

مقاوم سازی دال های بتن مسلح زیر بار انفجار با ترکیب CFRP-PU و GFRP-PU

رضانعلی ایزدی فرد^{۱*}، لیدا متقی^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(تاریخ وصول: ۹۷/۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۶)

چکیده

برای کاهش آسیب سازه‌ها زیر بارگذاری انفجاری، می‌توان دال‌های بتن مسلح موجود را با ورق‌های CFRP و GFRP که موادی با مقاومت بسیار زیاد و با رفتار الاستیک هستند بهسازی و مقاوم‌سازی نمود. در این مقاله با مدل‌سازی عددی نمونه‌هایی از دال‌های بتن مسلح با و بدون تقویت، نشان داده شد که استفاده از ورق‌های فوق‌الغیر در کاهش تغییر شکل دال مؤثرند ولی بر ظرفیت جذب انرژی سازه نمی‌افزایند. استفاده از پوشش Polyurea (PU) با رفتار الاستوپلاستیک بر روی ورق‌های فوق، علاوه بر کاهش تغییر شکل، جذب انرژی را تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد. این ترکیب تقویتی به نحوه استقرار حساس است به طوری که اگر پوشش PU بین بتن و ورق‌های سخت قرار گیرد کارایی آن نسبت به حالت قبل ۳۰٪ کاهش خواهد یافت. در حالتی که تقویت در وجه رو به انفجار نصب گردد نسبت به نصب در وجه پشتی دال، جذب انرژی را تا ۵۰٪ می‌افزاید. همچنین نشان داده شد که استفاده از PU به تنهایی مفید نیست و باید با مواد سخت توأمان به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: بار انفجار، بهسازی، دال بتن مسلح، Polyurea، ترکیب PU-FRP.

RC Slabs Retrofitting Against Blast Loading by GFRP-PU and CFRP-PU

R. A. Izadifard^{*}, L. Mottaghi

Imam Khomeini International University

(Received: 5/15/2018, Accepted: 10/28/2018)

Abstract

For the purpose of reducing structural damage against blast loading, fiber reinforced polymers sheet (CFRP, GFRP) can be used to retrofit the RC slabs. In this study, specimen of reinforced concrete slabs with or without retrofitting are modeled numerically. The results show that using high resistant, elastic material such as FRP sheets, are effective in reducing deformation of slabs, but it doesn't significantly increase the energy absorption capacity of structure. Using Polyurea (PU) coating with elastoplastic behavior on the FRP sheets, in addition of deformation reducing, will increase the absorption of energy up to 40 percent. In this combination, layer arrangement has an important role, so that if the PU coating is positioned between concrete and hard sheets, its efficiency will be reduced by 30% compared to the previous arrangement. When the reinforcement element is placed in front of the slab, it will increase the energy absorption up to 50 percent compared to the state where it is placed in the back of the slab. It has been also shown that PU alone is not useful and it should be used with stiffeners for better results.

Keyword: RC Slabs, Blast Loading, Retrofitting, Polyurea, FRP.

۱- مقدمه

هر سال تعداد بی‌شماری حادثه مرتبط با انفجار به علت فعالیت‌های تروریستی در سراسر جهان اتفاق می‌افتد، این وقایع نه تنها باعث آسیب و یا خرابی سازه‌ها می‌شوند بلکه تلفات انسانی زیادی نیز در پی دارند. اگرچه بتن نسبت به مواد سازه‌ای دیگر ظرفیت و مقاومت قابل توجهی دارد، اما بسیاری از سازه‌های بتنی موجود نیاز به بهسازی دارند. این سازه‌ها می‌توانند با صفحات فلزی یا ورق‌های ترکیبی الیاف برای بهبود ظرفیت جذب انرژی سازه‌ها و محدود کردن خرابی سازه‌ها در برابر انفجار مقاوم‌سازی شوند. بهسازی سازه‌های بتنی در معرض بارهای انفجار با استفاده از FRP به علت راحتی نصب و چسبندگی با سازه‌ها، مزایای زیادی نسبت به دیگر مواد بهسازی دارد. از این رو استفاده از موادی چون CFRP و GFRP در تقویت ساختمان‌ها در برابر بارهای مختلف همچون زلزله و انفجار متداول شده است.

پانتلیدس و همکاران [۱] برای درک بهتر از عملکرد انواع مختلف از پانل‌های بتنی بهسازی شده تحت بار انفجار، آزمایش‌های انفجار را بر روی پانل‌های دیوار انجام داده‌اند. در این پانل‌ها تغییر در ضخامت پانل‌ها، نوع بتن (RC، FRC)، نوع بهسازی داخلی یا خارجی، فاصله و میزان مسلح کردن شامل میله‌های فولادی و نوارهای GFRP داخلی، لایه‌های GFRP خارجی، برای بهسازی در نظر گرفته شده است و عملکرد مطلوب دیوارهای بتن مسلح با صفحات FRP را نشان داده است. رزاق پور و همکاران [۲] با استفاده از ماده انفجاری ANFO در فاصله ۳ متری از مرکز دال‌های بهسازی شده با GFRP، چند آزمایش تجربی انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داده است که استفاده از GFRP برای بهسازی در برابر بارهای انفجاری کم باعث بهبود عملکرد شده است اما برای بارهای شدید انفجاری به دلیل آسیب اساسی به بدنه بتنی تأثیر قابل توجهی در عملکرد دال نداشته است. قلی پور [۳] تیرهای بتن مسلح با و بدون پوشش CFRP را تحت مقادیر متفاوت ماده منفجره TNT قرار داده و نشان داد تقویت تیر بتنی با ورق‌های CFRP موجب افزایش مقاومت و کاهش تغییر شکل تیر شده است.

علاوه بر آزمایش‌های تجربی، مطالعات عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای بررسی اثر لایه‌های FRP در تقویت المان‌های سازه‌ای توسط برخی از محققین انجام شده است. نام و همکاران [۴] آزمایش‌های رزاق پور و همکاران [۲] را با استفاده از آنالیز المان محدود و با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در بتن و فولاد و همچنین با در نظر گرفتن امکان جداشدگی لایه‌های GFRP مدل‌سازی کرده و خروجی نرم‌افزار را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند.

موادی مانند CFRP و GFRP اگرچه دارای مقاومت و سختی زیادی هستند ولی رفتار آن‌ها کاملاً الاستیک بوده و فاقد محدوده پلاستیک هستند، از این رو اعضای تقویت شده با FRP شکننده بوده و شکل‌پذیری مناسبی از خود نشان نمی‌دهند. برای جبران این نقیصه استفاده از مواد

و روش‌های مناسب که بتواند همراه با افزایش مقاومت و سختی، شکل‌پذیری را نیز تقویت نماید مهم خواهد بود.

