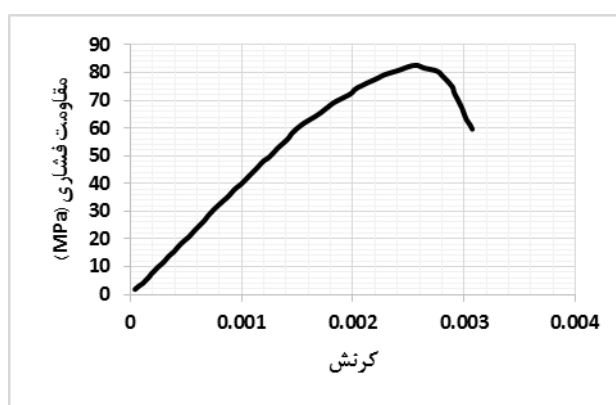
جدول ۳: مشخصات میلگردهای مصرفی [۱۵]

$f_y$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_s$ (GPa)	$E_s$ (GPa)	$\nu$
۳۴۰	۷۵۸۰	۲۱۰	۶/۵	۰/۳

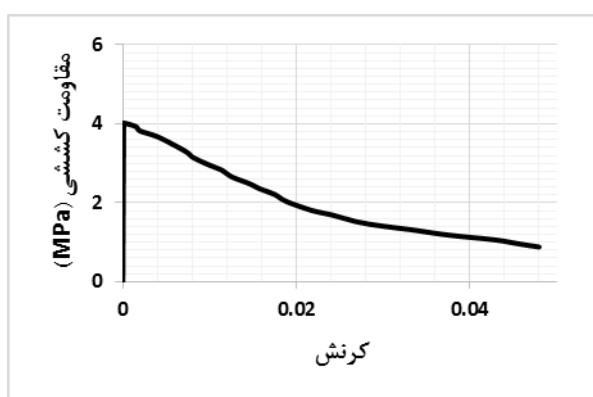
\* فرض شده

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک بتن [۱۵]

پارامتر روانگرایی	K	$fb_0/fc_0$	خروج از مرکزیت	زاویه اتساعی
۸۳/۱۰	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰-۳۱



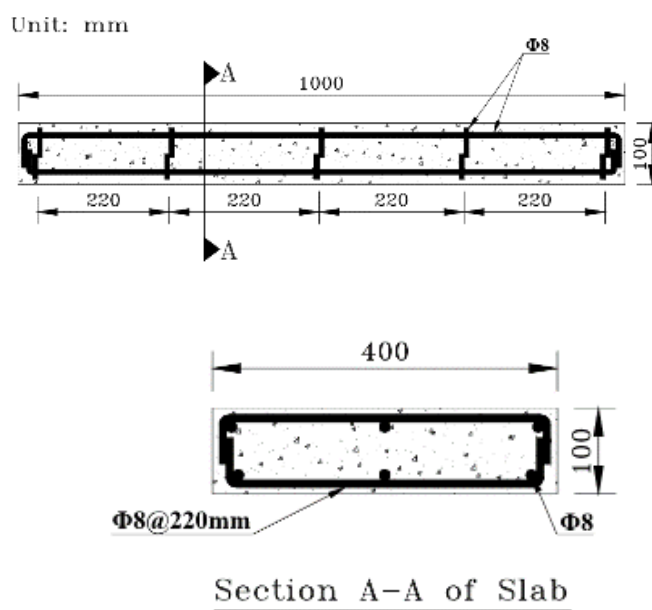
شکل ۷: منحنی تنش-کرنش بتن الیافی توانمند تحت فشار مورد استفاده در آباکوس [۱۵]



شکل ۸: منحنی تنش-کرنش بتن الیافی توانمند تحت کشش مورد استفاده در آباکوس [۱۵]



نحوه میلگرد گذاری در شکل (۹) نشان داده است. همان طور که مشاهده می گردد، تمامی میلگردهای شبکه دال با قطر ۸ میلی متر می باشند [۱۴].



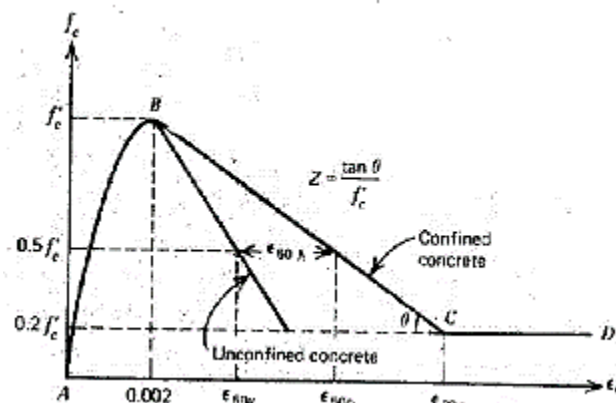
شکل ۹: نحوه میلگرد گذاری دال

لازم به توضیح است، جهت مدل سازی بتن معمولی استفاده در دال ها از مدل رفتاری بتن غیر محصور کنت-پارک [۱۶] استفاده می گردد. در شکل (۱۰) نحوه تعریف منحنی رفتار بتن معمولی در دو حالت بتن محصور و بتن غیر محصور نشان داده است. رابطه این مدل به صورت معادله (۳) است.

$$\sigma_c = f'_{co} \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

که در این رابطه  $\sigma_c$  و  $\epsilon_c$  به ترتیب تنش و کرنش فشاری،  $f'_{co}$  و  $\epsilon'_c$  به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن غیر محصور و کرنش متناظر با آن است، که در آن  $f'_{co}$  برابر  $0.02$  فرض شده است.

