



مد گسیختگی و مقاومت تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری موج انفجاری

علی جعفروند^۱، حامد عیوضی^۲

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه زنجان، ali_jafarvand@znu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه زنجان

چکیده

از آنجا که معمولاً در طراحی سازه‌ها بار انفجاری لحاظ نشده است و با توجه به رویدادهای اخیر جهان، هم‌اکنون بررسی مقاومت اجزای این سازه‌ها در برابر انفجار بسیار ضروری می‌باشد. در این تحقیق مدگسیختگی تیرهای بتنی با مقطع مستطیلی و درصد آرماتورهای طولی متفاوت به عنوان یکی از اجزای سازه‌های بتنی در برابر بارگذاری انفجاری توسط نرم افزار Abaqus مورد مطالعه قرار می‌گیرد و به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها با نتایج موجود مقایسه می‌شود. تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر پیش‌بینی شده توسط نرم افزار مطابقت مناسبی با نتایج حاصله از مطالعات آزمایشگاهی دارند، این تغییر مکان ماکزیمم نیز با مدل ساده شده‌ی سیستم تک درجه آزادی (SDOF) مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: موج انفجار، تیر بتن مسلح، آرماتور طولی، تحلیل دینامیکی غیر خطی

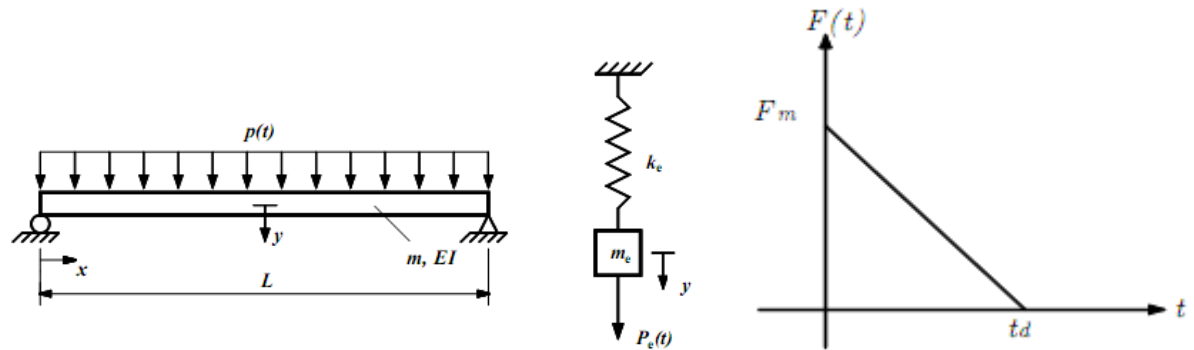
۱- مقدمه

همان‌طور که می‌دانیم تا چند دهه قبل، استفاده از روش‌های تحلیل و طراحی متداول نتایج چندانی را ارائه نمی‌داد و در موارد حساس به ناچار از آزمایشات تجربی استفاده می‌گردید. تدابیر امنیتی و شرایط خاص مورد نیاز برای انجام آزمایشات تجربی بر روی این موضوع باعث بالا رفتن هزینه‌ها می‌گشت. با ورود مراکز غیرعلمی در انجام این پژوهش‌ها، انتشار نتایج حاصله تحت تأثیر قرار گرفت و گزارش‌ها برای انتشار عمومی می‌بایست از فیلترهای بسیاری عبور می‌کردند و در برخی موارد تا سال‌ها به صورت محرمانه باقی می‌ماندند. اما در دهه‌های اخیر با رواج نرم‌افزارهای المان محدود و روش‌های عددی، می‌توان نتایج رضایت‌بخشی از تحلیل‌های مورد نظر گرفت، هم‌چنین انتشار مقالات نیز به دلیل بیش‌تر شدن تحقیقات رواج بیش‌تری یافته؛ البته هنوز هم تحقیقات کلیدی و بنیادی به صورت عمومی منتشر نمی‌شوند. اجزاء انعطاف پذیر مانند تیرها و سقف‌های سنگین با دهانه‌های طولانی مقدار زیادی از انرژی ناشی از انفجار را جذب می‌نمایند پاسخ سازه تابعی از خواص مواد تشکیل‌دهنده اجزاء و نحوه به کارگیری آنها می‌باشد. بتن را می‌توان هم بصورت قابی انعطاف پذیر و هم بصورت قابی سخت بکار برد. در حالت کلی سازه‌های سنگین وزن در مقایسه با سازه‌های سبک، رفتار بهتری از خود در مقابل انفجار نشان می‌دهند. در ایالت متحده، در نواحی مستعد انفجار، تنها ساختمان‌های بتن مسلح مجاز به ساخت هستند.