تکالور و همکاران [۵] به‌طور آزمایشگاهی رفتار خرابی و مقاومت انفجار صفحات با ترکیبات ساندویچی و لایه‌بندی شده با Polyurea (PU) و E-glass Vinyl Ester (EVE) را تحت بارگذاری انفجاری حاصل از شاک تیوپ ارزیابی کرده‌اند. واکنش صفحات با استفاده از یک دوربین با سرعت بالا ثبت شده است. مقایسه جابه‌جایی و رفتار خرابی نشان داده است که استفاده از PU شکل‌پذیری را مانند مقاومت انفجاری افزایش می‌دهد. علاوه بر این ساندویچ کردن PU بین دولایه EVE مقاومت انفجار را نسبت به حالت لایه‌ای افزایش می‌دهد. یه‌ی و همکاران [۶] صفحات ساندویچی که دارای هسته مرکزی از فوم بوده را در دو حالت تحت فشار شاک، در نرم‌افزار شبیه‌سازی کرده‌اند. جذب انرژی در حالتی که در سمت رو به انفجار از Polyurea زیر لایه CFRP استفاده شده نسبت به حالتی که در دو سمت فوم از CFRP استفاده شده بیشتر بوده است. سمایی و همکاران [۷] اثر Polyurea را در عملکرد صفحات دولایه‌ای (فلز-PU) تحت بارهای انفجار با استفاده از یک مدل المان محدود در نرم‌افزار Ls-Dyna شبیه‌سازی کرده‌اند. برای هر یک از ورق‌ها با ضخامت مختلف، حالات PU در قسمت رو به انفجار، PU در قسمت پشت صفحه فولادی و صفحه فولادی با ضخامت معادل دو مورد قبلی، همچنین دو نوع بارگذاری مستقیم و بارگذاری از طریق یک واسطه تحلیل شده است. نتایج نشان داد وقتی Polyurea با ضخامت کافی در قسمت پشت صفحه فلزی استفاده می‌شود عملکرد سامانه دولایه‌ای (PU- صفحه فلزی) نسبت به دو مورد دیگر بهبود می‌یابد. همچنین نشان داده شد که ضخامت PU عامل مهمی در کاهش اثر انفجار است. ها و همکاران [۸] از ترکیب CFRP- Polyurea برای بهسازی دال‌های بتنی در آزمایش انفجار با ۱۵/۸۸ کیلوگرم TNT در فاصله ۱/۵ متری استفاده نمودند. نتایج جذب انرژی نشان داد که ترکیب CFRP-PU برای بهسازی دال می‌تواند مفید باشد.

در تکمیل مطالعات محققان فوق، در این نوشتار تأثیر بهسازی دال‌های بتنی با استفاده از ترکیب "GFRP-Polyurea" و "CFRP-Polyurea" در افزایش مقاومت و نیز جذب انرژی موج انفجار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به‌منظور افزایش دقت تحلیل نسبت به مطالعات پیشین، نرخ کرنش مصالح به‌دقت در مدل‌سازی عددی لحاظ شده است. همچنین با تحلیل‌های متعدد، اثر موقعیت قرارگیری هر یک از لایه‌های تقویت مورد بررسی دقیق قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی

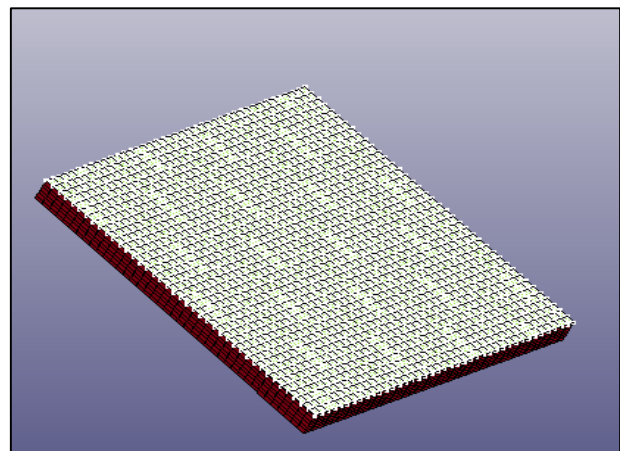
در این تحقیق، دال بتن مسلح شامل بدنه بتنی و آرماتورهای فولادی به همراه صفحات تقویتی به روش (Explicit) در نرم‌افزار Ls-Dyna شبیه‌سازی عددی شده است.

۱-۲- نرم‌افزار استفاده شده برای مدل‌سازی

در سال ۱۹۷۶ نرم‌افزار Dyna3D در مرکز تحقیقات Lawrence Livermore و به‌وسیله هاکویست ارائه شد که پایه نرم‌افزار LS-DYNA است. مهم‌ترین کاربرد این نرم‌افزار تحلیل تنش در سازه‌هایی است که تحت بارگذاری ضربه و انفجار قرار دارند. نرم‌افزار LS-DYNA نوعی کد المان محدود توانمند برای تحلیل تغییر شکل‌های دینامیکی بزرگ پلاستیک در سازه‌ها است. روش تحلیل در این نرم‌افزار، روش صریح (Explicit) است و مسائل دینامیکی را با پردازشگر صریح حل می‌کند. پردازشگر ضمنی (Implicit) در این نرم‌افزار وجود دارد که در تحلیل سازه‌ها و انتقال حرارت و مسائل استاتیکی قابل استفاده است [۹]. مدل‌سازی و تحلیل رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار و ضربه به کمک نرم‌افزارهای مختلف المان محدود انجام می‌گیرد. با توجه به فشار زیاد اعمالی، نرخ کرنش بالا و تابع زمان بودن مسائل، رفتار ماده باید به‌صورت غیر خطی هندسی و غیر خطی ماده در نظر گرفته شود. بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA از مزیت خاصی برخوردار است.

۲-۲- بار انفجار

ماده منفجره استفاده شده در این تحقیق بر اساس آزمایش تجربی مطالعات قبلی [۲ و ۱۰] از نوع ANFO و به مقدار ۳۳/۴ کیلوگرم در فاصله ۳ متر از مرکز دال انتخاب شد. در مدل‌سازی، بار انفجار با استفاده از نرم‌افزار CONWEP تولید شده است. CONWEP نرم‌افزاری برای محاسبه فشار انفجار بر اساس وزن و فاصله از مرکز انفجار است. روش CONWEP در گزینه LOAD-BLAST نرم‌افزار Ls-Dyna موجود است. این روش در دستورالعمل فنی TM5-855-1 آمریکا بیان شده است [۱۱]. شکل (۱) سطح بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سطح بارگذاری.

۳-۲- مدل بتن و فولاد

از مدل ماده (MAT_72_REL3) CONCRETE_DAMAGE_REL3 برای مدل‌سازی بتن و از مدل PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) برای مدل‌سازی فولاد استفاده شده است. در هر دو مدل اثرات افزایش نرخ کرنش در نظر گرفته می‌شود. مشخصات مصالح مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول (۱) بیان شده است. وقتی سازه‌ها در معرض بار انفجاری قرار می‌گیرند، به دلیل سرعت بسیار بالای بارگذاری، مصالح بتن و فولاد ممکن است نرخ کرنش‌هایی بیش از $1000s^{-1}$ را تجربه کنند. در این نرخ‌های کرنش، مقاومت ماده به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۱۲]. کمیته بین‌المللی بتن CEB-SIF در ۱۹۹۰، ضرایب افزایش دینامیکی را برای لحاظ کردن اثر نرخ کرنش توصیه کرده است [۱۳]. ضریب افزایش دینامیکی مقاومت کششی بتن از طریق روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود:

$$TDIF = \frac{f_{td}}{f_{ts}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_{ts}}\right)^{1.0166} \quad \text{for } \dot{\epsilon}_d \leq 30s^{-1} \quad (1)$$

$$TDIF = \frac{f_{td}}{f_{ts}} = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_{ts}}\right)^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon}_d > 30s^{-1} \quad (2)$$

در رابطه‌های فوق، f_{td} مقاومت کششی دینامیکی بتن در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_d$ ، f_{ts} مقاومت کششی استاتیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_{ts} = 3 \times 10^{-6}s^{-1}$ و $\log \beta = 7.11\delta - 2.33$ که:

$$\delta = \frac{1}{\left(10 + \frac{6f'_c}{f'_{co}}\right)}$$

$f'_{co} = 10\text{Mpa}$ و f'_c مقاومت فشاری استاتیکی تک‌محوره نمونه بر حسب مگا پاسکال است. روابط تجربی نرخ کرنش برای فشار به‌صورت روابط (۳ و ۴) است:

$$CDIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_{cs}}\right)^{1.026\delta} \quad \text{for } \dot{\epsilon}_d \leq 30s^{-1} \quad (3)$$

$$CDIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = \gamma(\dot{\epsilon}_d)^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon}_d > 30s^{-1} \quad (4)$$

