



بررسی و مقایسه تحلیل خطی و غیر خطی مدل سازی راه‌پله در ساختمان‌های بتنی

مهدی علیرضایی^۱، حسین امیدی^۲، سعید فلاحی^۳، میلاد دهقانی^۴

1- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملایر، گروه سازه، ملایر، ایران

Email: M.Alirezaei@iiees.ac.ir

2- دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تهران، ایران

Email: civil.hossein65@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد ملایر، ایران

Email: fallahi.saeid@ymail.com

4- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

Email: miladdehghani68@yahoo.com

چکیده:

در این مقاله، اثر مدل‌سازی راه‌پله در ساختمان بتنی با آنالیز خطی و آنالیز غیرخطی استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. نیاز لرزه‌ای و نقطه عملکرد^۱ در آنالیز پوش‌آور برای سازه با راه‌پله و بدون راه‌پله، محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج تحلیل خطی، نشان می‌دهد که وجود سختی پله، باعث کاهش پیرو و تغییر مکان جانبی سازه می‌گردد، که اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش هزینه طراحی سازه دارد. در عین حال، در حالت بدون راه‌پله نشان دهنده‌ی عدم کفایت مقاطع المان‌ها خصوصاً در اطراف پلکان است. همچنین در آنالیز غیرخطی، نتایج، نشان دهنده‌ی افزایش سطح عملکرد سازه‌ی با وجود راه‌پله می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل استاتیکی غیرخطی، دستگاه پله.

1. مقدمه

در مدل‌سازی‌های معمول در طراحی سازه‌ها اثر راه‌پله در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود. به این معنی که تنها وزن مرده و زنده ناشی از دستگاه پله به صورت خطی روی تیرها و یا بصورت بارهای متمرکز بر روی ستون‌های اطراف راه‌پله قرار داده می‌شود و مدل ریاضی ساخته شده جهت آنالیز با اجرا متفاوت خواهد بود. توجه اصلی برای این کار که توسط طراحان انجام می‌شود، عدم شرکت دستگاه راه‌پله در سختی جانبی سازه و بی‌اثر بودن آن در پاسخ‌های سازه و نتایج طراحی می‌باشد. این اثر در سازه‌های فولادی به سبب اتصالات مفصلی بین تیرهای نیم‌طبقه و ستون‌ها چندان قابل توجه نمی‌شود ولیکن تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که پتانسیل تشکیل مفاصل خمیری در سازه‌های بتنی، در اطراف دستگاه پله نسبتاً زیاد است.

¹ Life Safety



یکی از چالش‌های موجود در این زمینه مطالعات عددی و آزمایشگاهی ناچیزی است که تاکنون انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

در سال 2008، Bixiong Li و همکارانش [1] عملکرد دستگاه پله در زلزله ونچوان¹ و خسارات ناشی از آن را به صورت میدانی بررسی نمودند و بر اساس پژوهشی که انجام دادند نتیجه گرفتند که هرگاه سازه در معرض بار زلزله بطور عرضی قرار گیرد آسیب‌ها متوجه پله و هنگامی که سازه در معرض بار زلزله بطور طولی قرار گیرد آسیب‌ها بر ستونها یا تیرهای پله متمرکز می‌گردد.

در سال 2009، N.fardis [2] در کتاب ارزیابی، بهسازی و طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی بر اساس آیین‌نامه یورو 8 به بررسی رفتار دستگاه پله و مدل‌سازی آن پرداخته است. نویسنده، رفتار دستگاه پله را در جهت طولی مانند یک عضو بادبندی در نظر گرفته و به همین علت معتقد است که وجود دستگاه پله باعث ایجاد یک تمرکز سختی در پلان می‌گردد. همچنین در این کتاب به شکست‌های برشی و خمشی ستون‌های دستگاه پله که در اثر وجود میان‌طبقه در آنها اتفاق می‌افتد اشاره شده است.

در سال 1390 (ه.ش)، مرتضی بسطامی و همکارانش [3] مقاله‌ای در خصوص اثر مدل‌سازی دستگاه پله ارائه نموده‌اند و نتایجی در حوزه دوره تناوب و سختی سازه و تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار ETABS بدست آورده‌اند و نتایج بدست آمده را با نتایج حاصل از تحقیقات و تجربیات گذشته قیاس نموده‌اند. با بررسی تغییر مکان مرکز جرم دیافراگم در طبقه آخر مدل‌های ارزیابی شده در این مقاله مشخص گردیده که مدل‌سازی پله باعث افزایش سختی سازه و در نتیجه کاهش تغییر مکان در هر دو راستای عرضی و طولی می‌گردد. در جهت طولی پله بصورت بادبند قطری و در جهت عرضی دال پله مانند نوعی دیوار برشی مایل عمل می‌نماید.

