



## بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار ضربه ای پانل های بتنی ساخته شده با تکنیک حریره بتن الیافی (SIFCON)

یعقوب فرنام<sup>۱</sup>، محمد شکرچی زاده<sup>۲</sup>، سهیل محمدی<sup>۳</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران

2- استادیار، ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، انستیتو مصالح ساختمانی

3- دانشیار، ایران، تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، آزمایشگاه محاسبات سریع

Email: yfarnam@ut.ac.ir

### خلاصه

مطالعات اخیر نشان داده است که SIFCON نسبت به انواع دیگر بتن، مقاومت بیشتری در برابر بارهای ضربه ای و دینامیکی دارد. این امر سبب شده است تا SIFCON به عنوان یک ماده مقاوم برای ساخت سازه های استراتژیک به طور قابل ملاحظه ای مورد توجه محققین قرار گیرد. در این تحقیق به منظور بررسی رفتار ضربه ای این نوع بتن، قطعات SIFCON با ابعاد  $300 \times 300 \times 23$  میلیمتر تحت ضربه یک پرتابه استوانه ای شکل با قطر 50 میلیمتر و ارتفاع 550 میلیمتر قرار می گیرند. وزن این پرتابه 8.5 کیلوگرم و سرعت آن در لحظه برخورد 4.2 m/s می باشد. این پرتابه به صورت متناوب از ارتفاع یک متری رها شده و این عمل تا زمان شکست نهایی ادامه پیدا می کند. همچنین در این مقاله، آزمایشهای ضربه ای توسط نرم افزار اجزای محدود LS-DYNA شبیه سازی شده است. الگوی ترک های بدست آمده در قطعات SIFCON و همچنین عمق نفوذ پیش بینی شده توسط نرم افزار مطابقت مناسبی با نتایج حاصله از مطالعات آزمایشگاهی دارند.

کلمات کلیدی: نفوذ، الیاف، ضربه، SIFCON

### 1- مقدمه

امروزه در جهان بتن های الیافی (FRC) به طور گسترده ای در صنعت ساختمان برای بهبود خواص دینامیکی سازه های بتنی با اهداف مقاوم سازی و نظامی مورد استفاده قرار می گیرند. افزودن الیاف به بتن سبب افزایش طاق، انعطاف پذیری، مقاومت خمشی و کششی بتن در برابر بارهای ضربه ای و دینامیکی و کاهش پدیده های قلوه کن شدن بتن و انتشار ترک می شود [2]. تکنیک حریره بتن الیافی (SIFCON) روشی نو برای ساخت بتن فوق توانمند با مقاومت خیلی بالا و همراه با درصد الیاف زیاد می باشد که طاقت زیادی در برابر بارهای سنگین، ضربه ای و انفجاری دارد. نگاهی به تحقیقات گذشته نشان می دهد که از سال 1940، عملکرد سازه های خاص و استراتژیک در برابر بارهای ضربه ای و انفجاری و بهبود خواص آنها مورد توجه محققین بوده است [3]. بعد از حادثه 11 سپتامبر مقاومت ساختمان ها در برابر بارهای ضربه ای و انفجاری نه تنها مورد توجه طراحان سازه های دفاعی و استراتژیک بلکه مورد توجه تمام طراحان سازه ای قرار گرفت. با توجه به پیشرفت بشر در زمینه محاسبات کامپیوتری در چند دهه اخیر و علاقه مندی به پیش بینی رفتار سازه ها در مقابل بارهای وارده و در شرایط مختلف، استفاده از ابزارها و نرم افزارهای کامپیوتری برای شبیه سازی کامپیوتری مورد توجه محققین قرار گرفته و نرم افزارهای متعددی از قبیل ABAQUS، ELFEN، ANSYS، LS-DYNA و AUTODYN برای مدلسازی ضربه و انفجار نوشته شده است [4]. که محققین، امروزه در تلاش برای ارتقاء و بهینه کردن این نرم افزارها هستند. مقاله حاضر از دو بخش آزمایشگاهی و مدلسازی رایانه ای تشکیل شده است که در بخش اول نحوه ساخت بتن های SIFCON، نسبت های اختلاط و روش آزمایش ضربه توضیح داده شده است و در بخش دوم به مدلسازی ضربه بر روی پانل های سیفکونی پرداخته شده و در نهایت نتایج بدست آمده توسط نرم افزار با نتایج آزمایشگاه مقایسه شده است.