۲ - سیستم تک درجه آزادی (SDOF)

پیچیدگی تحلیل پاسخ دینامیکی سازه ها در بارهای انفجاری تحت اثر کرنش های زیاد، رفتار غیر خطی مصالح غیرالاستیک تحت بارهای نامعین انفجاری، محاسبات را بسیار پیچیده کرده و تغییر شکل ها را وابسته به زمان می کند. بنابراین ساده سازی تحلیل و کم کردن فرضیات در پاسخ سازه و بارگذاری می تواند روش موثر و قابل قبولی باشد. اصول تحلیل به این صورت است که سازه ایده آل یک درجه آزادی (SDOF) را در نظر گرفته و سیستمی با ارتعاش آزاد سازه و قسمت مثبت بارگذاری انفجاری در نظر می گیریم.

سازه های ساده از قبیل تیر و صفحه را میتوان به سیستم تک درجه آزادی کاهش داد که رفتار مشابهی همانند المان حقیقی دارند. (شکل ۱)



شکل ۱ سیستم تک درجه آزادی و بار انفجاری [۱]

ضرایب انتقال (جدول ۱) که بر اساس یک شکل تغییر شکل خاص از المان هدف محاسبه میشوند معمولاً در مدهای ارتعاشی اصلی آن برای تبدیل ساختار آنالیزی به سیستم SDOF معادل استفاده میشود. توضیح کامل در مورد اصول و پیشینه نظریه این روش و چارت های جامع برای پیش بینی واکنش المان های بارگیری شده بوسیله ی UFC و [۲],[۳] Biggs داده شده است.

جدول ۱ ضرایب انتقال برای تیر با تکیه گاه ساده تحت بارگذاری یکنواخت [۲]

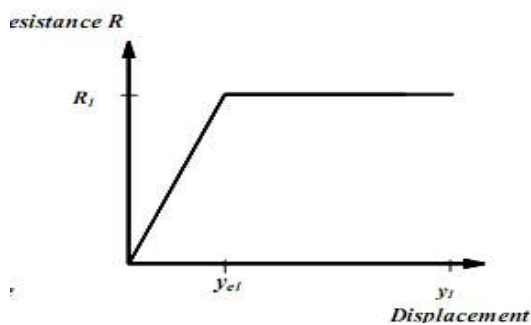
حیطه رفتاری	ضریب جرم K_M	ضریب بار K_F	ضریب مقاوم K_R	ضریب جرم K_{MF}	بار -
الاستیک	۰/۵	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۷۸	
پلاستیک	۰/۳۳	۰/۵	۰/۵	۰/۶۶	
میانگین	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۷۲	

چون سیستم در میان این مراحل مختلف جلو میرود به طور کلی در هر مرحله نیاز است که پاسخ به طور جداگانه با استفاده از ضرایب تبدیل برای هر مرحله خاص محاسبه شود. به هر حال پیشنهاد می شود اگر واکنش فراتر از گستره الاستیکی برود مقدار متوسط ضرایب تبدیل به کار برده میشود.

معادله حرکت سیستم آسیب ندیده SDOF معادل در معرض نیروی کاربردی $P(t)$:

$$(\kappa_{MF} \cdot m) \cdot \ddot{y} + k \cdot y = P(t)$$

می توانیم با استفاده از ساده سازی بار انفجاری به صورت مثلثی ساده (شکل-۱) و عملکرد مقاومت به صورت (شکل-۲) و با انتگرال دوهمل معادله ی بالا را حل کرد.



