

## بررسی آسیب در تیرهای بتن مسلح زیر بارگذاری انفجاری (آزمایش میدانی و شبیه‌سازی عددی)

رمضانعلی ایزدی فرد<sup>۱\*</sup>، رضا قلی پور<sup>۲</sup>، حامد حاجی کریمیان<sup>۳</sup>

۱- استادیار ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین، ۲- کارشناس ارشد دانشگاه مالک اشتر- تهران

(تاریخ وصول: ۹۵/۶/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۱)

### چکیده

بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری و برآورد آسیب وارده امری مهم در تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار است. در این مقاله ابتدا نتایج حاصل از آزمایش انفجاری بر روی ده عدد تیر بتن مسلح ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش شدت انفجار، تغییر مکان بیشینه و نهایی وسط دهانه تیر زیادتر می‌گردد و نیز بر شدت آسیب‌های وارد بر تیر افزوده می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده‌ای از فاصله مقیاس شده انفجار انجام شده است که نتایج آن از آسیب بسیار جزئی تا آسیب‌های بسیار شدید را دربر گیرد. سپس با انجام شبیه‌سازی دقیق در نرم‌افزار ABAQUS و راستی‌آزمایی با نتایج آزمایشگاهی، داده‌های بیشتری برای مقادیر مختلفی از مواد منفجره تولید شد. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد بین لگاریتم فاصله مقیاس شده انفجار و لگاریتم تغییر شکل تیر می‌توان رابطه‌ای خطی برقرار نمود. در ادامه مقاله با استفاده از مقادیر تغییر مکان نهایی و بیشینه و بررسی مفاهیم آن دو، شاخصی برای ارزیابی آسیب‌های وارده و نیز شاخصی برای بقا و ماندگاری تیر پیشنهاد، و مقادیر متناظر با آسیب جزئی، آسیب شدید قابل ترمیم و آسیب بسیار شدید معرفی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تیرهای بتن مسلح، بارگذاری انفجار، شاخص آسیب، شاخص بقا.

## Damage Assessment of RC Beams under Blast Loading (Experimental and Numerical Studies)

R. A. Izadifard<sup>1\*</sup>, R. Gholipour<sup>2</sup>, H. Hajikarimian<sup>3</sup>

1,3- Imam Khomeini Int. University - Qazvin 2- Maleke Ashtar University of Technology-Tehran

(Received: 9/19/2016, Accepted: 1/30/2017)

### Abstract

The behavior of RC beams under blast loading and damage estimating is very important to analysis and design of blast resistant structures. In this paper, the experimental results of ten RC beams are presented. These results show that by increasing the intensity of the blast, the maximum and permanent displacement and also the damage severity of the beams will be increased. Experimental tests have been carried out on a range of very minor to very serious damages. In the next step, accurate simulation by ABAQUS performed and after verification, more data were generated for different amounts of scaled distances. This study indicates there is a linear relationship between the logarithm of scaled distances and the logarithm of displacements. Then by using the concept of maximum and permanent displacements, a damage index and a survival index have been introduced and their amounts corresponding with minor, repairable and severe damages have been suggested.

**Keyword:** RC Beams, Blast Loading, Damage Index, Survival Index.

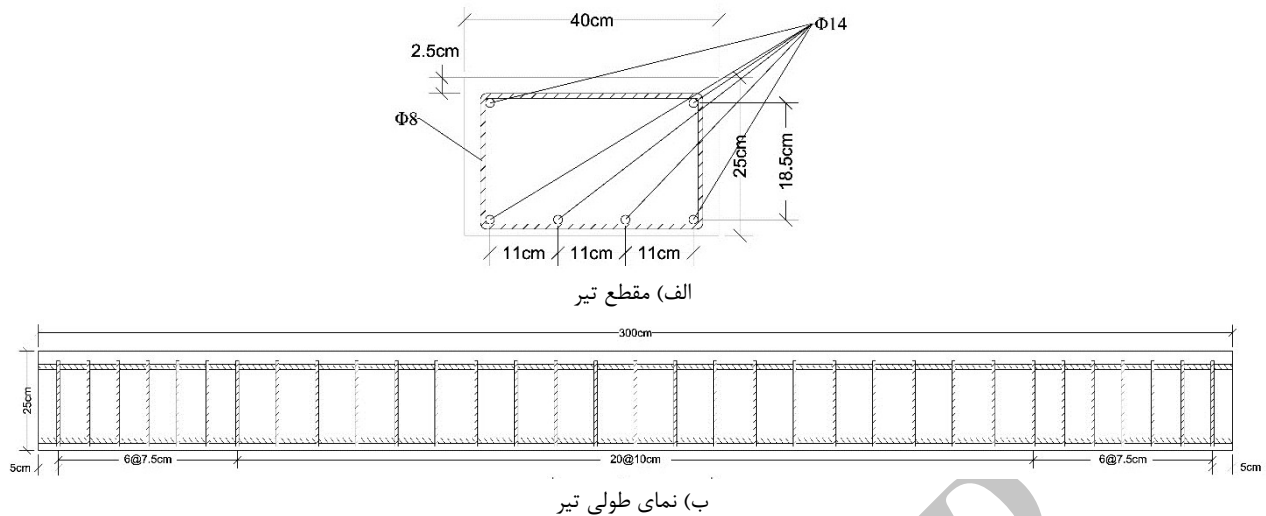
## ۱- مقدمه

مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تیرها بوده و مقاومت بتن و نسبت آرماتور تأثیر چندانی بر این رفتار ندارد. یان و همکاران [۶] با استفاده از روش اجزای محدود، مکانیزم قلوه‌کنی پوشش زیر و طرفین تیر بتن مسلح ناشی از تنش کششی و نیز انتشار ترک تیر را مورد توجه قرار دادند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی تیرهای کوچک‌مقیاس تحت انفجار توسط یان و همکاران انجام شده است. اگرچه این تحقیق صرفاً در محدوده‌ی آسیب شدید، اثر خاموت‌ها در کم کردن تغییر شکل و کاهش تخریب در پوسته و هسته بتنی را بررسی کرده است اما بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی برای تولید داده‌های بیشتر از شبیه‌سازی عددی، ایده مناسب و قابل تکراری در اختیار ما قرار می‌دهد [۷]. از مجموعه این مطالعات و نیز تجارب گذشته، نویسندگان این مقاله را بر آن داشته تا در مرحله اول با انجام آزمایش میدانی انفجار در مقیاس واقعی و تغییر در پارامترهای تأثیرگذار، آسیب‌های خمشی وارد بر تیرهای بتن مسلح را در بازه وسیعی از ترک‌های جزئی تا آسیب شدید بررسی نمایند و در مرحله دوم با شبیه‌سازی عددی این نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، ضمن ارائه مدل قابل قبول، نسبت به تولید داده‌های جدید اقدام نموده و نهایتاً در مرحله پایانی با استفاده از داده‌های گسترده تجربی و عددی، ارتباط معناداری بین تغییر شکل مشهود تیر و آسیب‌های واقعی آن برقرار نمایند. در این پژوهش بر روی تغییر شکل و آسیب تیرهای بتن مسلح به عنوان المان اصلی و پایه‌ای در سازه‌های بتن مسلح در معرض بارگذاری انفجار تمرکز شده است.

