

ارزیابی عددی اثر کامپوزیت‌های پلیمری (FRPS) در تقویت دال بتن آرمه در معرض انفجار

محمداسماعیل نیاعمران^{۱*}، مرجان گردان^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه کردستان

۲- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه کردستان

m.esmaeilnia@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۴/۱۴]

چکیده- یکی از راه‌های تقویت المان‌های سازه‌ای تحت انفجار، استفاده از مصالح با شکل‌پذیری و مقاومت بالا مانند کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده (FRPS) است. بررسی تأثیر تقویت المان‌ها، با انجام آزمایش و تحلیل پاسخ نمونه تحت انفجار انجام می‌شود. در این مطالعه به تحلیل دینامیکی غیر خطی نمونه دال‌های مسلح شده با کامپوزیت‌های FRP تحت بارهای انفجاری پرداخته شده است. برای مدل سازی نمونه‌ها و بارگذاری از نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده و نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است که سازگاری پاسخ عددی نرم‌افزار و آزمایش به دست آمده است. به طور کلی نمونه‌های تقویت شده با کامپوزیت نسبت به نمونه‌های فاقد تقویت پاسخ بهتری در مقابل آزمایش‌های انفجاری داشته‌اند. همچنین در اینجا مطالعات پارامتری برای بررسی حد تأثیر هر کدام از پارامترهای ضخامت ورقه‌ی کامپوزیت، مقاومت کامپوزیت، مقاومت فشاری بتن و درصد میلگردهای فولادی به طور مستقل صورت گرفته است. افزایش مقاومت فشاری بتن نسبت به افزایش سایر پارامترها تأثیر بیشتری در بهبود پاسخ نمونه تحت انفجار داشته و به عبارتی مقرون به صرفه‌تر است. برای بررسی مقاومت کامپوزیت در پاسخ نمونه تقویت شده، با ثابت نگه داشتن همه مشخصات نمونه و تنها با تغییر نوع کامپوزیت، از دو نوع کامپوزیت پلیمری کربن (CFRP) و کامپوزیت پلیمری شیشه (GFRP) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به این که مقاومت طولی کامپوزیت‌های الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه بالاتر است، در نتیجه بهبود در عملکرد نمونه‌های مسلح شده به کامپوزیت CFRP نسبت به GFRP بیشتر حاصل شده است.

واژگان کلیدی: دال بتن مسلح، انفجار، کامپوزیت‌های FRPS، نرم‌افزار LS-DYNA

۱- مقدمه

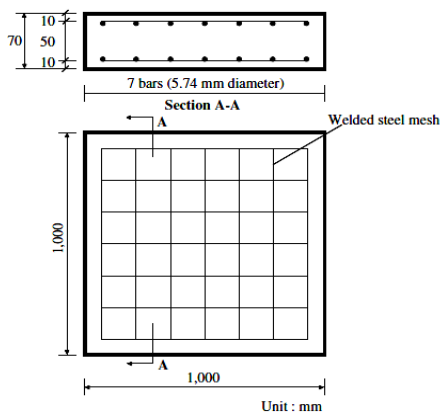
در قاب‌های بتن آرمه، افزایش مقاومت المان‌های سازه‌ای بتنی مقابل آتش، افزایش مقاومت بتن آرمه در سازه‌های زیردریایی مقابل خوردگی و سیکل‌های ذوب و یخبندان و... همچنین به تازگی پژوهش‌هایی در زمینه‌ی اثر FRP در تقویت دال‌های بتن آرمه تحت بارهای انفجاری صورت گرفته است. تولبا^۲ (۲۰۰۱) به انجام آزمایش‌های نمونه‌ی دال‌های بتن آرمه تقویت شده با الیاف CFRP و GFRP تحت بار انفجاری پرداخته

امروزه تقویت سازه‌های بتن مسلح به کمک ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRPS)^۱ به عنوان یک روش جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. به تازگی پژوهش‌هایی در زمینه‌ی تأثیر ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRPS) در تقویت المان‌های سازه‌ای انجام شده است. مانند تأثیر در افزایش ظرفیت خمشی دال‌های بتنی، افزایش ظرفیت برشی اتصالات

میلگردهای فولادی در سطح فشاری و کششی مسلح شده بود. فولاد دارای تنش تسلیم ۵۴۰ مگاپاسکال و کرنش تسلیم ۰/۰۰۲۵ بوده و نوع کامپوزیت مورد استفاده کامپوزیت مسلح شده به الیاف شیشه با مشخصات مکانیکی موجود در جدول (۱) بوده است. مشخصات مکانیکی لایه‌ی اپوکسی چسباننده بین سطح خارجی دال و ورقه‌های FRP در جدول (۲) آورده شده است و جدول (۳) پارامترهای انفجاری تست‌های انفجاری را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌ی دال تقویت شده در آزمایشگاه [۱]



شکل ۲: هندسه و آرایش آرماتورها در نمونه دال بتن آرمه [۱] (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

۳- بارگذاری

مطابق شکل (۳) دو فاز مثبت و منفی برای انفجار قابل تعریف است. فاز مثبت انفجار دارای دامنه‌ی بزرگ‌تر و مدت زمان بیشتری نسبت به فاز منفی انفجار است. به طوری که در بیشتر شبیه‌سازی‌های بار انفجار، از فاز منفی چشم‌پوشی می‌شود. پارامترهای فاز مثبت بار انفجار مانند فشار بیشینه،

