

Development of seismic fragility curve of the concrete building after the damage duo to vehicle collision

Hosein Abasi¹, Hamidreza Tavakoli^{2*}, Sepide Rahimi³, Mohammad Hoseinzade⁴

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nour, Iran

2- Associate Professor of Structural Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nour, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nour, Iran

ABSTRACT

Nowadays, according to the global population growth, building and automobile generation are increasing. Hence, the vehicle collision to structures is increasing too, and these events may cause more vulnerability on structures. That's why, these structures need to be re-evaluated for strengthening and rehabilitating, but this issue is usually ignored and neglected. For this reason, in this study has been made an effort to determine, the rate of concrete structure vulnerability under vehicle collision on corner and middle columns with 10, 60 and 100 km/h speeds with 19 seismic records simultaneously as incremental dynamic analysis (IDA). Also, this speed may be define as low, medium and high speeds. At initiation, by ETABS software and according to Iran's seismic design code of buildings (4th edition) a concrete structure with intermediate moment frame system was designed. Then to obtain the force-time spectrum, the vehicle collision and a concrete structure was simulated by LSDYNA software. After that this building was analysed under several force-time spectrum and 19 seismic records in near field. After that the fragility curves due to incremental dynamic analysis (IDA) were drawn. Finally, according to failure indicators from HAZUS standard, the probability of damage from vehicle collision and 19 seismic records on corner and middle columns was evaluated. Then it was specified, the collision causes permanent deformations on structural elements and increasing in vehicle speed will increase the horizontal displacement of story and reduces the base shear, as well as increases the rate of damage on structure finally. For instance, the rate of displacement ratio from vehicle collision to concrete structure with 10, 60 and 100 speeds, which indicates the rate of damage, applied on structure is equal 0.00152, 0.00515 and 0.023.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 June 2023

Revise Date: 30 October 2023

Accept Date: 23 November 2023

Keywords:

Fragility curve

Vulnerability

IDA analysis

Collision

Seismic acceleration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi:

*Corresponding author: Hamid Reza Tavakoli.

Email address: tavakoli@nit.ac.ir

توسعه منحنی شکنندگی لرزه ای ساختمان بتن آرمه پس از آسیب ناشی از برخورد خودرو

حسین عباسی^۱، حمیدرضا توکلی^{۲*}، سپیده رحیمی^۳، محمد حسین زاده^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

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

۳- استادیار گروه سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

۴- استادیار گروه سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

چکیده

امروزه با افزایش رشد ساخت سازه و تولید انبوه خودرو مطابق با افزایش رشد جهانی جمعیت، احتمال حوادث ناشی از برخورد خودرو به ساختمان‌ها رو به افزایش است و اینگونه حوادث در برخی موارد می‌تواند بسیار آسیب‌زننده باشد. از اینرو توجه به ارزیابی میزان خسارت و بهسازی مجدد لرزه‌ای آنها از ضروریات است که متأسفانه در بسیاری موارد از آن چشم‌پوشی می‌شود. از اینرو در این مقاله سعی شده است تا میزان خسارت ناشی از برخورد کامیون در سرعت‌های متغیر ۱۰، ۶۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، برای دو حالت برخورد به ستون وسط و گوشه همزمان با اعمال ۱۹ رکورد زلزله بصورت تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) مورد ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا یک ساختمان بتنی با شکلپذیری متوسط مطابق با آیین‌نامه زلزله ایران ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) با نرم افزار ETABS طراحی گردید. سپس مدل طراحی شده برای استخراج نمودار نیرو-زمان در نرم افزار LS-DYNA شبیه سازی شد. ساختمان مورد مطالعه مجدداً در نرم افزار OPENSEES با در نظر گرفتن نمودار نیرو-زمان همزمان با اعمال ۱۹ رکورد زلزله در حوزه نزدیک شبیه سازی و تحلیل شد و منحنی‌های شکنندگی ناشی از تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) ترسیم گردید. در نهایت میزان احتمال فراگذشت خسارت ناشی از برخورد همزمان کامیون و ۱۹ رکورد زلزله اعمال شده بر سازه در دو حالت برخورد به ستون‌های وسط و گوشه مطابق با شاخص‌های شکست آیین‌نامه HAZUS مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید برخورد خودرو باعث تغییر شکل‌هایی ماندگار در سازه می‌شود و همچنین افزایش سرعت باعث افزایش میزان جابجایی افقی سازه و کاهش برش پایه می‌شود و در نهایت باعث افزایش خرابی در سازه می‌گردد. به عنوان نمونه میزان نسبت جابجایی که یکی از پارامترهای تعیین خرابی سازه می‌باشد، در تمامی سناریوهای برخورد برای ستون وسط از سرعت کم به زیاد به ترتیب برابر با ۰/۰۱۵۲، ۰/۰۰۵۱۵ و ۰/۰۲۳ است.

کلمات کلیدی: برخورد، شتابنگاشت زلزله، تحلیل IDA، منحنی شکنندگی، آسیب پذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.397710.3119	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.397710.3119	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۲/۰۹/۰۲	۱۴۰۲/۰۹/۰۲	۱۴۰۲/۰۸/۰۸	۱۴۰۲/۰۳/۱۴
حمیدرضا توکلی tavakoli@nit.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

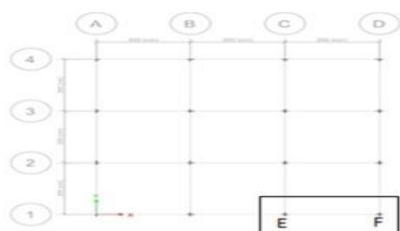
۱- مقدمه

امروزه با توجه با افزایش تولید خودرو و ساخت سازه‌های متناسب با افزایش جهانی رشد جمعیت و حوادث ناشی از برخورد خودرو به ساختمان، محققان را بر آن داشته که تحقیقات گسترده‌ای، راجع به این موضوع انجام دهند. در برخی از موارد حوادث برخورد ناشی از وسایل نقلیه سنگین به ستون‌های ساختمان احتمال وارد شدن خسارت و ایجاد خرابی حتی بصورت موضعی را در اعضای تیر و ستون افزایش می‌دهد. همانگونه که در مطالعات جبری و همکاران [۱] و صفری و همکاران [۲]. در خصوص برخورد خودرو به ساختمان و بالو و همکاران [۳]. و ناصری و همکاران [۴]. همچنین شیروند و واصف [۵]. در برخورد خودرو به پایه پل نشان می‌دهد، برخورد خودرو موجب تغییر شکل‌های ماندگار در سازه می‌گردد و مطمئناً این تغییر شکل‌های ایجاد شده و ماندگار، سازه را در برابر اعمال دیگر بارها همچون زلزله و یا برخورد مجدد یک وسایل نقلیه، آسیب پذیرتر خواهد کرد. لذا توجه به ارزیابی مجدد میزان توان و پایداری اینگونه سازه‌ها در برابر اثرات ناشی از نیروی زلزله و دیگر بارهای جانبی از ضروریات می‌باشد. از اینرو در این پژوهش سعی شده است میزان خسارت وارده ناشی از اثر برخورد کامیون تحت اثر ۳ سرعت ۱۰، ۶۰، و ۱۰۰ کیلومتر را که به نحوی بیانگر سناریوهای برخورد با سرعت کم، زیاد و متوسط می‌باشد را همزمان با اعمال شتاب ۱۹ رکورد زلزله در حوزه نزدیک مطابق با استاندارد HAZHS [۱۱] مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تا در راستای افزایش آگاهی ناشی از اثرات توأمان برخورد خودرو و زلزله کوشش شود. همچنین در این تحقیق از سه نرم افزار جهت شبیه سازی، تحلیل و طراحی موضوع مورد مطالعه استفاده شده است. در ابتدا یک سازه بتنی دو طبقه با سیستم قاب خمشی متوسط مطابق با استاندارد [۶] ۲۸۰۰ و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [۷]. توسط نرم افزار ETABS [۸] طراحی شده سپس جهت استخراج نمودار نیرو-زمان این سازه به همراه کامیون تحت مطالعه، در نرم افزار LSDYNA [۹] شبیه سازی شد و در نهایت سازه مورد مطالعه با در نظر گرفتن نمودار نیرو-زمان و ۱۹ رکورد زلزله که تمامی آنها با گام‌های ۰/۱ و بصورت افزایش یافته مقیاس شده‌اند، در نرم افزار OPENSEES [۱۰]. که یکی از کاربردی ترین نرم افزارها در تحلیل مسائل مربوط به اجزای محدود می‌باشد، شبیه سازی و مورد تحلیل قرار گرفت.

