

الله اعلم  
المرن



دانشگاه شهید باهنر کرمان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد عمران گرایش مکانیک خاک و پی

---

ارزیابی رفتار دینامیکی اندرکنش خاک-شمع در حالت سه  
بعدي

---

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا پوراابراهیم

مؤلف:

روزبه قلی زاده

۱۳۸۹/۳/۱۷

کتابخانه مرکزی دانشگاه شهید باهنر کرمان  
تسبیل مرکز

خرداد ۱۳۸۸

الف

۱۳۷۱۸۳



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: روزبه قلی زاده

استاد راهنما: غلامرضا پورابراهیم

داور ۱: سید مرتضی مرنندی

داور ۲: محمد حسین باقری پور

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: مسعود سعید

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است



تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

## تقدیر و تشکر

این تحقیق تلاش بسیار کوچکی در قلمرو گسترده علم میباشد که یقیناً دارای کاستی ها و نارسایی های بسیاری میباشد امید است با همفکری و هم اندیشی صاحبان علم از این کاستی ها کاسته شده و زمینه برای توسعه هر چه بیشتر این موضوع محیا شود.

اکنون که در سایه الطاف و عنایت پروردگارم موفق به نگارش این تحقیق شده ام، به توصیه شرع و تبعیت از بزرگان، بر خود لازم میدانم از دوستان و بزرگوارانی که من را در این راه یاری کردند و از سختی راه کاستند تشکر و قدر دانی به عمل آورم.

ابتدا از کلیه تلاش ها و زحمات پدر و مادر دلسوز و صبورم و برادر عزیزم که در تمام طول مدت تحصیل یار و یاور و مشوق من بودند، صمیمانه سپاسگزاری و تشکر میکنم.

سپاس و تقدیر فراوان از استاد گرامی و بزرگوارم جناب آقای دکتر پورابراهیم که در زمان انجام این پایان نامه متحمل زحمات بسیاری شدند و با صبر بی پایان، کمک های خستگی ناپذیر و مداومشان من را در این تحقیق یاری رساندند.

همچنین از استادان عزیزم جناب آقایان دکتر مرنندی و دکتر باقری پور که زحمات بسیاری را در این چند سال تحصیلی در دانشگاه شهید باهنر کرمان برای بنده کشیدند و همچنین قبول داوری در این پایان نامه را تقبل کردند، قدردانی نمایم.

همچنین بر خود لازم میدانم از جناب آقای دکتر محسن کمالیان در پژوهشگاه زلزله که اجازه حضور در کلاس های درس اندرکنش خاک و سازه و روش های عددی در ژئوتکنیک، خود را به من دادند و رهنمود های ارزشمندی را در این تحقیق ارائه کردند، سپاس گذاری کنم.

شایسته است از دکتر Sam Helwany بخاطر در اختیار گذاشتن برنامه های آنالیز شمع و تمامی مثال های کتابشان تشکر و قدردانی کنم که یقیناً بدون کمک ایشان قادر با اتمام رساندن این تحقیق نبودم.

همچنین از جناب آقایان دکتر محمد مهدی احمدی و دکتر محمد داوودی برای ارائه پیشنهادات و نظراتشان در مراحل انجام تحقیق تشکر میکنم.

در پایان سپاس خویش را به تمامی کسانی که به نحوی یاریگر اینجانب بودند ولی نامشان به سهواً از قلم افتاده است، ابلاغ مینمایم.

## چکیده

به علت استفاده از پی های شمعی در زیر سازه های مهمی همچون تجهیزات نیرو گاهی، مجتمع های پتروشیمی، اسکله ها، سازه های دریایی و پل ها، طراحی ایمن و اقتصادی این نوع پی ها تحت بارهای دینامیکی جانبی از اهمیت ویژه ای برخوردار میباشد.

پیچیدگی های موجود در مسایل مربوط به رفتار شمع ها و مسئله اندرکنش شمع و خاک به همراه اثرات ناشی از نیرو های زلزله و همچنین عدم وجود روش های دقیق، نیاز به استفاده از روش های عددی را برای تحلیل و شناخت هر چه بیشتر این موضوع روشن میکند.