است [۱]. خالد مسلم و آیمن مسلم (۲۰۰۱) به مطالعه و تحلیل عددی نمونه دال‌های دوطرفه‌ی بتنی تقویت شده با FRP تحت بار انفجار پرداخته‌اند [۲]. غنی رزاق پور و همکاران (۲۰۰۶)، به بررسی و مطالعه‌ی رفتار دال‌های بتن مسلح و تقویت‌شده با کامپوزیت‌های پلیمری GFRP تحت بارگذاری انفجار پرداخته [۳] و از نرم افزار CONWEP [۴]، برای محاسبه‌ی پارامترهای بارگذاری انفجار استفاده کرده‌اند. در تمامی مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته، تقویت دال‌های بتن آرمه با ورقه‌های FRP سبب افزایش ظرفیت باربری، کاهش تغییرشکل نمونه پس از انفجار و بهبود در عملکرد نمونه‌ی تقویت شده بوده است. پدرو سیلوا و همکارانش (۲۰۰۶) در آزمایش‌هایی نشان دادند که تقویت در هر دو وجه کششی و فشاری دال تحت انفجار به وسیله‌ی ورقه‌های کامپوزیتی ضروری است [۵]. اما مطالعات صورت گرفته بیشتر جنبه‌ی آزمایشگاهی داشته بنابراین در تحقیق حاضر سعی بر انجام ارزیابی عددی اثر تقویت دال‌های بتن مسلح با ورقه‌های FRP بوده و مطالعات پارامتریک نیز شامل حد تأثیر افزایش مقاومت بتن، مقاومت FRP، درصد میلگردهای فولادی و ضخامت FRP صورت گرفته است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

نتایج کار آزمایشگاهی تولبا در سال ۲۰۰۱، مبنای کار عددی این پژوهش قرار گرفته است. تولبا ۱۸ نمونه‌ی آزمایشگاهی دال بتن مسلح با ابعاد ۷۰*۱۰۰۰*۱۰۰۰ میلی‌متر که با دو شبکه میلگرد فولادی در بالا و پایین مسلح شده بود را مورد آزمایش قرار داد. ۵ نمونه برای کنترل، فاقد تقویت بوده و ۱۳ نمونه با ورقه‌های FRP در سطح کششی و فشاری دال به صورت خارجی، مطابق شکل (۱)، تقویت شده بود.

عرض ورقه‌های FRP ۵۰۰ میلی‌متر بوده و در نیمه‌ی میانی سطح دال در دو جهت عمود برهم پوشانده شده بود. مقاومت مشخصه‌ی بتن مصرفی ۴۰ مگاپاسکال بوده و دارای اسلامپ ۱۰۰ میلی‌متر با بزرگ‌ترین اندازه‌ی سنگ‌دانه ۱۰ میلی‌متر بوده است. همچنین اندازه‌ی پوشش روی مش میلگردها ۱۰ میلی‌متر بوده است. شکل (۲) هندسه‌ی مدل را نشان می‌دهد. مطابق شکل هر کدام از نمونه‌ها به وسیله‌ی دو مش

W: جرم ماده‌ی منفجره بر حسب کیلوگرم TNT
 فشار انعکاسی موج انفجار در حدود ۲ تا ۸ برابر بزرگ‌تر از
 فشار واقعی برخورد انفجار است. مایز و اسمیت^۳ در سال
 ۱۹۹۵ رابطه‌ی ۶ را برآورد فشار انعکاسی ارائه داده‌اند [۷].

$$Pr = 2P_{S0} [(7P_0 + 4P_{S0}) / (7P_0 + P_{S0})] \quad (6)$$

P₀: فشار هوای محیط

Pr: فشار انعکاسی موج انفجار

P_{S0}: فشار واقعی موج انفجار

لازم به توضیح است که در شبیه سازی بار انفجاری وارد بر
 سازه‌ها، از فاز منفی انفجار به علت کوتاه بودن مدت زمان و
 دامنه‌ی بار، چشم‌پوشی می‌شود و رابطه‌ی (۲) به شکل زیر
 خواهد شد.

$$P(t) = P_0 + P_{r0} \left(1 - \frac{t}{td}\right) \quad (7)$$

P_{r0}: فشار انعکاسی موج انفجار

td: مدت زمان فاز مثبت

با داشتن پارامترهای **P_{r0}**، **td** و قرار دادن در رابطه‌ی (۷)،
 منحنی فشار-زمان ترسیم می‌شود. مطابق با اشکال (۴) و (۵)،
 منحنی بارگذاری عددی به بارگذاری آزمایشگاهی (تولبا)
 نزدیک بوده و مورد تایید است.

۴- شرایط مرزی:

نمونه‌های آزمایشگاهی به وسیله‌ی چهار نبشی
 دورتادور، روی گودال حفر شده که در آن یک جعبه
 فلزی قرار گرفته و نبشی‌ها از زیر به جعبه‌ی فلزی
 اتصال پیدا کرده‌اند، مهار شده‌اند. مطابق شکل (۶)،
 جعبه‌ی فلزی که زیر نمونه قرار گرفته با اتصال به
 نبشی‌ها، آنها را در مقابل جابه‌جایی مهار نموده و شرایط
 گیرداری را در آنها ایجاد کرده است. بنابراین تکیه‌گاه-
 های نمونه در نرم افزار نیز گیردار در نظر گرفته شده
 است.

پریود بارگذاری، سرعت انفجار و فشار دینامیکی اغلب
 پارامترهای بارگذاری انفجار را تشکیل می‌دهد. کاهش فشار
 بیشینه با پارامتری به نام ضریب ثابت کاهش (Θ) قابل
 تعریف است. این فاکتور به میزان فشار بیشینه (**P_{S0}**) وابسته
 بوده و بدون بعد است تابع فشار انفجار را در هر لحظه با در
 نظر گرفتن فاکتور کاهش می‌توان فرمول‌نویسی کرد. رابطه‌ی
 (۱) رابطه‌ی محاسبه‌ی ضریب کاهشده‌ی فشار انفجار است. و
 رابطه‌ی (۲) برای برآورد فشار واقعی انفجار بر حسب زمان
 است.