## ۲- آزمایش‌های میدانی

برای بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح در برابر موج انفجار، تعداد ده عدد تیر به طول سه متر، عرض ۴۰ و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر از بتن به عیار  $400 \text{ kg/m}^3$  با مقاومت فشاری  $f_{cu} = 39 \text{ MPa}$  (نمونه مکعبی ۴۲ روزه به ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتیمتر) ساخته شد. به منظور اطمینان بیشتر و ارتقاء کیفیت آزمایش، قطعاتی از میل‌گردها تحت آزمایش کشش قرار گرفته است. برای تسلیح این تیرها از میل‌گرد نوع AIII با تنش تسلیم  $f_y = 417 \text{ MPa}$  و با شکل‌پذیری بیش از ۱۰ استفاده شد. آرماتورهای طولی به قطر ۱۴ میلی‌متر به تعداد ۴ عدد در وجه زیرین و ۲ عدد در وجه بالایی و نیز آرماتورهای عرضی (خاموت) به قطر ۸ میلی‌متر در طول تیر تعبیه شده‌اند. فاصله خاموت‌ها در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ۷/۵ و در وسط تیر ۱۰ سانتیمتر است (شکل ۱).

سازه‌های بتن مسلح از پرکاربردترین سازه‌ها در ابنیه مقاوم در برابر انفجار هستند. بسیاری از ساختمان‌های اداری، ورزشی، آموزشی و... که ممکن است در معرض انفجار اتفاقی قرار گیرند، سازه‌های خاص نظامی، امنیتی و حاکمیتی که باید در برابر تهدیدات پیش‌بینی‌شده مقاوم باشند و نیز بسیاری از مستحقات حیاتی و زیربنایی مانند زاغه‌های مهمات و پل‌ها از بتن مسلح ساخته می‌شوند. رفتار بتن مسلح در بارگذاری انفجاری پیچیده و غیرخطی است. بر حسب مقدار ماده منفجره و فاصله آن، نوع سازه بتنی، وضعیت تکیه‌گاه‌ها، چگونگی و نسبت تسلیح و... توزیع تنش و کرنش در مقطع، ترک‌خوردگی و آسیب متفاوت خواهد بود. در پژوهش‌های گذشته المان‌های مختلف بتنی نظیر دال، دیوار، قاب، ستون و تیر تحت بارهای دینامیکی مانند زلزله و انفجار از منظرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ایزدی فرد و همکاران [۱] با انجام آزمایش میدانی بر روی تعدادی تیر بتن مسلح در مقیاس واقعی، با بررسی تغییر شکل و مقاومت خمشی پسماند تأکید نمودند رفتار سنجی تیرها تحت موج انفجار در محدوده آسیب‌های متوسط نیازمند آزمایش‌های بیشتری بوده و ترجیحاً بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی می‌تواند در این راستا مفید باشد. دیائو ژانگ و همکاران [۲] با انجام آزمایش بر روی تیرهای کوچک‌مقیاس زیر بار انفجار نزدیک، مود آسیب و میزان آن را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق مشاهده شده است که انفجار نزدیک موجب تغییر شکل کاسه‌ای و آسیب برشی می‌شود و برای دستیابی به تغییر شکل‌های بشقابی و آسیب خمشی، لازم است فاصله محل انفجار از تیر افزایش یابد. برخی دیگر از محققین با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی بحث آسیب سازه ناشی از انفجار را مورد توجه قرار دادند. اِکس ژانگ و همکاران [۳] با شبیه‌سازی تیرهای بتن مسلح در نرم‌افزار LS-Dyna و بهره‌گیری از مدل H-I-C برای بتن و مدل الاستو پلاستیک سخت شونده برای فولاد، مودهای شکست تیر را تحقیق نموده‌اند. آن‌ها با معرفی سه نوع از مودهای شکست، اثر نسبت فولاد، مقدار ماده منفجره و فاصله آن را در غالب نمودن هر یک از مودها بررسی نموده‌اند. پارک و کواک [۴] با استفاده از مقاطع لایه‌ای (Layer-Section) در شبیه‌سازی تیرهای بتن مسلح زیر بارگذاری انفجار و در نظر گرفتن نرخ کرنش، مدعی شده‌اند روش عددی ارائه‌شده می‌تواند با دقت قابل قبولی رفتار تیرها را پیش‌بینی کند. اِسْتِچینو [۵] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان، تیرهای بتن مسلح را با روش المان محدود مدل‌سازی و آنالیز حساسیت نموده و تأکید کرده‌اند لاغری، حداکثر بار و طول عضو



شکل ۱- مشخصات نمونه‌های تیر بتنی مسلح.

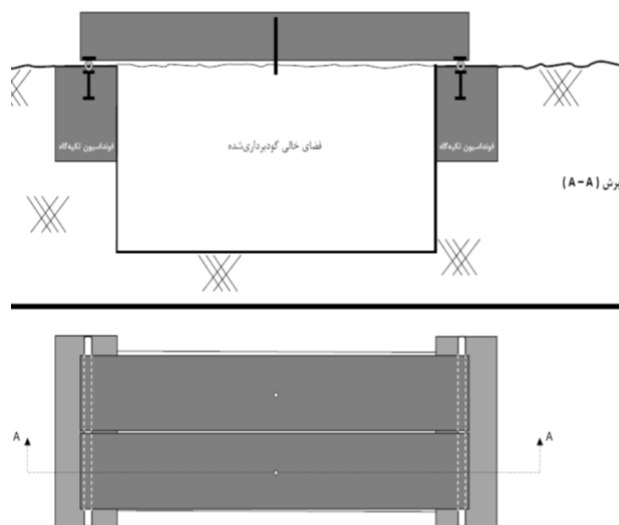


شکل ۲- آرماتورگذاری، قالب‌بندی و عمل‌آوری نمونه‌ها.

برای ساختن قطعات بتنی از قالب استاندارد فولادی و متناسب با ابعاد و مشخصات فنی تیرها با طول، عرض و ارتفاع یکسان استفاده گردید. به منظور ساخت نمونه‌های بتنی محوطه وسیعی که گنجایش استقرار و ساخت همزمان تیرها را داشته باشد کاملاً مسطح و با مصالح نرم (ماسه) رگلاژ و با غلظت کاملاً متراکم گردیده است. آرماتورهای طولی و عرضی در کارگاه با رعایت ضوابط قطع و خم استاندارد توسط کارگران ماهر بافته و سپس به محل قالب‌ها منتقل گردیدند. سطوح تحتانی و دیواره قالب فلزی با قشر نازکی از گازوئیل چرب شده و مش‌ها با در نظر گرفتن ۲/۵ سانتیمتر پوشش بتنی در داخل قالب قرار داده و تثبیت شدند. سپس بتن مورد نیاز توسط میکسر به محل حمل و توسط عوامل ماهر تحت نظارت دقیق در سطح قالب‌ها پخش و متراکم شده و در پایان سطح فوقانی نمونه‌ها به وسیله شمشه و ماله کاملاً صاف و پرداخت گردیده است. به منظور اتصال ابزار اندازه‌گیری، میل‌گردی در مرکز سطح هندسی زیر تیر تعبیه گردید. به منظور محافظت و عمل‌آوری بتن، سطوح نمونه‌ها با استفاده از گونی چتایی مرطوب پوشانده شد و با آبیاری مداوم رطوبت نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش حفظ گردید. به منظور ارتقاء دقت و مشخص شدن بهتر امتداد ترک‌های ایجادشده، سطح جانبی تیرها اندازه‌گذاری طولی گردید (شکل ۲).

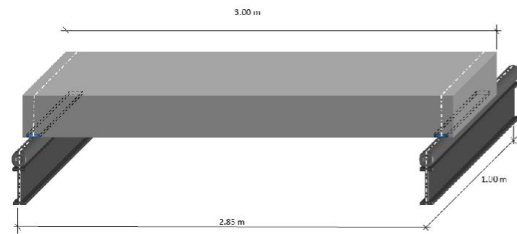
در دو انتهای تیر با استفاده از لوله، شرایط تکیه‌گاهی ساده (غلظتی) به وجود آمد. برای جلوگیری از لهیدگی بتن ناشی از تمرکز تنش در محل تکیه‌گاه‌ها، دو عدد ورق به ابعاد  $40 \times 10 \times 8$  سانتیمتر در زیر تیر و داخل توده بتن قرار داده شده است. برای جلوگیری از کنده شدن تیرها از روی تکیه‌گاه ناشی از نیروی بازگشتی<sup>۱</sup>، دو انتهای نمونه‌ها توسط نشی‌های فلزی به لوله‌های تکیه‌گاهی متصل شده‌اند (شکل ۳).