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد Email: yfarnam@ut.ac.ir

<sup>2</sup> استادیار Email: shekarch@ut.ac.ir

<sup>3</sup> دانشیار Email: smoham@ut.ac.ir

**2- بخش مطالعات آزمایشگاهی****2-1- نسبت های اختلاط**

مواد سیمانی ای که در این تحقیق استفاده شده است از نوع سیمان پرتلند تیپ II و متاکائولین به عنوان ماده پزولانی می باشد. سنگدانه مصرفی، شکسته و با پایه آهکی می باشد که حداکثر قطر سنگدانه ها 1 mm بوده و دارای چگالی ویژه 2.5 و جذب آب 3.2٪ می باشد. به منظور افزایش کارایی و کاهش نسبت آب به سیمان (با هدف افزایش مقاومت 28 روزه) از فوق روانساز با پایه کربوکسیلیک استفاده شده است. نوع الیاف مصرفی بکار رفته از جنس فولاد، با طول 30 mm و  $1/d=100$  می باشد. همچنین نسبت های طرح اختلاط برای ملات بکار رفته در ساخت پانل ها در جدول 1 آورده شده است.

**جدول 1- نسبت های طرح اختلاط**

مواد	نوع	مقدار بکار رفته
سیمان	تیپ II	1020 Kg/m <sup>3</sup>
پوزولان	متاکائولین	180 Kg/m <sup>3</sup>
سنگدانه	ماسه (0-1 mm)	850 Kg/m <sup>3</sup>
آب	-	385 Kg/m <sup>3</sup>
W/Cm	-	0.32
فوق روانساز	پلی کربوکسیلیک	18 Kg/m <sup>3</sup> (1.5٪ مواد سیمانی)
الیاف	فولادی	2٪ حجمی

**2-2- آماده سازی و عمل آوری نمونه ها**

به منظور اختلاط سیمان، متاکائولین و سنگدانه ها به صورت خشک با هم مخلوط شدند سپس آب و فوق روانساز به آرامی به مخلوط مورد نظر اضافه شدند تا ملاتی با کارایی و همگنی مناسب بدست آید، ملات بدست آمده به آرامی و در سه لایه به داخل قالب های فولادی 300×300×23 mm ریخته شدند. بعد از هر لایه، الیاف به صورت اتفاقی بر روی ملات داخل قالب که به آرامی و بیبره می شد ریخته می شدند تا از پخش شدن مناسب در لایه های افقی اطمینان حاصل شود. این روش، روشی نو با نام حریره بتن الیافی (SIFCON) برای ساخت بتن های الیافی است که الیاف در آن به صورت دلخواه جهت گیری شده است تا بتن در جهاتی که تقویت سازی مد نظر است مسلح شود [5]. قالب ها بعد از یک روز گیرش باز شدند و نمونه ها در آب مخلوط با هیدروکسید کلسیم و با دمای 22 °C به مدت 28 روز عمل آوری شدند.

**2-3- روش آزمایش**

آزمایش ضربه با استفاده از دستگاه ضربه پرتابه وزنی انجام شده است (شکل 1)، در این آزمایش، قطعات SIFCON با ابعاد 300×300×23 میلیمتر تحت ضربه یک پرتابه استوانه ای شکل با قطر 50 میلیمتر و ارتفاع 550 میلیمتر قرار می گیرند. وزن این پرتابه 8/5 کیلوگرم و سرعت آن در لحظه برخورد 4.2 m/s می باشد. این پرتابه به صورت متناوب از ارتفاع یک متری رها شده و این عمل تا زمان شکست نهایی ادامه پیدا می کند. همچنین تغییر شکل پایین ترین نقطه پانل نسبت به لبه ها در حین آزمایش، اندازه گیری شده و عکس هایی به منظور ثبت الگوهای ترک و رشد آنها از پشت و روی نمونه گرفته شد. همانگونه که در شکل 1 مشخص است تکیه گاه از نوع تکیه گاه گیردار می باشد که از تکیه گاه فلزی در پایین و یک قاب فلزی در رو که توسط 4 پیچ به هم متصل شده اند تشکیل شده است.



