رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هشتم، شماره اول ۱۴۰۳، صفحه: ۱-۱۳

بررسی اثرات اندرکنشی خاک وسازه درساختمانهای بلند

جلیل هادی [*۱]، محمد کشاورز بخشایش [۲]

*[*۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران*

[۲] استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه پیام نور، واحد زنجان

(jalilhadi127@yahoo.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱)

چکیده

با گسترش تکنولوژِی و شهر نشینی، پروژه های گسترده و وسیعی طراحی و اجرا می شوند که بعضی از این پروژه ها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شود .در هنگام وقوع زلزله در چنین شرایطی، اثرات متقابل خاک سازه حائز اهمیت می باشد و رفتار سیستم سازه ها را به مقدار قابل توجهی تحت تاثیر قرار می دهد. اثرات اندرکنش خاک سازه اختلافات پاسخ سازه در حالتی که این پاسخ با فرض برابر بودن حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده است را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت اصلاح شده یا واقعی پی، نشان می دهد و این اختلافات به مشخصه های حرکت میدان آزاد زمین بعلاوه خواص سازه و تکیه گاه انعطاف پذیر (خاک مجاور و زیر پی) بستگی دارد. یکی از اصلی ترین مباحث در طراحی سازه های سنگین و سخت با پی های عمیق مثل سکوهای ساحلی ، ساختمان های بلند و نیروگاه های هسته ای مساله اندرکنش خاک و سازه می باشد . با این وجود ، در تحلیل دینامیکی سازه ها اغلب فرض می شود که خاک زیر شالوده صلب است و ازاثرات اندرکنشی میان خاک و سازه صرف می شود. در این حالت پاسخ سازه تنها متاثر از خواص دینامیکی خود سازه است و انعطاف پذیری خاک ، تاثیری در پاسخ سازه ندارد . در این واقعیت ، پاسخ سازه متاثر از خواص دینامیکی خاک ، فونداسیون و سازه می باشد که با فرض صلب بودن خاک زیر شالوده در تناقض است . اندرکنش خاک – سازه در در اثر عبور امواج زلزله از میان سیستم خاک – سازه رخ می دهد. بنابراین واضح است که در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک – سازه جهت دستیابی به پاسخ واقعی و پیش بینی رفتار سازه ضروری خواهد بود . این تحقیق آثار اندرکنش خاک و سازه در پاسخ لرزه ای سازه ها ،مراحل انجام تحلیل اندرکنش خاک – سازه وروش های مختلف اندرکنش خاک – سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

اندرکنش خاک – سازه ، روش های تحلیل اندرکنش ، پاسخ لرزه ای.

Investigating the Interaction Effects of Soil and Structure in Tall Buildings

Jalil Hadi [1*]***, Mohamad Keshavarz Bakhshaesh*** [2]

[*1] *Ms.c. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran*

[2] *Assistant Professor, Department of Basic Sciences, Payam Nour University, Zanjan Branch*

(jalilhadi127@yahoo.com)

(Date of received: 12/02/2024, Date of accepted: 20/04/2024)

ABSTRACT

With the development of technology and urbanization, extensive projects are designed and implemented, and some of these projects must be implemented in unfavorable geotechnical conditions. When an earthquake occurs in such conditions, the mutual effects of the soil and the structure are important and the behavior of the system is important. It affects structures significantly. The effects of the soil interaction of the structure show the differences in the response of the structure in the case where this response is calculated assuming that the movement of the foundation is equal to the movement of the free field of the earth, compared to the response of the structure considering the modified or real movement of the foundation, and these differences are characteristic The movement of the free field of the ground depends on the properties of the structure and the flexible support (adjacent soil and under the foundation). One of the main topics in the design of heavy and hard structures with deep foundations, such as coastal platforms, tall buildings, and nuclear power plants, is the interaction between the soil and the structure. However, in the dynamic analysis of structures, it is often assumed that the soil under the foundation is rigid and the interaction effects between the soil and the structure are used. In this case, the response of the structure is only affected by the dynamic properties of the structure itself, and the flexibility of the soil has no effect on the response of the structure. In this fact, the response of the structure is affected by the dynamic properties of the soil, foundation and structure, which contradicts the assumption that the soil under the foundation is rigid. Soil-structure interaction occurs as a result of earthquake waves passing through the soil-structure system.

Keywords:

Soil-structure interaction, interaction analysis methods, seismic response.

۱- مقدمه

بطور کلی دینامیک سازه ها در ارتباط با روشهایی است که منجر به تعیین تغییر مکان و تنشهای یک سازه، تحت اثر بارهای دینامیکی می شود .بدین منظور بایستی مدل دینامیکی مورد تحلیل به روشنی مشخص بوده و درجات آزادی آن برای تحلیل کننده معلوم باشد .برای مدل کردن مسئله وتحلیل آن اغلب روشهای متعارف و شناخته شده ای موجود است و در یک تحلیل دینامیکی با قدری اغماض از جزئیات دقیق سازه ای، می توان یک مدل مناسب، آنچنان که رفتار دینامیکی سازه ی واقعی را با دقت قابل قبول تعیین کند، بدست آورد .این همراهی در بعضی مواقع مثال حالت وارد شدن بارهای استاتیکی یا حتی بارهای دینامیکی با فرکانس کم مثل زلزله ممکن است ناچیز باشد و یا اینکه به عللی بهای چندانی به این همراهی داده نشود، اما به هر حال در طرح سازه های مهم و درک واقعی مجموعه ی خاک و سازه بایستی این تأثیر متقابل درنظرگرفته شود. انتخاب روش مناسب برای مدل کردن خاک وسازه به عوامل مختلفی بستگی دارد .بعنوان مثال دقت مورد نیاز در نتایج،هزینه ی لازم برای استفاده از هرروش، امکانات موجود جهت تحلیل اطالعات موجود از رکودهای زلزله در تراز سطح زمین (یا سنگ بستر) ازعواملی هستند که در انتخاب روش مناسب جهت تحلیل اندرکنش خاک-سازه مهم می باشند.

