



تحلیل اندرکنش خاک و سازه پایه های یک پل شمع دار با استفاده از روش اجزاء محدود

رضا نادری^۱، مسعود نیازپور^۲، بهنام کریمی فرزقی^۳

۱- عضو هیئت علمی و استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی دانشگاه سمنان - سمنان، دانشگاه سمنان

آدرس پست الکترونیکی مولف رابط: masoud_niyazpoor@yahoo.com

خلاصه

در گذشته در تحلیل سازه ها، خاک و سازه را به صورت کاملاً مجزا از یکدیگر تحلیل و طراحی می کردند. این فرض فقط در حالتی صادق است که سازه بر روی بستر سنگی قرار داشته باشد. امروزه برای جلوگیری از آسیب هایی نظیر جداشدن سازه از فونداسیون و شکست ناگهانی، در طراحی سازه های بزرگ، اثرات اندرکنشی بین خاک و سازه را در نظر می گیرند. پایه های پل های شمع دار بر روی یک خاک نرم، یکی از انواع مختلف سازه هایی هستند که در معرض اثرات اندرکنش خاک و سازه قرار دارند. در این مقاله برای تحلیل مدلهای انجام شده از نرم افزار ABAQUS به عنوان یک نرم افزار برای تحلیل مسائل به روش اجزاء محدود استفاده می کنیم. پس از مدل کردن و تحلیل فونداسیون پایه پل و مشاهده جابجایی قائم زیر فونداسیون به این نتیجه می رسیم که جابجایی نسبتاً زیاد است و برای کاهش مقدار جابجایی از شمع استفاده می کنیم. سپس یک فونداسیون شمع دار را در دو حالت: الف) با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه و ب) با فرض در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه، مدل می کنیم. در نهایت نتیجه می گیریم که در یک فونداسیون پایه پل با وجود شمع هنگامی که اندرکنش خاک و سازه را در نظر بگیریم جابجایی های زیر فونداسیون به مراتب کمتر خواهد شد.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، پایه های پل های شمع دار، تحلیل، اجزاء محدود

۱. مقدمه

در گذشته در تحلیل سازه ها خاک و سازه را به صورت کاملاً مجزا از یکدیگر در نظر می گرفتند. به این صورت که سازه را جدا از خاک تحلیل و طراحی می کردند (خاک زیر سازه را صلب در نظر می گرفتند)، و خاک را نیز جدای از سازه تحلیل و طراحی می نمودند. طراحی سازه به طور مجزا در دو صورت می تواند منجر به حل رضایت بخش شود: [۱]

• زمین، تحمل بارگذاری، با تغییر مکان های قابل قبول را داشته باشد.

• زمین به وسیله بعضی تکنیک های مناسب، به سختی و مقاومت مطلوبی برسد.

در تحلیل کلاسیک سازه ها بطور معمول، تکیه سازه بر خاک به صورت ساده و بدون در نظر گرفتن تغییر شکل خاک مدلسازی می شود. در تحلیل لرزه ای سازه ها نیز حرکت میدان آزاد زمین، که در آن وجود سازه در حرکت زمین منظور نمی گردد، به تکیه گاههای 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 گردید. 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. در تحلیل های متداول دینامیکی یک سازه، روش معمول به این صورت است که حرکت میدان آزاد زمین در محل ساخت تعیین شود و حرکت به دست آمده به پای سازه، زمانی که به صورت صلب در نظر گرفته می شود، اعمال می شود. 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 شود؛ قسمتی از انرژی ارتعاشی سازه می تواند با انتقال به خاک زیر پی، بر اثر میرائی تشعشی حاصل از انتشار موج و میرائی

