بررسی اندرکنش خاک - پی - سازه در تحلیل لرزه ای استاتیکی ساختمان ها

وحید رضا کلات جاری[1]، علی نقی زاده[2]، رضا نادری[1]، محمدحسین طالب پور[3]

1- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

2- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

3- دانشجوی دکترا سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

A.naghizadeh.eng@gmail.com

خلاصه

عموماً در تحلیل لرزه ای سازه ها با تکیه گاه صلب از اثرات اندرکنش خاک- پی- سازه و تاثیر آن بر روی تغییرمکان طبقات و نیروهای داخلی چشم پوشی می شود. نوع خاک وانعطاف پذیری پی از جمله عواملی می باشند که می توانند تا حدودی نتایج تحلیل استاتیکی سازه را تحت تاثیر قرار داده و اندرکنش خاک- پی- سازه را ایجاب نمایند. در این راستا مطالعاتی توسط محققین برای تعیین این اثرات انجام شده است. در این مقاله نیز در جهت بررسی این نتایج سعی شده است تاثیر نوع خاک در روند تحلیل لرزه ای مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور از مدل های سه بعدی ساختمان های فولادی 4، 8 و12 طبقه در مجاورت سه نوع خاک نرم، متوسط و سخت استفاده شده است. مدل ها با استفاده از روش استاتیکی معادل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش به کمک نرم افزار Abaqus تحلیل شده، و سپس با ارائه جداول و نمودارها ، تغییرمکان طبقات و نیروی محوری ستون ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد اندرکنش خاک- پی- سازه بر روی تغییرمکان طبقه اول تاثیر چشمگیرتری نسبت به سایر طبقات دارد و با افزایش ارتفاع سازه این تاثیر، تا طبقه آخر ادامه می یابد.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک - پی – سازه، تحلیل استاتیکی معادل

1. مقدمه

بررسی حرکات سازه با توجه به انعطاف پذیری پای سازه، اندرکنش یا اثر متقابل خاک و سازه گفته می شود. در تحلیل های رایج هنگامی که در مدل، تکیه گاه گیردار فرض می شود، از اثر اندرکنش خاک- پی- سازه صرف نظر می شود. این مورد در حالتی صحیح است که سازه بر روی سنگ بنا شده باشد. در حالت قرار گرفتن سازه بر روی خاک نرم وضعیت کاملاً متفاوت است و می بایست اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات وسیعی در تعیین اثرات اندرکنش خاک- سازه بر روی رفتار سازه ها انجام شده است. شروع این مطالعات به صورت رسمی توسط محققین لی و هریسون در سال 1970 در مقاله ای تحت عنوان "تئوری اندرکنش پی و سازه" انجام گرفت[1]. تحقیق بعدی در سال 1972 توسط آقایان براون و لی انجام گرفت که در آن پدیده اندرکنش خاک- سازه به صورت استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفت[2]. استاویر دیس در سال 2002 مقاله ای تحت عنوان " تحلیل ساده شده اندرکنش خاک لایه ای با سازه" منتشر کرد و در آن روشی جدید بر پایه روش اجزا محدود برای تحلیل اندرکنش خاک- سازه معرفی نمود[3]. روش های متعددی جهت حل مسئله دینامیکی اندرکنش خاک- سازه وجود دارد که از جمله آنها می توان به دو روش اصلی زیرسازه سازی و روش مستقیم اشاره نمود[4و5]. روش زیرسازه متداولترین روش حل مساله اندرکنش دینامیکی خاک- سازه می باشد. در این روش مساله به سه قسمت مختلف تقسیم می گردد که به کمک جمع آثار قوا جواب نهایی سیستم بدست می آید. به دلیل استفاده از جمع آثار قوا لازم است فرض شود سازه و خاک به صورت خطی رفتار می کنند. برای درنظر گرفتن رفتار غیرخطی می توان از روش خطی معادل استفاده کرد. روش مستقیم که به نام روش Global نیز مشهور است از طریق اجزای محدود انجام شده و در محدوده وسیعی از اشکال کاربرد دارد. دانشمندانی چون Roesset , Kausel (1974) Lysmer (1975) و Seed (1975) این روش را پیشنهاد کردند. در این روش سازه و خاک زیر آن به صورت یکجا مدل شده و شتاب حرکت زمین (بسترسنگی) به گره های مرزی خاک که در فاصله مناسبی از سازه (3 الی 7 برابر عرض سازه) قرار دارند اعمال می شود و در نهایت سیستم به صورت یکپارچه به کمک روش های عددی از جمله اجزاء محدود یا روش های اجزاء مرزی آنالیز می شود. امکان استفاده از این روش جهت حل مسائل پیچیده مربوط به هندسه پی، رفتار غیرخطی مصالح و اثر سازه های مجاور به عنوان مزایای این روش محسوب می شود. از طرفی از معایب عمده آن می توان به حجم زیاد ورودی و خروجی ، پیچیدگی و وقت گیر بودن آن اشاره کرد[6]. در این مطالعه اثرات اندرکنش خاک- پی-