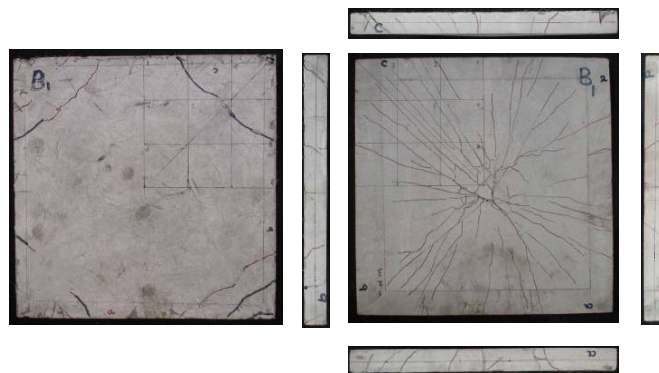
شکل 1- دستگاه ضربه از نوع پرتابه وزنی و تکیه گاه گیردار

#### 2-4- نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه

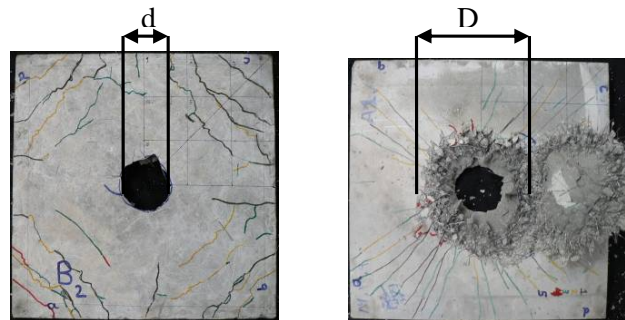
الگوهای شکست، رشد ترک، عرض ترک، تعداد ضربه اعمال شده و تغییر شکل نمونه ها در حین آزمایش با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی اندازه گیری شدند.

این نتایج نشان می دهند که:

- در ضربه های اولیه مکانیزم گسیختگی خمشی سبب ایجاد ترک شده اند ولی در ضربه های بعدی برش حاکم شده و گسیختگی برشی رخ داده است (شکل 2).
- گسیختگی برشی به شکل یک مخروط در نمونه مشاهده می شود که قطر دایره بالایی کوچکتر از قطر دایره پایینی است ( شکل 2- ب و جدول 2).
- تعداد ضربه ها و جابجایی متناظر بر آنها که در جدول 3 آورده شده است نشان می دهد که حدود تحمل این نوع پانل ها 5 ضربه در مقابل یک ضربه تحمل بتن ساده است، شایان ذکر است علت پراکندگی در نمونه های B1 و B2 عدم گیرداری کامل در نمونه B1 در حین انجام آزمایش و مستهلک کردن انرژی وارده از طریق تکیه گاه به علت خطا در محکم کردن آن و در نمونه B2 رسیدن به حد آستانه گسیختگی در ضربه پنجم می باشد.



(الف)



(ب)

شکل 2- الف- مکانیزم ترک های خمشی در ضربات اولیه، ب) مکانیزم شکست برشی

جدول شماره 2- تعداد ضربه و قطر مخروط برشی در رو و پشت هر نمونه

کد نمونه	B1	B2	B3	B4
تعداد ضربه متناظر با اولین اثر	1	1	1	1
تعداد ضربه در لحظه گسیختگی	7	6	5	5
D (mm)	180	140	170	165
d (mm)	55	57	55	55



جدول شماره 3- تعداد ضربه ها و جابجایی متناظر بر آنها

کد نمونه	جابجایی حداکثر در نقطه میانی پانل در هر ضربه (mm)						
	ضربه اول	ضربه دوم	ضربه سوم	ضربه چهارم	ضربه پنجم	ضربه ششم	ضربه هفتم
B1	0	1	2	4	7	14	گسیختگی
B2	1	2	4	7	17	گسیختگی	
B3	1	2.5	5	10	گسیختگی		
B4	1	2.5	5	9	گسیختگی		