فاصله ۲ متری بین ماده منفجره و سطح تیر، امکان گسترش موج کروی انفجار را فراهم می‌کند به طوری که در طول تیر، بار گسترده نسبتاً یکنواختی بر سطح آن اعمال و تغییر شکل خمشی بر رفتار تیر حاکم خواهد شد. اگر این فاصله کاهش قابل توجه یابد اعمال موج انفجار به صورت موضعی و آسیب وارد بر تیر عمدتاً به صورت برش پانچ ظاهر خواهد شد [۲]. با توجه به ابعاد تیرها، سکویی با ابعاد سطح نشیمن  $280 \times 82$  سانتیمتر در داخل زمین ساخته شد تا نفوذ موج انفجار به داخل آن امکان پذیر نباشد و بارگذاری تیرها صرفاً از وجه فوقانی باشد و نیز تیرها بتوانند به راحتی و بدون ممانعت دیواره‌ها تغییر شکل دهند. به منظور سهولت و امکان استقرار تجهیزات اندازه‌گیری در زیر تیر و ثبت تغییر مکان‌ها و ترک‌های ایجاد شده و نیز امکان عکس برداری از سطح تحتانی تیر پس از انجام انفجار، عمق سکو حدود دو متر در نظر گرفته شد. در دو انتهای سکو دو پروفیل INP180 تعبیه گردید و روی آن لوله فولادی جوش شد تا شرایط تکیه‌گاهی مناسب برای تیرها به وجود آید (شکل ۵).

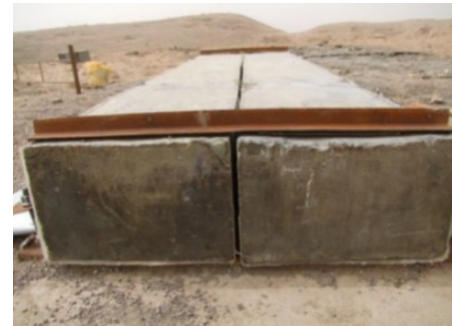


شکل ۵- جزئیات سکوی آزمایش.

بر اساس تحلیل اولیه و تجارب آزمایشگاهی گذشته، جهت دستیابی به دامنه‌ای از آسیب‌های جزئی تا تخریب گسترده، آزمایش‌ها با مقادیر ۸، ۱۲، ۲۰، ۲۴ و ۳۴ کیلوگرم ماده منفجره TNT انجام شد. با انجام واکنش شیمیایی در ماده منفجره TNT و ایجاد موج انفجار در آن، حجم قابل توجهی گاز با فشار بالا (تا  $300 \text{ K bar}$ ) و دمای بسیار زیاد ( $3000^\circ\text{C}$  -  $4000^\circ\text{C}$ ) تولید شده و فضای وسیعی را اشغال می‌نماید. در روی این حجم، لایه هوای فشرده‌ای به نام جبهه موج انفجار تشکیل می‌شود. مقدار این فشار که با فاصله گرفتن از مرکز انفجار تقلیل می‌یابد از روابط و گراف‌های متعدد ارائه شده در مراجع مختلف قابل محاسبه است. رابطه ۱ از دقیق‌ترین روابط محاسبه بیش فشار ( $P_0$ ) ناشی از انفجار  $W$  کیلوگرم ماده TNT در فاصله  $R$  متری از مرکز ماده منفجره است [۸].

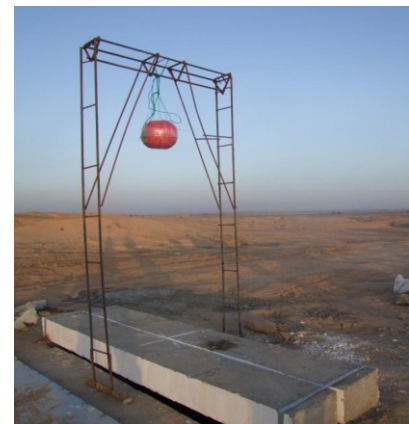


الف) تکیه‌گاه استقرار تیرها



ب) ممانعت از آلیفت ناشی از ریباوند  
شکل ۳- اجرای تکیه‌گاه‌های نمونه‌های مورد آزمایش.

تیرها به پنج دسته دوتایی تقسیم شده و هر دسته تحت انفجار مقدار معینی TNT قرار گرفت. مواد منفجره در محفظه‌ای کروی جاسازی و با استفاده از قاب فلزی در فاصله دومتری از سطح تیر و در راستای وسط آن مستقر گردید (شکل ۴).



الف) قاب نگهدارنده مواد منفجره



ب) ماده منفجره مورد استفاده

شکل ۴- آماده‌سازی مواد منفجره برای آزمایش.

مرحله، مقدار پیش گفته از ماده منفجره بر روی دو تیر با شرایط کاملاً یکسان آزمایش شده و پس از فروکش نمودن گرد و غبار، میزان جابجایی حداکثر لحظه‌ای و نیز جابجایی نهایی ماندگار وسط تیرها به دقت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین وضعیت ترک‌ها و آسیب‌های مشهود در وجوه تیر بررسی و با عکس برداری ثبت می‌گردد. خلاصه نتایج آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه گردیده است. با برخورد موج انفجار به تیر بتن مسلح که دارای صلبیتی به مراتب بیشتر از هوا است موج تنشی فشاری در بتن منتشر می‌شود و تیر تحت این بارگذاری خمیده می‌گردد. با توجه به انحنای مثبت تیر، در سطح فوقانی آن تنش فشاری به وجود می‌آید که با تنش ناشی از موج تنشی ترکیب برداری خواهد شد. در هر نقطه که برآیند تنش‌های فشاری از مقاومت فشاری بتن تجاوز کند پدیده خردشدگی بتن به وجود خواهد آمد. با برخورد موج تنشی به سطح زیرین تیر، به دلیل تفاوت چشمگیر سختی دو محیط، این موج به صورت کششی بر خواهد گشت. برآیند این کشش و تنش کششی ناشی از انحنای، موجب ترک و یا قلوه‌کنی در بتن زیر تیر خواهد شد. در جدول (۱) علاوه بر تغییر مکان‌های حداکثر و ماندگار وسط دهانه تیرها، وضعیت ترک‌ها در وجوه مختلف، خردشدگی بتن در سطح فوقانی و میزان آسیب‌دیدگی و قلوه‌کنی در زیر تیرها بر اساس مشاهدات میدانی و ارجاع به تصاویر نمونه‌ی شکل‌های زیر به صورت کیفی توضیح داده شده است.



شکل ۶- مراحل آغاز تا سرانجام یک آزمایش انفجاری.

$$\log_{10} [\log_{10} P_s] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.4644 \quad (1)$$

$$X = \log_{10}(Z)$$

که در آن  $Z$ ، فاصله مقیاس شده انفجار (رابطه ۲) است:

$$Z = R/W^{1/3} \quad (2)$$

بعد از مدت زمان کوتاهی ( $T_s$ ) فشار توده‌ی هوا با فشار محیط برابر می‌شود و پس از آن به مقادیر پایین‌تر از فشار پیرامونی نزول نموده و با ایجاد مکش موضعی، هوای پیرامونی به درون منطقه انفجاری کشیده خواهد شد. معمولاً در محاسبه بارهای انفجاری از مکش فوق (فاز منفی) صرف‌نظر و تنها اثر تکانه ناشی از فشار مثبت در نظر گرفته می‌شود [۹]. جبهه موج پس از برخورد با سطح تیر انعکاس یافته و به دلیل تفاوت چشمگیر سختی سازه و محیط هوا، فشار وارد بر تیر به شدت افزایش می‌یابد (فشار بازتاب). مقدار فشار بازتاب بر حسب بیش فشار موج انفجار و زاویه برخورد از گراف‌های موجود در مراجع [۹] و [۱۰] قابل محاسبه است.

