

مطالعه عددی خسارت‌های وارد بر پوسته ساخته شده از بتن پارچه‌ای تحت تأثیر انفجار نزدیک

محمد فیاض^{*}، عسکر قربان‌نژاد^۱، فریدون خسروی^۲

۱- استادیار، ۲- پژوهشگر، ۳- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۳/۰۴، پذیرش: ۹۷/۰۲/۳۱)

چکیده

بتن پارچه‌ای یک پارچه سه‌بعدی پر شده با پودر سیمان انعطاف‌پذیر است، زمانی که هیدراته و سخت می‌شود یک لایه بتنی نازک، مستحکم، ضد آب و ضد حریق را تشکیل می‌دهد. در این مطالعه مقاومت دال بتنی ساخته شده با بتن پارچه‌ای تحت بار انفجار مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بررسی رفتار پوسته ساخته شده از بتن پارچه‌ای در ابتدا رفتار انفجاری دال‌های بتن مسلح به صورت عددی و با استفاده از تحلیل درگیر با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشین، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. سپس رفتار دینامیکی پوسته بتن پارچه‌ای دوطرفه با شرایط تکیه‌گاهی چهار طرف گیردار تحت بار انفجار در حوزه نزدیک به کمک روش اجزاء محدود و با استفاده از تحلیل دینامیکی درگیر مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل شامل چگونگی گسترش شکست در پوسته بتنی، وضعیت توزیع ترک‌های قطری و شعاعی (حلقوی) در سطح پوسته و میزان جابجایی مرکزی پوسته است. نتایج این تحقیق مبین آن است که در صورت استفاده از پوسته بتن پارچه‌ای با ضخامت مناسب می‌توان از آن به عنوان یک سازه مقاوم در برابر بار انفجار استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: تحلیل درگیر، دال بتن مسلح، پوسته بتن پارچه‌ای، ترک‌های قطری، ترک‌های شعاعی، جابجایی مرکزی پوسته

Numerical Investigation of Damages on Concrete Canvas Shell under Near-Field Blast

M. Fayyaz^{*}, A. Ghorban Nejad, F. Khosravi

Imam Hossein University

(Received: 25/0/2017; Accepted: 21/05/2018)

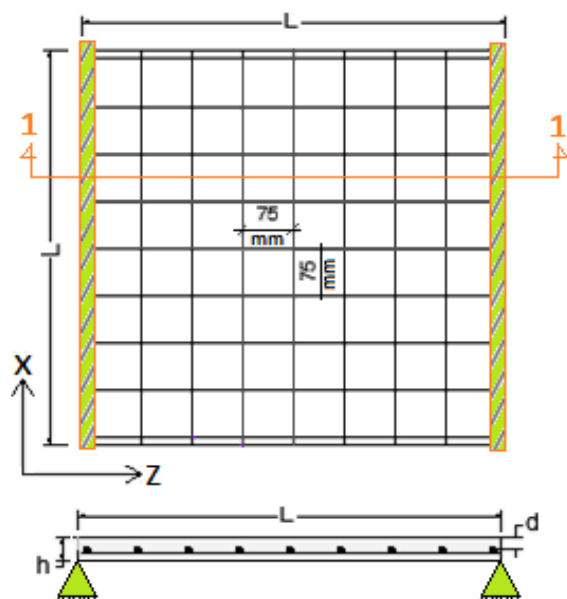
Abstract

Concrete Canvas is a flexible concrete impregnated fabric that hardens on hydration to form a thin, durable water proof and fire-resistant concrete layer. Strength properties of Canvas signify that it could be a blast resistant shell. In this paper, to investigate the concrete canvas shell behavior under blast loads, the blast behavior of reinforced concrete slabs are compared with prior experimental observations using coupled analysis. Then the dynamic behavior of two-way concrete canvas shell under near-field blast load is modeled using finite element method. Analysis results illustrates failure development, distribution of diagonal and radial cracks on surface and central deflection of concrete canvas shall. Results shows that using concrete canvas shell with proper thickness is more resistant under blast loads than conventional slabs.

Keywords: Coupled Analysis, Reinforced Concrete, Concrete Canvas Shell, Diagonal Crack, Radial Crack, Shell Central Deflection

۱-۲. تشریح مدل آزمایشگاهی

به علت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی مربوط به تأثیر انفجار بر روی پوسته‌های بتن پارچه‌ای در این مطالعه برای صحت‌سنجی رفتار پوسته بتنی تحت تأثیر بار انفجار به مدل‌سازی عددی مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط ونگ و همکاران [۱۱] که تأثیر انفجار بر روی دال‌های بتن مسلح را مورد بررسی قرار داده اند، پرداخته شده است. ابعاد و جزئیات تسلیح دال‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. دال‌های مورد مطالعه به ابعاد $1000 \times 1000 \times 40$ mm دارای شبکه‌ای از آرماتورها به قطر ۶ میلی‌متر بوده که از یکدیگر در هر دو امتداد X و Y به فواصل ۷۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن معمولی $39/5$ MPa، مقاومت کششی آن $4/2$ MPa و مدول الاستیسیته $28/3$ GPa است. مقاومت تسلیم و مدول یانگ آرماتورها نیز به ترتیب 600 MPa و 200 GPa است. دال مورد نظر بر روی قاب فولادی خاصی که برای انجام آزمایش‌ها ساخته شده است به صورت افقی قرار گرفته و ماده منفجره (TNT) توسط طناب به صورت معلق در امتداد محور تقارن دال و در فاصله ۴۰۰ میلی‌متری از وجه فوقانی آن قرار داده شده است. در آزمایشی که برای صحت‌سنجی رفتار پوسته بتنی تحت تأثیر بار انفجار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، جرم ماده منفجره (TNT) و فاصله مقیاس شده (مبنای مناسبی برای بررسی تغییرات شدت انفجار است که این پارامتر با افزایش ریشه سوم وزن ماده منفجره کاهش و با افزایش فاصله از منبع انفجار افزایش می‌یابد.) به ترتیب برابر با $0/55$ kg و $m/kg^{1/3}$ $0/488$ است.