اندرکنش خاک و سازه یکی از اصلی ترین مباحث در زمینه مهندسی زلزله است که در دهه های اخیر از لحاظ بین المللی به ویژه برای سازه های سنگین و حجیم نیروگاه های اتمی ، سکوهای ساحلی ، پل ها و ساختمان های بلند مورد توجه جامعی قرار گرفته است .زلزله توسط آزاد شدن انرژی در یک ناحیه بخصوص که در داخل پوسته زمین قرار دارد ، ایجاد می شود .انرژی توسط امواج از منبع به تمام جهات منتشر می شود و با انتشار پدیده های مختلفی ایجاد می شود .انرژی امواج با انتشار از منبع و عبور از ناحیه همگن کاهش می یابد به علاوه ناپیوستگی مواد موجود در محیط باعث بازتاب و شکستگی امواج می گردد که می تواند باعث تغییر جهت دامنه و نوع موج گردد. موج باعث ایجاد جابه جایی نوسانی در محیط می شود .وقتی که موج به نزدیکی سطح زمین می رسد این جابه جایی از طریق خاک به سازه منتقل می شود که موجب تحمیل خسارت و یا فروریزش سازه می گردد .در مقایسه با سازه ، خاک دارای قلمرو نامحدودی است که در شرایط انتشار امواج در آن ، باید در مدل مکانیکی به حساب آورده شود[1] . تغییر شکل های یک سازه در هنگام زلزله تحت تاثیر اندرکنش سه سیستم مرتبط سازه ، فونداسیون و مشخصات لایه های خاک زیر و اطراف فونداسیون قراردارد. آنالیزاندرکنش خاک و سازه پاسخ این سیستم ها را به حرکت زمین در میدان آزاد مورد ارزیابی قرار می دهد.گرچه در محاسبات نیروی اعمالی زلزله برسازه معمولا" تکیه گاه آن صلب و تغییر شکل ناپذیر فرض می گردد و از انعطاف پذیری خاک در زیر سازه صرف نظر می شود ولی مشاهدات و تجربیات گذشته نشانگر این واقعیت است که عامل تغییرشکل پذیری خاک علاوه بر تغییر خصوصیات حرکت آزاد زمین در سطح ، ممکن است به علت اندرکنش سازه تغییرات قابل ملاحظه ای در واکنش سازه در مقابل زلزله نیز ایجاد نماید .در واقع در ارزیابی بار لرزه ای اعمالی به سازه باید جنبه های مختلفی مثل شناسایی منبع لرزه زا ، اثرات مسیر حرکت موج ، اثرات عملی ساختگاه و اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شود . در واقع اندرکنش خاک و سازه به محاسبه ی مقدار واقع بار لرزه ای تجربه شده توسط سیستم سازه –پی –خاک می پردازد که توسط حرکت آزاد سطح زمین ایجاد شده است .پاسخ سازه در برابر زلزله بستگی به ویژه های حرکت زمین ، خاک و سازه دارد .اساسا "حرکت پی سازه احداث شده برروی سنگ یا خاک بسیار سخت است که در صورت عدم احداث سازه در آن نقطه ایجاد می شود (حرکت سطح آزاد زمین).در خاک های نرم به علت کوپل شدن خاک و سازه هنگام زلزله ،حرکت سطح آزاد متفاوت از حرکت پی می باشد. تحلیل عکس العمل دینامیکی سازه هایی که تحت بارهای بالقوه زلزله در پایه خود قرار دارند ، یکی از وظایف اصلی مهندسی زلزله می باشد .در دینامیک سازه تعیین روش هایی برای تعیین تنش ها و تغییر مکان های سازه که تحت اثر بارهای دینامیکی مانند زلزله و انفجار قرار دارد ، از اهم وسایل است .اما در حالت کلی با خاک اطراف خود در حال برهم کنش است ، بنابراین بار وارده به محیط خاک اطرافی سازه ، در خلال حرکات زلزله ، باید در نظر گرفته شود .در مقایسه با سازه ، خاک دارای قلمرونامحدودی است که شرایط انتشار امواج در آن باید در مدل دینامیکی آورده شود .در یک دید کلی می توان گفت که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث می شود تا رفتار سازه به رفتار واقعی اش نزدیک تر شود .امروزه با وجود نرم افزار های با تحلیل رویکرد اجزا محدود و قدرت مدل سازی در این

نرم افزارها ، زمینه تحقیق و بررسی مدل های مختلف به شکل منطقی وواقع گرایانه میسرشده است [2] تعریف اندرکنش خاک و سازه در تحلیل دینامیکی عموما "فرض می شود که خاک زیر شالوده صلب بوده و از انعطاف پذیری خاک زیر شالوده صرف نظر می شود .در این حالت پاسخ متاثر از خواص دینامیکی خود سازه است و خواص خاک زیرشالوده تاثیری در پاسخ سازه ندارد در حالی که اگر خاک زیر شالوده نیز در تحلیل ها در نظر گرفته شود سیستم جدیدی ناشی از اندرکنش خاک و سازه تشکیل خواهد شد که رفتار آن متفاوت از حالت قبل خواهد شد .دربیان دیگر ، هنگامی که یک موج از یک منبع به داخل محیط خاک تابیده می شود بسته به نوع محیط تغییر ماهیت داده که دو نکته مهم در خلال این موج باید مدنظر قرار گیرد .اول آنکه حرکت میدان آزاد در محل مورد نظر در غیاب سازه شدیدا "تحت تاثیر قرار گرفته و تغییر می کند و دوم آنکه وجود سازه روی خاک باعث می شود که سیستم دینامیکی مورد نظر دیگر سیستمی با پایه صلب نباشد و سازه مورد نظر با خاک اطراف خود یک رفتار اندر کنشی نشان دهد که این باعث می گردد که حرکت اعمال شده به پایه این سازه تحت تاثیر قرار بگیرد .این حرکت ممکن است شامل مولفه هایی به جز مولفه های انتقالی باشد .اندرکنش خاک و سازه ممکن است به ایجاد حرکت های گهواره ای و پیچشی (که به واسطه انعطاف پذیری محیطزیر پی بسیار محتمل است) منجر گردد [3] .اندرکنش دینامیکی از دو مکانیزم اندرکنش بین سازه ی پی و خاک به شرح زیر ناشی می شود:

الف- اندرکنش اینرسی

این نوع اندرکنش که نیروهای اینرسی سازه ناشی می شود به این روال می باشد که پس از این نیروی ناشی از زلزله به سازه اعمال شده نیروهای اینرسی سازه منجر به تولید لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در ترازپایه سازه می شوند که این خود سبب تغییر مکان پی سازه نسبت به سطح آزاد می گردد.

