

An analytical study on the effect of beams' impact on the stories of structure with attitude towards progressive collapse

Ghasem Gorji-Bandpey¹, Gholamreza Abdollahzadeh², , Ali Rahmani Firoozjaee³

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Prof, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant Prof, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

By reviewing previous studies in the field of roof's collapse, an efficient analytical method is required to simulate the impact mechanism and failure procedure. Hence, the purpose of present study is mainly to analyze the beams' impact. Consequently, upper and lower beams are considered to survey the collision effects of upper beam's equivalent concentrated mass to the lower beam's midspan in a way that an initial impact caused by mass is taken into account. At first, the maximum bending moment at the midspan is calculated by assuming linear behavior and employing the relations which involves the kinetic energy of concentrated mass and potential energy of the lower beam. Then, studying a conventional steel frame demonstrates that the bending moment is about eight times greater than the bending moment capacity of lower beam, therefore it would lead to formation of a plastic hinge at the midspan. In continue, the mentioned relations are solved by using the equations of motion including inertial effect. The results are used to calculate velocity in different sections of lower beam. Subsequently, the equilibrium equation is employed in the middle of lower beam and a virtual hinge at an arbitrary section which is tending in a wave form to supports is considered. Due to mentioned assumptions by investigating hinge formation behavior, the time of hinge tendency to the supports is calculated. Additionally, displacement values along the lower beam are obtained. Finally, the diagrams and tables are represented by using the obtained equations and compared with the lower beam's displacement capacity. The results demonstrate that the lower beams will collapse due to the collision of concentrated mass of upper beam and progressive collapse occurs in lower stories. Finally, for more accuracy of present study, the effect of secondary impact of upper beam on the lower beam is considered.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 December 2018

Revise Date: 18 February 2019

Accept Date: 16 March 2019

Keywords:

Beams' impact
Concentrated mass
Kinetic energy
Plastic hinge
Capacity diagram
Secondary impact
Steel structure
Progressive collapse

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.159652.1727

*Corresponding author: Gholamreza Abdollahzadeh
Email address: abdollahzadeh@nit.ac.ir

بررسی تحلیلی اثرات ضربه تیرها در طبقات سازه با نگرشی بر تخریب پیش رونده

قاسم گرچی بندپی^۱، غلامرضا عبدالله زاده درزی^{۲*}، علی رحمانی فیروزجانی^۳

۱- دانشجوی مقطع دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

با مرور مطالعات پیشین در حوزه فروریزش سقف سازه، جای خالی یک روش تحلیلی کارآمد که بتواند مکانیزم ضربه و نحوه گسترش خرابی در تیرها را به نحو مطلوبی مدلسازی نماید احساس می شود. لذا در این مطالعه به بررسی تحلیلی اثرات ضربه تیرها پرداخته شده است. بدین منظور در ابتدا اثرات برخورد جرم معادل متمرکز ناشی از تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی مورد بررسی قرار می گیرد و با فرض رفتار خطی و با استفاده از روابط انرژی جنبشی جرم و انرژی پتانسیل تیر تحتانی، مقدار لنگر وارده ناشی از ضربه در محل ماکزیمم لنگر که وسط دهانه می باشد محاسبه گردید و سپس با در نظر گرفتن یک سازه فولادی متعارف، نتایج محاسبات نشان می دهد که لنگر وارده از لنگر حد تسلیم تیر تحتانی بیش از هشت برابر بزرگتر می باشد و لذا در وسط دهانه لولای پلاستیک بوجود خواهد آمد. در ادامه با استفاده از معادله حرکت، تابع سرعت در نقاط مختلف تیر تحتانی محاسبه گردیده است و با استفاده از رابطه تعادل لنگر در محل وسط دهانه و یک نقطه دلخواه که آن نقطه در واقع محل لولای فرضی است که به صورت موج در حال رسیدن به تکیه گاه ها می باشد، زمان رسیدن لولا به تکیه گاه ها بدست آمده است و همچنین تابع تغییر مکان در نقاط مختلف تیر تحتانی محاسبه شده است. سپس نمودارها و جداول مربوطه ترسیم گردیده و این نمودارها با نمودار ظرفیت نهایی تغییر مکان تیر تحتانی مقایسه گردید که نتایج نشان می دهد تیر تحتانی تحت اثر ضربه ناشی از جرم معادل تیر فوقانی دچار تخریب خواهد شد و گسترش خرابی به تیرهای زیرین رخ خواهد داد. در پایان جهت افزایش دقت مدلسازی ضربه تیر فوقانی به تحتانی، اثرات ضربه ثانویه طرفین تیر فوقانی مدلسازی و محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد ضربه ثانویه نسبت به ضربه اولیه جرم معادل تیر فوقانی اثر ناچیزی در پاسخهای تیر تحتانی دارد.

کلمات کلیدی: ضربه تیر، جرم معادل، انرژی جنبشی و پتانسیل، لولای پلاستیک، نمودار ظرفیت، ضربه ثانویه، سازه فولادی، تخریب پیش رونده.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.159652.1727	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.159652.1727	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۷/۱۲/۲۵	۱۳۹۷/۱۲/۲۵	۱۳۹۷/۱۱/۲۹	۱۳۹۷/۰۹/۱۲
			غلامرضا عبدالله زاده درزی		*نویسنده مسئول:	
			abdollahzadeh@nit.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

عموما سازه‌ها براساس بارهای متعارف از جمله بار مرده، زنده، برف، باد و زلزله طراحی می‌شوند و بارهای غیرمتعارف نظیر ضربه، آتش و انفجار در تحلیل و طراحی سازه لحاظ نمی‌گردد. از اینرو در زمان مواجهه سازه با اینگونه بارهای غیرمتعارف، تخریب و خسارت فراوانی رخ خواهد داد. نمونه‌ای از اینگونه خرابی در سال‌های اخیر در برخی سازه‌ها در نقاط مختلف دنیا از جمله برج‌های دوقلوی تجارت جهانی در سال ۲۰۰۱ در اثر برخورد هواپیما به سازه و به دنبال آن انفجار و آتش سوزی می‌باشد. از دیگر موارد تخریب سازه در اثر بارهای غیرمتعارف می‌توان به تخریب کلی ساختمان پلاسکو در ایران در سال ۲۰۱۷ اشاره نمود که بخشی از این سازه در اثر آتش سوزی و به تبع آن از دست رفتن مقاومت المان‌های سازه‌ای سقف، دچار خرابی پیش‌رونده از نوع پن‌کیکی شده است. در خرابی‌های از نوع پن‌کیکی که با از دست رفتن ظرفیت باربری سیستم سقف سازه خواهد بود، کنترل و بررسی خیز تیرهای اصلی سقف در اثر عوامل خارجی از جمله ضربه و آتش سوزی بسیار مهم می‌باشد. در حوزه اعمال بار ضربه بر روی تیرهای ساختمانی مطالعاتی به صورت تجربی و عددی صورت گرفته است لذا انجام یک پژوهش در خصوص اثرات ضربه بر روی تیرها با یک روش تحلیلی کارآمد بسیار مفید خواهد بود. در سال ۲۰۰۹ ولایسیس و همکاران در مطالعه‌ای مرتبط با این پژوهش اثرات ضربه تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی را با دو رویکرد ضربه کاملاً پلاستیک و ضربه کاملاً صلب در نظر گرفته‌اند. در ضربه کاملاً پلاستیک فرض شده است که دوتیر پس از ضربه بصورت کامل در تمام نقاط با هم در تماس می‌باشند. تصمیم‌گیری در خصوص گسترش خرابی به طبقات زیرین با مقایسه درصدی از انرژی جنبشی که از تیر متحرک به تیر ساکن منتقل می‌شود، انجام شده است. همچنین آنها اثرات اتلاف انرژی در ضربه کاملاً پلاستیک را نیز در نظر گرفته‌اند [1]. یوان و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل مکانیکی با استفاده از سیستم جرم، فنر و میراگر را پیشنهاد دادند که این مدل می‌تواند اثرات ضربه طبقات در سناریو پن‌کیکی خرابی پیش‌رونده را مدلسازی نماید. آنها به جهت تحلیل مدهای مختلف خرابی، تیرها و ستون‌ها را جداگانه در نظر گرفتند. مطالعه پارامتریک آنها نشان داد که فرآیند خرابی پیش‌رونده شامل مکانیزم‌های پیچیده‌ای است اما این مدل پیشنهادی یک ابزار عددی مناسبی جهت تخمین رفتار کلی خرابی ناشی از چند تحریک اولیه می‌باشد. همچنین آنها خرابی‌های اتصال تیر به تیر و اتصال تیر به ستون را به عنوان عامل اولیه تخریب مورد بررسی قرار دادند [2]. یلماز و همکاران در سال ۲۰۱۴ به منظور بررسی اثرات نوع بارگذاری بر روی تیر بتنی پژوهشی تجربی انجام دادند. نمونه‌های تیر با طرح اختلاط و هندسه یکسان تحت آزمایشات بارگذاری استاتیکی سه نقطه‌ای و بارگذاری ضربه‌ای جرم افتان با سرعت پایین قرار گرفتند. رفتار بار-جابجایی، ظرفیت اتلاف انرژی، سختی و مدهای شکست نمونه‌های تیر بتنی در این پژوهش مورد بحث قرار گرفت. همچنین آنها یک مدل اجزای محدود در نرم افزار ANSYS ارائه نمودند و تحلیل‌های اجزای محدود را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نوع بارگذاری و نرخ آن تاثیر بسزایی بر حداکثر بار ضربه وارده، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی دارد و نتایج عددی به دست‌آمده از مدل‌های نرم‌افزاری آنها با نتایج آزمایشگاهی تطابق کامل داشت [3]. سونوونگ و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۵ به مدلسازی تحلیلی تاثیر سقف سازه بر مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده در قاب‌های خمشی فولادی پرداختند. برای این منظور، رفتار سقف دو دهانه با تحلیل اجزای محدود غیرخطی در اثر حذف ستون مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس تابع تغییرشکل سقف از تحلیل‌های عددی تعیین شده و در محاسبه سهم جذب انرژی سقف مورد استفاده قرار گرفته است. مدل پیشنهادی آنها را می‌توان در تحلیل‌های پیشرفته تخریب پیش‌رونده بر پایه انرژی برای قاب‌های خمشی فولادی مورد استفاده قرار داد [4]. عباس و همکاران در سال ۲۰۰۴ به مطالعه پاسخ غیرخطی تیر بتنی تحت اثر بار ضربه پرداختند. در این پژوهش تحلیل سه بعدی اجزا محدود غیرخطی تیر بتن مسلح تحت اثر بارگذاری ضربه‌ای انجام شده است. همچنین آنها تیر بتنی را با دو کرنش سنج در دو طرف سطح مدل سازی نمودند که این مدل قادر به پیش بینی ترک خوردگی بتن و تسلیم فولاد می‌باشد [5]. در همین زمینه علی احمد در سال ۲۰۱۴ نیز رفتار دینامیکی تیر بتن مسلح تحت اثر ارتعاش ناشی از ضربه را توسط تحلیل سه بعدی اجزا محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام دادند. ایشان سی مدل مختلف از تیر را با تغییر پارامترهایی از جمله میرایی و سختی تیر تحلیل نمودند و مدل بهینه شده در برابر ضربه را در این پژوهش معرفی