شکل ۱. هندسه و نحوه آرماتورگذاری نمونه دال بتن آرمه ($L=1000$ mm, $h=40$ mm, $d=28$ mm)

۱. مقدمه

بتن مسلح به پارچه (TRC) دارای مزیت‌های متنوعی از قبیل: مقاومت کششی بالا، انعطاف‌پذیری عالی، ضخامت و وزن کم، مقاوم در برابر خوردگی است [۲-۱]. به عنوان یک جز تسلیح کننده، پارچه می‌تواند مقاومت کششی را به گونه قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر نوع الیاف، هندسه بافت که شامل فضای الیاف بود و سایز بافت است [۴-۳]، سایز و اندازه دسته‌بندی الیاف ممکن است تأثیر قابل توجهی بر کارآمدی تسلیحات به‌کاررفته در بتن داشته باشد [۵]. در این میان بتن پارچه‌ای که توسط بروین و کروفرود در سال ۲۰۰۵ در انگلیس اختراع شد، یکی از مطلوب‌ترین محصولات در زمینه مهندسی عمران است [۶]. بتن پارچه‌ای (CC) یک پارچه سه‌بعدی پر شده با پودر سیمان انعطاف‌پذیر است، زمانی که هیدراته و سخت می‌شود یک لایه بتنی نازک، مستحکم، ضدآب و ضدحریق را تشکیل می‌دهد. خصوصیات و ویژگی اجزایش شامل ماتریس سیمان، نوع الیاف و الگوی هندسی پارچه مستقیماً مقاومت مکانیکی و پایداری حجمی CC را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۹-۷]. در مقایسه با مخلوط‌های بتن سنتی، بتن پارچه‌ای (CC) دارای نصب آسان‌تر، سریع‌تر بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است و همچنین دارای مزیت‌هایی از قبیل: کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، کاهش زمان ساخت‌وساز و بهره‌برداری و کاهش نیروی کاری است. انواع کاربرد بتن پارچه‌ای شامل: جان‌پناه‌ها و سنگ‌های نظامی، ساخت کانال‌های آب، پایدار کردن خاک‌ریزی‌ها، ساخت سریع سواره‌رو جهت ایجاد سطوح فرود تقویت‌سازه، پوشش کانال، پوشش تونل، تثبیت زمین و ... است [۱۰]. محصول بتن پارچه‌ای، فناوری نو ظهوری است که به صورت تجاری در دهه ۲۰۱۰ توسعه یافته است. با توجه به استفاده از الیاف ویژه در بتن پارچه‌ای و افزایش مقاومت کششی بتن و شکل‌پذیری آن، این محصول پتانسیل خوبی جهت استفاده به عنوان سازه‌های مقاوم در برابر انفجار را دارد لکن مطالعه تأثیر انفجار بر این محصول تا کنون انجام نشده است. در این مطالعه برای نخستین بار عملکرد بتن پارچه‌ای در برابر انفجار مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار پوسته ساخته‌شده از بتن پارچه‌ای تحت تأثیر انفجار در حوزه نزدیک است.

۲. روش تحقیق

به دلیل استفاده از پوسته‌های بتن پارچه‌ای در اهداف نظامی و ضد حریق بودن المان مذکور در این مقاله رفتار دینامیکی یک پوسته بتن پارچه‌ای دو طرفه تحت اثر بارهای انفجاری با استفاده از نرم‌افزار المان محدود اتوداین [۱۰] به روش تحلیل دینامیکی درگیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲. مشخصات و ابعاد هندسی پوسته بتن پارچه‌ای

پوسته بتن پارچه‌ای مورد مطالعه در این تحقیق دارای ابعاد 400x400x13 mm است. مطابق شکل (۲)، ترکیب سیمان و الیاف موجود در پارچه تشکیل بتن الیافی را داده است. به عبارتی پارچه سه بعدی، دارای الیافی است که دو سطح لایه جاذب آب و لایه PVC را به یکدیگر متصل کرده و همچنین نقش الیاف را نیز بازی می‌کند. از این رو ویژگی‌های مقاومتی بتن پارچه‌ای مشابه بتن الیافی بوده که با نمونه‌های استاندارد ارزیابی شده‌اند. مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن الیافی موجود در آن ۴۰ MPa، مقاومت کششی آن ۵/۵ MPa است [۶]. مقاومت تسلیم و مدول یانگ پارچه (با ضخامت ۱/۵ mm) قرار گرفته در سطح فوقانی پوسته به ترتیب ۷۳۱ MPa و ۱۷/۳۹ GPa است. پارچه قرار گرفته در سطح تحتانی پوسته دارای شبکه‌ای از الیاف به قطر ۱/۵ میلی‌متر بوده که از یکدیگر در هر دو امتداد X و Y به فواصل ۳ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. مقاومت تسلیم و مدول یانگ الیاف مذکور به ترتیب ۴۴۳ MPa و ۱۰/۵۴ GPa است [۶]. لایه‌ای از PVC انعطاف‌پذیر با ضخامت ۰/۵ mm که در پایین‌ترین قسمت پوسته قرار می‌گیرد دارای مقاومت تسلیم ۱۶/۳ Mpa و مدول یانگ ۲۵/۱ Mpa است [۶]. برای بررسی رفتار پوسته مورد نظر به صورت دوطرفه، در چهار لبه پوسته از تکیه‌گاه‌های گیردار با عرض ۳۰ mm استفاده می‌شود. ماده منفجره (TNT) در امتداد محور تقارن پوسته و در فاصله ۳۰۰ میلی‌متری از وجه فوقانی آن قرار داده شده است. جرم ماده منفجره (TNT) و فاصله مقیاس شده آن به ترتیب برابر با ۰/۰۶ kg و ۰/۷۶۶ m/kg^{1/3} است

۳-۲. مدل‌سازی اجزاء محدود

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی پوسته بتن پارچه‌ای تحت اثر بار انفجار با استفاده از تحلیل دینامیکی درگیر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل شامل رفتار کلی سازه، خردشدگی محلی بتن و جابجایی مرکزی دال مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. برای کلیه شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود غیرخطی تصریحی اتوداین [۱۰] استفاده می‌شود که در ادامه روش مدل‌سازی تبیین می‌گردد.