شکل ۲ تابع مقاومت سیستم معادل SDOF برای بار مثلثی [۱]

معادله جابه جایی بر حسب زمان برای سیستم SDOF معادل نزدیک به اوج :
 واکنش در مرحله ی الاستیک :

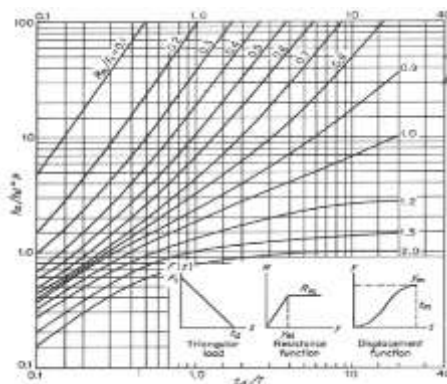
$$y = \frac{P_1}{k} (1 - \cos(\omega t)) + \frac{P_1}{k \cdot t_d} \left(\frac{\sin(\omega t)}{\omega} - 1 \right)$$

واکنش در مرحله ی پلاستیک :

$$y = -\frac{P_1}{6\kappa_{MF} m t_d} (t - t_{el})^3 + \left(\frac{P_1 - R_l}{2\kappa_{MF} m} - \frac{P_1 t_{el}}{2\kappa_{MF} m t_d} \right) (t - t_{el})^2 + y'_{el} (t - t_{el}) + y_{el}$$

برای اهداف طرح عملی نمودارهای مختلفی برای ماکزیمم پاسخ سیستم های SDOF در معرض انواع مختلف توابع بار ساده و مقاومت الاستیک-کاملاً پلاستیک آمده است (شکل ۳).

نسبت t_d/T و مقاومت داخلی به نسبت بار اعمالی R_l/P_1 برای محاسبه پاسخ اوج کافی می باشد.

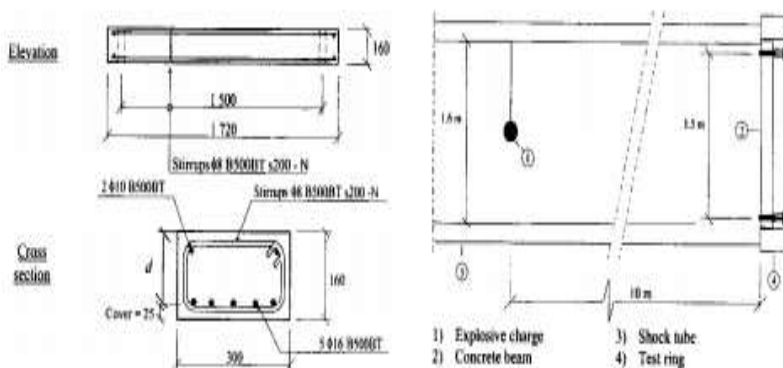


شکل ۳ پاسخ ماکزیمم جابه جایی بر حسب تابع مقاومت برای بار مثلثی [۳]

۳- آزمایش انفجار روی تیر بتن مسلح (Magnusson and Hallgren)

در این آزمایش همانطور که در شکل ۴ مشخص است تیر تحت اثر بار ناشی از انفجار قرار گرفته است. ابعاد و آرماتورهای تیرهای بتنی ساخته شده در شکل زیر نمایش داده شده است. بار انفجاری در یک تونل شوک ایجاد شده است که مقطع داخلی این تونل شوک مستطیلی و به ابعاد ۱,۶*۱,۲ متر میباشد. تیرها به نحوی که در شکل نمایش داده شده اند درون تونل شوک قرار گرفته اند.