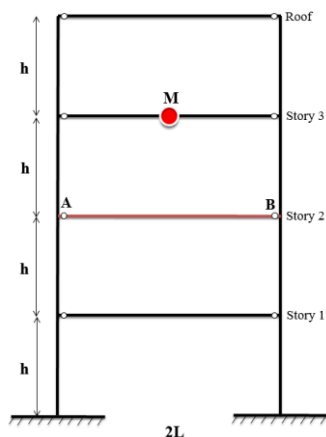
نمودند [6]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی به تحلیل دینامیکی مکانیزم خرابی دال بتن مسلح تحت اثر بار انفجار پرداختند. آنها جهت انجام این مطالعه، دال بتنی به ابعاد 1000 mm X 1000 mm X 400 mm را در نظر گرفتند و با مدلسازی

کامپیوتری در نرم افزار LS-DYNA، نتایج این مطالعه عددی را با مطالعات تجربی موجود مورد مقایسه قرار دادند. این پژوهش به نحو مطلوبی قادر به تخمین مکانیزم خرابی دال‌ها در اثر انفجار خواهد بود و نتایج نشان داد مکانیزم تخریب با تغییر حجم مواد منفجره تغییر خواهد کرد [7]. دلپوم و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مطالعه سازه‌های در دامنه شیب پرداختند که تحت اثرات پرتاب سنگ از نقاط بالا دست می‌باشند. برای این قبیل سازه‌ها المان‌های حفاظتی جهت جلوگیری از برخورد مستقیم سنگ به سازه وجود دارد که هدف از مطالعه آنها بررسی واکنش سازه‌ای این المان‌ها با کمک مدل سه بعدی اجزا محدود و با سیستم جرم و فنر می‌باشد که نتایج مطالعات آنها انطباق خوبی با نتایج مطالعات تجربی در این حوزه داشته است [8]. اردم و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی به تحلیل غیرخطی دال بتن مسلح تحت اثر بار ضربه پرداختند. بدین منظور با استفاده از نرم افزار آباکوس سه نوع دال با ضخامت‌های متفاوت و با شرایط تکیه گاهی متفاوت را مدلسازی نمودند و تحت اثر بار ضربه ای متمرکز در مرکز دال مورد بررسی قرار دادند و شتاب، سرعت و تغییر مکان را در نقاطی از پیش تعیین شده از دال تعیین نمودند و با حد ظرفیت دال مورد مقایسه قرار دادند [9]. در همین راستا زین الدین و همکاران در سال ۲۰۰۷ مطالعه ای تجربی در این خصوص انجام دادند و رفتار دینامیکی دال را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثرات شرایط هندسی متفاوت دال، پوشش های متفاوت بتن، تغییر چیدمان میلگردها و نیز تغییر در ارتفاع سقوط در نظر گرفته شده است [10]. سیف الهی و همکاران در سال ۱۳۹۶ مطالعه‌ای در خصوص بررسی عددی رفتار دال های بتن آرمه تحت اثر انفجار انجام دادند. در این پژوهش از نرم افزار المان محدود ال اس- داینا (LS-DYNA) که توانایی مدل سازی انفجار را داراست، استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی آنها ابعاد و شرایط تکیه گاهی، محل انفجار و میزان مواد منفجره و چگونگی آرماتورگذاری بوده است. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد مدل‌های مورد بررسی تحت انفجار نزدیک کاملاً گسیخته شده‌اند و با افزایش ضخامت خیزی که توسط نمونه‌ها تجربه شده است به شدت کاهش یافته و با وجود درصد آرماتور یکسان هرچه قطر آرماتورها کمتر و فاصله قرارگیری آنها نیز کمتر باشد، دال‌ها خیز کمتری را تجربه خواهند کرد و در صورتیکه درصد آرماتور به کار رفته در نمونه‌ها افزایش یابد، خیز حداکثری که نمونه‌ها در شرایط یکسان تجربه کرده‌اند مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شرایط تکیه گاهی از گیردار به ساده تاثیر بسزایی در گستردگی ایجاد ترک و تغییر سطح خرابی دال‌ها دارد و افزایش طول دهانه تاثیر چندانی در افزایش سطح خرابی دال‌ها نداشته است [11]. زرپرور و همکاران در سال ۱۳۹۳ در مطالعه‌ای به تخمین الگوی بار ناشی از ریزش آوار زلزله بر تیرهای فولادی پرداختند. بدین منظور آنها با محاسبه ضریب بار دینامیکی برای نمونه ای از تیرهای فولادی در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک به استخراج الگوی بار ضربه آوار تحت شرایط مختلف و در نتیجه ارایه یک الگوی بارگذاری معادل به منظور تخمین رفتار سازه در مقابل ریزش طبقات فوقانی پرداختند. در مطالعات آنها مشخص شد که پارامترهایی نظیر زمان تناوب تیر، ارتفاع سقوط و جرم آوار تاثیر بسزایی بر نتایج بدست آمده دارند، بطوریکه با افزایش زمان تناوب و جرم آوار مقدار ضریب بار دینامیکی کاهش و با افزایش ارتفاع سقوط این مقدار افزایش می‌یابد [12].

حال در این مطالعه به بررسی تحلیلی اثرات ضربه تیرها پرداخته شده است. بدین منظور در ابتدا اثرات برخورد جرم معادل متمرکز ناشی از تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با فرض رفتار خطی و با استفاده از روابط انرژی جنبشی جرم و انرژی پتانسیل تیر تحتانی، مقدار لنگر وارده ناشی از ضربه در محل ماکزیمم لنگر که وسط دهانه می‌باشد محاسبه گردید و سپس با در نظر گرفتن یک سازه فولادی متعارف به بررسی ایجاد لولای پلاستیک در وسط دهانه پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از معادله حرکت، تابع سرعت در نقاط مختلف تیر تحتانی محاسبه گردیده است و با استفاده از رابطه تعادل لنگر در محل وسط دهانه و یک نقطه دلخواه که آن نقطه در واقع محل لولای فرضی است که به صورت موج در حال رسیدن به تکیه‌گاه‌ها می‌باشد، زمان رسیدن لولا به تکیه‌گاه‌ها بدست آمده است و همچنین تابع تغییر مکان در نقاط مختلف تیر تحتانی محاسبه شده است. سپس نمودارها و جداول مربوطه ترسیم گردیده و این نمودارها با نمودار ظرفیت نهایی تغییر مکان تیر تحتانی مقایسه گردید. در پایان جهت افزایش دقت مدلسازی ضربه تیر فوقانی به تحتانی، اثرات ضربه ثانویه طرفین تیر فوقانی مدلسازی و محاسبه گردید.

۲- رابطه سازی

در این مطالعه جهت بررسی رفتار تیر دو بعدی تحتانی در برابر ضربه تیر فوقانی، فرض شده است که کل جرم تیر فوقانی در نقطه وسط آن متمرکز شده است (شکل ۱). برای بررسی و رابطه سازی مساله ابتدا حالت الاستیک برای ضربه وارده در نظر گرفته شده است و پس از مشاهده پاسخ رفتار تیر تحتانی در خصوص الاستیک یا پلاستیک بودن مساله تصمیم‌گیری خواهد شد.



شکل ۱: تصویر قاب مورد مطالعه.