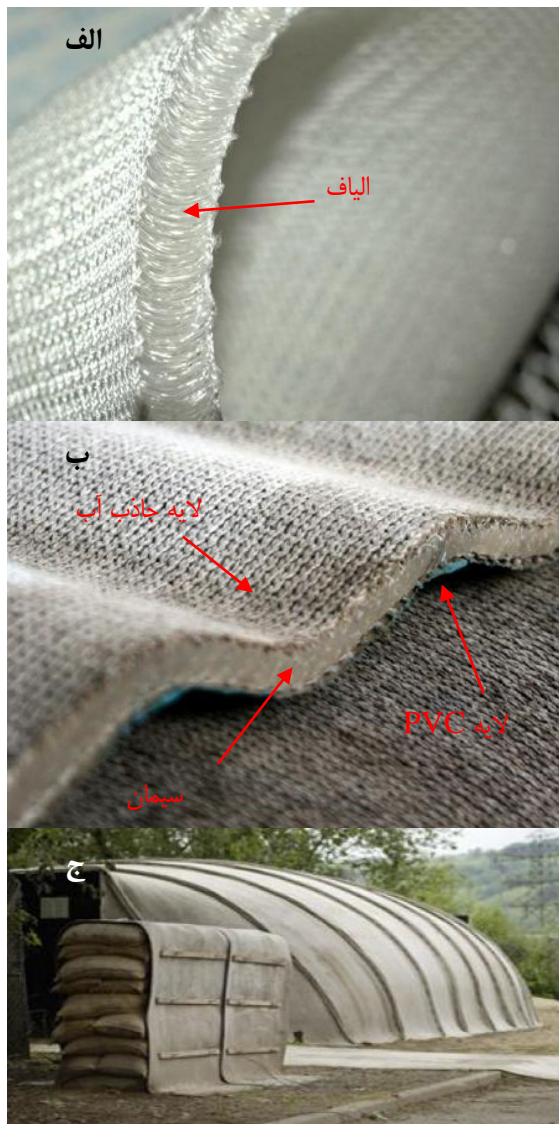
۱-۳-۲. مدل‌سازی مواد

هوا: در تحلیل درگیر، علاوه بر سازه در معرض انفجار (دال بتنی)، ماده منفجره و هوای اطراف آن جهت اعمال بار انفجاری مدل می‌شوند. هوای اطراف ماده منفجره در تحلیل درگیر به صورت یک گاز کامل مدل می‌گردد. کاربرد مفهوم گاز کامل یا ایده‌آل، حل بسیاری از مسائلی را که با تغییر شرایط گاز مرتبط هستند ساده می‌کند. به همین دلیل در این مطالعه برای

مدل‌سازی هوا از معادله حالت گاز ایده‌آل استفاده می‌شود. معادله حالت هوا با استفاده از قانون گاز ایده‌آل (گاما) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \quad (۱)$$

که در آن، P فشار، γ نسبت ضریب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت به حجم ثابت تعریف می‌شود و برای گازهای دو اتمی مانند هوا برابر با ۱/۴ است، ρ چگالی جریان و ρ_0 چگالی اولیه هوا بوده که در حدود ۱/۲۲۵ kg/m³ است. E_0 نیز انرژی درونی اولیه است که مقدار آن برابر است با ۲/۵E5 J/kg. سایر پارامترهای مربوط به معادله حالت گاز ایده‌آل به طور کامل در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲. الف) پارچه بکار رفته در بتن پارچه‌ای قبل از تزریق سیمان ب) بتن پارچه‌ای بعد از تزریق سیمان ج) نمونه‌هایی از سازه‌های احداث شده با بتن پارچه‌ای پس از گیرش

فشرده شده و رابطه بین فشار و چگالی دوباره خطی می‌شود. بتن به دلیل ناهم‌انگهی و تخلخل بالا (۱۰ درصد) دارای رفتار تراکمی غیرخطی پیچیده‌ای است. به همین دلیل جهت شبیه‌سازی رفتار آن از معادله حالت پی-آلفا استفاده می‌شود. در این معادله حالت پارامتر α نشان دهنده تخلخل ماده است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\alpha = \frac{v}{v_s} \quad (۳)$$

در رابطه فوق V حجم ویژه ماده متخلخل و V_s حجم ویژه ماده در حالت غیرمتخلخل است. مقدار V_s برابر است با $1/\rho_s$ که ρ_s چگالی در حالت غیرمتخلخل است. مسیر تراکم در معادله حالت پی-آلفا نشان دهنده سختی حجمی ماده متخلخل بین فشار اولیه P_e و فشار کاملاً متراکم کننده P_s است که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\alpha = 1 + (\alpha_p - 1) \left[\frac{p_s - p}{p_s - p_e} \right]^n \quad (۴)$$

در رابطه فوق α_p تخلخل متناظر با جاری شدن اولیه پلاستیک، P فشار حاضر و n توان تراکم (اندازه توان تراکم ۲ یا ۳ در نظر گرفته می‌شود) است. در مطالعه حاضر مقدار ۳ برای n در نظر گرفته شده است.