برای اینکه تیرها در حین آزمایش بتوانند آزادانه حول هر تکیه گاه چرخش داشته باشند فاصله ای بین تیرها و جدار تونل شوک قرار داده شده است. ماده منفجره از نوع TNT و به شکل تقریباً کروی است و به فاصله ۱۰ متری از تیر بتنی و در مرکز سطح مقطع تونل قرار گرفته است. دهانه تیرها (در بین دو تکیه گاه) ۱۵۰۰ میلیمتر و دو عدد بولت در هر تکیه گاه برای ثابت نگه داشتن تیر در حین آزمایش استفاده شده است. در این آزمایشات از یک گیج فشار جهت اندازه گیری فشار وارده به تیر در اثر اعمال بار انفجاری و گیج تغییر مکان در وسط دهانه برای ثبت تغییر مکان ماندگار وسط دهانه استفاده شده است.



شکل ۴ ابعاد تیر بتن آرمه (mm) و نحوه ی برپایی آزمایش [۴]

در این آزمایش مشخصات مصالح بصورت زیر است: [۴]

I. بتن

مقاومت فشاری - 0.2 ضریب پواسون - 46 GPa مدول کشسانی

2400kg/m³ چگالی - 6 MPa مقاومت کششی

II. میلگرد طولی

604 MPa تنش جاری شدن - 0.3 ضریب پواسون - 210 GPa مدول کشسانی

7850kg/m³ چگالی - 703 MPa مقاومت نهایی

III. میلگرد عرضی

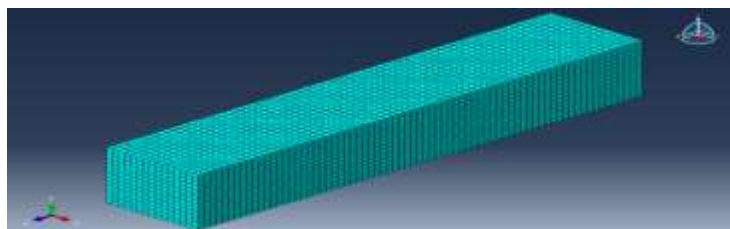
501 MPa تنش جاری شدن - 0.3 ضریب پواسون - 205 GPa مدول کشسانی

7850kg/m³ چگالی - 597 MPa مقاومت نهایی

۴- صحت سنجی

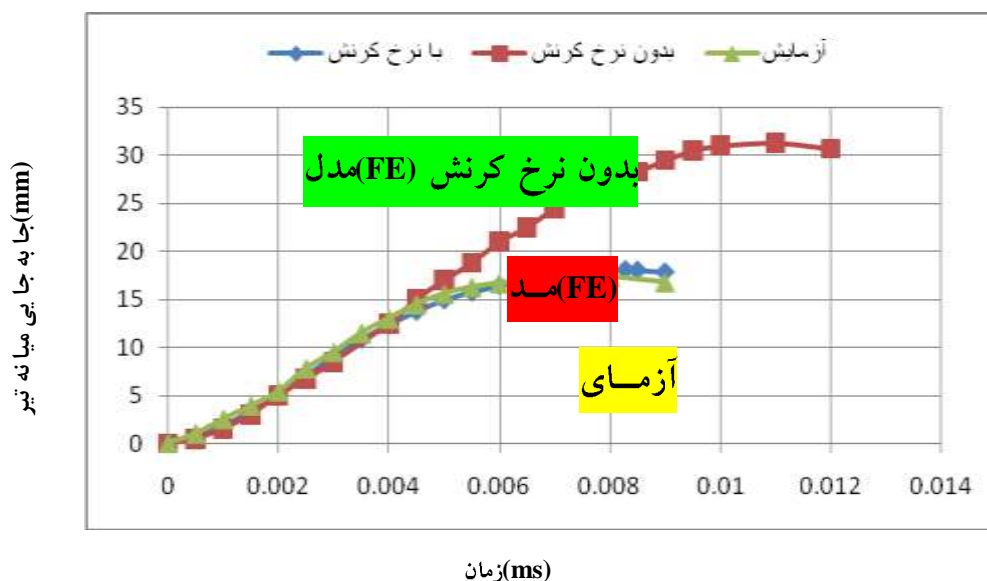
در این قسمت باتوجه به قابلیت به ABAQUS/Explici رفتار تیر RC در معرض بارگذاری انفجاری مدل شده (FE) و با نتایج آزمایشگاهی hallgren و magnusson [4] مورد مقایسه قرار می دهیم. این صحت سنجی در دو بخش ارائه می شود:

الف) جابه جایی میانه تیر ب) الگوی ترک



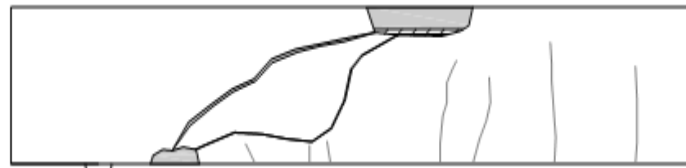
شکل ۵ پلات مدل تغییر شکل نیافته

الف) از منحنی جابه جایی میانه تیر - زمان می توان نزدیک بودن مدل (مدلی که نرخ کرنش را در نظر گرفته) را با آزمایش نتیجه گرفت. مدل در نبود تاثیرات نرخ کرنش نسبت به آزمایش رفتاری بسیار نرم تر دارد.

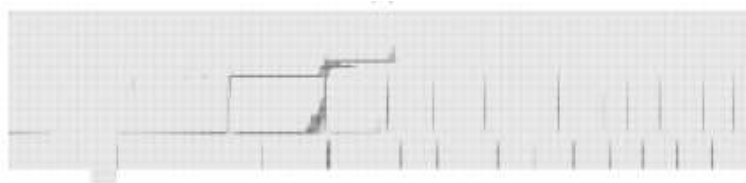


شکل ۶ منحنی جابه جایی میانه تیر بر حسب زمان انفجار

ب) در شکل (۶-الف) مربوط به آزمایش تیر می توان مشاهده کرد که شکاف برشی نزدیک تکیه گاه بوجود می آید و به سمت بالای سطح تیر انتقال می یابد که موجب شکست برشی تیر می شود. شکل (۶-ب) الگوی خسارت را در FE نشان میدهد . میتوانیم نتیجه بگیریم که الگوهای خسارت در مدل FE و آزمایش به طور کامل شبیه هم نیست ولی هر دو یک الگوی خسارت منطقی ای را نشان می دهند.



الف) الگوی ترک تیر (آزمایش) [4]



ب) الگوی ترک تیر (FE) - در زمانی که بیشترین واکنش تکیه گاهی را داریم
شکل ۷ الگوی ترک ها

۵- تاثیر نسبت آرماتورهای طولی

بررسی های آزمایشگاهی انجام گرفته توسط Magnusson و Hallgren [4] نشان می دهد که مد گسیختگی تیر زمانی که میزان تقویت کششی کاهش می یابد از گسیختگی برشی ترد به گسیختگی خمشی نرم تغییر پیدا می کند. به عبارت دیگر خطر گسیختگی برشی در تیر تحت بارگذاری انفجاری با نسبت کمتر آرماتور طولی کاهش می یابد. به منظور بررسی تاثیر نسبت تقویت کششی بر روی مدهای گسیختگی تیر بتنی تحت بار انفجاری، چندین مدل با مقادیر مختلف آرماتور طولی مورد بررسی قرار گرفته شده است. که در جدول ۲ مشاهده می شود :

جدول ۲ مشخصات مدل با نسبت آرماتورهای طولی متفاوت

نسبت مساحت سطح مقطع به فاصله ی خاموت ها (mm)	فاصله ی خاموت ها (mm)	درصد آرماتورهای طولی (کششی)	ارتفاع تیر (mm)	نوع تیر
۰/۵۳	۲۰۰	۲/۲۵	۱۶۰	A
۰/۵۳	۲۰۰	۲	۱۶۰	B
۰/۵۳	۲۰۰	۱/۲۵	۱۶۰	C
۰/۵۳	۲۰۰	۱/۵	۱۶۰	D