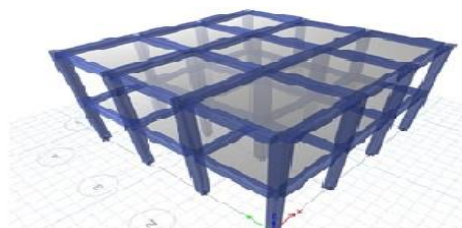
۲- روش تحلیل

۲-۱- مدل سازی اولیه

همانطور که در بخش ۱ اشاره شد، یک سازه دو طبقه به صورت سه بعدی با ۳ دهانه و با اندازه‌های مساوی بطول ۳ متر با سیستم قاب خمشی متوسط توسط نرم افزار ETABS مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران و دستورالعمل‌های بتن ایران طراحی و مدل سازی شد. ارتفاع طبقات در این تحقیق ۳/۱۵ متر در نظر گرفته شده است. برای طراحی سازه بار ثقلی مرده معادل ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، بار زنده طبقه اول برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و طبقه دوم برابر با ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شد. از سوی دیگر برای اعمال بار جانبی مطابق با استاندارد ایران شماره ۲۸۰۰ فرض بر این بود که سازه در ناحیه لرزه خیزی بالا با شتاب اوج $g = 0.3$ و خاک نوع III قرار دارد. مقاومت تسلیم میلگرد طولی مصالح ۴۰۰ مگاپاسکال و میلگرد برشی ۳۰۰ مگاپاسکال است، مدول الاستیسیته برای میلگرد ۲۰۱۱ مگاپاسکال است. در شکل ۱ مدل سه بعدی سازه بتنی آورده شده است که پس از طراحی ستون‌های میانی (E) و گوشه (F) از سازه برای ضربه خودرو انتخاب شده است. همچنین مطابق با دستور العمل HAZUS_MH MR_5 [۱۱]. سازه مورد نظر جزء سازه کوتاه مرتبه در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲ نمای کلی از سازه مورد مطالعه قابل مشاهده است.

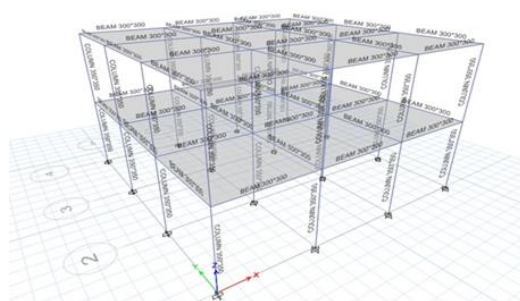


شکل ۲: محل برخورد خودرو در پلان ساختمان ۲ طبقه



شکل ۱: مدل ۳ بعدی ساختمان ۲ طبقه

همچنین ابعاد تیر و ستون طراحی شده در شکل ۳ و مشخصات مصالح مورد استفاده در سازه بتنی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل ۳: ابعاد تیر و ستون سازه بتنی طراحی شده

جدول ۱: مشخصات مصالح مورد استفاده

شرح	ابعاد مقطع	سایز میلگرد مصرفی	مشخصات مصالح بتنی	مشخصات مصالح فولادی
ستون	۳۵۰×۳۵۰ mm	میلگرد طولی ۱۶	$f'_c=25\text{Mpa}$	$F_y=400\text{ Mpa}$
		میلگرد عرضی (خاموت) ۱۰		$F_y=300\text{ Mpa}$
تیر	۳۰۰×۳۰۰ mm	میلگرد طولی ۱۴	$f'_c=25\text{Mpa}$	$F_y=400\text{ Mpa}$
		میلگرد عرضی (خاموت) ۱۰		$F_y=300\text{ Mpa}$

۲-۲- تجزیه و تحلیل ضربه خودرو

در ادامه روند این تحقیق، داشتن خروجی نمودار نیرو-زمان ناشی از برخورد وسیله نقلیه بر روی عناصر سازه ای ضروری می باشد. برای بدست آوردن این نمودار نیاز به یک نرم افزار المان محدود FEM می باشد که قابلیت پردازش بالائی داشته باشد. از اینرو در این تحقیق از نرم افزار LS-DYNA که نرم افزاری کارآمد و مفید در این حوزه می باشد استفاده شده است. از این نرم افزار شبیه ساز در بسیاری از صنایع همچون خودروسازی، هوافضا، ساخت و ساز و مهندسی عمران، فاکتورینگ نظامی و مهندسی زیستی استفاده می شود. در این تحقیق مدل کامیون و ساختمان بتنی مطابق با اطلاعات جدول شماره ۲ و ۳ که بترتیب اطلاعات مربوط به کامیون (F800) و سازه می باشد، توسط این نرم افزار شبیه سازی شده است [۱۲]. نمای کلی از مدل سازی انجام شده در نرم افزار LSDYNA در دو حالت برخورد

به ستون وسط و گوشه در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از مدل سازی در نرم افزار، نمودار نیرو-زمان جهت انجام مراحل بعدی استخراج گردید.



ب) مدل برخورد کامیون به ستون گوشه

شکل ۴: الف) مدل برخورد کامیون به ستون وسط

جدول ۲: اطلاعات کلی مدل وسیله نقلیه [۱۲].

مدل المان محدود استفاده شده در آنالیز برخورد		
۱۹۴۷۹	shell	
۱۲۴۸	solid	تعداد المان ها
۱۲۴	beam	
۸۰۳۵		وزن وسیله نقلیه (kgf)
۲۰۵۰۰۰		مدول الاستیسیته (Mpa)
۲۴۰۰ × ۳۲۰۰ × ۸۵۰۰	[B×H×L,mm]	ابعاد وسیله نقلیه

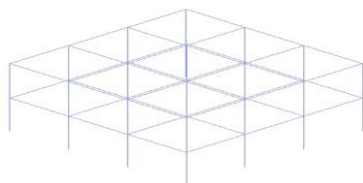
جدول ۳: اطلاعات کلی مدل سازی المان محدود سازه [۱۲].