P_{S0}: فشار بیشینه انفجار

t₀: مدت زمان فاز مثبت

$$\alpha = t_0 / \Theta \quad (1)$$

$$(2)$$

$$P(t) = P_{S0} \left[1 - \frac{t}{t_0}\right] \exp\left\{-\frac{at}{t_0}\right\}$$

کینی و گراهام^۲ در سال ۱۹۸۵ روابط (۳) و (۴) را برای
 برآورد فشار واقعی انفجار (**P_{S0}**) و مقدار بازه‌ی زمانی فاز
 مثبت انفجار (**t₀**) ارائه دادند [۶].

$$\frac{P_{S0}}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2}} * \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.85}\right)^2}} \quad (3)$$

$$\frac{t_0}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74}\right)^6\right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9}\right)^2}} \quad (4)$$

P_{S0}: فشار بیشینه انفجار (Kpa)

Z: فاصله‌ی مقیاس شده ($m/kg^{0.33}$)

$$Z = R/W^{0.33} \quad (5)$$

R: فاصله‌ی مرکز انفجار تا مرکز سطح جسم هدف (m)

P₀: فشار هوای محیط (Kpa)

جدول ۱: مشخصات مکانیکی GFRP [۱]

نام تجاری	چگالی (kg/m ³)	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (Mpa)	مدول کششی (Gpa)	کرنش نهایی (%)
E-glass fabric	2100	1.2	580	72.5	2.1

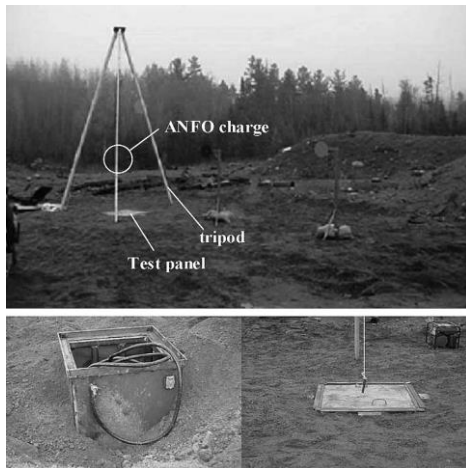
جدول ۲: مشخصات مکانیکی اپوکسی [۱]

نام	مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته (Gpa)	کرنش نهایی (%)
Epoxy	580	72.5	2.1

۵- مدل مواد در نرم افزار

۵-۱- مدل ماده‌ی بتن

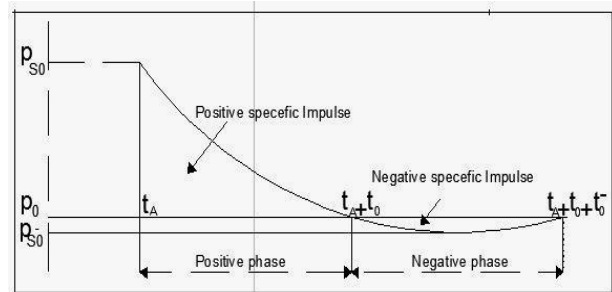
در دو دهه‌ی گذشته پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی مدل ماده‌های ترکیبی برای رفتار پیچیده‌ی بتن تحت بارگذاری‌های مختلف انجام شده است. نرم‌افزار LS-DYNA دارای چندین مدل ماده برای رفتار بتن است مدل ماده‌های ۵، ۱۶، ۲۵، ۷۲ مدل ماده‌های تعریف شده برای رفتار بتن است [۸]. مدل ماده‌ی ۷۲ (MAT_CONCRETE_DAMAGE) در حالت پیشرفته‌ی مدل ماده‌ی ۱۶ (MAT_PSEUDO_TENSOR) بوده که قادر است رفتار پیچیده‌ی بتن را در فشار و کشش تحت بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا (مانند بارهای انفجاری) مدل کند. حالت پیشرفته‌ی این مدل ماده به نام MAT72-REL3 در نرم افزار قادر به مدل کردن رفتار پیچیده‌ی بتن تحت انفجار با داشتن پارامترهای محدود آزمایشگاهی است. همچنین نرم افزار معادله حالت EQS-TABULATED-COMPACTION را برای رفتار بتن تحت انفجار معرفی می‌کند [۸].



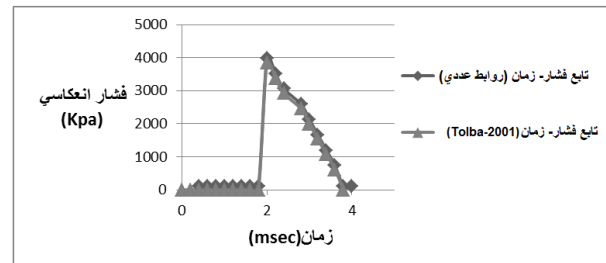
شکل ۶: شرایط تکیه‌گاهی نمونه در آزمایشگاه [۱]

جدول ۳: آزمایش‌های انفجاری [۱]

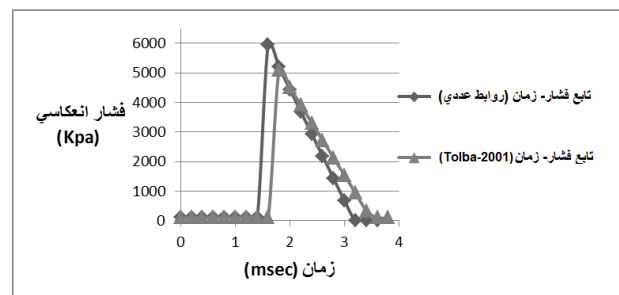
Test No.	R (m)	W(kg)	Z(m/kg ^{1/3})
1	3	10.99	1.349
2	3	18.37	1.137
3	3	27.39	0.995



شکل ۳: منحنی فشار-زمان بار انفجاری [۱]



شکل ۴: مقایسه‌ی آزمایشگاهی و عددی منحنی فشار انعکاسی - زمان به ازای ۳۷/۱۸ کیلوگرم TNT



شکل ۵: مقایسه‌ی آزمایشگاهی و عددی منحنی فشار انعکاسی - زمان به ازای ۲۷/۳۹ کیلوگرم TNT

نظر گرفته شده است. تابع تنش تسلیم میلگردهای فولادی بر اساس تئوری وان مایسز^۴ بدین صورت است [۱۰]:

$$\sigma_y = \beta[\sigma_0 + f_h(\epsilon_{eff}^p)] \quad (12)$$

β : متغیر اثر نرخ کرنش که از معادله ی (۱۳) محاسبه می شود.

