

دانشکده فنی

گروه عمران

گرایش سازه

## پاسخ ضربه ساختمانهای مجاور تحت حرکات ناهمگون نزدیک به گسل

از:

معین رضایی بلوچی

استاد راهنما:

دکتر رضا صالح جلالی

صفحه	عنوان
ب	فهرست مطالب
ج	فهرست جداول
ح	فهرست اشکال
1	فصل اول؛ مقدمه
2	1-1- مقدمه
3	1-2- رویکرد اصلی پایان نامه
4	1-3- ساختار پایان نامه
5	فصل دوم؛ کلیات
6	1-2- مقدمه
6	2-2- بررسی تحقیقات پیشین
6	1-2-2- آسیبهای ناشی از ضربه در زلزله های گذشته
7	2-2-2- مطالعات انجام شده بر روی پاسخ سازه های تحت برخورد
15	2-2-3- مطالعات انجام شده روی مدل کردن برخورد دو سازه
17	2-2-4- مطالعات انجام شده در زمینه اثرات زلزله های حوزه نزدیک بر سازه ها
25	فصل سوم؛ زلزله های نزدیک گسل و مشخصه های آن
26	1-3- مقدمه

26	.....2-3-گسلهای لرزه ای
28	.....3-3-خصوصیات زلزله های نزدیک گسل
34	.....4-3-پالس های به کار رفته در این پایان نامه
<b>41</b>	<b>فصل چهارم؛ معادلات حاکم بر مدل سازه ای و مدل برخورد</b>
42	.....1-4-مقدمه
43	.....2-4-معادلات حرکت سازه ها تحت حرکات ناهمگون پایه ها
43	.....1-2-4-ساختمان یک طبقه
53	.....2-2-4-ساختمان دو طبقه
69	.....3-2-4-معادلات حاکم بر کل سیستم
70	.....3-4-شبیه سازی نیروی ضربه
<b>72</b>	<b>فصل پنجم؛ تجزیه و تحلیل عددی</b>
73	.....1-5-مقدمه
75	.....2-5-اثر ضربه بر پاسخ ساختمانهای مجاور تحت حرکات افقی همفاز زمین
75	.....1-2-5-با فرض رفتار خطی مصالح
87	.....2-2-5-با فرض رفتار غیرخطی مصالح
97	.....3-5-اثر اختلاف فاز و مولفه های تحریک لرزه ای بر حداکثر نیروی ضربه و حداقل فاصله لازم جهت جلوگیری از ضربه
<b>110</b>	<b>فصل ششم؛ جمع بندی و پیشنهادات</b>
111	.....1-6-مقدمه

فهرست مطالب

---

---

111 ..... 2-6- جمع بندی

112 ..... 3-6- پیشنهادات

112 ..... مراجع

123 ..... پیوست

صفحه	عنوان شکل
8	شکل 1-2-1-انواع آسیب ناشی از برخورد.....
13	شکل 2-2-مدل سازه ای ساختمانهای مجاور در مرجع [50].....
14	شکل 2-3-مدل در نظر گرفته شده توسط یانکوفسکی [51].....
15	شکل 2-4-مثالی از تاریخچه زمانی نیروی ضربه در یک آزمایش برخورد.....
16	شکل 2-5-مدل در نظر گرفته شده در آزمایشات ون مایر و همکاران.....
27	شکل 1-3-انواع مختلف گسلش.....
29	شکل 2-3-تعریف نواحی مختلف در زلزله های نزدیک گسل.....
30	شکل 3-3-تاثیر تجمع انرژی حاصل از شکست نواحی مختلف گسل.....
30	شکل 3-4-رکوردهای سرعت ثبت شده در سه ناحیه مختلف نزدیک گسل با جهت گیری پیش رونده، پس رونده و دور از گسل در زلزله لندنر سال 1992.....
31	شکل 3-5-تاریخچه زمانی سرعت مؤلفه موازی و عمود بر گسل ثبت شده در ایستگاه ملولند اورپس در زلزله امپریال ولی با جهت گیری پیش رونده.....
32	شکل 3-6-نمایش ترسیمی پالس ناشی از اثرات جهت گیری و جابجایی ماندگار زمین.....
33	شکل 3-7-ساختار مولفه های موازی و عمود بر گسل بر حسب مکانیزم گسیختگی.....
35	شکل 3-8-حرکت در امتداد گسل، $d_N(t)$ و حرکت عمود بر گسل، $d_F(t)$ برای بزرگای $M=6$ .....
37	شکل 3-9-دامنه تغییرات حداکثر جابجایی زمین $d_{max}$ تعیین شده توسط آنالیز رگرسیون رکوردهای ثبت شده.....
38	شکل 3-10-مقایسه بین حداکثر دامنه جابجایی حرکت زمین در امتداد گسل محاسبه شده توسط مدل‌های رگرسیون G4RM و با استفاده از دامنه رکوردهای ثبت شده با دامنه $2d_{N,max}$ (جدول 3-2) به کار گرفته شده در این مطالعه.....
39	شکل 3-11-اندازه‌گیری میزان افت تنش در سطح گسل با استفاده از رکوردهای ثبت شده در نزدیکی آن و مقایسه آن با میزان افت تنش حاصل از $\dot{d}_F$ و بکار گرفته شده در این تحقیق.....
40	شکل 3-12-حرکت در امتداد گسل زمین ثبت شده در زلزله پارکفیلد کالیفرنیا.....