کلمات کلیدی برای مدل سازی FE		
MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (024)	فولاد	مواد به کار رفته
MAT_CSCM_CONCRETE (159)	بتن	
MAT_RIGID (020)	سطح زمین	
CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID	فولاد در بتن	قید
CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE	وسيله نقلیه	تماس
CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE	سازه	

۳-۲- تحلیل همزمان ضربه و زلزله

همانطور که گفته شد، هدف از این تحقیق بررسی رفتار یک سازه بتنی تحت سناریوهای مختلف برخورد خودرو و شتاب زلزله به طور همزمان بوده است. با توجه به نوع تحلیل که بصورت IDA می باشد یقیناً حجم قابل توجهی از تحلیل مدنظر است از این رو استفاده از یک نرم افزاری که بتوان به راحتی در آن مدل سازی انجام شود و سرعت تحلیل در آن بالا باشد بسیار ضروریست، از این رو در این تحقیق از نرم افزار OPENSEES استفاده شده است که قابلیت های مورد نیاز را دارا بوده و به راحتی می تواند اینچنین عملیات را انجام دهد. این نرم افزار یک نرم افزار با محیط باز است که برای مهندسی سازه و زلزله توسعه یافته است [۱۳]. این نرم افزار توسط دانشگاه برکلی

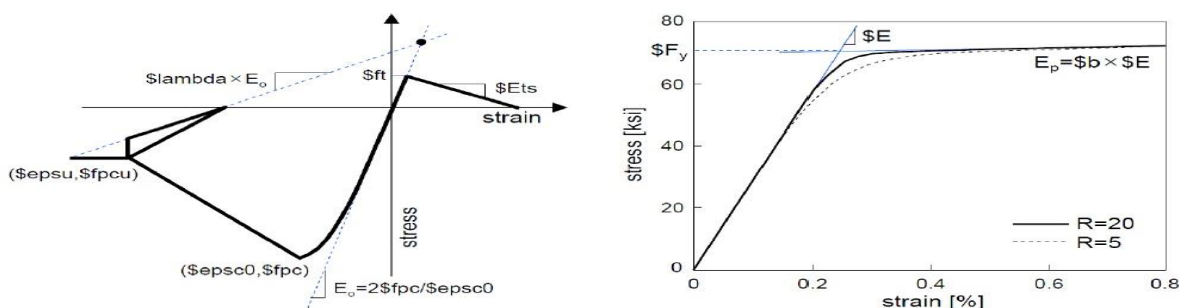
ساخته شده و به صورت رایگان در اختیار مهندسان و دانشجویان جهت تحلیل های مهندسی و تحقیقاتی قرار گرفته است؛ همچنین این نرم افزار اساساً برای تحلیل سازه‌های غیرخطی در نظر گرفته شده است. در نهایت با استفاده از این نرم افزار تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) انجام و نمودارهای مورد نیاز حاصل از این تحلیل، ترسیم می‌گردد و میزان خرابی تعیین می‌شود. در شکل ۵ سازه بتنی شبیه سازی شده توسط نرم افزار OPENSEES نشان داده شده است.



شکل ۵: مدل شبیه سازی شده سازه بتنی

۳- مدل رفتاری مصالح

در تعریف مصالح بتنی در نرم افزار OPENSEES از Concrete 0.2 استفاده شده است این مصالح رفتار تنش کششی بتن را در نظر می‌گیرد. بتن محصور شده و محصور نشده توسط مدل مصالح Concrete 0.2 در محیط نرم افزار مدل شده‌اند که بر مبنای مدل مندر و همکاران [۱۴] در OPENSEES توسعه داده شده است و در برگیرنده مقاومت محوری بهبود یافته و همچنین شکل پذیری بتن هسته با در نظر گرفتن ضریب محصور شدگی می‌باشد. از سوی دیگر میلگردهای طولی توسط مدل مصالح Steel 0.2 که بر مبنای منگنتو و پینتو [۱۵] در محیط نرم افزار توسعه داده شده مدل گردیده است. این مدل در برگیرنده سختی کرنشی ایزوتروپیک در مصالح می‌باشد. تصویر کلی مدل-های مصالح به کار رفته در شکل ۶ نشان داده شده اند.

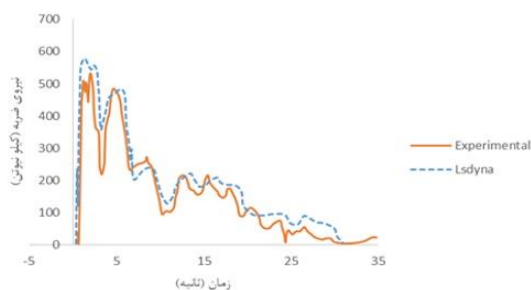


شکل ۶: مدل رفتاری مصالح بتن و فولاد بکار رفته OPENSEES

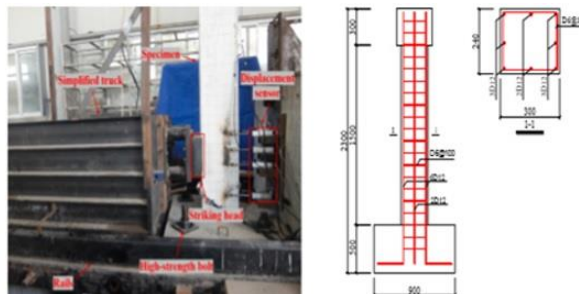
۴- صحت سنجی

نخستین گام در مدل سازی هر نرم افزار صحت سنجی نتایج نرم افزار با رفتار واقعی سازه و دیگر المان‌ها می‌باشد به همین دلیل سعی شده است با بررسی نتایج یک نمونه آزمایشگاهی از هر مدل نرم افزار بکار رفته در این پژوهش صحت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا یک نمونه آزمایشگاهی از ستون بتنی تحت اثر ضربه، توسط لی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت و جهت صحت سنجی در نرم افزار LS-DYNA شبیه سازی شد و نتایج آن در شکل ۷ با یکدیگر مقایسه گردید [۱۶]. همانگونه که در شکل ۷ دیده می‌شود نتایج حاصل از اثر ضربه بصورت آزمایشگاهی بسیار نزدیک به نتایج حاصل از شبیه ساز عددی می‌باشد. همچنین در شکل ۸ مدل آزمایشگاهی ویسچیو و فرما با مدل نرم افزاری سازه دو طبقه قاب خمشی بتنی که تحت الگوی بارگذاری جانبی مثلثی قرار گرفته است در نرم افزار OPENSEES

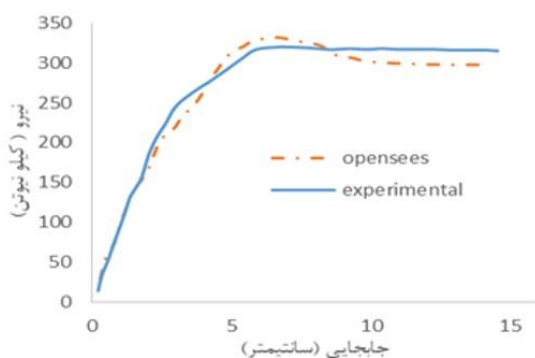
مدل گردید و منحنی پوش آور نتایج حاصل از نرم افزار و نتایج آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردید [۱۷]. با توجه به شکل می توان مشاهده نمود که نتایج نرم افزاری (تحلیلی) به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک و از دقت خوبی برخوردار است.



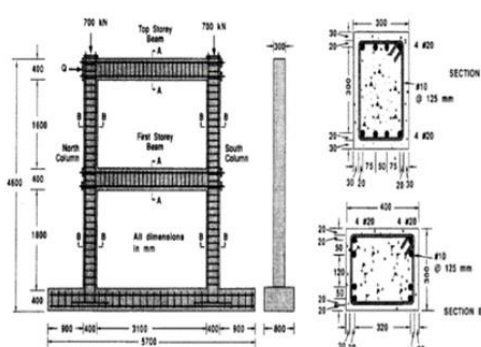
ب) نتایج شبیه سازی شده عددی و آزمایشگاهی



شکل ۷: الف) مدل آزمایشگاهی لی و همکاران [۱۶]



ب) منحنی پوش آور نتایج حاصل از نرم افزار OPENSEES و نتایج آزمایشگاهی

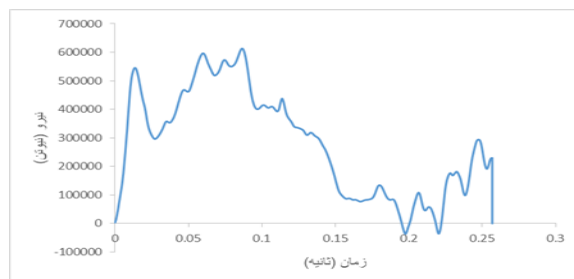


شکل ۸: الف) مدل آزمایشگاهی ویسجیو و فرما [۱۷]

۵- بارهای اعمال شده

۵-۱- بار ضربه ای

همانطور که گفته شد نیروی ضربه نیروی قابل توجهی است که می تواند تغییر شکل دائمی بر روی اعضای سازه ایجاد کند که معمولاً تاثیر آن در محاسبات سازه نادیده گرفته می شود. از این رو، تصمیم به ارزیابی و مقایسه رفتار سازه بتنی تحت سناریوهای مختلف ضربه خودرو و سوابق زلزله گرفته شد. به همین دلیل در این تحقیق، منحنی نیروی ضربه ناشی از برخورد خودرو با سرعت متغیر از ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت برای اعمال بر روی دو ستون میانی و گوشه سازه بتنی از نرم افزار LS-DYNA برای ادامه فرآیند تحلیل در نرم افزار OPENSEES استخراج شد. شکل ۹ منحنی نیرو-زمان ضربه ناشی از برخورد خودرو به ستون گوشه را در سرعت برابر با ۱۰ کیلومتر نشان می دهد.