σ_0 : تنش تسلیم اولیه

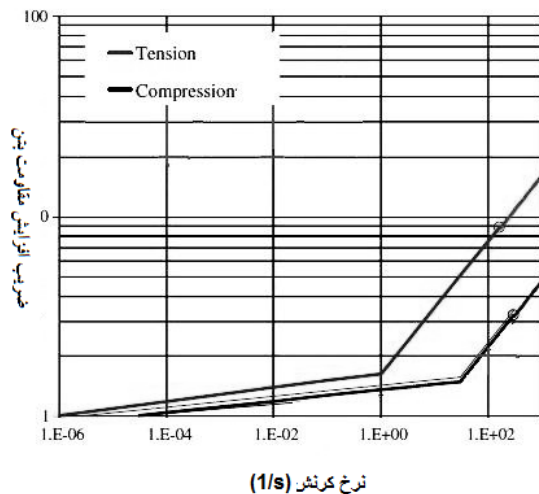
$f_h(\epsilon_{eff}^p)$: تابع سخت شدگی که در رابطه ی (۱۴) محاسبه می شود. در این رابطه E_p سختی پلاستیک و ϵ_{eff}^p مقدار کرنش پلاستیک موثر است.

$$\beta = 1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/r} \quad (13)$$

$$f_h(\epsilon_{eff}^p) = E_p(\epsilon_{eff}^p) \quad (14)$$

۳-۵: مدل FRP

برای مدل کردن ورقه های FRP از مدل ماده ی شماره ی ۲ (MAT_ORTHOTROPIC-ELASTIC-MODEL) استفاده شده است [۸]. این مدل رفتار ارتوتروپیک-الاستیک مصالح را در المان های جامدات و پوسته ها به خوبی مدل می کند.



شکل ۷: ضریب افزایش مقاومت بتن به ازای نرخ کرنش [۱۰]

• تئوری شکست FRP:

مدل شکست FRP در این مطالعه بر اساس تئوری شکست هاشینگ و چانگ^۵ استوار است [۱۱]. اثر نرخ کرنش در

• تئوری شکست بتن:

تئوری شکست بتن در این مطالعه بر اساس تئوری مالوار^۱ استوار است [۹].

که سطح شکست بتن بر اساس سطح شکست ویلام-وارک^۲ با تفکیک به سه نوع سطح شکست بوده و این مدل رفتار بتن تحت بار دینامیکی با سه سطح شکست زیر تعریف می شود:

سطح شکست بیشینه (Maximum failure surface)

$$\Delta\sigma_m = \alpha_0 + \frac{P}{\alpha_1 + \alpha_2 P} \quad (8)$$

سطح شکست پس ماند (Residual failure surface)

$$\Delta\sigma_r = \frac{P}{\alpha_1 r + \alpha_2 r P} \quad (9)$$

سطح شکست تسلیم (Yield failure surface)

$$\Delta\sigma_y = \alpha_{0y} + \frac{P}{\alpha_{1y} + \alpha_{2y} P} \quad (10)$$

سطح شکست پیشرفته (Enhanced failure surface)

$$\Delta\sigma_e = r_f \Delta\sigma \left(\frac{P}{r_f} \right) \quad (11)$$

$\Delta\sigma$: اختلاف تنش در سطح شکست

P : فشار محصور کننده^۳ بتن در هر سطح شکست

پارامترهای α_0 و α_1 و α_2 ، ثابت هایی است که از انجام آزمایش های فشاری سه محوری و آزمایش های فشاری محصور نشده به دست می آید. r_f ، پارامتر افزایش مقاومت بتن به ازای نرخ کرنش بالا است که از شکل (۷) به دست می آید. مقاومت افزایش یافته بتن در هر نرخ کرنش از ضرب ضریب افزایش مقاومت در مقاومت استاتیکی فشاری بتن به دست می آید.

۲-۵: مدل میلگردهای فولادی

از مدل ماده ی شماره ی ۲۴ (MAT_PEICEWISE_LINEAR_PLASTICITY) برای مدل رفتار فولاد استفاده شده است [۸]. در این مدل، ماده الاستوپلاستیک بوده و منحنی تنش-کرنش وابسته به نرخ کرنش تعریف می شود (شکل ۸). برای مدل کردن رفتار دینامیکی میلگردهای فولادی فاکتورهای افزایش مقاومت در

1 Malvar's Model

2 Willam-Warnke

3 Confining pressure

4 Von Mises

5 Hashing and chang

۶- نتایج و تحلیل آن‌ها

۶-۱- مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی

در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمودار خیز- زمان مرکز نمونه‌ها برگرفته از نتایج آزمایشگاهی تولبا در سال ۲۰۰۱ و نتایج مدل‌سازی آورده شده‌است. لازم به گفتن است که بارگذاری نمونه در آزمایشگاه و نرم افزار یکسان بوده و از نوع سوم (جدول ۳ شامل ۳۹/۲۷ کیلوگرم TNT به فاصله‌ی ۳ متر) است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، بیشینه اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی خیز مرکزی دال بر حسب زمان تحت بارگذاری نوع سوم (۳۹/۲۷ کیلوگرم TNT به فاصله‌ی انفجاری ۳ متر) در نمونه‌ی فاقد تقویت، ۳ درصد بوده‌است. بنابراین سازگاری نتایج عددی و آزمایشگاهی در این نمودار مشهود است. در شکل (۱۰) نمودار خیز مرکزی دال بر حسب زمان حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی تقویت شده تحت بارگذاری نوع سوم (۳۹/۲۷ کیلوگرم TNT به فاصله‌ی انفجاری ۳ متر) آورده شده‌است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، بیشینه اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی تغییر مکان مطابق شکل، ۱۳ درصد است. این اختلاف می‌تواند به دلیل ماهیت اجزا محدود نرم افزار و ضعف نرم‌افزار در شبیه سازی و مدل کردن ورقه‌ی کامپوزیت پلیمری و لایه‌ی چسب زیر آن باشد. اما رفتار نمونه و منحنی تغییر مکان- زمان، به طور کلی در نمونه‌ی تقویت شده با هم سازگاری دارد. بدیهی است اعداد منفی به دلیل ماهیت آزمایشگاهی داده‌ها بوده به گونه‌ای که پژوهشگر نیز بر لزوم مدل‌سازی اجزا محدود پژوهش تاکید داشته‌است [۱]. با مقایسه‌ی شکل (۹) و (۱۰) در منحنی تحلیل عددی اثر GFRP در کاهش مقدار تغییر مکان نمونه‌ها در نرم افزار، حدود ۲۳ درصد و در آزمایشگاه حدود ۳۱ درصد بوده‌است. بنابراین اثر تقویت چه در مطالعات عددی و چه در تست‌های آزمایشگاهی قابل تایید است.