پس از استقرار تیرها بر روی سکوی انفجار، نصب دستگاه اندازه‌گیری، تثبیت ماده منفجره در فاصله ۲ متری از سطح فوقانی دال به وسیله قاب نگه‌دارنده و انتقال افراد به محل‌های امن، گروه آتشیاری نسبت به برقراری مدار انفجار اقدام و آزمایش انجام می‌شود (شکل ۶). در هر

جدول ۱- نتایج ثبت شده از آزمایش‌ها.

وضعیت ترک‌ها و آسیب	تغییر مکان وسط دهانه (mm)		وزن TNT (Kg)
	ماندگار	حداکثر	
ترک‌های مویی بسیار کم در زیر تیر. در بدنه تیر تقریباً ترکی مشاهده نمی‌شود. سطح فوقانی تیر بدون هرگونه ترک و آسیب است. آسیب مشهودی ثبت نشده است (شکل ۷).	۱۰	۱۶	۸
	۱۲	۱۹	
ترک‌های کم و مویی در بدنه و زیر تیر. در بدنه تیر ترک‌های مویی اندکی مشاهده می‌شود. سطح فوقانی تیر بدون هرگونه ترک و آسیب است. آسیب بسیار جزئی (شکل ۸).	۱۷	۳۰	۱۲
	۱۸	۳۲	
ترک‌های مویی در بدنه تیر، به جز در تکیه‌گاه‌ها ترک‌ها عمدتاً خمشی هستند. در زیر تیر ترک‌های تقریباً عمیق در راستای خاموت‌ها مشاهده می‌شوند ولی قلوه‌کنی مشهود نیست. سطح فوقانی تیر بدون هرگونه آسیب است. آسیب کم (شکل ۹).	۴۶	۶۸	۲۰
	۴۴	۷۰	
ترک‌های عمیق در بدنه تیر که عمدتاً در یک سوم میانی تیر متمرکز هستند. در زیر تیر ترک‌های عمیق در راستای خاموت‌ها مشاهده می‌شود و نیز قلوه‌کنی مشهود است. سطح فوقانی تیر آسیب‌دیده و لهیده شده است. آسیب زیاد (شکل ۱۰).	۵۴	۷۶/۵	۲۴
	۴۴	۷۱	
ترک‌های عمیق و تخریب پوشش در بدنه تیر که عمدتاً در میانه تیر مشابه تخریب پانچی است. در زیر تیر ترک‌های عمیق و گسترده مشاهده می‌شود و قلوه‌کنی افزایش یافته است. سطح فوقانی تیر به شدت آسیب‌دیده و لهیده شده است. آسیب بسیار زیاد (شدید) (شکل ۱۱).	۱۰۶	۱۲۷	۳۴
	۹۹	۱۱۸	

گزینه CONWEP بوده و نوع انفجار به صورت هوایی در نظر گرفته شده است. قرارگیری تیرها در آزمایش میدانی بر روی سکوهایی که از نفوذ موج انفجار به داخل آن ممانعت شده است موجب می‌شود بار انفجاری صرفاً بر سطح بالایی تیر اعمال گردد. لذا در گزینه CONWEP صرفاً وجه فوقانی تیرها در معرض تکانه فشاری قرار خواهند گرفت. نوع تحلیل در نظر گرفته شده برای حل مسئله به صورت دینامیکی صریح<sup>۱</sup> است و برای بررسی و مقایسه‌ی محل تشکیل ترک‌ها در مدل‌سازی عددی و نمونه‌های آزمایش، در تعریف مشخصات مصالح و خروجی‌های مدنظر، پارامتر آسیب تعریف شده است.



ترک در زیر تیرها



الف) ترک در بدنه جانبی تیر شماره ۱



ب) ترک در بدنه جانبی تیر شماره ۲

شکل ۱۰- وضعیت تیرها پس از انفجار ۲۴ کیلوگرم TNT.

### ۳-۱- مشخصات مصالح و مدل‌ها

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای دو انتهای تیر به صورت دو سر مفصل است. مطابق با آزمایش میدانی انجام شده، تیرها تنها تحت بارگذاری ناشی از انفجار قرار گرفته‌اند. پس از انجام تحلیل حساسیت مش، اندازه‌ی المان‌ها برابر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای



شکل ۷- وضعیت تیرها پس از انفجار ۸ کیلوگرم TNT.



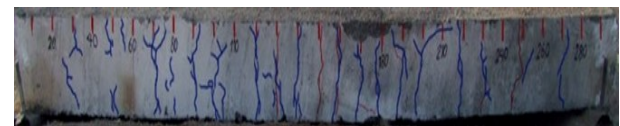
شکل ۸- وضعیت تیرها پس از انفجار ۱۲ کیلوگرم TNT.



ترک در زیر تیرها



الف) ترک در بدنه جانبی تیر شماره ۱

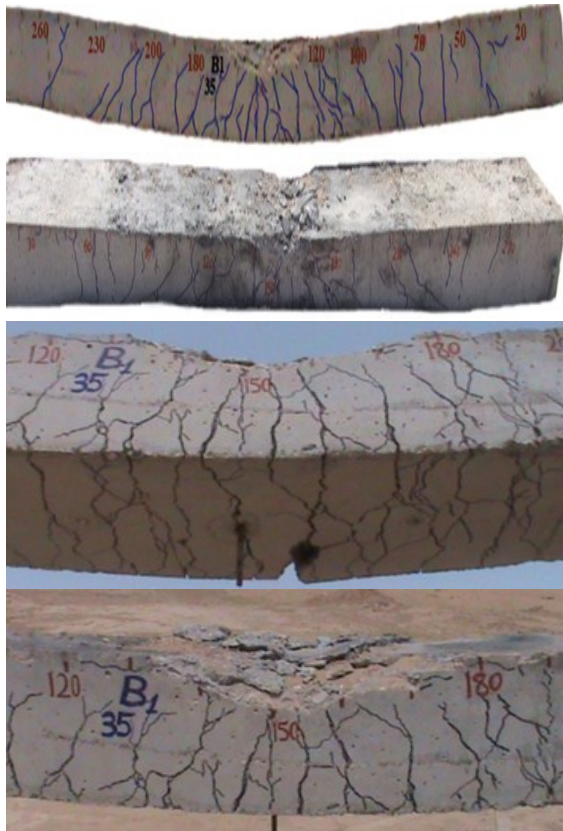


ب) ترک در بدنه جانبی تیر شماره ۲

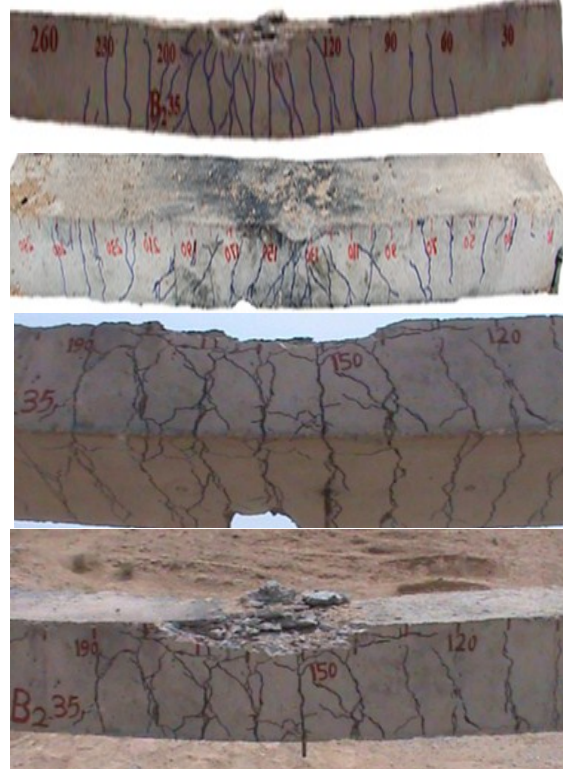
شکل ۹- وضعیت تیرها پس از انفجار ۲۰ کیلوگرم TNT.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی، تیری که پیش‌تر در شکل (۱) نشان داده شد، تحت مقادیر بار انفجاری مشخص قرار گرفت و مقادیر حاصل با نتایج آزمایش میدانی مقایسه گردید. نحوه‌ی اعمال انفجار بر مدل‌ها با