سازه به صورت استاتیکی مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا به کمک روش استاتیکی معادل نیروی وارده به طبقات سازه محاسبه شده، سپس این نیرو به صورت یکنواخت بر سقف سازه اثر داده می شود و در ادامه خاک- پی و سازه در نرم افزار Abaqus به صورت سه بعدی مدل و به کمک روش اجزاء محدود آنالیز می شوند. با مقایسه نتایج اثر نوع خاک و طبقات بر روی تغییرمکان طبقات و نیروهای داخلی بررسی شده است.

2. تحلیل لرزه ای

نیروی جانبی زلزله را می توان با استفاده از روش "تحلیل استاتیکی معادل" یا "روش های تحلیل دینامیکی" محاسبه کرد. در این مقاله از تحلیل استاتیکی معادل برای بررسی اثرات اندرکنش خاک–سازه استفاده شده است[7].

پس از زلزله 1908 در مسینارجیو ایتالیا، تیمی مرکب ازمهندسان ماموریت یافتند که ساختمان های تخریب شده را مطالعه نموده و سبب را جویا شوند. تیم مزبور با بررسی ساختمان های تخریب شده به این نتیجه رسیدند که زلزله باید نیرویی افقی ایجاد کرده باشد که سبب خرابی شده است. مقدار این نیرو برابر $\frac{1}{12}$ وزن ساختمان فرض شد[8]. این نظریه سپس تکامل یافته و در قالب زیر بیان شد:

$$V = CW \tag{1}$$

که در آن V نیروی زلزله، W وزن ساختمان و C ضریب زلزله می باشند.از زمان پیشنهاد این رابطه تاکنون روابط زیادی برای محاسبه ضریب C ارائه گردید.آئین نامه 2800 ایران رابطه زیر را برای این ضریب پیشنهاد می کند:

$$C = \frac{ABI}{R} \tag{2}$$

که در آن A نسبت شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب ساختمان، I ضریب اهمیت ساختمان و R ضریب رفتار ساختمان می باشد.

پس از محاسبه برش پایه (V) این نیرو توسط رابطه زیر در ارتفاع ساختمان توزیع می گردد:

$$F_i = (V - F_t)\frac{W_i H_i}{\sum_{j=1}^{n} W_j H_j} \tag{3}$$

که در آن F_i نیروی جانبی در تراز طبقه i، H_i ارتفاع سقف طبقه i از تراز پایه، n تعداد طبقات ساختمانی از تراز پایه به بالا، F_t اثر شلاقی در تراز سقف طبقه n و W_i وزن طبقه i که شامل وزن سقف و قسمتی از بار زنده و نصف وزن دیوارها و ستون هایی که در بالا و پایین سقف قرار گرفته اند می باشد.

3. مدل سازی و آنالیز

1,3. معرفی ساختگاه

از آنجا که در این مقاله از تحلیل استاتیکی استفاده شده است لذا بحث انعکاس امواج مطرح نبوده و می توان ابعاد محیط خاکی را کوچکتر در نظر گرفت از این رو ساختگاه به صورت یک لایه خاک همگن الاستیک به ابعاد$40 \times 50 \times 50$ متر بر روی بستر سنگی در نظر گرفته شده است. جهت بررسی تاثیرخاک بر روی پاسخ سازه از سه نوع خاک نرم، متوسط و سخت منطبق بر مشخصات انواع IV، III و II آئین نامه 2800 ایران استفاده شده است. مشخصات خاک ها در جدول (1) آورده شده است.