شکل ۹: نمودار نیرو-ضربه ناشی از برخورد کامیون

۲-۵- بار لرزه ای

در برخی از مناطق جهان به دلیل سطح لرزه خیزی احتمال وقوع زمین لرزه در این مناطق وجود دارد. اخیراً زلزله مرگباری در ترکیه رخ داد و بیش از ۴۰ هزار نفر جان باختند. این چنین حوادث ناگهانی باعث شده تا مهندسان و محققان به برخی پارامترهای مرتبط با این رویداد مرگبار توجه بیشتری داشته باشند. در این تحقیق سعی شده است تعدادی رکورد زلزله با بزرگای نسبتاً بالا با معیارهایی همچون نوع خاک و ویژگی های محل وقوع زلزله از سایت Peer دانشگاه برکلی انتخاب شود. پس از آن شتاب رکوردهای انتخاب شده به صورت فزاینده و با گامهای ۰/۱ مقیاس می شود و پس از اعمال نمودار نیرو- زمان به سازه اعمال می شود تا شکست کامل رخ دهد [۱۸]. همچنین در خصوص انتخاب تعداد رکوردهای انتخابی می توان به گفته شم و کرنل اشاره کرد که بهترین تعداد رکورد برای انتخاب رکورد زلزله را بین ۱۰ تا ۲۰ رکورد تعیین کردند [۱۹]. به همین دلیل در این تحقیق ۱۹ رکورد زلزله برای اعمال بر سازه بتنی پس از اعمال بار ضربه انتخاب شده است. جدول ۴ رکوردهای منتخب زلزله را نشان می دهد.

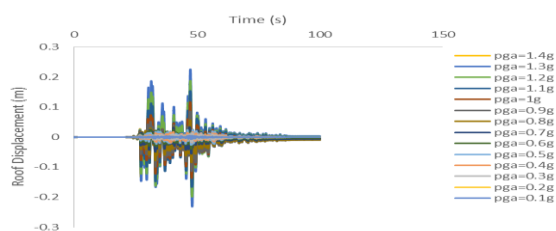
جدول ۴: رکوردهای زلزله انتخاب شده

ردیف	نام زلزله	ایستگاه	PGA(g)	PGV(cm/s)	Mw	فاصله از مرکز (km)
۱	Chi-Chi, Taiwan	TCU084	۱/۱۶	۱۱۵/۱	۷/۶	۸/۹
۲	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	۰/۷۸۹	۱۲۷/۷	۷/۶	۲۶/۷
۳	Cape Mendocino	Cape Mendocino	۱/۴۳	۱۱۹/۵	۷	۱۰/۴
۴	Coalinga-05	Oil City	۰/۸۴۱	۴۱/۲	۵/۸	۴/۶
۵	Imperial Valley-06	Elcentro#5	۰/۵۲۸	۹۱/۵	۶/۵	۲۷/۸
۶	Imperial Valley-06	Elcentro#8	۰/۶۰۲	۴۸/۶	۶/۵	۲۸/۱
۷	Kocaeli, Turkey	Izmit	۰/۲۲	۲۸/۹	۷/۵	۵/۳
۸	Loma Prieta	BRAN	۰/۶۴	۵۵/۹	۶/۹	۹
۹	Morgan Hill	Coyote Lake Dam	۱/۳	۶۲	۶/۲	۶.۲۴
۱۰	Nahanni	Site 2	۰/۴۵	۳۷/۴	۸.۶	۶/۵
۱۱	Northridge	Sylmar-Converter Station	۰/۸۹۷	۱۳۰/۳	۶/۷	۱۳/۳
۱۲	Northridge	Sylmar-Olive View	۰/۸۴۳	۱۲۲/۷	۶/۷	۱۶/۸
۱۳	San Fernando	Pacoima Dam	۱/۲۴	۱۱۶/۵	۶/۶	۱۱/۹
۱۴	Nigata	NIGH11	۰/۵۹	۵۸/۱	۶/۶۳	۸/۹
۱۵	Kobe	Nishi-Akashi	۴۸	۴۶/۸	۶/۹	۷/۶
۱۶	Gazli, USSR	Karakyr	۰/۷۱	۷۱/۲	۶/۸	۱۲/۸
۱۷	Bam	Bam	۰/۸	۱۲۴/۱	۶/۶	۱۵
۱۸	Tabas	Tabas	۰/۸۵	۲۴	۷/۳۵	۸
۱۹	Manjil	Abhar	۰/۵۱	۱۰/۶	۷/۳۷	۱۵

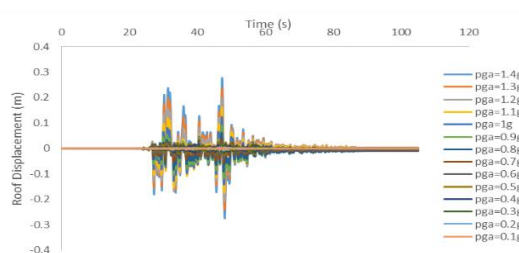
۶- بررسی پاسخ دینامیکی تحت یک رکورد انتخابی

۶-۱- تاریخچه جابجایی افقی طبقه

جابجایی افقی طبقات یکی از پاسخ‌های مهم سازه است. پس از وقوع زلزله، به خاطر رفتار غیرخطی در سازه و در نتیجه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک و رسیدن اعضا به ماکزیمم مقاومت خود و نرم شدگی اعضای سازه، جابجایی‌های آن راحت‌تر انجام می‌گیرد و باعث تغییر شکل‌های ماندگار در سازه می‌گردد. از اینرو در این پژوهش با توجه به تحلیل IDA انجام شده از رکورد Chi-Chi, Taiwan مقدار جابجایی افقی طبقه در سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت با جانمایی ستون تحت برخورد در هر دو حالت گوشه و وسط مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۱۰ مقدار جابجایی بام ناشی از اثر برخورد و شتابنگاشت زلزله Chi-Chi, Taiwan در ستون گوشه را نشان می‌دهد.