در رابطه‌های فوق، f_{cd} مقاومت فشاری دینامیکی بتن در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}_d$ ، $\dot{\epsilon}_{cs} = 3 \times 10^{-6}s^{-1}$ و $\log \gamma = 6.156\alpha - 0.49$ و $\alpha = \left(5 + \frac{3f_{cu}}{4}\right)^{-1}$ و f_{cs} مقاومت فشاری استاتیکی و f_{cu} مقاومت فشاری استاتیکی نمونه مکعبی بر حسب مگا پاسکال است. از آنجا که حداکثر ضریب افزایش دینامیکی فشاری و کششی که برای بتن در نظر گرفته می‌شود، تا نرخ کرنش $300s^{-1}$ ارائه شده است در نرخ کرنش‌های بالاتر، ضریب افزایش دینامیکی مطابق با $300s^{-1}$ در نظر گرفته می‌شود.

برای فولاد ضریب افزایش دینامیکی طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}}\right)^{\alpha} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.074 - 0.040 \frac{f_y}{414}$$

فرض شده است. بر اساس تحلیل‌های مختلفی که برای سنجش حساسیت جواب به اندازه مش انجام شده است اندازه مش المان‌ها ۲/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. طبق شرایط آزمایش کلیه درجه‌های آزادی انتقالی و چرخشی در تکیه‌گاه‌ها ثابت شده و گیردار فرض شده است (شکل ۲).

جدول ۱- مشخصات مصالح.

۴۲	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	بتن	
۴	مقاومت کششی (مگا پاسکال)		
۲۹	مدول یانگ (گیگا پاسکال)		
۰.۱۶۷	ضریب پواسون		
۴۸۰	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	میلگرد	
۶۰۰	تنش نهایی (مگا پاسکال)		
۲۷.۵	Ex (گیگا پاسکال)	GFRP	
۱.۳	Ey (گیگا پاسکال)		
۰.۲۷	Gxy=Gyz=Gxz (گیگا پاسکال)		
۰.۱۲	νxy - ضریب پواسون		
۲۱۰۰	وزن مخصوص (kg/m ^۳)		
۱.۳	ضخامت (میلی‌متر)		
۵۵.۰۲۲	E1, E2 (گیگا پاسکال)		
۱۰.۷۹۲	E3 (گیگا پاسکال)		
۲۱.۳۱۹	G12 (گیگا پاسکال)		
۴.۹۵۳	G13, G23 (گیگا پاسکال)		
۰.۲۹	ν12 ضریب پواسون	CFRP	
۰.۲۴۸	ν13, ν23 ضریب پواسون		
۱۵۸۰	وزن مخصوص (kg/m ^۳)		
۱.۳	ضخامت (میلی‌متر)		
۰.۸۶	Gxy= Gyz= Gxz (گیگا پاسکال)		
۱۰۷۰	وزن مخصوص (kg/m ^۳)		
۱۰	مقاومت تسلیم فشاری (مگا پاسکال)		
۵۴	مقاومت کششی (مگا پاسکال)		
			اپوکسی

جدول ۲- مشخصات معادلات Polyurea

پلاستیسیته و پارامترهای حالت (EOS) معادلات برای Polyurea		
مدل	شماره معادله	پارامترها
Plasticity	۶	$\sigma_y^0 = 10Mpa, E_h = 10Mpa,$ $a_1 = 2, a_2 = 0$
Gruneisens EOS	۷	$\gamma_0 = 1.55 C = \frac{25m}{s}, a = 1$ $S_1 = 2, S_2 = S_3 = 0$

در رابطه فوق، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش بر حسب s^{-1} و f_y مقاومت تسلیم بر حسب مگا پاسکال است. این رابطه برای میله‌های فولادی با مقاومت تسلیم بین ۲۹۰ تا ۷۱۰ مگا پاسکال و نرخ کرنش بین $10^{-4}s^{-1}$ تا $225s^{-1}$ معتبر است [۱۴].

۴-۲- مدل ماده FRP

سامانه‌های FRP در انواع مختلفی مانند CFRP، GFRP و AFRP در بازار یافت می‌شوند که برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، به سطح خارجی آن‌ها چسبانده می‌شوند. محدوده چگالی CFRP از ۱/۵ تا ۱/۶ و محدوده چگالی GFRP از ۱/۲ تا ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که حدود ۴ تا ۶ برابر کمتر از چگالی فولاد است [۳]. در این تحقیق از GFRP و CFRP برای بهسازی استفاده شده است و مدل در نظر گرفته شده برای این ماده (MAT 002-Orthopic-Elastic) Orthotropic-Elastic است که مناسب برای مدل کردن رفتار است [۱۵]. مشخصات این مصالح در جدول (۱) ارائه شده است.

۵-۲- مدل ماده Polyurea

Polyurea در سال ۱۹۸۹ توسط یک شرکت شیمیایی (Texaco) تولید شد. اگرچه این ماده به‌طور گسترده در پوشش‌های صنعتی استفاده می‌شود، اما با توجه به خواص مکانیکی، در ساختمان‌های فولادی و بتنی در برابر بارهای انفجار هم کاربرد دارد [۱۶]. ماده Polyurea رفتاری در محدوده الاستیک و پلاستیک دارد و با افزایش کرنش و نرخ کرنش، افزایش سختی از خود نشان می‌دهد. بنابراین در این مقاله با یک مدل الاستو پلاستیک هیدرو دینامیکی و یک معادله حالت توصیف شده است [۶]. این مواد به‌صورت پلاستیک غیر قابل فشردگی با مقاومت تسلیم وابسته به فشار فرض شده است.

$$\sigma_y = \sigma_y^0 + E_h \epsilon^p + (a_1 + a_2 p) \max[p, 0] \quad (۶)$$

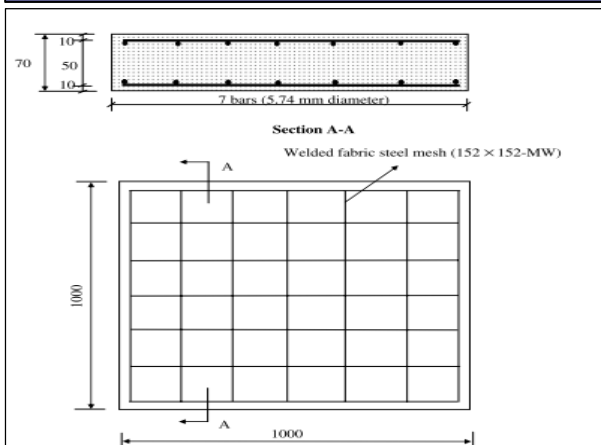
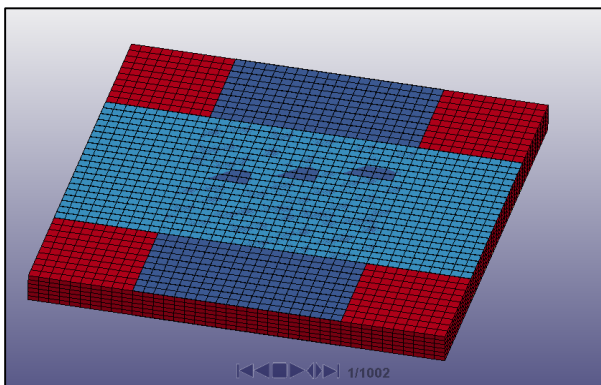
رفتار ماده تحت بارهای هیدرو استاتیکی ناشی از فشار شوک با معادله grunesin توصیف شده است.