جدول 1- مشخصات خاک ها

نوع خاک	وزن حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگا پاسکال)	ضریب پواسون	توضیحات
خاک نرم	1850.2	60	0.4	منطبق بر خاک نوع IV آئین نامه 2800
خاک متوسط	2018.3	200	0.3	منطبق بر خاک نوع III آئین نامه 2800
خاک سخت	2186.5	600	0.2	منطبق بر خاک نوع II آئین نامه 2800

2,3. معرفی سازه و پی ها

در این مقاله از سه مدل اسکلت فولادی 4، 8 و 12 طبقه استفاده شده است. ساختمان ها مسکونی فرض شده، در هر دو راستا متقارن و دارای سیستم قاب خمشی می باشند. سازه و پی آن به ترتیب توسط نرم افزار ETABS و SAFE با فرض قرارگیری در منطقه ای با خطر لرزه ای بسیار زیاد طراحی شده اند. مشخصات مقاطع سازه ای و جزئیات مربوط به پی به ترتیب در جداول شماره (2)، (3)، (4) و شکل شماره (1) نشان داده شده است.

جدول 2- مشخصات مقاطع ساختمان 4 طبقه

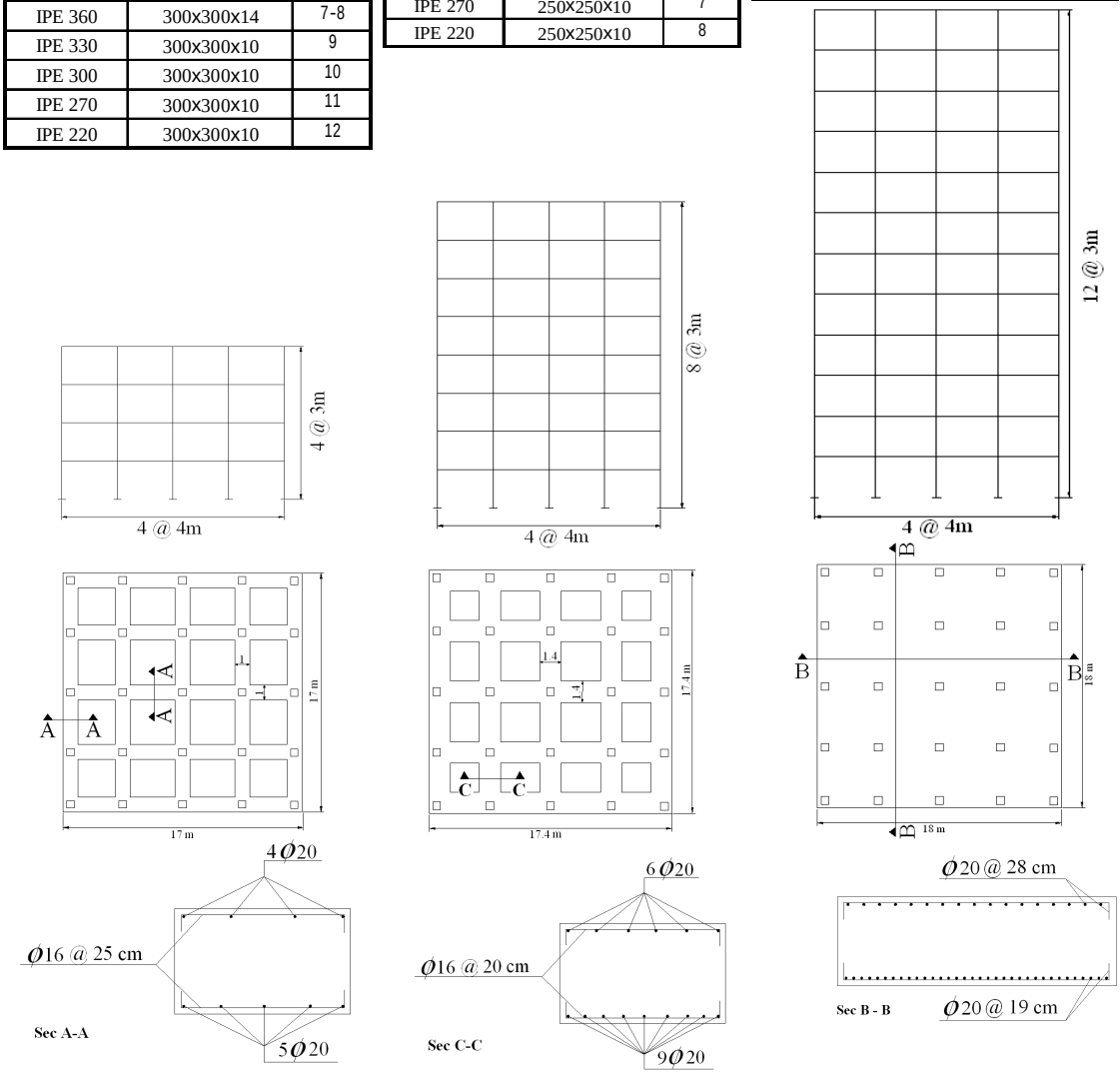
شماره تراز طبقات	مقطع ستون ها (قوطی)	مقطع تیر ها IPE
1	250x250x14	IPE 330
2	250x250x14	IPE 300
3	250x250x10	IPE 270
4	250x250x10	IPE 200