همچنین جهت شبیه‌سازی رفتار بتن از معادله حالت منسجم چندجمله‌ای با ارائه شکل‌های تحلیلی متفاوت برای حالت‌های فشاری و کششی استفاده می‌شود. در این معادله حالت فشار با استفاده از متراکم‌سازی پس از تراکم کامل $\bar{\mu}$ و انرژی درونی ویژه e محاسبه می‌گردد. در تراکم کامل $(\bar{\mu} = \frac{p}{\rho_s} - 1)$ ، چگالی ρ و چگالی ρ_s در فشار صفر است. برای $\bar{\mu} > 0.0$ ماده تحت فشار است و فشار (P) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$p = A_1 \bar{\mu} + A_2 \bar{\mu}^2 + A_3 \bar{\mu}^3 + (B_0 + B_1 \bar{\mu}) \rho_s e \quad (۵)$$

برای $\bar{\mu} < 0.0$ ماده تحت کشش است و فشار (P) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$p = T_1 \bar{\mu} + T_2 \bar{\mu}^2 + B_0 \rho_s e \quad (۶)$$

در معادلات فوق ρ_s چگالی در فشار صفر، e انرژی درونی ویژه، A_1 مدول بالک و A_2 ، A_3 ، B_0 ، B_1 ، T_1 و T_2 ضرایب ثابت هستند.

مدل مقاومت و شکست: از آنجایی که در شبیه‌سازی سازه در برابر بار انفجار در نظر گرفتن تأثیرات نرخ کرنش امری مهم تلقی می‌گردد در نرم‌افزار اتوداین [۱۰] مدل مقاومت و شکست با استفاده از معیار RHT ارائه شده توسط ریدل، هایرمایر

جدول ۱. پارامترهای معادله حالت گاز ایده‌آل برای هوای اطراف سازه و ماده منفجره [۱۰]

پارامتر	مقدار
گاما	۱/۴۰
ثابت بی دررو	۰/۰۰
تغییر فشار (kPa)	۰/۰۰
دمای مرجع (K)	۲۸۸/۲
گرمای ویژه (J/kgK)	۷۱۷/۶
خاصیت هدایت حرارتی (J/mKs)	۰/۰۰

ماده منفجره: برای مدل‌سازی ماده منفجره از معادله حالت JWL استفاده می‌شود. استفاده از این معادله برای مدل‌سازی انواع مواد منفجره کاربرد بسیار فراوانی دارد که معادله آن به شکل زیر است.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (۲)$$

در معادله (۲) P فشار هیدرواستاتیک، V حجم ویژه، e انرژی درونی ویژه و A ، B ، R_1 ، R_2 و ω ثابت‌های مواد هستند. مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد TNT با چگالی $1/63 \text{ g/cm}^3$ مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. پارامترهای معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT [۱۰]

پارامتر	مقدار
A (kPa)	۷۳۷۷/۳E۸
B (kPa)	۷۴۷۱/۳E۶
R1	۱۵/۴
R2	۹۰/۰
W	۳۵/۰
سرعت انفجار C-J (m/s)	۹۳/۶E۳
واحد حجم / انرژی C-J (kJ/m3)	۰۰/۶E۶
فشار C-J (kPa)	۱۰/۲E۷

بتن: رفتار بتن تحت بار دینامیکی مانند انفجار، با رفتار معمولی بتن تحت بار استاتیکی متفاوت است، بنابراین لازم است برای مدل‌سازی بتن از مدل منطبق بر رفتار دینامیکی آن استفاده شود.

معادله حالت (EQS): رابطه بین فشار و چگالی در بتن تا یک فشار معین به صورت خطی است. اما پس از این فشار منافذ بتن فشرده شده و ترک‌های موسوم به میکرو ترک شکل می‌گیرند و در اثر فشارهای بیشتر منافذ بتن از هم پاشیده شده و مواد متراکم می‌شوند. رفتار فشار - چگالی در این مرحله غیرخطی است. اما در فشارهای بسیار بالا بتن به طور کامل

درجه حرارت (دما) است [۱۴]. با توجه به کاربرد فراوان مدل جانسون- کوک در شبیه‌سازی مسائل مربوط به ضربه و انفجار، در این مطالعه جهت تعریف رفتار مقاومتی فولاد از آن استفاده شده است.

تنش تسلیم در مدل جانسون- کوک با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - T_H^m] \quad (7)$$

در معادله فوق A تنش تسلیم پایه در کرنش‌های کم، B و n پارامترهای مربوط به تأثیر پدیده سخت‌شدگی مجدد در فولاد و ε_p کرنش پلاستیک موثر هستند. پیرانتز دوم در معادله (7) شامل تأثیرات نرخ کرنش ناشی از بارهای سریع انفجاری در فولاد است. پارامتر C ثابت ماده است. نسبت $\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}$ نمایانگر نرخ کرنش پلاستیک موثر نرمالایز شده برای $\varepsilon_0 = 1s^{-1}$ است. پیرانتز سوم در معادله (7) نشان دهنده تأثیرات دما است. T_H (دمای همولوگ) به صورت $(T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ تعریف می‌شود که T دمای مطلق، T_{room} دمای فضا و T_{melt} درجه حرارت ذوب فولاد است. پارامتر m در معادله (7) ثابت ماده است. پارامترهای معادله حالت و مدل مقاومت برای فولاد در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است.

جدول ۳. پارامترهای معادله حالت خطی برای فولاد [۱۰]

پارامترها	مقدار
مدول بالک (kPa)	۱/۶۷E۸
دمای مرجع (K)	۳۰۰
گرمای ویژه (J/kgK)	۴۷۷
خاصیت هدایت حرارتی (J/mKs)	۰/۱۰۰

جدول ۴. پارامترهای مدل مقاومت جانسون و کوک [۱۰]

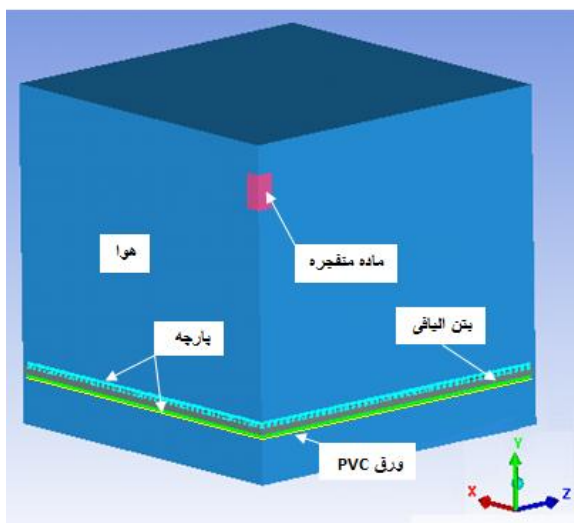
پارامترها	مقدار
مدول برشی (kPa)	۷/۶۹۲E۷
تنش تسلیم (kPa)	۲/۸E۵
ثابت سخت‌شدگی (kPa)	۵/۱E۵
توان سخت‌شدگی	۲۶/۰
ثابت نرخ کرنش	۰/۰۱۴
دمای ذوب (K)	۱/۷۹۳E۳
نرخ کرنش مرجع (/s)	۱/۰۰
اصلاح نرخ کرنش	1 st Order