برای مدل سازی رفتار کششی بتن معمولی، مقاومت کششی ده درصد مقاومت فشاری فرض شده است.



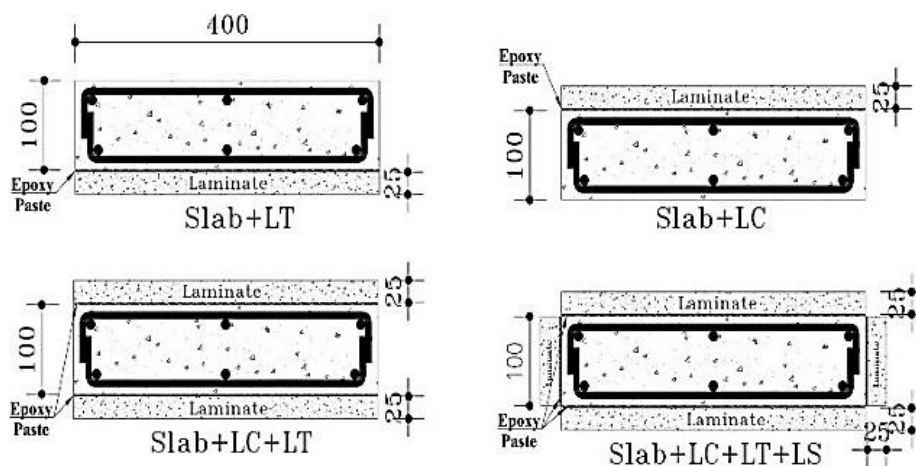
شکل ۱۰: نمایی از مدل Kent & Park برای بتن غیر محصور و محصور [۱۶]

## ۲-۳- نحوه ی مقاوم سازی

اگرچه برخی از محققین برای اتصال ورقه های بتن توانمند الیافی به محل مقاوم سازی از ترکیب چسب اپوکسی و پیچ استفاده کرده اند [۱۷]، اما با توجه به انطباق سختی کامپوزیت الیافی و بتن و عدم نگرانی از لغزش ورقه روی بتن، متداول ترین روش اتصال ورقه به بتن، استفاده از چسب اپوکسی به تنهایی است.

البته محققین برای اطمینان از کامل بودن اتصال، ایجاد یک شبکه از شیارهای نازک و کم عمق را پیشنهاد کرده اند [۱۸]. برای ضخامت ورقه های بتن توانمند الیافی پیش ساخته، محققین ضخامت های در محدوده  $t=0.05h$  تا  $t=0.15h$  را پیشنهاد کرده اند [۱۹]. همچنین یکی از ضخامت های مورد توجه اکثر محققین  $t=0.1h$  است [۱۸ و ۲۰]. در روابط فوق  $t$  ضخامت لایه مقاوم سازی و  $h$  ارتفاع کلی مقطع است.

در این بررسی از ورقه های با ضخامت ۲۵ میلی متر استفاده شده است. در شکل (۱۱) جزییات و محل اتصال لایه های بتن توانمند الیافی به دال ضعیف نشان داده شده است [۱۴]. برای مدل سازی اتصال آن ها به دال ضعیف از قید Tie در نرم افزار آباکوس استفاده شده است که فرض بر اتصال کامل<sup>۱۵</sup> ورقه های بتن توانمند الیافی و دال است [۲۱].

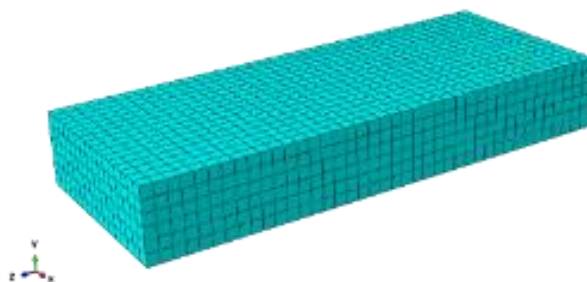


Types of Strengthening the Slabs

Unit: mm

شکل ۱۱: محل های قرارگیری ورقه های بتن توانمند الیافی [۱۴]

لازم به ذکر است که ابعاد المان های Solid جهت مش بندی برابر ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۳) یک نمونه مش بندی منظم دال مقاوم سازی شده با استفاده از شکل المان شش وجهی نشان داده شده است، لازم به ذکر است ابعاد مش بندی برابر ۰/۰۲۵ متر فرض شده اند (شکل ۱۲).

