



بررسی تاثیر اندرکنش خاک - سازه بر روی عملکرد سیستم قاب و دیوار برشی بتنی

صهبا شریعت یزدی¹، رضا پورحسینی²، علیرضا میرجلیلی³

1- کارشناس ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، یزد، ایران

shariat_s98@yahoo.com

2- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

r_porhoseini@yazd.ac.ir

3- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، یزد، ایران

mirjalili@iauyazd.ac.ir

چکیده

در بررسی رفتار لرزه ای سازه ها عموماً خاک زیر شالوده صلب فرض شده و از اثرات انعطاف پذیری خاک چشم پوشی می شود. در این پژوهش 8 نوع قاب بتنی به همراه دیوار برشی بتنی بر روی سه نوع خاک مطابق آیین نامه 2800 مدل شده است و فاکتورهای مختلفی نظیر تغییر مکان نسبی طبقات و میزان دوران مفاصل تیرهای متصل به دیوار برشی با هم مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد عدم در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در خلاف جهت اطمینان است.

واژه های کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، تحلیل دینامیکی، قاب بتنی، فنر، میراگر

1. مقدمه

اندرکنش بین سازه و محیط خاک تکیه گاهی آن رفتار واقعی سازه را در مقایسه با رفتار سازه با تکیه گاه صلب تغییر می دهد. در حالت اندرکنش خاک-سازه، پاسخ متاثر از پاسخ لایه خاک و پاسخ لایه خاک متاثر از حضور سازه بوده و خاک و سازه اثر متقابل بر پاسخ یکدیگر دارند [1].

اما محاسبه پاسخ سازه یا خاک با در نظر گرفتن اثر متقابل آن دو روی یکدیگر به سادگی تحلیل یک سیستم چند درجه آزادی دینامیکی نمی باشد. در این میان برخلاف سازه که یک محیط محدود است و می تواند به راحتی با تعداد محدودی درجه آزادی دینامیکی به طور دقیق مدل و تحلیل شود، خاک یک فضای نیمه بینهایت است که رفتار دینامیکی آن تابع فرکانس تحریک می باشد. از این رو از سه دهه گذشته تاکنون روش های متفاوتی برای تحلیل مساله اندرکنش خاک-سازه طرح شده است [2]. در سالهای اخیر نیز تحقیقات بسیاری توسط افراد مختلف انجام شد. از جمله تحقیقی که در سال 2012 توسط J.Th.Snabjornsson تحت عنوان اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ ساختمانهای کوتاه بتنی در حوزه نزدیک و دور ارائه شده است [3]. همچنین در سال 2011 تحقیقی تحت عنوان بررسی عملکرد لرزه ای قاب و دیوار برشی بتنی با در نظر گرفتن اثر



اندرکنش خاک- فونداسیون- سازه انجام گرفت که نتایج آن نشان می دهد فرض پای گیردار در خلاف جهت اطمینان برای طراحی و بهسازی سازه ها است [4]. در سال 2013 پژوهشی توسط Chinmayi, Jayalecshmi ارائه شده که در آن سازه های دارای دیوار برشی تحت بار لرزه ای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در سازه هایی که در آنها اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده بود با سازه هایی که با فرض پای صلب تحلیل شده بودند بسیار متفاوت بود [5]. همچنین تحقیقات بسیاری برای نحوه تحلیل اندرکنش خاک- سازه بسته به روش مدل کردن کردن محیط خاک انجام شده است. به طور کلی تمام روشها به دو دسته اصلی تقسیم می شوند. روش مستقیم که پاسخ دینامیکی سازه و خاک اطراف آن در یک گام آنالیز با در نظر گرفتن ترکیب سیستم خاک- سازه، در نظر گرفته می شود. روش دیگر روش زیر سازه است که سازه در گامهای مختلف تحلیل می شود [6]. روشهای متفاوتی از روشهای عددی مانند المان محدود، روش المان مرزی و روشهای هیبریدی به طور معمول برای مدل سازی اثرات اندرکنش خاک- سازه استفاده می شوند [7]. همچنین خصوصیات محلی خاک مانند جنس خاک، لایه ای بودن خاک و نیز تغییرات عمق پایه از عوامل موثر بر رفتار لرزه ای سازه می باشد که باید مورد بررسی قرار گرفته و در تحلیل سازه لحاظ گردد [8]. در این پژوهش از روش زیر سازه استفاده شده است.

2. لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک- سازه

اندرکنش خاک و سازه بدلیل رفتار پیچیده خاک و تفاوت در دو محیط رفتاری خاک و سازه باعث شده که مدل ریاضی حاکم بر این رفتار از پیچیدگی خاصی برخوردار باشد. اکثرا با ساده سازی این رفتار را مدل کرده، توصیف ریاضی از آن ارائه می گردد.

اندرکنش دینامیکی از دو مکانیزم اندرکنش بین سازه، پی و خاک به شرح زیر ناشی می شود:

الف- اندرکنش اینرسی: نیروهای اینرسی سازه تولید نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در تراز پایه می کند که سبب تغییر مکان پی نسبت به سطح آزاد می گردد. توابع امپدانس پی بر حسب فرکانس بیانگر انعطاف پذیری و میرایی سیستم پی - خاک می باشد.

ب- اندرکنش سینماتیکی: وجود پی سخت روی خاک باعث تغییر حرکات پی نسبت به سطح آزاد می گردد. سه عامل می تواند سبب این تغییر حرکات باشد. عامل اول قیود سینماتیکی مربوط به حرکت جسم صلب پی می باشد. عامل دوم به مدفون بودن پی مربوط می شود که با افزایش آن، حرکات لرزه ای زمین کاهش پیدا می کند. عامل سوم نیز به تفرقه امواج لرزه ای از اطراف پی مربوط می شود.

در تعیین مقادیر سختی معادل خاک از روابط زیر استفاده شده است:

$$K_u = \frac{8}{2-\nu} Gr_0 \quad (1)$$

$$K_\theta = \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_0^3 \quad (2)$$



در روابط فوق G مدول برشی دینامیکی خاک، ν نسبت پواسون خاک و r شعاع پی دایره ای می باشد. شعاع دایره ای معادل در پی های غیر دایره ای برای حرکات افقی و چرخشی از سازگاری سطح مقطع A_f و ممان اینرسی I_f پی بدست می آید ($r_u = \sqrt{A_f/\pi}$ و $r_\theta = \sqrt{I_f/\pi}$). حال اگر سیستم تکدرجه به صورت یک سیستم تکدرجه معادل با پایه گیردار دارای پرئود موثر T و میرایی موثر $\tilde{\beta}$ در نظر گرفته شود داریم

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{K}{K_u} + \frac{K h^2}{K_\theta}} \quad (3)$$

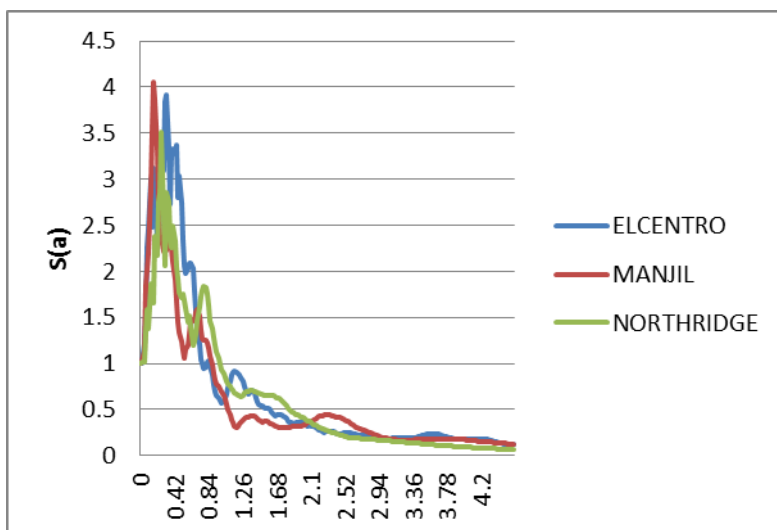
$$\tilde{\beta} = \beta_0 + \frac{\beta}{(\tilde{T}/T)^2} \quad (4)$$