۶-۲- مطالعات پارامتری

برای کامل کردن مطالعات عددی در این پژوهش به بررسی حد تاثیر پارامترهای مقاومت بتن، درصد میلگرد، ضخامت

مقاومت FRP بر اساس مدل پارک^۱ در نظر گرفته شده است [۱۲]. برای مدل شکست کششی، تئوری شکست فیبر به صورت زیر بیان می‌شود:

نشانه‌ی شکست که به صورت ترکیبی به تنش نرمال و تنش برشی وابسته است.

$$e = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{T_{12}}{SC_{12}}\right)^2 \quad \text{and} \quad \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 \geq \left(\frac{T_{12}}{SC_{12}}\right)^2, \text{ for } \sigma_{11} \geq 0 \quad (15)$$

e: نشانه‌ی شکست فیبر

σ_{11} : تنش نرمال

T_{12} : تنش برشی

X_t : مقاومت کششی

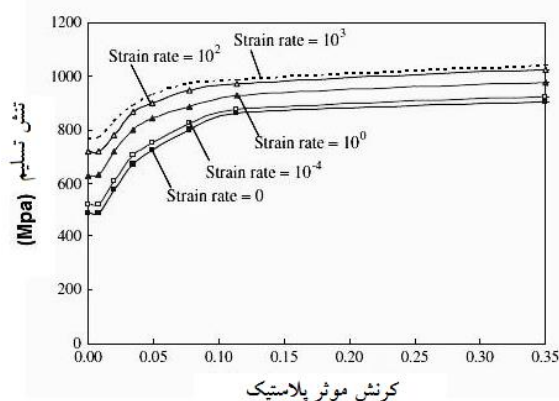
SC: تنش برشی صفحه‌ای

در این تئوری معیار شکست فیبر، وقتی است که مقدار نشانه‌ی شکست، بزرگ‌تر یا مساوی واحد شود.

در مواردی که میزان تنش نرمال بیشتر از تنش برشی موجود باشد امکان ایجاد شکست فشاری بیشتر شده و تئوری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$e = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2, \text{ for } \sigma_{11} < 0 \quad (16)$$

X_c : مقاومت فشاری



شکل ۸: اثر نرخ کرنش در منحنی تنش- کرنش پلاستیک فولاد [۱۰]

این تئوری علت شکست فشاری را بیشتر تنش نرمال σ_{11} بیان می‌کند که باعث ایجاد کماتش می‌شود.

۶-۲-۳- اثر ضخامت FRP

برای بررسی اثر ضخامت FRP، ضخامت ورقه‌های GFRP نمونه گام به گام افزایش یافته و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها در شکل (۱۳) به اختصار آورده شده است. مطابق شکل (۱۳)، با افزایش ضخامت ورقه‌ی GFRP از ۱/۳ به ۱/۵ میلیمتر (۱۵ درصد) مقدار خیز نمونه از ۱۰/۴۰۶ به ۱۰/۳۹۸ میلیمتر (۲ درصد) کاهش یافته به شکلی که با ۳ برابر شدن ضخامت کامپوزیت، مقدار خیز بیشینه نمونه حدود ۴۳ درصد کاهش یافته است که این نشان می‌دهد افزایش ضخامت ورقه‌ی GFRP نسبت به افزایش مقاومت بتن و درصد میلگردهای فولادی تأثیری در کاهش تغییر مکان حداکثر نداشته است.

۶-۲-۴- اثر مقاومت FRP

برای بررسی اثر مقاومت FRP در پاسخ نمونه با داشتن پارامترهای GFRP و CFRP برگرفته از مطالعه و پژوهش صورت گرفته به وسیله‌ی پژوهشگران در گذشته به بررسی پاسخ نمونه تحت این پارامترها پرداخته شده است (جدول ۴). بیشترین پارامتر تعیین کننده‌ی مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری، مقاومت کششی کامپوزیت در راستای طولی الیاف (XT) است. مطابق شکل (۱۴) به طور کلی با افزایش مقدار مقاومت کششی در راستای طولی (XT) مقدار خیز مرکزی نمونه کاهش یافته است. بررسی پارامتر مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری FRP به کارگیری ۳ نوع کامپوزیت پلیمری GFRP و ۳ نوع از کامپوزیت‌های پلیمری CFRP همگی با ضخامت ۱/۳ میلیمتر تحت مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. که این کامپوزیت‌ها دارای پارامترهای مکانیکی مشخص و تعریف شده‌ای بوده که از انجام آزمایش به دست آمده است. به شکل کلی کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده به الیاف کربن (CFRP) نسبت به الیاف شیشه (GFRP) دارای مقاومت بیشتری بوده و تاثیر بیشتری در کاهش خیز نمونه و بهبود عملکرد نمونه تحت بار انفجاری دارد. اما مطابق جدول ۴ و شکل ۱۳ با افزایش مقاومت کامپوزیت‌های (CFRP) از ۱۰۹۵ به ۲۲۸۰ (حدود دو برابر) مقدار خیز

GFRP و انواع FRP با مقاومت‌های مختلف پرداخته شده است. به این ترتیب با ثابت نگه داشتن تمامی شرایط اعم از بارگذاری، شرایط تکیه گاهی، مدت زمان تحلیل و ثابت بودن تمامی پارامترهای مکانیکی سایر مواد، پارامتر مورد نظر را تغییر داده و نتایج تحلیل در هر قسمت به اختصار در نمودار آورده شده است. لازم به توضیح است که از نمونه‌ی تقویت شده با بارگذاری ۲۷/۳۹ کیلوگرم TNT برای انجام تمامی مطالعات پارامتری استفاده شده و مبنای پاسخ، بیشینه خیز مرکزی نمونه در هر تحلیل بوده است.