هیستریزیس مصالح خاک تلف شود. [۲] در صورتی که در حالت کلاسیک 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. [۳] در موارد زیادی این اختلاف اندک بوده و قابل چشم پوشی است. در برخی مسائل ویژه، تحلیل دقیق مساله بدون وارد نمودن اثر اندرکنش امکان پذیر نمی باشد. بارهای دینامیکی وارد بر سازه ها انواع مختلفی دارد نظیر بار زلزله، بار ماشین آلات سنگین و ... ضعف های موجود در طراحی، اجرا و ساخت در هنگام اعمال بارهای دینامیکی بیشتر آشکار می شوند. [۴] یکی از ایرادهایی که تا قبل از زلزله های بسیار بزرگ جهان در طراحی سازه ها وجود داشت در نظر نگرفتن اثرات اندرکنشی بین خاک و سازه بود. چشم پوشی از این اثرات اندرکنشی بین خاک و سازه خسارات جبران ناپذیری را در پی داشت که در زلزله های بزرگ نظیر زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیته خود را نشان داد. در این زلزله، علاوه بر اثرات ساختگاهی، وجود لایه خاک نرم روی بستر سنگی باعث اندرکنش شدید خاک و سازه گردید به طوری که ساختمانهای با پیوند ارتعاشی حدود ۲ تانیه به شدت خسارت دیده و یا منهدم شدند. به عقیده بسیاری از محققین، این زلزله نقش و اهمیت اندرکنش خاک و سازه را بیش از پیش نشان داد. بعد از وقوع این زلزله بود که تحقیقات گسترده ای در این خصوص به عمل آمد و اثرات اندرکنش خاک و سازه در ضوابط آیین نامه های طرح لرزه ای منعکس گردید. در شکل ۱ آسیب های ناشی از چشم پوشی اندرکنش بین خاک و سازه در طراحی سازه ها در زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیته، نشان داده شده است.



شکل ۱ - جداسدن سازه و فنداسیون از زمین در زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیته

امروزه برای تحلیل و طراحی سازه های بزرگ در اکثر موارد، اثرات اندرکنش بین خاک و سازه را در نظر می گیرند. پایه های پل های شمع دار که بر روی خاک نرم ساخته می شوند یکی از انواع مختلف سازه هایی هستند که در معرض اثرات اندرکنشی بین خاک و سازه قرار دارند. [۵]

۲. روشهای تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک و سازه

پاسخ دینامیکی سازه حین لرزه های اعمالی، متغیری از نوع خاک زیر پی بوده، لذا بدون در نظر گرفتن تاثیر آن نمی توان تخمین واقع گرایانه ای از نیروهای اعمالی زلزله بر سازه داشت. همچنین خصوصیات محلی خاک مانند جنس خاک، لایه ای بودن خاک و نیز تغییرات عمق لایه از عوامل موثر بر رفتار لرزه ای سازه می باشد که باید مورد بررسی قرار گرفته و نیز در تحلیل سازه لحاظ کرد. بنابراین به نظر می رسد بررسی رفتار لرزه ای سازه بدون لحاظ نمودن اثر خاک منجر به نتایج واقعی نخواهد شد.

برای تحلیل اندرکنش خاک و سازه دو روش کامل (مستقیم) و زیرسازه مرسوم است. [۶] در واقع مشکل اصلی تحلیل اندرکنش خاک و سازه، نامحدود بودن محیط خاک می باشد.

متداولترین روش حل مساله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، روش زیرسازه است. در این روش، مساله خطی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، به یک سری زیرمساله ساده تر تفکیک می شود و هر زیرمساله با مناسبترین روش تحلیل می شود و سپس نتایج حاصله، با استفاده از اصل جمع آثار قوا، با هم ترکیب می شوند. [۷] در این روش، در یک گام اندرکنش جنبشی با صرف نظر نمودن از جرم سازه مورد بررسی قرار گرفته و حرکت ورودی سازه معین می گردد. در گام بعدی حرکت ورودی محاسبه شده به سازه اعمال می شود و این گام ها تا همگرایی جواب ادامه خواهند یافت. خاطر نشان می کند، منظور از سازه در این تحلیل می تواند سازه به همراه بخشی از خاک پیرامون آن، که لازم است نسبتاً دقیق آن محاسبه گردد، باشد و خاک باقیمانده، محیط نامحدود آن است.