ب) ستون وسط تحت برخورد



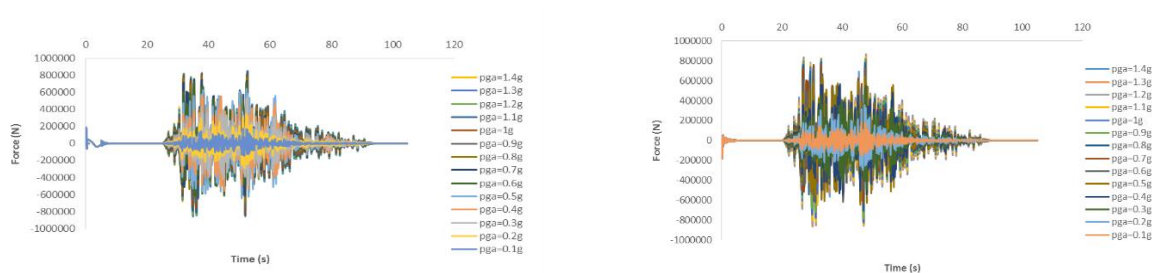
الف) ستون گوشه تحت برخورد

شکل ۱۰: جابجایی افقی طبقه تحت اثر برخورد با سرعت ۱۰ کیلومتر و زلزله Chi-Chi, Taiwan

همانطور که در شکل‌های بالا قابل مشاهده است پس از برخورد خودرو به سازه یکسری تغییر شکل‌های ماندگار هر چند ناچیز بر روی سازه ایجاد شده است که این تغییر شکل‌ها مطمئناً در پاسخ دینامیکی سازه تأثیرگذار خواهد بود. همچنین محل قرار گیری ستون تحت برخورد مطابق با محل جانمایی صورت گرفته در پلان نیز می‌تواند در پاسخ رفتاری سازه اثر گذار باشد. به نحوی که مقدار جابجایی افقی طبقه در حالت برخورد خودرو به ستون وسط در تمامی pgaهای اعمال شده بیشتر از حالت برخورد به ستون گوشه بوده است. بعنوان نمونه در pga برابر با ۰/۳ برای ستون گوشه مقدار جابجایی افقی سازه برابر با ۰/۱۵۶ متر و برای ستون وسط برابر با ۰/۱۸۲ متر ثبت گردیده است. در تشریح علت این موضوع می‌توان گفت مقدار سطح بارگیر سقف در محل ستون وسط نسبت به ستون گوشه بیشتر می‌باشد و این موضوع باعث اعمال بیشتر بار ثقلی بر ستون شده است. همچنین این حالت بر میزان جابجایی افقی بیشتر سازه پس از اعمال ضربه و شتاب زلزله تأثیر بسزایی داشته است و میتوان ادعا کرد در این حالت با افزایش بیشتر بار ثقلی مطعناً اثر پی دلتا تحت اثر ضربه و رکورد زلزله اعمال شده نیز افزایش خواهد یافت و این حجم از تنش‌های وارد شده ممکن است باعث شود تا سازه جهت مستهلک کردن نیروها و تنش‌های موجود از ظرفیت غیر الاستیک خود استفاده کند که در صورت نبود ظرفیت مناسب برای مستهلک کردن این تنش‌ها مطمئناً سازه به سمت ناپایداری متمایل خواهد شد.

۲-۶- تاریخچه برش پایه

یکی دیگر از پارامترهای مهم مورد بررسی از پاسخ‌های لرزه ای سازه را می‌توان برش پایه دانست که در واقع بیان کننده‌ی میزان مقاومت سازه است و آن را می‌توان الگوی مناسبی از جذب انرژی در سازه دانست. با شروع رفتار غیرخطی سازه به دلیل ایجاد مفاصل پلاستیک و رسیدن اعضا به حداکثر مقاومت خود، سازه از ظرفیت غیر الاستیک خود در مستهلک کردن انرژی زلزله استفاده کرده و این امر باعث کاهش مقاومت و در نهایت کاهش برش پایه در سازه می‌شود. شکل ۱۱ مقدار برش پایه شتابنگاشت زلزله Chi-Chi, Taiwan را نشان می‌دهد.



ب) ستون وسط تحت برخورد

الف) ستون گوشه تحت برخورد

شکل ۱۱: برش پایه تحت اثر برخورد با سرعت ۱۰ کیلومتر و زلزله Chi-Chi, Taiwan

پس از بررسی نتایج مشخص گردید مقادیر برش پایه برای حالت برخورد خودرو به ستون گوشه نسبت به حالت برخورد خودرو به ستون وسط در تمامی pga های اعمالی بیشتر است. به عنوان نمونه این مقدار در pga برابر با 0.3 در حالت برخورد به ستون وسط برابر با 537 کیلو نیوتن و برای حالت برخورد به ستون گوشه برابر با 867 کیلو نیوتن و برای حالت برخورد به ستون وسط برابر با 820 کیلو نیوتن می باشد. همچنین ماکزیمم برش پایه برای حالت برخورد خودرو به ستون گوشه برابر با 867 کیلو نیوتن و برای حالت برخورد به ستون وسط برابر با 820 کیلو نیوتن می باشد با توجه به مقادیر بدست آمده می توان نتیجه گرفت میزان خسارت وارده به سازه در حالت برخورد به ستون وسط نسبت به ستون گوشه بیشتر است و به همین دلیل مقاومت سازه نیز بیشتر کاهش یافته است. از این رو سازه سعی دارد با استفاده از ظرفیت غیر الاستیک خود، انرژی زلزله را مستهلک و پایداری خود را حفظ نماید. با ادامه این روند به مرور میزان جذب انرژی سازه کاهش خواهد یافت و برش پایه نیز روندی کاهشی را تجربه می کند.

۷- تعیین محدوده شکست

محدوده شکست با عملکرد سازه ها رابطه مستقیم دارد. می توان گفت گذر از سطح عملکرد سازه به مثابه شکست یک سطح آن سازه می باشد، چون اگر سازه از آن سطح عملکرد گذر کند، دیگر ضوابط آن سطح عملکرد را ارضا نمی کند و از دیدگاه بهسازی نیازمند تقویت است. در دستور العمل HAZHS_MH MR_5 برای سازه ها چهار سطح خرابی (کم، متوسط، گسترده و کامل) تعریف شده است [۱۱]. این سطوح برای معیار حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای در جدول ۴ آمده است. بر اساس این دستور العمل بهترین نقطه-ای که در طول منحنی IDA می تواند معرف تقاضا در سطح عملکرد آستانه فرو ریزش باشد، نقطه‌ای است که در آن، منحنی شروع به نرم شدگی در راستای رسیدن به ناپایداری دینامیکی کل سازه می کند. در واقع این نقطه باید کمترین مقدار خسارت را در میان نقاط احتمالی دارا باشد. با توجه به تعریف، اولین نقطه ای که ۲۰ درصد شیب ناحیه الاستیک را در طول منحنی IDA^۱ داشته باشد به عنوان تقاضای زلزله در این سطح عملکرد شناخته می شود. مشکلی که در این روش وجود دارد آن است که شیب هر منحنی IDA لزوماً قبل از رسیدن به ناپایداری کلی سازه، تا ۲۰ درصد شیب ناحیه خطی اولیه افت نمی کند و بنابراین در برخی موارد اصولاً استفاده از این روش امکان پذیر نیست. همچنین به عنوان یکی دیگر از معیارهای مبتنی بر خرابی در این آیین نامه‌ها، حداکثر نسبت تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای می باشد، که با توجه به نوع ساختمان در آیین نامه‌ها ارائه گردیده است، چنانچه سازه از هر یک از این دو معیار خرابی ارائه شده زودتر عبور کند آن نقطه سطح خرابی کامل محسوب می شود. حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای برای سطح خرابی کامل در جدول ۵ تعریف شده است که برای سازه کوتاه مرتبه در حالت خرابی کامل برابر با 0.08 است. [۲۰]

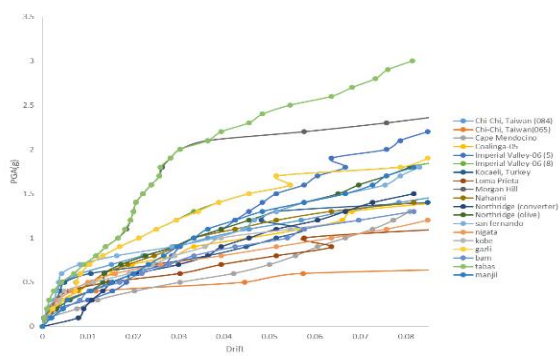
¹ Incremental Distribution Function

جدول ۵: آستانه تغییر شکل نسبی طبقات متناظر با خرابی برای حدود خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل [۲۰]