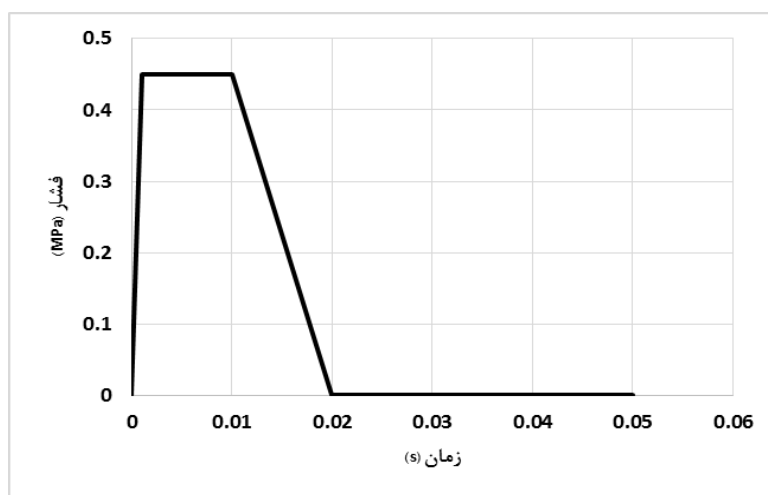


شکل ۱۲: مش بندی یک نمونه دال با استفاده از شکل المان Hex و تکنیک Structured

<sup>15</sup>Perfect Bonding

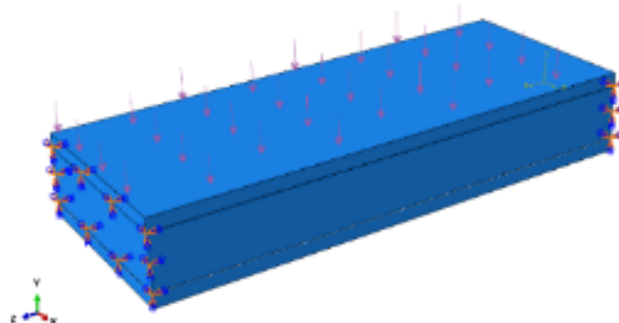
## ۲-۴- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

انفجار یک انرژی سریع، ناگهانی و اتفاقی است. اثرات بعد از نیروی اولیه انفجار را موج انفجار می‌نامند. این موج‌ها می‌توانند به محیط اطراف خسارت‌های بسیاری زیادی وارد کنند. با فرض انفجار ۳۵۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری از دال مطابق TM5-1300، فشار موج انفجار وارد بر سطح دال برابر ۴۵۰۰۰۰ پاسکال در نظر گرفته شده است [۲۲]. در شکل (۱۳)، نمودار تاریخچه‌ی بار انفجار ارائه شده است.



شکل ۱۳: تاریخچه بار انفجاری

پیچیدگی در تحلیل پاسخ دینامیکی سازه‌های تحت اثر بارگذاری انفجار ناشی از اثر نرخ کرنش بالای کرنش، رفتار غیر ارتجاعی مواد، نامطمئنی از محاسبات بارگذاری انفجار و تغییر شکل‌های وابسته زمانی است؛ بنابراین برای تحلیل سازه باید، یک سیستم یک درجه آزاد (SDOF<sup>۱۶</sup>) مدنظر قرار گیرد [۲۳]. جهت مدل‌سازی دال‌ها در نرم‌افزار فرض شده است که دال‌ها در دو طرف دارای شرایط مرزی گیردار هستند. در شکل (۱۴) نحوه مدل‌سازی فشار ناشی از موج انفجار بر روی سطح دال که به صورت بار گسترده است و تکیه‌گاه‌های گیردار در دو طرف دال مشاهده می‌شود.