ب- اندرکنش سینماتیک

تفاوت میان سختی پی و خاک زیر آن باعث می شود که پی نسبت به سطح آزاد تغییر مکان پیدا کرده و با حالتی که پی بر روی سنگ بستر است تفاوت داشته باشد .این تغییر مکان ها عبارتند از قید سینماتیکی مربوط به حرکت جسم صلب پی ، مدفون بودن و اختلاف سطح آزاد با سطح پی و میزان تفرق امواج لرزه ای از اطراف پی در واقع می توان چنین بیان نمود که سازه با خاک اطراف خود در اندرکنش بوده و خود این باعث تغییرات بیشتر در اثر امواج لرزه ای می شود .مفهوم این امر آن است که نمی بایستی در آنالیزهای دینامیکی تنها به آنالیز سازه پرداخت ، بلکه اثر متقابل سازه و خاک نیز می بایستی در نظر گرفته شود .پاسخ دینامیکی سیستم خاک –سازه وقتی تحت تاثیر یک بارگذاری دینامیکی قرار بگیرد ، تابعی از 3عامل پارامترهای دینامیکی زمین محل ، نیرو های و تحریکات وارده و مدل دینامیکی سیستم می باشد .پارامترهای دینامیکی زمین محل شامل مدول ارتجاعی خاک ، مدول برشی خاک ، ضریب پواسون خاک و میرائی در خاک است .میرائی به دو دسته میرائی داخلی و تشعشعی تقسیم می شود .میرائی داخل در اثر عبور امواج ارتعاشی ، در داخل خاک به وجود می آید و می توان آن را عامل اتالف انرژی در اثر پسماند در خاک دانست .اما میرائی تشعشعی یا تابشی عامل اتلاف انرژی در اثر پخش امواج از پی سازه به اطراف محدوده نیمه بی نهایت است و به این دلیل به چنین توزیع هندسی انرزی امواج ارتجاعی ، میرائی هندسی می گویند .تحلیل مناسب عکس العمل دینامیکی یک سیستم اندرکنش خاک و سازه ، نیازمند شناخت مولفه های مختلف سیستم و تحریکات وارده است که شامل تعیین حرکت میدان آزاد (یعنی حرکت زمین بدون حضور سازه) و محاسبه پراکنش (تفرق) امواج زلزله به واسطه پدیده حاصل ازاندرکنش خاک و سازه می باشد .مدل دینامیکی سیستم شامل ارتباط مدل دینامیکی سازه با مدل دینامیکی محیط پی می باشد .در حل معادالت حرکت مربوط به اندرکنش خاک و سازه زمانی که پارامترها و متغییرها مستقل از فرکانس باشند ، دو روش حل در حوزه زمان و فرکانس ، هر دو قابل استفاده می باشند .اما برای حل معادلات حرکت در حالتی که رفتار غیرخطی و شرایط مرزی است تنها روش انتگرال گیری (حل در حوزه زمان) قابل استفاده خواهد بود[4]

اهمیت اندرکنش خاک و سازه در سازه های مختلف معمولا "از اثرات اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه های مرسوم ، چشم پوشی می شود .این امر اغلب باعث محافظه کارانه شدن طراحی می شود . اندرکنش خاک و سازه برای سازه های سنگین و سخت با پی های عمیق و یا سازه های که سیستم بار برآنها باعث سختی پی شده است ، بسیار مهم است .نیروگاه های هسته ای ساخته شده برروی خاک از جمله سازه هایی هستند که اندرکنش خاک و سازه در آنها اهمیت دارد .اثرات اندرکنش خاک وسازه مهم است ومعمولا "نمی توان از آن چشم پوشی کرد . برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک وسازه ، مقررات ساختمان های مرسوم ، مقدار بار جانبی استاتیکی معادل را کاهش می دهند .در سازه های ویژه مثل نیروگاه های هسته ای ، تحلیل بسیار پیچیده ای برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه انجام می شود. سوالی که ممکن است در رابطه با تحلیل اندرکنش سازه و خاک مطرح گردد، این است که تحت چه شرایطی فرض صلب بودن تکیه گاه سازه (عدم در نظر گرفتن اندرکنش) خطای زیادی در محاسبه ایجاد می نماید .تحقیقات انجام نشان می دهدکه تحلیل اندرکنش سازه و خاک در مواقعی که رابطه زیر برقرار باشد ، کاملا ضروری است :

$$Vs\times h/f<20 \quad (۱)$$

که در رابطه فوق Vsسرعت امواج برشی خاک و fفرکانس اصلی سازه با فرض صلب بودن تکیه گاه و hارتفاع آن می باشد .در سازه های قابی شکل $f\approx 30/h$ وبرای ساختمان های دارای دیوار برشی $f\approx 45/h$است . چنانچه از رابطه های تقریبی ذکر شده استفاده شود ، در این صورت می توان نتیجه گرفت که در ساختمان های قابی شکل برای $Vs\leq 600m/s$و در ساختمان های برشی برای ، $Vs\leq 900m/s$تاثیر اندرکنش قابل ملاحظه خواهد بود.

مراحل انجام تحلیل اندرکنش خاک و سازه شامل انجام مراحل زیر است:

۱- تحلیل پاسخ ساختگاه :محاسبه حرکت آزاد سطح زمین (یعنی حرکتی که سطح پی در صورت عدم وجود سازه و هرگونه خاک برداری تجربه می کند).

۲- تحلیل پراکندگی امواج توسط پی :حرکت سطح آزاد زمین از سطح پی پراکنده می شود .این پراکندگی براثر خاکبرداری خاک پی و شرایط مرزی سطح مشترک سازه و پی ایجاد می شود.

۳- مدل سازی سازه :عبارت است از محاسبه خواص دینامیکی سازه

۴- تحلیل امپدانس پی :عبارت است از محاسبه روابط دینامیکی نیرو –جابه جایی پی

۵- تحلیل پاسخ اندرکنش :عبارت است از محاسبه پاسخ سیستم کوپل شده خاک و سازه در برابر نیروهای دینامیکی اعمالی مراحل مختلف انجام تحلیل اندرکنش در شکل به صورت شماتیک نشان داده شده است[5] .