جدول 3- مشخصات مقاطع ساختمان 8 ط بقه

شماره تراز طبقات	مقطع ستون ها (قوطی)	مقطع تیر ها IPE
1-2	300x300x20	IPE 360
3-4	250x250x20	IPE 360
5	250x250x14	IPE 330
6	250x250x14	IPE 300
7	250x250x10	IPE 270
8	250x250x10	IPE 220

جدول 4- مشخصات مقاطع ساختمان 12 طبقه

شماره تراز طبقات	مقطع ستون ها (قوطی)	مقطع تیر ها IPE
1	300x300x28	IPE 360
2	300x300x28	IPE 400
3-4	300x300x20	IPE 400
5-6	300x300x18	IPE 400
7-8	300x300x14	IPE 360
9	300x300x10	IPE 330
10	300x300x10	IPE 300
11	300x300x10	IPE 270
12	300x300x10	IPE 220

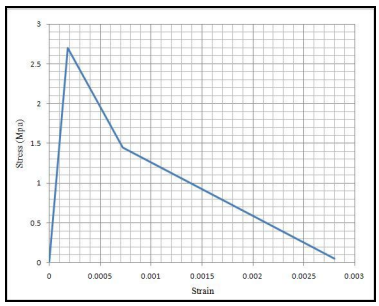


شکل 1 – جزئیات پی ها

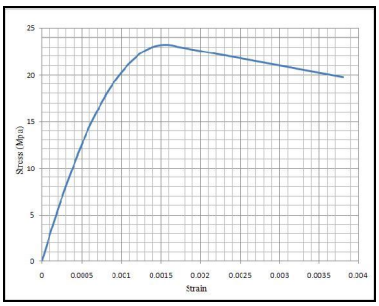
3,3. مشخصات مواد

بتن مصرفی از نوع C25 (مقاومت مشخصه 25 مگاپاسگال) با جرم مخصوص $2500\ kg/m^3$ ، مدول الاستیسیته 26875 Mpa و ضریب پواسون 16/. در نظر گرفته شده است. برای ترسیم نمودار تنش - کرنش بتن در ناحیه فشاری از رابطه Hognestad اصلاح شده استفاده و در ناحیه کششی، این نمودار به صورت خطی فرض شده است [9]. نمودار تنش - کرنش بتن را می توان در شکل شماره (2) و (3) مشاهده نمود.

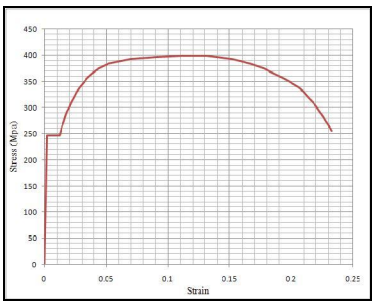
فولادمصرفی از نوع A36 با جرم مخصوص $8000\ kg/m^3$ ، مدول الاستیسیته 206010 Mpa و ضریب پواسون 3/. می باشد. شکل (4).