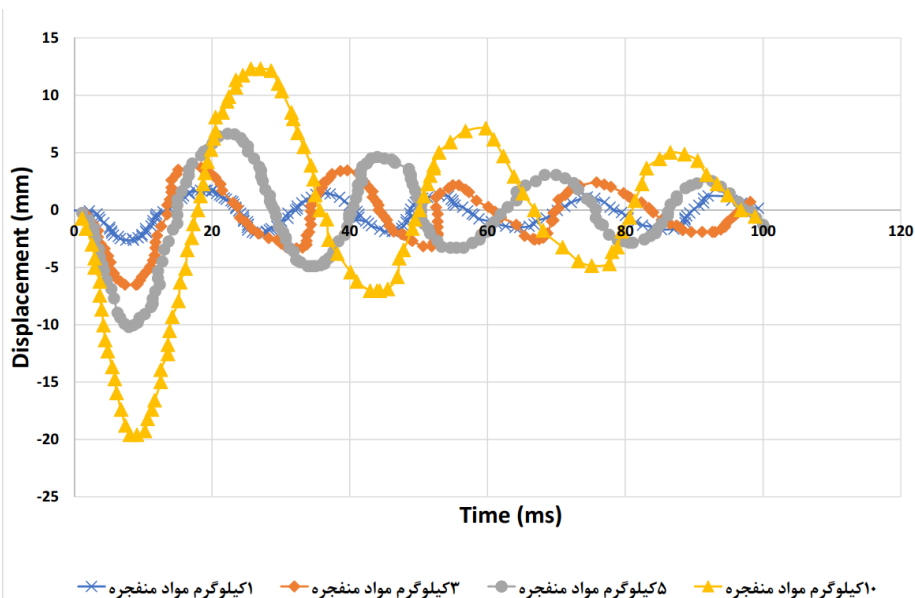


شکل ۱۴: نحوه اعمال فشار ناشی از موج انفجار در نرم‌افزار آباکوس و شرایط مرزی

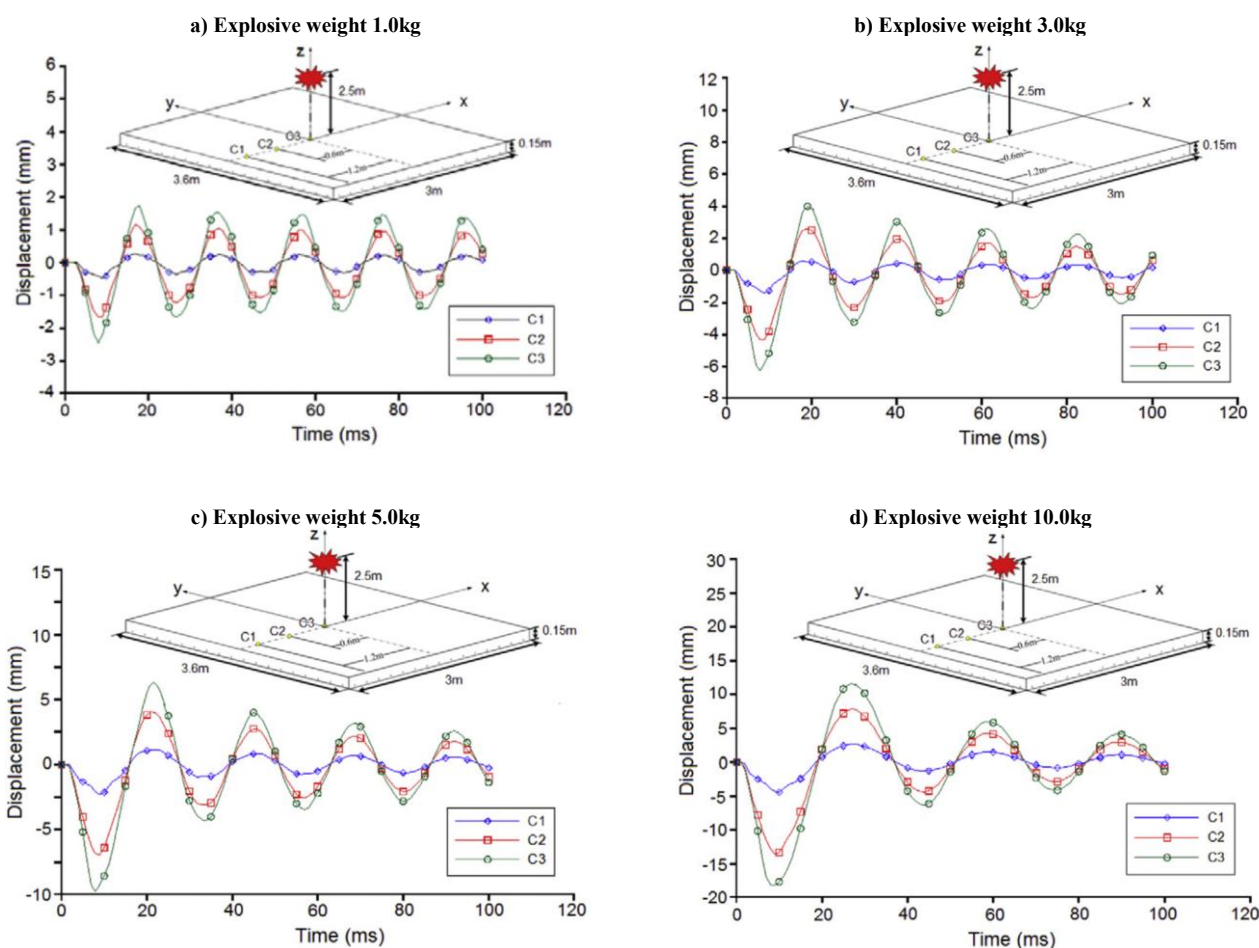
## ۲-۵- صحت سنجی

برای اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج مطالعات آزمایشگاهی تای و همکاران [۲۴]، شبیه‌سازی شده است و نتایج خیز دال براساس شبیه‌سازی عددی برای مقادیر مختلف TNT در شکل (۱۵) ارائه شده است. مقایسه نتایج عددی شکل (۱۵) با نتایج آزمایشگاهی مرجع ۲۳ در شکل (۱۶) صحت مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.

<sup>16</sup> Single Degree Of Freedom (SDOF)



شکل ۱۵: نتایج مدل سازی عددی آزمایشات تای با نرم افزار آباکوس



شکل ۱۶: نتایج خیز اندازه گیری شده در آزمایش تای و همکاران [۲۴]