با توجه به اهمیت این موضوع و امکان استفاده از روش های عددی و فن اوری رایانه برای ارزیابی رفتار شمع ها، در این تحقیق سعی شده است با استفاده از روش المان محدود و مدل سازی سه بعدی غیر خطی در حوزه زمان به بررسی پاسخ سیستم شمع و خاک نسبت به بارهای جانبی هارمونیک و لرزه ای پرداخته شود. آنالیز حساسیت نسبت به اندازه المان ها و ابعاد مدل نیز انجام شده است. در مدل بکار برده شده در این تحقیق از المان های نامحدود استفاده شده است و با توجه به جدید بودن این مفهوم مقایسه ای نسبت به حالت رایج استفاده از میراگر ها در مدل انجام گرفته است. همچنین به بررسی اثرات غیر خطی بودن خاک و تغییرات پارامتر های خاک در تابع انتقال، تغییر مکان های شمع و نیرو های برشی ایجاد شده در شمع پرداخته شده است.

# فہرست

۱	فصل اول : مقدمه و کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۷	۲-۱- تعریف مساله
۹	۳-۱- مراحل تحقیق
۹	۴-۱- ساختار پایان نامه
۱۱	فصل دوم : مساله اندرکنش و مروری بر تحقیقات انجام گرفته
۱۲	۱-۱- مقدمه
۱۵	۲-۱- کلیات مساله اندرکنش خاک و سازه
۱۵	۱-۲-۲- پارامترهای دینامیکی زمین محل
۱۵	۲-۲-۲- نیروها و تحریکات وارده
۱۶	۳-۲-۲- مدل دینامیکی سیستم
۱۷	۳-۲-۳- بررسی حرکات ارتعاشی زمین
۱۸	۴-۲- انتشار امواج در محیط های ارتجاعی
۱۹	۵-۲- مکانیزم رفتار شمع و خاک اطراف آن تحت اثر بار جانبی
۲۲	۵-۲-۳- روشهای تحلیلی در بررسی پاسخ شمع
۲۲	۱-۵-۲- روش ساده حل مهندسی
۲۴	۲-۵-۲- تیر بر روی فونداسیون الاستیک
۲۵	۳-۵-۲- روش محیط الاستیک
۲۸	۴-۵-۲- تیر بر روی فونداسیون وینکلر
۴۳	۵-۵-۲- روش محاسباتی زیر سازه
۴۶	۱-۶-۲- واکنش زلزله ای سینماتیک
۵۰	۷-۲- روشهای عددی و اجزای محدود
۵۱	۱-۷-۲- موارد استفاده روشهای عددی و اجزا محدود در گذشته
۵۷	۲-۷-۲- روش مستقیم اجزاء محدود
۵۹	۳-۷-۲- روش ترکیبی المان های محدود و المان های مرزی



۶۰	۴-۷-۲-مقایسه روشهای مستقیم و زیر سازه در تحلیل اندرکنش خاک و سازه:.....
۶۴	فصل سوم : مدل سازی عددی.....
۶۵	۱-۳- مقدمه.....
۶۵	۲-۳-توضیح اصطلاحات بکار رفته.....
۶۶	۳-۳-روش المان محدود.....
۶۶	۱-۳-۳- مقدمه.....
۶۷	۲-۳-۳- گسسته سازی المان محدود.....
۷۰	۴-۳- المان محدود در برنامه Abaqus.....
۷۰	۱-۴-۳- معرفی برنامه Abaqus.....
۷۲	۲-۴-۳- کاربردهای برنامه Abaqus.....
۷۲	۳-۴-۳- روش المان محدود در برنامه Abaqus.....
۷۶	۵-۳- مدل سازی خاک.....
۷۶	۱-۵-۳- مقدمه.....
۷۶	۲-۵-۳- تئوری الاستیک.....
۷۷	۳-۵-۳- تئوری پلاستیسیته.....
۷۹	۶-۳- شرایط مرزی.....
۷۹	۱-۶-۳- المان های کلومین.....
۸۰	۲-۶-۳- المان میراگر.....
۸۲	۳-۶-۳- المان های نامحدود.....
۸۶	۷-۳- سطح تماس خاک و شمع.....
۸۶	۱-۷-۳- فصل مشترک خاک و شمع در برنامه Abaqus.....
۸۷	۸-۳- اعمال تنش های اولیه.....
۸۷	۹-۳- میرایی.....
۸۸	۱-۹-۳- میرایی مادی.....
۹۰	۲-۹-۳- میرایی تشعشی.....