- شکل 3-13- حرکت عمود بر سطح گسل زمین ثبت شده در زلزله سنفرناندو کالیفرنیا ..... 40
- شکل 4-1- مدل سازه های برخورد کننده..... 42
- شکل 4-2- مدل سازه یک طبقه..... 43
- شکل 4-3- (a) مدل سختی دوخطی برای فنرهای دورانی (b) سیستم الاستوپلاستیک و سیستم خطی نظیر آن..... 45
- شکل 4-4- تغییر شکل سازه سمت چپ تحت حرکات ناهمگون پایه ها..... 46
- شکل 4-5- (a) دیاگرام آزاد تیر (b) دیاگرام آزاد ستون..... 47
- شکل 4-6- مدل سازه دو طبقه..... 54
- شکل 4-7- تغییر شکل سازه سمت راست تحت حرکات ناهمگون پایه ها..... 55
- شکل 4-8- دیاگرام آزاد طبقه دوم..... 57
- شکل 4-9- دیاگرام آزاد طبقه اول..... 62
- شکل (5-1) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت خطی..... 76
- شکل (5-2) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت خطی..... 77
- شکل (5-3) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس موازی گسل با بزرگای  $M=6$  در حالت خطی..... 78
- شکل (5-4) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس موازی گسل با بزرگای  $M=7$  در حالت خطی..... 79
- شکل (5-5) تغییرات حداکثر نیروی ضربه بر حسب فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور با رفتار خطی تحت پالسهای عمود برگسل..... 80
- شکل (5-6) تغییرات حداکثر نیروی ضربه بر حسب فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور با رفتار خطی تحت پالسهای موازی گسل..... 80
- شکل (5-7) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.2, T_R = 0.4$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت خطی..... 82
- شکل (5-8) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.2, T_R = 0.4$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت خطی..... 83
- شکل (5-9) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.3, T_R = 0.6$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت خطی..... 84

- شکل (10-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.3, T_R = 0.6$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت خطی ..... 85
- شکل (11-5) تغییرات حداکثر نیروی ضربه بر حسب فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور ..... 86
- شکل (12-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت غیر خطی ..... 88
- شکل (13-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت غیر خطی ..... 89
- شکل (14-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور تحت پالس موازی گسل با بزرگای  $M=7$  در حالت غیر خطی ..... 90
- شکل (15-5) تاریخچه زمانی پاسخ ( $\Delta$ ) ساختمان یک طبقه و طبقه اول ساختمان دو طبقه (طبقه های تحت برخورد) با فاصله اولیه  $d=10$  cm تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت غیر خطی در مختصات کلی ..... 90
- شکل (16-5) نمودار نیروی برخورد در ازای فاصله اولیه در دو حالت رفتار خطی و غیر خطی سازه ها ..... 91
- شکل (17-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.2, T_R = 0.4$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت غیر خطی ..... 92
- شکل (18-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.2, T_R = 0.4$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت غیر خطی ..... 93
- شکل (19-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.3, T_R = 0.6$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=6$  در حالت غیر خطی ..... 94
- شکل (20-5) تاریخچه زمانی پاسخ ساختمانهای مجاور با پریودهای  $T_L = 0.3, T_R = 0.6$  تحت پالس عمود برگسل با بزرگای  $M=7$  در حالت غیر خطی ..... 95
- شکل (21-5) نمودار نیروی برخورد در ازای فاصله اولیه در دو حالت رفتار خطی و غیر خطی ساختمانها تحت پالس عمود برگسل ..... 96
- شکل (22-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی حرکت عمود بر گسل (u) در حالت خطی ..... 98
- شکل (23-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه های افقی و عمودی حرکت عمود بر گسل (u+v) در حالت خطی ..... 99
- شکل (24-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه های افقی و عمودی حرکت عمود بر گسل (u-v) در حالت خطی ..... 101
- شکل (25-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی حرکت موازی گسل (u) در حالت خطی ..... 102

- شکل (26-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی و عمودی حرکت موازی گسل ( $u+v$ ) در حالت خطی..... 103
- شکل (27-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی و عمودی حرکت موازی گسل ( $u-v$ ) در حالت خطی..... 104
- شکل (28-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی حرکت عمود بر گسل ( $u$ ) در حالت غیرخطی..... 105
- شکل (29-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی و عمودی حرکت عمود بر گسل ( $u+v$ ) در حالت غیرخطی..... 106
- شکل (30-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی و عمودی حرکت عمود بر گسل ( $u-v$ ) در حالت غیرخطی..... 107
- شکل (31-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی ( $u$ ) حرکت موازی گسل با بزرگای 7 در حالت غیر خطی ..... 108
- شکل (32-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی ( $u+v$ ) حرکت موازی گسل با بزرگای 7 در حالت غیرخطی..... 108
- شکل (33-5) تغییرات ماکزیمم نیروی ضربه بر حسب اختلاف فاز و فاصله اولیه بین ساختمانهای مجاور تحت مولفه افقی ( $u-v$ ) حرکت موازی گسل با بزرگای 7 در حالت غیرخطی..... 109



---

---

صفحه	عنوان جدول
36	جدول 3-1- ویژگیهای جابجایی عمود بر گسل.....
36	جدول 3-2- ویژگیهای جابجایی در امتداد گسل.....