$$\sigma_y = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{1}{2} \gamma_0 \right) \mu - \frac{1}{2} a \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{(1 + \mu)} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu) e \quad (۷)$$

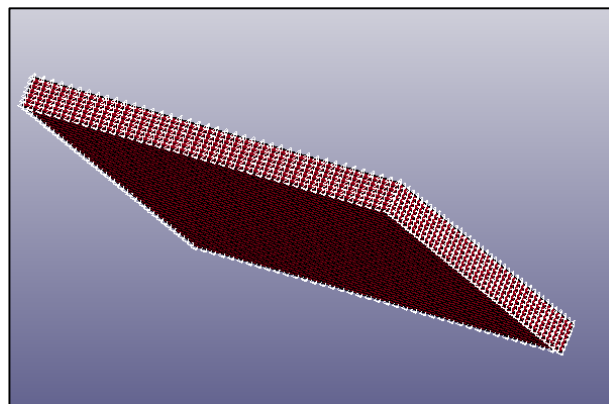
مدل ماده (MAT 10-Elastic Plastic Hydrodynamic) موجود در نرم‌افزار، برای مدل‌سازی Polyurea استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول (۱) و مقادیر پارامترهای استفاده شده در این معادلات در جدول (۲) ارائه شده است [۶].

۶-۲- مدل‌های المان محدود

برای مدل‌سازی بتن و فولاد به ترتیب از المان Solid و Beam در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش استفاده شده است. المان Shell برای FRP و المان Solid برای Polyurea به‌کار رفته است. اتصال بین PU-FRP کامل و اتصال بین بتن با ورق‌ها Automatic-Surface to Surface-Tie Break



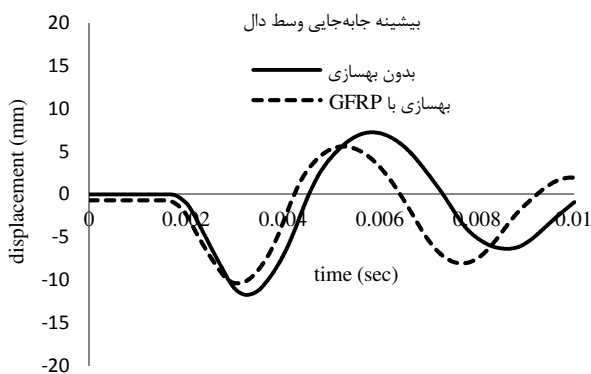
شکل ۳- هندسه مدل و آرماتورگذاری.



شکل ۲- شرایط تکیه‌گاهی.

۲-۷- راستی آزمایشی مدل‌سازی

برای صحت‌سنجی مدل دال‌های ساخته شده در نرم‌افزار، دال‌های بتنی آزمایش شده تحت بار انفجار در مطالعات رزاق‌پور و تلبا [۲ و ۱۰] در نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی شده است. نمونه‌ها با ابعاد $1 \times 1 \times 0.7$ m در دو لایه و در دو جهت مطابق شکل (۳)، میلگرد گذاری شده است. مساحت میلگردها $25/8$ میلی‌متر مربع و فاصله مرکز به مرکز 152 میلی‌متر است و مقاومت تسلیم و نهایی میلگردها به ترتیب 480 و 600 مگا پاسکال و مقاومت فشاری بتن 42 مگا پاسکال است. دال‌ها توسط دو لایه GFRP به صورت عمود بر هم در 500 میلی‌متر میانی دال به شکل صلیب تقویت شده است، شکل (۳). مشخصات مدل‌های مواد و بار انفجار مطابق مطالب پیش گفته در مدل‌سازی منظور شده است. با تحلیل مدل در نرم‌افزار LS-DYNA حداکثر جابه‌جایی مرکز دال بدون بهسازی $11/72$ میلی‌متر و برای دال بهسازی شده با GFRP، $10/34$ میلی‌متر به دست آمده است (کاهش 12%). در جدول (۳) نتایج فوق با مقادیر به دست آمده از آزمایش تجربی [۲ و ۱۰] و شبیه‌سازی عددی دیگر محققین [۴] مقایسه شده است که تطابق خوب مطالعات آزمایشگاهی و عددی، معرف صحت شبیه‌سازی با مفروضات این تحقیق است. همچنین مقایسه تاریخچه جابه‌جایی وسط دال‌ها در حالات بهسازی نشده و بهسازی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- جابه‌جایی مرکز دال بهسازی نشده و بهسازی شده با GFRP.

جدول ۳- مقایسه نتایج با مطالعات قبلی.

نتایج کار آزمایشگاهی [۱۰]	نتایج مقاله عدد [۴]		نتایج صحت‌سنجی	
	بدون بهسازی	بهسازی با GFRP	بدون بهسازی	بهسازی با GFRP
بهسازی با GFRP	۱۲.۵	۱۱.۱۴	۱۱.۷۲	۱۰.۳۴
بدون بهسازی	۹.۵۸	۱۲.۲۹	۱۱.۷۲	۱۰.۳۴

در شکل (۵) مقادیر انرژی hourglass و انرژی داخلی که از شبیه‌سازی این تحقیق به دست آمده است با مقادیر ارائه شده در مطالعه نام [۴] مقایسه شده است که نشان دهنده تطابق بسیار خوب آن‌ها است.

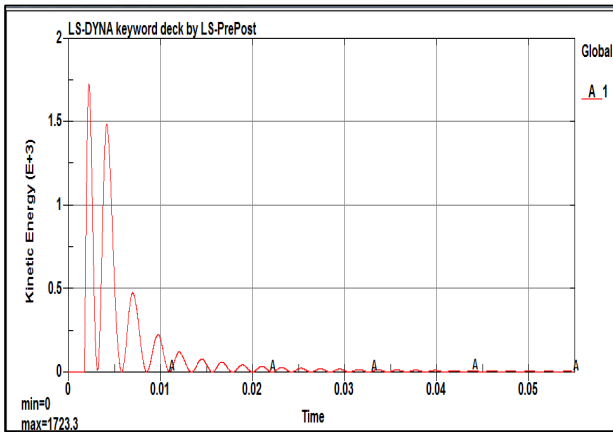
۳- نتایج و بحث

برای بررسی اثر Polyurea (PU) در عملکرد دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجار، حالات چندگانه‌ای در نظر گرفته شده است، حالت اول استفاده از ترکیب GFRP و PU و حالت دوم استفاده از ترکیب CFRP و PU است. در هر دو حالت PU یکبار در سمت رو به انفجار و بار

Archive of SID

انرژی وارد شده به دال ناشی از یک منبع مشخص انفجاری در همه حالات ذکر شده ثابت است. بخشی از این انرژی توسط سامانه جذب و بقیه به اشکال انرژی جنبشی و پتانسیل ظاهر خواهد شد. در لحظه پیک انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل صفر است. از این رو می‌توان با مقایسه حداکثر انرژی جنبشی سازه، برآورد مناسبی از انرژی جذب شده توسط سامانه به دست آورد. هرچه پیک انرژی جنبشی کمتر باشد معرف اتلاف بیشتر انرژی توسط سامانه سازه‌ای است.

شکل (۶) تغییرات انرژی جنبشی (کینتیک) را بر حسب زمان برای دال بتن مسلح بدون استفاده از هر گونه بهسازی نشان می‌دهد. حداکثر انرژی جنبشی ۱۷۲۳.۳ است. تحت بار انفجاری پیش گفته، وسط دهانه دال تغییر مکان بیشینه ۱۱/۷۲ میلی‌متر را تجربه می‌کند.