الف) ترک و آسیب در تیر شماره ۱



ب) ترک و آسیب در تیر شماره ۲

مدل سازی بتن از المان شش وجهی C3D8R و برای آرماتور فولادی از المان T3D2 استفاده شده است. المان C3D8R، یک المان شش وجهی ۸ گره‌ای است که برای آن از روش انتگرال گیری کاهش یافته<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. از جمله قابلیت‌های این المان در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و آسیب است. المان T3D2 یک المان خرابایی خطی سه بعدی ۲ گره‌ای است که هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد و با رفتار غیرخطی مصالح فولادی سازگاری دارد. برای اندرکنش بین مصالح، میل‌گردها به صورت مدفون<sup>۲</sup> در بتن در نظر گرفته شده‌اند. بتن اختصاص داده شده به تیر بتنی دارای چگالی‌ای برابر با  $2400 \text{ kg/m}^3$  و ضریب ارتجاعی  $18 \text{ GPa}$  است. جهت مدل سازی ماده بتن از مدل آسیب خمیری (CDP<sup>۳</sup>) استفاده شده است. مشخصات پلاستیک بتن از آزمایش به دست آمده و در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات پلاستیک بتن.

پارامتر گرانروی	$K_c^*$	نسبت $f_{tu}/f_{c0}$	خروج از مرکزیت	زاویه‌ی اتساع (درجه)
۰	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۸

\* عامل مشخص کننده‌ی شکل مقطع عرضی سطح تسلیم که مقدار آن بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. مطابق با توصیه‌ی نرم افزار مقدار ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.

چگالی و ضریب ارتجاعی فولاد استفاده شده برای مدل سازی به ترتیب برابر با  $7900 \text{ kg/m}^3$  و  $200 \text{ GPa}$  بوده و مشخصات پلاستیک آرماتورها با توجه به داده‌های آزمایشگاهی در جدول (۳) ارائه شده است. تعداد و محل قرارگیری آرماتورها مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. جزئیات هندسی مدل سازی بتن و آرماتورها در شکل (۱۲) ارائه گردیده است.

جدول ۳- مشخصات پلاستیک آرماتورها.

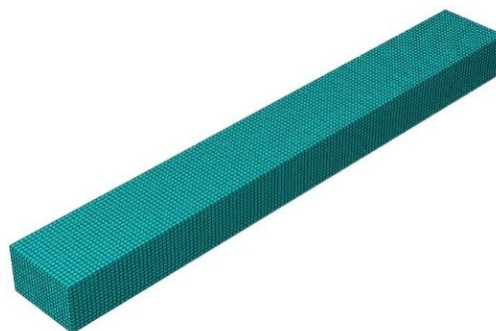
تنش تسلیم (MPa)	۴۴۱/۲۶	۴۴۱/۲۶	۵۹۹/۸۴	۶۸۹/۴۸
کرنش پلاستیک	۰	۰/۰۰۶۷۹	۰/۰۳۲	۰/۰۶۶۵۵

پس از مدل سازی پنج نمونه‌ی آزمایش میدانی و اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، مدل برای مقادیر دیگری از مواد منفجره تحلیل گردید تا تعداد داده‌های بیشتری برای ترسیم نمودار توسعه یافته در دسترس باشد. نتایج حاصل از مدل سازی (شکل ۱۴) نشان می‌دهد کاهش فاصله‌ی مقیاس شده باعث افزایش مقادیر تغییر مکان می‌شود و روند این کاهش مشابه با تابعی نمایی است.

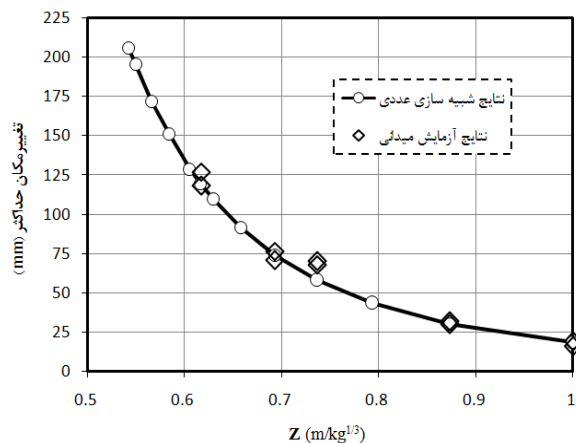
شکل ۱۱- ترک در وجوه تیرها، لهیدگی و قله‌کنی ناشی از انفجار ۳۴ کیلوگرم TNT.

- 1- Reduced Integration
- 2- Embedded
- 3- Concrete Damaged Plasticity

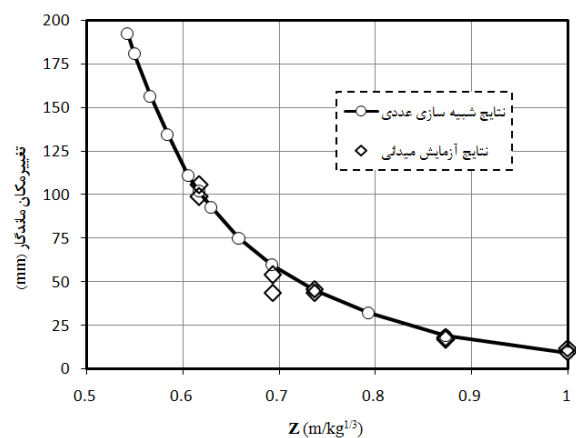
منفجره قرار می‌گیرد تعدادی خطوط آسیب عمودی در میانه تیر و خطوط آسیب مورب در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها مشاهده می‌شود که با الگوی ترک آزمایش تجربی در شکل (۸) منطبق است. با افزایش ماده منفجره به ۲۰ و ۲۴ کیلوگرم، ناحیه آسیب در میانه تیر و آسیب مورب در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد. ناحیه وسیعی از تیر تحت انفجار ۳۴ کیلوگرم TNT دچار آسیب شده و عملاً تیر بخش زیادی از مقاومت خود را از دست داده است. نتایج تجربی در شکل‌های (۹) تا (۱۱) همین روند افزایش آسیب تا مرحله خرابی شدید را تأیید می‌نماید.