۶-۲-۱- مقاومت بتن

برای بررسی اثر تغییر مقاومت بتن در پاسخ نمونه، اثر افزایش مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل (۱۱) آورده شده است. با افزایش مقاومت بتن از ۴۲ مگاپاسکال به ۴۵ مگاپاسکال مقدار خیز دال از ۱۰/۴۰۹ به ۸/۶۵۳ میلیمتر (۱۷ درصد) کاهش داشته است. با افزایش مقاومت بتن با گام‌های ۳ مگاپاسکال کاهش خیز دال مشهود بوده به طوری که افزایش ۲۰ مگاپاسکال (۴۷ درصد) در مقاومت منجر به کاهش تغییر مکان در حدود ۴۳ درصد شده است. بنابراین افزایش مقاومت فشاری بتن تأثیر به‌سزایی در کاهش خیز نمونه داشته است.

۶-۲-۲- اثر درصد میلگردهای فولادی

برای بررسی اثر درصد میلگردهای فولادی در پاسخ نمونه تحت انفجار، درصد میلگردها را گام به گام افزایش داده و پس از تحلیل نتایج در شکل (۱۲) خلاصه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، با افزایش درصد میلگردهای فولادی از ۰/۳۰۱ به ۰/۳۴۴ در نمونه (۱۴ درصد) تغییر مکان مرکزی دال از ۱۰/۴۰۹ به ۹/۵۳۵ میلیمتر (۹ درصد) کاهش یافته است. به ازای افزایش درصد میلگردها تا حدود بیش از دو برابر، کاهش تغییر مکان دال حدود ۳۰ درصد بوده است. بنابراین در مقایسه‌ی دو پارامتر مقاومت بتن و درصد میلگردهای فولادی، افزایش مقاومت بتن تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد نمونه داشته و مقرون به صرفه‌تر است.

در بهبود عملکرد نمونه داشته و مقرون به صرفه‌تر است. (۴) با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و افزایش درصد میلگردها، خیز مرکزی نمونه حدود ۳۰ درصد کاهش یافته که نشان‌دهنده‌ی این است که افزایش درصد میلگردها پس از پارامتر مقاومت بتن نسبت به سایر پارامترها بهبودی نسبی در پاسخ نمونه تحت انفجار مدل سازی داشته‌است.

(۵) با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و افزایش ضخامت ورقه‌ی GFRP تا حدود سه برابر مقدار خیز مرکزی نمونه چیزی حدود ۴۳ درصد کاهش داشته‌است که نشان دهنده‌ی این است که نسبت به سایر پارامترها افزایش ضخامت ورقه‌ی GFRP تاثیر چندانی در بهبود عملکرد نمونه نداشته و به عبارت دیگر مقرون به صرفه نیست.

(۶) پارامتر مکانیکی تعیین کننده‌ی مقاومت کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده به الیاف طبق مطالعات و آزمایش‌های انجام شده [۱۳-۱۶] مقاومت کششی کامپوزیت در جهت طولی الیاف (XT) است. که به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش مقاومت کششی طولی الیاف، مقدار خیز مرکزی دال کاهش می‌یابد. اما تاثیر آن نسبت به پارامتر مقاومت بتن و درصد میلگردهای فولادی ناچیز بوده و مقرون به صرفه نیست.

(۷) به‌طور کلی کامپوزیت‌های پلیمری مسلح شده به الیاف کربن (CFRP) نسبت به الیاف شیشه (GFRP) دارای مقاومت بیشتری بوده و تاثیر نسبی بیشتری در کاهش خیز نمونه و بهبود در عملکرد نمونه تحت بار انفجاری داشته‌اند.

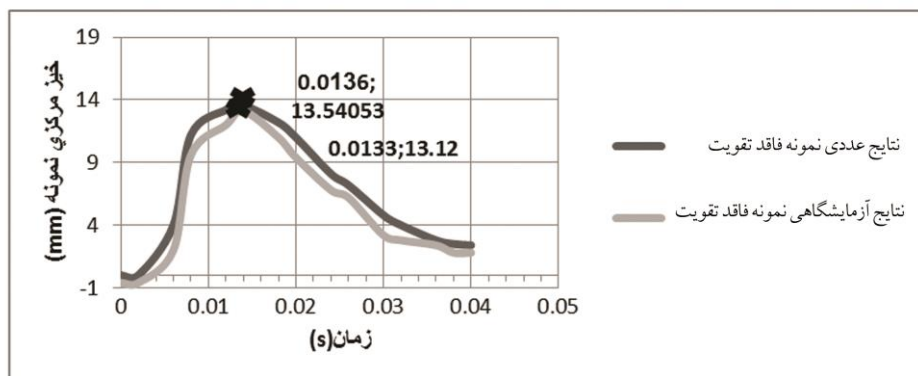
مرکزی بیشینه نمونه از ۹/۸۱۳ به ۹/۲۱۲ میلیمتر (۶ درصد) کاهش داشته‌است که نسبت به پارامترهای مقاومت بتن و درصد میلگردهای فولادی تاثیر کمتری داشته‌است.