شکل 2 – نمودار تنش-کرنش کششی بتن



شکل 3 – نمودار تنش-کرنش فشاری بتن



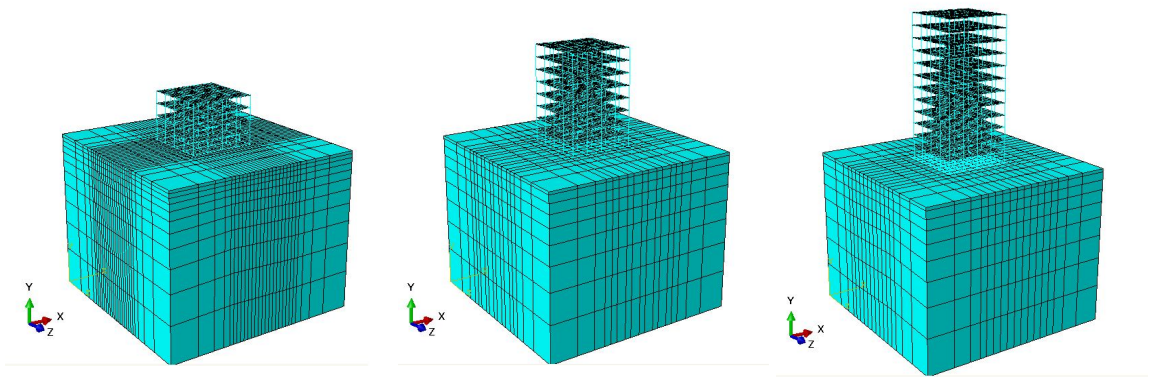
شکل 4 – نمودار تنش-کرنش فولاد

4,3. روش آنالیز

در این مقاله اثر اندرکنش خاک- سازه به صورت استاتیکی مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور نخست با در نظر گرفتن نوع خاک برش پایه محاسبه، سپس برش پایه در ارتفاع توزیع شده و نیروی وارده به هر سقف بدست می آید؛ در ادامه این نیرو به صورت یکنواخت بر کف توزیع می شود. در کلیه موارد تکیه گاه های سازه ها گیردار فرض شده است. سپس سازه ها تحت اثر نیروهای وارده توسط نرم افزار Abaqus آنالیز و پاسخ ها محاسبه می شوند. در مرحله بعد سازه ها تحت نیروهای بدست آمده از تحلیل استاتیکی معادل بر روی خاکی که برش پایه با فرض وجود آن خاک محاسبه شده است قرار داده شده و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک- پی- سازه آنالیز و در انتها نتایج بدست آمده از دو مرحله با هم مقایسه می شوند.

5,3. مدل سازی

همانطور که اشاره شد، مدل ها به کمک نرم افزارهای ETABS و SAFE طراحی شده اند؛ همچنین جهت تحلیل سه بعدی اندرکنش خاک- سازه از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus استفاده شده است. انواع المان های مورد استفاده در مدل سازی به کمک این نرم افزار را می توان در جدول شماره (5) مشاهده نمود. اتصال بین خاک و فونداسیون از نوع سطح به سطح و دارای دو رفتار Tangential Behavior با Friction Coeff = 0,4 و Normal Behavior با رفتار Hard Contact می باشد. سقف ها از نوع المان Shell بوده و در محل اتصال با قاب به تیر ها Tie شده اند. در تحلیل استاتیکی بار جانبی وارده به دیافراگم به صورت یکنواخت بر کف توزیع شده و در قالب نیرو بر واحد سطح به برنامه داده می شود. در مش بندی المان های خاک اندازه المان ها با نزدیک شدن به مرز سازه کوچکتر می شود. شمایی کلی از ساختگاه بعد از انجام مش بندی در شکل شماره (5) نشان داده شده است.