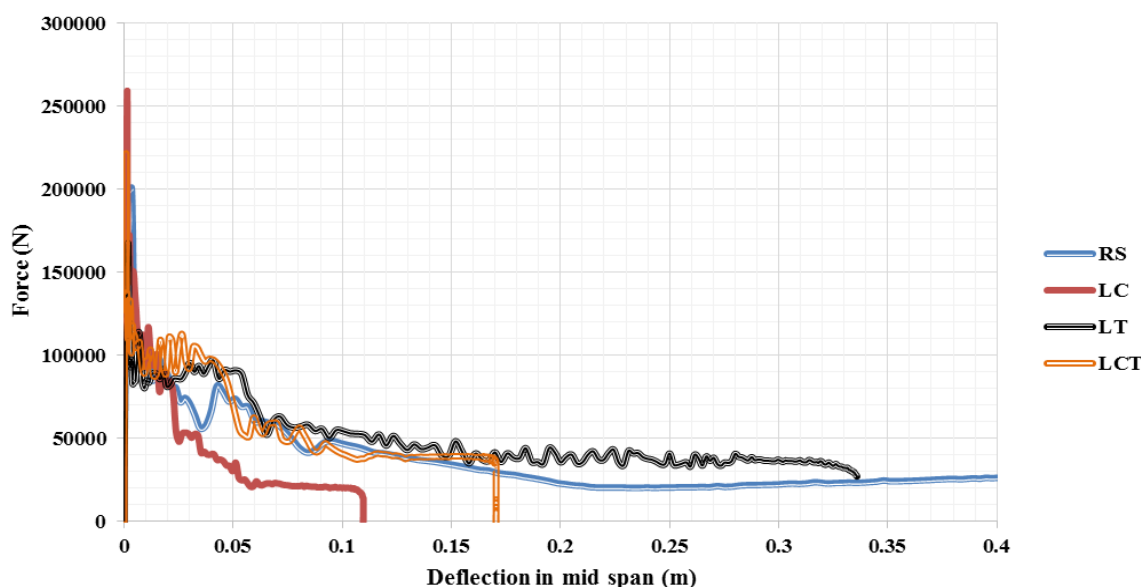
### ۳- نتایج و بحث و بررسی

در این قسمت به بررسی نتایج به دست آمده از خروجی نرم افزار ABAQUS پرداخته می شود. خروجی های مدنظر شامل تغییر مکان وسط دهانه دال طی بارگذاری و میزان اتلاف انرژی پلاستیک دال ها می باشند. همچنین تنش وون میززا ایجاد شده در دال ها و میلگردهای آن ها ارائه گردیده است.

#### • بررسی منحنی نیرو-تغییر مکان

مطابق شکل (۱۵)، بیشترین نیروی قابل تحمل برابر ۲۵۸۰۰۰ نیوتن است که مربوط به دال مقاوم سازی شده در ناحیه فشاری است که این میزان بار قابل تحمل، ۱/۳ برابر دال مرجع است. کمترین میزان نیروی قابل تحمل مربوط به دال مقاوم سازی در ناحیه کششی است که این بار برابر ۱۶۶۰۰۰ نیوتن است. دال مقاوم سازی در ناحیه کششی- فشاری نیز همان طور که مشاهده می گردد، دارای رفتار میانه است. در واقع در دال مقاوم سازی شده در ناحیه فشاری، به دلیل مقاوم سازی ناحیه ای که در معرض بار انفجار قرار دارد بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است. لازم به ذکر است، در تمامی دال ها پس از رسیدن به یک بار حداکثری، نمونه ها به صورت ناگهانی سختی و مقاومت خود را از دست می دهند و پس از آن در نمونه ها کرنش های عمده ای ایجاد می شود.

از نمودار شکل (۱۵) چنین برداشت می شود که نمونه مقاوم سازی شده در ناحیه کششی افت بار کمتری نسبت به سایر نمونه ها داراست که این خود به دلیل ثبات بتن توانمند الیافی در طول بار انفجاری است هر چند که حداکثر بار قابل تحمل آن کمتر است. همچنین شرایط در دال مقاوم سازی در ناحیه فشاری کاملاً عکس است، به طوری که دال با وجود ظرفیت باربری بیشتر، در طول بارگذاری بشدت دچار افت ظرفیت باربری می شود.