۲- طبقه بندی روش های تحلیل اندرکنش خاک و سازه

برای تحلیل اثر اندرکنش خاک- سازه ، روش های مختلفی وجود دارد که عبارتند از :

۱-روش المان های محدود (F.E.M)

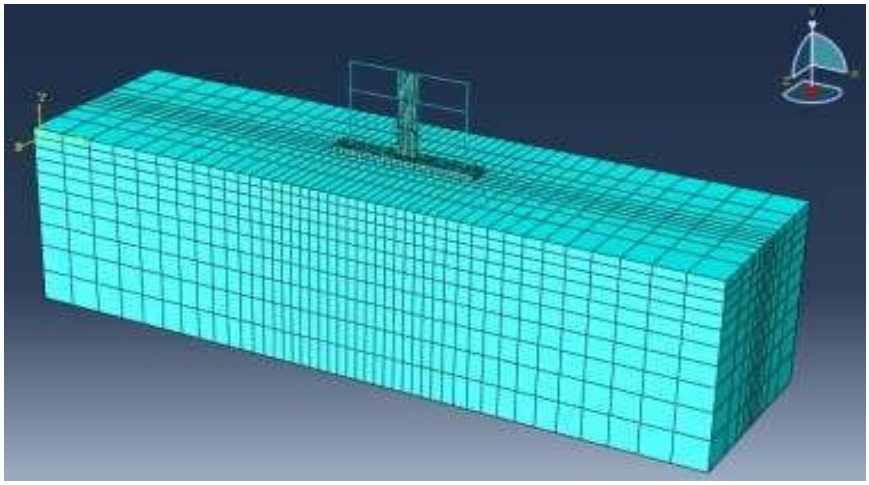
۲-روش المان مرزی (B.E.M)

۳-روش هایبرید یا پیوندی

۴-روش زیر سازه

۲-۱- روش مستقیم

روش حل مستقیم اندرکنش خاک-سازه به وسیله ی متد اجزای محدود انجام می شود و می تواند در محدوده ی وسیعی از مسائل با هندسه های مختلف اعمال شود .در این روش، سازه و قسمتی از خاک اطراف سازه ی مدفون شده، توسط المانهای محدود مدل شده و سپس با هم تحلیل می شوند .حرکت میدان آزاد خاک در مرزها به سیستم اعمال می شود .این روش دارای این برتری مهم است که قادر به در نظر گرفتن مشخصات غیرهمگن خاک یا سنگ می باشد .تجربه نشان داده که این روش برای استفاده سازه های مدفون، ساده تر می باشد. روش مستقیم، اجازه در نظر گرفتن قوانین رفتاری غیرخطی آن بویژه سطح تماس خاک و سازه (لغزش و جدا شدگی بر روی پی آن) می باشد .در روش مستقیم، عکس العملهای سازه و خاک به طور همزمان به دست می آیند .در این روش سازه می تواند خیلی بزرگ مدل گردد. در روش مستقیم بخشی از خاک به همراه سازه مدل می گردد .در این روش محدوده ی خاک که دارای میرایی ماده ای می باشد به وسیله مرزهای مصنوعی که به اندازه ی کافی دور از سازه در نظرگرفته می شوند(طوری که درتحریک زلزله، امواج ایجاد شده در فصل مشرک خاک-سازه به آن مرزهانمی رسند)و یا بایستی شرایطی در این مرزها رعایت گردد که امواج حاصل جذب گردد و انعکاس بوجود نیاید.



شکل ۱: سیستم خاک-سازه.

بار مؤثرسازه برحسب حرکت محیط آزاد مرزهای خارجی توصیف می شود و فقط روی آن گره هایی که در مجاورت مرزهای خارجی هستند اعمال می گردد. در عمل شتاب زلزله از طریق حرکت در تراز سنگ بسترکه در عمق واقع شده اعمال می گردد .سنگ بستر در واقع سطح انتهایی لایه ی خاک است که خاک بر روی آن به صورت گیردار فرض می شود .حرکت سنگ بستر از حرکت سطح آزاد زمین متفاوت بوده و پیشاپیش شناخته شده نیست به همین دلیل برای یک پروژه ی عملی باید خاک را قبال بدون حضور ساختمان مطالعه کرده و حرکت سنگ بستر را در اثر حرکت سطح آزاد زمین (که توسط شتاب نگاشتهای زمین ثبت شده است) تعیین کرد .این عمل خود مستلزم تکنیکهای دقیقی است و می تواند موضوع بحث گسترده ای باشد .پس از انجام این عمل مدل اصلی متشکل از خاک وسازه را در نظرگرفته ودرترازسنگ بستر، حرکتی را که بانمودار شتاب-زمان مشخص شده، اعمال می کنند . ثابت شده که اکثر طیفهای زلزله، امواجی که از روی مرز گیردار افقی که به اصطلاح پایه مدل را تشکیل می دهند، از اهمیت چندانی برخوردار نبوده و اختلال چندانی دردقت نتایج بوجود نمی آورند .چرا که امواجی که در مبحث اندرکنش خاک-سازه بسیار حائزاهمیت می باشند بیشتر امواج سطحی می باشند و این امواج چنانکه از نامشان پیداست نمی توانند عمیقا" در زمین نفوذ کنند .این امواج بیش از آنکه ازمرزهای تحتانی مدل منعکس گردند از مرزهای جانبی مدل انعکاس می یابند .انتخاب عمقی تقریباً به اندازه ی ارتفاع سازه برای لایه ی مش بندی خاک مناسب است .ابعاد مش بندی خاک را نبایدبیشتر از $\lambda/5$ انتخاب گردد. (طول موج برشی می