۹۰	.....۳-۹-۳-ضرایب میراگر ها
۹۰	.....۳-۱۰-۱-مدل سازی به روش المان محدود در برنامه Abaqus
۹۳	.....۳-۱۰-۱-مدل سازی خاک
۹۴	.....۳-۱۰-۲-مراحل مدل سازی شمع
۹۶	.....فصل چهارم: ارزیابی صحت مدل
۹۷	.....۴-۱-مقدمه
۹۷	.....۴-۲-ارزیابی صحت مدل
۹۸	.....۴-۲-۱-ابعاد ابتدایی مدل برای ارزیابی
۹۸	.....۴-۲-۲-ارزیابی برای آنالیز استاتیکی
۱۰۳	.....۴-۳-۳-ارزیابی برای آنالیز دینامیکی
۱۰۵	.....۴-۴-نتیجه گیری
۱۰۷	.....فصل پنجم: نتایج تحقیق المان محدود
۱۰۸	.....۵-۱-مقدمه
۱۰۸	.....۵-۱-۱-رفتار شمع منفرد تحت بار دینامیکی
۱۰۸	.....۵-۱-۲-طریقه محاسبه تابع انتقال
۱۰۹	.....۵-۲-بررسی های انجام گرفته در مساله اندرکنش خاک-شمع
۱۰۹	.....۵-۲-۱-بررسی مدل استفاده شده
۱۱۰	.....۵-۲-۲-بررسی تأثیر ابعاد المان ها
۱۱۳	.....۵-۲-۳-بررسی تأثیر میرایی رایلی
۱۱۴	.....۵-۲-۴-بررسی تأثیر شرایط مرزی
۱۱۷	.....۵-۳-بررسی پارامتریک اثر اندکنش سینماتیک در شمع های منفرد
۱۱۸	.....۵-۳-۱-اثر خصوصیات غیر خطی خاک بر تابع انتقال
۱۱۹	.....۵-۳-۲-اثر قطر شمع بر تابع انتقال
۱۲۰	.....۵-۳-۳-اثر فاصله افتادگی بین شمع و خاک
۱۲۲	.....۵-۳-۴-تأثیرات اندرکنش با در نظر گرفتن بارگذاری زلزله

---

۱۲۳	۵-۳-۵- اثر پارامترهای مختلف بر تغییر مکان و نیروی برشی در اندرکنش خاک و شمع.
۱۳۳	۵-۳-۶- نتیجه گیری.....
۱۳۶	فصل ششم : جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات.....
۱۳۷	۶-۱- مقدمه.....
۱۳۷	۶-۲- خلاصه.....
۱۳۷	۶-۳- نتایج.....
۱۳۹	۶-۴- پیشنهادات برای تحقیقات بعدی.....
۱۴۰	مراجع.....
۱۴۶	پیوست.....
۱۴۷	پیوست الف.....
۱۵۷	Abstract.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مساله اندرکنش خاک و شمع ..... ۴
- شکل ۲-۱: تقسیم مساله به دو زیر مساله اندرکنش اینرسی (سمت راست) و اندرکنش جنبشی (سمت چپ) ..... ۴
- شکل ۳-۱: دو مرحله حل مساله اندرکنش اینرسی ..... ۵
- شکل ۱-۲: توضیح مساله اندرکنش خاک-سازه ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: مساله اندرکنش خاک-سازه الف) پاسخ میدان آزاد ب) اندرکنش سینماتیم پ) اندرکنش اینرسی ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: انواع امواج ..... ۱۸
- شکل ۴-۲: مکانیزم رفتار شمع کوتاه با سر آزاد در بارگذاری جانبی ..... ۱۹
- شکل ۵-۲: مکانیزم رفتار شمع کوتاه با سر گیردار در بارگذاری جانبی ..... ۱۹
- شکل ۶-۲: مکانیزم رفتار شمع بلند در بارگذاری جانبی: الف) شمع با سر گیردار ب) شمع در حالت آزاد ..... ۲۰
- شکل ۷-۲: تغییرات سختی و میرایی نسبی با فرکانس ..... ۲۳
- شکل ۸-۲: مدل‌های میرایی شعاعی یک بعدی و سه بعدی ..... ۲۷
- شکل ۹-۲: هندسه گوه مقاوم نزدیک سطح زمین و نیروهای آن برای بار جانبی شمع ..... ۲۹
- شکل ۱۰-۲: تعاریف طرح  $p-y$  الف) شمع بدون بار ب) شمع تحت بار جانبی با مقاومت بسیج شده ..... ۳۰
- شکل ۱۱-۲: منحنی نمونه  $p-y$ ، همراه با افزایش سختی با عمق ..... ۳۱
- شکل ۱۲-۲: شکل مشخصه منحنی  $p-y$  در رس نرم الف) بارگذاری استاتیکی ب) بارگذاری سیکلی ..... ۳۲
- شکل ۱۳-۲: مدل 8 SPASM الف) مدل شمع -خاک روسازه ب) تغییرات رفتار بار-کمانش با عمق ..... ۳۳
- شکل ۱۴-۲: مدل 8 SPASM الف) مدل درز شمع -خاک ب) رفتار نیرو-جابجایی ..... ۳۴
- شکل ۱۵-۲: مدل فنرهای غیر خطی جزء المانهای 8 SPASM ..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲: شکل مشخصه منحنی  $p-y$  در ماسه ..... ۳۵