در روابط فوق T پرئود سازه با پایه گیردار ($T = 2\pi\sqrt{k/m}$)، \tilde{T} پرئود موثر سازه پایه انعطاف پذیر، β نسبت میرایی سازه با پایه گیردار، β_0 نسبت میرایی پی (میرایی هیستریزس خاک و میرایی تشعشی پی) و $\tilde{\beta}$ میرایی موثر سازه با پایه انعطاف پذیر می باشد [9].
 پس از تعیین میرایی و سختی از فنر و میراگر برای مدلسازی پایه انعطاف پذیر استفاده شده است.

3. معرفی مدلها

در این تحقیق 48 قاب دوبعدی مدل شده است. قابهای مورد مطالعه در 4 تیپ ارتفاعی 3، 5، 7 و 9 طبقه که در هر تیپ ارتفاعی دو نوع قاب یکی با یک دیوار برشی در وسط و یکی با دو دیوار برشی در طرفین و در دو حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه مدل شده اند. این قابها دارای سه دهانه 6 متری بوده، ارتفاع هر طبقه 3/2 متر و عرض بارگیر هر قاب 5 متر می باشد. فرض شده است که قابهای مورد بررسی قاب میانی یک پلان متعارف باشد. در کلیه قابها سیستم مقاوم در برابر بار جانبی قاب خمشی بتنی به همراه دیوار برشی بتنی می باشد. جهت بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه محل قرارگیری پروژه بر سه نوع زمین تیپ II و III و IV تعیین شده است که قابها برای دو حالت با پایه ثابت و پایه انعطاف پذیر مدل شده اند.

ابتدا سازه ها به کمک نرم افزار ETABS 2000 ver 9.7.0 و براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و آیین نامه زلزله 2800 (ویرایش سوم) و همچنین مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران مدل سازی، تحلیل و طراحی شده اند. کنترل های مورد نظر براساس آیین نامه 2800 و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان انجام شده است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده، سازه ها در نرم افزار PERFORM مدل شده اند. تحلیل مدلها به روش دینامیکی غیر خطی انجام شده است. برای تحلیل دینامیکی از سه شتابنگاشت NORTHBRIDGE، ELCENTRO و MANJIL استفاده شده است (شکل 1)