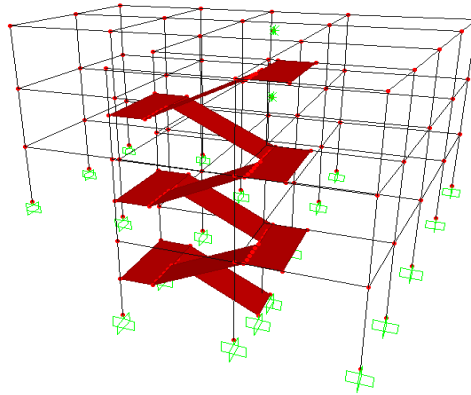
در این تحقیق ابتدا سازه به صورتی که هم‌اکنون در کشور توسط مهندسين محاسب منظور می‌گردد، مدل‌سازی و تحلیل شده و سپس همان سازه با افزودن المان پله، مدل‌سازی، تحلیل و طراحی شده است و نتایج حاصل از تحلیل و طراحی در قالب جداول و نهایتاً گراف‌هایی بصورت خلاصه ارائه گردیده و بدین صورت اثر مدل‌سازی المان‌های پله همراه با مدل سازه اصلی بررسی شده است. ساختمان انتخاب شده یک سازه بتنی با قاب خمشی متوسط در هر دو جهت می‌باشد.

2. معرفی روش اجرای دستگاه پله مورد استفاده در این تحقیق

در ساختمان‌های بتنی دستگاه پله به روش‌های مختلفی اجرا می‌گردد. این تنوع به دلیل فقدان الزامات آیین‌نامه‌ای در مورد دستگاه پله ایجاد گردیده است و بسته به سلیقه مهندسان و با دخالت مجریان در مناطق مختلف، متفاوت می‌باشد.

¹ Wenchuan

هرچند روش‌های مختلفی جهت اجرای پله در ساختمان وجود دارد اما در این تحقیق به بررسی یکی از رایج‌ترین روش‌های اجرای دستگاه پله (شکل 1) در کشورمان پرداخته می‌شود. این روش مرسوم اجرای پله عبارتست از بکار بردن تیری در میان طبقه که دال پاگرد پله بر آن تکیه داده می‌شود و هنگام اجرا، آرماتورهای دال با این تیر درگیر می‌گردد بطوری که بعد از بتن‌ریزی بصورت یکپارچه در می‌آیند. مشکل این گونه پله‌ها این است که به علت اجرای تیر میان طبقه، پدیده ستون کوتاه به وجود می‌آید. البته برخی طراحان به لحاظ بعضی ضوابط سعی در مفصلی کردن اتصال بین تیر میان طبقه و ستون دارند ولی واضح است که اجرای یک اتصال مفصلی در سازه‌های بتنی به آسانی فراهم نمی‌گردد. مشکل دیگر این گونه پله‌ها این است که در هنگام اجرا ستون‌هایی که تیر میان طبقه به آن‌ها متصل است باید دوبار قالب‌بندی و بتن‌ریزی گردند. یک بار جهت اجرای نیم‌ستون پایین تیر و بار دیگر جهت نیم‌ستون بالای تیر.



شکل (1): روش مرسوم اجرای دستگاه پله در کشور

3. الزامات آیین‌نامه‌ای دستگاه پله

اگر به آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف رجوع گردد ملاحظه خواهد شد که در مورد دستگاه پله، دیدگاه‌های متفاوتی در سطح جهانی نیز وجود دارد. بعضی از کشورها ضوابط و الزامات زیادی جهت طراحی و اجرای آنها در آیین‌نامه‌های خود ملحوظ نموده و بسیاری از کشورها نیز، در این زمینه الزامات خاصی ندارند. در آیین‌نامه‌های طراحی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای، بایستی به راه‌پله‌ها توجه ویژه‌ای صورت گیرد، هم از این نظر که راه‌پله‌ها بطور کلی دارای این پتانسیل هستند که پاسخ لرزه‌ای ساختمان را بطور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهند و هم به این خاطر که آنها جزئی ضروری از یک ساختمان هستند که برای خروج اضطراری و دسترسی در حین زلزله یا پس از آن (که آسانسورها کارایی خود را از دست می‌دهند) مورد نیاز می‌باشند [4].

