



## یک روش جدید جهت تحلیل غیر خطی قاب‌های چند درجه آزادی تحت اثر بارگذاری انفجاری

علیرضا حبیبی<sup>۱</sup>، سید افشین قوام<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه کردستان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه کردستان

afshin.ghavam@gmail.com

### خلاصه

سازه‌های معمولی در برابر انفجارها به شدت آسیب پذیر هستند. زیرا بارگذاری‌ای که تحت آن سازه طراحی و ساخته شده است اغلب کمتر از نیرویی است که تحت اثر انفجار به سازه وارد می‌شود. بنابراین لازم است که برای طراحی سازه‌ها در برابر بار ناشی از انفجار، بارگذاری دیگری نیز بر روی سازه اعمال شود. از آنجا که مدلسازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌های چند درجه آزادی تحت بارگذاری انفجاری دارای پیچیدگیهای خاصی بوده و مستلزم صرف زمان نسبتاً زیادی می‌باشد، در این تحقیق سعی شده است یک روش ساده و در عین حال کارا و موثر جهت تحلیل غیرخطی سازه تحت اثر این نوع بارگذاری ارائه شود. به این منظور ابتدا روابط و گرافهایی جهت شبیه‌سازی رفتار غیر خطی قاب‌های چند درجه آزادی بر اساس نتایج حاصل از روش بار افزون، استخراج می‌شود. جهت نشان دادن دقت روش، یک قاب تحت بارگذاری انفجاری مدلسازی شده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی، با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی مقایسه می‌شوند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تحقیق علاوه بر ساده بودن، می‌تواند پاسخ دینامیکی غیر خطی سازه تحت بارگذاری انفجار را با دقت مطلوبی تخمین زند.

**کلمات کلیدی:** تحلیل غیر خطی، بارگذاری انفجاری، روش بار افزون، قاب

### ۱. مقدمه

در حال حاضر، تحقیقات و مطالعات گسترده به منظور یافتن راهکارهایی برای جلوگیری از تخریب ساختمان‌ها در برابر انفجار ضروری می‌باشد. گرچه اثر چنین انفجارهایی در عمر مفید سازه‌های شهری که غالباً سازه‌های مسکونی طراحی شده در برابر نیروهای زلزله می‌باشند بسیار کم است، اما در صورت وقوع باعث ایجاد خرابی‌های شدید در آن‌ها می‌شود. تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی راجع به اثر انفجار روی سازه‌ها صورت گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. در سال ۲۰۰۷، بینگ لی و همکارانش به ارائه یک روش ساده جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار پرداختند. آنها با استفاده از قوانین بقای انرژی و مدلسازی قاب‌های متنوع تحت حالات مختلف بارگذاری، روابطی جهت ساده سازی تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه کردند. نتایج عددی حاصل از تحقیقات آنها، حاکی از محافظه کارانه بودن روش پیشنهادیشان و خطای نسبتاً زیاد بود [۱]. سانگ و همکارانش (۲۰۰۰)، یک روش آنالیز غیرخطی برای قاب‌های فولادی در برابر انفجارها ارائه کردند که در آن رفتار الاستوپلاستیک فولاد با در نظر گرفتن اثرات دمای بالا، خزش و نرخ کرنش‌های بالا مدلسازی شده است [۲]. در سال ۲۰۰۴، لوچیونی و همکارانش خرابی ساختمان‌های بتنی در برابر انفجار را با استفاده از المان‌های سه بعدی Solid مدلسازی کردند [۳]. میاموتو و همکارانش (۲۰۰۰) اثر میراگر مایع ویسکوز (FVD) را در قاب خمشی فولادی ویژه در برابر بارگذاری انفجاری بررسی کردند [۴]. مطالعه آنها نشان داد که استفاده از FVD روش مؤثری در کاهش تغییر مکان جانبی و دوران مفصل‌های پلاستیک در قاب خمشی فولادی ویژه در برابر بارگذاری انفجار می‌باشد.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و تحلیل نیروهای ناشی از پدیده انفجار و تعیین پاسخ سازه در برابر این نیروها با استفاده از یک روش ساده و موثر می‌باشد. به همین منظور، با مدلسازی غیرخطی تعداد زیادی قاب فولادی تحت اثر بارگذاری‌های مختلف انفجاری، روابط و نمودارهایی جهت تخمین پاسخ غیرخطی سازه استخراج می‌شود که به کمک آن‌ها بدون نیاز به تحلیل دینامیکی غیرخطی، می‌توان به طراحی سازه پرداخت. نشان داده می‌شود روابط پیشنهادی که بر اساس نتایج تحلیل بار افزون می‌باشند، دارای دقت مطلوبی در تخمین پاسخ غیرخطی سازه در برابر انفجار هستند.



## ۲. روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی تحقیق، یک روش ساده بر اساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی جهت تخمین پاسخ غیرخطی سازه‌های فولادی در برابر انفجار توسعه داده می‌شود. به این منظور، به بررسی ارتباط بین نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه در برابر انفجار و نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی پرداخته می‌شود. در این راستا، تعداد زیادی قاب فولادی تحت بارگذاری‌های مختلف انفجاری مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج آماری بدست آمده، روابط مورد نظر حاصل می‌شوند. در ادامه‌ی این بخش به جزئیات استخراج روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

### ۲-۱. قاب‌های مورد مطالعه

به منظور بررسی رفتار سازه‌های فولادی تحت اثر بارگذاری انفجار، تعداد ۱۵ نوع قاب فولادی به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که سطح وسیعی از نظر تعداد طبقات و دهانه‌ها را شامل شوند. این ۱۵ نوع قاب در ۵ دسته‌ی متشکل از قاب‌های دو، چهار، شش، هشت و ده طبقه تقسیم‌بندی شده‌اند. هر یک از این دسته‌ها شامل قاب‌های یک، سه و پنج دهانه می‌باشند. با توجه به ترکیب بارگذاری پیشنهادی آئین نامه‌های انفجاری، این قاب‌ها (تعداد ۵۲۵ قاب فولادی با مشخصات سختی و ایمپالس‌های متفاوت) ابتدا تحت بارهای ثقلی طراحی شده و سپس تحت پنج ایمپالس انفجاری متفاوت (منظور از ایمپالس، سطح زیر منحنی بارگذاری انفجار می‌باشد)، مورد تحلیل انفجاری (تحلیل دینامیکی غیرخطی) و تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل قاب‌های مذکور، منجر به حصول روابط و گراف‌هایی گردید که در بخش‌های بعدی معرفی می‌گردند. جهت اطلاع از جزئیات طراحی قاب‌های مورد بررسی، به مرجع [۵] مراجعه شود.