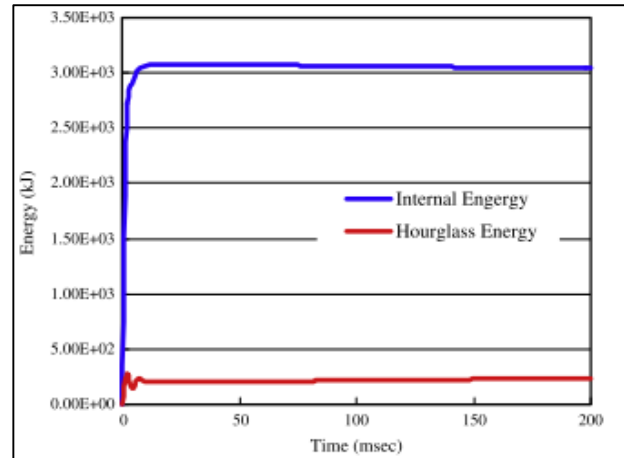


شکل ۶- انرژی جنبشی دال بدون بهسازی.

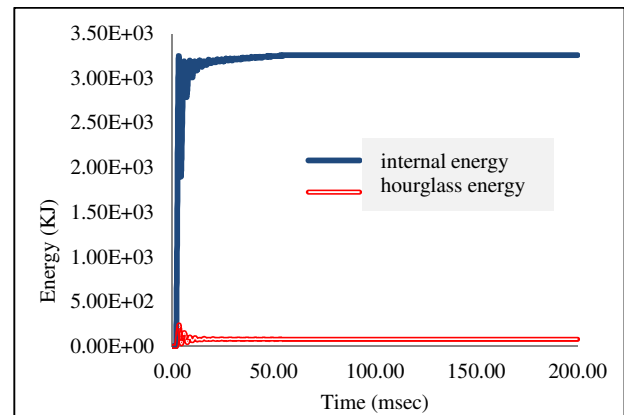
شکل (۷) انرژی جنبشی دال بتن مسلح که با دو لایه GFRP تقویت شده است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در صورت استفاده از ورق GFRP در سطحی از دال که در معرض موج انفجار است مقدار ۱۵۵۴.۷ به عنوان حداکثر انرژی جنبشی ثبت شده است که نسبت به دال بدون بهسازی شده به شکل درصد کاهش یافته است. مقدار کاسته شده از انرژی جنبشی، توسط سازه جذب شده است. اگر ورق‌های GFRP به وجه پشت دال که به‌طور مستقیم در معرض موج انفجار نیستند چسبانده شوند، انرژی جنبشی به ۱۶۸۱ کاهش می‌یابد که نشان دهنده بهبود اندک جذب انرژی (۲/۵ درصد) در این حالت است. تغییر مکان وسط دال در حالت‌های فوق به ترتیب ۱۰/۷ و ۹/۸ میلی‌متر است که نسبت به دال اولیه حدود ۹ و ۱۶ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر استقرار ورق‌های GFRP در سطح پشتی دال سختی بیشتری ایجاد می‌نماید و به کاهش بیشتر تغییر مکان منجر خواهد شد، ولی قرارگیری در وجه رو به انفجار می‌تواند در افزایش توان جذب انرژی سازه مؤثرتر از حالت دیگر باشد.

شکل (۸) مقادیر انرژی جنبشی را در دال بهسازی شده با لایه‌ای از PU به ضخامت برابر با دو لایه GFRP در دو حالت استقرار در وجه رو به انفجار و سطح پشتی دال ارائه می‌دهد. مقدار پیک انرژی در دو حالت

دیگر در سمت پشت به انفجار استفاده شده است. دال، PU، GFRP و CFRP طبق موارد بیان شده در بخش قبل در نرم‌افزار LS-DYNA مدل‌سازی و برای کلیه ترکیب‌های پیش گفته تحلیل شده است. در جدول (۴) علائم اختصاری با توضیحات ارائه شده است.



الف) انرژی داخلی و hourglass [۴].

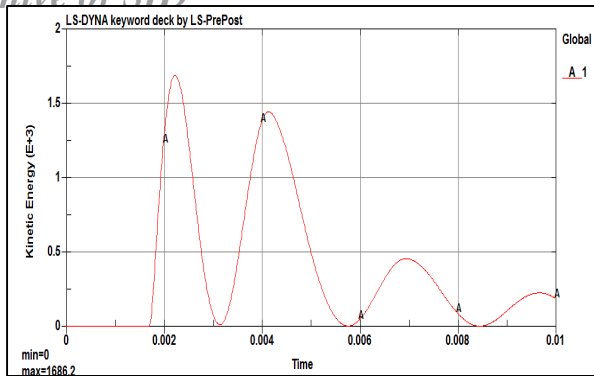


ب) انرژی داخلی و hourglass مدل برای راست آزمایی.

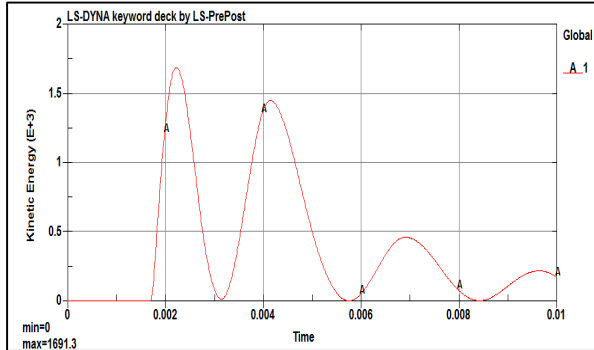
شکل ۵- مقایسه مقادیر انرژی.

جدول ۴- وضعیت قرارگیری تقویت‌ها بر روی دال بتن مسلح.

نمونه	شرح نمونه
PUG	یک لایه PU به‌اندازه یک برابر ضخامت GFRP روی (زیر) دال + یک لایه GFRP
GFRP	۲ لایه GFRP روی (زیر) دال
PU	یک لایه PU به‌اندازه ضخامت ۲ لایه GFRP روی (زیر) دال
GPU	یک لایه GFRP روی (زیر) دال + یک لایه PU به‌اندازه یک برابر ضخامت GFRP روی GFRP
PUC	یک لایه PU به‌اندازه یک برابر ضخامت CFRP روی (زیر) دال + یک لایه CFRP
CFRP	۲ لایه CFRP روی (زیر) دال
PU	یک لایه PU به‌اندازه ضخامت ۲ لایه CFRP روی (زیر) دال
CPU	یک لایه CFRP روی (زیر) دال + یک لایه PU به اندازه یک برابر ضخامت CFRP روی CFRP

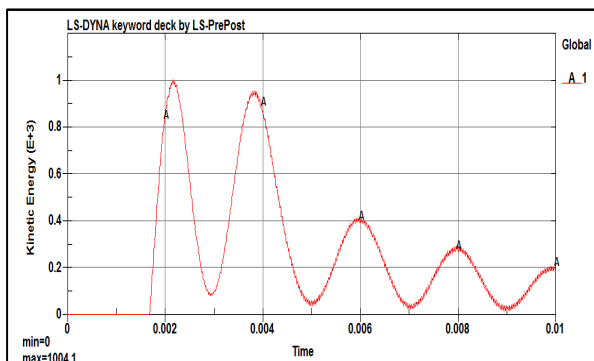


الف) PU در سطح رو به انفجار.