خصوصیات مکانیکی بتن (استاتیکی - بدون در نظر گرفتن نرخ کرنش):

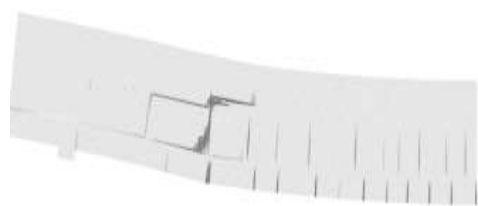
مقاومت فشاری بتن = 45 Mpa

مقاومت کششی بتن = $4/1 \text{ Mpa}$

مدول الاستیک بتن = $34/5 \text{ Gpa}$

۱-۵ شکل پذیری و مدهای گسیختگی

الگوی خسارت و منحنی های عکس العمل - خیز برای مدل های مختلف A, B, C, D در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به آن ها می توان نتیجه گرفت که با کاهش مقدار آرماتور طولی شکست تیر از برش به خمش تغییر می یابد و افزایش قابل توجهی در نرم شوندگی تیر مشاهده می شود که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت کامل دارد.



(A)



(B)

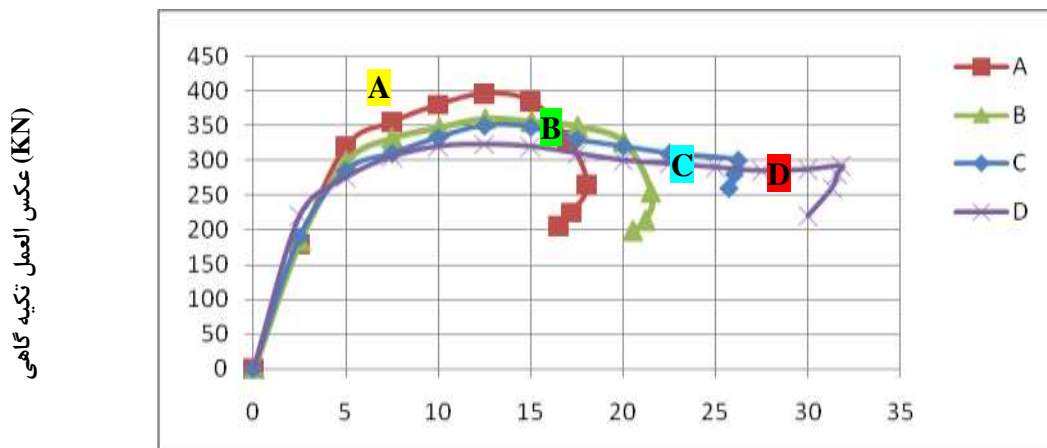


(C)



(D)

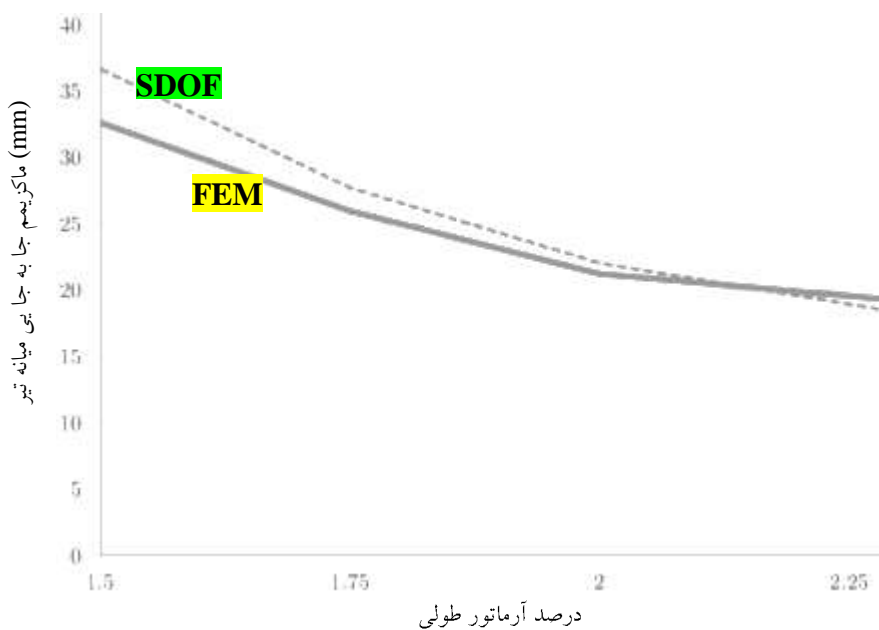
شکل ۸ نتایج الگوهای ترک با درصد آرماتورهای طولی متفاوت (A, B, C, D)