الف) مدل‌سازی بتن به صورت solid



الف) نمودار خیز حداکثر بر حسب فاصله‌ی مقیاس‌شده

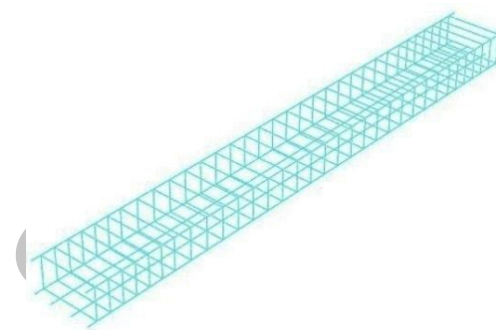


ب) نمودار خیز ماندگار بر حسب فاصله‌ی مقیاس‌شده

شکل ۱۴- مقایسه تغییر مکان‌ها بین نتایج آزمایشگاهی و عددی.

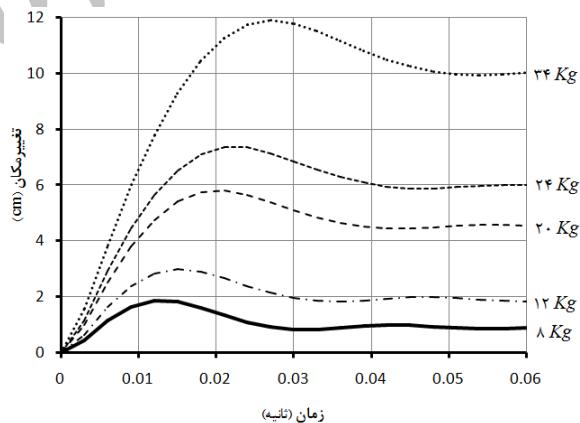
#### ۴- نتایج و بحث

همان‌طور که در نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پیش‌گفته دیده شد با کاهش فاصله مقیاس‌شده انفجار، تغییر شکل تیر کاهش می‌یابد. در شکل (۱۶) لگاریتم تغییر مکان لحظه‌ای (ماکزیمم) و ماندگار وسط دهانه تیر بر حسب لگاریتم مقادیر مختلف فاصله مقیاس‌شده (X) ترسیم شده است.



ب) مدل‌سازی آرماتورها به صورت wire

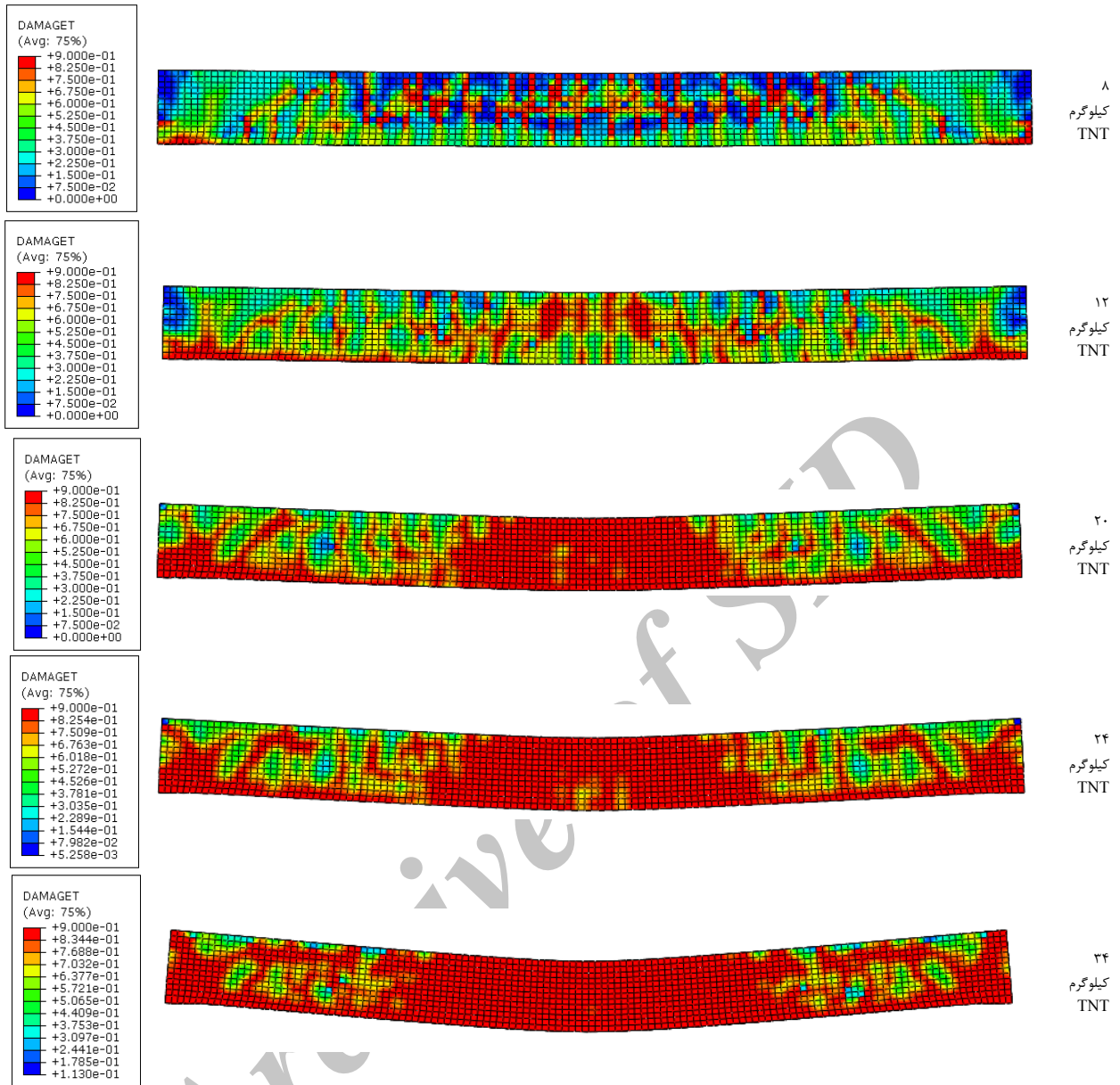
شکل ۱۲- شبیه‌سازی عددی بتن و میل‌گردها در نرم‌افزار آباکوس.



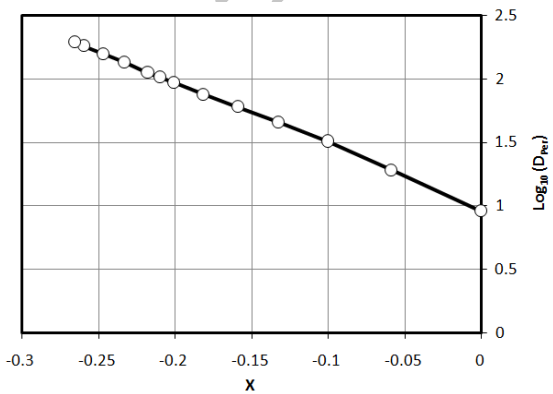
شکل ۱۳- تاریخچه زمانی تغییر مکان وسط تیر.

دیگرام آسیب کششی وارده بر تیر بتن مسلح برای بارگذاری‌های انفجاری ۸، ۱۲، ۲۰، ۲۴ و ۳۴ کیلوگرم TNT در شکل (۱۵) ارائه شده است. رنگ سرخ در شکل معرف آسیب کششی است و المان‌های واقع در این ناحیه در معرض ترک کششی می‌باشند. لذا با توجه به این شکل، محل تشکیل ترک‌ها در نواحی بحرانی آسیب کششی قابل پیش‌بینی است. آسیب کششی در المان‌های اندکی از میانه تیر تحت انفجار ۸ کیلوگرم TNT دیده می‌شود. به عبارت دیگر ترک‌های ایجادشده در این تیر بسیار محدود و ریز خواهد بود. نتیجه این شبیه‌سازی با آنچه در آزمایش میدانی (ترک‌های مویی اندک) دیده شده است انطباق خوبی دارد. وقتی تیر تحت انفجار ۱۲ کیلوگرم ماده

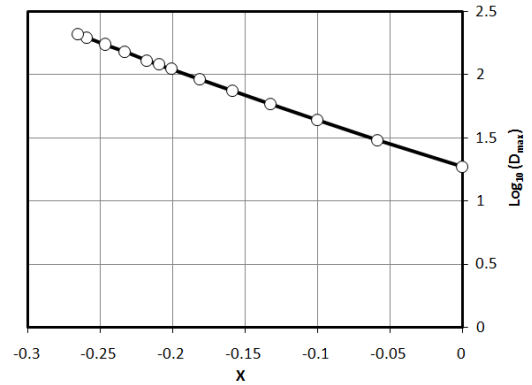




شکل ۱۵- الگوی آسیب کششی وارده بر تیر بتنی تحت بارهای انفجاری مختلف.