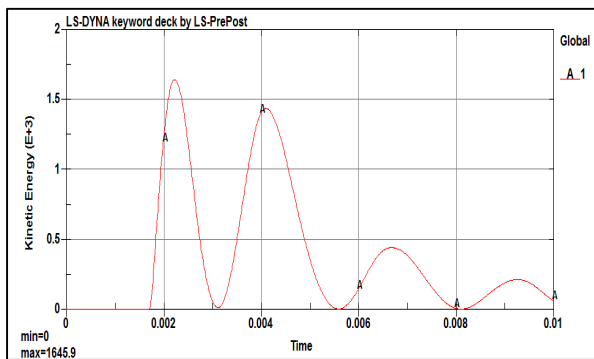


ب) PU در سطح پشتی دال.

شکل ۸- انرژی جنبشی دال تقویت شده با پوشش Polyurea.



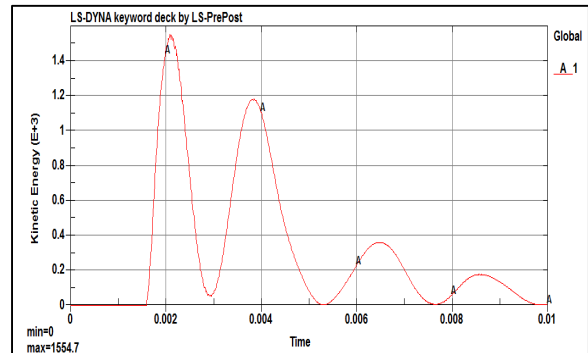
الف) GPU در سطح رو به انفجار.



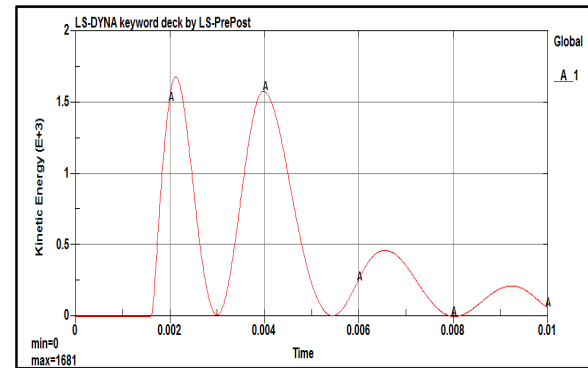
ب) GPU در سطح پشتی دال.

شکل ۹- انرژی جنبشی دال تقویت شده با GFRP و Polyurea.

فوق به ترتیب ۱۶۸۶.۲ و ۱۶۹۱.۳ است که معادل حدود دو درصد کاهش نسبت به حالت بدون بهسازی است. تغییر مکان وسط دال در حالت‌های فوق به ترتیب ۱۱/۳ و ۱۱/۴۵ میلی‌متر است که نسبت به دال اولیه کاهش محسوسی نداشته است (حدود سه درصد). در حقیقت استفاده از PU به‌تنهایی، نقش چندانی در کاهش تغییر مکان و افزایش جذب انرژی ندارد.



الف) ورق در سطح رو به انفجار.



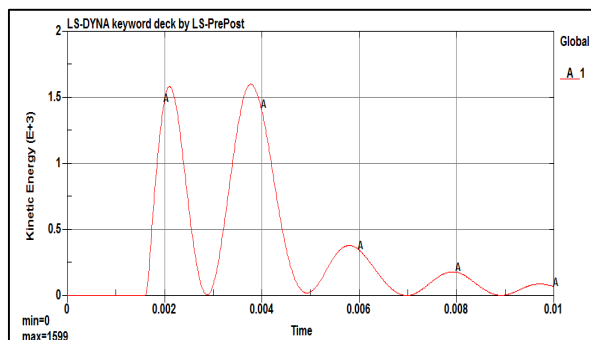
ب) ورق در سطح پشتی دال.

شکل ۷- انرژی جنبشی دال تقویت شده با دو لایه GFRP.

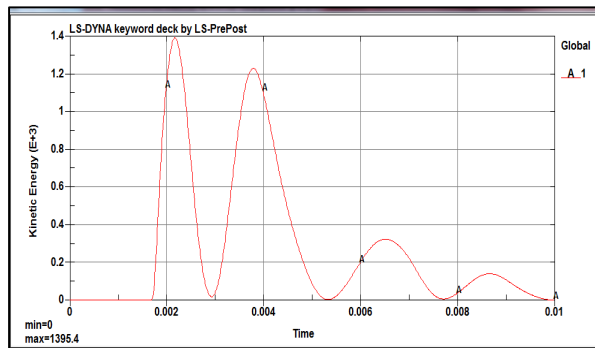
در صورتی که از یک لایه GFRP برای تقویت دال استفاده شود و سپس روی آن یک لایه PU قرار گیرد به‌طوری‌که ضخامت کل تقویت معادل دو لایه GFRP باشد عملکرد سازه با دو وضعیت فوق کاملاً متفاوت خواهد شد. شکل (۹) تغییرات انرژی جنبشی این سازه را در دو حالت تقویت در وجه رو به انفجار و پشت دال نشان می‌دهد. بیشینه انرژی جنبشی در دو حالت فوق به ترتیب ۱۰۰۴/۱ و ۱۶۴۵/۹ است که نسبت به دال بهسازی نشده ۴۲ و ۴/۵ درصد کاهش و نسبت به دال بهسازی شده با GFRP معادل ۳۵ و ۲ درصد کاهش دارد. این نتایج نشان می‌دهد بهسازی وقتی تأثیر مطلوب و محسوس در جذب انرژی دال دارد که اولاً در وجه رو به انفجار دال اجرا گردد و ثانیاً لایه سخت GFRP همراه با لایه نرم PU به‌کار گرفته شود. تغییر مکان وسط دال در حالت‌های فوق به ترتیب ۶/۶ و ۱۰/۱۶ میلی‌متر است که نسبت به دال اولیه کاهش قابل توجه ۴۴ و ۱۰ درصد داشته است.

نسبت به دال اولیه حدود ۲۱ و ۳۶ درصد کاهش یافته است. مشابه نتایج کاربرد ورق‌های GFRP، بهره‌گیری از تقویت CFRP در سطحی از دال که در معرض موج انفجار است در افزایش جذب انرژی و کاهش تغییر شکل سازه مؤثرتر از حالتی است که وجه پشتی دال تقویت می‌گردد.

در صورت استفاده از پوشش PU بر روی بتن و سپس چسباندن یک لایه CFRP به آن، انرژی جنبشی در دو حالت بهسازی در سطح رو به انفجار و در سطح پشت دال که در شکل (۱۲) آورده شده است به ترتیب ۱۳۹۵/۴ و ۱۵۹۹ به دست می‌آیند که معرف ۱۹ و ۹/۵ درصد کاهش نسبت به دال بهسازی نشده است. تغییر مکان وسط دال در حالت‌های فوق به ترتیب ۹/۳ و ۸/۸ میلی‌متر است که نسبت به دال اولیه کاهشی بیش از ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. اگر ترتیب استفاده از PU و CFRP تغییر کند به طوری که ابتدا یک لایه CFRP به بتن چسبانده و سپس پوشش PU به کار رود انرژی جنبشی در دو حالت بهسازی در سطح رو به انفجار و در سطح پشت دال که در شکل (۱۳) آورده شده است به ترتیب ۸۳۷/۹ و ۱۶۰۳ معادل ۵۱ و ۷ درصد کاهش نسبت به دال بهسازی نشده به دست می‌آیند و تغییر مکان وسط دال به ترتیب به ۶/۲ و ۹/۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد.