و دوما صورت می‌پذیرد که شامل سختی فشاری، سختی کرنشی، سختی نرخ کرنش و سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی) و شاخص آسیب است [۱۲] سه ثابت وابسته شامل سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقی‌مانده توصیف می‌شود. مدل RHT به صورت تنش تسلیم در برابر فشار ارائه شده است که در آن فشار به صورت میانگین حاصل از سه تنش اصلی تعریف می‌شود. هنگامی که عضو در معرض یک فشار خطی قرار گیرد، در ابتدا کرنش همراه با تنش افزایش می‌یابد (رابطه الاستیک تنش با کرنش). این وضعیت با شیبی متناظر با مدول الاستیسیته ادامه پیدا می‌کند تا به حد الاستیک آن برسد. در مرحله بعدی که فاز سخت‌شدگی نام دارد، رفتار به صورت یک رفتار خطی تقریب زده می‌شود که شیب آن به کمک پارامترهای مدول برشی پلاستیک و الاستیک قابل بیان است. سطح شکست در پایان این مرحله قرار دارد و بعد از آن مرحله نرم‌شدگی آغاز می‌شود. در مرحله نرم‌شدگی، فشار و مقاومت کاهش خواهند یافت تا به سطح مقاومت باقی‌مانده برسند.

ترکیب سیمان و پارچه سه بعدی در بتن پارچه‌ای نوعی بتن الیافی با الیاف PET را تشکیل می‌دهد. با توجه به محدودیت مدل‌سازی الیاف در اتوداین در این تحقیق مدل‌سازی بتن الیافی از طریق اعمال خصوصیات بتن الیافی به نرم‌افزار انجام شده است (شکل ۲). مطابق گزارش کانویس، مقادیر ضرایب مربوط به مدل مقاومت و شکست RHT جهت شبیه‌سازی بتن موجود در پوسته بتن پارچه‌ای به صورت زیر است [۶]:

چگالی اولیه $(\rho = 2/75 \text{ g/cm}^3)$ ، مدول برشی $(G = 16/7 \text{ GPa})$ ، مقاومت فشاری $(f_c = 40 \text{ MPa})$ ، مقاومت کششی $(f_t = 5/5 \text{ MPa})$ ، ثابت سطح شکست دست‌نخورده $(A = 1/6)$ ، توان سطح شکست دست‌نخورده $(N = 0/61)$ ، $Q = 0/6805$ ، ثابت مقاومت شکست $(B = 1/6)$ ، توان مقاومت شکست $(M = 0/61)$ ، ثابت شکست $(D_I = 0/04)$ و $(D_2 = 1)$ ، حداقل کرنش شکست کششی $(\varepsilon_f^{min} = 0/01)$ ، خطای مدول برشی باقی‌مانده $= 0/13$ است.

فولاد: از فولاد برای مدل کردن مسلح‌کننده‌ها در سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. برای توصیف رفتار فولاد در این مطالعه از معادله حالت خطی استفاده شده است. این معادله توصیف‌کننده رفتار خطی بین کرنش حجمی و فشار در فولاد است، که به وسیله مدول بالک (k) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. مدل جانسون- کوک مدل مناسبی در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مصالح فولادی با در نظر گرفتن مقادیر کرنش، نرخ کرنش و آثار



شکل ۳. یک چهارم مدل‌سازی عددی به صورت سه بعدی

در مدل‌سازی عددی پوسته بتنی به دلیل تغییر شکل‌های کوچک پوسته از حل گر لاگرانژی [۱۰] استفاده می‌شود (در حل گر لاگرانژی شکل هندسی المان‌ها و مش‌ها در هنگام تحلیل متغیر است) درحالی‌که هوا و ماده منفجره به دلیل تغییر شکل‌های بزرگ با استفاده از حل گر اویلری [۱۰] مدل می‌شوند (در حل گر اویلری شبکه‌بندی ماده در فضای تحلیل ثابت بوده و این ماده است که در میان شبکه‌بندی اجازه عبور دارد). به دلیل ضخامت کم پی وی سی انعطاف‌پذیر و پارچه فوقانی جهت مدل‌سازی اجزا مذکور از حل گر پوسته (Shell) استفاده شده و پارچه تحتانی به دلیل شباهت آن به شبکه آرماتور در دال‌های بتن مسلح با استفاده از حلگر Beam شبیه‌سازی می‌گردد. حلگر Beam نرم‌افزار اتوداین امکان فراهم نمودن یکپارچگی با المان اصلی (Solid) را فراهم می‌نماید. در این حلگر می‌توان بدون افزایش حجم محاسبات تعداد گره‌های اتصال بین پارچه و بتن را به نحوی تعریف نمود تا پارچه و بتن رفتار یکپارچه‌ای را تا لحظه گسیختگی داشته باشند. از این رو پس از گسیختگی دال، امکان بررسی جداسازی پارچه نیز علاوه بر تخریب دال وجود دارد. علاوه بر این از رابط اویلری لاگرانژی برای مدل کردن اثر متقابل سیال و سازه استفاده به عمل می‌آید. لازم به ذکر است که مش لاگرانژی معمولاً محدودیت هندسی بر مش اویلری تحمیل نموده درحالی‌که مش اویلری مرز فشار وارده بر مش لاگرانژی را فراهم می‌کند. تنها شرط مرزی خروج سیال برای مش اویلری در نظر گرفته می‌شود. جهت گیردار نمودن کامل چهار لبه پوسته، در نواحی تکیه‌گاهی آن، قیود تکیه‌گاهی از بالا و پایین و در امتداد افق ایجاد می‌گردند، جابجایی تکیه‌گاه‌ها در تمام جهات ثابت است.