### ۲-۲. تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌ها

گام اول در روند مدل‌سازی انفجار به کمک تحلیل بارافزون، انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی سازه‌های مورد مطالعه می‌باشد. به همین منظور بر روی هر یک از قاب‌ها با مقدار سختی و میزان ایمپالس‌های متفاوت تحلیل دینامیکی صورت گرفته است. این گام از تحقیق، توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS [۶] انجام می‌پذیرد. این نرم‌افزار علاوه بر داشتن توانایی و دقت لازم جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، دارای تحلیل‌گر صریح (Explicit) نیز می‌باشد که مختص بارگذاری‌های دینامیکی با زمان تداوم بسیار کوتاه مانند ضربه و انفجار است که خود نقطه قوتی جهت برگزیدن این نرم‌افزار برای تحلیل سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش بود. با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی، می‌توان تغییر شکل نسبی کلی سازه (Overall Drift) را از رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$OD = \frac{\Delta_n}{H} \quad (1)$$

که در رابطه فوق OD تغییر شکل نسبی کلی سازه،  $\Delta_n$  جابه‌جایی دینامیکی طبقه آخر قاب و H نیز ارتفاع سازه می‌باشد.

### ۲-۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌ها

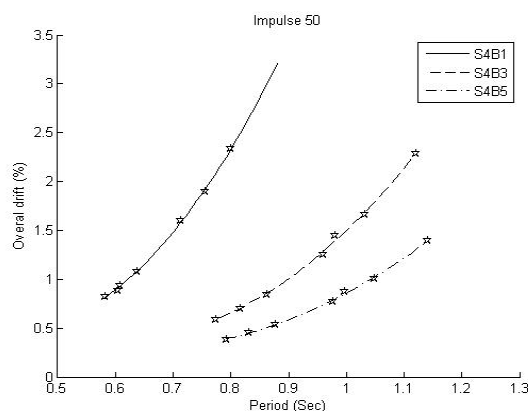
پس از تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌ها و یافتن میزان جابه‌جایی دینامیکی سازه، می‌بایست جهت تعیین میزان جابه‌جایی نسبی استاتیکی طبقات قاب‌های مورد مطالعه، به تحلیل استاتیکی غیرخطی آنها با استفاده از روش بارافزون پرداخت. نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش جهت انجام تحلیل بارافزون، نسخه سوم نرم‌افزار IDASS [۷] می‌باشد. دلیل این انتخاب، روش‌های مدل‌سازی و تحلیل، سرعت پردازش، نوع المان‌های به کار گرفته شده، نحوه ورود اطلاعات و استخراج نتایج، دقت نتایج و همخوانی با نمونه‌های واقعی و آزمایشگاهی می‌باشد. به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، می‌بایست که تغییر مکان هدف را به نرم‌افزار IDASS معرفی نمود. با در اختیار داشتن میزان تغییر شکل نسبی کلی قاب که از تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل می‌شود و استفاده از رابطه (۱)، می‌توان مقدار جابه‌جایی هدف (گره کنترل) را بدست آورد. با تحلیل بارافزون قاب‌های مورد بررسی،



میزان جابه‌جایی نسبی استاتیکی طبقات سازه حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که جهت استفاده از روابط حاصل شده در تحقیق، می‌بایست الگوی بار مستطیلی جهت تحلیل بار افزون انتخاب گردد.

## ۲-۴. منحنی‌های تغییرات تغییر شکل نسبی کلی سازه در برابر دوره تناوب

یکی از منحنی‌های مفیدی که در روش پیشنهادی ارائه می‌شود، تغییرات تغییر شکل نسبی کلی سازه (*Overall Drift*) در برابر دوره تناوب سازه (منحنی *OD-T*) می‌باشد که از آن می‌توان برای تخمین تغییر شکل نسبی کلی سازه بر اساس دوره تناوب استفاده نمود. با بررسی ارتباط بین  $\Delta_n$  حاصل شده از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و پریود سازه ( $T$ )، می‌توان منحنی *OD - T* را حاصل نمود. به عنوان مثال، منحنی *OD - T* برای یک قاب چهار طبقه تحت ایمپالس  $50 \frac{kgf(s)}{cm}$  در شکل (۱) نشان داده شده است. منحنی‌های مشابهی برای سایر قاب‌ها حاصل شده است [۵].



شکل ۱- منحنی *OD - T* برای یک قاب چهار طبقه تحت ایمپالس  $50 \frac{kgf.s}{cm}$

در شکل فوق، عدد بعد از  $S$  بیانگر تعداد طبقات قاب بوده و عدد بعد از  $B$  تعداد دهانه قاب را مشخص می‌سازد. کاربرد این منحنی جهت یافتن میزان تغییر شکل نسبی کلی قاب‌های فولادی (*OD*) تحت ایمپالس‌های متفاوت می‌باشد. روابط (۲) تا (۴) معادلات تغییر شکل نسبی را بر حسب  $T$  که به روش خطای حداقل مربعات استخراج گشته‌اند، برای قاب‌های با تعداد طبقات زوج و دهانه فرد نشان می‌دهند.

$$y_{mn1} = a_{mn1} T^2 + a_{mn2} T + a_{mn3} \quad (2)$$

$$y_{mn2} = b_{mn1} T^2 + b_{mn2} T + b_{mn3} \quad (3)$$

$$y_{mn3} = c_{mn1} T^2 + c_{mn2} T + c_{mn3} \quad (4)$$

در روابط فوق حرف  $m$  معرف تعداد طبقات قاب، حرف  $n$  متغیری از ۱ تا ۵،  $T$  پریود سازه،  $y_{mn1}$  جابه‌جایی نسبی قاب یک دهانه،  $y_{mn2}$  جابه‌جایی نسبی قاب سه دهانه،  $y_{mn3}$  جابه‌جایی نسبی قاب پنج دهانه و پارامترهای  $a$  و  $b$  و  $c$  ضرایبی می‌باشند که از جدول (۱) به دست می‌آیند. به این ترتیب ضرایب مورد نیاز برای کلیه نمودارها و روابط قاب‌های مختلف از این جدول قابل استخراج هستند. جهت یافتن پاسخ قاب‌های با تعداد طبقه فرد و یا دهانه زوج، می‌توان در معادلات حاصل شده درون‌یابی انجام داد.