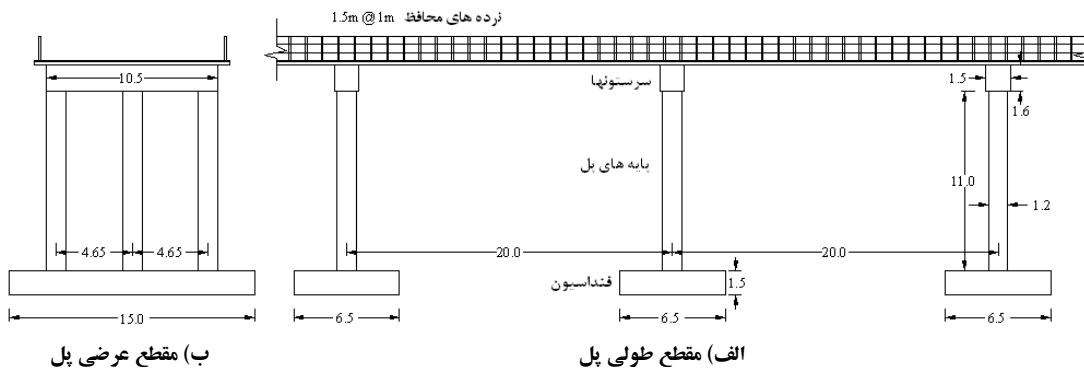
با توجه به اینکه روش زیرسازه، یک روش خطی تحلیل اندرکنش است برای در نظر گرفتن اثرات رفتار غیرخطی خاک، می توان از روش خطی معادل استفاده کرد.

در روش مستقیم، سازه و خاک هردو با هم مدل می شوند و تحلیل در یک گام صورت می پذیرد. غالباً خاک با المانهای محدود جامد (Solid) و سازه با المانهای محدود تیری (Beam) المان بندی می گردد. به دلیل اینکه در این حالت، فرضیه جمع آثار قوا لازم نمی باشد آنالیزهای غیرخطی ممکن می گردد.

برای تحلیل صحیح اندرکنش خاک و سازه باید شرط تابش برقرار باشد. در واقع شرایط مرزی باید به گونه ای اعمال گردد که امواج منعکس شده از سازه به سوی توده نیم بی نهایت خاک در مرزها به طرف سازه برگشت داده نشوند. شرط تابش سبب به دست آمدن پاسخ منحصر بفرد در تحلیل اندرکنش خواهد گردید. در تحلیل در حوزه زمان، شرط مزبور به مفهوم ناپدید شدن تغییر مکان در خارج از دامنه تاثیر اندرکنش می باشد. دامنه تاثیر، در یک لحظه مشخص زمان، محدوده ای از محیط نامحدود خاک است که توسط ماکزیمم سرعت موج انتشار شده پیموده می شود. با پیش رفتن در طی زمان، دامنه تاثیر گسترده تر می شود. این امر نیازمند صرف انرژی در مرز مشترک خاک و سازه می باشد و منجر به میرایی تابشی خواهد گردید. برای مدلسازی این پدیده می توان از میراگر در مرز مشترک سود برد. در تحلیل در حوزه فرکانس، شرط تابش در فاصله بی نهایت از مرز مشترک خاک و سازه اعمال می گردد. برای وارد کردن شرط مزبور، هیچ انرژی نباید از بی نهایت به سوی مرز مشترک تاییده شود. خاطر نشان می کند، تحلیل اندرکنش در عمل با روشهای عددی و گسسته سازی محیط امکان پذیر است. مرسوم ترین روش عددی در این زمینه، اجزاء محدود است که در این مقاله ما برای تحلیل مساله از نرم افزار ABAQUS برای حل مساله به روش اجزاء محدود استفاده می کنیم.

۳. مدل سازی

یک پل بتن آرمه ساخته شده در کیلومتر ۸۴ محور مشهد - سرخس در روستای کشف رود با مشخصات زیر را برای مدل سازی خود انتخاب کردیم. طول پل ۱۴۵ متر که دارای ۷ دهانه است که محور به محور ستونها ۲۰ متر می باشد. عرض پل ۱۲ متر می باشد. تعداد خطوط ترافیک در جهت رفت یک خط و در جهت برگشت نیز یک خط می باشد. در هر جهت یک پیاده رو تعبیه شده است که عرض هر پیاده رو ۲ متر میباشد. عرض هر خط ماشین رو ۳.۶۵ متر می باشد. در هر دو جهت پل ۳۵ سانتیمتر برای قرار گیری نرده های محافظ در نظر گرفته شده است. ارتفاع قسمت زیرین عرشه پل تا سطح زمین ۱۲.۶ متر است. سر ستونها بر روی هر یک از پایه های پل (ستونها) به عرض ۱.۵ متر و طول ۱۰.۵ متر و ارتفاع ۱.۶ متر قرار دارند و ۷۵ سانتیمتر در هر طرف کنسول اجرا شده است. بنابراین ارتفاع پایه ها ۱۱ متر و با مقطع دایروی به صورت یکنواخت از پائین به بالا با قطر ۱.۲ متر می باشند. در جهت عرض از ۳ ردیف پایه پل (ستون) استفاده می شود، بنابراین فاصله مرکز به مرکز پایه های پل در جهت طولی ۲۰ متر و در جهت عرضی ۴.۶۵ متر است. ضخامت دال بتنی پیش ساخته ۲۰ سانتیمتر می باشد و روی آن یک لایه آسفالت به ضخامت ۷ سانتیمتر قرار دارد. نرده های محافظ به ارتفاع ۱.۵ متر در طول پل هر یک متر قرار دارند. شکل ۲ مقطع پل را در جهت طولی و عرضی نمایش می دهد.