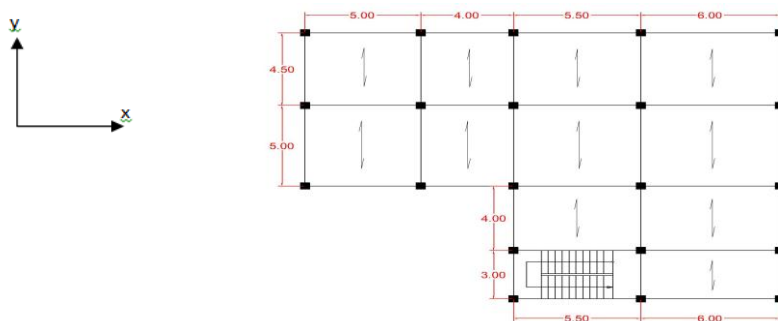
5. معرفی نرم افزار مورد استفاده در تحقیق

به منظور بررسی اثرات مدل سازی پله، نیاز به مدل سازی دقیق سازه بوده، زیرا به وضوح با داشتن یک مدل مناسب می توان رفتار سازه را به طور دقیق مورد بررسی قرار داد. خصوصا در عصر حاضر که نرم افزارهای متعددی، مدل سازی، آنالیز و طراحی را از یک فرآیند وقت گیر و احیانا کم دقت، به روندی بسیار آسان و کم هزینه و در عین حال با دقت قابل قبول تبدیل کرده اند.

برای رسیدن به اهداف مورد نظر در این تحقیق نیاز به مدل سازی های دقیق و متعدد بود که از میان نرم افزارهای موجود و مرتبط با موضوع، نرم افزار SAP2000 [5] انتخاب گردید.

6. معرفی مدل مورد استفاده

جهت بررسی اثر دستگاه پله در مدل سازی از یک پلان (شکل 2) با مشخصات فرضی زیر استفاده شده است: پلان نامنظم با کاربری مسکونی به مساحت 258 مترمربع واقع در شهر نورآباد استان لرستان. اسکلت سازه، بتنی و سیستم باربر جانبی در هر دو جهت، قاب خمشی متوسط و سیستم باربر ثقلی ساختمان تیرچه بلوک می باشد. پلان مذکور برای سازه 3 طبقه با ارتفاع 3.2m، در دو حالت با راه پله و بدون راه پله مدل سازی و مورد تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی قرار گرفت. تمامی مشخصات تعریف شده برای همه مدل ها یکسان است. المان سطحی دال پله مدل های با راه پله، المان پوسته (Shell) در نظر گرفته شده و مش بندی گردیده است. بارگذاری روی سطوح مایل راه پله بطور عمود بر سطح (Gravity Project) اعمال شده است.

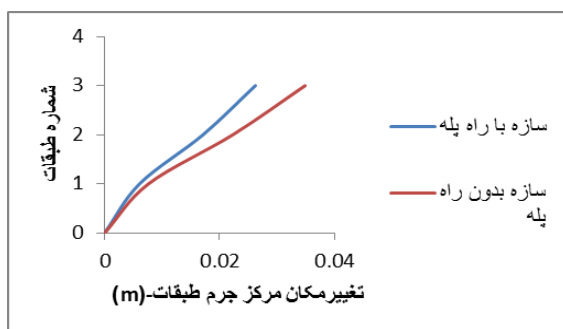


شکل (2): پلان نامنظم مورد بررسی

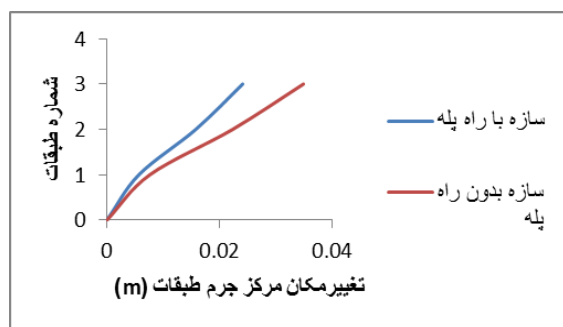
7. تحلیل سازه های مورد مطالعه

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از تحلیل خطی با روش استاتیکی معادل، سازه‌ی با راه‌پله و بدون راه‌پله تحلیل شد و نتایج خروجی هر دو سازه از جمله تغییر مکان مرکز جرم طبقات (اشکال 4 و 5)، پیروی مود اول تا دوازدهم سازه‌ها (شکل 6) برای مقایسه، ارائه گردید و سپس با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی، منحنی ظرفیت آن‌ها (منحنی تغییرات برش پایه در مقابل جابجایی مرکز جرم بام)، برای محاسبه و مقایسه‌ی نقطه عملکرد و تراز عملکرد هر دو سازه ارائه گردید (شکل 7).