## ۲-۵. منحنی‌های تغییرات تغییر شکل نسبی دینامیکی در مقابل تغییر شکل نسبی استاتیکی

از آنجا که تغییر شکل نسبی طبقات، یکی از پارامترهای مهمی است که در طراحی سازه در برابر انفجار باید کنترل گردد؛ در این بخش رابطه بین تغییر شکل نسبی دینامیکی و استاتیکی بررسی می‌شود تا بتوان تغییر شکل نسبی دینامیکی را از روی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی تخمین زد. منحنی تغییرات تغییر شکل نسبی دینامیکی در برابر تغییر شکل نسبی استاتیکی ( $D_d - D_s$ )، با بررسی ارتباط بین نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و تحلیل



جدول ۱- ضرایب معادلات OD-T

نوع قاب	n	a <sub>mn1</sub>	a <sub>mn2</sub>	a <sub>mn3</sub>	b <sub>mn1</sub>	b <sub>mn2</sub>	b <sub>mn3</sub>	c <sub>mn1</sub>	c <sub>mn2</sub>	c <sub>mn3</sub>
S2 m=2	1	41.5943	-20.309	3.1151	9.2378	-4.256	0.7122	3.8035	-1.2141	0.1924
	2	40.5088	-15.138	1.9642	12.9062	-5.6098	0.8478	5.7163	-2.0865	0.3394
	3	41.3684	-12.519	1.4766	16.4906	-6.7594	0.9616	6.8867	-2.119	0.2819
S3 m=3	4	42.7145	-10.492	1.1596	24.9161	-11.821	1.8249	9.9267	-3.7897	0.581
	5	50.7794	-11.819	1.2846	27.575	-11.882	1.6875	12.7812	-5.0671	0.7618
	1	17.958	-13.372	3.0501	5.3644	-4.3631	1.1562	2.3426	-1.4925	0.4669
	2	13.809	-6.8495	1.1857	7.9796	-6.6094	1.71	3.6393	-2.6279	0.7675
	3	21.106	-11.979	2.2846	10.548	-8.6395	2.1729	5.6042	-4.5748	1.3223
S4 m=4	4	28.18	-16.877	3.3509	14.237	-11.861	2.9341	7.3174	-6.1234	1.7308
	5	43.685	-28.842	5.8886	17.213	-14.209	3.4542	8.8521	-7.295	1.9818
	1	9.3543	-8.8708	2.3685	3.4917	-4.0634	1.3981	1.5581	-1.4621	0.4053
	2	5.2535	-1.6802	-0.263	5.4129	-6.6034	2.3353	2.6762	-3.0291	1.0251
	3	12.805	-10.713	2.7086	7.1772	-8.7077	3.0287	4.3362	-5.5114	2.0337
S5 m=5	4	19.367	-18.06	5.009	9.363	-11.249	3.7975	5.3496	-6.7242	2.4384
	5	29.412	-29.435	8.4521	11.442	-13.788	4.6462	6.2924	-7.7406	2.7341
	1	6.2972	-7.772	2.6351	1.8226	-2.3389	0.8601	0.2162	0.8262	-0.8712
	2	1.6746	2.261	-2.1877	3.2425	-4.8839	2.1123	0.5287	0.5992	-0.8047
	3	9.263	-10.816	3.5732	5.0399	-8.1105	3.7178	0.9929	0.09	-0.7107
S6 m=6	4	15.401	-20.405	7.5778	11.073	-20.777	10.513	10.67	-23.226	13.446
	5	19.773	-26.443	9.7633	8.9087	-14.528	6.4321	0.9838	1.5351	-1.6846
	1	4.6278	-7.1022	2.8619	1.005	-1.2333	0.3466	-0.3096	2.1103	-1.9705
	2	0.9991	2.5194	-2.9898	2.2393	-4.0861	2.1197	-0.1437	2.0865	-2.1379
	3	7.0773	-10.659	4.4874	3.7182	-7.4506	4.1505	-0.383	3.356	-3.3229
S7 m=7	4	12.082	-20.53	9.6223	10.168	-24.444	15.475	-0.6532	4.8012	-4.6851
	5	13.988	-23.363	10.794	7.3711	-15.283	8.4544	-1.3155	7.448	-6.9507
	1	4.4228	-9.0368	4.8101	1.4038	-2.9958	1.725	0.0383	1.0447	-1.4539
	2	3.2587	-4.7074	1.4587	2.2425	-5.1456	3.1967	0.9402	-1.6056	0.5942
	3	6.5428	-12.974	6.9909	3.6845	-9.1061	6.03	1.175	-1.9073	0.683
S8 m=8	4	9.4115	-19.516	10.959	8.2017	-22.894	16.693	1.4408	-2.2437	0.6465
	5	10.918	-22.46	12.566	6.2342	-15.645	10.363	1.6485	-2.3351	0.3741
	1	4.2634	-10.885	7.2846	1.8357	-5.2527	3.9722	1.0928	-3.1485	2.4104
	2	4.892	-11.874	7.6452	2.6219	-7.6107	5.8297	1.4283	-4.0494	3.0455
	3	5.6661	-13.602	8.8184	4.0036	-12.023	9.4577	1.9298	-5.5531	4.2275
S9 m=9	4	7.5339	-18.398	12.109	6.0252	-18.675	15.045	2.5611	-7.5565	5.8882
	5	8.6522	-21.068	13.901	5.2763	-15.509	11.955	3.2081	-9.5697	7.5196
	1	4.9354	-15.454	12.576	1.6692	-5.5161	4.7709	1.0016	-3.3169	2.884
	2	5.8764	-17.758	14.031	2.2332	-7.356	6.3422	1.2939	-4.2252	3.621
	3	6.4282	-18.842	14.485	3.1838	-10.712	9.4024	1.5869	-5.1462	4.3833
S10 m=10	4	6.8993	-19.667	14.946	4.3714	-14.998	13.376	2.0325	-6.6947	5.789
	5	6.3508	-17.361	12.941	5.0319	-17.109	15.116	2.6236	-8.8295	7.7879
	1	6.5906	-25.075	24.46	1.5065	-5.6257	5.5607	0.9568	-3.6079	3.6393
	2	7.1771	-25.888	24.025	1.8604	-6.7935	6.5542	1.2246	-4.5672	4.5341
	3	7.1108	-24.486	21.868	2.4361	-8.9337	8.6177	1.355	-4.9109	4.7457
4	6.0856	-19.606	16.63	3.2663	-12.205	11.941	1.6644	-6.0623	5.8658	
5	3.9263	-11.117	8.6651	4.7678	-18.38	18.396	2.1061	-7.815	7.6708	