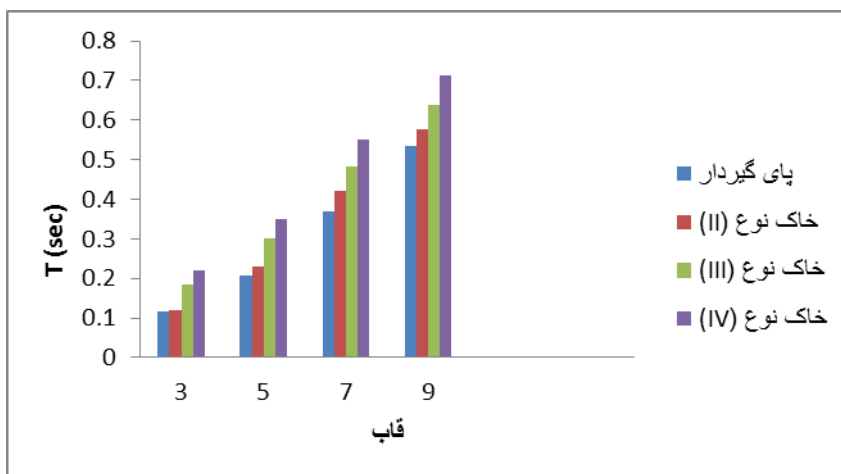


شکل (1): طیف پاسخ زلزله های استفاده شده در تحلیل دینامیکی غیر خطی

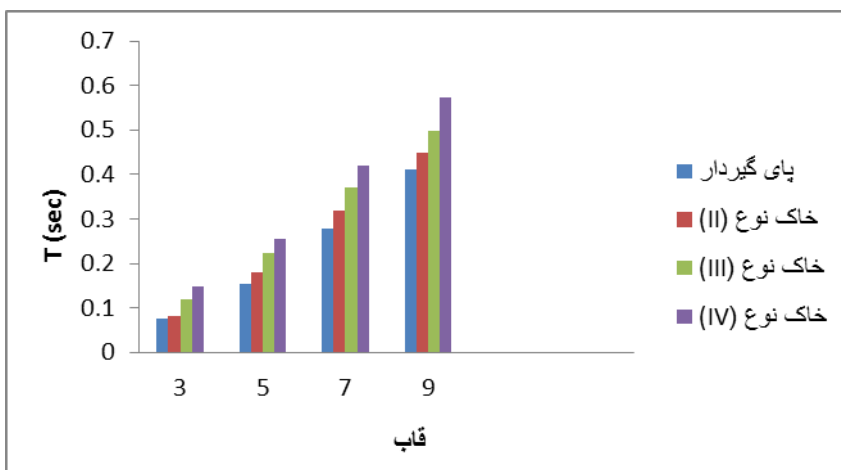
4. نتایج تحلیل

4-1. مقایسه میزان زمان تناوب در سازه ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه و بدون در نظر گرفتن آن در خاک های مختلف

مقادیر زمان تناوب ارتعاشی سازه ها در حالت های گیردار و انعطاف پذیر به دست آمده از آنالیز غیر خطی در خاک های مختلف در نمودارهای زیر نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه در محاسبات دینامیکی سازه باعث افزایش پریود سازه می شود. هرچه خاک زیر پی نرم تر باشد فاصله پریود ارتعاشی در حالت پی صلب و انعطاف پذیر بیشتر است. همچنین این اختلاف در خاک نوع IV نسبت به خاک نوع III بیشتر از خاک نوع III نسبت به خاک نوع II است (شکل های 2 و 3).



شکل (2): زمان تناوب در قابها با یک دیوار برشی



شکل (3): زمان تناوب در قابها با دو دیوار برشی

2-4. مقایسه میزان جابجایی نسبی طبقات در سازه ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و بدون در نظر گرفتن آن در خاک های مختلف

در جدول زیر مقادیر تغییر مکان نسبی بام نسبت به پایه در حالت آنالیز دینامیکی غیر خطی نشان داده شده است. با مقایسه جابجایی نسبی طبقات مشخص شد که حداکثر جابجایی نسبی طبقه بام در خاک نوع II در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بیشتر از حالت بدون در نظر گرفتن آن است. دلیل این امر دوران سازه به همراه فونداسیون سازه است که باعث می شود تغییر مکانها در این حالت بیشتر شود. ولی در خاکهای نرم (خاک نوع III و IV) علی رغم این که چرخش سازه به همراه فونداسیون باعث افزایش تغییر مکانها می شود ولی در این

دو نوع خاک تغییر مکانهای حداکثر سازه کمتر است. در خاکهای سخت اختلاف پریود سازه در دو حالت پایه انعطاف پذیر و پایه گیردار زیاد نیست و عامل تاثیر گذار در این نوع خاکها چرخش شالوده به همراه سازه است. همچنین مشاهده می شود که مقادیر تغییر مکانها در حالت پایه انعطاف پذیر در خاکهای تیپ 4 اختلاف زیادی نسبت به انواع دیگر خاک دارد که این تفاوت تغییر مکانهای حداکثر قابل اغماض نبوده و لازم است به نحوی اثر اندرکنش خاک و سازه در روند تحلیل دینامیکی این سازه ها وارد شود (جدول 1).