۱-۲- پاسخ الاستیک

در این حالت، رفتار مصالح تیر تحتانی الاستیک در نظر گرفته شده است. سرعت جرم متمرکز معادل تیر فوقانی در لحظه برخورد به تیر تحتانی با استفاده از روابط دینامیک به صورت زیر خواهد بود [1]:

$$V_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

که در این رابطه g شتاب جاذبه زمین و h ارتفاع طبقه می‌باشد. انرژی جنبشی جرم متمرکز M به صورت زیر می‌باشد:

$$E_K = \frac{1}{2} M V_0^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} V_0^2 \quad (2)$$

که در آن W وزن تیر فوقانی می‌باشد. انرژی تغییر شکل تیر تحتانی برابر است با:

$$E_P = \int_0^y P du = \int_0^{y_{\max}} K u du = \frac{1}{2} K y_{\max}^2 \quad (3)$$

در این رابطه K سختی خمشی تیر و y_{\max} ماکزیمم تغییر مکان تیر تحتانی واقع در نقطه وسط تیر و P نیروی معادل ضربه جرم می‌باشد. از تساوی انرژی جنبشی جرم M و انرژی تغییر شکل تیر تحتانی، رابطه زیر برای ماکزیمم تغییر مکان تیر تحتانی بدست خواهد آمد:

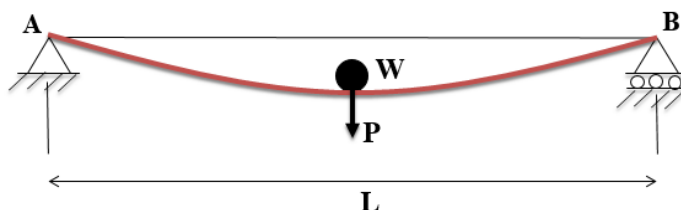
$$E_K = E_P \Rightarrow \frac{1}{2} K y_{\max}^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} V_0^2 \Rightarrow y_{\max} = V_0 \sqrt{\frac{W}{Kg}} = \sqrt{\frac{2E_K}{K}} \quad (4)$$

ماکزیمم نیروی ضربه برابر است با:

$$P_{\max} = K y_{\max} = V_0 \sqrt{\frac{KW}{g}} = \sqrt{2KE_K} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن کار اضافه انجام شده توسط وزن W که در اثر تغییرشکل تیر صورت می‌پذیرد (شکل ۲)، انرژی جذب شده برابر است با:

$$E_K + W y_{\max} = \frac{1}{2} \frac{W}{g} V_0^2 + W y_{\max} \quad (6)$$



شکل ۲: خیز تیر تحتانی پس از برخورد وزن معادل تیر فوقانی.

از تساوی انرژی جذب شده (رابطه ۶) و کار حاصل از تغییرشکل الاستیک (رابطه ۳)، رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$E_K + W y_{\max} = \frac{1}{2} K y_{\max}^2 \quad (7)$$

یا به عبارتی دیگر:

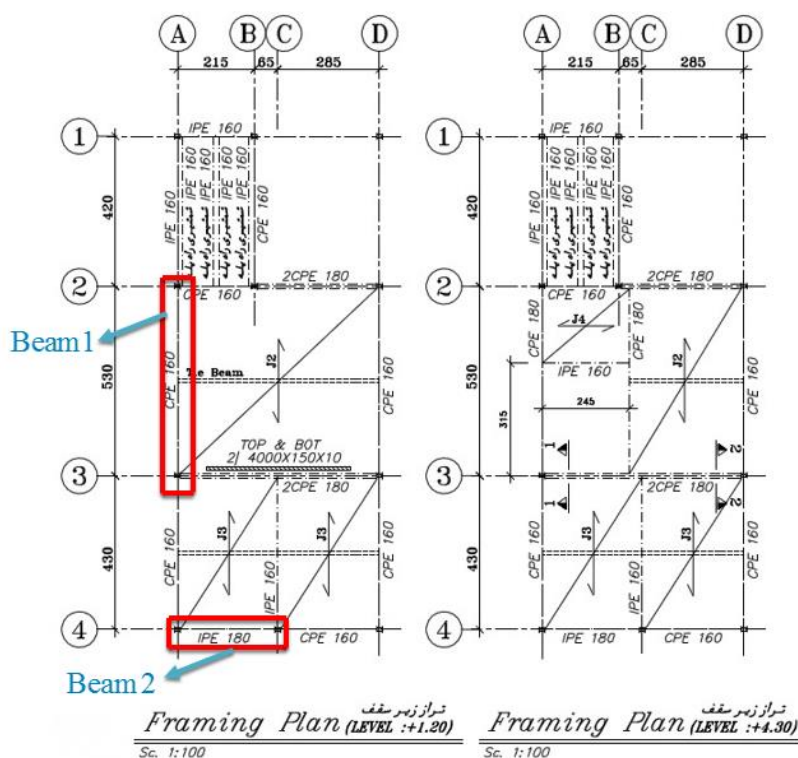
$$y_{\max} = \frac{W}{K} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2KE_K}{W^2}} \right) = y_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2E_K}{W y_{st}}} \right) \quad (8)$$

که در آن y_{st} تغییرشکل الاستیک تحت وزن W می‌باشد. در رابطه فوق، عبارت داخل پرانتز ضریب تقویت دینامیکی می‌باشد به طوری که در زمان اعمال بار ناگهانی، مقدار آن بزرگتر از مقدار واقعی خواهد شد و بزرگ نمایی صورت می‌گیرد. به طور مثال، اگر در رابطه ۸ مقدار سرعت اولیه V_0 برابر صفر منظور شود، رابطه زیر نشان می‌دهد که در صورت اعمال بار ناگهانی به میزان دو برابر تنش و تغییرمکان بیشتر نسبت به بار تدریجی بوجود خواهد آمد.

$$V_0 = 0 \rightarrow E_K = 0 \Rightarrow \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2E_K}{W y_{st}}} \right) = 2 \Rightarrow y_{\max} = 2 y_{st} \quad (9)$$

لازم به ذکر است سختی تیر برای بار استاتیکی و دینامیکی یکسان فرض شده است و همچنین از جرم تیر تحتانی صرف‌نظر شده است و نیز تغییرشکل تیر بدون اتلاف انرژی رخ می‌دهد و انرژی از حالت انرژی جنبشی جرم به انرژی کرنشی تیر تغییر می‌کند. این فرضیات محافظ کارانه است و برای نشان دادن مقاومت در برابر ضربه کافی به نظر می‌رسد.

به جهت بررسی موردی این مطالعه، یک ساختمان ۵ طبقه با اسکلت فولادی در نظر گرفته می‌شود. کلیه تیرآهن‌های مصرفی از نوع St37 بوده و $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشد. ارتفاع طبقات $h = 3.1 \text{ m}$ می‌باشد. مشخصات تیرهای مورد مطالعه که Beam1 و Beam2 می‌باشد، در شکل ۳ و پیوست نشان داده شده است. این تیرها در دو حالت دو سر مفصل و دو سر گیردار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳: تصویری از تیرهای مورد مطالعه در پلان.

نیروی معادل ضربه پس از ساده سازی به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$P = K \cdot y_{\max} = K \cdot y_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2E_K}{W y_{st}}} \right) \Rightarrow P = K \cdot \frac{W}{K} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2E_K}{W y_{st}}} \right) = W \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2KE_K}{W^2}} \right) \quad (10)$$

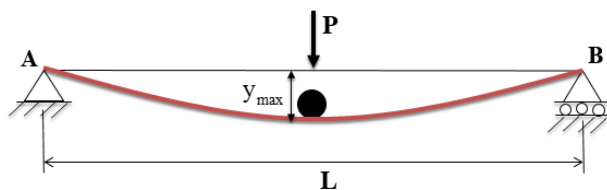
$$\Rightarrow P = W \left(1 + \sqrt{1 + \frac{KV_0^2}{gW}} \right)$$

در حالت تیر دو سر مفصل ماکزیمم لنگر برابر است با (شکل ۴):

$$M_{\max} = \frac{PL}{4} = \frac{WL}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{KV_0^2}{gW}} \right) = \frac{WL}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{48EI V_0^2}{gWL^3}} \right) = \frac{MgL}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{48EI V_0^2}{g^2 ML^3}} \right) \quad (11)$$

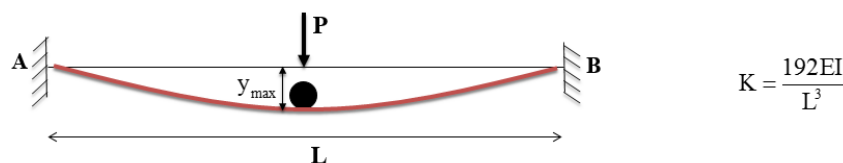
در حالت تیر دو سر گیردار ماکزیمم لنگر برابر است با (شکل ۵):

$$M_{\max} = \frac{PL}{8} = \frac{WL}{8} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{KV_0^2}{gW}} \right) = \frac{WL}{8} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{192EI V_0^2}{gWL^3}} \right) = \frac{MgL}{8} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{192EI V_0^2}{g^2 ML^3}} \right) \quad (12)$$



$$K = \frac{48EI}{L^3}$$

شکل ۴: تصویری خیز و سختی خمشی تیر دو سر مفصل.



شکل ۵: تصویر خیز و سختی خمشی تیر دو سر گیردار.