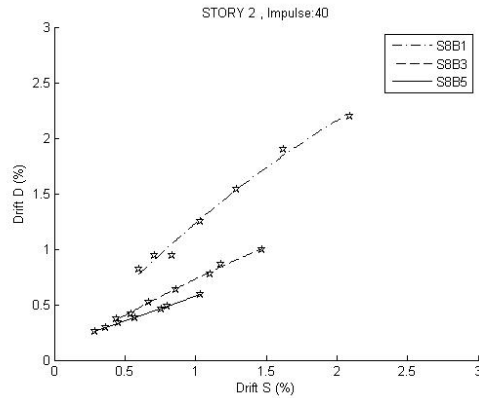
غیرخطی حاصل می‌شود. در شکل (۲) نمونه‌ای از منحنی  $D_d - D_s$  برای طبقه دوم یک قاب ۸ طبقه تحت ایپالس  $kgf(s)$  ۴۰ به نمایش درآمده است. منحنی‌های مشابهی برای سایر قاب‌ها حاصل شده است [۵]. نتایج حاصل از این منحنی‌ها را می‌توان به عنوان هدف اصلی این تحقیق بیان کرد. همانطور که ذکر گردید، هدف از تحقیق حاضر استفاده از روشی ساده (تحلیل بارافزون) جهت تخمین جابه‌جایی قاب‌های فولادی تحت اثر انفجار می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۲) پیداست، با در اختیار داشتن میزان جابه‌جایی نسبی استاتیکی یک طبقه از قاب، می‌توان جابه‌جایی نسبی دینامیکی متناظر با طبقه‌ی مورد نظر را به دست آورد. جهت روشن‌تر شدن موضوع، در انتهای تحقیق به ذکر مثال عددی و همچنین صحت سنجی منحنی‌های فوق پرداخته شده است. به منظور کارایی بهتر روش پیشنهادی، در روابط (۵) تا (۷)، معادلات منحنی‌های  $D_d - D_s$  برای قاب‌های مختلف که به روش خطای حداقل مربعات استخراج گشته‌اند، برای قاب‌های با تعداد طبقات زوج و دهانه فرد نشان داده شده است.

$$y_{msn1} = a_{msn1} x^2 + a_{msn2} x + a_{msn3} \quad (۵)$$

$$y_{msn2} = b_{msn1} x^2 + b_{msn2} x + b_{msn3} \quad (۶)$$

$$y_{msn3} = c_{msn1} x^2 + c_{msn2} x + c_{msn3} \quad (۷)$$

در روابط فوق حرف  $m$  معرف تعداد طبقات قاب، حرف  $n$  متغیری از ۱ تا ۵، حرف  $s$  معرف شماره طبقه مورد نظر قاب،  $x$  جابه‌جایی نسبی استاتیکی سازه،  $y_{msn1}$  جابه‌جایی نسبی دینامیکی طبقات قاب یک دهانه،  $y_{msn2}$  جابه‌جایی نسبی دینامیکی طبقات قاب سه دهانه،  $y_{msn3}$  جابه‌جایی نسبی دینامیکی طبقات قاب پنج دهانه و پارامترهای  $a$  و  $b$  و  $c$  ضرایبی می‌باشند که از جدول (۲) به دست می‌آیند. به منظور درون‌یابی پاسخ قاب‌های



شکل ۲- تغییرات دررفت دینامیکی بر حسب دررفت استاتیکی برای طبقه دوم یک قاب هشت طبقه تحت ایمپالس  $40 \text{ kgf.s/cm}$

با تعداد طبقات فرد و دهانه‌های زوج، می‌بایست اقدام به برازش معادلات منحنی‌های  $D_d - D_s$  شود.