### 3- بخش مدلسازی کامپیوتری

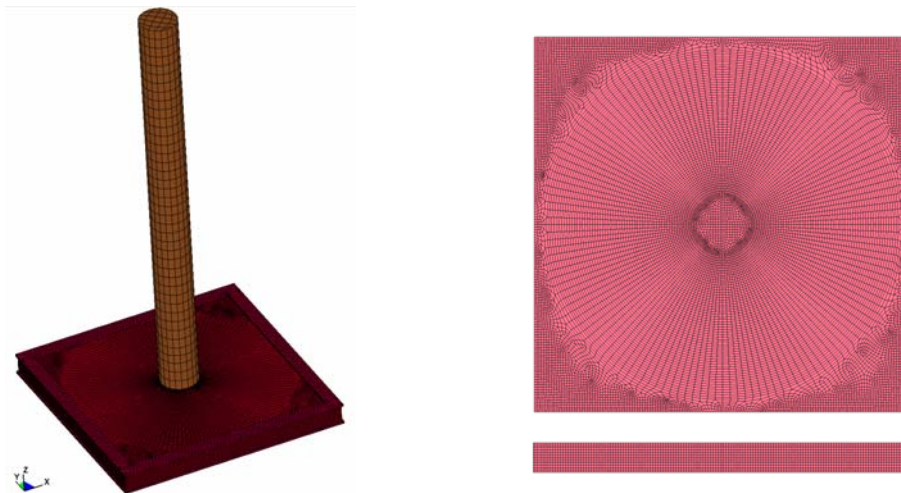
#### 3-1- کلیات

نرم افزارهای متعددی برای مدلسازی رفتار سازه ها تحت بار ضربه و انفجار بکار رفته است که از آن جمله می توان به ABAQUS، LS-DYNA، AUTODYN و ANSYS، ELFEN اشاره نمود. مدل های مقاومتی زیادی برای بتن تحت بار ضربه و انفجار در کدهای نرم افزاری و مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است [1]. با توجه به کار بودن نرم افزار LS-DYNA در مدلسازی انواع بتن و تنوع مدل ماده های بکار رفته، در ادامه این تحقیق آزمایش های صورت گرفته توسط این نرم افزار مدلسازی شده اند.

در نرم افزار LS-DYNA مدل های زیادی برای بتن با کاربردهای مختلف ارائه شده است که شامل اثر آهنگ کرنش و گسترش ترک می باشد. مدل Winfrith براساس توصیه نامه CEB، سه ثابت و چهار پارامتر را مدنظر قرار می دهد و اثر آهنگ کرنش را در نظر می گیرد. برخی دیگر از مدل ها در این نرم افزار عبارتند از Pseudo Tensor Concrete یا Geological Concrete Damage Model، Soil/Concrete Model و Brittle Damage Model [6].

#### 3-2- مدلسازی هندسی

در مدلسازی هندسی برای مش بندی پانل و پرتابه از المان های شش وجهی و برای مش بندی تکیه گاه فولادی گیردار از المان های هرمی استفاده شده است. تعداد کل المان ها 201326 عدد بوده و نوع المان ها، تنش ثابت Solid می باشد. در شکل 3 نوع مش بندی و مدلسازی هندسی آزمایش ضربه نشان داده شده است. لازم بذکر است برای اعمال شرایط مرزی تمام گره های زیر و گره های چهار گوشه در بالای تکیه گاه در جهت ضربه بسته شده اند.



شکل 3- مدلسازی هندسی (چپ)، نوع مش بندی پانل بتنی (راست)

#### 3-3- مدلسازی ضربه

در مدلسازی ضربه، پرتابه با سرعت 4.23 m/s که معادل سرعت سقوط از یک متری است شبیه سازی شده است، تماس ما بین پرتابه و پانل و همچنین پانل با تکیه گاه از نوع سطح به سطح می باشد. در نرم افزار LS-DYNA از سه روش Kinematic Constraint Method،



Distributed Parameter Method و Penalty Method برای مدل‌سازی تماس استفاده شده است که در تحقیق حاضر از روش پنیالتی برای مدل‌سازی ضربه استفاده شده است.