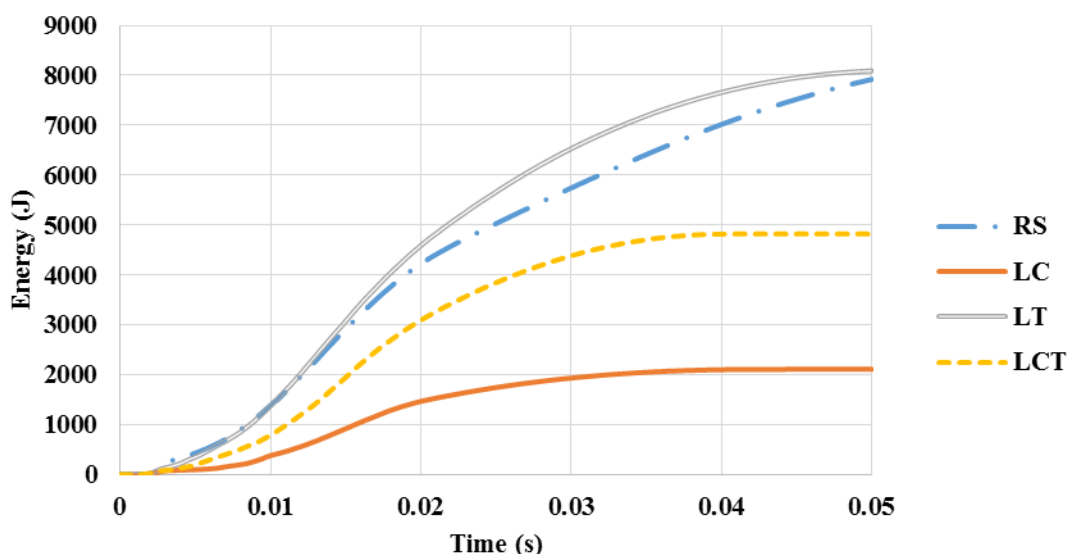


شکل ۱۵: منحنی نیرو - خیز دال های مورد بررسی

#### • بررسی منحنی میزان انرژی اتلاف پلاستیک

مطابق شکل (۱۶)، بیشترین میزان جذب انرژی اتلاف پلاستیک مربوط به نمونه مقاوم سازی شده در ناحیه کششی است و کمترین این میزان انرژی مربوط به دال مقاوم سازی شده در ناحیه فشاری دارد. این میزان جذب انرژی رابطه مستقیمی با میزان تغییر شکل نمونه دارد، به نوعی که هرچه تغییر شکل بیشتر این میزان انرژی نیز افزایش می یابد. به عبارت دیگر مساحت زیر نمودار بار - خیز که برابر انرژی اتلاف انرژی است در نمونه مقاوم سازی شده در ناحیه کششی نسبت به سایر نمونه بیشتر است.

## Plastic Disipation: ALLPD for Whole Model



شکل ۱۶: منحنی میزان انرژی پلاستیک جذب شده - زمان دال‌های مورد بررسی

نکته قابل توجه در شکل (۱۶)، کم بودن میزان جذب انرژی در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری و کششی - فشاری است که دلیل امر مربوط نوع رفتار این دال‌ها در برابر بار انفجار است که به سبب این رفتار وقتی این نمونه‌ها سختی خود را در برابر بار انفجار از دست می‌دهند، دچار افت شدید باربری می‌شوند که این خود یعنی کم شدن مساحت زیر نمودار مذکور و در نتیجه جذب انرژی نمونه کمتر می‌شود. میزان انرژی جذب شده در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری و کششی - فشاری به ترتیب کمتر از نمونه مرجع هستند. همچنین همان‌گونه که در شکل (۱۶) مشاهده می‌گردد، جذب انرژی در لحظه پایانی بارگذاری به میزان حداکثری خود رسیده است که توجیه این مسئله همان میزان تغییر شکل در دال‌ها است.

#### • بررسی تنش وون میز دال‌ها

در شکل (۱۷)، به ترتیب کنتور تنش وون میز در دال مرجع، دال مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری، دال مقاوم‌سازی شده در ناحیه کششی و دال مقاوم‌سازی در ناحیه کششی - فشاری نشان داده شده است؛ که همان‌طور مشاهده می‌شود، این تنش در دال مرجع و نمونه مقاوم‌سازی در ناحیه کششی نسب به دو نمونه دیگر تقریباً ۱/۴ برابر است. همچنین نمونه مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری کمترین تنش در آن ایجاد شده است.

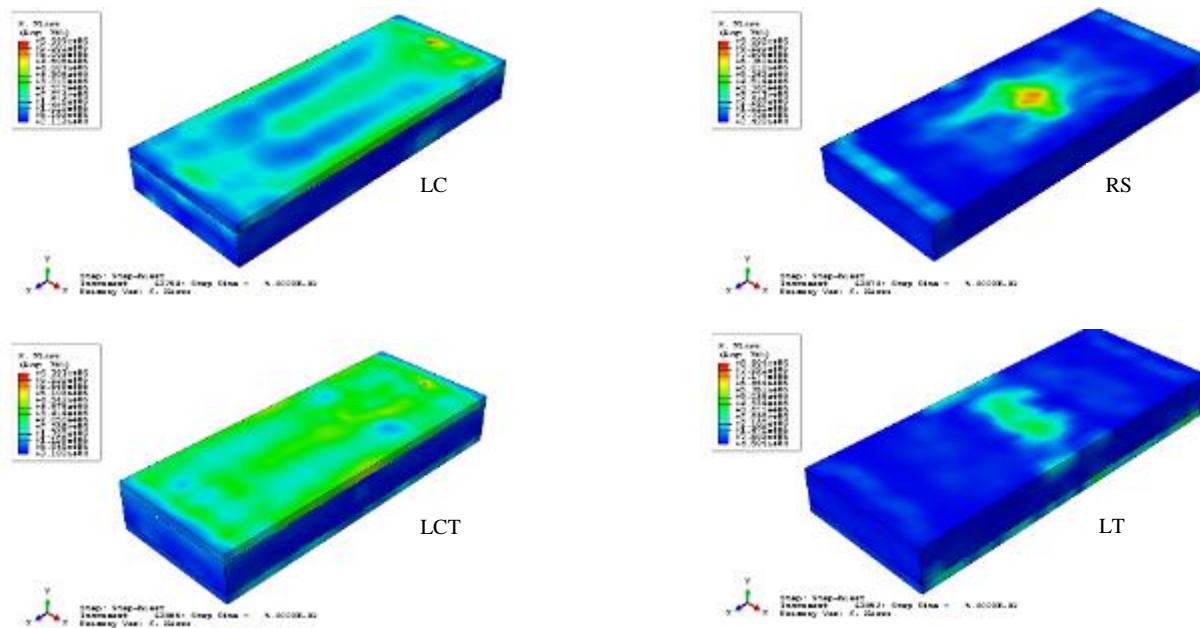
لازم به ذکر که بیشترین تنش ایجاد در نمونه‌های مقاوم‌سازی در قسمت بتن توانمند الیافی بخصوص در ناحیه مجاور بار انفجار رخ داده است که این خود دلیلی بر نقش بسزای این لایه‌ها در برابر نیروی انفجار است.