پی وی سی انعطاف‌پذیر، پارچه فوقانی و تحتانی: جهت توصیف رفتار پی وی سی و پارچه معادله حالت خطی (Linear)، مدل مقاومتی الاستیک (Elastic) و مدل شکست تنش اصلی (Principal Stress) مورد استفاده قرار می‌گیرد که ضرایب این معادلات و مدل‌ها در جدول‌های (۷-۵) آورده شده است.

جدول ۵. پارامترهای معادله حالت برای پی وی سی و پارچه [۶]

پارامترهای معادله حالت خطی	مقادیر برای پی وی سی	مقادیر برای پارچه فوقانی	مقادیر برای پارچه تحتانی
چگالی مرجع (g/cm^3)	۳/۱	۱/۳۸	۱/۳۸
مدول بالک (kPa)	۱۸۳۳/۴E۴	۲/۸۹۸E۷	۱/۷۵۷E۷
گرمای ویژه (J/kgK)	۱/۰E۳	۱/۳E۳	۱/۳E۳
خاصیت هدایت حرارتی (J/mKs)	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

جدول ۶. پارامترهای مدل مقاومت پی وی سی و پارچه [۶]

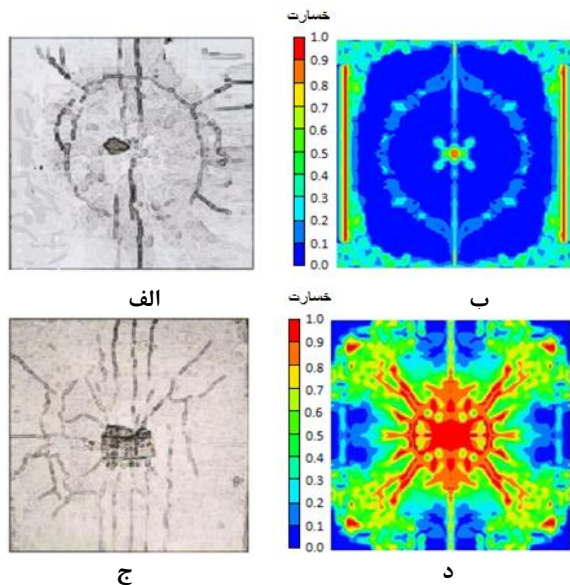
پارامترهای مدل مقاومتی الاستیک	مقادیر برای پی وی سی	مقادیر برای پارچه فوقانی	مقادیر برای پارچه تحتانی
مدول برشی (kPa)	۸/۹۶E۳	۶/۲۱E۶	۳/۷۶E۶

جدول ۷. پارامترهای مدل شکست پی وی سی و پارچه [۶]

پارامترهای مدل شکست الاستیک	مقادیر برای پی وی سی	مقادیر برای پارچه فوقانی	مقادیر برای پارچه تحتانی
تنش شکست کششی اصلی (kPa)	۱/۶۳E۴	۷/۳۱E۵	۴/۴۳E۵

۲-۳-۲. گسسته‌سازی اجزاء محدود

در این تحقیق برای شبیه‌سازی پوسته‌های بتن پارچه‌ای تحت بار انفجاری از تحلیل دینامیکی درگیر استفاده می‌شود. در تحلیل درگیر پوسته بتن پارچه‌ای (شامل بتن الیافی و پارچه) همراه با ماده منفجره و حجم مناسبی از هوای حد فاصل بین دال و ماده منفجره و همچنین هوای وجه پشتی دال مدل می‌گردند (شکل ۳). با توجه به تقارن محوری موجود در هندسه دال و بارگذاری انفجار، تنها یک چهارم دال و ماده منفجره مدل‌سازی شده است.



شکل ۴. یک کانتورهای خسارت مربوط به سطوح دال: الف) مشاهده آزمایشگاهی مربوط به سطح فوقانی دال، ب) نتایج تحلیل درگیر مربوط به سطح فوقانی دال، ج) مشاهده آزمایشگاهی مربوط به سطح تحتانی دال، د) نتایج تحلیل درگیر مربوط به سطح تحتانی دال

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وضعیت خسارت و جابجایی ماندگار در تحلیل عددی از تشابه مناسبی با مشاهدات آزمایشگاهی برخوردار است. پس از صحت‌سنجی تحلیل عددی در بررسی رفتار دال بتن مسلح تحت بار انفجار با مشاهدات آزمایشگاهی به مطالعه عددی رفتار پوسته بتن پارچه‌ای تحت بار انفجار در حوزه نزدیک پرداخته می‌شود.

دو شکل (۵-الف) و (۵-ج) وضعیت خسارت‌های وارده بر وجه فوقانی پوسته بتن پارچه‌ای پس انفجار را نشان می‌دهد که شامل مجموعه‌ای از ترک‌های سراسری به موازات تکیه‌گاه‌ها در محل قرارگیری آن‌ها به دلیل ایجاد لنگر منفی در این نواحی، ترک‌های قطری به دلیل وجود تکیه‌گاه‌های گیردار در چهار لبه پوسته که با الگوی خسارت نظیر تشکیل مکانیزم در دال‌های دوطرفه با شرایط تکیه‌گاهی گیردار سازگار هستند و تشکیل ترک‌های حلقوی و شعاعی به علت تمرکز بیشتر فشار انفجار در نواحی مرکزی پوسته نسبت به کناره‌های آن است. همان‌گونه که در شکل (۵-الف) قابل مشاهده است در سطح فوقانی پوسته که همانند یک دال دوطرفه عمل می‌کند ترک‌های قطری از مرکز روبه گوشه‌های دال امتداد یافته‌اند.