جدول ۲- ضرایب معادلات  $D_d - D_s$

$C_{msn3}$	$C_{msn2}$	$C_{msn1}$	$b_{msn3}$	$b_{msn2}$	$b_{msn1}$	$a_{msn3}$	$a_{msn2}$	$a_{msn1}$	n	نوع قاب
0.2043	0.9847	0.0288	-0.0244	1.8292	-0.3058	-0.1237	2.2349	-0.0727	1	m=2 s=1
0.2459	1.0997	0.0329	0.052	1.7114	0.0506	-0.3238	2.757	-0.2029	2	
0.2101	1.581	-0.1669	-0.0885	2.4227	-0.2592	-0.2651	2.6731	-0.0949	3	
0.3871	1.2518	0.2393	-0.1893	2.9005	-0.3589	-0.3189	2.8426	-0.1442	4	m=2 s=2
0.3483	1.6893	0.0609	-0.1002	2.9247	-0.3214	-0.692	3.5453	-0.4058	5	
-0.2114	1.034	-0.0325	0.048	0.3697	0.1762	0.0091	0.5483	-0.0876	1	
-0.2388	0.9364	-0.0737	-0.1957	0.8454	-0.1428	0.0735	0.4426	-0.0822	2	m=4 s=1
-0.2061	0.6191	0.0347	0.0912	0.1744	0.0555	0.1052	0.3684	-0.0806	3	
-0.409	0.9363	-0.1997	0.056	0.1425	0.02	0.1491	0.2896	-0.0645	4	
-0.394	0.7238	-0.1295	0.0005	0.0975	0.0204	0.1009	0.3684	-0.0878	5	m=4 s=2
0.1837	1.1268	-0.1618	0.2502	0.6905	0.8321	0.5236	0.5226	1.8931	1	
0.2492	1.1579	0.0389	0.068	1.6464	0.4106	0.9955	-1.449	4.3822	2	
0.3568	1.185	0.2757	-0.669	4.0898	-0.6832	1.047	-1.5799	5.0025	3	m=4 s=3
0.2152	2.1927	-0.3022	0.1556	1.9994	1.0243	0.8825	-1.1133	5.0103	4	
0.1827	2.7626	-0.4374	0.0387	2.6347	1.2594	-1.5137	5.3789	1.0889	5	
0.111	0.496	0.0993	0.1344	0.495	0.1068	-0.0175	1.038	-0.001	1	m=4 s=4
0.2083	0.2947	0.1836	0.1417	0.59	0.0718	0.3362	0.6013	0.1719	2	
0.1827	0.4844	0.0824	0.5625	0.0191	0.2559	-0.4139	2.1273	-0.4586	3	
0.1629	0.5576	0.0863	0.6279	0.1615	0.1621	-0.4833	2.2145	-0.4868	4	m=6 s=1
0.1835	0.4791	0.1329	0.1135	1.0984	-0.149	-0.7429	2.5169	-0.5674	5	
-0.0702	0.987	0.2803	-0.681	3.0106	-1.233	-0.4563	1.8588	-0.352	1	
-0.2202	1.4828	-0.1209	-0.5917	2.4054	-0.736	-1.3318	3.0784	-0.7655	2	m=6 s=2
-0.3182	1.6637	-0.3027	-0.965	2.9242	-0.8953	-0.4462	1.5087	-0.2219	3	
-0.1784	1.2412	-0.128	-0.8216	2.3485	-0.5892	-0.2799	1.312	-0.1991	4	
-0.3385	1.5648	-0.3113	-0.447	1.763	-0.471	1.992	-0.9157	0.2767	5	m=6 s=3
0.4218	-3.7098	10.284	0.1646	0.0517	0.3063	-0.1876	0.6079	-0.1542	1	
-0.6578	3.5579	-3.1803	0.4047	-0.516	0.2682	-0.4961	1.0321	-0.3032	2	
-0.6133	2.5474	-1.9667	0.3537	-0.4371	0.1146	-0.3289	0.6644	-0.1601	3	m=6 s=4
-0.7086	2.3993	-1.7956	0.2584	-0.4259	0.1595	-0.1785	0.4824	-0.1124	4	
0.2719	-0.9385	0.6163	0.2235	-0.4825	0.1843	0.4473	-0.137	0.0255	5	
0.1749	1.0512	-0.0974	0.1777	0.9471	0.6742	0.3471	1.1167	1.7282	1	m=6 s=5
0.2613	1.0064	0.1631	0.3126	0.5339	1.4413	0.5209	0.7528	2.9598	2	
0.5786	0.2826	1.0657	-0.0547	2.0359	0.8193	1.3259	-2.978	8.1256	3	
1.2889	-1.1829	2.1528	-1.4377	6.7231	-1.8208	1.4257	-3.6977	10.188	4	m=6 s=6
1.6005	-1.1342	2.0515	0.601	-0.0434	4.0968	0.398	0.0952	7.997	5	
0.1868	0.255	0.2237	0.0583	0.6565	0.0235	0.399	0.3185	0.3124	1	
1.042	-1.4028	0.97	-0.1809	1.2053	-0.1607	0.9313	-0.3737	0.6072	2	m=6 s=7
2.0053	-2.6667	1.3179	-0.4174	1.4869	-0.1495	0.239	1.1597	-0.037	3	
2.5447	-3.0512	1.289	-1.6743	3.382	-0.7904	-0.6839	2.9	-0.7493	4	
3.1476	-3.357	1.2163	-0.4223	1.9443	-0.3983	-1.4072	4.1335	-1.2347	5	m=6 s=8
0.6342	-0.8977	0.9941	0.1561	0.4192	0.177	0.5335	0.1276	0.3644	1	
0.5375	-0.3388	0.5224	0.074	0.7309	0.0231	1.1394	-0.5492	0.6128	2	
-0.7655	2.1077	-0.5198	0.1755	0.867	-0.0825	0.1308	0.7944	0.2442	3	m=6 s=9
-1.2305	2.6506	-0.6122	-0.7728	2.3345	-0.5403	0.0246	0.9411	0.2363	4	
-1.3228	2.5343	-0.4576	0.0646	0.8432	0.1507	0.8652	0.0076	0.5069	5	
-3.4597	13.388	-11.034	0.2937	-0.2672	1.1419	-0.02	0.8944	-0.0684	1	m=6 s=10
-5.203	14.682	-8.859	-0.9368	2.5747	-0.6046	-0.8257	2.1968	-0.4927	2	
-4.8486	10.545	-4.7101	-0.5571	1.7292	-0.3453	-0.9841	2.3291	-0.5145	3	
-3.1917	5.6477	-1.8153	0.4864	0.1689	0.1391	-0.3114	1.5955	-0.3362	4	