#### • بررسی تنش وون میز میلگردها

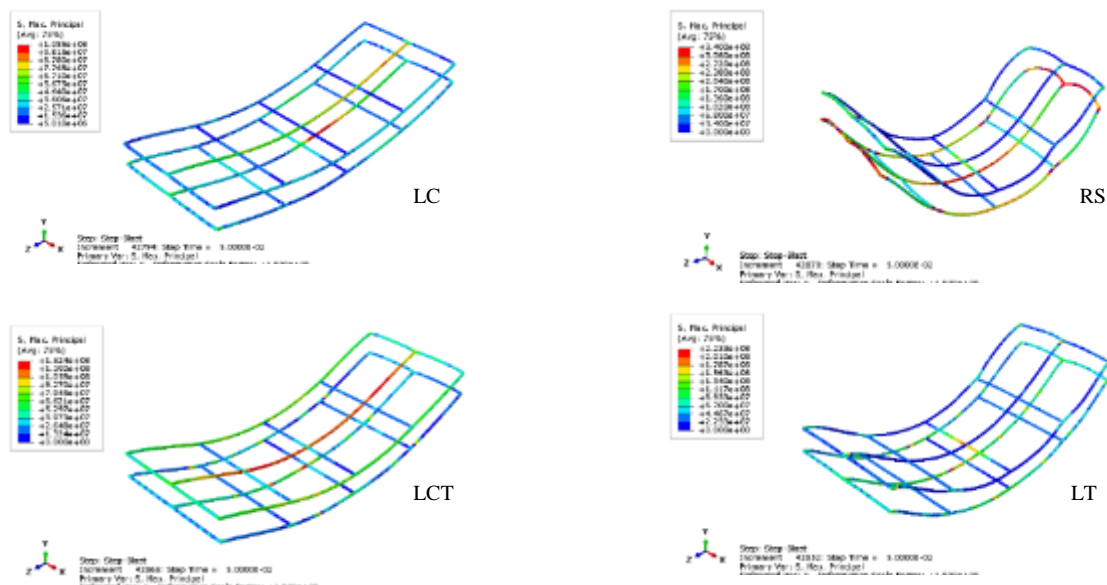
در شکل (۱۸)، کنتور تنش وون میز در میلگردهای دال‌های مورد بررسی نشان داده شده است. مطابق این شکل، کمترین تنش ایجاد شده مربوط به میلگردهای دال مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری است که دلیل آن را می‌تواند در تغییر شکل کمتر این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها دانست. میلگردهای دال مرجع نیز کمترین میزان تنش را دارند.

مطابق شکل (۱۸)، با مقاوم‌سازی دال در ناحیه فشاری می‌توان تنش ایجاد شده در میلگردها را تا شصت درصد کاهش داد.





شکل ۱۷: منحنی میزان انرژی پلاستیک جذب شده-زمان دال‌های مورد بررسی



شکل ۱۸: منحنی میزان انرژی پلاستیک جذب شده-زمان دال‌های مورد بررسی

#### ۴- نتیجه گیری

- با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی نمونه مرجع و نمونه‌های مقاوم‌سازی با استفاده بتن توانمند الیافی، می‌توان نتیجه گرفت که، استفاده از بتن توانمند الیافی تأثیر بسزایی در افزایش میزان ظرفیت باربری، شکل‌پذیری دال یک‌طرفه دارد. به عبارت دیگر، استفاده از بتن توانمند الیافی به‌عنوان یک روش در مقاوم‌سازی اجرای سازه‌های از جمله دال‌ها، در بهبود رفتار سازه‌های دال‌های یک‌طرفه بخصوص در زمینه پدافند غیرعامل مؤثر خواهد بود.

- با توجه به بررسی‌های عددی انجام شده، بیشترین تأثیر در بهبود رفتار سازه‌ای دال یک‌طرفه مربوط به حالتی است که ورقه بتن توانمند حالتی به صورت کامل نواحی کششی و فشاری نمونه را به صورت هم‌زمان پوشش داده است چرا که استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی به صورت هم‌زمان در تمامی نواحی دال موجب افزایش چشم‌گیر سختی آن و کاهش خیز نمونه می‌شود.
- با توجه به هزینه‌بر بودن این روش مقاوم‌سازی و نتایج استخراج شده از آزمایش‌های انجام شده، استفاده از ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری، بجای پوشش تمامی نواحی دال یک‌طرفه به دلایل زیر توصیه می‌شود:
  - از لحاظ بهبود رفتار سازه‌ای و صرفه اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است.
  - با توجه به اهمیت ناحیه در مجاورت بار انفجار، مقاوم‌سازی این ناحیه نسب به سایر نواحی ارجح‌تر است که این خود موجب خرابی دال در برابر انفجار می‌گردد.
  - افزودن ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری موجب کاهش چشم‌گیر تنش در آن‌ها می‌شود (جذب انرژی بالای بتن توانمند الیافی).
  - کاهش ۵۰ درصدی خیز دال مقاوم‌سازی در ناحیه فشاری نسب به سایر نواحی مقاوم‌سازی شده.