جدول 1- مقادیر جابجایی نسبی طبقات در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر گرفتن آن *

(rad) 0.001

	سازه بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه			سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه		
	II	III	IV	II	III	IV
سه طبقه با یک دیوار برشی	6.۷۹	7.03	8.43	6.84	6.96	8.48
سه طبقه با دو دیوار برشی	6.42	6.71	8.12	6.49	6.58	8.19
پنج طبقه با یک دیوار برشی	6.78	7.65	10.22	6.94	6.42	9.13
پنج طبقه با دو دیوار برشی	6.23	7.12	9.97	6.38	5.81	8.71
هفت طبقه با یک دیوار برشی	6.31	7.63	10.86	6.47	7.12	9.84
هفت طبقه با دو دیوار برشی	5.94	7.01	9.54	6.17	6.73	8.48
نه طبقه با یک دیوار برشی	6.07	7.15	8.02	6.12	6.88	7.44
نه طبقه با دو دیوار برشی	5.56	6.44	7.87	5.61	6.12	7.29

3-4. مقایسه میزان دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در سازه ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه و بدون در نظر

گرفتن آن در خاکهای مختلف

ارزیابی لرزه ای سازه نشان می دهد که در اثر اعمال اندرکنش خاک و سازه میزان دوران مفاصل تیرهای متصل به دیوار برشی نسبت به حالت پایه گیردار افزایش خواهد داشت. دلیل این پدیده این است که در اثر انعطاف پذیری خاک زیر سازه، میزان چرخش های فیزیکی در دیوار برشی نسبت به حالت پایه گیردار بیشتر شده و به تبع آن برای حفظ یکپارچگی سازه دوران مفاصل در تیرهای متصل به دیوار برشی هم بیشتر می شود. با بررسی کلی میزان دوران تیرهای متصل به دیوار برشی نتیجه می شود که در حالت کلی دوران تیرها در حالت انعطاف پذیر در تمامی طبقات و تمامی انواع خاکها بیشتر از حالت پایه گیردار است. این اختلاف در سازه های کوتاه زیاد بوده ولی در سازه های بلند کمتر است. این پدیده نشان می دهد که در حالت انعطاف پذیر، تغییر شکلها

و به تبع آن نیروها در تیرها و ستونها بیشتر می شود. این تغییر شکلها ممکن است باعث به وجود آمدن آسیبها و خسارات قابل توجهی در قاب شود (جداول 2 و 3 و 4 و 5).

جدول 2- مقادیر دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر

گرفتن آن * 0.001(rad) (قاب با یک دیوار برشی و خاک نوع III)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 طبقه	FIX	14.32	17.48	14.77	-	-	-	-	-	-
	SSI	18.51	20.11	16.68	-	-	-	-	-	-
5 طبقه	FIX	15.64	17.93	16.38	17.21	14.99	-	-	-	-
	SSI	21.37	22.82	21.48	20.69	17.53	-	-	-	-
7 طبقه	FIX	14.96	17.31	17.67	17.89	16.59	17.21	15.09	-	-
	SSI	16.23	20.15	20.05	19.74	19.17	19.44	18.02	-	-
9 طبقه	FIX	15.39	17.70	17.18	17.93	17.48	17.52	16.80	17.33	15.24
	SSI	18.54	19.73	19.06	20.04	19.84	19.52	18.89	19.35	17.81

جدول 3- مقادیر دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر

گرفتن آن * 0.001(rad) (قاب با یک دیوار برشی و خاک نوع IV)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 طبقه	FIX	21.34	23.56	20.43	-	-	-	-	-	-
	SSI	28.45	29.73	24.97	-	-	-	-	-	-
5 طبقه	FIX	18.27	20.42	18.78	19.56	16.23	-	-	-	-
	SSI	25.42	26.69	24.37	27.12	25.52	-	-	-	-
7 طبقه	FIX	19.46	22.21	21.63	21.66	20.04	20.23	19.77	-	-
	SSI	23.67	27.56	26.02	25.64	24.97	23.61	22.46	-	-
9 طبقه	FIX	21.76	22.45	22.07	22.44	22.89	22.67	21.61	21.72	20.57
	SSI	24.57	25.24	24.87	25.03	24.73	24.94	24.31	24.97	24.58