-2.2168	3.3763	-0.7865	0.3513	0.267	0.0705	0.2585	0.9975	-0.1999	5	m=6 s=5
-1.5585	7.138	-4.026	0.0492	0.6495	0.9115	-0.337	1.6394	-0.2994	1	
-1.609	5.8672	-1.8901	0.5685	-0.3404	0.8009	-1.4714	2.8204	-0.6625	2	
1.5694	-5.0852	6.2574	0.1295	1.2919	-0.6256	-0.776	1.726	-0.3365	3	
2.8011	-6.7783	5.5638	0.2067	0.7701	-0.2367	-0.049	0.8814	-0.1431	4	
2.4679	-3.8299	2.344	0.0786	1.052	-0.4028	1.2424	-0.4054	0.1387	5	
-1.71	16.683	-31.667	-1.3882	16.149	-37.837	-0.4143	1.2271	-0.514	1	m=6 s=6
-9.752	75.6	-140	3.8767	-19.49	25.248	-0.3694	0.8462	-0.2861	2	
-7.0437	45.136	-68.244	4.51	-18.366	18.589	-0.3136	0.6543	-0.1933	3	
44.475	-274.75	425	2.3282	-7.5078	5.7207	-0.241	0.5274	-0.1479	4	
-0.8029	6.2542	-11.031	0.6225	-1.739	0.8704	0.2472	0.019	-0.0233	5	
0.0758	1.821	-1.608	0.1093	1.4369	-0.46	-0.0081	2.5708	0.2172	1	m=8 s=1
0.1834	1.387	-0.3946	0.3268	0.4994	1.1419	0.3805	1.3158	2.2539	2	
0.2198	1.7386	-0.512	0.2595	1.2422	0.8372	0.9361	-1.4	6.9233	3	
0.1505	2.5653	-0.976	0.1794	2.0087	0.7094	0.8405	-1.1186	8.3425	4	
0.1101	3.3763	-1.4126	-0.1206	3.6072	0.0398	1.2022	-3.283	13.212	5	
0.0991	0.4887	-0.0703	0.684	-0.1208	0.684	-0.1726	1.3265	-0.1551	1	m=8 s=2
0.1405	0.4133	0.0219	0.0383	0.7666	-0.0741	-0.004	1.3922	-0.1558	2	
0.1176	0.6286	-0.1012	-0.1379	1.2359	-0.2243	-0.0757	1.7775	-0.2735	3	
0.2649	0.4076	0.0033	-0.2945	1.6233	-0.3586	-1.1251	4.1626	-1.4066	4	
0.492	0.0127	0.1879	0.0015	1.235	-0.1943	-1.4469	4.666	-1.5153	5	
-0.0002	0.8633	-0.1796	0.1764	0.3301	0.2553	0.692	0.0243	0.3499	1	m=8 s=3
0.1148	0.505	0.0791	0.1556	0.5157	0.1804	0.8908	-0.3844	0.6291	2	
0.1609	0.4322	0.1597	-0.1543	1.051	0.0543	0.8472	-0.3971	0.8001	3	
0.1077	0.5547	0.1313	-0.129	1.0293	0.1018	2.0506	-2.3147	1.6198	4	
0.2461	0.2961	0.266	-0.199	1.1615	0.0915	1.0128	-0.5366	1.0378	5	
0.0639	0.3878	0.1907	0.1297	0.4276	0.0269	-0.2277	1.1579	-0.1539	1	m=8 s=4
0.047	0.6433	-0.1794	-0.1564	1.0472	-0.2128	-0.53	1.6825	-0.294	2	
0.1903	0.3996	-0.0794	-0.1333	1.0143	-0.2002	-0.4282	1.7129	-0.3196	3	
0.1529	0.5181	-0.0788	-0.0321	0.9261	-0.1742	-0.598	2.0182	-0.4269	4	
0.1811	0.4934	-0.0601	-0.0532	1.0328	-0.222	-1.1246	2.7844	-0.6732	5	
-0.0497	1.1789	-0.2319	-0.0486	0.9428	0.3069	0.686	0.1076	0.2572	1	m=8 s=5
0.1463	0.2184	0.8398	0.0613	0.6941	0.3495	-0.083	1.0532	0.0045	2	
-0.0482	0.9249	0.2164	0.2834	0.3878	0.3535	-0.4105	1.5121	-0.1478	3	
-0.1934	1.2	0.0629	-0.0166	0.9094	0.1475	0.425	0.6253	0.074	4	
-0.3341	1.3517	0.0311	-0.0065	0.8864	0.1394	2.2471	-1.0577	0.4268	5	
-0.2324	1.8349	0.5894	-0.2286	2.15	-1.2239	-0.376	1.5732	-0.2983	1	m=8 s=6
-0.4777	2.8376	-0.7256	-0.2705	1.9901	-0.8402	-0.5699	1.8153	-0.392	2	
-0.2894	2.1561	-0.9889	0.0562	0.9432	-0.1574	-0.4879	1.6578	-0.3504	3	
0.905	-2.8071	3.8697	0.6085	-0.1565	0.2522	0.1733	0.8977	-0.162	4	
0.142	0.0915	1.013	0.4506	0.1854	0.0301	0.9662	0.1333	0.0003	5	
0.3082	-3.0324	15.299	1.4171	-9.6019	21.636	-0.4312	1.9736	-0.3547	1	
2.2796	-18.955	45.107	2.7239	-14.82	24.25	-0.7768	2.1992	-0.5662	2	m=8 s=7
2.0424	-15.151	33.313	0.3901	-0.757	2.8829	-1.0158	2.1793	-0.525	3	
0.2401	-2.9264	11.645	-0.3626	2.3188	-0.8173	-0.8916	1.8761	-0.4325	4	
-1.6881	8.784	-6.8941	0.1406	0.7988	-0.0542	0.2394	0.3851	-0.0192	5	
0.2915	-5.5631	37.976	-2.2655	24.35	-57.483	-0.8012	3.1838	-2.4342	1	
2.5396	-36.992	139.83	-1.0524	7.9096	-10.022	-0.4163	1.3502	-0.7396	2	m=8 s=8
18.018	-209.88	612.5	13.35	-92.722	161.11	-0.116	0.4451	-0.1772	3	
-14.28	129.3	-290	38.926	-235.72	356.14	-0.3662	0.7211	-0.2438	4	
-4.5	19	0	26.752	-138.43	177.94	-0.3441	0.5803	-0.1731	5	
0.1341	0.9138	0.7171	0.0966	1.4069	-0.4209	-0.1446	3.6582	-1.3533	1	
0.0668	2.4075	-2.249	-0.0448	2.8959	-2.3915	0.0858	3.4334	-0.6825	2	m=10 s=1
0.1479	2.6609	-2.3277	0.2591	1.5343	-0.0067	0.196	3.7281	-0.4749	3	
0.3484	1.9149	-0.7389	0.4457	1.0332	1.0997	-0.2287	6.5545	-3.1384	4	
0.4883	1.4507	0.6398	0.476	1.2191	1.4498	-0.1048	6.3153	-2.1409	5	
-0.0067	1.0304	-0.8467	0.1734	0.2238	0.1502	-0.0846	1.2159	-0.1771	1	
0.0494	0.7271	-0.3171	0.1654	0.3556	0.1083	0.1278	1.1061	-0.0526	2	m=10 s=2
0.1426	0.3935	0.0396	0.0904	0.6387	0.0031	-0.0434	1.5828	-0.1299	3	
0.1296	0.5226	0.0012	0.1833	0.4599	0.1627	-0.5967	2.8104	-0.5948	4	
0.1088	0.7246	-0.0885	-0.1673	1.2929	-0.1489	-0.104	1.6777	0.1062	5	
0.1039	0.389	0.1278	0.0774	0.5018	0.0735	-0.0613	1.1548	-0.0483	1	
0.1236	0.4784	-0.0174	0.1423	0.4691	0.1164	0.1553	1.0234	0.0265	2	m=10 s=3
0.1455	0.4588	0.035	0.2168	0.4096	0.2022	0.455	0.7038	0.2076	3	
0.1907	0.3378	0.1771	0.0975	0.6986	0.1499	0.6059	0.5086	0.3782	4	
0.1379	0.4688	0.1664	-0.097	1.0512	0.0824	0.4649	0.7617	0.3755	5	
-0.0251	0.7874	-0.3082	0.0317	0.6303	-0.0889	0.1378	0.5525	0.0121	1	
-0.007	0.6918	-0.1708	0.088	0.4675	0.0442	0.0751	0.7882	-0.025	2	m=10 s=4
-0.0018	0.7357	-0.1744	0.1035	0.4662	0.0443	-0.1285	1.1507	-0.0933	3	
0.1569	0.4412	-0.0135	-0.0713	0.825	-0.0739	-0.3024	1.3864	-0.1113	4	
0.0968	0.587	-0.0568	-0.3978	1.3302	-0.2117	-0.7326	2	-0.2683	5	
-0.06	1.0292	-0.2015	-0.0863	1.0414	-0.1617	-0.1174	1.1665	-0.0639	1	
-0.0023	0.7866	-0.0296	0.0982	0.5532	0.1393	0.4142	0.5501	0.1061	2	m=10 s=5
0.225	0.1431	0.3778	-0.1395	1.0273	-0.0052	0.5047	0.514	0.1394	3	
0.0465	0.6674	0.0721	-0.4668	1.4874	-0.1135	0.5704	0.4748	0.1857	4	
-0.1235	1.0174	-0.0752	-0.8544	1.9152	-0.2047	0.8773	0.1428	0.2992	5	
0.1157	0.0742	1.1274	0.1372	0.4187	0.247	-0.0234	0.7774	-0.0083	1	
0.0324	0.7319	0.0575	0.0621	0.7141	0.0114	-0.2572	1.0692	-0.0733	2	m=10 s=6
-0.2278	1.6768	-0.7303	-0.0199	0.9452	-0.1418	-0.4833	1.3373	-0.133	3	
-0.2961	1.8026	-0.7387	-0.2301	1.3076	-0.2928	0.0417	0.8871	-0.0359	4	