شکل ۲-۱۶- شکل مشخصه منحنی $p-y$ در رس سخت الف) بارگذاری استاتیکی ب) بارگذاری سیکلی ..... ۳۵	شکل ۲-۱۷: ضریب ظرفیت باربری جانبی $N_p$ در مقابل عمق نرمالیزه شده ..... ۳۶
شکل ۲-۱۸: ضریب مناسب فنریت خاک-شمع، بارگذاری لرزه ای ..... ۳۸	شکل ۲-۱۹- مدل اندرکنش شمع و خاک نوگامی تیر روی فونداسیون وینکلر ..... ۳۹
شکل ۲-۲۰: مدل میدان دور نوگامی الف) ارتعاش قائم ب) ارتعاش افقی ..... ۴۰	شکل ۲-۲۱: میدان داخلی و میدان نزدیک در مدل شمع -خاک نوگامی الف) ارتعاش قائم ب) ارتعاش افقی ..... ۴۱
شکل ۲-۲۲- منحنیهای دینامیکی $p-y$ ارایه شده توسط الناگار در سال ۲۰۰۰ در عمق ۵/۱ متری a) برای مدل هیپربولیک و b) مدل منحنی $p-y$ (که در آن $\rho_p$ دانسیته شمع $\rho_s$ دانسیته خاک، $p_{ult}$ بار نهایی جانبی شمع است) ..... ۴۲	شکل ۲-۲۳: منحنیهای دینامیکی $p-y$ ارایه شده توسط الناگار در عمق ۳ متری a) مدل هیپربولیک و b) مدل منحنی $p-y$ ..... ۴۲
شکل ۲-۲۴: شکل کلی و ایده آل ضریب تغییر مکان سینماتیکی ..... ۴۸	شکل ۲-۲۵: مدل شبه سه بعدی شمع-خاک ..... ۵۲
شکل ۲-۲۶: نمای کلی سازه و پی شمعی ..... ۵۳	شکل ۲-۲۷- مرزهای مکمل ..... ۵۸
شکل ۲-۲۷: سازه نیمه مدفون در خاک چند لایه تحت امواج زلزله ..... ۵۹	شکل ۳-۱: برخورد موج به مرز و میراگرها ..... ۸۰
شکل ۳-۲: یک جزء المان و نیروهای وارد بر آن ..... ۸۰	شکل ۳-۳: نمایش یک المان نامحدود یک بعدی و ارتباط بین مختصات کلی و محلی ..... ۸۳
شکل ۳-۴: ارتباط بین میرایی رایلی و فرکانس ..... ۸۸	شکل ۳-۵: شکل کلی میراگرها و اتصال آنها به سازه ..... ۸۹
شکل ۳-۶: مدل در نظر گرفته شده برای آنالیز المان محدود (خاک و شمع) ..... ۹۲	شکل ۳-۷: مدل در نظر گرفته شده برای آنالیز المان محدود (شمع) ..... ۹۲
شکل ۳-۸: پلان و ابعاد المان ها در مدل ساخته شده ..... ۹۳	شکل ۳-۹: نمای جانبی مدل ساخته شده و ابعاد المان ها در این راستا ..... ۹۳