۷- خلاصه‌ی نتایج

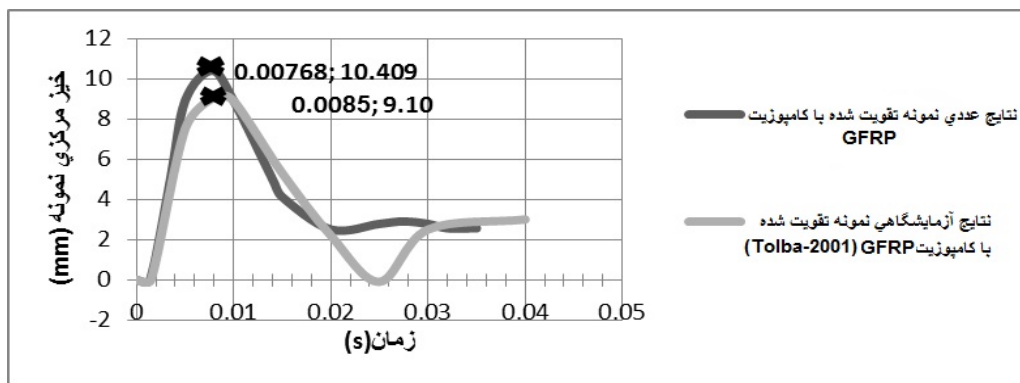
(۱) در پاسخ نمونه تحت انفجار مدل سازی نمونه دال‌های تقویت شده و فاقد تقویت و شبیه سازی بارگذاری در نرم افزار LS-DYNA، شکل ۱۵، نتایجی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی بوده که نشان دهنده‌ی صحت مدل سازی و تحلیل نرم‌افزار بوده است.

(۲) طبق مطالعات اجزای محدود صورت‌گرفته، تقویت نمونه دال بتنی مسلح با ورقه‌های کامپوزیت پلیمری GFRP، تاثیر به سزایی در کاهش تغییر مکان دال داشته‌است. به شکلی که در نمونه‌ی تقویت شده تحت بار ۳۹/۲۷ کیلوگرم مقدار کاهش خیز مرکزی دال در نمونه‌ی تقویت شده ۱۳۱/۳ میلی‌متر، به عبارتی ۲۳ درصد بوده است.

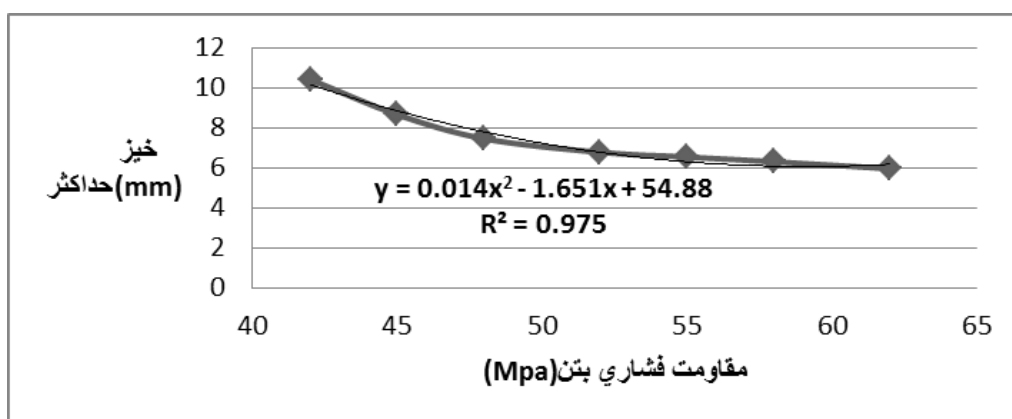
(۳) طی مطالعات پارامتریک صورت گرفته با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار کرنش ایجاد شده در مصالح و به دنبال آن مقدار خیز مرکزی نمونه کاهش می‌یابد. حد تاثیر این پارامتر به قدری است که با افزایش مقاومت فشاری بتن تا ۴۸ درصد، مقدار خیز مرکزی نمونه در حدود ۴۳ درصد کاهش داشته‌است که این نشان دهنده‌ی این است که افزایش پارامتر مقاومت فشاری بتن تاثیر به سزایی در کاهش خیز نمونه و بهبود در عملکرد نمونه تحت انفجار داشته و نسبت به سایر پارامترها بیشترین تاثیر را



شکل ۹: مقایسه‌ی نمودارهای تغییر مکان - زمان عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی فاقد تقویت



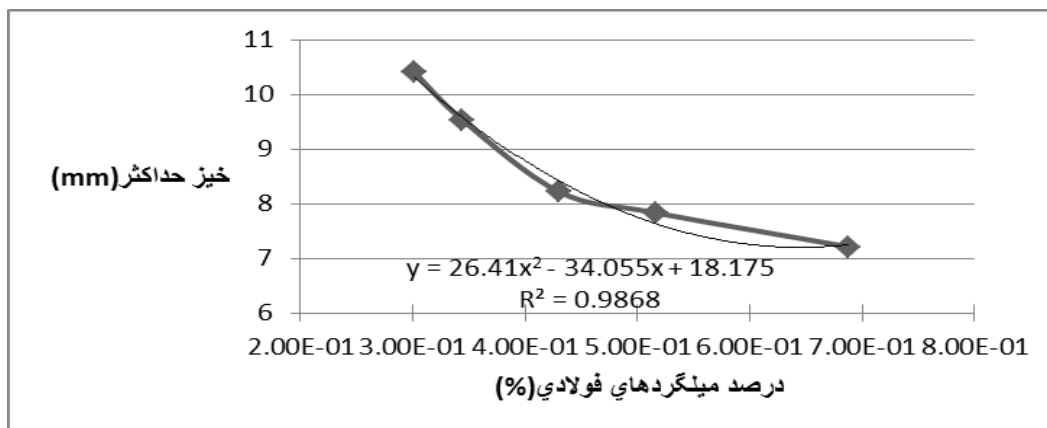
شکل ۱۰: مقایسه‌ی نمودارهای تغییر مکان - زمان عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی تقویت شده



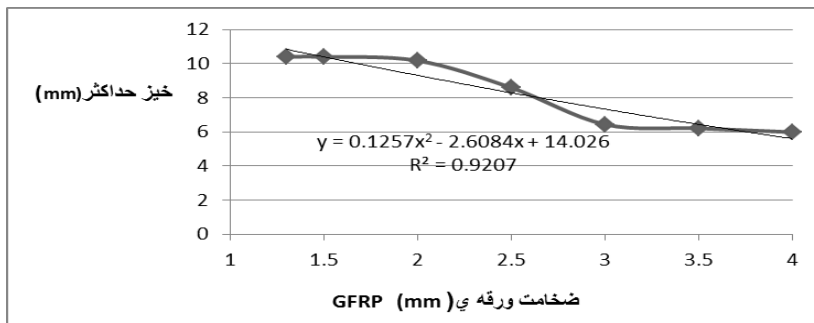
شکل ۱۱: اثر افزایش مقاومت فشاری در کاهش تغییر مکان حداکثر نمونه