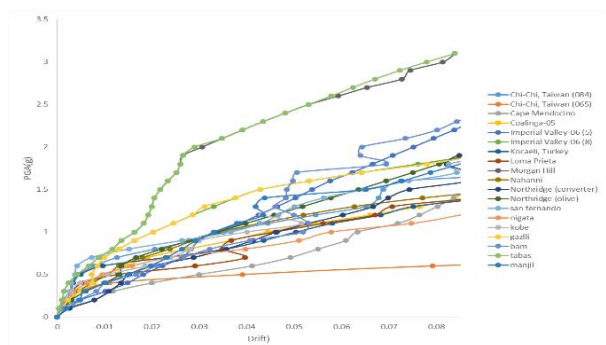
آستانه خرابی بر اساس تغییر مکان نسبی بین طبقات				نوع سازه
کامل	زیاد	متوسط	کم	
۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۵	قاب خمشی بتن مسلح کوتاه مرتبه
۰/۰۵۲	۰/۰۲	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۷	قاب خمشی بتن مسلح متوسط مرتبه
۰/۰۴	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۵	قاب خمشی بتن مسلح بلند مرتبه

۸- منحنی های تحلیل IDA برای سازه های مورد مطالعه

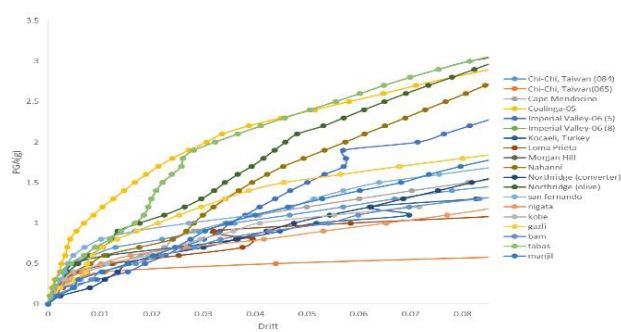
برای تحلیل سازه از تحلیل دینامیکی غیر خطی افزاینده استفاده شده است. به این صورت که پس از چند ثانیه بعد از برخورد خودرو به سازه شتاب زلزله (PGA) که با گام های ۰/۱ و بصورت افزاینده مقیاس شده اند و از $0.1g$ تا خرابی کامل (فروریزش) به سازه اعمال می شوند. سپس با تحلیل سازه در هر گام منحنی IDA ترسیم می شود. منحنی رفتاری سازه مورد مطالعه تحت ۱۹ شتابنگاشت معرفی شده با استفاده از تحلیل IDA بصورت شکل ۱۲ می باشد.



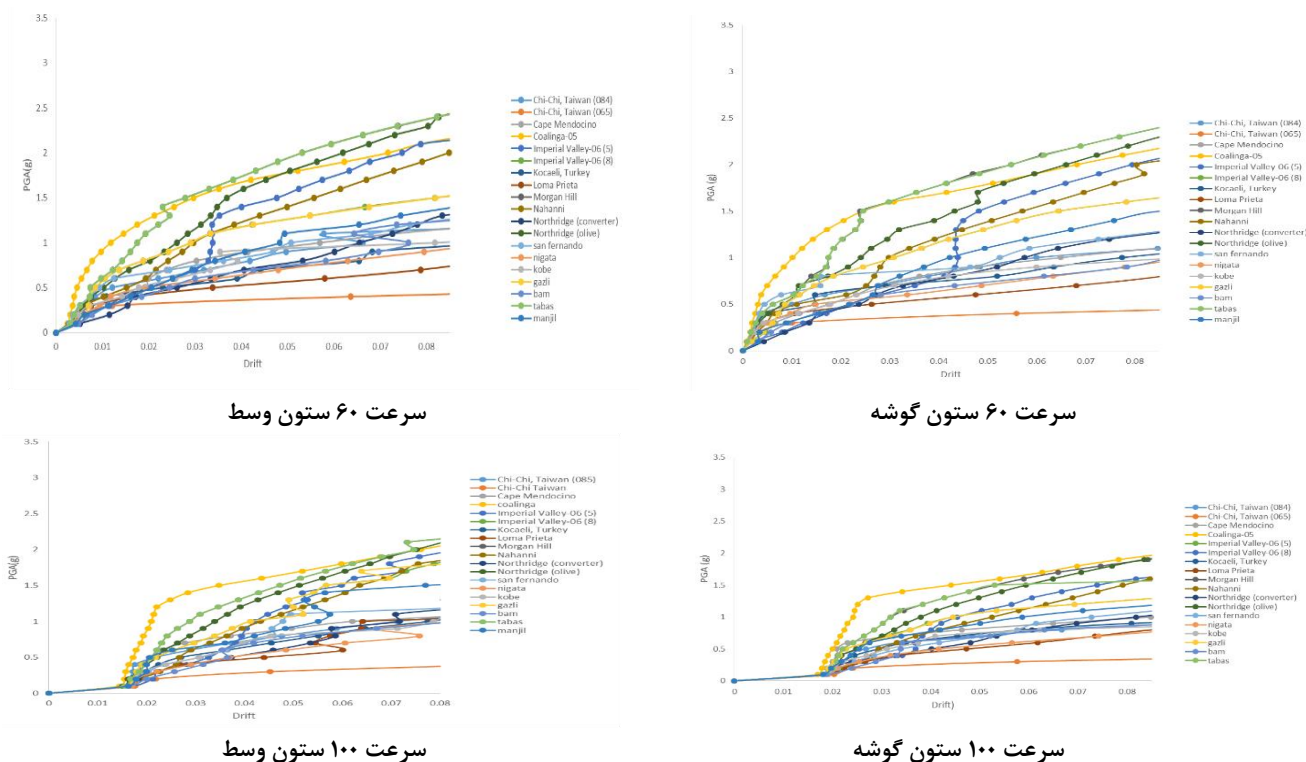
بدون ضربه



سرعت ۱۰ ستون وسط



سرعت ۱۰ ستون گوشه



شکل ۱۲: نمودار IDA تحت اثر برخورد خودرو و ۱۹ رکورد زلزله

همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است با افزایش سرعت برخورد و اعمال شتاب زلزله مقدار دررفت سازه روندی افزایشی پیدا می کند و این امر بیانگر تاثیر ضربه وارده بر رفتار سازه می باشد. همچنین با بررسی نتایج حاصل از تحلیل می توان دریافت مقدار دررفت سازه در حالت برخورد به ستون وسط نسبت به ستون گوشه بیشتر است. همانگونه که در شکل ها مشخص است تغییرات نسبت جابجایی در دو سرعت ۱۰ و ۶۰ کیلومتر ناچیز به نظر می رسد ولی این افزایش در سرعت ۱۰۰ کیلومتر قابل توجه می باشد. بعنوان نمونه در زلزله Tabas مقدار نسبت جابجایی در در pga برابر با ۰/۳ و حالت بدون برخورد برابر با ۰/۰۰۱۵۲ می باشد این در حالی است که مقدار نسبت جابجایی سازه در همان pga و در تمامی سناریوهای برخورد به ستون وسط از سرعت کم به زیاد به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۵۲، ۰/۰۰۵۱۵ و ۰/۰۲۳ می باشد و همچنین در سناریوی برخورد به ستون گوشه برابر با ۰/۰۰۱۵۱، ۰/۰۰۲۶۱ و ۰/۰۱۹ است.

