

## مرور مهمی بر ایده آل سازی و مدل سازی برهم کنش در سیستم خاک-پی-سازه

حامد رجبی صیقلانی\*<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶ تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵

### چکیده

برهم کنش بین سازه‌ها، فونداسیون‌هایشان و محیط خاکی زیر فونداسیون، رفتار حقیقی سازه را به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالتی که از ملاحظه خود سازه درک می‌شود، تغییر می‌دهد. لذا در طرح‌های بهبود یافته سازه‌های مهم نیاز به مدل دقیقی از سیستم برهم کنش بین خاک-پی-سازه که دارای اعتبار، کارایی و دقت محاسباتی است، می‌باشد. پژوهش حاضر، تلاش به جمع آوری انواع مدل‌های موجود در این زمینه در مقالات گذشته می‌نماید. تاکید بر مدل‌سازی فیزیکی محیط خاکی است چرا که ظاهراً مدل‌سازی سازه تقریباً ساده است. نقاط قوت و ضعف مدل‌ها در یک مقاله شرح داده شده است تا شاید در انتخاب یک نوع مناسب به مهندسین عمران برای پژوهش و طرحشان کمک نماید.

### واژگان کلیدی

برهم کنش خاک-سازه، مدل‌سازی، وینکلر، محیط پیوسته

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

## مقدمه

پاسخ هر سیستم شامل بیش از یک قطعه، همیشه به تک تک قطعات وابسته است و لازم و ملزوم هم می‌باشد. مثلاً تیری که روی سه تکیه‌گاه ستون قرار گرفته است و دارای شالوده منفرد می‌باشد را در نظر بگیرید (شکل ۱). به دلیل تمرکز بیشتر نیرو در تکیه‌گاه میانی، خاک زیر آن تمایل بیشتری برای نشست دارد. از سوی دیگر به محض نشست بیشتر ستون میانی، عمل قاب بندی (framing) تحمیل شده توسط تیر، منجر به انتقال نیرو به ستون انتهایی می‌گردد. لذا مقادیر نیرو و نشست خاک در حالت نهایی را تنها می‌توان از طریق آنالیز متقابل سیستم خاک-سازه-پی به دست آورد. این امر بیانگر اهمیت در نظر گیری برهم کنش و فعل و انفعال خاک-سازه است.

قاب سه بعدی در روبنا، پی آن و خاکی که قاب روی آن قرار می‌گیرد، همه با هم یک سیستم کامل را تشکیل می‌دهند. با نشست‌های متمایز بین اجزای سازه، هم نیروهای محوری و هم گشتاورهای اعضای سازه‌ای ممکن است تغییر کند. میزان توزیع مجدد نیروها وابسته به صلیب سازه و خواص بار-نشست خاک است. اثر قابل توجه صلیب سازه‌ای در همان شرایط به صورت کیفی در مرجع [۱] شرح داده شده است. متعاقباً پژوهش‌های متعددی جهت تخمین اثر این عامل انجام گرفته است. مطالعه دقیقی در این زمینه در مرجع [۲] صورت گرفته که سیستم خاک-پی-سازه را به چند روش مدل می‌کند. در حالت کلی می‌توان به طور حسی انتظار داشت که استفاده از مدل‌هایی که سیستم واقعی را به صورت محسوس تری از نظر مکانیکی ارائه می‌دهد، منجر به حصول نتایج بهتری خواهد شد. ولی عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ورودی در گیر در این سیستم‌ها ممکن است گاهی اوقات نتیجه عکس بدهد. لذا جهت انتخاب یک مدل دقیق باید در مورد میزان دقتی که با آن، پارامترهای دخیل در مدل، قابل ارزیابی هستند، مراقب بود. در پژوهش حاضر روش‌های مختلف مدل‌سازی سیستم خاک-سازه-پی مورد بررسی دقیق قرار گرفته و همچنین دقت و شایستگی‌شان برای حل مسائل عملی مهندسی مقایسه شده است.