شکل 5 – نمایی از مش بندی مدل ها

جدول 5 - مشخصات المان ها

موضوع	نوع المان	مشخصات المان
سقف	Shell	S4R
قاب فولادی ومیلگردها	Beam	B31
خاک و فونداسیون	3D Stress	C3D8R

6. نتایج عددی

1,6. بررسی تغییرمکان جانبی طبقات

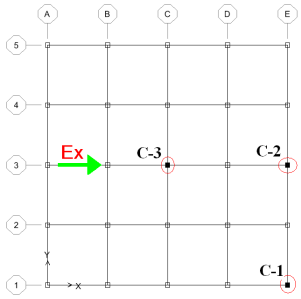
پس از انجام تحلیل استاتیکی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک- پی- سازه مشاهده شد که در نظر گرفتن اندرکنش درتمام حالات باعث افزایش تغییرمکان ها می شود. در شکل های (7) الی (9) درصد تغییرات دریفت و تغییرمکان جانبی مطلق، در حالت وجود اندرکنش خاک – پی- سازه نسبت به حالت فرض تکیه گاه صلب در سه ناحیه خاک نرم، متوسط و سخت و مقادیر عددی آن در جدول شماره (6) آورده شده است.

با بررسی نمودارها می توان دریافت بیشترین تغییرات دریفت، همواره مربوط به طبقه اول سازه می باشد. برای هر سه نوع خاک با افزایش تعداد طبقات سازه، تغییرات دریفت در اکثر طبقات افزایش پیدا می کند. تغییرات دریفت مدل 8 طبقه نسبت به مدل 4 طبقه بر روی خاک نرم، متوسط و سخت به ترتیب حداکثر 10 درصد، 3 درصد و 1 درصد افزایش می یابد. تغییرات دریفت مدل 12 طبقه نسبت به مدل 8 طبقه نیز همین روند افزایشی را دنبال می نماید. در میانه های ساختمان اندازه تغییرات دریفت کمتر شده و مجدداً با نزدیک شدن به طبقات فوقانی تحت تاثیر نوع خاک و تعداد طبقات سازه اوج می گیرد. هر چه تعداد طبقات سازه بیشتر باشد تغییرات دریفت در طبقات فوقانی بیشتر می شود. با فرض وجود خاک نرم در مدل 4 طبقه تغییرات دریفت طبقه آخر 12 درصد نسبت به حالت گیردار افزایش می یابد؛ در حالی که در مدل 8 طبقه تغییرات دریفت طبقه آخر 27 درصد افزایش داشته و برای مدل 12 طبقه عملاً تغییرات دریفت در طبقه اول وآخر برابر می شود که معادل 57 درصد افزایش نسبت به حالت گیردار می باشد.

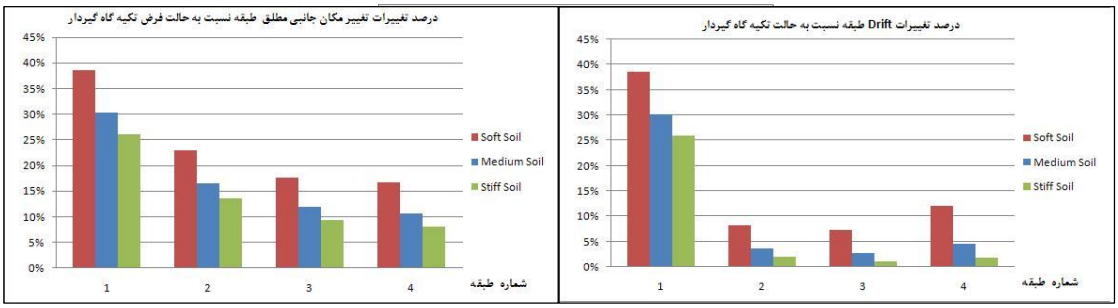
هر چه خاک نرم تر شود با گیردار فرض کردن پای سازه، تغییرات دریفت در طبقات فوقانی بیشتر می شود؛ به عنوان مثال برای سازه 12 طبقه روی خاک سخت، تغییرات دریفت طبقه آخر حدود 5 درصد نسبت به حالت گیردار افزایش می یابد، در حالی که بر روی خاک متوسط 19 درصد افزایش یافته و بر روی خاک نرم این مقدار به 57 درصد می رسد که معادل تغییرات دریفت طبقه اول می باشد. در تمام نمونه های واقع برخاک سخت تغییرات دریفت نسبت به حالت گیردار برای تمام طبقات غیر از طبقه اول بسیار ناچیز بوده و به کمتر از 6 درصد میرسد، اما همچنان تاثیرش بر روی طبقه اول پابرجاست. این مطالب نشان می دهد هنگامی که سازه را با فرض گیرداری در پایه طراحی می کنیم، بخصوص در مناطقی که دارای خاک نرم هستند باید توجه خاصی به طرح طبقه اول صورت دهیم. علاوه بر این برای سازه های مرتفع در مناطق دارای خاک نرم نیز می بایست به همان اندازه به طرح طبقه آخر توجه نماییم.