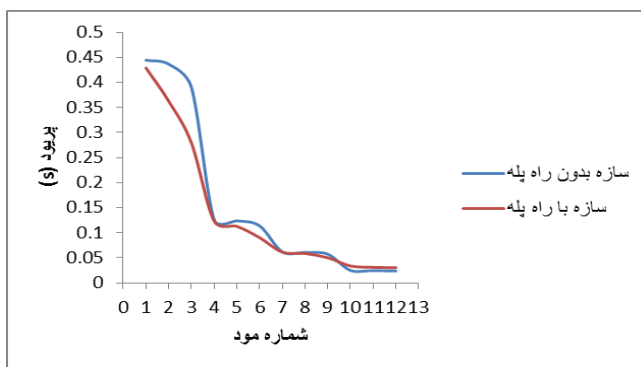
برای انجام تحلیل خطی استاتیکی معادل ابتدا نیروی برش پایه محاسبه و سپس در ارتفاع سازه توزیع می‌شود آنگاه سهم عناصر لرزه‌ای به نسبت سختی مشخص می‌گردد و اعضای سازه بر اساس نیروی حاصل طرح می‌گردد.



شکل (4): نمودار تغییر مکان مرکز جرم طبقات در حالت با راه‌پله و بدون راه‌پله بر اساس توزیع بار جانبی در روش استاتیکی معادل برای سازه مذکور در جهت X.



شکل (5): نمودار تغییر مکان مرکز جرم طبقات در حالت با راه‌پله و بدون راه‌پله بر اساس توزیع بار جانبی در روش استاتیکی معادل برای سازه مذکور در جهت Y.



شکل(6): نمودار مقایسه‌ی پریود مود اول تا دوازدهم سازه در حالت با راه پله و بدون راه پله

پیچش سازه نیز با توجه به سختی متمرکز ناشی از وجود راه پله دستخوش تغییرات مختلفی در دو جهت شده است. در جهت X (هم راستا با شمشیری پله)، پس از مدل سازی دستگاه پله، پیچش به میزان بسیار قابل توجهی (بیش از دو برابر) افزایش یافته است اما در جهت Y (جهت عمود بر شمشیری راه پله)، مدل سازی دستگاه پله، با توجه به موقعیت آن در پلان، این اثر نامطلوب را به میزان 25٪ افزایش داده است که نشان از تاثیر بسزای مدل سازی این مولفه از سازه است. بدون شک موقعیت راه پله در پلان و نسبت مساحت دستگاه پله به مساحت زیربنای سازه در این تاثیر نقش بسیار مهمی خواهد داشت، که مستلزم تحقیقات بعدی خواهد بود. در جدول (1) تاثیر مدل سازی راه پله بر مولفه‌ی پیچش سازه آمده است که در آن D_{max} و D_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین جابجایی دیافراگم سقف های سازه و L نیز بعد سازه در جهت عمود بر جهت مورد بررسی است.

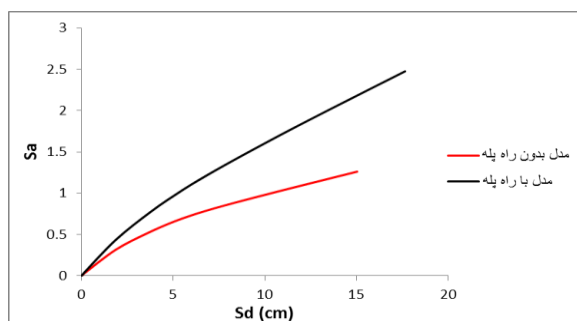
جدول (1) تاثیر مدل سازی راه پله بر پیچش سازه

طبقه	جهت	بی راه پله ($D_{max}-D_{min}$)*100/L	با راه پله ($D_{max}-D_{min}$)*100/L	درصد افزایش یا کاهش پیچش
سوم	x	0.00025	0.00061	افزایش 143%
سوم	Y	0.00023	0.00017	کاهش 25%
دوم	x	0.00023	0.00048	افزایش 113%
دوم	Y	0.00017	0.00012	کاهش 27%
اول	x	0.00008	0.00018	افزایش 114%
اول	Y	0.00006	0.00005	کاهش 23%