## 1-1- مقدمه

برخورد ساختمانهای همجوار با فاصله ناکافی و یا اجزای پل، بارها و بارها هنگام وقوع زمین لرزه مشاهده شده است. که از جمله می توان به زلزله های 1964 آلاسکا [1]، 1971 سان فرناندو [2]، 1985 مکزیکوسییتی [3]، 1989 لوما پریتا [4 و 6]، 1999 آتن [5] و 1995 کوبه [7] اشاره نمود. این پدیده ممکن است به آسیب جدی یا تخریب کلی سازه ها منجر شود. دلیل اصلی برخورد بین ساختمان ها معمولا ارتعاش غیر هم فاز آنها می باشد که این نوع ارتعاش به دلیل تفاوت در مشخصات دینامیکی ساختمان ها پدید می آید [8 و 9]. از سوی دیگر در مورد سازه های طویل پدیده ضربه بین قسمت های فوقانی سازه اغلب به دلیل اثر انتشار موج و اعمال تحریکات لرزه ای متفاوت به تکیه گاه های سازه ایجاد می شود [10 و 11]. نتایج مطالعات مختلف عددی که با استفاده از مدل های سازه ای مختلف و به کار بردن مدل های برخورد به دست آمده تعیین میکند که پدیده ضربه میتواند منجر به آسیب در نقاط تماس و همچنین افزایش قابل ملاحظه در پاسخ سازه گردد. طبیعی ترین راه برای جلوگیری از ضربه تأمین فاصله کافی بین سازه های مجاور یا اعضای سازه های طویل می باشد از اینرو در اکثر آیین نامه های طراحی حداقل فاصله لرزه ای بین سازه ای جهت جلوگیری از ضربه تعیین شده است [12] لیکن به دلیل تغییر شکلهای بزرگ در سازه های تحت تحریکات نزدیک گسل [21] مقادیر ارائه شده در آیین نامه ناکافی به نظر می رسد.

نظر به مطالعات انجام گرفته در چند دهه اخیر بر روی رکورد های ثبت شده از زلزله ها در نزدیکی گسل و مشاهده تاثیر این نوع حرکات روی سازه های گوناگون، نیاز به تحقیق بیشتر در مورد این رکوردها و اهمیت بررسی آثار آن روی سازه ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. اولین تحقیقات در زمینه زلزله های نزدیک گسل<sup>1</sup> از حدود نیم قرن پیش آغاز گردید. در آن زمان زمین لرزه ها را بر اساس فاصله محل ثبت رکورد تا گسل، به دو دسته زلزله های نزدیک گسل و دور از گسل<sup>2</sup> تقسیم بندی نمودند [13]. البته بعدها این تعریف اصلاح گردید و عوامل دیگری جز فاصله نیز بر این تقسیم بندی تاثیر گذاشتند [14].

در اغلب موارد به زلزله هایی که سایت ثبت زلزله در فاصله ای کمتر از 15 تا 20 کیلومتری از محل وقوع آن قرار داشته باشد زلزله های حوزه نزدیک گفته می شود [15]. این نوع زمین لرزه ها توسط حرکات شدید پالسی با دوره زمانی کوتاه شناخته می شوند. این حرکات پالسی شکل مخصوصا در نواحی با جهت گیری پیش رونده<sup>3</sup> که شکست گسل با سرعتی نزدیک به

---

1. Near-Field Earthquakes

2. Far-Field Earthquakes

3. Forward Directivity

سرعت موج برشی به آن محل نزدیک می شود بسیار آشکارتر خواهد بود [16]. علاوه بر این، نگاشت های ثبت شده در نواحی نزدیک گسل از لحاظ محتوای فرکانسی نسبت به زلزله های دور از گسل غنی تر هستند [17]. رکوردهای بدست آمده از زلزله های حوزه نزدیک شامل مقادیر بزرگ جابجایی دائمی زمین نیز می باشند که این پدیده ناشی از تغییرشکل تکتونیکی زمین بوده و بطورکلی در مولفه موازی گسل قابل رویت می باشد. لذا در اکثر موارد با اثرات ناشی از جهت گیری انتشار شکست ترکیب نخواهد شد [18 و 19]. گزارشات ارایه شده پس از وقوع زلزله های نورث ریج در سال 1994 و کوبه در سال 1995 نشان داد که پاسخ سازه ها تحت زلزله های نزدیک گسل در مقایسه با دور از گسل متفاوت بوده لذا محققان را به سمت مطالعه دقیقتر این موضوع سوق داد. در این مطالعات نشان داده شد که نیاز تغییرمکانی زلزله های نزدیک گسل بسیار بالا بوده و این امر ناشی از آزاد شدن حجم زیاد انرژی در مدت زمان کوتاه می باشد [20]. از اینرو سازه هایی که برطبق آیین نامه های لرزه ای گذشته طراحی شده اند به هیچ وجه نمی توانند تامین کننده این نیاز باشند [21]. در همین راستا در آیین نامه UBC 97 [۲۲] و برخی دیگر از آیین نامه های طراحی لرزه ای مساله زلزله های نزدیک به منبع لرزه ای مورد توجه قرار گرفته است [23]. در ایران نیز بعد از زلزله طبس در سال 1978 [24 و 25] و زلزله بم در سال 2003 [26 و 27]. توجه بیشتری به زلزله های نزدیک گسل معطوف گردیده است.

## 1-2- رویکرد اصلی پایان نامه

زلزله حوزه نزدیک را می توان با ضربه کوتاهی که در ابتدای رکورد وجود دارد و در مدت زمان بسیار کوتاه انرژی زیادی را به سازه منتقل می کند نشان داد. خصوصیات ویژه زلزله های نزدیک گسل و قدرت تخریب بالای تکانه های ناشی از آنها نشان داده که طراحی سازه هایی که در محدوده نزدیک گسل قرار می گیرند نیازمند توجه خاصی می باشند. از اینرو جهت طراحی سازه های مجاور احتیاج است که ماکزیمم نیروی ضربه قابل انتظار در زمان زلزله، به منظور ارزیابی آسیب بالقوه ناشی از برخورد و نیز حداقل فاصله لازم برای پیشگیری از برخورد شناخته شوند.