با توجه به مقادیر فوق، لنگر وارده تیرها در حالت دو سر مفصل برابر است با:

$$M_{\max} = \frac{MgL}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{48EI V_0^2}{g^2 ML^3}} \right)$$

$$M_{\max} = 3.346 \times 10^4 \text{ kg.m} \quad \text{for Beam 1}$$

$$M_{\max} = 3.12 \times 10^4 \text{ kg.m} \quad \text{for Beam 2}$$

و همچنین لنگر وارده تیرها در حالت دو سر گیردار برابر است با:

$$M_{\max} = \frac{MgL}{8} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{192EI V_0^2}{g^2 ML^3}} \right)$$

$$M_{\max} = 3.29 \times 10^4 \text{ kg.m} \quad \text{for Beam 1}$$

$$M_{\max} = 3.101 \times 10^4 \text{ kg.m} \quad \text{for Beam 2}$$

با توجه به جدول ۱، مقادیر لنگر وارده در هر دو حالت دو سر مفصل و دو سر گیردار بیش از ۸ برابر لنگر مقاوم می‌باشد. در نتیجه مقطع در وسط دهانه قطعا به حد پلاستیک خواهد رسید. در تیر دو سر مفصل با ایجاد لولای پلاستیک در وسط دهانه، تیر مکانیزم خواهد شد و از حیض ارتفاع خارج می‌شود اما در تیر دو سر گیردار تا زمان رسیدن تکیه گاه‌ها به حد پلاستیک، تیر دارای ظرفیت باربری می‌باشد. لذا تحلیل و بررسی رفتار تیر دو سر گیردار پس از ایجاد لولای پلاستیک در وسط دهانه و قبل از رسیدن تکیه گاه‌ها به حد پلاستیک بسیار لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

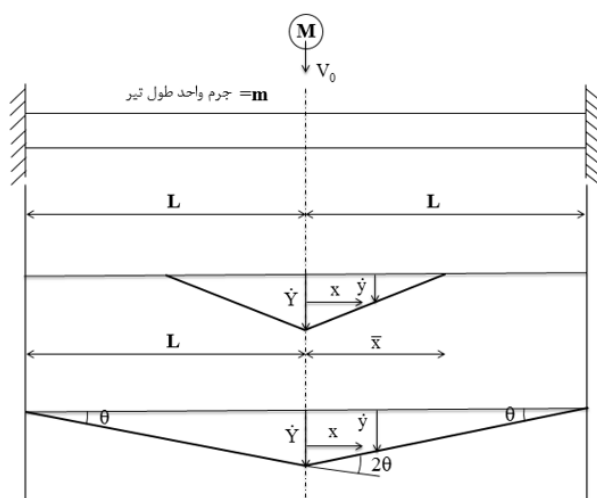
جدول ۱: مقایسه نسبت لنگر وارده با لنگر مقاوم در Beam 1 و Beam 2 در دو حالت دوسر گیردار و دوسر مفصل.

شرایط تکیه گاهی	نوع تیر	M_{\max} (kg.m)	M_y (kg.m)	M_{\max} / M_y
تیر دو سر مفصل	Beam 1	33460	3768	8.88
	Beam 2	31200	3504	8.90
تیر دو سر گیردار	Beam 1	32900	3768	8.73
	Beam 2	31010	3504	8.85

۲-۲- پاسخ پلاستیک تیر دو سر گیردار تحت بار ضربه جرم (M)

به جهت بررسی رفتار تیر دو سر گیردار پس از ایجاد لولای پلاستیک در وسط دهانه، دو مود حرکت برای تیر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶). مود اول حرکت پس از ایجاد لولای پلاستیک وسط تا زمان رسیدن لولا به تکیه گاه‌ها را شامل می‌شود و مود دوم حرکت از زمان ایجاد لولای پلاستیک تکیه گاه‌ها تا زمان انهدام تیر را شامل می‌شود. در مود دوم حرکت، دو لولای پلاستیک در تکیه گاه‌ها و لولای پلاستیک وسط تیر ثابت باقی می‌ماند و حرکت تیر و جرم آنقدر ادامه یافته تا کل انرژی جنبشی باقیمانده در جرم و تیر به صورت کار پلاستیک میرا شود. در شکل ۶، \bar{x} موقعیت مکانی لولای متحرک می‌باشد که وابسته به زمان است. همچنین در زمان برخورد اولیه، وسط تیر با سرعت ثابت V_0 حرکت می‌کند در حالیکه سایر قسمت‌ها ساکن می‌باشند. لازم به ذکر است در تحلیل دینامیکی اثرات ضربه،

با توجه به اینکه زمان اعمال بار بسیار کوتاه می باشد، از اثرات نیروی سختی و میرایی به دلیل کوچک بودن آن در مقایسه با نیروی اینرسی صرف نظر می شود.



$$\dot{Y} = \frac{dY}{dt} \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt} \quad \begin{matrix} \text{تغییر مکان} = Y \\ \text{سرعت} = \dot{Y} \end{matrix}$$

نمودار سرعت عرضی برای **مود اول** حرکت $0 \leq t \leq \bar{t}$

نمودار سرعت عرضی برای **مود دوم** حرکت $\bar{t} \leq t \leq T$

شکل ۶: تصویر مود اول و دوم حرکت در تیر دو سر گیردار پس از ایجاد لولای پلاستیک وسط.

در مود اول حرکت نمودار سرعت تیر به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{Y}(1 - x/\bar{x}) & 0 \leq x \leq \bar{x} \\ \dot{y} = 0 & \bar{x} \leq x \leq L \end{cases} \quad (13)$$

نیروی برش Q در محل لولاهای متحرک $x = \pm \bar{x}$ برابر صفر می باشد. از تعادل قسمت میانی تیر در حدفاصل دو لولای متحرک رابطه زیر را می توان نوشت:

$$M\ddot{Y} + 2 \int_0^{\bar{x}} m \ddot{y} dx = 0 \Rightarrow M\ddot{Y} + 2m \int_0^{\bar{x}} [\ddot{Y}(1 - x/\bar{x}) + \dot{Y}x\dot{\bar{x}}/\bar{x}^2] dx = 0 \Rightarrow M\ddot{Y} + m(\ddot{Y}\bar{x} + \dot{Y}\dot{\bar{x}}) = 0 \quad (14)$$

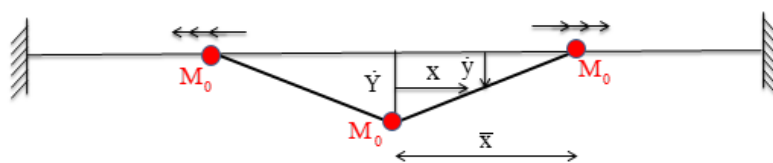
با در نظر گرفتن شرایط اولیه در زمان $t = 0$ ، $\dot{\bar{x}} = 0$ و $\dot{Y} = V_0$ می باشد. با اعمال این شرایط در رابطه ۱۴، مقدار سرعت تیر در وسط دهانه بدست خواهد آمد:

$$M\ddot{Y} + m \frac{d}{dt}(\dot{Y}\bar{x}) = 0 \Rightarrow M\ddot{Y}dt = -m\dot{Y}\dot{\bar{x}} \Rightarrow \int_0^t M\ddot{Y}dt = -m\dot{Y}\bar{x} \Rightarrow M\dot{Y}|_0^t = -m\dot{Y}\bar{x} \quad (15)$$

$$M\dot{Y} - MV_0 = -m\dot{Y}\bar{x} \Rightarrow M\dot{Y} + m\dot{Y}\bar{x} = MV_0 \Rightarrow \dot{Y} = \frac{V_0}{1 + m\bar{x}/M}$$

از رابطه تعادل لنگر در قسمت $0 \leq x \leq \bar{x}$ با لولاهای پلاستیکی در $x = 0$ و $x = \bar{x}$ حول مرکز تیر نتیجه می شود (شکل ۷):

$$2M_0 - \int_0^{\bar{x}} m \ddot{y} x dx = 0 \Rightarrow 2M_0 = \int_0^{\bar{x}} m [\ddot{Y}(1 - x/\bar{x}) + \dot{Y}x\dot{\bar{x}}/\bar{x}^2] x dx \Rightarrow 2M_0 = m(\ddot{Y}\bar{x}^2/6 + \dot{Y}\dot{\bar{x}}\bar{x}/3) \quad (16)$$



شکل ۷: محل ایجاد لولای وسط و لولای متحرکی که به سمت تکیه‌گاه‌ها در حال انتشار است.

با استفاده از قوانین ریاضی، رابطه ۱۶ را می‌توان به فرم زیر نوشت و پس از ساده سازی، رابطه زمان-فاصله برای لولاهای متحرک به صورت زیر بدست می‌آید:

$$2M_0 = m \left(\ddot{Y}\bar{x}^2 / 6 + \dot{Y}\dot{\bar{x}}\bar{x} / 3 \right) \Rightarrow \frac{12M_0}{m} = \left(\ddot{Y}\bar{x}^2 + 2\dot{Y}\dot{\bar{x}}\bar{x} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} (\dot{Y}\bar{x}^2) = 12M_0 / m \Rightarrow \int_0^t \frac{12M_0}{m} dt = \dot{Y}\bar{x}^2 \Rightarrow \frac{12M_0}{m} t \Big|_0^t = \dot{Y}\bar{x}^2 \quad (17)$$

$$\frac{12M_0}{m} t = \dot{Y}\bar{x}^2 \Rightarrow \boxed{t = \frac{m\dot{Y}\bar{x}^2}{12M_0}}$$

با اعمال رابطه ۱۵ در رابطه ۱۷، معادله مرتبه دوم زیر بدست خواهد آمد:

$$t = \frac{m\bar{x}^2}{12M_0} \times \frac{MV_0}{M + m\bar{x}} = \frac{m\bar{x}^2 MV_0}{12M_0 (M + m\bar{x})} \Rightarrow mMV_0\bar{x}^2 - 12M_0 t m\bar{x} - 12M_0 t M = 0 \quad (18)$$

از حل معادله فوق، دو ریشه زیر بدست خواهد آمد که ریشه قابل قبول آن، \bar{x}_1 می‌باشد:

$$\bar{x} = \begin{cases} \bar{x}_1 = \frac{2\sqrt{3}\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)} + 6M_0 m t}{MV_0 m} \\ \bar{x}_2 = -\frac{2\sqrt{3}\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)} - 6M_0 m t}{MV_0 m} \end{cases} \quad (19)$$

سرعت لولاهای پلاستیکی متحرک برابر است با:

$$\dot{\bar{x}} = \frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{d\bar{x}_1}{dt} = \frac{6M_0 m + \frac{\sqrt{3} [3M_0^2 m^2 t + M_0 m (V_0 M^2 + 3M_0 m t)]}{\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)}}}{MV_0 m} \quad (20)$$