-0.2057	1.4695	-0.5143	-0.2333	1.2744	-0.2751	-0.4981	1.5689	-0.2086	5	m=10 s=7
-0.1812	1.9495	0.3016	-0.0897	0.8612	1.8422	-0.122	1.3243	-0.0453	1	
-0.128	0.9382	2.2684	-0.0062	0.7351	1.0823	0.1672	0.7858	0.0735	2	
0.1091	-0.1393	2.9346	-0.017	0.9713	0.4211	0.1032	0.8878	0.0144	3	
-0.2006	1.3018	0.8733	0.0163	0.8285	0.4221	0.2358	0.8328	-0.0045	4	
-0.2531	1.5463	0.388	0.2996	0.3809	0.4384	0.2151	0.923	-0.0512	5	m=10 s=8
0.4605	-3.955	13.571	0.0792	-0.0794	4.0616	-0.1237	1.1301	0.0196	1	
1.1921	-9.095	21.769	-1.0831	6.2555	-5.1092	-0.1956	1.0239	-0.0318	2	
0.656	-4.4277	11.533	-0.808	4.4578	-3.0539	-0.6305	1.4453	-0.1789	3	
0.2446	-1.7671	6.77	-0.6155	3.4567	-2.1027	-0.0531	0.7182	-0.0267	4	
0.0521	0.2296	2.3213	0.4257	0.3077	0.0724	-0.254	1.0422	-0.1499	5	m=10 s=9
0.0558	-0.034	10.29	2.604	-26.733	75.91	0.927	-2.26	3.376	1	
1.9575	-22.222	71.282	2.4699	-22.391	57.841	-0.2875	1.2155	0.1121	2	
3.6593	-35.766	94.694	0.8485	-7.9731	23.67	-0.2441	0.736	0.0964	3	
7.1609	-61.477	138.64	-0.6406	2.8993	2.0997	0.1139	0.2162	0.1287	4	
5.2401	-41.881	90.47	0.7365	-2.3155	4.962	0.3586	-0.0453	0.137	5	

### ۳. صحت‌سنجی روش پیشنهادی

در این بخش به منظور بررسی میزان دقت روش ارائه شده، به مطالعه موردی یک قاب فولادی پرداخته می‌شود. قابی که در این بخش مورد مطالعه قرار گرفته عبارت است از یک قاب ۶ طبقه سه دهانه. مشخصات سازه‌ای قاب مذکور به همراه شدت ایمپالس انفجاری وارده به قاب در جدول (۳) ارائه شده است. عرض باربر قاب مورد مطالعه ۴ متر در نظر گرفته شده است. همچنین با فرض فولاد مصرفی ST-37 کلیه مشخصات الاستیک و پلاستیک مربوط به این نوع فولاد در نرم‌افزارهای مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است. ارتفاع طبقات قاب ۳ متر و دهانه‌های قاب نیز ۴ متر فرض شده است.