روش کار در تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه به این صورت است که سازه پس از اعمال بارهای ثقلی، تحت اثر بارهای جانبی با توزیع خاص و ثابت قرار می گیرد و این بار به تدریج افزایش می یابد. سپس تغییر مکان گره کنترل، که معمولاً در تراز بام انتخاب می شود تحت اثر این افزایش بار تعیین می گردد و منحنی V-D که

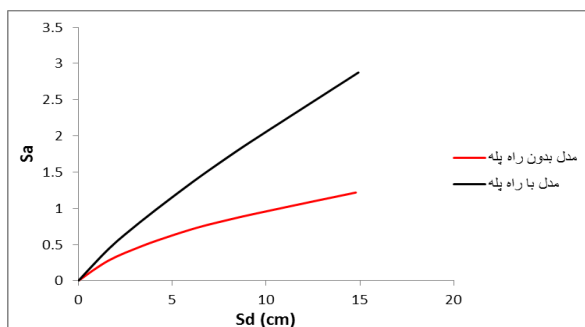
بیان گر تغییرات نیروی برش پایه در برابر تغییر مکان گره کنترل است بدست می آید. این نمودار را طیف ظرفیت¹ نیز می نامند. طیف تقاضای سازه² که بر اساس زلزله طرح تعیین می شود با طیف ظرفیت مقایسه می شود. با استفاده از این دو منحنی حداکثر تغییر مکان، که سازه در آن نقطه می تواند عملکرد مورد نظر را از خود نشان دهد و زلزله مورد نظر را تحمل کند، تعیین می گردد. این نقطه را تغییر مکان هدف³ یا نقطه عملکرد⁴ می گویند که برای هر سطح عملکرد معین، مقدار این تغییر مکان مشخص است [6].

با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، قاب تحت بارگذاری ثقلی $1.1(DL + LL)$ قرار گرفته و پس از این بارگذاری تحت اثر الگوی بار جانبی، بر اساس توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی در جهت X و Y قرار میگیرد. لازم به ذکر است که مختصات نقطه عملکرد سازه و همچنین منحنی ظرفیت آنها در هر یک از بارگذاری ها بر اساس ATC40 و در مقیاس ADRS⁵، یعنی بر اساس جابجایی طیفی (S_d) ، در برابر شتاب طیفی (S_a) ، بر اساس داده های نرم افزار، بدست آمده است. نمودارهای پوش آور این بارگذاری ها در جهت X و Y مطابق شکل های 7 و 8 می باشد. همچنین خلاصه ای از نتایج آنالیز استاتیک غیرخطی در جدول (2) آمده است که در آن برش پایه و تغییر مکان نظیر آن در تغییر مکان هدف برای هر دو جهت در ATC40 و برای جهت X در آیین نامه ی FEMA356 که با نشریه ی 360 داخل سازگاری نسبتا کاملی دارد، برای سازه ی بدون وجود راه پله و سازه ی با وجود راه پله مقایسه شده است.



شکل (7): نمودار تغییر مکان طیفی - شتاب طیفی سازه بدون راه پله، تحت اثر الگوی بار جانبی بر اساس توزیع بار جانبی در روش استاتیکی برای سازه مذکور در جهت X .

¹. Capacity Spectrum
². Demand Spectrum
³. Target-Displacement
⁴. Performance Point
⁵ Acceleration Displacement Response Spectrum



شکل (8): نمودار تغییر مکان طیفی - شتاب طیفی سازه با راه پله، تحت اثر الگوی بار جانبی بر اساس توزیع بار جانبی در روش استاتیکی برای سازه مذکور در جهت Y.

جدول (2) - مقایسه برش پایه و تغییر مکان هدف در شرایط جهت بارگذاری جانبی، آیین نامه و وجود یا عدم مدل سازی راه پله

جهت	وضعیت مدل سازی راه پله	آیین نامه	تغییر مکان هدف - cm	برش پایه - ton
X	بدون راه پله	ATC40	6.85	90.4
X	با راه پله	ATC40	4.4	100.1
Y	بدون راه پله	ATC40	7.02	88.2
Y	با راه پله	ATC40	4.23	111.02
X	بدون راه پله	FEMA 360	7.1	92.2
X	با راه پله	FEMA 360	4.5	101.5