باشد) ابعاد المانها درجهت انتشار امواج می بایست حداکثربرابر از$\lambda/8$ ودرجهت عمود بر انتشار حداکثر بایستی$\lambda/5$باشدکه درآن $\lambda = V/F_{00}$ می باشدو F_{00} فرکانس انفصال می باشد. نکته ی مثبت این روش تحلیل آن است که یک برنامه استاندارد تحلیل دینامیکی سازهها باروش اجزای محدود، بدون آنکه الزاماً برنامه ی خاصی جهت مدل کردن خاک به برنامه استاندارد اصلی اضافه شود، برای انجام این روش تحلیل کافی است. دراین حالت فقط بایستی جرم مخصوص ،ρمدول یانگ ،Eمدول برشی ،Gضریب پواسون vو ضریب میرایی Dمربوط به خاک مشخص باشند، رفتار خاک با داشتن پارامترهای یاد شده با دقت قابل قبول تعیین خواهدشد.در این روش تغییرات خواص خاک در جهات مختلف (که آثار ناهماهنگی خاکمی باشند)براحتی قابل اعمال کردن است. بعلاوه شکلهای نامنظم مرزهای خاک، مرزهای سازه و هرگونه بی نظمی باشکل خاص دیگردرخاک یاسازه می تواند در نظر گرفته شود. در این روش تحلیل درحوزه ی زمانی انجام می شود .لازم به ذکر است که برخی از پارامترهای خاک به فرکانس تحریک حساسمی باشند، بعنوان مثال، سختی خاک ومیرایی آن، هر دو به فرکانس تحریک وابسته اند. این وابستگی به فرکانسهای کم، مانند بارحاصل از زلزله ممکن است چندان زیاد نباشد .اما اگر فرکانس تحریک بالا باشد (مثال در مورد پی ماشین آلات دورانی) دراین صورت باید به این مطلب توجه گردد که فرکانس تحریک چه اثری بر دامنه ی کرنش و ضرایب مدول یانگ و مدول برشی خواهد داشت، دراین روش اجزای محدود که تحلیل در حوزه ی زمانی انجام می گیرد از این امر صرف نظر می گردد. در این روش سیستم سازه و خاک (سازه و بخشی از خاک اطراف سازه)در یک مرحله مورد تحلیل قرار می گیرد .سازه و خاک به وسیله روش المان های محدود مدل می شود به علت اینکه از یک مدل غیر پیوسته برای مدل کردن یک محیط نیمه بی نهایت استفاده شده است، نحوه اعمال شرایط مرزی مناسب بسیار مهم است .به علت حجم قابل توجه و تعداد زیاد المان ها این روش بسیار مشکل و زمان بر می باشد .در نتیجه اکثراً در روش حل مستقیم از مدل های دو بعدی ساده شده یا مدل جرم متمرکز برای سازه به همراه مدل های تقریبی برای بررسی رفتار غیرخطی خاک استفاده می شود .به دلیل فرمول بندی کاملا" متفاوت و اختلاف درجات آزادی تعریف شده برای المان های سازه و خاک نمی توان به سادگی المان های سازه ای را به المان های خاک کوپل نمود. درمدل های اجزا محدود می توان مرز زیرین مدل خاک را در عمقی در نظر گرفت که بر روی خاک بسیار سخت تر به عنوان کف سنگ لرزه ای قرار گیرد (این عمل در انتخاب رکوردهای زلزله مهم خواهد بود). شرایط مرزی جانبی مختلفی که در این روش بکار برده می شود عبارتند از مرزهای ابتدایی، مرزهای جاذب ومرزهای سازگار[6] . مدل اندرکنش خاک و سازه به سه مجموعه از نقاط گرهی تقسیم می شود :نقاط مشترک در سطح، بین سازه و خاک که بااندیس cنمایش داده می شود، گره های سازه ای که با اندیس sو گرههای فونداسیون که با اندیس fنمایش داده می شوند .از تقریب سختی مستقیم در آنالیز سازه ای، نیروهای دینامیکی معادل در قسمت جابجایی کل Uبه وسیله معادله زیرماتریس زیربدست می آید. جرم و سختی گره های تماسی برابر مجموع سهم سازه و فونداسیون می باشد. بمنظور حل مسئله SSIنیازمند حل معادله بالا می باشیم .این معادله با استفاده از روش عددی نیومارک حل می شود که مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب کل را نتیجه می دهد .جهت رسیدن به حل مسئله SSIبطورمستقیم پاسخ دینامیکی فونداسیون بدون سازه محاسبه می شود .جابجایی، سرعت و شتاب میدان آزاد باv ، $\dot{v}$ و $\ddot{v}$بیان می شود .در اینجا $\ddot{U}_g$ بردار شتاب زمین می باشد.

$$M_{cc}=M_{cc}^{(s)}+M_{cc}^{(f)},\ c_{cc}=c_{cc}^{(s)}+c_{cc}^{(f)},\ K_{cc}=K_{cc}^{(s)}+K_{cc}^{(f)} \qquad (۲)$$

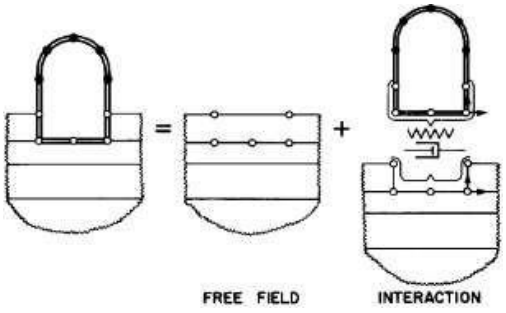
با یک تغییر متغیر ساده، مقادیر جابجایی کل U،سرعت کل $\dot{U}$ و شتاب کل $\ddot{U}$ بر حسب uو vبیان می شود:

$$R = -\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sc} & 0 \\ M_{cs} & M_{cc} & M_{cf} \\ 0 & M_{fc} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} & 0 \\ C_{cs} & C_{cc} & C_{cf} \\ 0 & C_{fc} & C_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_c \\ \dot{v}_f \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{Bmatrix} \quad (۳)$$

$$F = -\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sc} & 0 \\ M_{cs} & M_{cc} & M_{cf} \\ 0 & M_{fc} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_s^g \\ \ddot{U}_c^g \\ \ddot{U}_f^g \end{Bmatrix}$$

۲-۲- روش زیر سازه

فرض اصلی این روش برقراری اصل برهم نهی که صریحا "متضمن رفتار خطی است می باشد .روش زیر سازه بر اساس تقسیم سیستم خاک-سازه به یک سری اززیرمسئله های ساده تر می باشد .هر زیر مسئله جداگانه حل شده و در مرحله نهایی تحلیل، بر پایه اصل بر هم نهی نتایج با هم ترکیب می شوند. این روش به خصوص درمواقعی که یک قسمت سیستم مثلا "پی دارای هندسه ساده ای است درحالی که قسمت های دیگرهندسه پیچیده ای دارند،کاربرد دارد. در روش زیر سازه فرض اصلی براصل اجتماع قوا در محدوده ی مرزی بین خاک و سازه می باشد برای مثال شکل (۲) را درنظر بگیرید. گره های مدل دینامیکی سازه در شکل سمت چپ مشخص شده اند، گره هایی در طول فصل مشترک بین خاک وسازه قراردارند، به صورت دایره های توخالی مشخص شده اند . ابتدا حرکت سطح آزاد زمین بدون حضور سازه و بدون خاکبرداری تعیین می گردد .دراین مرحله حرکت سطح آزاد زمین فقط در نقاط مشترک خاک می باشد.