۹- ترسیم منحنی شکنندگی سازه بتنی

منحنی شکنندگی، احتمال افزایش میزان خسارت از میزان مشخص شده در سطوح مختلف از جنبش های لرزه ای زمین است. از دیدگاه ریاضی شکنندگی ساختمان به صورت احتمال بروز خرابی در ساختمان بر اثر یک زلزله خاص با شدت J و بر اساس خسارت I مطابق رابطه ۱ تعریف می شود.

$$F_{ij} = \text{prob}(D \geq d_i | IM) \quad (1)$$

در رابطه فوق F_{ij} تابع شکنندگی، IM پارمتر اندازه گیری شدت زلزله است. این مقیاس حتی می تواند متفاوت باشد، مانند بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV)، بیشینه تغییر مکان زمین (PGD)، شتاب طیفی (Sa) و غیره، D میزان خرابی در سازه بر اثر وقوع این رخداد های تصادفی (برای مثال تغییر مکان نسبی طبقات)، d_i میزان خرابی مشخص از سازه است که به آن خرابی حالت i ام گفته می شود. این خرابی به صورت کیفی بیانگر نظر کمی با شاخص های متفاوتی مانند شکل پذیری سازه، تغییر مکان نسبی و شاخص خرابی پارک وان اندازه گیری می شود. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشاهده می گردد که توزیع لگاریتم نرمال، توزیع مناسب تری برای بیان این توزیع ها می باشد. مناسب بودن این توزیع در مطالعات گذشته محققان دیگر از جمله بیکر و همکاران نیز مورد تاکید قرار گرفته

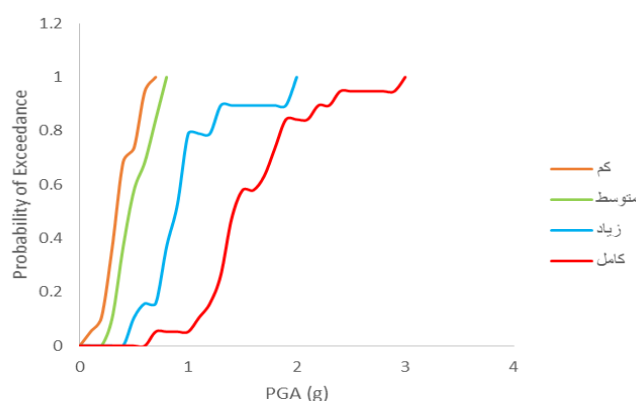
است [۲۱]. به منظور ارزیابی احتمال خرابی در هر شدت از زلزله، میزان پارامترهای توزیع احتمالاتی در هر شدت از زلزله، بر اساس برآزش توزیع لگاریتمی نرمال به داده ها بدست آمده است. حال می توان احتمال افزایش شاخص از مقادیر مختلف را با استفاده از رابطه (۱) بدست آورد. با توجه به استفاده از توزیع لگاریتم نرمال این رابطه به صورت رابطه (۲) باز نویسی شده است.

$$p(d > d_i | I) = 1 - p(d > d_i | I) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{ISD_i}{ISD_j}\right)\right) \quad (2)$$

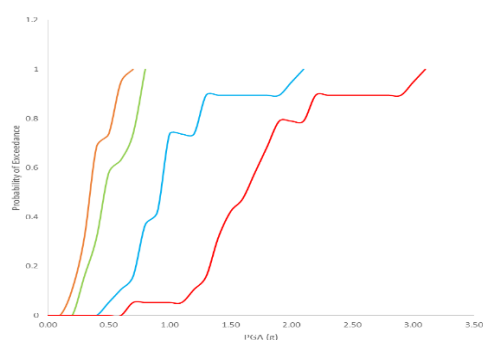
این رابطه برای چهار حالت خرابی (کم، متوسط، زیاد و کامل) و برای مقادیر مختلف بزرگای زمین لرزه برآورد شده است. تابع شکنندگی توسط برآزش تابع توزیع تجمعی لاگ نرمال که با نتایج عددی بدست آمده است حاصل می شود.

$$p(D > d_i | S_a) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_i} \ln\left(\frac{S_a}{S_{a_i}}\right)\right) \quad (3)$$

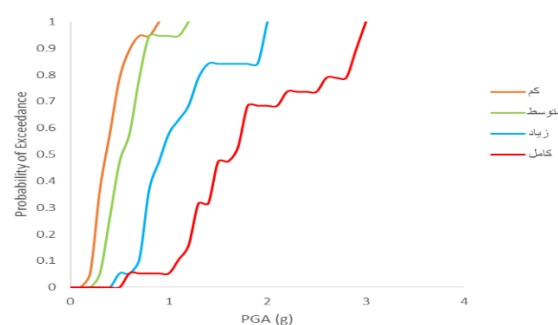
در این رابطه $p(D > d_i | S_a)$ احتمال افزایش خرابی d_i بوده، S_a پارامتر حرکت زمین (حداکثر شتاب زمین)، S_{a_i} مقدار میانگین و β_i انحراف معیار تابع لگاریتم نرمال آن برای حالت خرابی I ام است. توابع برآزش شده با اطلاعات بدست آمده برای سازه های مورد بررسی محاسبه و در شکل ۱۳ برای منحنی شکنندگی ساختمان مورد پژوهش نشان داده شده است [۲۲].



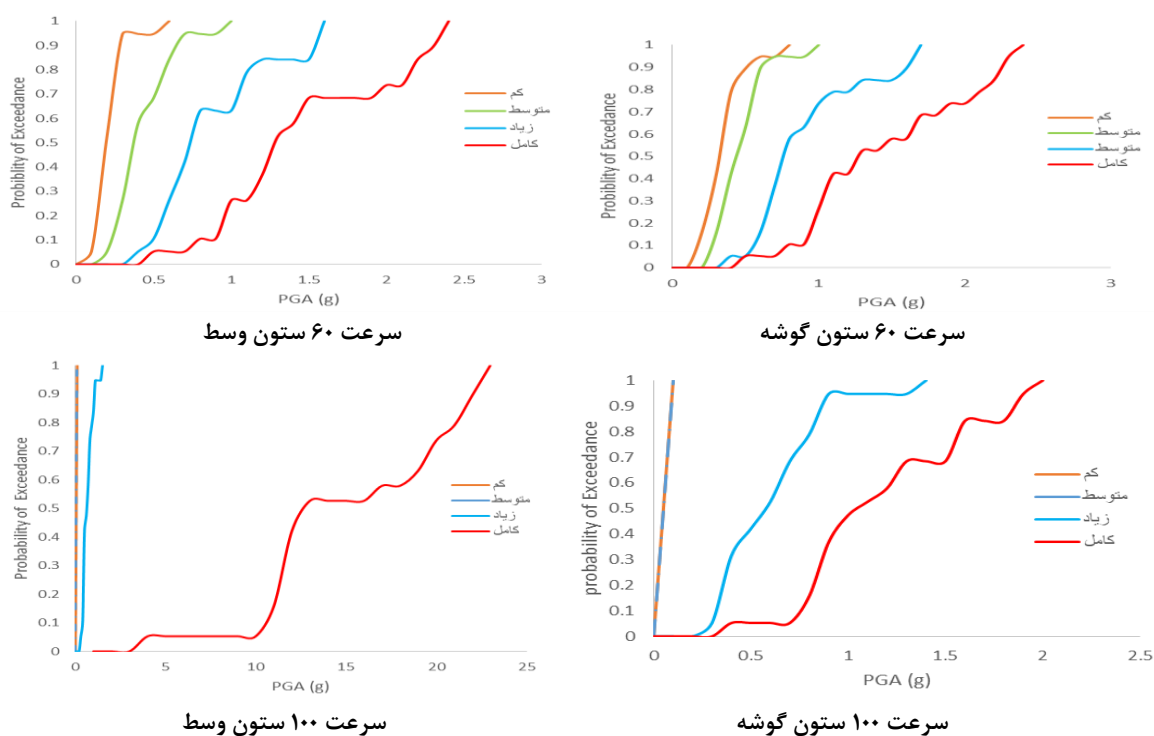
بدون ضربه



سرعت ۱۰ ستون وسط



سرعت ۱۰ ستون گوشه



شکل ۱۳: نمودار IDA تحت اثر برخورد خودرو و ۱۹ رکورد زلزله

همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است، مقدار نیروی وارده حاصل از سرعت برخورد خودرو به سازه احتمال فراگذشت از حالات حدی را افزایش می دهد و این حالت در سناریوی برخورد با سرعت ۱۰۰ کیلومتر چشمگیر است به نحوی که میزان احتمال خرابی کامل در هر دو حالت برخورد ستون گوشه و وسط در دو حالت حدی کم و متوسط برای سرعت برخورد ۱۰۰ کیلومتر، در کمترین pga که برابر با ۰/۱ می باشد رخ داده است در حالی که مقدار pga عبوری از سطوح عملکردی کم و متوسط در سرعت برخورد ۶۰ کیلومتر برای حالت برخورد به ستون گوشه به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۱ و برای حالت برخورد به ستون وسط برابر با ۰/۶ و ۱ می باشد.