برای مدل کردن پایه پل به همراه خاک پیرامون آن که مدنظر ماست، بحرانی ترین پایه را از لحاظ بارگذاری در نظر می گیریم. تمام پایه های میانی پل از نظر بار اعمالی یکسان هستند، به همین دلیل، ما یکی از آنها را در نظر می گیریم. نیروی وارد شده به پایه پل ناشی از بار مرده کف شامل دال



پیش ساخته بتنی و آسفالت را به دست می آوریم. بار کامیون دومحور ۸.۲ تنی را به عنوان بار هم ارز ترافیک در نظر می گیریم. برای ساده سازی و در جهت ضریب اطمینان فرض میکنیم کل بار ۸.۲ تنی به پایه مورد نظر اعمال می شود. همچنین بار مرده ناشی از وزن پایه پل به ارتفاع ۱۱ متر و سرستون به ارتفاع ۱.۶ متر را نیز به دست می آوریم. بر اساس اصل جمع آثار قوا، بار اعمالی به یکی از پایه های پل برابر است با برآیند حاصل از نیروهای به دست آمده از هر یک از حالت های فوق. در جدول ۱ بار مرده کف ناشی از وزن دال بتنی پیش ساخته و آسفالت برای یک پایه میانی به صورت یک نیروی متمرکز محاسبه شده است. در جدول ۲ بار مرده ناشی از وزن پایه پل و سرستون برای یک پایه پل به صورت یک نیروی متمرکز محاسبه شده است.

جدول ۱- بار مرده کف برای یک پایه پل به صورت نیروی متمرکز

	وزن مخصوص kg/m^3	ضخامت cm	وزن kg/m^2
دال بتنی	۲۵۰۰	۲۰	۵۰۰
آسفالت	۲۲۰۰	۷	۱۵۴
جمع			۶۵۴

سطح بارگیر پایه پل m^2	وزن اعمال شده kg
$۲۰ * ۴.۶۵ = ۹۳$	$۶۵۴ * ۹۳ = ۶۰۸۲۲$

جدول ۲- بار مرده سرستون و پایه پل به صورت نیروی متمرکز

	حجم m^3	وزن مخصوص kg/m^3	وزن kg
سرستون	$۱.۵ * ۱.۶ * ۴.۶۵ = ۱۱.۱۶$	۲۵۰۰	۲۷۹۰۰
پایه پل	$(۳.۱۴ * ۱.۲^2 / ۴) * ۱۱ = ۱۲.۴۳$	۲۵۰۰	۳۱۰۷۵
جمع			۵۸۹۷۵

بنابراین مجموع بار مرده برای یک پایه پل برابر خواهد بود با:

$$۶۰۸۲۲ + ۵۸۹۷۵ + ۸۲۰۰ = ۱۲۷۹۹۷ \text{ kg}$$

فنداسیون به ابعاد ۱۲ متر در جهت عرض پل و ۶.۵ متر در جهت طول پل به عمق ۱.۵ متر در هر ردیف از پایه ها اجرا شده است. برای مدل کردن فنداسیون و لایه خاک در نرم افزار ABAQUS به خاطر کاهش محاسبات در حالت کرنش مسطح (Plane Strain) نسبت به حالت سه بعدی، از حالت دویبعدی با کرنش مسطح استفاده می کنیم. [۸] چون کرنش در جهت عمود بر راستای محور طولی پایه ناچیز است فرض کرنش مسطح در این حالت فرض درستی است. در حالت اولیه یک فنداسیون را به همراه خاک پیرامون آن مدل می کنیم. عمق لایه خاک را بیش از دو برابر عرض پی در نظر میگیریم که مطمئن باشیم تنش ها در ناحیه ای داخل این محیط خاک به صفر خواهند رسید. عمق لایه خاک پیرامونی و فنداسیون مدل شده را در شکل ۳ مشاهده می کنیم.