شکل ۲: روش زیرسازه برای تحلیل اندرکنش خاک- سازه.

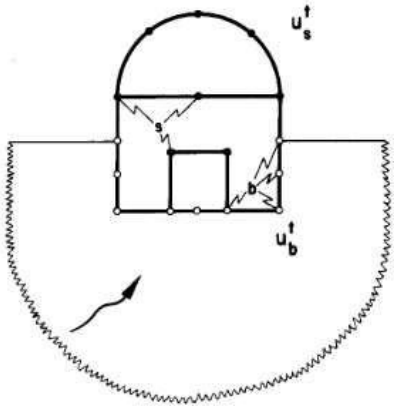
قدم بعدی تحلیل شامل دو مرحله است :در مرحله ی اول محدوده ی خاک به صورت یک زیر سازه در نظر گرفته شده و بعد ازنوشتن ماتریس سختی خاک، آن را به صورت دینامیکی مورد بررسی قرارداده و نهایتاً سختی دینامیکی بدست می آیند .ضرایب سختی دینامیکی خاک به صورت یک فنر و کمک فنر (میرا گر) و با استفاده از نتایج قدم اول مدل شوند .سپس سازه بر روی این فنر و کمک فنر قرار گرفته و برای حالتی که ارتعاشات تعیین شده در نقاط تلاقی خاک و سازه بر فنر و کمک فنر تأثیر می کنند، تحلیل دینامیکی قسمت بعدی سیستم انجام یافته و بدین ترتیب مسئله اندرکنش خاک و سازهی دو مسئله ی جدا و در عین حال مرتبط باهم تفکیک شده و نتایج نهایی بدست می آید .مراحل محاسباتی بطور مختصربشرح زیر می باشد:

$$\begin{Bmatrix}\ddot{U}_s\\ \ddot{U}_c\\ \ddot{U}_f\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\ddot{v}_s\\ \ddot{v}_c\\ \ddot{v}_f\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\ddot{u}_s\\ \ddot{u}_c\\ \ddot{u}_f\end{Bmatrix}\ ,\ \begin{Bmatrix}\dot{U}_s\\ \dot{U}_c\\ \dot{U}_f\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\dot{v}_s\\ \dot{v}_c\\ \dot{v}_f\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}\dot{u}_s\\ \dot{u}_c\\ \dot{u}_f\end{Bmatrix}\ ,\ \begin{Bmatrix}U_s\\ U_c\\ U_f\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}v_s\\ v_c\\ v_f\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}u_s\\ u_c\\ u_f\end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}M_{ss} & M_{sc} & 0\\ M_{cs} & M_{cc} & M_{cf}\\ 0 & M_{fc} & M_{ff}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{u}_s\\ \ddot{u}_c\\ \ddot{u}_f\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}C_{ss} & C_{sc} & 0\\ C_{cs} & C_{cc} & C_{cf}\\ 0 & C_{fc} & C_{ff}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{u}_s\\ \dot{u}_c\\ \dot{u}_f\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}K_{ss} & K_{sc} & 0\\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf}\\ 0 & K_{fc} & K_{ff}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_s\\ u_c\\ u_f\end{Bmatrix}=R+F \quad (۴)$$

یک حالت کلی را که احتمال دارد بخشی از سازه در خاک مدفون باشد، در نظر بگیرید :سیستم خاک وسازه مطابق شکل (5-3)نامگذاری می شوند .مقادیر تغییر مکان کلی سیستم با $\{U^t\}$ نشان داده می شوند که درحالت کلی تابعی از فرکانس wاست . منظور از کلمه ی "کلی "به منزله ی تغییر مکان گره های سازه در سیستم خاک و سازه نسبت به یک مبدأ ثابت است .بردار $\{U^t\}$ می تواند به زیر بردارهای $\{U_b^t\}$و $\{U_s^t\}$تجزیه گردد که $\{U_b^t\}$مربوط به تغییر مکان کلی گره های واقع در فصل مشترک خاک وسازه و $\{U_s^t\}$تغییر مکان کلی سایرنقاط سازه می باشند. ماتریس سختی دینامیکی سازه که یک محیط محدود است به طریق زیرمحاسبه می گردد:

$$[S] = [K](1 + 2\xi i) - w^2 [K] \quad (۵)$$



شکل ۳: سیستم خاک وسازه.

متداول ترین روش حل اندرکنش خاک و سازه تحلیل بر اساس روش زیر سازه است .در این روش، مسئله خطی اندرکنش خاک وسازه به یکسری زیرمسئله ساده تر تفکیک می شود و سپس نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قوا ترکیب می شوند .در روش جداسازی و تفکیک زیر سازه ها کل سیستم خاک وسازه نشان داده شده در ، به سه زیر سازه تفکیک می شود .زیرسازه ی Iشامل میدان آزاد ساختگاه است، زیر سازه ی IIشامل حجم خاک برداشته شده و زیر سازه IIIشامل سازه ی رویی و پی آن است .در روش تفکیک زیر سازه ها، فرض بر این است که اندرکنش خاک و سازه فقط در مرز مشترک زیر سازه ها و سطح تماس پی و خاک رخ می دهد .معادله حرکت زیر سازه های ، می تواند به فرم ماتریس زیر نوشته شود[6] .

$$[M]\{\ddot{\hat{u}}\} + [K]\{\hat{u}\} = \{\hat{Q}\} \quad (۶)$$

$$\{\hat{Q}\} = \{Q\}\exp(i\omega t)$$

$$\{\hat{u}\} = \{u\}\exp(i\omega t)$$

معادله حرکت برای سیستم اندرکنش خاک و سازه، به صورت زیر تفکیک می شود:

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_{ii}^{II} + X_{ii} & -C_{iw}^{II} & C_{is}^{III} \\ -C_{wi}^{II} & -C_{ww}^{II} & 0 \\ C_{si}^{III} & 0 & C_{ss}^{III} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_w \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ii}u_i \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (۷)$$