شکل ۹ منحنی عکس العمل - خیز تیر برای مدل هایی با درصد آرماتور طولی (کششی) متفاوت

۲-۵ ماکزیمم جابه جایی میانه تیر و مقایسه با مدل SDOF

ماکزیمم جابه جایی نقطه میانی مدل ها با نسبت های مختلف آرماتور کششی (D,C,B,A) از FEM به دست آمده که با محاسبات SDOF مقایسه می شود که در جدول ۳ و شکل ۱۰ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده میشود ماکزیمم جابه جایی نقطه میانی تیر توسط FEM و محاسبات SDOF به هم نزدیک هستند به هر حال با افزایش نرم شدگی تیر تفاوت بیشتر می شود دلیل آن این است که در محاسبات SDOF سخت شدگی پلاستیک فولاد در نظر گرفته نمی شود بنابراین در تغییر شکل های پلاستیک بزرگ، عملکرد مدل FE نسبت به مدل SDOF سخت تر است.



شکل ۱۰ جابه جایی نقطه میانی تیر برای مدل هایی با درصد آرماتور متفاوت

جدول ۳ ماکزیمم جابه جایی میانه تیر برای مدل هایی با درصد آرماتور متفاوت

SDOF/FEM	SDOF	FEM	نوع تیر
mm/mm	جابه جایی ماکزیمم (mm)	جابه جایی ماکزیمم (mm)	
۰/۹۴	۱۸	۱۹/۲	A
۱/۰۴	۲۲/۳	۲۱/۵	B
۱/۰۶	۲۸/۱	۲۶/۴	C
۱/۱۳	۳۷/۴	۳۳/۲	D

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده در دو بخش آزمایشگاهی و عددی نتیجه گیری های زیر قابل بیان است :

- (۱) نتایج به دست آمده از روش حل عددی مانند تاثیر نرخ کرنش، جابه جایی میانه تیر، الگوی ترک ها و مد گسیختگی تیرها مطابقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.
- (۲) ماکزیمم جابه جایی نقطه میانی تیر توسط FEM و محاسبات SDOF به هم نزدیک هستند و در تغییر شکل های پلاستیک بزرگ، عملکرد مدل FE نسبت به مدل SDOF سخت تر است.
- (۳) می توان از روش شبیه سازی عددی به عنوان روشی مناسب جهت بررسی تاثیر کلیه عوامل موثر در مقاومت تیرهای بتن مسلح تحت انفجار بدون صرف هزینه و زمان زیاد استفاده نمود.

مراجع

- [1] Magnusson J., 2007. Structural Concrete Elements subjected to Air Blast Loading, licentiate thesis, royal institute of technology, division of concrete structures, stockholm sweden.
- [2] UFC, 2008. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, unified facilities criteria 3-340-02, US army corps of engineers, Washington, D.C.
- [3] Biggs, J.M., 1964. Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York.
- [4] Magnusson J., Hallgren, M., 2000. High Performance Concrete Beams Subjected to Shock Waves from Air Blast, swedish defense research establishment (FOA).
- [5]. Crawford, Malvar, W. Dunn, J. Gee, "Retrofit of reinforced concrete column using composite wrap to resist blast effect"

[6] بزرگوار، شوشتری. "اثر انفجار بر ساختمان های بتنی مقاوم در برابر زلزله". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان؛ اردیبهشت