شکل ۳- نمایش عمق و عرض فنداسیون و خاک پیرامون آن

مشخصات لایه خاک و بتن فنداسیون در جدول ۳ نمایش داده شده است.

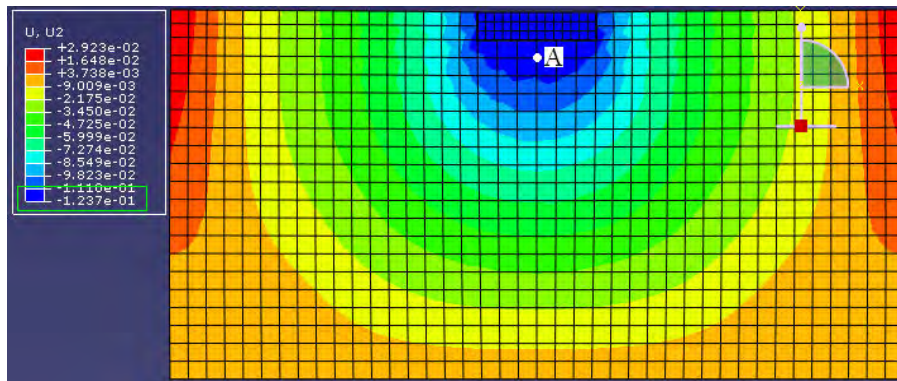
جدول ۳ - مشخصات لایه خاک و بتن

	خاک	بتن
γ	17 KN/m ³	24 KN/m ³
E	20 MPa	2×10 ⁴ MPa
ν	0.3	0.2
C	20 KPa	-
ϕ	23°	-

۴. تحلیل

فنداسیون بدون شمع:

برای تحلیل از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده می کنیم و از مش های ۱ متر در ۱ متر مربعی برای لایه خاک و مش های ۵۰ سانتیمتر در ۵۰ سانتیمتر مربعی برای فنداسیون استفاده می کنیم. پس از تحلیل مدل فوق، با توجه به مقادیر جابجایی المان های مختلف لایه خاک و فنداسیون، به این نتیجه می رسیم که این لایه خاک، بسیار ضعیف بوده و به تنهایی قادر به تحمل تنش های ناشی از بار پایه پل را ندارد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می کنیم ماکزیمم جابجایی قائم در زیر فنداسیون اتفاق می افتد. مقدار ماکزیمم جابجایی قائم در نقطه A در زیر فنداسیون نمایش داده شده است که بیش از ۱۲ سانتیمتر می باشد.



شکل ۴- نمایش جابجایی های قائم لایه خاک در فنداسیون بدون شمع

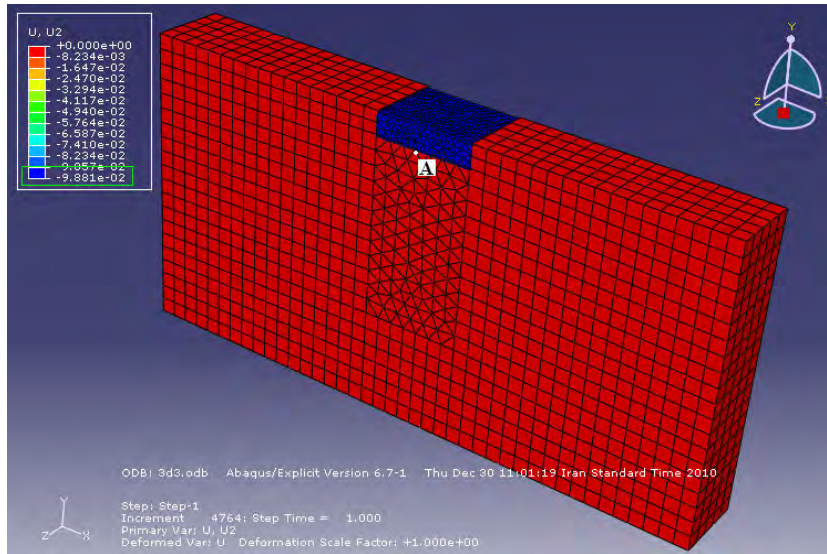
فنداسیون شمع دار:

الف) با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه:

با توجه به مقادیر زیاد جابجایی زیر فنداسیون برای تقویت لایه خاک و کاهش مقادیر جابجایی از شمع استفاده کنیم. برای این منظور در زیر هر پایه پل از چهار شمع به ارتفاع ۱۲ متر با مقطع دایروی به قطر ۶۰ سانتیمتر استفاده می کنیم. در این حالت به خاطر وجود شمع باید فنداسیون و شمع را به صورت سه بعدی مدل کنیم و فرض کرنش مسطح برای این حالت، اشتباه است. برای مدل کردن فنداسیون به همراه شمع در این حالت عرض بارگیر فنداسیون را ۴.۶۵ متر که همان فاصله مرکز به مرکز عرضی پایه پل است در نظر میگیریم. در این مدل از المان های مشترک بین خاک و شمع استفاده نمی کنیم به عبارت دیگر هنوز اندرکنش دینامیکی خاک و سازه را در نظر نمیگیریم. در شکل ۵ جابجایی قائم لایه خاک برای فنداسیون شمع دار با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود مقدار ماکزیمم جابجایی قائم زیر فنداسیون بیش از ۹ سانتیمتر می باشد. روشن است که با قرار دادن شمع زیر فنداسیون، مقادیر جابجایی لایه خاک نسبت به حالت بدون شمع کاهش می یابد ولی چون هنوز اندرکنش خاک و سازه لحاظ نشده است لایه

خاک پیرامونی نسبت به اثرات شمع (تنش ها و تغییر مکان ها) بی تفاوت می باشد. مقادیر جابجایی قائم هنوز هم نسبت به مقادیری که با وجود شمع، مورد انتظار است زیاد بوده و باید مدلسازی دقیقتری انجام شود.

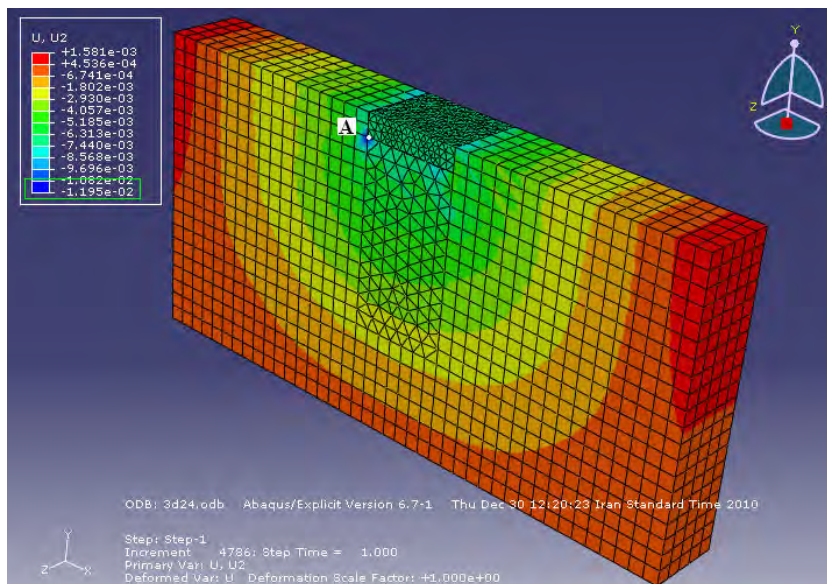


شکل ۵ - نمایش جابجایی های قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

ب) با فرض در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه:

در هیچ کدام از حالت های بالا اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نشده است به همین دلیل مدلسازی انجام شده نزدیک به واقعیت نیست. در حالت نهایی اندرکنش خاک و سازه با در نظر گرفتن المان های مشترک در مرز بین شمع و لایه خاک مدل می شود. برای این منظور از یک فنر و یک میراگر در مرز خاک و شمع استفاده می کنیم.

شکل ۶ جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با فرض در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه را نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود مقدار جابجایی ماکزیمم در زیر فنداسیون به کمتر از ۱.۲ سانتیمتر رسیده است.