## مبانی نظری

همزمان با گسترش شهرها در تمامی نقاط دنیا از جمله ایران، وجود پروژه‌های عمرانی که در برگیرنده عملیات گودبرداری عمیق و نیمه عمیق می‌باشند، اجتناب ناپذیر است. با توجه به اینکه یکی از مسائل مهم در گودبرداری‌های درون شهری تاثیر متقابل گودبرداری و ساختمان‌های مجاور آن است، در عمل یک مدل کارآمد و با دقت معقول از سیستم گودبرداری-خاک-پی-سازه جهت تحلیل مجموعه مورد نیاز می‌باشد. بررسی رفتار این سیستم در برابر زلزله امری است که باید هنگام تحلیل و طراحی گودبرداری‌ها مدنظر قرار گیرد. از اینرو در پژوهش حاضر به تحلیل لرزه‌ای اندرکنش ساختمان بلند مجاور گود عمیق پرداخته شده است. روندی که در آن پاسخ خاک تحت تاثیر حرکت سازه و پاسخ سازه تحت تاثیر حرکت خاک قرار می‌گیرد، به اندرکنش خاک-سازه مشهور است. اهمیت این مسئله به ویژه برای سازه‌های حجیم و سنگین مثل نیروگاه‌های اتمی، سدها، سکوه‌های ساحلی، پل‌ها و سازه‌های بلند که بر روی خاک نرم بنا شده‌اند، بسیار برجسته می‌باشد. جهت تفسیر نتایج تحلیل عددی مسائل اندرکنش باید علاوه بر مدل

اندرکنش خاک-سازه و مدل اندرکنش ساختمان-گودبرداری، مدل با تکیه گاه ثابت نیز بررسی گردد؛ بنابراین در این پژوهش ۶ مدل مختلف تعریف شده است. مدل سازی دو بعدی به کمک روش تفاضلات محدود صورت گرفت و نتایج مربوط به سازه و خاک شامل قاب ساختمانی و مجموعه گودبرداری مانند برش پایه، نسبت تغییر مکان جانبی طبقات، لنگر خمشی تیرها، تغییر شکل دیواره گود، لنگر خمشی شمع، نیروی محوری مهاری ها، برآورد آسیب وارد بر ساختمان مجاور گودبرداری و سایر موارد بدست آمده اند. برای مدل سازی قاب ساختمانی در نرم افزار flac از عنصر تیر استفاده می شود. مقادیر حاصل از روابط تئوری تحلیل سازه ها و نرم افزار sap با نتایج نرم افزار flac در تحلیل تیرهای دو سر ساده و دو سر گیردار و همچنین قاب ساختمانی مطابقت بسیار مناسبی دارند، بنابراین می توان به روشنی بیان نمود که این نرم افزار کاملاً امکان مدل سازی و تحلیل قاب های ساختمانی را دارا است. یکی از اساسی ترین مراحل در مدل سازی های عددی بحث صحت سنجی، راست آزمایی و مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با داده های میدانی می باشد. صحت سنجی نتایج مدل عددی براساس داده های انحراف سنج نصب شده بر روی ستون ساختمان مجاور گودبرداری و همچنین نیروسنج های قرار گرفته در محل مهاری های دیواره گود انجام شده است.

گاهی اوقات جهت تحلیل سازه های مجاور خاک، نمی توان سازه و خاک را به طور مجزا تحلیل و شبیه سازی (مدل سازی) کرد؛ زیرا خاک و سازه هر کدام بر روی دیگری اثر متقابل می گذارد. به در نظر گرفتن اثرات متقابل خاک و سازه بر روی یکدیگر، **اندرکنش خاک و سازه** گفته می شود.

عموماً در تحلیل انواع سازه های فلزی و بتنی فرض می شود که خاک واقع در زیر سازه صلب است و از اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر می گردد. این در حالی است که خاک در واقعیت صلب نیست و وجود خاک در زیر سازه باعث تغییر خصوصیات دینامیکی سازه و در نتیجه پاسخ آن می گردد. از طرف دیگر قرارگیری شالوده نسبتاً صلب سازه در خاک باعث تغییر تحریکات ورودی به سیستم خاک و سازه می گردد. این اثر که اصطلاحاً اثر سینماتیکی نامیده می شود، خصوصاً در سازه های دارای پی مدفون و عمیق بیشتر حائز اهمیت است. هر چند در مورد تأثیر خاک بر پاسخ ارتجاعی سازه ها مطالعات فراوانی صورت گرفته است، تحقیقات انجام شده در ناحیه غیرارتجاعی اندک و محدود به سال های اخیر می باشد. تحقیقات انجام شده هم اغلب محدود به مطالعات موردی برای شرایط خاصی از خاک و سازه بوده اند. تنها مطالعات پارامتریک انجام شده نیز از اندرکنش سینماتیکی صرف نظر کرده اند.