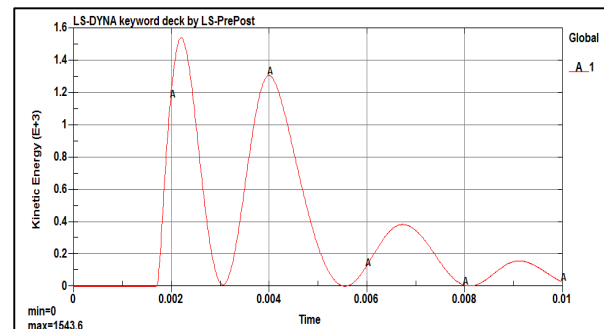
الف) PUC در سطح رو به انفجار.



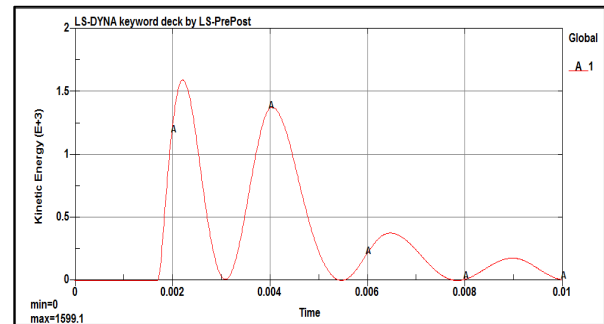
ب) PUC در سطح پشتی دال.

شکل ۱۲- انرژی جنبشی دال تقویت شده با Polyurea و CFRP.

مقادیر بیشینه انرژی جنبشی دال در حالات مختلف با و بدون تقویت و مقایسه بین آن‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین حداکثر تغییر مکان وسط دال در حالت‌های متفاوت در جدول (۶) مرتب شده است. مقایسه مقادیر در دو جدول فوق می‌تواند به انتخاب گزینه برتر در بهسازی دال بتن مسلح در بارگذاری انفجار منجر گردد.

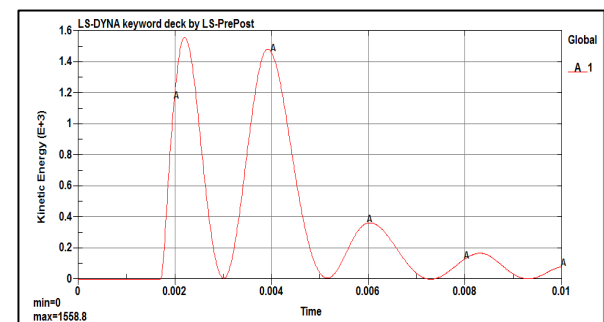


الف) PUG در سطح رو به انفجار.

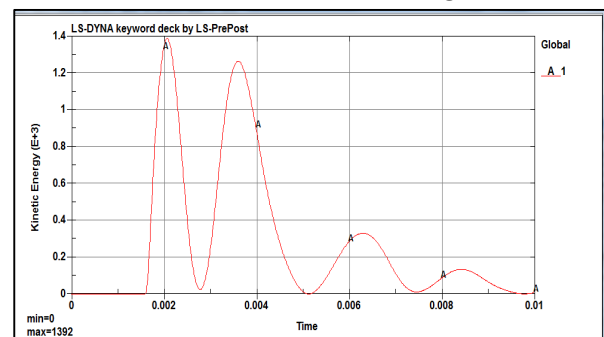


ب) PUG در سطح پشتی دال.

شکل ۱۰- انرژی جنبشی دال تقویت شده با Polyurea و GFRP.



الف) CFRP در سطح رو به انفجار.



ب) CFRP در سطح پشتی دال.

شکل ۱۱- انرژی جنبشی دال تقویت شده با دو لایه CFRP.

شکل (۱۱) تغییرات انرژی جنبشی در دال بتن مسلح تقویت شده با دو لایه CFRP را در دو حالت رو به انفجار و پشت دال نشان می‌دهد. مقادیر انرژی جنبشی بیشینه در دو حالت فوق به ترتیب ۱۳۹۲ و ۱۵۵۸/۸ است که نسبت به دال بدون بهسازی ۱۹ و ۷ درصد کاهش یافته است. تغییر مکان وسط دال در حالت‌های فوق به ترتیب ۹/۲۳ و ۷/۵ میلی‌متر است که

جدول ۵- مقایسه نتایج در قالب انرژی جنبشی سازه.

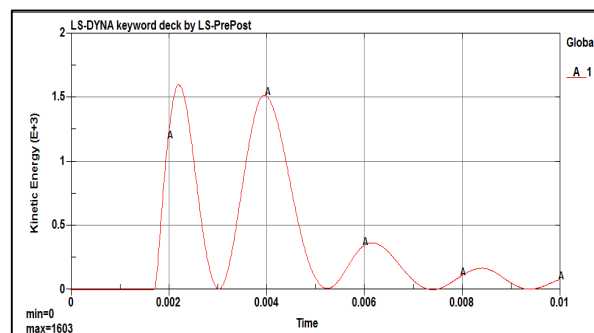
وضعیت:	روبه انفجار/ پشت به انفجار	نمونه	انرژی kinetic	درصد تغییرات انرژی kinetic	انتخاب بهترین نمونه
ترکیب GPU	روبه	GPU	۱۰۰۴.۱	۴۱.۷	انتخاب بهترین نمونه
	انفجار	GFRP	۱۵۵۴.۷	۹.۷	
		PUG	۱۵۴۳.۶	۱۰.۴	
		PU	۱۶۸۶.۲	۲.۱۵	
ترکیب GFRP,PU	پشت به انفجار	GPU	۱۶۴۵.۹	۴.۵	انتخاب بهترین نمونه
		GFRP	-۱۶۸۱	۲.۴۵	
	PUG	۱۵۹۹.۱	۷.۲		
	PU	-۱۶۹۱	۱.۸		
ترکیب CFRP,PU	روبه انفجار	CPU	۸۳۷.۸۶	۵۱.۳۸	انتخاب بهترین نمونه
		CFRP	-۱۳۹۲	۱۹.۲۲	
	PUC	۱۳۹۵.۴	۱۹		
	PU	۱۶۸۶.۲	۲.۱۵		
ترکیب CFRP,PU	پشت به انفجار	CPU	-۱۶۰۳	۶.۹۸	انتخاب بهترین نمونه
		CFRP	-۱۵۹۹	۷.۲	
	PUC	۱۵۵۸.۸	۹.۵		
	PU	-۱۶۹۱	۱.۸۷		

جدول ۶- مقایسه نتایج بیشینه تغییر مکان وسط دال.

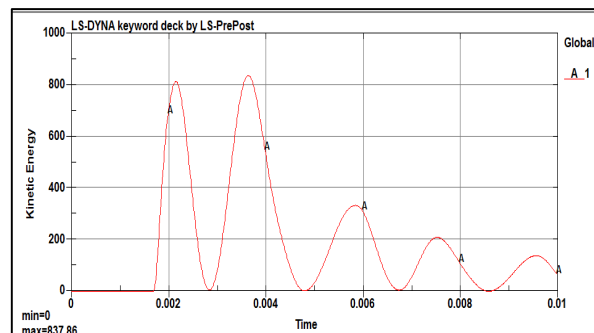
وضعیت:	روبه انفجار/ پشت به انفجار	نمونه	بیشینه جابه‌جایی وسط دال (mm)	درصد کاهش بیشینه جابه‌جایی وسط دال در حالت‌های بهسازی نسبت به حالت بدون بهسازی	انتخاب بهترین نمونه
ترکیب GPU	روبه انفجار	GPU	۶.۶	۴۳.۶	انتخاب بهترین نمونه
		GFRP	۱۰.۷	۸.۷	
		PUG	۱۰.۱۵	۱۳.۳۹	
		PU	۱۱.۳	۳.۵	
ترکیب GFRP,PU	پشت به انفجار	GPU	۱۰.۶	۹.۵	انتخاب بهترین نمونه
		GFRP	۹.۸	۱۶.۳	
	PUG	۱۰.۲	۱۳		
	PU	۱۱.۴۵	۲.۳		
ترکیب CFRP,PU	روبه انفجار	CPU	۶.۱۷	۴۷.۳۵	انتخاب بهترین نمونه
		CFRP	۹.۲۳	۲۱.۲۴	
	PUC	۹.۲۸	۲۰.۸		
	PU	۱۱.۳	۳.۵		
ترکیب CFRP,PU	پشت به انفجار	CPU	۹.۲۱	۲۱.۴۱	انتخاب بهترین نمونه
		CFRP	۷.۵	۳۶	
	PUC	۸.۸	۲۴.۹		
	PU	۱۱.۴۵	۲.۳		