در این راستا مدلی ساده از سازه های مجاور یک و دو طبقه در نظر گرفته شده و برخورد آنها تحت مولفه های افقی و عمودی حاصل از حرکات موازی گسل و عمود بر گسل با بزرگا و اختلاف فازهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحقیق بررسی حداکثر نیروی ضربه و حداقل فاصله لازم برای پیشگیری از ضربه و نیز اثر اختلاف فاز و دوران حرکت زمین بر میزان نیروی ضربه مورد نظر است. هر طبقه شامل یک تیر صلب و دو ستون صلب بدون جرم بوده که با دو فنر پیچشی غیرخطی بهم متصل شده اند. جهت مدل کردن نیروی ضربه بین سازه ها از مدل ویسکوالاستیک غیرخطی استفاده شده است. سیستم تحت حرکات عمود و موازی گسل قرار گرفته و پاسخ تاریخیچه زمانی خطی و غیر خطی سازه ها مورد بررسی قرار می گیرد.

---

در این تحقیق حرکت گسل با پالس‌هایی که متوسط دامنه و پریود آنها بر اساس مشاهده‌ها و رکوردهای ثبت شده کالیبره شده‌اند، مدل گردیده است. جهت حل معادلات غیرخطی حرکت سیستم از روش رنگ-کوتای مرتبه چهارم استفاده گردیده که روشی پایدار است.

### 1-3- ساختار پایان نامه

هدف از این تحقیق بررسی اثر ضربه روی جابجایی نسبی ساختمانهای مجاور و میزان بیشینه نیروی ضربه و حداقل فاصله لازم برای پیشگیری از برخورد سازه‌ها و نیز بررسی تاثیر اختلاف فاز پالس‌های ورودی بر بیشینه نیروی برخورد و حداقل فاصله لازم تحت حرکات موازی گسل و عمود بر گسل می‌باشد.

فصل اول مقدمه‌ای بر پدیده ضربه بین سازه‌های مجاور و نیز خصوصیات حرکات زمین در نزدیکی گسل و اهمیت در نظرگرفتن اثرات ناشی از آن در طراحی سازه‌ها و شرح مشخصه‌های کلی مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق است.

فصل دوم مرور و بررسی مطالعات گذشته در زمینه پدیده ضربه بین سازه‌های مجاور و نیز اثرات زلزله حوزه نزدیک بر سازه‌ها می‌باشد.

فصل سوم به بیان خصوصیات حرکات شدید زمین در نزدیکی گسل و وجه تمایز آن با حرکات دور از گسل و نیز جزییات پالس‌های به کار گرفته شده در این تحقیق می‌پردازد.

فصل چهارم مدل سازه‌ای به کار گرفته شده در این تحقیق را شرح داده و روابط و معادلات دینامیکی سیستم و مدل شبیه‌سازی برخورد و پارامترهای به کار رفته در آن و روش حل معادلات را مورد بررسی قرار می‌دهد.

فصل پنجم به بررسی نتایج عددی حاصل از تحلیل‌ها می‌پردازد.

فصل ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق پرداخته و در آن پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه شده است.

## 1-2-1- مقدمه

در شهرهای پرجمعیت به دلیل تراکم بالای ساختمانها و آسیبهای زیادی که در زلزله های پیشین بر اثر برخورد سازه های مجاور گزارش شده این پدیده مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این فصل ابتدا مطالعات مرتبط با پدیده برخورد سازه های مجاور شرح داده شده سپس تحقیقاتی که در گذشته پیرامون اثرات زلزله های نزدیک گسل بر سازه ها انجام گردیده بطور خلاصه آورده شده است.

## 2-2- بررسی تحقیقات پیشین

## 1-2-2- آسیبهای ناشی از ضربه در زلزله های گذشته

در زلزله آلاسکا در سال 1964، برج اصلی هتل انکوريج وستوار<sup>1</sup> در برخورد با سالن سه طبقه ای که در مجاورت آن قرار داشت، تخریب شد [1]. سال 1971 در زلزله سان فرناندو<sup>2</sup> برخورد بین ساختمان اصلی بیمارستان اولیو ویو<sup>3</sup> و یکی از پله های آن که کنار سازه اصلی احداث شده بود باعث آسیب پله و کج شدن دائمی آن گردید [2]. روزنبلوت<sup>4</sup> و ملی<sup>5</sup> [3] گزارش داده اند که در زمین لرزه 19 سپتامبر 1985 مکزیکوسیتی در حدود 40 درصد از سازه های آسیب دیده، برخورد با یکدیگر را تجربه کرده اند که 15 درصد از آنها منجر به فروپاشی شده است. در طول زلزله سال 1989 لوما پریتا<sup>6</sup> بیش از 200 برخورد مشاهده شد که بین بیش از 500 ساختمان رخ داده بود [4]. همچنین خسارت قابل توجهی به علت برخورد بین بخش هایی از ساختمان یک مدرسه در آتن پس از زلزله 1999 مشاهده شد [5]. شواهدی از اثرات منفی ناشی از برخورد در هنگام زلزله در پل ها نیز دیده شده است. از آن جمله در زلزله لوما پریتا در یک اتوبان دو طبقه برخورد بین جاده پایین تر و ستون نگه دارنده طبقه دوم، منجر به

1- Anchorage Westward hotel

2- San Fernando

3- Olive View hospital

4- Rosenblueth

5- Meli

6- Loma Prieta

خسارت قابل توجهی به عرشه پل و ستون‌ها گردید [6]. در گزارش آسیب به یک پل بزرگراهی در زلزله 1995 کوبه<sup>1</sup>، یک دلیل شکستگی قسمتهایی از پل و سقوط عرشه پل پدیده ضربه عنوان شده است [7].