- شکل ۴-۱: شتاب سنگ بستر و شتاب در میدان آزاد خاک در فرکانس ۱Hz ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲: پاسخ میدان آزاد از روش تئوری ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱: طرح شمع منفرد تحت شرایط انتشار امواج افقی برشی ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲: اندازه المان های مدل در پلان (مدل اول) ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳: اندازه المان های مدل در نما (مدل اول) ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴: اندازه المان های مدل در پلان (مدل دوم) ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۵: اندازه المان های مدل در پلان (مدل دوم) ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۶: اختلاف شتاب در سر شمع در المان بندی ریز و درشت تر ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۷: مدل ساخته شده با اتصال هر گره به سه میراگر در سه جهت عمود بر هم ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۸: نمایش اتصال گره ها به میراگر در سه جهت عمود بر هم ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۹: شتاب سر شمع متأثر از شتاب کف بستر با دامنه  $1m/s^2$  و فرکانس 1Hz در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک (نمودار حالت شرایط مرزی با المان نامحدود و میراگر به یک شکل هستند) ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۰: شتاب سر شمع متأثر از شتاب کف بستر با دامنه  $1m/s^2$  و فرکانس 2Hz در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک (نمودار حالت شرایط مرزی با المان نامحدود و میراگر به یک شکل هستند) ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۱: شتاب سر شمع متأثر از شتاب کف بستر با دامنه  $1m/s^2$  و فرکانس 4Hz در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۲: شتاب سر شمع متأثر از شتاب کف بستر با دامنه  $1m/s^2$  و فرکانس 4Hz در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۳: تغییرات بزرگنمایی به فرکانس بی بعد در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۴: تغییرات تابع انتقال نسبت به فرکانس بی بعد در حالت های خاک الاستیک و الاستوپلاستیک ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۱۵: تغییرات تابع انتقال با توجه به تغییر قطر شمع در حالت الاستیک ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۶: تغییرات تابع انتقال با توجه به تغییر قطر شمع در حالت الاستوپلاستیک ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۱۷: شتاب نگاشت زلزله کوبه ..... ۱۲۲

- شکل ۵-۱۸: تغییر مکان ماکزیمم در طول شمع..... ۱۲۲
- شکل ۵-۱۹: تغییرات برش ماکزیمم در طول شمع..... ۱۲۳
- ۵-۳-۵- اثر پارامترهای مختلف بر تغییر مکان و نیروی برشی در اندرکنش خاک و شمع..... ۱۲۳
- شکل ۵-۲۰: اثر الاستیک و الاستوپلاستیک خاک در تغییر مکان ناشی از زلزله..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۱: شتاب نگاشت زلزله ال-سنترو..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۲: تغییر مکان سر شمع در حالت های الاستیک و الاستوپلاستیک با بارگذاری زلزله ال-سنترو..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۳: تغییر مکان ماکزیمم شمع با تغییرات مدول الاستیسیته خاک..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۴: تغییر مکان ماکزیمم سر شمع با تغییرات مدول الاستیسیته خاک..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۵: برش ماکزیمم در طول شمع در رابطه با مدول الاستیسیته..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲۶: تغییرات برش ماکزیمم و عمق در مدول الاستیسیته های مختلف..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲۷: تغییر مکان ماکزیمم شمع در رابطه با ضریب پواسون..... ۱۲۹
- شکل ۵-۲۸: تغییر مکان سر شمع در رابطه با ضریب پواسون..... ۱۲۹
- شکل ۵-۲۹: تغییر مکان ماکزیمم شمع در رابطه با چگالی..... ۱۳۰
- شکل ۵-۳۰: تغییر مکان ماکزیمم سر شمع در رابطه با چگالی..... ۱۳۰
- شکل ۵-۳۱: تغییرات برش ماکزیمم در طول شمع در رابطه با چگالی..... ۱۳۱
- شکل ۵-۳۲: تغییرات چسبندگی و تغییر مکان ماکزیمم در شمع..... ۱۳۱
- شکل ۵-۳۳: تغییرات چسبندگی و تغییر مکان سر شمع..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳۴: تغییرات چسبندگی و برش ماکزیمم در شمع..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳۵: تغییرات برش ماکزیمم و عمق در رابطه با چسبندگی..... ۱۳۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: توابع شکل و توابع نگاشت در المان نامحدود سه بعدی ..... ۸۵
- جدول ۲-۳: خصوصیات خاک مدل شده ..... ۹۳
- جدول ۳-۳: خصوصیات مدل شمع ..... ۹۴
- جدول ۱-۴: مقادیر بدست آمده از روابط تجربی برای محاسبه نشست سر شمع در بارگذاری عمودی ..... ۱۰۰
- جدول ۲-۴: مقایسه مقادیر بدست آمده از آنالیز المان محدود برای مدل های با ابعاد متفاوت ..... ۱۰۱
- جدول ۳-۴: مقایسه نتایج بدست آمده از آنالیز المان محدود برای بارگذاری دینامیکی در سر شمع ..... ۱۰۳
- جدول ۱-۵: مقایسه فرکانس طبیعی در مدل ها ..... ۱۱۲
- جدول ۲-۵: مقایسه شتاب سر شمع نسبت به مقادیر مختلف میرایی ..... ۱۱۳
- جدول ۳-۵: مقایسه تابع انتقال با در نظر گیری اثر جدا افتادگی بین شمع و خاک ..... ۱۲۱