### 3-4- مدل‌سازی ماده

همانگونه که در قبل اشاره شد، نرم افزار LS-DYNA از قابلیت و تنوع مناسبی در مدل ماده بتن دارد. به منظور مدل‌سازی ماده بتن ساخته شده با تکنیک حریره بتن الیافی از مدل ماده TYPE78: MAT\_SOIL\_CONCETE همراه با گزینه ADD\_EROSION با محدودیت کرنش نهایی برشی استفاده شده است.

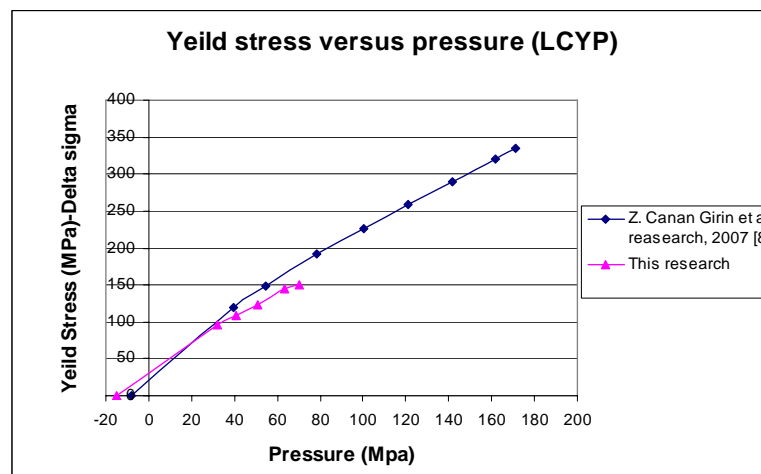
در مدل ماده MAT\_SOIL\_CONCETE توانایی در نظر گرفتن معادله حالت (EOS)، تنش تسلیم فشاری و کششی در فشار های همه جانبه مختلف، مقاومت باقیمانده بعد از ایجاد ترک و قطع جریان در لحظه مقاومت کششی ماکزیمم (که معادل با مقاومت Pullout در بتن الیافی است)، این مدل ماده را برای مدل‌سازی بتن های الیافی مناسب می سازد. یکی از ضعف های این مدل ماده برای مدل‌سازی بتن ساخته شده با تکنیک حریره بتن الیافی در نظر نگرفتن برش حاکم در لحظه گسیختگی است که برای از بین بردن این مشکل از گزینه ADD\_EROSION با محدودیت کرنش نهایی برشی 0.012 برای بتن های SIFCON استفاده شده است.

برای پانل های ساخته شده با تکنیک SIFCON آزمایشهای مختلفی برای تعیین پارامترهای ورودی نرم افزار انجام شد که نتایج آن در جدول شماره 4 و شکل های 4 و 5 آورده شده است. همچنین برای معادله حالت از نتایج آزمایشات گریکسان [7] که مطابقت مناسبی با بتن ساخته شده دارد استفاده شده است که نتایج آن در شکل 5 نشان داده شده است.

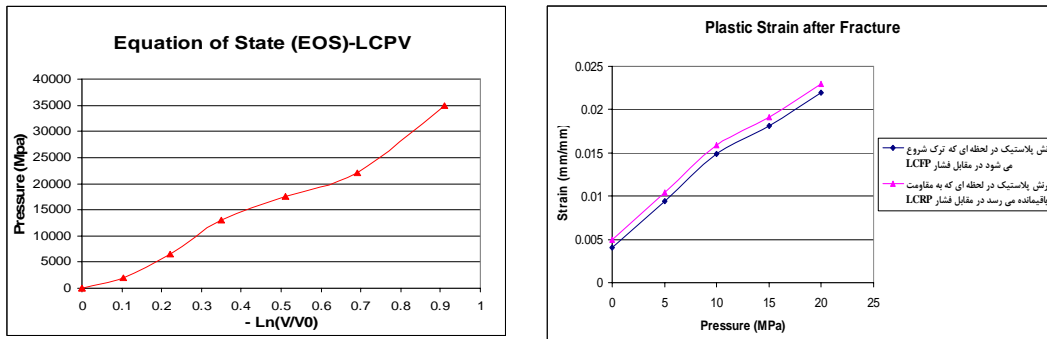
همچنین برای مدل‌سازی پرتابه و تکیه گاه از مدل ماده MAT\_ELASTIC با مشخصات چگالی  $7800 \text{ kg/cm}^3$ ، ضریب الاستیسیته  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  و ضریب پواسون 0.3 استفاده شده است.