۲-۳- روش مختلط

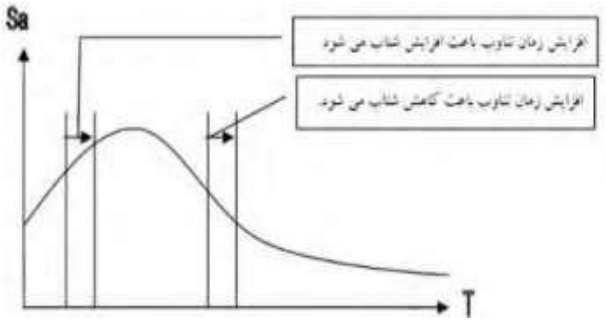
روش زیر سازه دیگری که سیستم کلی خاک-سازه را به دو زیر سیستم تقسیم می کند، روش هیبرید می باشد که توسط گوپتاابداع شده است .اولین زیر سیستم، موسوم به میدان نزدیک است که نه تنها سازه بلکه محدودیت معینی از خاک اطراف سازه را نیز در بر می گیرد .دومین زیر سیستم، میدان دور، که محدوده ی باقیمانده از خاک نیمه بی نهایت، در بیرون سطح تماس نیم کره را شامل میشود. این روش، بیشتر در تحلیل سه بعدی اندرکنش خاک سازه به کار می رود و با استفاده از قدرت روش اجزای محدود، توانایی مدل کردن هندسه پیچیده پیهای نیمه مدفون و انعطاف پذیر وهمچنین فضای پیوسته را دارا می باشد .در این حالت امپدانس باید برای یک محیط پی نیمه بی نهایت تعیین شود[5] . تاثیر اندرکنش بین خاک و سازه بر روی پارامترهای سازه در این قسمت ، اثر ملحوظ کردن اندرکنش در سازه ها برروی بعضی از پارامترها را در زیر مورد بررسی قرار می دهیم [8].

۱- میرایی: میرایی در یک محیط انعطاف پذیر نسبت به یک محیط صلب از اهمیت بیشتری برخوردار است .میرایی در محیط انعطاف پذیر را می توان به دو قسمت میرایی تشعشعی و میرایی هیسترزیس خاک تقسیم کرد.

۲- میرایی تشعشعی: در هنگام زلزله امواج پس از انتشار و ارتعاش سازه ، از پی سازه به سمت محیط نیمه بی نهایت خاک حرکت کرده و انرژی به علت برخورد با این محیط بی نهایت میرا می شود .این میرایی که تابعی از چگالی خاک ، مدول ارتجاعی زمین ، ضریب پواسون خاک ، جرم واحد سطح سازه و فرکانس زاویه ای طبیعی زمین می باشد برای مدل های بالاتر دچار کاهش می شود . شایان ذکر است میرایی تشعشعی بانرم تر شدن خاک و عمیق تر شدن محیط فراگیر افزایش می یابد.

۳- میرایی هیسترزیس خاک: این نوع میرایی در اثر تغییر شکل های غیرارتجاعی زمین در مجاورت پی صورت می گیرد و هر چه شدت زلزله بیشتر باشد بسته به نوع خاک این میرایی نیز افزایش می یابد .لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه ، معمولا" موجب افزایش نسبت میرایی درسازه ها ، و افزایش نسبت میرایی در سازه موجب کاهش شتاب و تغییر مکان سازه می گردد.

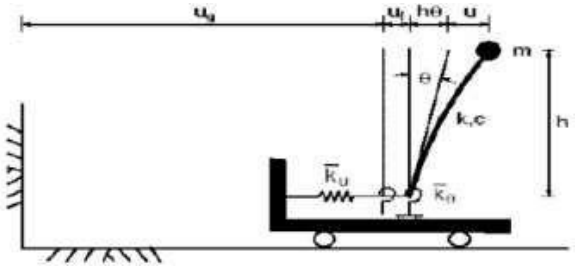
۴- زمان تناوب: ایجاد حرکت گهواره ای در سازه که خود از اثرات اندرکنش خاک و سازه می باشد می تواند منجر به افزایش پریود طبیعی سازه گردد که این افزایش زمان تناوب بر پاسخ سازه نیز تاثیر گذار خواهد بود .افزایش زمان تناوب ممکن است با توجه به شرایط خاک وزمان تناوب باعث افزایش یا کاهش شتاب وارد بر سازه شود(شکل ۴).



شکل ۴: تغییرات شتاب نسبت به زمان تناوب.

شکل فوق نشان می دهد که در ساختمان های کوتاه اثرات حرکت افقی و گهواره ای در اندرکنش خاک و سازه تقریبا یکسان است اما با افزایش ارتفاع سازه حرکت گهواره ای غالب می شود به شکلی که در ساختمان های بلند (۲۰طبقه به بالا)بیش ازنود درصد تغییرات پریود سازه ناشی می شود.معمولا "افزایش زمان تناوب موجب افزایش تغییر مکان می گردد که این افزایش باعث افزایش اثرات می گردد.

۵- تغییر مکان سازه: دوران بسیار کوچکی ناشی از حرکت گهواره ای سازه می تواند تاثیر قابل توجهی برروی تغییر مکان سازه داشته باشد .که این خود پاسخ سیستم سازه را به شکل عمده ای تغییر می دهد .همانطور که قبال گفته شد مکانیزم اصلی اندرکنش خاک و سازه مربوط به حرکات افقی و گهواره ای پی ها می باشد ، در یک سیستم یک درجه آزاد مطابق شکل(۵) می توان سهم حرکت افقی پی در حرکت جانبی سقف بام سازه را ازتفاضل حرکت افقی پی و سطح آزاد همچنین حرکت گهواره ای پی در حرکت جانبی سقف بام سازه را برابر hΘدر نظر گرفت.



شکل ۵: سیستم یک درجه آزادی.

۶- تاثیر بر زمان تناوب اصلی سازه و شکل مودهای سازه: با کاهش سختی خاک زیر سازه (در نظر گرفتن اندرکنش) ، زمان تناوب اصلی سازه افزایش می یابد .شکل مودهای سازه تابع سازه سختی خاک خواهد بود و به همین علت، مودهای غالب در سازه تغییر خواهند نمود.