با توجه به شکل ۷، تغییر مکان عرضی در محل x تا زمان $t(x)$ صفر می‌باشد. بنابراین تغییر مکان عرضی در محل x برای زمان $t \geq t(x)$ برابر است با:

$$y = \int_{t(x)}^t \dot{y} dt \quad (21)$$

با توجه به $\dot{\bar{x}} = \frac{d\bar{x}}{dt} \Rightarrow dt = \frac{d\bar{x}}{\dot{\bar{x}}}$ و $\dot{y} = \dot{Y}(1 - x/\bar{x})$ ، معادله فوق به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$y(x) = \int \frac{\dot{y} d\bar{x}}{\dot{\bar{x}}} \Rightarrow y = \int \frac{V_0(1 - x/\bar{x})}{(1 + m\bar{x}/M)} \times \frac{MV_0 m}{6M_0 m + \frac{\sqrt{3} [3M_0^2 m^2 t + M_0 m (V_0 M^2 + 3M_0 m t)]}{\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)}}} d\bar{x} \quad (22)$$

از حل انتگرال فوق، رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$y_1(x) = \frac{MV_0^2 m}{6M_0 m + \frac{\sqrt{3} [3M_0^2 m^2 t + M_0 m (V_0 M^2 + 3M_0 m t)]}{\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)}}} \times \left(\frac{\ln\left(\frac{M + m\bar{x}}{m}\right)(M + mx)}{m} - x \ln \bar{x} - \frac{\ln\left(\frac{M + mx}{m}\right)(M + mx)}{m} + x \ln x \right) \quad (23)$$

که در آن $\bar{x} = \frac{2\sqrt{3} \sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)} + 6M_0 m}{MV_0 m}$ می باشد. مود اول حرکت با رسیدن لولاهای پلاستیک متحرک به

تکیه گاهها کامل می شود. بنابراین زمان رسیدن لولاهای متحرک به تکیه گاهها با استفاده از رابطه زیر و با قرار دادن $\bar{x} = L$ به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$t = \frac{m\bar{x}^2 MV_0}{12M_0(M + m\bar{x})} \Rightarrow \bar{t} = \frac{mL^2 MV_0}{12M_0(M + mL)} \quad (24)$$

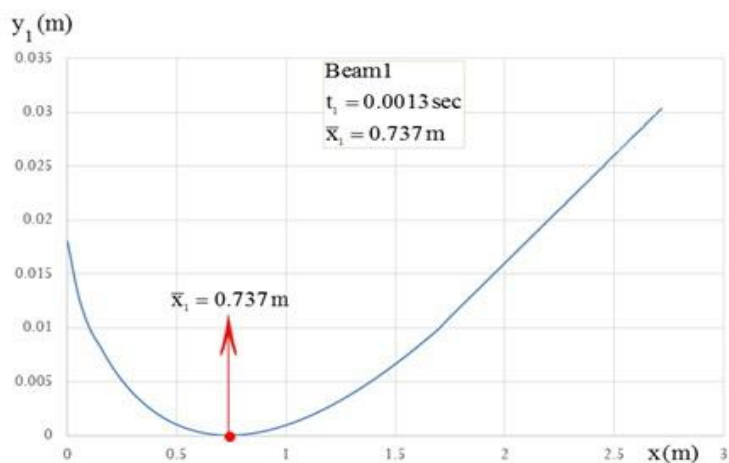
با استفاده از مشخصات داده شده هندسی و مصالح تیرهای مورد بررسی، مقادیر مکان- زمان لولاهای پلاستیک که در حال انتشار و رسیدن به تکیه گاهها است، در ۱۰ گام محاسبه شده و در جداول ۲ و ۳ مقادیر آنها آمده است. در شکل ۸ نمودار جابجایی عمودی Beam 1 مشاهده می شود. با توجه به این نمودار در گام زمانی اول و پس از گذشت 0.0013sec از لحظه برخورد، لولا پلاستیک در فاصله 0.737m از وسط دهانه واقع شده است. بلند شدگی نمودار پس از این فاصله نشان از حاکم نبودن معادلات در این نواحی می باشد. شکل ۹ محل متغییر لولای پلاستیک در Beam 1 را نشان می دهد که در حال انتشار از وسط دهانه به سمت تکیه گاهها می باشد.

جدول ۲: ارتباط مکان لولای پلاستیک با گامهای زمانی در Beam 1 ($\bar{t} = 0.013$)

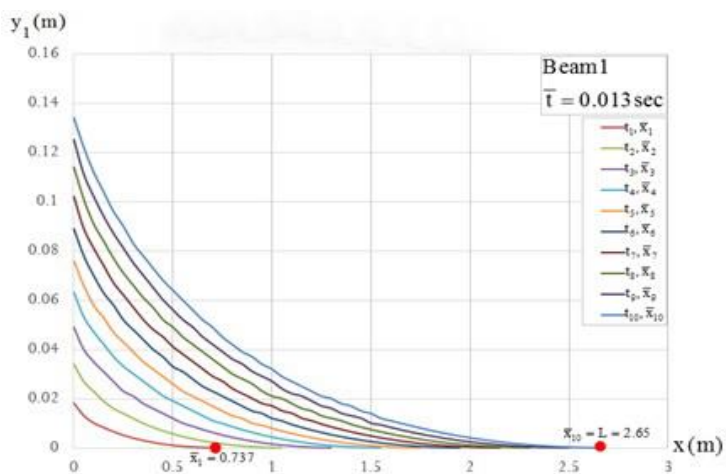
Step	Time	Distance
Step 0	$t_0=0.0000$	$\bar{X}_0 = 0.000$
Step 1	$t_1=0.0013$	$\bar{X}_1 = 0.737$
Step 2	$t_2=0.0026$	$\bar{X}_2 = 0.1.071$
Step 3	$t_3=0.0039$	$\bar{X}_3 = 1.339$
Step 4	$t_4=0.0052$	$\bar{X}_4 = 1.573$
Step 5	$t_5=0.0065$	$\bar{X}_5 = 1.786$
Step 6	$t_6=0.0078$	$\bar{X}_6 = 1.983$
Step 7	$t_7=0.0091$	$\bar{X}_7 = 2.169$
Step 8	$t_8=0.0104$	$\bar{X}_8 = 2.347$
Step 9	$t_9=0.0117$	$\bar{X}_9 = 2.516$
Step 10	$t_{10}=0.0130$	$\bar{X}_{10} = L = 2.650$

جدول ۳: ارتباط مکان لولای پلاستیک با گام‌های زمانی در Beam 2 ($\bar{t} = 0.00456$).

Step	Time	Distance
Step 0	$t_0=0.0000$	$\bar{X}_0 = 0.000$
Step 1	$t_1=0.00046$	$\bar{X}_1 = 0.386$
Step 2	$t_2=0.00091$	$\bar{X}_2 = 0.560$
Step 3	$t_3=0.00137$	$\bar{X}_3 = 0.700$
Step 4	$t_4=0.00182$	$\bar{X}_4 = 0.822$
Step 5	$t_5=0.00228$	$\bar{X}_5 = 0.933$
Step 6	$t_6=0.00273$	$\bar{X}_6 = 1.036$
Step 7	$t_7=0.00319$	$\bar{X}_7 = 1.134$
Step 8	$t_8=0.00364$	$\bar{X}_8 = 1.226$
Step 9	$t_9=0.00410$	$\bar{X}_9 = 1.315$
Step 10	$t_{10}=0.00456$	$\bar{X}_{10} = L = 1.400$

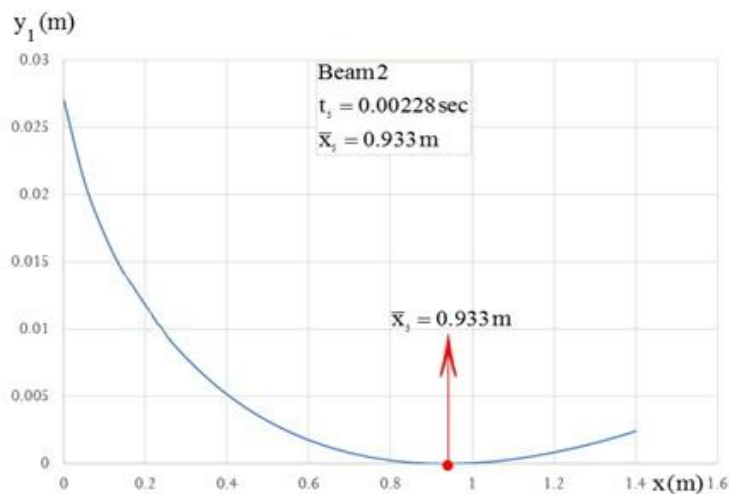


شکل ۸: تغییر مکان عمودی در گام اول زمان.

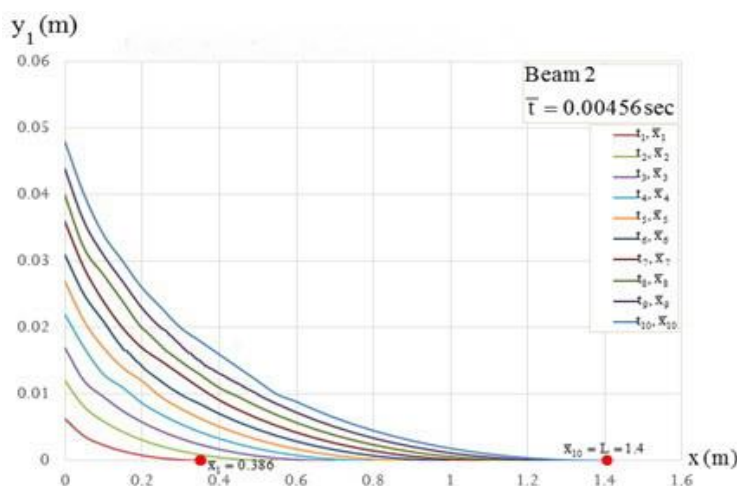


شکل ۹: نحوه انتشار لولای پلاستیک در Beam 1 به سمت تکیه‌گاه‌ها از مود اول تا دهم.