۴- نتیجه‌گیری

به‌منظور کاهش آسیب سازه‌ها در بارگذاری انفجاری، می‌توان دال‌های بتن مسلح موجود را به روش‌های مختلف بهسازی و مقاوم‌سازی نمود. استفاده از ورق‌های CFRP و GFRP که موادی با مقاومت بسیار زیاد و رفتاری الاستیک هستند یکی از روش‌های متداول تقویت المان‌های سازه‌ای است. در این مقاله برای تعدیل رفتار سخت و الاستیک ورق‌های فوق، از پوشش Polyurea (PU) که رفتاری الاستو پلاستیک دارد استفاده شده است. بررسی نمونه‌های تحلیل شده در این تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از دو لایه ورق تقویتی CFRP و GFRP در وجه کششی بتن دال که به‌طور مستقیم در معرض موج انفجار نیست به مقاومت سازه افزوده و تغییر مکان وسط دال را ۱۶ تا ۳۶ درصد کاهش می‌دهد ولی به دلیل رفتار کاملاً الاستیک ورق‌های فوق، در افزایش ظرفیت جذب انرژی سازه چندان مؤثر نیست به‌طوری‌که کاهش انرژی بیشینه سامانه کمتر از ده درصد بوده است. استفاده از ورق‌های فوق در وجه رو به انفجار دال موجب کاهش تغییر مکان میانه دال به مقدار ۱۰ تا ۲۰ درصد گردید که نسبت به حالت قبل کمتر است ولی جذب انرژی سازه را تا حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. استفاده از پوشش PU به‌تنهایی چه در وجه رو به انفجار و چه در پشت



الف) CPU در سطح رو به انفجار.



ب) CPU در سطح پشتی دال.

شکل ۱۳- انرژی جنبشی دال تقویت شده با CFRP و Polyurea.

- [5] Tekalur, S. A.; Shukla, A.; Shivakumar, K. "Blast Resistance of Polyurea Based Layered Composite Materials"; *Compos. Struct.* 2008, 84, 271-281.
- [6] Yehia, A.; Bahei, E. D.; George, J. D.; Olivia, J. F. "A Blast-Tolerant Sandwich Plate Design with a Polyurea Interlayer"; *Int. J. Solids. Struct.* 2006, 43, 7644-7658.
- [7] Samiee, A. V.; Amirkhizi, A.; Nemat-Nasser, S. "Numerical Study of the Effect of Polyurea on the Performance of Steel Plates under Blast Loads"; *Mech. Mater.* 2013, 64, 1-10.
- [8] Ha, J. H.; Yi, N. H.; Choi, J. K.; Kim, J. H. J. "Experimental Study on Hybrid CFRP-PU Strengthening Effect on RC Panels under Blast Loading"; *Compos. Struct.* 2011, 93, 2070-2082.
- [9] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual Version 9.71. Livermore Software, Technology Corporation, July 2006.
- [10] Tolba, A. "Response of FRP-Retrofitted Reinforced Concrete Panels to Blast Loading"; Ph.D. Thesis, Carleton Univ., Ottawa, Canada, 2001.
- [11] Hyde, D. W. "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, CONWEP (Conventional Weapons Effects)"; User Guide, TM5-8511-1; United States Army Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss, 1988.
- [12] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structure"; Butter Worth Heinemann Ltd, 1994 (Translated to Persian by: R. A. Izadifard, Malek-e Ashtar Un. Pub.).

[۱۳] اسمیت، هترینگتن، ترجمه ایزدی فرد، رضاعلی "تأثیرات بارگذاری انفجاری و بالستیک بر سازه‌ها"; انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، چاپ اول، ۱۳۹۳.

- [14] Thilakarathna, H. "Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Columns Subjected to Vehicular Impact"; Ph.D Thesis, School of Urban Development, Queensland Univ. of Technol. 2010.
- [15] Nam, J. W.; Kim, H. J.; Kim, S. B.; Kim, J. H. J.; Byun, K. J. "Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads"; *Int. J. Damage. Mech.* 2009, 18, 461-490.
- [16] Amirkhizi, A.; Isaacs, J.; GeeMc, J.; Nemat-Nasser, S. "An Experimentally-based Viscoelastic Constitutive Model for Polyurea, Including Pressure and Temperature Effects"; *Philos. Mag.* 2006, 86, 5847-5866.

دال، تأثیر محسوسی بر افزایش جذب انرژی و کاهش تغییر شکل سازه نداشته است. در صورتی که یک لایه CFRP و روی آن یک لایه PU استفاده شود مقدار جذب انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و نیز از تغییر شکل سازه کاسته خواهد شد. این نوع تقویت وقتی به حداکثر کارایی خود خواهد رسید که در وجه رو به انفجار دال استفاده شود. در این صورت ظرفیت جذب انرژی تا حدود ۵۰ درصد افزایش و تغییر مکان نیز ۲۰ تا ۴۴ درصد کاهش خواهد یافت. اگر نحوه استقرار لایه‌های فوق تغییر کند به طوری که ابتدا پوشش PU و سپس CFRP یا GFRP نصب شود اگرچه نسبت به حالت به کار نرفتن PU جذب انرژی افزایش می‌یابد ولی نسبت به وضعیتی که PU روی ورق‌های فوق قرار می‌گیرد کارایی آن حدود ۳۰ درصد تنزل می‌کند. بر اساس نتایج به دست آمده از نمونه‌های بررسی شده در این مقاله، توصیه می‌شود در تقویت دال‌های بتن مسلح تحت بار انفجاری اولاً ترکیبی از مواد سخت الاستیک به همراه مواد الاستوپلاستیک مانند PU به کار گرفته شود، ثانیاً ترتیب قرارگیری تقویت به گونه‌ای باشد که مواد الاستیک به بتن چسبانده شوند و روی آن پوشش PU قرار گیرد و ثالثاً این تقویت در وجه رو به انفجار دال نصب گردد.

مراجع

- [1] Pantelides, C. P.; Garfield, T. T.; Richins, W. D.; Larson, T. K.; Blakeley, J. E. "Reinforced Concrete and Fiber Reinforced Concrete Panels Subjected to Blast Detonations and Post-Blast Static Tests"; *Eng. Struct.* 2014, 76, 24-33.
- [2] Razaqpur, A. G.; Tolba, A.; Contestabile, E. "Blast Loading Response of Reinforced Concrete Panels Reinforced with Externally Bonded GFRP Laminates"; *Compos. Part. B-Eng. J.* 2007, 38, 535-546.
- [۳] قلی‌پور، رضا "مطالعه تجربی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح مقاوم سازی شده با FRP تحت بارهای انفجار"; پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۹۱.
- [4] Nam, J. W.; Kim, H. J.; Kim, S. B.; Yi, N. H.; Kim, J. H. J. "Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure"; *Compos. Struct.* 2010, 92, 1212-1222.