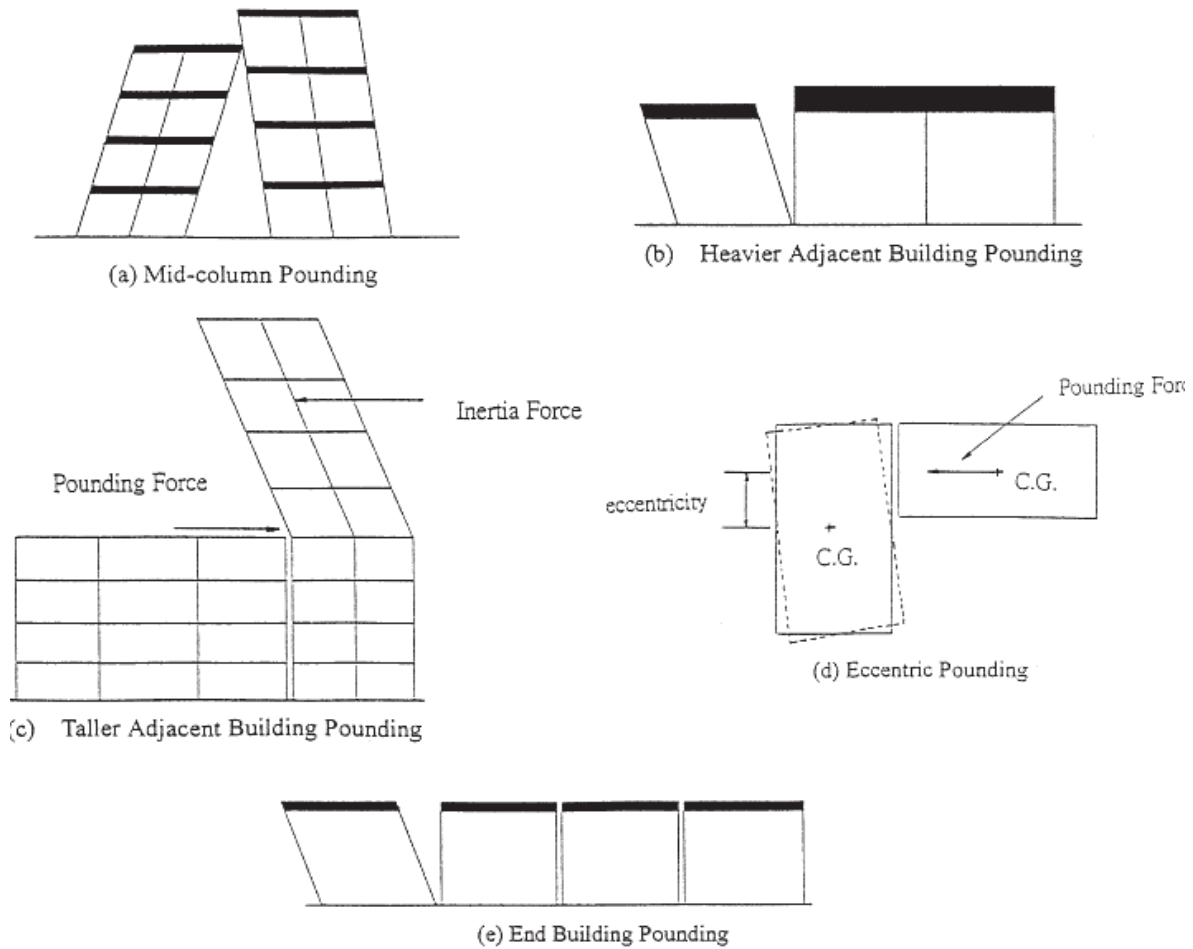
با توجه به این خسارات و بسیاری گزارشات دیگر تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گردیده که به تعدادی از آنها در این بخش اشاره خواهد شد.

## 2-2-2- مطالعات انجام شده بر روی پاسخ سازه های تحت برخورد

خسارات ناشی از برخورد سازه های مجاور حاصل از انتقال نیروی عظیم بین سازه های برخورد کننده است و این نیروی برخورد بیش از ظرفیت طراحی سازه، منجر به صدمات جدی و حتی فروپاشی سازه می شود.

بررسی آسیب های ناشی از ضربه در زلزله در گزارشات [28و29] پنج نوع عمده از آسیب را نشان می دهد:

- 1- برخورد وسط ستونی: طبقات ساختمان های مجاور ممکن است در سطوح مختلف باشند بنابراین طبقه ای از یک ساختمان به ستون ساختمان مجاور برخورد می کند و باعث شکست ستون می شود (شکل 2-1-a).
- 2- برخورد ساختمان مجاور سنگین تر: جرم ساختمانهای مجاور ممکن است بسیار متفاوت باشد بنابراین ساختمان سبکتر حرکت جانبی قابل توجهی بر اثر ضربه ساختمان سنگین تر خواهد داشت (شکل 2-1-b).
- 3- برخورد ساختمان مجاور بلندتر: ساختمانهای مجاور ممکن است ارتفاع متفاوتی داشته باشند بنابراین نوسان ساختمانی که بلندتر است به طور ناگهانی توسط ساختمان کوتاه تر محدود شده و منجر به صدمات شدید در طبقات بالای محل برخورد می شود (شکل 2-1-c).
- 4- برخورد خارج از مرکز: ساختمان در یکی از گوشه ها توسط ساختمان مجاور مورد برخورد قرار گرفته و منجر به القای حرکت پیچشی طبقه و شکست ستون گوشه ای می شود (شکل 2-1-d).
- 5- برخورد به ساختمان انتهایی: برای ساختمان ها سری و پشت سر هم اثر آونگ باعث حرکت بزرگ و آسیب به ساختمان واقع در انتهای سری می شود (شکل 2-1-e).