در تحلیل مرسوم سازه های بتنی و فولادی، قرارگیری سازه بر خاک به صورت ساده و بدون در نظر گرفتن تغییر شکل خاک در نظر گرفته می شود. در تحلیل لرزه ای سازه ها نیز حرکت میدان آزاد زمین که در آن وجود سازه در حرکت زمین منظور نمی شود، به تکیه گاه های مزبور اعمال می شود.

- در صورتی که سختی سازه و پی در نظر گرفته شود، حرکت خاک در مجاورت سازه با حرکت میدان آزاد متفاوت خواهد بود، این اثر، اندرکنش جنبشی نامیده می شود.
  - همچنین پاسخ دینامیکی سازه نسبت به شتاب پایه، سبب تغییر شکل خاک خواهد شد. این پدیده اندرکنش اینرسی نامیده می شود.
- مجموع دو اندرکنش جنبشی و اینرسی، اندرکنش خاک و سازه نام دارد و نشانگر اثر حرکت خاک بر پاسخ سازه و حرکت سازه بر پاسخ خاک است.

به منظور روشن شدن اندرکنش سینماتیکی و اندرکنش اینرسی به صورت کیفی، مثال زیر را در نظر بگیرید:

فرض کنید که امواجی که به قایق شکل زیر می رسد، تحریک میدان آزاد باشند. بنابراین قایق نماینده پی و شخص ایستاده در آن نماینده سازه خواهد بود. قایق نوسانی به اندازه میانگینی از امواج رسیده به بدنه خود خواهد داشت و در اثر نوسان قایق، شخص داخل آن نیز نوسان می کند. تا این قسمت، نوسانات ایجاد شده همان اثر سینماتیکی است و مشابه تحریک ورودی به پی می باشد؛ اما کار به اینجا ختم نمی شود. وقتی که شخص داخل قایق نوسان می کند، به علت جرم خود و در اثر قانون اول نیوتن به هر طرفی که می رود، در انتهای نوسان خود ضربه ای وارد می کند که خود آن ضربه باعث تغییر نوسانات ایجاد شده می گردد. این بخش از نوسانات همان اثر اینرسی می باشد.

اندرکنش خاک و سازه چیست

در تحلیل های متداول دینامیکی یک سازه، روش معمول به این صورت است که حرکت میدان آزاد زمین در محل ساخت تعیین شود و به پای سازه، به صورت صلب، اعمال گردد. این مورد در حالتی صحیح است که ساختمان بر روی سنگ بنا شده باشد. در حالت قرار گرفتن سازه بر روی خاک نرم، وضعیت کاملاً متفاوت است و یک مولفه دورانی ناشی از انعطاف پذیری تکیه گاه بر حرکات افقی پی اضافه می گردد. قسمتی از انرژی ارتعاشی سازه می تواند با انتقال به خاک زیر پی بر اثر میرایی تشعشعی حاصل از انتشار موج و میرایی هیستریزس مصالح خاک تلف شود. در صورتی که در حالت معمول با صلب فرض کردن خاک زیر سازه این اتلاف انرژی در نظر گرفته نمی شد در این حالت در هنگام وقوع زلزله، رفتار غیرخطی خاک زیرین و وقوع پدیده اندرکنش خاک و سازه، در پاسخ سازه ای به صورتی نتیجه می دهد که می تواند کاملاً متفاوت از پاسخ یک سازه با پای صلب قرار گرفته تحت اثر حرکت میدان آزاد زمین باشد. در موارد زیادی این اختلاف اندک بوده و قابل چشم پوشی است.

حرکت آزاد زمین را می توان به عنوان حرکت ثبت شده در سطح خاک و بدون در نظر گرفتن سازه تعریف کرد. پاسخ ساختاری در برابر زلزله به تعامل بین سه مورد زیر وابسته است:

- سازه
- شالوده (فونداسیون)
- خاک زیرین

تجزیه و تحلیل اندرکنش خاک و سازه برای ارزیابی پاسخ مشترک سه مورد بالا استوار است. تعامل خاک و سازه را می توان به عنوان فرآیندی تعریف کرد که در آن، تغییر شکل خاک بر حرکت سازه تأثیر می گذارد و حرکت سازه بر تغییر شکل های خاک، اثر می گذارد. نیروهای بین سازه و خاک عمدتاً نیروهای تعاملی هستند که می توانند برای هر سازه ای ایجاد شوند.