## مراجع

- [1] Brandt, AM. (2008). Fibre Reinforced Cement-based (FRC) Composites after over 40 Years of Development in Building and civil Engineering. *Compos. Struct.*, 86, 3-9
- [2] Ågårdh, L. (1997). Fe-Modelling of Fibre Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Load. *J. Phys. IV Colloq.* 7, 723-728
- [3] Curbach, M.; Jeese, F. (1999). High-performance Textile-reinforced Concrete. *Struct. Eng. Int.* 9, 91-289
- [4] Reinhardt, W.; Krüger M.; H, GroBe C.; U. (2003). Concrete Restressed with Textile Fabric. *Adv. Conc. Technol.* 1, 9-231
- [5] Hemmati, A.; Kheyroddin, A.; Sharbatdar, MK. (2013). Using HPFRCC for Increasing the Capacity of a R.C. Frame. *Sci. J. Manag. Syst.* 29-2(3), 97-106
- [6] Banthia, N.; Zanotti, C.; Sappakittipakorn, M. (2014). Sustainable Fiber Reinforced Concrete for Repair Applications. *Constr. Build. Mater.* 67, 12-405
- [7] Chi, Y.; Xu, L.; Yu, H. (2014). Constitutive Modelling of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Using a Non-associated Plasticity and its Numerical Implementation. *Compos. Struct.* 111, 497-509
- [8] Hossain, KMA.; Lachemi, M.; Sasmour, M.; Sonebi, M. (2013). Strength and Fracture Energy Characteristics of Self-Consolidating Concrete Incorporating Polyvinyl Alcohol, Steel and Hybrid Fibres. *Constr. Build. Mater.* 45, 9-20
- [9] Yau, Sh.; Zhang, D.; Chen, X.; Lu, F.; Wang, W. (2016). Experimental and Numerical Study on the Dynamic Response of RC Slabs under Blast Loading. *Eng. Fail. Anal.* 66, 9-120
- [10] Feng, J.; Zhou, Y.; Wang, P.; Wang, B.; Zhou, J.; Chen, H.; Fan, H.; Jin, F. (2017). Experimental Research on Blast-Resistance of one-Way Concrete Slabs Reinforced by BFRP Bars Under Close-in Explosion. *Eng. Struct.* 150, 61-550
- [11] Yao, Sh.; Zhang, D.; Chen, X.; Lu, F.; Wang, W. (2017). Finite Element Modelling of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Using Modified Concrete Damaged Plasticity. *Eng. Struct.* 148, 23-35
- [12] Manual ABAQUS. (2016). Getting Started with ABAQUS.
- [13] SoroushNia, S.; Najafi, H.; Mamghani, M.; Mehrvand, M. (2014). The Most Complete Practical Reference of ABAQUS (Civil Special). 3<sup>rd</sup> Edition; Negarand Danesh Press, Tehran, Iran.
- [14] Afrooznia, M. (2016) Experimental Study on Strengthening of Weak One-Way Slabs with Precast High-Performance Fiber Concrete Laminates. M.Sc. Thesis, Semnan University, Semnan, Iran.
- [15] Bassuni Othmna, H.A. (2016). Performance of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Plates under Impac Loads. Ph.D. Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada.
- [16] Park, R.; Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. John Wiley and Sons.
- [17] Bedirhanoglu, I.; Ilki, A.; Kumbasar, N. (2013). Precast Fiber Reinforced Cementitious Composites for Seismic Retrofit of Deficient RC Joints – A Pilot Study. *Eng. Struct.* 52, 192-206.
- [18] Alaei, F.J.; Karihaloo, B.L. (2003). Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC. *J. Compos. Constr.* 7
- [19]. Safdar, M.; Matsumoto, T.; Kakuma, K. (2016). Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Repaired with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Compos. Struct.* 157, 60-448
- [20] Martinola, G.; Meda, A.; Plizzari, GA.; Rinaldi, Z. (2010). Strengthening and Repair of RC Beams with Fiber Reinforced Concrete. *Cement Concrete Comp.* 32, 9-731
- [21] Shahbazi, R.; YekrangNia M. (2015). Practical Guide of ABAQUS Along with Structural and Geotechnical Problems. 3<sup>rd</sup> Edition, Elme Omran Press, Tehran, Iran.
- [22] TM5-1300. (1990). Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions. USA.
- [23] Kheyroddin, A.; Anvari, A.M. (2014). Loading of Structures. 3<sup>rd</sup> Edition, Semnan University Press, Semnan, Iran.
- [24] Y.S. Tai, T.L. Chu, H.T. Hu, J.Y. Wu (2011). Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 56(3), 140-147