# فصل اول

مقدمه و کلیات

## ۱-۱- مقدمه

با گسترش تکنولوژی و شهرنشینی، پروژه‌های گسترده و وسیعی طراحی و اجرا می‌شوند که بعضی از این پروژه‌ها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شوند. با گذشت زمان مقیاس و اندازه این پروژه‌ها افزایش می‌یابد و در این شرایط، با توجه به وضعیت‌های ناشناخته یا عوامل در نظر گرفته نشده، ضریب اطمینان طراحی و به طبع آن قیمت تمام شده پروژه‌ها افزایش می‌یابد.

تحلیل عکس العمل دینامیکی سازه‌هایی که تحت بارهای بالقوه زلزله در پایه خود قرار دارند، یکی از وظایف اصلی مهندسی زلزله می‌باشد. در دینامیک سازه تعیین روش‌هایی برای تعیین تنش‌ها و تغییر مکان‌های سازه که تحت اثر بارهای دینامیکی مثل زلزله قرار دارد، از اهم مسایل است. اما در حالت کلی سازه با خاک اطراف خود در حال برهم کنش است، بنابراین بار وارده به محیط خاک اطراف سازه، در خلال حرکات زلزله، باید در نظر گرفته شود. در مقایسه با سازه، خاک دارای قلمرو نامحدودی است که شرایط انتشار امواج در آن باید در مدل دینامیکی به حساب آورده شود. یکی از موضوعاتی که می‌تواند در تحلیل اندرکنش خاک و پی در نظر گرفته شود بررسی اندرکنش خاک و شمع به عنوان نوعی خاص از انواع پی‌ها است.

پیدایش صنعت انرژی هسته‌ای و نیاز به طراحی و ساخت راکتورهای بزرگ و اهمیت بررسی رفتار دقیق آنها در شرایط زلزله از یکسو و پیشرفت صنعت استخراج نفت از دریا و لزوم احداث سازه‌های دریایی استوار بر شمع‌ها، که تحت اثر ارتعاشات حاصل از امواج و زلزله قرار دارند، از سوی دیگر محققین را متوجه لزوم بررسی رفتار دینامیکی شمع‌ها کرد. این موضوع در محدوده دانش اثر متقابل خاک و سازه است. در طراحی شمع‌ها پس از انتخاب و تعیین نوع مصالح بر پایه دوام و پایداری شمع‌ها، بر اساس نیروهای وارد بر شمع یا گروه شمع طراحی صورت می‌گیرد. نیروهای وارد بر شمع، نیروهای محوری، جانبی و ممان‌های خمشی می‌باشند و طراح باید اطمینان داشته باشد که شمع تک و یا شمع بحرانی در گروه شمع تحت نیروهای مذکور ایمن بوده و تغییر مکان نیز از مقادیر مجاز تجاوز نمی‌کند. طراحی شمع تحت بارهای قائم و محوری با حل معادلات تعادل در راستای نیرو صورت می‌گیرد. در حالیکه در شمع‌های با بارگذاری جانبی مسئله به حل معادلات دیفرانسیلی غیر خطی منجر می‌شود. بررسی ظرفیت باربری نهایی یک شمع قائم تحت بار جانبی و کنترل تغییر مکان سر شمع به لحاظ پیچیدگی اندرکنش بین یک شمع نیمه صلب و خاک الاستوپلاستیک جزو مسایل مبهم در علم ژئوتکنیک قرار گرفته است [۱].