شکل ۱۰ نمودار جابجایی عمودی Beam 2 را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار در گام زمانی پنجم و پس از گذشت 0.00228 sec از لحظه برخورد، لولا پلاستیک در فاصله 0.933 m از وسط دهانه واقع شده است. شکل ۱۱ محل متغییر لولای پلاستیک در Beam 2 را نشان می‌دهد که در حال انتشار از وسط دهانه به سمت تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۰: تغییر مکان عمودی Beam 2 در گام پنجم زمان.



شکل ۱۱: نحوه انتشار لولای پلاستیک Beam 2 به سمت تکیه‌گاه‌ها از مود اول تا دهم.

از رابطه زیر پیداست که سرعت عرضی در $t = \bar{t}$ صفر نیست، لذا در این حالت:

$$\dot{Y} = \frac{V_0}{1 + m\bar{x}/M} \Rightarrow \dot{Y} = \frac{V_0}{1 + mL/M} \quad (25)$$

انرژی جنبشی کلی جرم M و تیر برابر است با:

$$E_K = \frac{1}{2} M \dot{Y}^2 + \frac{1}{2} \times mL \times \frac{2\dot{Y}^2}{3} = \frac{MV_0^2}{2(1+mL/M)^2} + \frac{mLV_0^2}{3(1+mL/M)^2} \quad (26)$$

که انرژی فوق می‌بایست در مود دوم حرکت مستهلک گردد.

مود دوم حرکت شامل بازه زمانی $\bar{t} \leq t \leq T$ می باشد. همانطور که گفته شد انرژی جنبشی باقیمانده در تیر، در پایان مود اول حرکت می بایست در مود دوم حرکت توسط لولای پلاستیک تکیه گاهها و لولای پلاستیک وسط مستهلک گردد. تغییر مکان عرضی در این مود به صورت زیر خواهد بود:

$$y_2(x) = (L-x)\theta \quad (27)$$

که در آن θ زاویه چرخش تکیه گاهها و 2θ زاویه چرخش مرکز تیر در مود دوم حرکت می باشد. تعادل انرژی در این مود به صورت زیر در می آید:

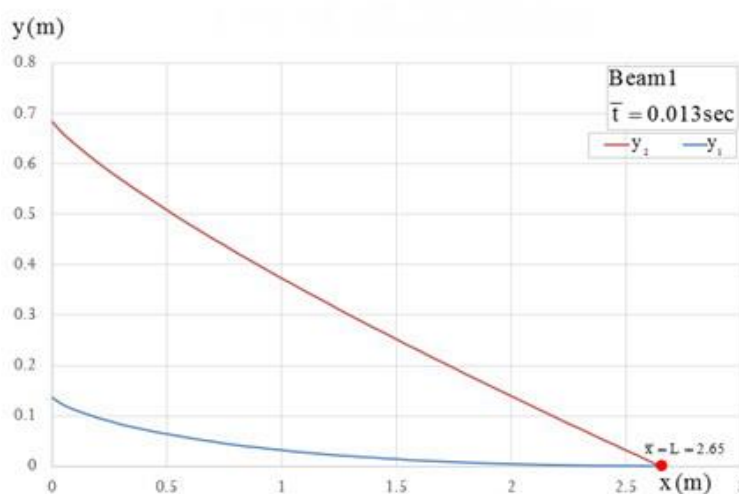
$$4M_0\theta = E_K = \frac{MV_0^2}{2(1+mL/M)^2} + \frac{mLV_0^2}{3(1+mL/M)^2} \quad (28)$$

با قرار دادن θ از رابطه ۲۷ در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$y_2(x) = \frac{(L-x)}{4M_0} \left[\frac{MV_0^2}{2(1+mL/M)^2} + \frac{mLV_0^2}{3(1+mL/M)^2} \right] \quad (29)$$

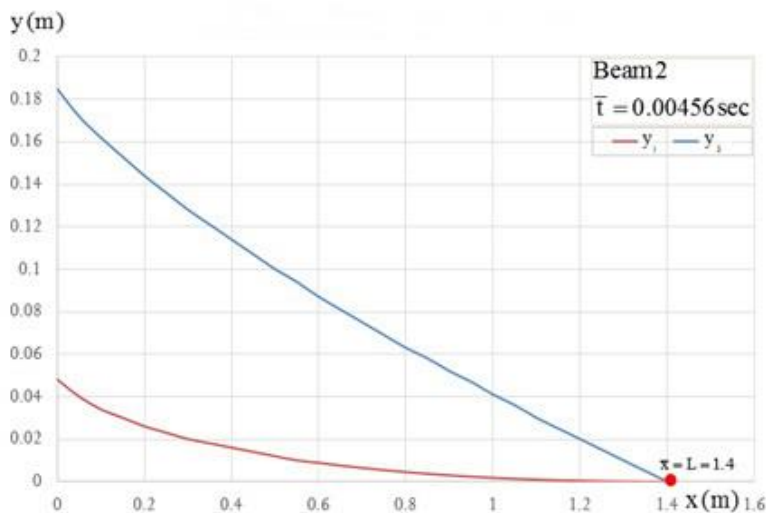
تغییر مکان دائمی و نهایی تیر از جمع روابط $y_1(x)$ در حالت $\bar{x} = L$ و $y_2(x)$ به صورت زیر بدست می آید:

$$y_t(x) = y_1(x) + y_2(x) = \frac{MV_0^2 m}{6M_0 m + \frac{\sqrt{3} [3M_0^2 m^2 t + M_0 m (V_0 M^2 + 3M_0 m t)]}{\sqrt{M_0 m t (V_0 M^2 + 3M_0 m t)}}} \times \left(\frac{\ln\left(\frac{M+mL}{m}\right)(M+mx)}{m} - x \ln L - \frac{\ln\left(\frac{M+mx}{m}\right)(M+mx)}{m} + x \ln x \right) + \frac{(L-x)}{4M_0} \left[\frac{MV_0^2}{2(1+mL/M)^2} + \frac{mLV_0^2}{3(1+mL/M)^2} \right] \quad (30)$$



شکل ۱۲: مقایسه تغییر مکان تیر در مودهای اول و دوم با مود اول در Beam 1.

شکل ۱۲ مقایسه تغییرمکان تیر Beam 1 در مودهای اول و دوم با مود اول را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان پی برد که پس از ایجاد لولای پلاستیک در تکیه‌گاه‌ها، تیر قادر خواهد بود تا ۵ برابر تغییر مکان بیشتر نسبت به مود اول را تحمل کند. شکل ۱۳ نیز مقایسه فوق را برای تیر Beam 2 نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: مقایسه تغییرمکان تیر در مودهای اول و دوم با مود اول در Beam 2.

در ادامه به جهت مطالعه و بررسی توسعه خرابی به طبقات زیرین، نیاز است که تغییرمکان تیر تحت بار ضربه با تغییرمکان ظرفیت نهایی تیر مقایسه شود. با توجه به روابط حاکم بر تحلیل سازه‌ها، معادله بین خیز و بار متمرکز وارد بر تیر به صورت زیر می‌باشد (شکل ۵):

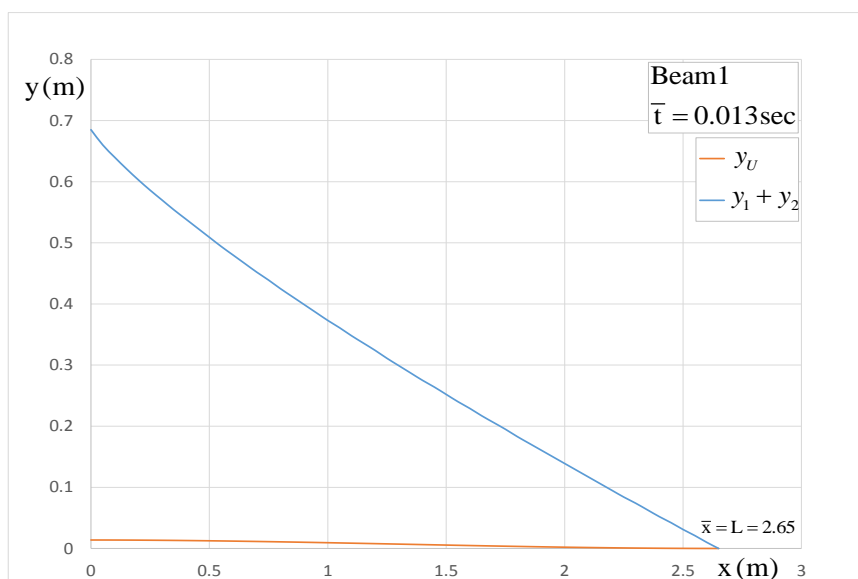
$$y(x) = \frac{Px^2}{48EI}(3L - 4x) \quad (31)$$

لنگر در دو انتهای تیر و در زیر محل اثر بار برابر $\frac{PL}{8}$ می‌باشد. در حالت حد نهایی ظرفیت تیر، می‌توان این لنگرها را برابر لنگر