جدول ۳ - مشخصات سازه‌ای قاب مورد بررسی

ایمپالس $\frac{kgf(s)}{cm}$	بار مرده و زنده $\frac{kg}{m^2}$	مقاطع ستون‌ها در هر طبقه						مقطع تیرها	نوع قاب
		۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۵۶	۶۰۰	IPB 220	IPB 220	IPB 240	IPB 240	IPB 260	IPB 260	IPE220	S6B3

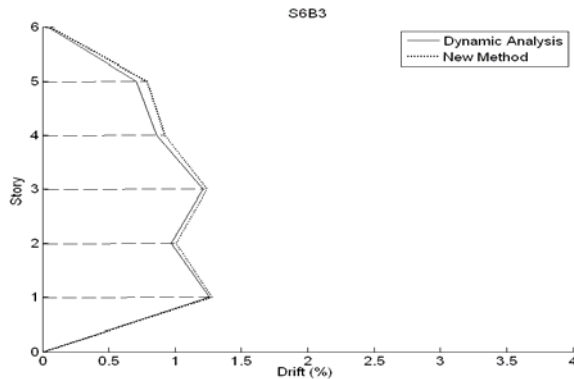
همچنین به منظور بررسی میزان دقت روش پیشنهادی، نیاز به مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی و نتایج روش مذکور می‌باشد. به همین دلیل بر روی قاب مورد مطالعه یک بار تحلیل دینامیکی و بار دیگر تحلیل بارافزون صورت گرفته است. نتایج حاصله در جدول (۴) گردآوری شده‌اند. نتایج عددی جدول (۴) نشان می‌دهد که حداکثر مقدار اختلاف روش دینامیکی غیرخطی و روش پیشنهادی در این مثال، ۰/۰۸ درصد (معادل ۰/۲۴ سانتیمتر در قاب‌های با ارتفاع طبقه ۳ متر) می‌باشد. بنابراین روش ارائه شده ضمن سادگی محاسباتی، از دقت مطلوبی برخوردار می‌باشد. به منظور انجام

جدول ۴ - مقایسه نتایج دقیق و تقریبی قاب مورد بررسی

نوع قاب	روش تحلیل	Drift D <sub>1</sub> (%)	Drift D <sub>2</sub> (%)	Drift D <sub>3</sub> (%)	Drift D <sub>4</sub> (%)	Drift D <sub>5</sub> (%)	Drift D <sub>6</sub> (%)
S6B3	دینامیکی غیرخطی	۱/۲۶	۰/۹۷	۱/۲۱	۰/۸۶	۰/۷۱	۰/۰۴
	روش پیشنهادی	۱/۲۸	۱/۰۱	۱/۲۴	۰/۹۲	۰/۷۹	۰/۰۶
	میزان اختلاف دو روش	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۲



مقایسه‌ی بهتر نتایج حاصل از روش پیشنهادی و روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، در شکل (۳) توزیع تغییر شکل نسبی طبقات در قاب مورد مطالعه، به نمایش درآمده است.



شکل ۳- توزیع تغییر شکل نسبی قاب شش طبقه سه دهانه

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک روش جدید جهت تحلیل غیرخطی سازه تحت اثر بارگذاری انفجار توسعه داده شد که پیچیدگی‌ها و دشواری‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی را نداشته و در عین حال از دقت مطلوبی نیز برخوردار است. به این منظور قاب‌های زیادی تحت بارگذاری‌های مختلف انفجاری مدل‌سازی شده و رفتار غیرخطی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس روابط و گراف‌هایی بر اساس نتایج روش بارافزون استخراج شدند که می‌توانند تخمین بسیار مناسبی از پاسخ دینامیکی غیرخطی قاب‌های فولادی تحت اثر بارگذاری انفجاری را ارائه دهند. نشان داده شد که نتایج روش پیشنهادی در تعیین توزیع تغییر شکل نسبی طبقات سازه، از دقت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند برای مقاصد مهم‌تری همچون طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. گرچه محدوده‌ای خاص از نظر تعداد طبقات و تعداد دهانه برای قاب‌هایی که با این روش مورد تحلیل قرار می‌گیرند تعریف شده است، اما با توجه به نتایجی که از این تحقیق حاصل گردید و همچنین سادگی و سهولت کاربرد روش مذکور در مقایسه با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، می‌توان تحقیق حاضر را سرآغازی جهت انجام مطالعات و پژوهش‌های گسترده جهت تعمیم روابط حاصل شده به تمامی قاب‌ها بدون در نظر گرفتن شرایط خاص و اعمال محدودیت‌ها دانست.

#### ۵. مراجع

1. Bing Li, Hai-Cheng Rong, Tso-Chien Pan (2007), " Drift Controlled Design of Reinforced Concrete Frame Structures Under Distant blast Conditions", Nanyang Technological University, Singapore
2. Song, L., Izzudin, A., Elnashai, A.S., 2000, " An integrated adaptive environment for fire and explosion analysis of steel frames – Part I: Analytical models", p. 63-85.
3. Luccioni, B.M., Ambrosini, R.D., Danesi, R.F., 2004, " Analysis of building collapse under blast loads ", Eng. Struct. 26, p63-71.
4. Miyamoto, H.K., Taylor, D., 2000, " Structural control of dynamic blast loading ", Advanced Technology in Structural Engineering, Proceeding from structures Congress, ASCE, Reston, VA.
5. قوام، سید افشین، ۱۳۸۹، "تحلیل بار افزون قاب‌های فولادی تحت اثر بار انفجار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کردستان.
6. Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, 2000, " ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.5", v. I & II.
7. S.K.Kunnath, (1999), IDASS version 3, a program for the Inelastic Damage Analysis of Structural Systems, University of Central Florida.