شکل ۶ - نمایش جابجایی های قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه



با مقایسه مقدار جابجایی قائم در سه حالتی که در این مقاله ذکر شد متوجه می شویم که مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه کمترین مقدار را دارد. در ضمن با مشاهده تحلیل مدلها متوجه می شویم که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، مدلسازی به واقعیت نزدیک تر خواهد شد. در جدول ۴ مقادیر ماکزیمم جابجایی قائم لایه خاک در سه فنداسیون مدل شده، آورده شده است.

جدول ۴ - ماکزیمم جابجایی قائم در سه فنداسیون مدل شده

ماکزیمم جابجایی لایه خاک (سانتیمتر)	نوع فنداسیون
۱۲.۳۷	فنداسیون بدون شمع
۹.۸۸	فنداسیون شمع دار (با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه)
۱.۱۹	فنداسیون شمع دار (با فرض در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه)

همان طور که مشاهده می شود، با به کار بردن شمع در فنداسیون پایه پل، مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه نسبت به مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون بدون شمع ۲۰٪ کاهش پیدا میکند و مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با فرض در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه نسبت به مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون بدون شمع ۹۰٪ کاهش و نسبت به مقدار جابجایی قائم لایه خاک در فنداسیون شمع دار با فرض عدم در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه ۸۸٪ کاهش می یابد.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله اندرکنش خاک و سازه در پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. فنداسیون بحرانی ترین پایه پل از لحاظ بارگذاری در حالت های بدون شمع و با شمع مقایسه گردید و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- برای پایه های پل که یک سازه بزرگ به شمار می آیند فنداسیون به تنهایی قادر به تحمل بار وارد شده نیست.
- ۲- جابجایی قائم لایه خاک زیر فنداسیون بدون شمع نسبتا زیاد است.
- ۳- جابجایی قائم لایه خاک زیر فنداسیون شمع دار، بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه نسبت به فنداسیون بدون شمع کمتر است.
- ۴- بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، تنشهای وارد شده به شمع، به خاک مجاور شمع انتقال نمی یابند.
- ۵- با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در فنداسیون شمع دار، مقادیر جابجایی قائم کاهش می یابد.
- ۶- با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در مدلسازی سازه های بزرگ، مدلسازی به واقعیت نزدیک تر خواهد شد.

۶. مراجع

1. The Institution of Structural Engineers, (March 1989), "Soil-Structure Interaction, The Real Behaviour of Structures", The Institution of Structural Engineers, The Institution of Civil Engineers, International Association for Bridge and Structural Engineering, 11 Upper Belgrave Street, London.
۲. ناطقی الهی، ف. و رضایی تبریزی، ع.، (۱۳۸۳)، "مطالعه اثر اندرکنش سازه - خاک - سازه بر پاسخ غیرخطی سازه های بلند"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۲۴-۲۲ اردیبهشت.
۳. گنمیری، ب. و تاج الدینی، ح.ر.، (۱۳۸۲)، "بررسی اثرات رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ دینامیکی سازه های بلند"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۲، دانشگاه تهران، تهران، ایران، شهریور، ۲۹۴-۲۸۳.
4. Zhang, C. and Wolf, J.P., (1997), "Dynamic Soil-Structure Interaction, Current Research in China and Switzerland", Developments in Geotechnical Engineering, 83, Elsevier Science B.V. Sara Burgerhartstraat 25, P.O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands.



5. Jaradat, Y.M., (2005), "*Soil-Structure Interaction of FRP Piles in Integral Abutment Bridges*", Dissertation of Doctor of Philosophy, University of Maryland.
۶. صمدیان، ب. و جانعلی زاده چوب بستی، ع. و واثقی امیری، ح. (۱۳۸۳)، "لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل دینامیکی سازه ها"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۲۴-۲۲ اردیبهشت.
۷. مویدیان، م. (۱۳۸۷)، "تحلیل لرزه ای دیوارهای مدفون"، رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
8. Ellis, E.A. and Springman, S.M., (2001), "*Modelling of Soil-Structure Interaction for a Piled Bridge Abutment in Plane Strain FEM Analyses*", Computers and Geotechnics, 28, pp 79-98.