2,6. بررسی نیروی محوری ستون ها

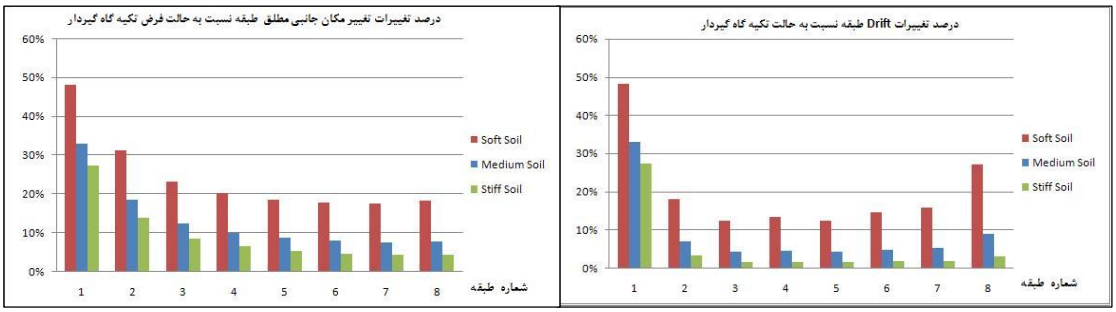
با بررسی نیروی محوری ستون ها مشاهده می شود درصد تغییرات نیروی محوری نسبت به حالت فرض تکیه گاه صلب با افزایش طبقات سازه و نرم تر شدن خاک بیشتر می شود. نمودارهای مربوطه در شکل (10) نشان داده شده است. محل قرارگیری ستون ها در پلان و جهت اعمال نیروی زلزله در شکل شماره (6) قابل مشاهده است. با مشاهده نمودارها می توان دریافت درصد تغییرات نیروی محوری هر سه ستون در تمام نمونه ها، بر روی خاک سخت به کمتر از 5 درصد می رسد.



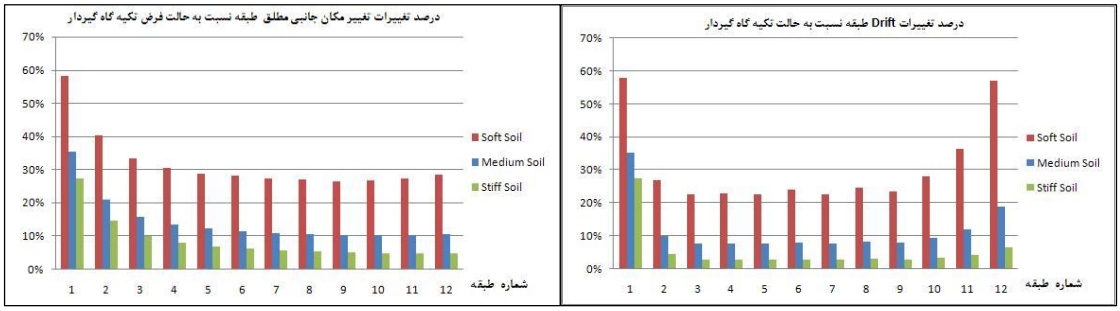
شکل 6 – محل قرارگیری ستونها



شکل 7 – درصد تغییرات دریفت و تغییرمکان جانبی مطلق نسبت به حالت فرض گیردار برای مدل 4 طبقه



شکل 8 – درصد تغییرات دریفت و تغییرمکان جانبی مطلق نسبت به حالت فرض گیردار برای مدل 8 طبقه



شکل 9 – درصد تغییرات دریفت و تغییرمکان جانبی مطلق نسبت به حالت فرض گیردار برای مدل 12 طبقه

جدول 6 - درصد تغییرات دریفت نسبت به حالت فرض گیردار

مدل 4طبقه			
	Soft	Medium	Stiff
Story 1	39%	30%	26%
Story 2	8%	4%	2%
Story 3	7%	3%	1%
Story 4	12%	5%	2%