با مشاهده دو شکل (۵-ب) و (۵-د) متوجه می‌شویم که سطح خردشدگی در وجه تحتانی پوسته بسیار وسیع بوده به گونه‌ای که تقریباً تمام سطح پوسته را فرا گرفته است اما به دلیل عمق ناچیز این خردشدگی‌ها نسبت به ضخامت پوسته در این نواحی، آسیب سازه‌ای جدی‌ای به پوسته وارد نشده است

جدول ۸. نتایج حساسیت سائز المان‌های در تحلیل

تعداد المان‌ها برای بتن	۹۲۴۸	۱۲۸۰۰	۲۰۰۰۰
اندازه المان‌های بتن در سطح بالایی و زیرین دال (mm ²)	۱۵x۱۵	۱۲/۵x۱۲/۵	۱۰x۱۰
اندازه المان‌های بتن در ضخامت دال (mm ²)	۵x۱۵	۵x۱۲/۵	۵x۱۰
مقدار خطا در ارزیابی جابجایی مرکزی دال (mm)	۲۷/۷٪	۷/۲٪	۵/۳٪
زمان نرمال شده مورد نیاز برای رسیدن به نتایج مطلوب	۰/۳۴	۱/۰۰	۲/۴۰

با توجه به جدول (۸) برای مدل‌سازی بتن استفاده از المان‌هایی با ابعاد $12/5 \times 12/5 \times 5 \text{ mm}^3$ و $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ به علت خطای نسبتاً کمتر در تخمین جابجایی مرکزی دال مناسب‌تر است. به دلیل کوتاه‌تر بودن زمان تحلیل در ادامه این مقاله ابعاد المان‌های اجزاء محدود در مدل‌سازی دال بتنی $12/5 \times 12/5 \times 5 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شده است. همچنین از ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ برای المان‌های اجزاء محدود در مدل‌سازی هوا و ماده منفجره استفاده شده است. فرسایش یک روش عددی است که المان‌های بی‌مصرف و یا المان‌هایی که باعث می‌شوند گام زمانی در فرآیند تحلیل به کمتر از حداقل مقدار آن کاهش یابد را حذف می‌کند. معیارهای فرسایش می‌تواند بر اساس مقادیر گام زمانی حداقل، کرنش و یا شکست مواد باشند [۱۰]. روش فرسایش برای شبیه‌سازی روند خسارت به کار برده می‌شود. روش فرسایش باید زمانی که خسارت دال خیلی جدی است در نظر گرفته شود، به عنوان مثال زمانی که در سطح پشتی دال خردشدگی و سوراخ شدگی اتفاق بیفتد. اگر هیچ آسیب جدی به جز چند ترک جزئی در مرکز سطح دال مشاهده نشود، روش فرسایش نمی‌تواند در نظر گرفته شود [۱۰].

۳. نتایج و بحث

شکل‌های (۴-الف) و (۴-ج) به ترتیب وضعیت خسارت مشاهده‌شده در وجه فوقانی و تحتانی دال پس انفجار را نشان می‌دهند که شامل مجموعه‌ای از ترک‌های طولی در محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها، ترک‌های سراسری به موازات تکیه‌گاه‌ها در مرکز دال، ترک‌های حلقوی و شعاعی است. دو شکل (۴-ب) و (۴-د) منعکس‌کننده نتایج تحلیل درگیر هستند. شعاع ناحیه خردشده در مرکز دال (در وجه تحتانی دال) در مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج عددی به ترتیب 90 mm و 95 mm هستند. همچنین جابجایی ماندگار مرکزی دال در مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل عددی به ترتیب 15 mm و $14/32 \text{ mm}$ است.

همراه خردشدگی و سوراخ شدگی به موازات تکیه‌گاه در محل قرارگیری آن‌ها گسترش یافته‌اند (شکل‌های ۵ و ۶). حداکثر جابجایی مرکزی پوسته بتن پارچه‌ای در حد ۱۹/۹۴ mm است.

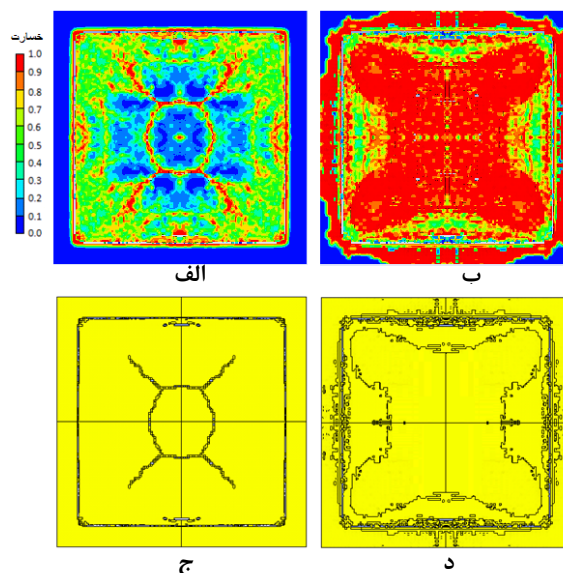
۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار پوسته ساخته‌شده از بتن پارچه‌ای تحت تأثیر انفجار در حوزه نزدیک بود. برای این منظور در ابتدا رفتار دال‌های بتن مسلح به صورت عددی و با استفاده از تحلیل درگیر با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشین، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و رفتار دال مذکور اعتبارسنجی شده و سپس رفتار پوسته بتن پارچه‌ای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که پوسته‌های بتن پارچه‌ای به دلیل ضخامت کم در نواحی تکیه‌گاهی ضعیف عمل کرده و در نواحی مذکور خسارت‌های زیادی (خردشدگی و سوراخ‌شدگی) بر آن‌ها وارد می‌شود. اگرچه در مورد پوسته بتن پارچه‌ای نتایج آزمایش میدانی در دسترس نیست لکن روشن است در مدل‌سازی عددی به دلیل تحقق شرایط گیرداری ۱۰۰٪ تکیه‌گاه‌ها، خسارت‌های به دست آمده در نواحی نزدیک تکیه‌گاه‌ها بیشتر از خسارت مورد انتظار در واقعیت است. به دلیل عدم وجود الیاف در بتن معمولی ناحیه خرد شده عمیقی در مرکز دال پدیدار می‌شود که این خود یک ضعف سازه‌ای محسوب می‌گردد. به دلیل وجود الیاف در بتن و پارچه در سطح تحتانی پوسته بتن پارچه‌ای، نواحی مرکزی آن در وجه تحتانی پوسته آسیب‌های سازه‌ای کمتری دیده و عمق خردشدگی در نواحی مذکور بسیار ناچیز است. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق اگرچه پوسته بتن پارچه‌ای در نواحی تکیه‌گاهی ضعیف عمل کرده اما می‌توان این ضعف را با افزایش ضخامت این پوسته بر طرف نمود. البته اضافه نمودن لایه‌ها می‌تواند تبعات دیگری نیز داشته باشد که می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