۷- تاثیر بر برش پایه و لنگر واژگونی: اگر ما پی را به صورت ثابت در نظر نگیریم ، یعنی خاک زیر پی رابصورت انعطاف پذیر و در تعامل با سازه در نظر بگیریم ، آنگاه نیروی برشی بوجود آمده در اثر زلزله(V) باعث ایجاد حرکت نسبی جانبی در پی می شوند . همچنین لنگر بوجود آمده در اثر زلزله (M) ، باعث ایجاد حرکت دورانی در پی می شوند .در نتیجه با انعطاف پذیر در نظرگرفتن خاک و بوجود آمدن این حرکات نسبی پی ، حرکات و جابجایی نسبی نقاط مختلف سازه نسبت به پی کاهش می یابد و در نهایت می توان گفت لنگر واژگونی و غالبا برش پایه ی سازه کاهش می یابد.

۸- تاثیر بر میرایی پی: در اثر ایجاد حرکات نسبی جانبی و دورانی در پی ناشی از عدم ثابت و صلب در نظر گرفتن پی و خاک زیر آن ، دو نوع میرایی تشعشعی و میرایی چرخه ای بوجود می آید که می توان گفت به نوعی حرکت نسبی دورانی پی بیشتر باعث ایجاد میرایی تشعشعی وحرکت نسبی جانبی پی بیشتر باعث ایجاد میرایی چرخه ای می شود . حرکت نسبی دورانی پی بیشتر باعث ایجاد میرایی تشعشعی می شود .در واقع این میرایی به دلیل انتشار امواج است .پس ازبرخورد موج با پی و بعد از آن برخورد موج با سازه و همچنین درمسیر برگشت موج و انتقال آن از سازه به پی و سپس برخورد آن با خاک ، در این رفت و برگشت و انتقال موج که باعث تحریک و جابجایی سازه و پی می شود ، به دلیل نبودن پی و دوران پی ، سازه و پی و خاک به هم ضربه می زنند و تا حدی مانع حرکت هم می شوند و در نتیجه در کل سیستم میرایی بوجود می آید.میرایی چرخه ای نیز در واقع ناشی از حرکت نسبی جانبی پی نسبت به زمین و به دلیل اصطکاک بین زمین و پی است .در واقع این رفت و برگشت پی به نوعی مانند بارگذاری و باربرداری است و در نتیجه نمودار تنش –کرنش به صورت چرخه ای در می آید .در نتیجه میرایی هندسی در پی که به دلیل تعامل رفتار پی و خاک و سازه می باشد ، معمولا" تقلیل زیادی در واکنش های سازه ایجاد می نماید .به عنوان مثال برای سکوهای بتنی وزنی ، این تقلیل برای لنگرهای واژگونی حدود 50درصد می باشد.

۳- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می دهد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در طراحی سازه های امن مقاوم در برابر زلزله امری ضروریست .لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه در محاسبات دینامیکی سازه باعث افزایش پریود سازه می شود که با توجه به نوع خاک و سختی سازه مقدار افزایش پریود متفاوت است .هر چه نسبت سختی سازه به خاک بیشتر شود میزان ازدیاد پریود نیز بیشتر می گردد .که این مسئله بیشتر برای سازه سخت برروی خاک نرم مصداق پیدا می کند نه سازه نرم بر روی خاک سخت اهمیت این موضوع در مورد سازه های سنگین و سخت با پی های عمیق و یا ساختمان های بلند بسیار مهم است .اثر اندرکنش خاک و سازه در همه سازه ها باعث کاهش برش پایه و بسته به رکورد زلزله باعث کاهش جابجایی بام گردید .نوع خاک در مسئله اندرکنش خاک سازه بسیار حائز اهمیت است و هر چه سرعت موج برشی در خاک کمتر شود اثر اندرکنش خاک و سازه درتحلیل بیشتر می گردد . در ساختمان های قابی شکل برای $Vs\leq600m/s$و در ساختمان های برشی برای ،$Vs\leq900m/s$تاثیر اندرکنش قابل ملاحظه خواهد بود .تاثیر اندرکنش خاک و سازه در تحلیل سبب نتایج زیر می گردد

۱-افزایش پریود طبیعی سازه به علت ایجاد حرکت گهواره ای در سازه

۲-افزایش میرایی سازه

۳-ایجاد حرکت نسبی جانبی و دورانی در پی

۴-کاهش لنگر واژگونی و برش پایه ساختمان ها

۵-افزایش تغییرمکان جانبی سازه

۶-ایجاد میرایی تشعشعی در پی به علت حرکت نسبی دورانی پی

۷- ایجاد میرایی چرخه ای در پی به علت حرکت نسبی جانبی پی نسبت به زمین

با توجه به نتایج بدست آمده چنین می توان بیان نمود که عدم لحاظ پدیده اندرکنش خاک –سازه در تحلیل و طراحی سازه های امن و مهم از قابلیت اعتماد آن ها می کاهد .عبارت دیگر در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک –سازه جهت دستیابی به پاسخهای واقعی و پیش بینی رفتار سازه امری ضروریست.

۴- مراجع

1-Venanzi, I., Salciarini, D., The effect of soil–foundation–structure interaction on the wind-induced response of tall buildings, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti, 93 – 06125, 2014 .

2- Mengke, Li., Xi ao, Lu., Influence of soilestructure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 14(6), 477-485,2014 .

3- J.P. Wolf., Dynamic Soil-Structure Interaction, PRENTICE HALL, 1985

۴- رحیم زاده، م .و پورشاء، م . ارزیابی لرزه ای قابهای خمشی فولادی با ارتفاع متفاوت با در نظرگیری اندرکنش سازه و خاکهای نوع سخت، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشگاه فنی و مهندسی دانشگاه اردبیل، 1392 .

۵- شریعت یزدی، ص .و پورحسینی، ر .بررسی تاثیر اندرکنش خاک –سازه بر روی عملکرد سیستم دوگانه، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، 1392 .

۶- قلی زاده، ر .حکمت، ع .آنالیز دینامیکی اندرکنش شمع و خاک به روش المان محدود در حالت سه بعدی با استفاده از المان های نامحدود، پنجمین کنگره مهندسی عمران، مشهد،1389 .

۷- آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله(استاندارد ، 2800) ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی، 1392.

۸- حسینی، س .یوسف پور، ف .اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه های سنگین و نیمه مدفون، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مشهد،1391.