شکل 1-2 انواع آسیب ناشی از برخورد [28 و 29]

(a) برخورد وسط ستونی

(b) برخورد ساختمان مجاور سنگین تر

(c) برخورد ساختمان مجاور بلندتر

(d) برخورد خارج از مرکز

(e) برخورد به ساختمان انتها

در سال 1983 میلر<sup>1</sup> و فاطمی [30] به بررسی پدیده برخورد ساختمان های مجاور تحت تاثیر حرکت همساز (هارمونیک) با استفاده از مفهوم تاثیر ارتعاشی پرداختند. در 1988 آناگنوستوپولوس<sup>2</sup> [31] اثر ضربه بر ساختمان تحت حرکات شدید زمین

1- Miller

2- Anagnostopoulos

توسط یک مدل ساده یک درجه آزادی را آنالیز کرد. در 1992 آنانگوستوپولوس و اسپیلیوپولوس<sup>1</sup> [32] به بررسی واکنش متقابل پاوندینگ بین ساختمان های مجاور در بلوک شهری تحت زلزله قوی پرداختند. در این مطالعه، ساختمان به صورت تیر برشی (shear beam) و سیستم چند درجه آزادی در نظر گرفته شد. در 1989 وسترمو<sup>2</sup> [33] ساختمان های مجاور را به منظور کاهش اثر ضربه، به یکدیگر پیوند داد. او این پیوند را با ترکیبی از تیرها مدل کرد و به این نتیجه رسید که متصل کردن سازه ها انحراف نسبی طبقات را کاهش اما برش پایه را افزایش می دهد. مطالعات فوق شروع توجه جدی روی پدیده برخورد ساختمانهای مجاور در اثر زلزله های شدید می باشد.

در ارزیابی جداسازی ساختمانها جهت جلوگیری از برخورد معمولاً مدل سازه ای به صورت سیستم های الاستیک خطی ایده آل در نظر گرفته شده است. یک رابطه ساده برای ارزیابی فاصله مورد نیاز جهت جلوگیری از برخورد هنگام زلزله قوی توسط پنزی<sup>3</sup> [34] برای ساختمان های که بیشینه جابه جایی آنها در مود اول اتفاق می افتد ارائه شده است. در این مطالعه سیستم یک درجه آزادی غیر خطی توسط یک سیستم خطی معادل مدل گردیده و مقدار حداکثر جابجایی نسبی دو ساختمان مجاور به عنوان یک معیار برای انتخاب فاصله لازم، مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از این مقدار مطلق محافظه کارانه است چون شامل جابجایی سازه ها در حال دور شدن از یکدیگر می شود. لین<sup>4</sup> [35] نیز مقدار حداکثر جابجایی نسبی از ساختمان های مجاور را به عنوان فاصله مورد نیاز برای جلوگیری از برخورد در سیستم های چند درجه آزادی در نظر گرفته است. در مطالعات پنزی<sup>3</sup> [34] و لین [35] از میانگین حداکثر پاسخ ها استفاده شده است. در سال 2001 یک ارزیابی احتمالاتی از فاصله بین دو ساختمان مجاور توسط لین [36] با در نظر گرفتن ساختمانها به عنوان سیستم های غیر خطی ارائه شد. این تحقیق نشان داد که خطر برخورد در ساختمان هایی که حداقل فاصله مشخص شده در آیین نامه [37] را رعایت کرده اند همیشه متناسب و سازگار با پیوند ساختمان های مجاور نیست. البته این مطالعات عدم قطعیت در خواص سازه ها را در نظر نگرفته است. در سال 2000 وانگ<sup>5</sup> و هونگ<sup>6</sup> [38] روشی برای تعیین فاصله مورد نیاز بین سازه ها ارائه نمودند. این روش بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان و نظریه ارتعاشات تصادفی برای سیستم های الاستیک خطی فرموله شده و برای سیستم های یک و چند درجه آزادی که استفاده می شود و عدم قطعیت در خواص سازه ها را در نظر گرفته است که نتایج نشان می دهد که این در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث افزایش فاصله بحرانی مورد نیاز می شود.

1- Spiliopoulos

2- Westermo

3- Penzien

4 - Lin

5 - Wang

6 - Hong



دیویس<sup>1</sup> [39] ضربه ساختمان های مجاور تحت تحریک هارمونیک را توسط مدل غیر خطی هرتز بررسی نمود. در این مطالعه طیف پاسخ ضربه، به ازای مقادیر زیادی از پارامترهای مدل ارائه شد. پنتلیدس<sup>2</sup> و مت<sup>3</sup> [40] با استفاده از مدل ارائه شده توسط دیویس به بررسی رفتار میرای سیستم یک درجه آزادی با ضربه خوردن از یک طرف هنگام وقوع زمین لرزه پرداختند و با مقایسه رفتار ضربه سازه الاستیک با سازه غیر الاستیک تحت چهار زمین لرزه نشان دادند که به ازای مقادیر متوسط میرایی، پاسخ جابجایی سازه غیر الاستیک بیشتر از سازه الاستیک بوده، با این حال مقادیر حداکثر سرعت، شتاب و نیروی ضربه در سازه غیر الاستیک به میزان قابل توجهی کمتر از سازه الاستیک است. علاوه بر این تعداد برخورد رخ داده برای سازه با رفتار غیر الاستیک کمتر از سازه الاستیک است. همچنین فاصله مورد نیاز برای جلوگیری از برخورد آرایه شده توسط آیین نامه ها با فاصله مورد نیاز ناشی از چهار زمین لرزه مقایسه گردید و مشخص شد که مقادیر آیین نامه برای سازه با میرایی متوسط در مقایسه با فاصله واقعی که از طریق تجزیه و تحلیل سیستم های یک درجه آزادی به دست آمده محافظه کارانه هستند.