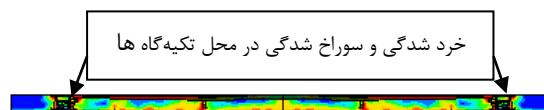
۵. مراجع‌ها

- [1] Hegger, J.; Voss, S. "Investigations on the Bearing Behaviour and Application Potential of Textile Reinforced Concrete"; Eng. Struct. 2008, 30, 2050-2056.
- [2] Colombo, I. G.; Magri, A.; Zani, G.; Colombo, M.; di Prisco, M. "Textile Reinforced Concrete: Experimental Investigation on Design Parameters"; Mater. Struct. 2013, 46, 1953-1971.
- [3] Peled, A.; Cohen, Z.; Pasher, Y.; Roye, A.; Gries, T. "Influences of Textile Characteristics on the Tensile Properties of Warp Knitted Cement Based Composites"; Cem. Concr. Compos. 2008, 30, 174-183.
- [4] Peled, A. "Strain Hardening Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC)"; Proc. of the SHCC2-Rio. Conference. 2011, 45-52.
- [5] Hartig, J.; Heaubler-Combe, U.; Schicktan, K. "Influence of Bond Properties on the Tensile Behaviour of Textile Reinforced Concrete"; Cem. Concr. Compos. 2008, 30, 898-906.

(شکل ۵). علت این خردشدگی‌های وسیع و کم عمق در وجه تحتانی پوسته بتن پارچه‌ای جدا شدن پارچه تحتانی از بتن موجود در پوسته به هنگام انفجار است اما همان طور که در شکل‌های (۴-ج) و (۴-د) قابل مشاهده است علی‌رغم ضخامت بیشتر دال بتن مسلح نسبت به پوسته بتن پارچه‌ای (تقریباً ۳ برابر) ناحیه خردشده کم وسعتی با عمق قابل توجه در وجه تحتانی آن پدیدار می‌شود که این امر یک ضعف سازه‌ای مهم تلقی می‌گردد. لذا بر خلاف شکل (۳)، خردشدگی تنها در سطوح مشاهده می‌گردد (شکل ۵) که مطابق شکل (۶) عمق زیادی ندارد. علت اصلی این امر خاصیت شکل‌پذیری بتن الیافی است که با افزودن الیاف شکل‌پذیری نیز افزایش یافته و مقادیر بیشتری انرژی ناشی از شوک انفجار مستهلک می‌گردد.



شکل ۵. آسیب‌های وارده بر سطوح پوسته: الف) کانتور خسارت در سطح فوقانی پوسته، ب) کانتور خسارت در سطح تحتانی پوسته، ج) خردشدگی‌های موجود در سطح فوقانی پوسته، د) خردشدگی موجود در سطح تحتانی پوسته



شکل ۶. خسارت‌های وارده بر مقطع عرضی پوسته بتن پارچه‌ای

با توجه به شکل (۴-ب) و شکل (۵) در سطح زیرین پوسته با وجود ضعف در مقاومت کششی بتن، انتظار می‌رفت که همانند شکل‌های (۴-ج) و (۴-د) ناحیه خردشده‌ای با عمق قابل توجه در مرکز پوسته به وجود آید اما به دلیل وجود الیاف در بتن و پارچه قرار گرفته در سطح تحتانی پوسته بتن پارچه‌ای این ضعف برطرف گردیده و مانع به وجود آمدن ناحیه خردشده عمیقی در مرکز پوسته می‌گردد. به دلیل تغییر شکل خمشی پوسته و ضخامت کوچک آن، ترک‌های طولی قابل توجهی به

- [11] Wang, W.; Zhang, D.; Lu, F.; Wang, S. C.; Tang, F. "Experimental Study and Numerical Simulation of the Damage Mode of a Square Reinforced Concrete Slab under Close-in Explosion"; *Eng. Fail. Anal.* 2013, 27, 41–51.
- [12] Riedel, W.; Thoma, K.; Hiermaier, S. "Numerical Analysis Using a New Macroscopic Concrete Model for Hydro Codes"; *Proc. of the 9th international Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures 1999*, 315–322.
- [13] Herrmann, W. "Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials"; *J. Appl. Phys.* 1962, 40, 2490–2499.
- [14] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures"; *Proc. of the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, the Netherlands, 1983*, 541–548.
- [6] Concrete Canvas Ltd. "Concrete Canvas"; <http://www.concretecanvas.com>, 2005, accessed 22 July 2012.
- [7] Han, F. Y.; Chen, H. S.; Jiang, K. F. "Influences of Geometric Patterns of 3D Spacer Fabric on Tensile Behavior of Concrete Canvas"; *Constr. Build. Mater.* 2014, 65, 620–629.
- [8] Balaguru, P.; Ramakrishnan, V. "Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability, Behavior under Long-Term Loading, and Air-Void Characteristics"; *ACI. Mater.* 1988, 85, 189–196.
- [9] Bao, B. C. "Preparation and Performance of Concrete Canvas (in Chinese)"; MSc. Thesis, Southeast University, Nanjing, 2013.
- [10] AUTODYN, Theory Manual, Century Dynamics, 2006.