جدول شماره 4- پارامترهای ورودی مدل ماده SOIL\_CONCRTE بر اساس آزمایشهای انجام شده

پارامتر	مقدار
چگالی $\text{kg/cm}^3$	2200
مدول برشی (MPa)	$1.098 \times 10^4$
مدول بالک (MPa)	$1.641 \times 10^4$
مقاومت کششی ماکزیمم در لحظه قطع جریان (MPa)	30
ضریب مقاومت باقیمانده	0.9
نوع گسیختگی	When pressure reaches failure pressure element is eroded



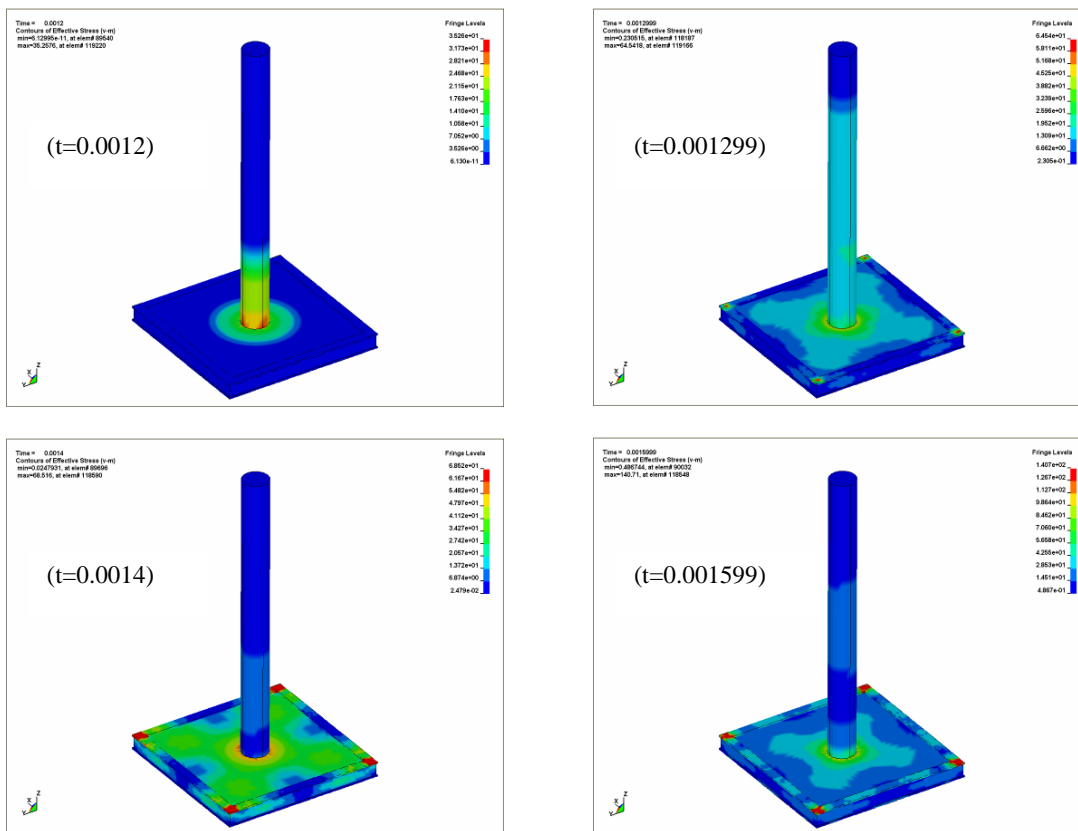
شکل 4- تنش تسلیم فشاری و کششی در فشار های همه جانبه مختلف