فیلیاترالت<sup>4</sup> و سروانتس<sup>5</sup> [41] به بررسی تحلیلی روی فاصله مورد نیاز بین ساختمان های مجاور برای جلوگیری از ضربه هنگام هنگام وقوع زمین لرزه پرداختند. پنج ساختمان 3، 6، 10، 15، و 25 طبقه برای سه منطقه لرزه ای مختلف در کانادا یعنی مونترال، ونکوور، و شاهزاده روپرت طراحی شد. تحلیل دینامیکی غیر خطی برای تعیین فاصله جهت جلوگیری از برخورد بین هر جفت ساختمان تحت هر زلزله انجام و فاصله های به دست آمده با آیین نامه کانادا مقایسه شد و نتایج به دست آمده نشان داد که فاصله به دست آمده از روش استاتیکی آیین نامه به شدت بالاتر از مقادیر محاسبه شده می باشد. آنها اعلام کردند که آیین نامه در به دست آوردن فاصله از روش استاتیکی متغیرهای دخیل نظیر پریودها و پاسخ سازه ای را که وابسته به حرکت زمین و خواص سازه ای است در نظر نگرفته است.

چنگ<sup>6</sup> و تزنگ<sup>7</sup> [42] در مطالعه ای به ارزیابی خطر برخورد سازه های مجاور تحت زمین لرزه در شهر تایپه و معرفی سازه های مستعد این پدیده پرداختند. آنها تجزیه و تحلیل دینامیکی برخورد روی مدل قاب سازه ها را برای به دست آوردن تشدید برش

---

1- Davis

2 - Pantelides

3- Mat

4- Filiatrault

5- Cervantes

6- Jeng

7 - Tzeng

طبقات انجام دادند و نتیجه گرفتند که اقدام فوری برای تعدیل تأثیرات برخورد در تعداد زیادی از ساختمان های موجود مورد نیاز است.

هسیانگ لین<sup>1</sup> و چیانگ ونگ<sup>2</sup> [43] در مقاله ای روشی طیفی برای ارزیابی احتمال برخورد دو ساختمان مجاور در طول یک دوره زمانی تحت زلزله ارائه کردند. مدل در نظر گرفته شده آنها دو سازه چند درجه آزادی بود که با حداقل فاصله مشخص شده در آیین نامه در کنار هم قرار داشتند و تحلیلها بر نظریه ارتعاشات تصادفی استوار بود و شبیه سازی عددی از 36 سازه در این مطالعه ارائه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت پیروید ساختمان های مجاور، نقش عمده ای را در احتمال برخورد آنها ایفا می کند.

جونگ ونگ<sup>3</sup> و هسیانگ شی<sup>4</sup> [44] در سال 2007 مطالعه ای موردی روی لغزش عرشه پل و برخورد آن با خاک پرکننده کناری، انجام دادند. مورد مطالعه پل بتنی چند دهانه با بلبرینگ های لاستیکی ساده بود که تحت حرکات افقی و عمودی زمین برگرفته از پالسهای زمین لرزه سال 1999 چی-چی<sup>5</sup> تایوان (7/3 ریشتر)، قرار داده شد. اندرکنش خاک و سازه نیز در تحلیل ها لحاظ شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که لغزش اصطکاکی بر روی پد بلبرینگ همراه با تغییر شکل پلاستیک در خاک پرکننده کناری برای جلوگیری از سقوط عرشه هنگام وقوع زمین لرزه های بزرگ ضروری است. آنها دریافتند که اگر مقاومت خاک به نصف کاهش پیدا کند حداکثر جابجایی عرشه کمتر از دو برابر خواهد بود ولی اگر ضریب اصطکاک در بلبرینگ ها از 0/1 به 0/2 افزایش یابد حداکثر کج شدگی دندانهای پایه پل بر اثر برخورد تا ده برابر کاهش می یابد. جونگ ونگ در تحقیقی دیگر [45] به مطالعه موردی روی شکست یک پل در اثر برخورد و لغزش تحت حرکات شدید زمین، پرداخت. هدف از این مطالعه بررسی ضعف بلبرینگهای لولایی و نقش آن در شکست عرشه پل بزرگراهی در تایوان بود که در سال 1999 در معرض زلزله چی-چی (7/3 ریشتر) قرار داشت. این مطالعه نشان می دهد که جزئیات ظاهری و خصوصیات رفتاری بلبرینگ می تواند به میزان قابل توجهی در رفتار یک پل در معرض برخورد تغییر ایجاد کند.

هاو<sup>6</sup> و چاو<sup>1</sup> [46] در سال 2008 در مقاله ای تاثیر حرکات نزدیک گسل و اندرکنش خاک و سازه روی پاسخ نسبی دو قاب کنار هم را در پلها با درز انبساط معمولی ارایه کردند. این مطالعه نشان داد که فرض تحریکات یکنواخت زمین و ثابت بودن پایه

---

1 - Hsiang Lin

2 - Chiang Weng

3 - Jong Wang

4 - Hsiang Shih

5 - Chi-Chi

6 - Hao

ها در تجزیه و تحلیل و طراحی پل ها ممکن است برآورد واقع بینانه ای از پاسخ برخورد قابهای پل را فراهم نکند. آنها روش تنظیم نسبت فرکانس قابها در جهت حداقل رساندن پاسخ نسبی و در نتیجه کاهش پتانسیل برخورد اجزای پل را که مقررات طراحی در حال حاضر توصیه می کنند را نیز مورد بررسی قرار دادند.

در 1999 ژو<sup>2</sup> و همکاران [47] در مطالعه ای معادلات حرکت چند درجه آزادی برای ساختمان های چند طبقه مجاور تحت تحریک زلزله که با دمپهای مایعی به هم متصل شده اند را ارائه کردند. آنها شتاب ناشی از زلزله را به عنوان یک فرایند تصادفی در نظر گرفتند، و یک الگوریتم شبه تحریک در حوزه فرکانس را در یک برنامه کامپیوتری برای رسیدگی به خواص غیر کلاسیک میرایی سیستم مدل کردند و برای تحلیل دینامیکی سیستم در حوزه زمان از تاریخچه زمانی زلزله سال 1940 ال سنترو<sup>3</sup> استفاده نمودند. در این مطالعه اثر میراگرهای مفصلی مایعی بر روی کاهش جابه جایی، شتاب و برش در ساختمان های مجاور مورد بررسی قرار گرفت و سپس مطالعه پارامتری گسترده ای برای پیدا کردن خواص مطلوب میراگرها برای ساختمان های مجاور با نسبت سختی ها و ارتفاع های مختلف انجام شد. نتایج نشان می دهد که اگر خواص میراگر مناسب انتخاب شود استفاده از میراگرهای مایع برای اتصال ساختمان های مجاور با فرکانسهای مختلف به طور موثر می تواند به کاهش پاسخ های ناشی از زلزله منجر شود.