### اثرات متقابل اندرکنش خاک و سازه

با در نظر گرفتن سختی شالوده (فونداسیون) یک سازه، هیچ اثر متقابلی بین خاک و سازه وجود ندارد؛ بنابراین اگر نیروی اندرکنش بر پی ساختمان تأثیر بگذارد، در محاسبات لحاظ می گردد. تأثیر نیروهای اندرکنش بر حرکت خاک به دو مورد زیر بستگی دارد:

- بزرگی نیرو
- انعطاف پذیری خاک

هر چه سازه سنگین تر باشد، اثرات اندرکنشی خاک و سازه نیز بیشتر خواهد بود. اثرات اندرکنش خاک و سازه بر روی بیشتر ساختمان های شهری که وزن کمی دارند، ناچیز است. در حالی که اثرات اندرکنش سازه و خاک در سازه های سنگین همانند سدها و نیروگاه های هسته ای (NPP) پر اهمیت است.

یکی دیگر از شرایطی که بر روی اثرات متقابل خاک و سازه موثر است، انعطاف پذیری خاک است. در خاک نرم تر اثرات اندرکنش خاک و سازه بیشتر است؛ بنابراین برای ساختمانی که بر روی خاک نرم و در منطقه لرزه خیز ساخته شده است، این اثر باید لحاظ گردد.

کاربردهای اندرکنش خاک و سازه

- در سازه های سنگین مانند سازه های هیدرولیکی، تونل ها، مخازن مدفون، برج ها و سازه های هسته ای کاربرد دارد.
- برای سازه هایی که اثرات  $P\delta$  اهمیت دارد، اندرکنش خاک و سازه موثر است.
- برای شالوده های عمیق، سازه های پشتیبانی ساخته شده بر روی خاک نرم، سازه های بلند که دارای سرعت برشی متوسط ۱۰۰ متر بر ثانیه هستند.

### جمع بندی

مرور جایگاه فعلی مدل سازی خاک در مقالات، در حالی که خاک در آنالیز برهم کنش بین خاک-سازه در نظر گرفته می شود، منجر به نتیجه گیری های جامع ذیل می گردد:

به منظور تخمین صحیح مقادیر نیروی طراحی، اثر برهم کنش خاک-سازه تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی باید در نظر گرفته شود. برای بدست آوردن آن، مدل سازی واقعی و ساده شده ی سیستم خاک-سازه-پی ضروری است.

تئوری وینکلر، با وجود محدودیت‌های آشکار خود، منجر به دستیابی به یک عملکرد منطقی می‌شود و کاربرد آن ساده است. لذا برای اهداف عملی، بجای آنالیز دارای ایده‌آل‌سازی ثابت (fixed base)، باید دست کم این ایده‌آل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

پدیده تحکیم خاک رس از یک رابطه تنش-نشست غیرخطی تبعیت می‌کند. از این رو، جهت دستیابی به یک آنالیز واقعی تر از برهم کنش بین خاک-سازه شامل خاک رس، به مدل‌سازی غیرخطی خاک نیاز است. جهت اجرای این نوع آنالیز، به نظر می‌رسد تکنیک تکرار شونده افزایشی مناسب‌ترین و معمول‌ترین تکنیک باشد.

خاک رس که دارای نفوذپذیری پایین است، دارای رفتار وابسته به زمان تحت بار ثابت است. در این نوع برهم‌کنش وابسته به زمان خاک-سازه، در هر زمانی از فرآیند ممکن است گاهاً شرایط بحرانی رخ دهد. در چنین وضعی، تنها مدل‌سازی خاک به صورت یک مدل ویسکوالاستیک می‌تواند ورودی مناسب برای طراحی را تامین نماید.

### منابع

1. Simons, H., Hansel, w., and Reuter, E. (1984). "Physical and Chemical Behavior of Clay- Based Barriers under Percolation with Test Liquids," Proc. Int. Symposium on Clay Barriers for Isolation of Toxic Chemical Wastes, May 28-30, 1984, Stockholm, p. 117. Expanded version in German, pp. 118-127.
2. Akinwumi I. I., Diwa D and Obianigwe N. (2014). "Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay", Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 3, Issue 4
3. Khamchian, M., Charkhabi A.H., Tajik, M., (2007), " Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils," Journal of Engineering Geology, (89), 220-229.
4. Habib-ur-Rehman, Abduljawwad SN and Akram T. (2007). Geotechnical Behavior of Oil Contaminated Fine Grained Soils, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, EJGE, 12, - Bundle A; 0720.
5. Rahman Z., Hamzah U and Taha MR. (2010). Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil. American Journal of Applied Sciences, 7(7), pp 954-961.
6. Mashalah, K., 2006. The effects of crude oil contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran. The Geological Society of London 2006, IAEG2006 Paper number 214.