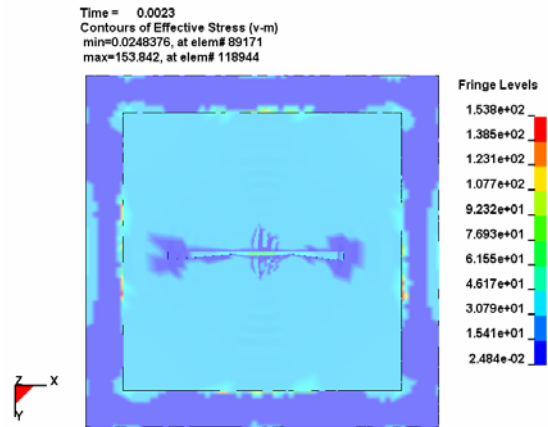
شکل 5- کرنش پلاستیک بعد از لحظه ایجاد ترک (راست)، معادله حالت بر اساس نتایج آزمایشات گریکسان [7]

### 3-5- نتایج بخش مدلسازی

اجرای مدل شبیه سازی شده برای پانل های بتنی ساخته شده با تکنیک حریره بتن الیافی توسط کامپیوتر سرعت بالا در آزمایشگاه محاسبات سریع دانشکده عمران دانشگاه تهران انجام شد که زمان حل 2.5 ساعت را به خود اختصاص داد. کنتورهای تنشی موثر نشان داده شده در شکل 6 نحوه پخش تنش ها را در زمان های مختلف بیان می کند. همچنین کنتور تنش موثر در لحظه ایجاد ترک و نحوه توزیع در اطراف ترک در شکل 7 آورده شده است.



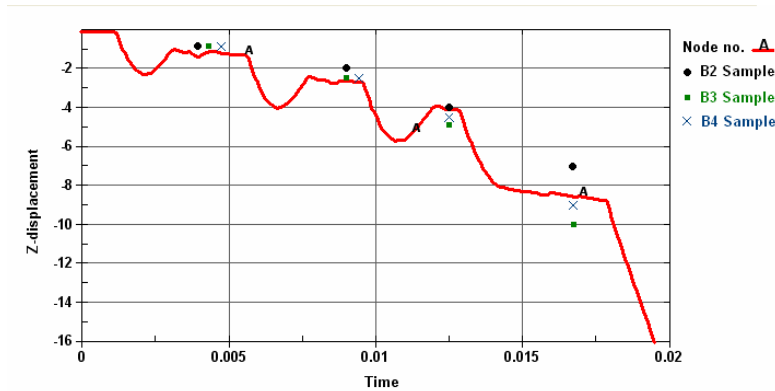
شکل 6- تنش موثر در زمانهای مختلف (MPa)



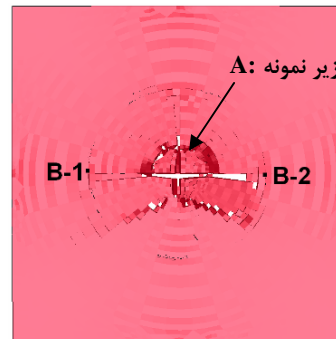
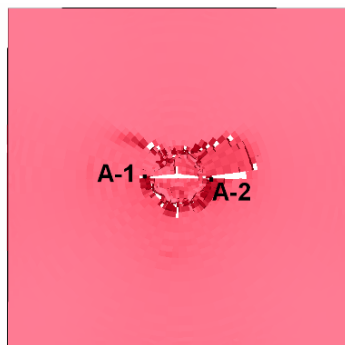
شکل 7- کنتور تنش موثر در لحظه ایجاد ترک و نحوه توزیع در اطراف ترک (MPa)

تعداد ضربه های بدست آمده تا لحظه گسیختگی برابر 5 ضربه می باشد که با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه های B2 و B3 برابر است، همچنین جابجایی نقطه میانی در ضربه های مختلف که در شکل 8 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و قطر باز شدگی در رو و پشت نمونه به ترتیب برابر 58 و 158 میلیمتر که در شکل های 9 و 10 نشان داده شده اند گویای این حقیقت اند که نتایج بدست آمده توسط مدلسازی کامپیوتری با نتایج آزمایشگاهی مطابقت مناسبی دارد.