۱۰- نتیجه گیری

با توجه به مطالعه انجام شده بر روی میزان آسیب پذیری یک سازه بتن آرمه با سیستم قاب خمشی متوسط تحت اثر همزمان برخورد خودرو به دو ستون گوشه و وسط با سرعت های متغیر ۱۰، ۶۰ و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت که به نحوی بیانگر سرعت کم، متوسط و زیاد می باشد و اعمال همزمان ۱۹ رکورد زلزله در بیشینه شتاب های متغیر، نتایج زیر حاصل گردیده است.

۱- در حالت کلی می توان ادعا نمود ضربه ناشی از برخورد در پاسخ سازه و سطح عملکردی سازه تاثیر داشته و این تاثیر در سرعت بالاتر قابل توجه است.

۲- در خصوص میزان جابجایی افقی طبقه که یکی از پاسخ دینامیکی سازه می باشد می توان گفت که میزان جابجایی در حالت برخورد خودرو به ستون وسط بیشتر از ستون گوشه می باشد و آن می تواند بخاطر آسیب و خسارت وارده بر سازه و استفاده سازه از محدوده غیرالاستیک وسیع تری برای مستهلک کردن انرژی زلزله نسبت به حالت برخورد به ستون گوشه باشد.

۳- با توجه به بررسی مقادیر برش پایه که یکی دیگر از پاسخ دینامیکی سازه تحت اثر ضربه و شتاب زلزله می باشد می توان دریافت که در این حالت از پاسخ سازه، میزان برش پایه درحالت برخورد خودرو به ستون وسط نسبت به ستون گوشه روندی کاهشی داشته است و این امر با افزایش سرعت برخورد خودرو کمتر می شود که می توان دلیل آن را در کاهش جذب انرژی زلزله و مقاومت سازه دانست.

۴- با افزایش pga و ضربه ناشی از سرعت برخورد خودرو به سازه مقدار دررفت سازه نیز افزایش می یابد، هر چند این افزایش در سرعت ۱۰ و ۶۰ کیلومتر محسوس نمی باشد ولی این امر در سرعت ۱۰۰ کیلومتر افزایش قابل توجهی را نشان می دهد.

۵- همانگونه که مشخص است با افزایش ضربه وارده ناشی از سرعت برخورد خودرو میزان احتمال فرا گذشت از حالات حدی افزایش می یابد و در نخستین مقادیر شتاب وارده ناشی از زلزله اتفاق می افتد، اما این حالت در سرعت های پایین و در هر دو حالت برخورد تفاوت چندانی ندارد.

مطابق با توضیحات فوق می توان نتیجه گرفت اثر برخورد باعث تشکیل تغییر شکل های ماندگار در سازه هر چند ناچیز می شود و این تغییر شکل ها در سرعت های بالاتر بیشتر و نهایتاً باعث خسارات بیشتر به سازه می شود که می بایست به این مقوله در تعیین پارامترهای طراحی، توجه بیشتر شود.

مراجع

- [1] K.M.A. Sohel, K. Al-Jabri, A.H.S. Al Abri(2020). "Behavior and design of reinforced concrete building columns subjected to low-velocity car impact." *Structures* 26,601–616
- [2] Safari Honar, F., Mohammadi Dehcheshmeh E., Broujerdian V., Torabi M. (2022) " Nonlinear Dynamic Behavior of Three- Dimensional Moment Steel Frames and Dual System under Vehicle Impact" *Civil Infrastructure Researches*, Vol. 7, Issue.2, pp. 21-31
- [3] Balou M, Phlavan H, Naseri A, Rafiee F, (2022)" Seismic fragility analysis of multi frame RC curved bridges with base isolation " *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(12), pp. 208-224
- [4] Naseri A, Mirza Goltabar Roshan A, Pahlavan H, Ghudrati Amiri G, (2021) " Effect of curvature radius on probabilistic evaluation of seismic horizontally Curves RC Box girder bridges using Monte Carlo simulation under threedimensional excitations under Near-Field Earthquakes' *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(7), pp. 5-30
- [5] M.R. Shiravand, M. Vasef, (2021) "Effect of Structural Parameters on Failure Probability of Piers in Seismic Isolated Concrete Bridges", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) 2995-3016.
- [6] BHRC. (2016). Seismic Design Code of Buildings, 4th Edition, *Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and City Planning*, Islamic Republic of Iran.
- [7] National Building Regulations, Topic 9(2021), Design and Implementation of Concrete Buildings, *National Building Regulations Compilation and Promotion Office*, Tehran, Deputy of Engineering System and Building Implementation, Ministry of Housing and Urban Development.
- [8] Computers and Structures Inc. (ETABS) (2013).ETABS 2013 ver 13: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Analysis Reference, University of California, Berkeley.
- [9] LSDYNA; theory manual for version 960. (2002). Livermore Software Technology Corporation.
- [10] Mazzoni, S., Mckenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. (2006) OpenSees Command Language Manual. <http://OpenSees.Berkeley.edu/OpenSees/manuals/user manual/OpenSees Command Language Manual.pdf>.
- [11] HAZUS-MH MR5, *Multi-Hazard loss Estimation Methodology: Earthquake Model*. (2003), Department of Homeland security, FEMA, Washington, D.C.
- [12] Kang Hyungoo, Kim Jinkoo. (2017) " Response of a steel column-footing connection subjected to vehicle impact " *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 63, No 1, 125-136.
- [13] Moradi M, Tavakoli H, AbdollahZade GR(2019) " Sensitivity analysis of the failure time of reinforcement concrete frame under postearthquake fire loading." *Structural Concrete*.;1–17. <https://doi.org/10.1002/suco.201900165>
- [14] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.

- [15] Menegotto M., Pinto P. (1973). *Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending*, Proceedings. IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well- Defined Repeated Loads, Final Report, Lisbon, Portugal.
- [16] Li RW, Zhou DY, Wu H. (2020) "Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading". *Eng Fail Anal*;109:104319.
- [17] Vecchio, F.J. and Emara, M.B., (1992). "Shear deformations in reinforced concrete frames". *ACI Structural Journal*, 89(1), pp.46-56
- [18] <http://peer.berkeley.edu/nga.html>
- [19] Shome N, Cornell CA, (1999). "Probability seismic demand analysis of nonlinear structures" Ph.D, dissertation. Stanford University.
- [20] R.W. Li, D.S. Cao, H. Wu, D.F. Wang (2021). " Collapse analysis and damage evaluation of typical simply supported double-pier RC bridge under truck collision " *Structures* 33 (2021) 3222–3238.
- [21] Baker, J.W. and Cornell, C.A. (2005). "A vectorvalued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, p. 1193-1217.
- [22] Hashemi S, Pouraminian M, Sadeghi S, (2021) " Seismic Fragility Equipped with Curve Development of Frames with BRB's Smart Materials subjected to Mainshock-Aftershock Ground Motion' *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9), pp. 76-95.