جدول 4- مقادیر دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر گرفتن آن * 0.001(rad) (قاب با دو دیوار برشی و خاک نوع III)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 طبقه	FIX	34.03	37.04	35.53	-	-	-	-	-	-
	SSI	38.41	41.25	39.87	-	-	-	-	-	-
5 طبقه	FIX	33.07	37.26	36.90	37.33	36.36	-	-	-	-
	SSI	37.45	42.53	41.97	41.28	43.23	-	-	-	-
7 طبقه	FIX	32.29	35.95	37.26	38.07	37.04	37.41	36.56	-	-
	SSI	35.47	38.76	40.03	40.45	39.73	38.54	39.61	-	-
9 طبقه	FIX	31.02	34.43	35.26	36.75	37.55	37.99	36.97	37.33	36.۳۶
	SSI	33.65	36.04	37.48	38.91	39.08	39.16	39.24	39.47	38.03

جدول 5- مقادیر دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و بدون در نظر گرفتن آن * 0.001(rad) (قاب با دو دیوار برشی و خاک نوع IV)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 طبقه	FIX	40.64	44.91	43.04	-	-	-	-	-	-
	SSI	47.23	50.84	49.21	-	-	-	-	-	-
5 طبقه	FIX	37.34	40.78	40.07	40.11	39.94	-	-	-	-
	SSI	43.54	46.15	46.84	45.65	46.72	-	-	-	-
7 طبقه	FIX	37.45	40.34	41.89	42.93	42.35	42.39	41.62	-	-
	SSI	42.53	45.12	47.38	47.45	47.16	46.94	45.76	-	-
9 طبقه	FIX	36.37	38.67	39.56	40.24	40.79	41.83	40.36	40.68	39.71
	SSI	39.59	40.98	42.58	43.57	43.52	44.09	42.87	43.09	43.21

FIX: سازه با پایه صلب (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه)

SSI: سازه با پایه انعطاف پذیر (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه)

5. خلاصه و نتیجه گیری

- لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه در محاسبات دینامیکی سازه باعث افزایش پریود سازه می شود که با توجه به نوع خاک و ارتفاع سازه مقدار افزایش پریود متفاوت است.
- در حالت پایه انعطاف پذیر دوران مفاصل در تیرها بیشتر از حالت گیردار است که با نرم تر شدن خاک این اختلاف بیشتر می شود.

- حداکثر دریافت طبقه بام در خاک سخت در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بیشتر از حالت بدون در نظر گرفتن آن است ولی در خاکهای نرم (خاکهای نوع III و IV) حداکثر دریافت طبقه بام در حالت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه کمتر است.
- میزان دوران تیرهای متصل به دیوار برشی در حالت انعطاف پذیر بیشتر از حالت پایه گیردار است. این اختلاف در سازه های کوتاه بیشتر از سازه های بلند است.

6. مراجع

- [1] Andersen L., Clausen J., Impedance of surface footings on layered ground, Computers and structures, 2007.
- [2] Wolf J.P., Dynamic Soil- Structure Interaction, Prentice-Hall, 1985.
- [3] Snabjornsson. J. TH, Sigtryggsdottir. F. G, Soil-structure interaction effects on the excitation and response of a low-rise RC building subjected to near-and far-fault earthquakes , 15 WCEE, LISBOA, 2012.
- [4] Marzban.S., Banazadeh.M, Azarbakhat.A., Seismic performance of concrete wall frames considering soil – foundation –structure interaction. Proceeding of the 8th international conference on structural dynamics, EURO DYN, Leuven, Belgium, 2011.
- [5] Chinmayi. H. K, Jayalekshmi. B. R, Soil-Structure interaction of RC frame shear wall buildings over raft foundations under seismic loading, International Journal of Scientific and Engineering Research vol. 4, Issue 5, 2013.
- [6] Wolf.J.P and Song.C, Some Corner Stones Of Dynamic Soil-Structure Interaction, Engineering Structures, 24, 13-28, 2002
- [7] Mirhashemian.P, Khaji.N, Shkib.H, Soil-Structure Interaction Analysis Using a Hybrid Spectral Element/finite element (SE/FE) Approach, JSEE, VOL 11, NO.2, Summer 2009.
- [8] برگی، خسرو، اصول مهندسی زلزله، چاپ سوم، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، 1379.
- [9] Stewart.J.P, Seed.R.B, Fenves.G.L, Empirical evaluation of inertial Soil-Structure Interaction effects, PEER-98107., 1998.