کواشیما<sup>4</sup> و روآنگ راسامی<sup>5</sup> [48] مطالعه ای برای بررسی اثر میراگرهای متغیر در بهبود پاسخ لرزه ای از جمله اثر برخورد انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که میراگر نوع اصطکاکی می تواند بیشترین کاهش را در جابجایی عرشه، جابه جایی نسبی بین دو عرشه و شتاب پالس مانند ناشی از برخورد بین دو عرشه در پی داشته باشد.

در سال 2006 عبدالرحیم [49] مطالعه ای پارامتری روی پاسخ برخورد ساختمان ها و همچنین راهکارهای مناسب برای کاهش خطرات لرزه ای در ساختمان های مجاور انجام داد. او سه دسته زمین لرزه ثبت شده را برای ورودی استفاده نمود و اثر ضربه را با مدل نیروی برخورد خطی و غیر خطی برای فاصله اولیه مختلف بین سازه ها مورد مطالعه قرار داد و پاسخ های با برخورد و بدون برخورد را با هم مقایسه کرد. در نتیجه این تحقیق عنوان شد که نتایج بدست آمده به تحریکات لرزه ای و نسبت پیوند ساختمانها بستگی دارد و برخورد ناشی از زمین لرزه بین ساختمان های مجاور ممکن است خسارت هایی ناخواسته به بار بیاورد حتی اگر هر یک از سازه ها جداگانه مقاومت لازم در برابر زلزله را داشته باشند. از نتایج دیگر این بود که برخورد باعث شتاب و

1 - Chouw

2 - Xu

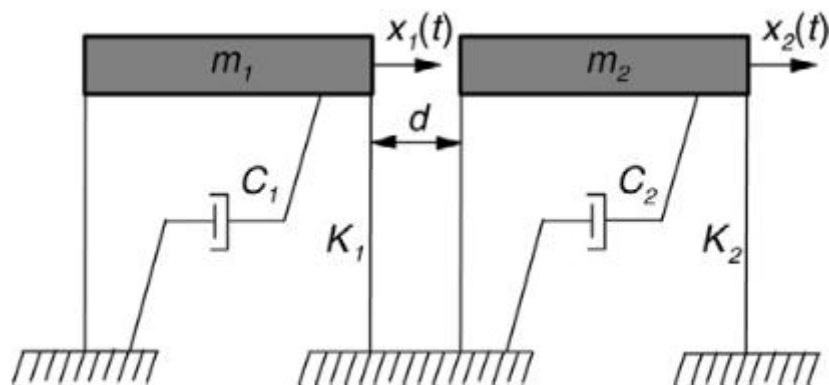
3 - El centro

4 - Kawashima

5 - Ruangrassamee

برش بیشتری در طبقات مختلف نسبت به حالت بدون برخورد می شود، در حالی که ماکزیمم دریفت طبقات بستگی به ویژگی های تحریکات ورودی دارد.

در سال 2006 یانکوفسکی<sup>1</sup> [50] در مطالعه ای به ارائه طیف نیروی ضربه برای دو ساختمان مجاور پرداخت که نشانگر نموداری از ماکزیمم نیروی ضربه به عنوان تابعی از پیوندهای طبیعی سازه های مجاور می باشد. دو سازه توسط سیستم یک درجه آزادی (شکل 2-2) و ضربه نیز به صورت المان ویسکوالاستیک غیرخطی مدل گردیده و آنالیز الاستیک و غیر الاستیک (الاستو پلاستیک) سیستم تحت حرکت زمین انجام شد. در این تحقیق طیفهای ضربه ارائه شده نشان می دهد که پارامترهایی نظیر فاصله ی بین سازه ای، پیوند طبیعی سازه ها، ضریب میرایی، جرم، تأخیر زمانی حرکات زمین و شکل پذیری می توانند تأثیر قابل ملاحظه ای در مقدار ماکزیمم نیروی ضربه داشته باشند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که تنظیم کردن پارامترهای دینامیکی دو سازه به نحوی که بتوانند هم فاز ارتعاش کنند یا تأمین فاصله ی مناسب بین آنها اثرات منفی ضربه را کاهش داده یا حتی از هر گونه تماس سازه ای جلوگیری می کند. همچنین زمانیکه هردو سازه پیوند طبیعی بسیار کوچکی دارند (سیستم های با فرکانس بالا) از برخورد جلوگیری می شود چرا که تحت فرکانس های بالا سازه ها با تغییر شکل های بسیار کوچک ارتعاش می کنند. نتایج نشان میدهد که طیف ضربه اطلاعات بارزشی در مورد حداکثر مقدار نیروی ضربه قابل انتظار در حین حرکات زمین فراهم نموده و می تواند برای طراحی سازه های نزدیک به هم استفاده شود.



شکل (2-2) مدل سازه ای ساختمانهای مجاور در مرجع [50]

یانکوفسکی [51] در سال 2008 برای انجام تحقیقات دقیقتر ضربه دو سازه مجاور هم ارتفاع و با خواص دینامیکی متفاوت (شکل 2-3)، را مورد بررسی قرار داده و توجه ویژه ای به اثرات غیر خطی سازه ها در طول ضربه بین دو سازه نمود. او