مدل 8طبقه			
	Soft	Medium	Stiff
Story 1	48%	33%	27%
Story 2	18%	7%	3%
Story 3	12%	4%	1%
Story 4	13%	4%	2%
Story 5	12%	4%	1%
Story 6	14%	5%	2%
Story 7	16%	5%	2%
Story 8	27%	9%	3%

مدل 12طبقه			
	Soft	Medium	Stiff
Story 1	58%	35%	27%
Story 2	27%	10%	4%
Story 3	22%	8%	3%
Story 4	23%	8%	3%
Story 5	23%	7%	3%
Story 6	24%	8%	3%
Story 7	22%	7%	3%
Story 8	24%	8%	3%
Story 9	23%	8%	3%
Story 10	28%	9%	3%
Story 11	36%	12%	4%
Story 12	57%	19%	6%

شکل 10 – درصد تغییرات نیروی محوری نسبت به حالت فرض تکیه گاه گیردار برای مدل های 4، 8 و12طبقه

7. نتیجه‌گیری

- در نظر گرفتن اندرکنش خاک- پی- سازه درتمام حالات باعث افزایش تغییرمکان ها می شود.
- برای هر نوع خاک، با افزایش طبقات سازه، تغییرات دریفت نسبت به حالت گیردار همواره افزایش می یابد.
- بیشترین تغییرات دریفت نسبت به حالت فرض تکیه گاه گیردار همواره مربوط به طبقه اول سازه می باشد. با حرکت به سمت بالای ساختمان اندازه تغییرات دریفت کمتر شده و مجدداً با نزدیک شدن به طبقات فوقانی تحت تاثیر نوع خاک و تعداد طبقات سازه اوج می گیرد.
- با نرم تر شدن خاک در تمام نمونه ها همواره دریفت افزایش می یابد.
- در تمام مدل های ساختمان واقع برخاک سخت و در تمام طبقات غیر از طبقه اول دریفت همواره زیر 6 درصد است.
- در تمام نمونه های واقع برخاک سخت تغییرات نیروی محوری در هرسه ستون زیر 5 درصد است.
- درصد تغییرات نیروی محوری نسبت به حالت فرض تکیه گاه صلب با افزایش طبقات سازه و نرم تر شدن خاک بیشتر می شود.
- اثرات اندرکنش خاک- پی- سازه در خاک های سخت ناچیز و قابل چشم پوشی است و برای ساختمان های واقع بر خاک های نرم بخصوص ساختمان های بلند غیرقابل اغماض می باشد.

12. مراجع

1. Lee, I.K and Harrison,H. B. (۱۹۷۰)." Structure and Foundation Interaction Theory ," Journal of Structural Division , ASCE , Vol . ۹٦ No . ST۲ , pp. ۱۷۷-۱۹۷.
2. Lee , I.K.and Brown , p.T. (۱۹۷۲) ."Structure and Foundation Intraction Analysis ," Journal of Structural Division , ASCE , Vol. ۹۸۰No. ST ۱۱ , pp.۲٤۱۳ – ۲٤۳۱.
3. L.T . Stavirdis . (۲۰۰۲). " Simplified Analysis of Layered Soil – Structure Interaction , " Journal of Structural Engineering , ASCE, Vol.۱۲۸۰, No.۲,pp.۲۲٤-۲۳۰.
4. Chin, C. C. (۱۹۹۸). Substructure Subtraction Method and Dynamic Analysis of Pile Foundations, Ph.D.Dissertation, University of California, Berkeley.
5. Wolf, J. P. (۱۹۸۵). Dynamic Soil-Structure Interaction. Prentice-Hall Inc.
6. ناطق الهی. ف. و رضایی تبریزی .ع. و بهنام فر. ف. " مطالعه اثر اندرکنش خاک – سازه بر پاسخ غیر خطی سازه های بلند ،". نشریه دانشکده فنی. 1382
7. آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله - استاندارد 2800- ویرایش سوم.
8. مقدم ، ح.، (1387)، " مهندسی زلزله: مبانی و کاربرد ،" ، تهران.
9. مستوفی نژاد ، د.، (1387)، " سازه های بتن آرمه ،" جلد اول ، انتشارات ارکان دانش ، اصفهان