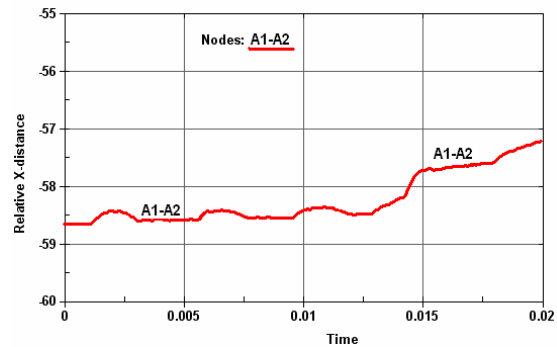
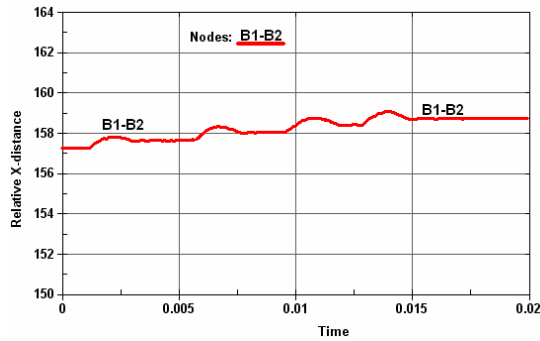
همچنین در مدلسازی، الگوی شکست خمشی در ضربات اولیه مشاهده شد که در لحظه گسیختگی شکست برشی حاکم شد، شکل 10 الگوی شکست و مخروط ایجاد شده در لحظه گسیختگی را نشان می دهد.



شکل 8) جابجایی نقطه میانی پانل در ضربه های مختلف (mm)



شکل 9) باز شدگی در رو و پشت نمونه در لحظه گسیختگی (الگوی شکست)



شکل 10) قطر باز شدگی در رو و پشت نمونه (mm)

#### 4- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج بدست آمده در دو بخش آزمایشگاهی و عددی نتیجه گیری های زیر قابل بیان است:
- نتایج بدست آمده از روش حل عددی مانند تعداد ضربه، جابجایی نقطه میانی پانل، قطر باز شدگی در رو و پشت نمونه و الگوهای بدست آمده مطابقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.
  - مدل ماده SOIL\_CONCRETE و گزینه ADD\_EROSION با محدودیت کرنش برشی نهایی، مدل ماده مناسبی برای شبیه سازی بتن های ساخته شده با تکنیک حریره بتن الیافی است.
  - نرم افزار LS-DYNA دارای توانایی زیادی در شبیه سازی ماده های کامپوزیتی از جمله بتن الیافی است.

#### 5- قدردانی

در اینجا لازم می دارد تا از تلاش ها و مساعدت جناب آقای دکتر موسوی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده معدن، دانشگاه تهران در انجام آزمایشهای سه محوری بتن کمال تشکر و قدردانی بعمل آید.

#### مراجع

- بنکدار، ابودر (1384) بررسی رفتار پانل های بتن الیافی پرمقاومت در برابر ضربه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- Marar, K., Eren, O. and Celik, T. (2001) Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete. *Materials Letters*, V. 47, 297-304.
- Wang, Z.L., Li, Y.C., Shen, R.F. and Wang, J.G (2007) Numerical study on craters and penetration of concrete slab by ogive-nose steel projectile. *Journal of Computers and Geotechnics*, V. 34, 1-9.
- Agardh, L., Laine, L. (1999) 3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs. *International Journal of Impact Engineering*, V.22, 911-922.
- Naaman, A.E., Otter, D., Najm, H. (1992) Elastic modulus of SIFCON in tension and compression. In: *ACI Materials Journal* 88, No. 6, pp.603-612.
- LSTC, LS-DYNA keywords User's Manual, version 971(2006) Livermore Software Technology Corporation, LSTC, Livermore.
- Gregsson, V.G. (1992) A shockwave study of Fondu-Frye WA-1 and a concrete, DNA2797F, Appendix A, Concrete constitutive relations at high strength levels. *US Army Armament Research and Development Command*, AFATL-TR-78-24-VOL.II.
- Girin, C.Z., Anoglu, N. and Anoglu, E. (2007) Evaluation of strength criteria for very-high-strength concretes under triaxial compression. *ACI Structural Journal*, V.104, No. 3, 278-284.