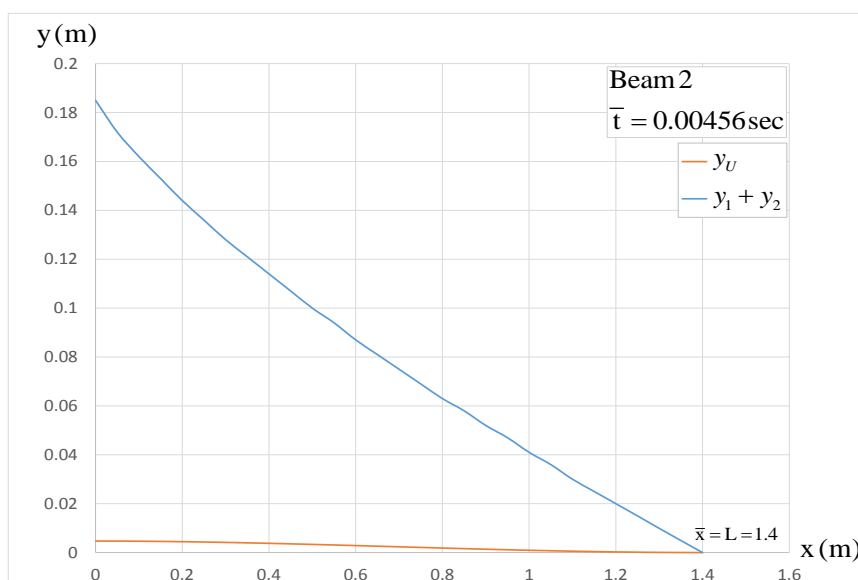
پلاستیک M_p لحاظ نمود. لذا مقدار بار متمرکز بر حسب لنگر پلاستیک برابر $P = \frac{8M_p}{L}$ می‌باشد. با جاگذاری این مقدار در معادله ۳۱، رابطه تغییرمکان ظرفیت زیر بدست خواهد آمد:

$$y_U(x) = \frac{M_p x^2}{6EIL}(3L - 4x) \quad (32)$$

به جهت بررسی گسترش خرابی تیر به طبقات زیرین، نمودار ظرفیت معادله ۳۲ با نمودار تغییرمکان مودهای اول و دوم تیرهای Beam 2 و Beam 1 مقایسه می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). لذا با جاگذاری مشخصات تیرهای Beam 1 و Beam 2 در معادله ۳۲، نمودارهای مقایسه‌ای این تیرها به شرح زیر بدست می‌آید:



شکل ۱۴: مقایسه تغییر مکان ظرفیت تیر با تغییر مکان مودهای اول و دوم در Beam 1.

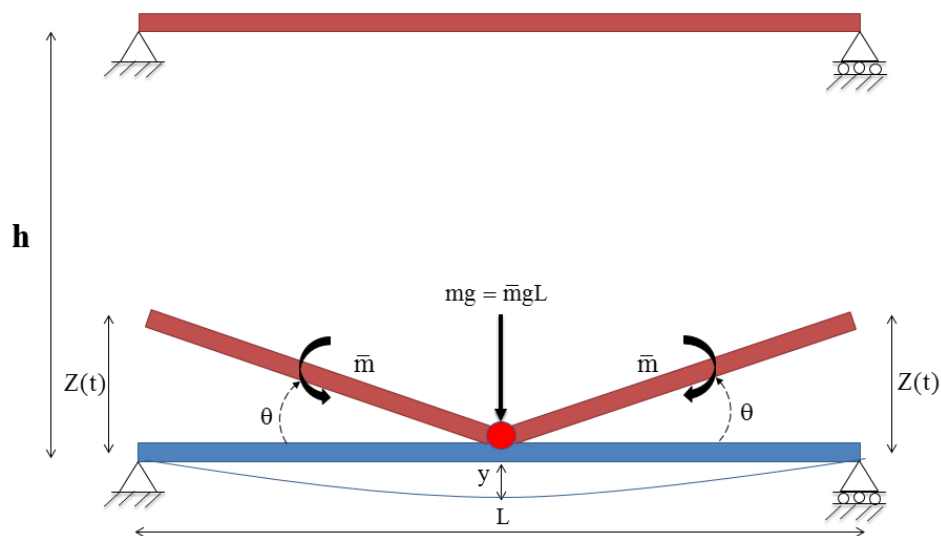


شکل ۱۵: مقایسه تغییر مکان ظرفیت تیر با تغییر مکان مودهای اول و دوم در Beam 2.

با بررسی نمودارهای ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که میزان تغییر مکان ناشی از ضربه در تیرهای تحتانی Beam 1 و Beam 2 به مراتب بیشتر از نمودار ظرفیت تغییر مکان این تیرها می‌باشد و لذا این تیرها تحت اثر بار ضربه دچار انهدام خواهد شد و خرابی آن به طبقات زیرین گسترش خواهد یافت.

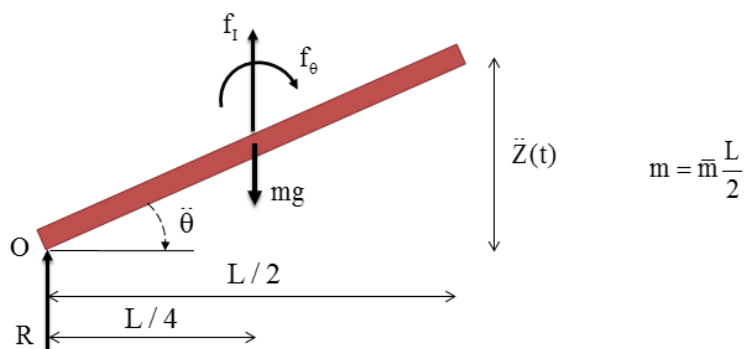
۲-۳- تحلیل اثر ضربه ثانویه تیر فوقانی

به جهت بالابردن دقت مساله، اثر ضربه ثانویه تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی در نظر گرفته شده است. بدین منظور ضربه اولیه در محل ماکزیمم تغییر مکان تیر فوقانی که در وسط دهانه هر دو تیر می‌باشد، واقع شده است. نتایج ضربه اولیه در قسمت قبل ارائه شده است. ضربه ثانویه به صورت ضربه صلب طرفین تیر فوقانی حول مرکز دهانه مطابق شکل ۱۶ روی می‌دهد. لازم به ذکر است تیر تحتانی پس از تشکیل لولای پلاستیک در وسط و در تکیه گاه‌ها به صورت تیر دو سر مفصل مدل می‌شود.



شکل ۱۶: ضربه ثانویه تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی.

به جهت ساده سازی مساله، شکل ۱۷ به صورت نیمی از تیر فوقانی مدل شده است و معادلات حاکم بر ضربه ثانویه به صورت رابطه ۳۳ می‌باشد.



شکل ۱۷: نیمی از تیر فوقانی و نیروهای وارد بر آن در ضربه ثانویه.

$$f_I = m \frac{L}{4} \ddot{\theta}$$

$$f_\theta = \frac{1}{12} m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \ddot{\theta}$$

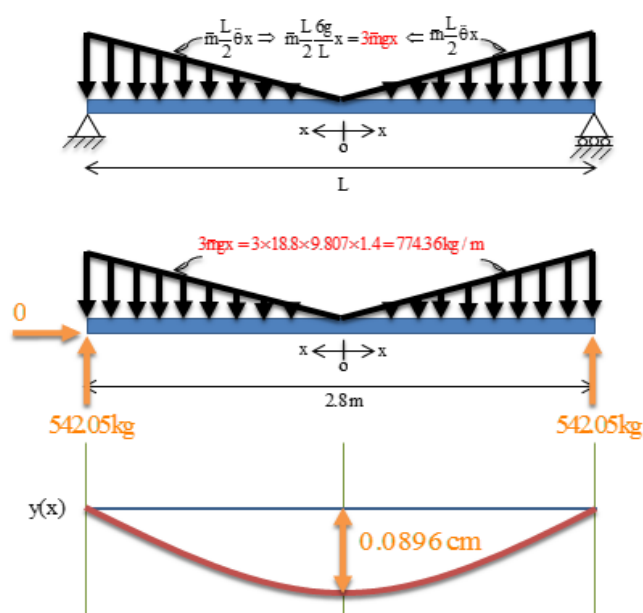
$$\sum M_O = 0$$

$$\Rightarrow f_\theta + (mg - f_I) \frac{L}{4} = 0 \Rightarrow \frac{1}{12} m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \ddot{\theta} + (mg - m \frac{L}{4} \ddot{\theta}) \frac{L}{4} = 0$$

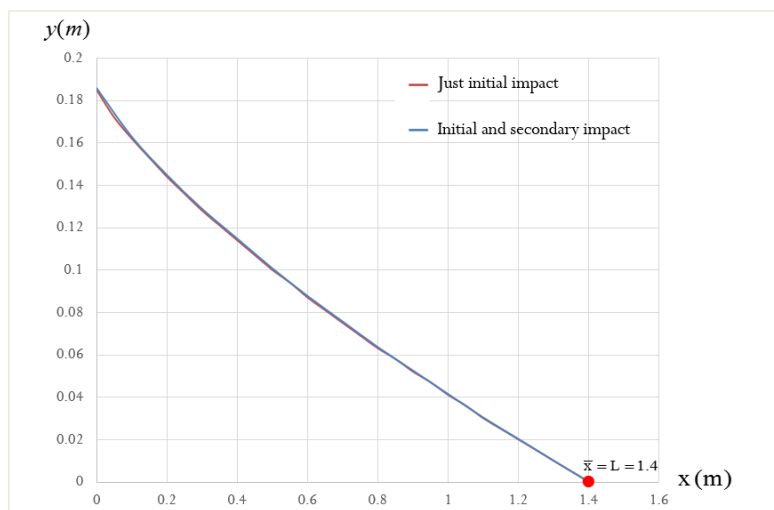
$$\Rightarrow \ddot{\theta} \left(\frac{mL^2}{48} - \frac{mL^2}{16} \right) = -\frac{mgL}{4} \Rightarrow \ddot{\theta} \left(\frac{-mL^2}{24} \right) = -\frac{mgL}{4} \Rightarrow \ddot{\theta} = \frac{6g}{L}$$

$$\ddot{Z}(t) = \ddot{\theta} \times \frac{L}{2} = \frac{6g}{L} \times \frac{L}{2} = 3g \quad (33)$$

نیروی معادل ضربه ثانویه و تحلیل های مرتبط به آن برای تیر Beam2 در شکل ۱۸ نشان داده شده است. شکل ۱۹ نشان می دهد تغییر مکان در ضربه ثانویه در مقایسه با ضربه اولیه مقدار کمی دارد.