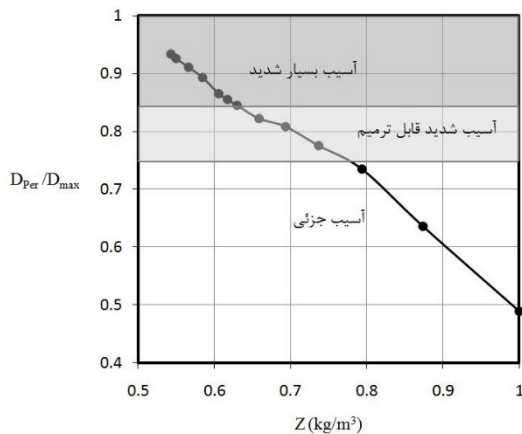
(ب) تغییر مکان نهایی



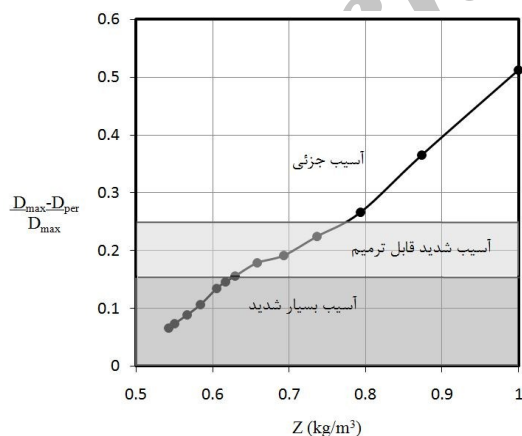
(الف) تغییر مکان لحظه‌ای

شکل ۱۶- نمودار تغییر شکل-فاصله ی مقیاس شده.

با توجه به توضیح فوق، دو معیار برای تبیین میزان آسیب تیرهای بتن مسلح در این مقاله پیشنهاد شده است. در معیار اول نسبت تغییر مکان ماندگار وسط دهانه به تغییر مکان لحظه‌ای ( $D_{per}/D_{max}$ ) به عنوان شاخصی برای آسیب<sup>۱</sup> ارائه و نمودار آن برحسب شدت انفجار در شکل (۱۸-الف) ترسیم شده است. شاخص صفر معادل سالم بودن سازه و آسیب ندیدن آن است. شاخص‌های نزدیک به یک معرف تخریب کامل است. این نمودار به خوبی نشان می‌دهد با افزایش شدت انفجار، آسیب در تیر بتنی افزایش می‌یابد. در معیار دوم نسبت تفاضل تغییر مکان‌های لحظه‌ای و ماندگار به تغییر مکان ماکزیمم ( $(D_{max}-D_{per}) / D_{max}$ ) به عنوان شاخص بقا و ماندگاری (Survival Index) پیشنهاد شده است. سالم ماندن کامل تیر با شاخص واحد و تخریب کامل با شاخص صفر نشان داده می‌شود. شکل (۱۸-ب) مقادیر این شاخص را برای تیرهای مورد آزمایش در این مقاله برحسب شدت‌های متفاوت انفجار نشان می‌دهد.



الف) نمودار شاخص آسیب



ب) نمودار شاخص ماندگاری

شکل ۱۸- نمودار شاخص‌های آسیب و ماندگاری بر حسب شدت‌های مختلف انفجار.

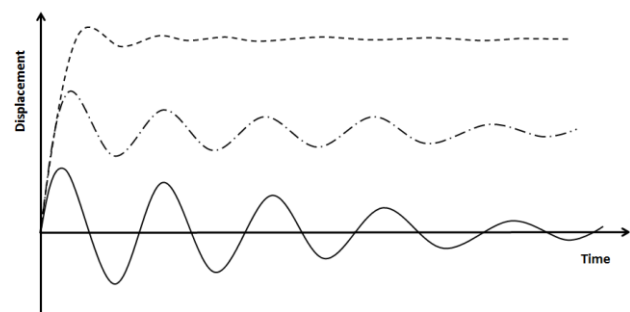
نکته قابل تأمل، خطی بودن نمودار شکل (۱۶) است که برای نمونه‌های تیر بتنی بررسی شده در این مقاله می‌تواند با روابط زیر بیان گردد:

$$\text{Log}_{10}(D_{max}) = -3.227 X + 1.313 \quad (۳)$$

$$\text{Log}_{10}(D_{per}) = -3.87 X + 1.284 \quad (۴)$$

در روابط فوق  $D_{per}$  و  $D_{max}$  به ترتیب تغییر مکان ماکزیمم (لحظه‌ای) و ماندگار وسط تیر و  $X$  لگاریتم فاصله مقیاس شده مطابق رابطه ۱ است. این رابطه می‌تواند کمک مؤثری برای محاسبه تغییر مکان و آسیب در تیر بتن مسلح تحت مقادیر مختلف ماده منفجره و فاصله آن از تیر باشد.

در شکل (۱۷) تاریخچه زمانی تغییر مکان یک سازه فرضی در دو حالت ترسیم شده است. اگر رفتار سازه کاملاً الاستیک باشد نوسان تغییر مکان‌ها حول محور صفر بوده و در نهایت با توجه به مقدار میرایی سیستم، پس از چند ارتعاش سازه بدون وجود هیچ تغییر شکلی به حالت اولیه برمی‌گردد (نمودار خط ممتد در شکل ۱۷). بنابراین در این حالت، مستقل از مقدار تغییر مکان ماکزیمم، تغییر مکان نهایی صفر می‌باشد. اگر رفتار سازه در مراحل تخریب، رفتاری تقریباً پلاستیک کامل در نظر گرفته شود تغییر شکل پلاستیک زیادی که پس از اعمال بار، در سازه رخ می‌دهد برگشت ناچیزی داشته و تغییر مکان نهایی به تغییر مکان ماکزیمم نزدیک است (نمودار خط چین در شکل ۱۷). به عبارتی دیگر نسبت تغییر مکان نهایی به لحظه‌ای نزدیک به یک است. در حالتی بین دو حالت فوق، سازه ابتدا تغییر شکل ماکزیمم لحظه‌ای را تجربه خواهد کرد و سپس با ارتعاش‌های میرا شونده، به تغییر مکان نهایی مجانب خواهد شد. میزان برگشت تغییر مکان لحظه‌ای وابسته به میزان ورود سازه به ناحیه پلاستیک است. هرچه رفتار پلاستیک سازه کمتر و رفتار الاستیک حاکمیت بیشتری داشته باشد درصد بیشتری از تغییر شکل برگشته و نسبت تغییر مکان نهایی به ماکزیمم به صفر نزدیک‌تر خواهد بود. با استدلال مشابه هرچه تخریب و یا پلاستیک شدن سازه توسعه یابد درصد کمتری از تغییر شکل برگشته و نسبت تغییر مکان نهایی به ماکزیمم به یک نزدیک‌تر خواهد بود (نمودار خط نقطه در شکل ۱۷).



شکل ۱۷- تاریخچه زمان تغییر مکان یک سازه‌ی فرضی.