جدول ۴: انواع FRP به کار رفته در تحقیق

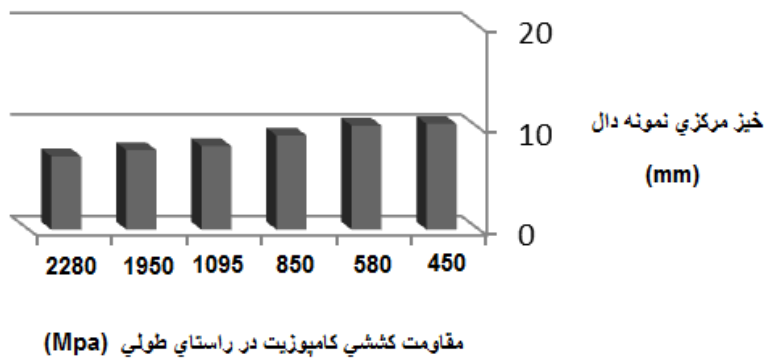
نوع FRP	CFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GFRP	GFRP
محقق	Han et al Carbon/epoxy [۱۳]	Soden et al Carbon/epoxy [۱۴]	Chan et al Carbon/epoxy [۱۵]	Castatino et al Glass/epoxy [۱۶]	Deka et al Glass/epoxy [۱۷]	Tolba Glass/epoxy [۱]
X(t)(Mpa)	1095	1950	2280	850	450	580
خیز حداکثر (mm)	9.813	9.319	9.212	9.367	10.223	10.198



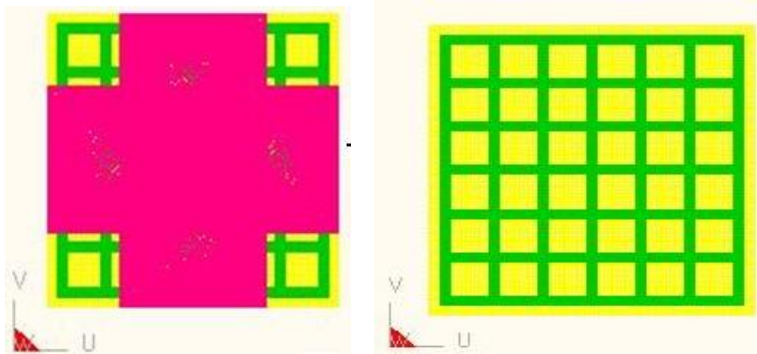
شکل ۱۲: اثر افزایش درصد میلگردهای فولادی در کاهش تغییر مکان نمونه



شکل ۱۳: اثر افزایش ضخامت ورقه‌ی GFRP در کاهش تغییر مکان نمونه



شکل ۱۴: مقدار تغییر مکان حداکثر دال با به‌کارگیری چند نوع کامپوزیت پلیمری



المان **solid** برای بتن،
المان **beam** برای فولاد
و المان **shell** برای
FRP

شکل ۱۵: مدل دال بتن مسلح فاقد تقویت (راست) و تقویت شده (چپ) در نرم افزار

۸- منابع

Ont., Canada

[4] CONWEP, Conventional weapons, effects, A computer software produced by U.S. Army Waterways Experimental Station, Mississippi, USA, 1990

[5] Pedro F. Silva, Binggeng Lu, Improving the blast resistance capacity of RC slabs with innovative composite materials, Science direct Journals, 2006

[6] Kinney, G.F. and Graham, K.J. (1985), Explosive shock, Springer-verlag, Newyork

[7] Mays, G.C. and Smith, P.D. (1995), Blast effects on buildings, Telford Publications, London, 121 PP.

[8] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual version 9.71. Livermore Software Technology

[1] Ahmed Fahmy Farag Tolba, Response of FRP-Retrofitted Reinforced concrete panels to Blast loading, PHD thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 2001

[2] Khalid M. Mosalam, Ayman S. Mosallam Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slabs subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites, University of California, Berkeley, 2001

[3] A. Ghani Razaqpur, Ahmed Tolba, Ettore Contestabile, Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates, McMaster University, Hamilton,

- [14] Soden PD, Hinton MJ, Kaddour AS. Lamina Properties, Lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates. *Composite Science and Technology* 1998;58:1011e22.
- [15] Chan S, Fawaz Z, Behdinin K, Amid R. Ballistic limit prediction using numerical model with progressive damage capability. *Composite Structures* 2007;77:466e74.
- [16] Castantino Menna, Domenico Asprone, Giancarlo Caprino, Valentino Lopresto, Andrea prota, Numerical Simulation of impact tests on GFRP composite laminates, *Science Direct Journal*, 2011
- [17] L.J. Deka, S.D. Bartus, U.K. Viakia, Damage evaluation and Energy Absorption of FRP plates subjected to Ballistic Impact using a Numerical Model, 9th International LS-DYNA users conference. Corporation; July 2006.
- [9] Malvar LJ, Crawford JE, Wesevich JW, Simons D. A plasticity concrete material model for DYNA3D. *Int J Imp Eng* 1997;19(9/10):847-73.
- [10] Jin-Won Nam, Ho-Jin Kim, Sung-Bae Kim, Na-Hyun Yi, Jang-Ho Jay Kim, Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure, *Science direct Journals*, 2010.
- [11] Chang FK, Chang KY. A progressive damage model for laminated composite containing stress concentration. *J Compos Mater* 1987;21(9):834-55.
- [12] Park H, Lee K, Lee SW, Kim K. Dynamic analysis of nonlinear composite structures under pressure wave loading. *J Compos Mater* 2006;40(15): 1361-83.
- [13] Han H, Taheri F, Pegg N, Lu Y. A numerical study on the axial crushing response of hybrid pultruded and braided tubes. *Composite Structures* 2007;80:253e64.