شکل ۱۸: تحلیل ضربه ثانویه در تیر Beam2.



شکل ۱۹: تغییر مکان نیمی از تیر تحتانی با در نظر گرفتن ضربات اولیه و ثانویه در تیر Beam2.

۳- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی تحلیلی اثرات ضربه تیرها پرداخته شده است. بدین منظور، در ابتدا با در نظر گرفتن دو تیر فوقانی و تحتانی، اثرات برخورد جرم معادل متمرکز ناشی از تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی مورد بررسی قرار گرفت به طوری که یک ضربه اولیه ناشی از ضربه جرم معادل تیر فوقانی لحاظ گردید. در ابتدا با فرض رفتار خطی و با استفاده از روابط انرژی جنبشی جرم و انرژی پتانسیل تیر تحتانی، مقدار لنگر وارده ناشی از ضربه در محل ماکزیمم لنگر که وسط دهانه می باشد محاسبه گردید و سپس با در نظر گرفتن یک سازه فولادی متعارف، نتایج محاسبات نشان داد که لنگر وارده از لنگر حد تسلیم تیر تحتانی بیش از ۸ برابر بزرگتر می باشد و لذا در وسط دهانه قطعا لولای پلاستیک بوجود خواهد آمد. در ادامه با استفاده از معادله حرکت که شامل جملات نیروی اینرسی می باشد، به حل این معادله پرداخته شده است و از حل آن تابع سرعت در نقاط مختلف تیر تحتانی محاسبه گردیده است. سپس با استفاده از رابطه تعادل لنگر در محل وسط دهانه و یک نقطه دلخواه که آن نقطه محل لولای فرضی است که به صورت موج در حال رسیدن به تکیه گاه ها می باشد، رابطه زمان رسیدن لولا به تکیه گاه ها بدست آمده است و همچنین تابع تغییر مکان در نقاط مختلف تیر تحتانی نیز بدست آمده است. در

ادامه با استفاده از روابط بدست آمده، نمودارها و جداول مربوطه ترسیم گردیده است. در پایان به جهت افزایش دقت مساله، اثرات ضربه ثانویه تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی در نظر گرفته شده است. جهت ارائه نتایج حاصل از این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- تیرهای سازه های متعارف که اثرات ضربه در روند تحلیل و طراحی آن ها لحاظ نشده است، بسیار مستعد تخریب و گسترش خرابی در طبقات می باشد، به طوری که این مطالعه نشان داد تنها تحت اثر ضربه ناشی از تیر فوقانی، در وسط تیر تحتانی لولای پلاستیک ایجاد گردید که میزان لنگر معادل آن حدود ۸ برابر بیشتر از لنگر مقاوم تیر می باشد. این موضوع زمانی بحرانی تر خواهد شد که ضربات ناشی از اشیا و یا برخورد خارجی نیز حادث گردد.

۲- با توجه به نتایج این پژوهش می توان به جهت اقتصادی شدن طراحی سازه، بر روی رفتار غیرخطی تیرها پس از مکانیزم نیز حساب کرد به طوری که نتایج این مطالعه نشان می دهد تیر قادر به تحمل حدود ۵ برابر خیز بیشتر نسبت به لحظه قبل از مکانیزم می باشد.

۳- نتایج حاصل از مقایسه تغییرمکان ناشی از ضربه در تیرهای مورد بررسی با تغییرمکان ظرفیت نهایی این تیرها نشان می دهد که تغییرمکان ناشی از ضربه به مراتب بیشتر از تغییرمکان حد نهایی ظرفیت تیرها می باشد و در نتیجه این تیرها تحت اثر ضربه ناشی از تیرهای فوقانی دچار تخریب شده و خرابی آن به طبقات زیرین گسترش پیدا خواهد کرد.

۴- نتایج بررسی ضربه ثانویه تیر فوقانی بر روی تیر تحتانی نشان می دهد که تغییرمکان ناشی از ضربه ثانویه به مراتب کوچکتر از ضربه اولیه می باشد و بنابراین در تحلیل ها می توان از ضربات ثانویه صرف نظر نمود.

۵- با توجه خرابی های اخیر سازه ها در نقاط مختلف دنیا تحت اثر بارهای غیرقابل پیش بینی همچون برخورد و ضربه اجسام، توصیه می شود این بارها در آیین نامه های تحلیل و طراحی سازه های حساس پیش بینی گردد تا در زمان حادث شدن آن، تخریب کلی اجزاء سازه ای ضربه دیده و گسترش آن در سازه حادث نگردد.

۶- با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه پیشنهاد می گردد تکیه گاه تیرهای تحت اثر ضربه به صورت گیردار در نظر گرفته شود. چرا که در تکیه گاه های ساده پس از ایجاد مفصل در محل ضربه، مقاومت چندان را در تیر قبل از انهدام شاهد نخواهیم بود و تیر از حیض انتفاع خارج خواهد شد، اما اتلاف انرژی و مقاومت تیر تحت اثر ضربه در تکیه گاه های گیردار به مراتب بیشتر است.

۷- با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه پیشنهاد می گردد در نقاطی از تیر که امکان حادث شدن ضربه وجود دارد با ورق هایی در بال های مقطع تقویت شود تا با افزایش ممان اینرسی، لنگر مقاوم مقطع در آن محل از لنگر محرک بیشتر شده و از بوجود آمدن مفصل پلاستیک در آن محل جلوگیری نماید.

پیوست

مشخصات Beam1 به صورت زیر می باشد:

$$\bar{M} = 15.8 \text{ kg / m}$$

$$I_x = 1729 \text{ cm}^4 = 1729 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$S_x = 157 \text{ cm}^3 = 157 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$Z_x = 179 \text{ cm}^3 = 179 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$L = 5.3 \text{ m}$$

$$M_y = F_y \cdot S_x = 2400 \times 157 = 376800 \text{ kg.cm} = 3768 \text{ kg.m}$$

$$M_p = F_y \cdot Z_x = 2400 \times 179 = 429600 \text{ kg.cm} = 4296 \text{ kg.m}$$

$$\Rightarrow M = \bar{M} \times L = 15.8 \times 5.3 = 83.74 \text{ kg}$$

و مشخصات Beam2 به صورت زیر می باشد:

$$\bar{M} = 18.8 \text{ kg/m}$$

$$I_x = 1320 \text{ cm}^4 = 1320 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$S_x = 146 \text{ cm}^3 = 146 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$Z_x = 166.4 \text{ cm}^3 = 1664 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$L = 2.8 \text{ m}$$

$$M_y = F_y \cdot S_x = 2400 \times 146 = 350400 \text{ kg.cm} = 3504 \text{ kg.m}$$

$$M_p = F_y \cdot Z_x = 2400 \times 166.4 = 399360 \text{ kg.cm} = 3993.6 \text{ kg.m}$$

$$\Rightarrow M = \bar{M} \times L = 18.8 \times 2.8 = 52.64 \text{ kg}$$

همچنین سایر مقادیر از جمله شتاب جاذبه زمین، مشخصات مصالح و سرعت اولیه برابر است با:

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$$

$$V_0 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.807 \times 3.1} = 7.798 \text{ m/s}$$

۴- مراجع

- [1] Vlassis, A.G. and Izzuddin, B.A. and Elghazouli, A.Y. and Nethercot, D.A. (2009). Progressive collapse of multi-storey building due to failed floor impact. *Engineering Structures*, doi: 10. 1016/j.engstruct.2009.02.009, 1522- 1534.
- [2] Yuan, Weifeng . and Kang, Hai Tan. (2011). Modeling of progressive collapse of a multi-storey structure using a spring-mass-damper system. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 37, No. 1, 79-93.
- [3] Yılmaz, M. C. and Anıl, Ö. And Alyavuz, B. and Kantar, E. (2014). Load displacement behavior of concrete beam under monotonic static and low velocity impact load, *IJCE*. 2014; 12 (4), 488-503.
- [4] Seonwoong, Kim. and Cheol-Ho, Lee. And Kyungkoo, Lee (2015). Effects of floor slab on progressive collapse resistance of steel moment frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 110, 182-190.
- [5] Abbas, H. and Gupta, N.K. And Alam, M (2004). Nonlinear Response of Concrete Beams and Plates under Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 30, 1039-1053.
- [6] Ahmed, A (2014). Modeling of a Reinforced Concrete Beam Subjected to Impact Vibration Using ABAQUS, *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 4, 227-236.
- [7] Zhao, C.F. and Chen, J.Y (2013). Damage Mechanism and Mode of Square Reinforced Concrete Slab Subjected to Blast Loading, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 63-64, 54-62.
- [8] Delhomme, F. and Mommessin, M. and Mougine, J.P. and Perrotin, P (2007). Simulation of a Block Impacting a Reinforced Concrete Slab with a Finite Element Model and a Mass-Spring System, *Engineering Structures*, 29, 2844-2852.
- [9] Erdem, R. Tugrul. and Gucuyen, Engin (2017). Non-linear analysis of reinforced concrete slabs under impact effect, *Gradevinar* 6/2017, 479-487.
- [10] Zineddin, M. and Krauthammer, T (2007). Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading, *International Journal of Impact Engineering* 34, 1517-1534.
- [11] سیف الهی، حسین و مرشد، رضا، (۱۳۹۶). بررسی رفتار دال های بتن آرمه تحت اثر انفجار، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۴، ۶۹۶-۶۸۷.
- [12] زرپرور، پویا و صافی، محمد، (۱۳۹۳). تخمین الگوی بار ناشی از ریزش آوار زلزله بر تیرهای فولادی، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره چهاردهم، شماره ۲، ۱۷۵-۱۸۶.