از مقادیر تغییر مکان نهایی و بیشینه و بررسی مفاهیم آن، دو شاخص برای ارزیابی آسیب‌های وارد بر تیر ناشی از اعمال موج انفجار ارائه گردید. شاخص اول معادل حاصل تقسیم تغییر مکان‌های نهایی به بیشینه  $(D_{per} / D_{max})$  و معرف میزان آسیب وارده است. شاخص دوم حاصل تقسیم مقدار برگشت الاستیک تغییر مکان به تغییر مکان بیشینه  $([D_{max}-D_{per}] / D_{max})$  و معرف امکان ماندگاری و بقای تیر در آینده است. در نمونه‌های بررسی شده در این مقاله دیده می‌شود اگر مقدار شاخص آسیب کمتر از  $0/75$  باشد در آن صورت تیر آسیب جزئی دیده و نیازمند ترمیم جدی نیست. در صورتی که این شاخص از  $0/75$  تا  $0/85$  افزایش یابد آسیب‌های وارد بر تیر به تدریج شدت یافته و نیازمند ترمیم‌های سازه‌ای است. تجاوز شاخص اول از  $0/85$  نشان می‌دهد تیر متحمل آسیب بسیار شدید شده است. متقابلاً در صورتی که شاخص ماندگاری کمتر  $0/15$  باشد نشان‌دهنده عدم ماندگاری تیر تحت بارهای بهره‌بردار است. اگر شاخص ماندگاری بین اعداد  $0/15$  تا  $0/25$  باشد بقای تیر مشروط به مرمت و تعمیر سازه ای است. در شاخص‌های بزرگ‌تر از  $0/25$  تیر تقریباً سالم مانده و از آسیب‌های وارده می‌توان چشم‌پوشی و یا به تعمیرات ساده اکتفا نمود.

## مراجع

- [۱] ایزدی فرد، رضاعلی و مقیمی خیرآبادی، پرویز و زارع شانی، علی. "مقاومت خمشی پسماند تیرهای بتن مسلح آسیب‌دیده از بار انفجار"، مجله علمی-پژوهشی مواد پراثرژی، سال هشتم، شماره ۳، صفحه ۳-۱۴، ۱۳۹۲.
- [2] Zhang, D.; Yao, S.; Lu, F.; Chen, X.; Lin, G.; Wang, W.; Lin, Y. "Experimental Study on Scaling of RC Beams under Close-in Blast Loading"; Eng. Failure Anal. 2013, 33, 497-504.
- [3] Zhang, X. H.; Wu, Y. Y.; Wang, J. "Numerical Simulation for Failure Modes of Reinforced Concrete Beams under Blast Loading"; Adv. Mater. Res. 2011, 163-167, 1359-1363.
- [4] Park, G. K.; Kwak, H. G. "Numerical Analysis of RC Beam Subjected to Blast Load"; Int. J. Struct. Civil Eng. Res. 2016, 5, 1
- [5] Stochino, F. "RC Beams under Blast Load: Reliability and Sensitivity Analysis"; Eng. Failure Anal. 2016, 66, 544-565.
- [6] Yan, B.; Liu, F.; Song, D.; Jiang, Z. "Numerical Study on Damage Mechanism of RC Beams under Close-In blast Loading"; Eng. Failure Anal. 2015, 51, 9-19.
- [7] Yao, S. J.; Zhang, D.; Lu, F. Y.; Wang, W.; Chen, X. G. "Damage Features and Dynamic Response of RC Beams under Blast"; Eng. Failure Anal. 2016, 62, 103-111.
- [8] Izadifard, R. A.; Foroutan, M. "Blastwave Parameters Assessment at Different Altitude Using Numerical Simulation"; Turk. J. Eng. Environ. Sci. 2009, 33, 1-17.
- [۹] اسمیت، هترینگتن، ترجمه ایزدی فرد، رضاعلی "تأثیرات بارگذاری انفجاری و بالستیک بر سازه‌ها"، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، ۱۳۹۳.
- [10] FEMA-426. "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks against Buildings"; Federal Emergency Management Agency, Report No. 426, Washington D.C., 2003.

بر اساس مشاهدات میدانی از آسیب وارد بر تیرها و انطباق با مقادیر شاخص‌های معرفی شده، می‌توان مقادیری اولیه برای برآورد آسیب تعریف نمود. البته باید توجه داشت که بررسی رابطه کمی بین شاخص‌ها و آسیب سازه نیازمند آزمایش‌های میدانی و شبیه‌سازی گسترده برای ابعاد مختلفی از تیر بتن مسلح و با درصد‌های متنوعی از فولادگذاری است. این مقاله صرفاً درصد معرفی این شاخص است و نتایج آن گامی مقدماتی برای کمی سازی آن‌ها است. با توجه به شکل (۱۸-الف) اگر شاخص آسیب  $(D_{per} / D_{max})$  کمتر از  $0/75$  باشد در آن صورت تیر آسیب جزئی دیده و نیازمند ترمیم جدی نیست. در صورتی که این شاخص از  $0/75$  تا  $0/85$  افزایش یابد آسیب‌های وارد بر تیر به تدریج شدیدتر می‌شود و برای تداوم بهره‌برداری نیازمند ترمیم‌های اساسی است. تجاوز شاخص از  $0/85$  معرف آسیب‌های بسیار شدید است. در صورتی که از شاخص ماندگاری  $([D_{max}-D_{per}] / D_{max})$  مطابق شکل (۱۸-ب) استفاده شود مقادیر کمتر از  $0/15$  متناظر آسیب شدید و عدم ماندگاری تیر تحت بارهای بهره‌برداری است. در صورتی که شاخص ماندگاری بین اعداد  $0/15$  تا  $0/25$  باشد بقای تیر مشروط به مرمت و تعمیر سازه‌ای آن است. در شاخص‌های بزرگ‌تر از  $0/25$  تیر تقریباً سالم مانده و از آسیب‌های وارده می‌توان چشم‌پوشی نمود و یا با تعمیرات ساده به حالت اولیه برگرداند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا گزارش تفصیلی از ساخت و آزمایش انفجاری بر روی ده عدد تیر بتن مسلح با ابعاد، مصالح، فولادگذاری و شرایط تکیه‌گاهی مشابه با مقادیر متفاوت ماده TNT ارائه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند با افزایش شدت انفجار تغییر مکان بیشینه و نهایی وسط دهانه تیر زیادتر می‌گردد و نیز بر شدت آسیب‌های وارد بر تیر افزوده می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده‌ای از فاصله مقیاس‌شده انفجار انجام شده است که نتایج آن از ترک‌های مویی (آسیب بسیار جزئی) تا آسیب‌های شدید را در برگیرد. سپس با انجام شبیه‌سازی دقیق سازه در نرم‌افزار ABAQUS شامل مدل‌سازی مصالح بتن و فولاد، اندرکنش مصالح، بارگذاری انفجاری، شرایط تکیه‌گاهی و... نتایج عددی بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از آزمایش‌های میدانی به دست آمده‌اند. با اطمینان از صحت و دقت نتایج شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی برای مقادیر مختلفی از مواد منفجره انجام و داده‌های گسترده‌تری برای تحلیل و بررسی تولید شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد بین فاصله مقیاس‌شده انفجار و تغییر شکل تیر می‌توان رابطه‌ای خطی در مقیاس لگاریتمی برقرار نمود. این نتیجه مهم می‌تواند راهنمایی برای محاسبه تغییر مکان تیر در حالات مختلفی از بارگذاری انفجاری با داشتن تعداد معدودی داده (از آزمایش و یا شبیه‌سازی) باشد و مراحل طراحی و تحلیل تیرهای بتن مسلح را ساده‌سازی نماید. در ادامه مقاله با استفاده