با توجه به نتایج ثبت شده در جدول 2 مشاهده می شود که در هر دو جهت، ظرفیت سازه حدود 11٪ افزایش و تغییر مکان هدف سازه تقریباً 40٪ کاهش یافته اند که بسیار قابل توجه می باشند. در ادامه به بررسی سطح عملکرد اعضای سازه خواهیم پرداخت. در مدل بدون راه پله در هر دو جهت، پس از اعمال بارگذاری جانبی و آنالیز استاتیکی غیرخطی، تیرهای همگی طبقات و ستون های طبقات دوم و سوم، الاستیک باقی مانده اند در حالی که همگی ستون های طبقه اول وارد ناحیه IO¹ (قابلیت استفاده یی وقفه) شده اند. این در حالی است که در صورت مدل سازی راه پله تنها تعداد محدودی از ستون های طبقه اول وارد ناحیه مذکور می شوند که حاکی از افزایش به وضوح تراز عملکردی سازه که مطلوب استراتژی طراحی سازه بر اساس عملکرد است، می باشد.

7. نتایج

¹ Immediate occupancy level

پریود سازه فقط در مودهای اول کاهش محسوسی داشته است که به نظر می‌رسد به دلیل مساحت بالای مدل نسبت به مساحت فضای راه‌پله باشد و با کاهش نسبت فوق اثر آن تشدید خواهد شد. پیچش طبقات در صورت مدل کردن راه‌پله، با توجه به اینکه سازه نامنظم است و سختی نامتقارن مشخصی در دو جهت (به ویژه در جهت X) دارد مشاهده شد که در صورت مدل‌سازی راه‌پله پیچش سازه نسبت به حالتی که راه‌پله مدل نشده است بیش از دو برابر شده است. تغییر مکان جانبی مرکز جرم طبقات در صورت عدم مدل‌سازی راه‌پله به ویژه در جهت X که شمشیری راه‌پله مانند یک عضو مهاری عمل می‌کند، در طبقات بالاتر حتی بیش از 25٪ افزایش نشان می‌دهد که حاکی از سختی قابل ملاحظه‌ی دستگاه پله می‌باشد. در مورد ستون‌های اطراف دستگاه پله مشاهده شد که در صورت مدل‌سازی راه‌پله نسبت تنش به وجود آمده در آن‌ها با توجه به تمرکز سختی ناشی از وجود راه‌پله) افزایش می‌یابد و در طرف مقابل در سایر المان‌های سازه، این نسبت تنش کاهش می‌یابد و همین امر صرفه‌ی اقتصادی قابل توجهی در سطح کلان در پی خواهد داشت. مدل‌سازی راه‌پله تاثیر بسزایی در ظرفیت سازه و تراز عملکردی آن و به خصوص کاهش تغییر مکان هدف سازه خواهد داشت. لذا چه در طراحی سازه‌های جدید و چه در ارزیابی و بهسازی سازه‌های موجود، این مهم را باید در نظر داشت و انتظار می‌رود آیین‌نامه‌های طراحی و بهسازی نیز الزاماتی در این مورد را با توجه به نقش اساسی آن در نظر بگیرند. اگرچه در مورد سازه‌های بتنی به دلیل گیردار بودن ذاتی اتصالات آن مدل‌سازی راه‌پله غیر قابل اجتناب خواهد بود، در سازه‌های فولادی می‌توان با در نظر گرفتن اتصال مفصلی تیرهای نیم‌طبقه به ستون‌های اطراف از مدل‌سازی آن با قبول درصد خطای اندکی، چشم‌پوشی کرد.

8. مراجع

- [1] Bixiong Li , Zhe Wang , Khalid M.Mosalam , Xuan Wang , Zhou Wei, Analysis of stairwells performance and damage during Wenchuan earthquake, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* , Beijing, China, 2008.
- [2] Michael N.Fardis, Seismic design , assessment and retrofitting of concrete buildings 2009.
- [3] بسطامی، م ، تاجمیر ریاحی، ح ، پورعابدین، ع، اثر مدل‌سازی دستگاه پله‌های دوطرفه در سازه‌های بتن آرمه، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، 1390
- [4] Catherine Roha , James W. Axley, Vitelmo V. Bertero , The performance of stairways in earthquakes, College of engineering university of California, Berkeley, California 1982.
- [5] Computers and Structures, Inc, "Help of SAP2000 software" , <http://www.csiberkeley.com>
- [6] K. Chopra, R. K. Goel, Inelastic Seismic Response of One-Story Asymmetric-Plan System: Effect of Stiffness and Strength Distribution, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 19: 949-970.