تقریباً تمام شمع‌ها تحت بارهای افقی قرار دارند. در بعضی سازه‌ها مقدار این بارها در مقایسه با بارهای قائم ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن است، ولیکن در بعضی موارد شمع‌ها و گروه شمع‌ها تحت بارهای جانبی قابل توجهی قرار دارند. در اسکله‌ها و سازه‌های بندری که در آنها نیروهای افقی از طریق برخورد کشتی‌ها و پهلوگیری و یا در اثر باد و امواج دریا بوجود می‌آیند، در سازه‌های نگهبان متکی بر شمع‌ها، سازه‌های واقع در مناطق لرزه خیز، شمع‌ها تحت نیروهای افقی قابل ملاحظه‌ای هستند [۲].

اکثر مطالعات انجام گرفته برای انجام تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن کل سیستم سازه و پی شمعی، با استفاده از ساده سازی های دور از واقعیت و غیر استاندارد بوده است. در مطالعات کارایی شمع در هنگام زلزله، دو مسئله مهم وجود دارد: پی شمعی بر روی امواج زلزله که به سازه می رساند اثر می گذارند و همچنین شمع ها میتوانند مقاومت قابل توجهی در مقابل شکست و خسارت شدید ناشی از بارگذاری زلزله از خود نشان دهند [۳].

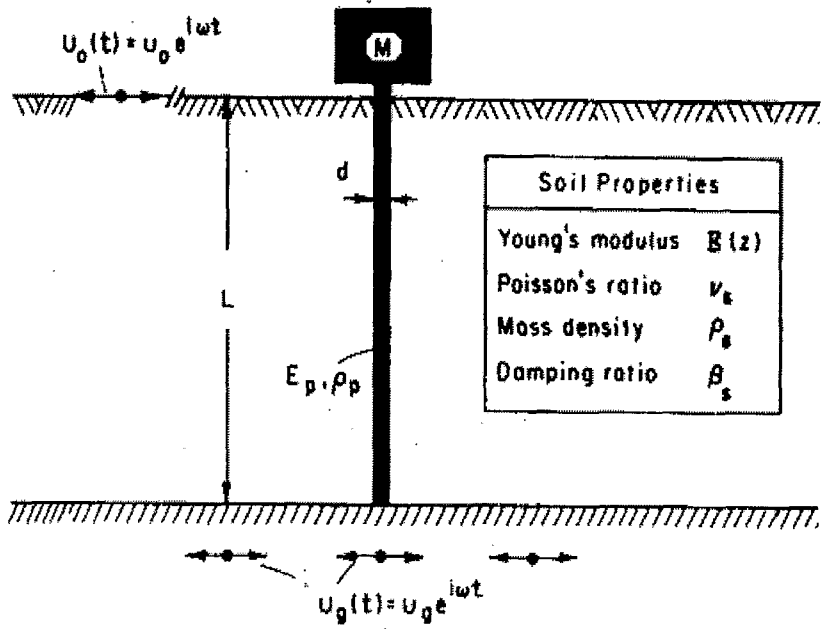
عموماً در بررسی سیستم اندرکنش خاک-شمع-سازه از مفهوم زیرسازه برای بررسی آن استفاده می شود. در شکل (۱-۱) می توان مشخصات اصلی این مفهوم را مشاهده کرد. سیستم از خاک، روسازه، شمع و ارتعاشات در بستر تشکیل شده است. اندرکنش های سیستم را می توان به دو قسمت به عنوان های اندرکنش جنبشی (سینماتیک)<sup>۱</sup> و اندرکنش جرمی (اینرسی)<sup>۲</sup> تقسیم کرد که در زیر توضیح داده شده اند [۴]:

- اندرکنش جنبشی (سینماتیک): در میدان آزاد، زلزله سبب جابجایی خاک در جهت افقی و قائم میشود. اگر یک شالوده بر سطح یا داخل لایه خاک به اندازه های سخت باشد که قادر به تحمل تغییر شکل های میدان آزاد نباشد، حرکت آن حتی اگر جرمی هم نداشته باشد تحت تأثیر اندرکنش جنبشی قرار خواهد گرفت. به بیان دیگر اندرکنش جنبشی هنگامی رخ می دهد که سختی سیستم پی، مانع گسترش حرکات میدان آزاد شود.
- اندرکنش جرمی (اینرسی): اینرسی به وجود آمده در سازه ناشی از ارتعاشات داخلی آن باعث به وجود آمدن نیروهای خمشی و برشی در پی می شود که این موضوع باعث ایجاد جابجایی در پی نسبت به میدان آزاد می شود.

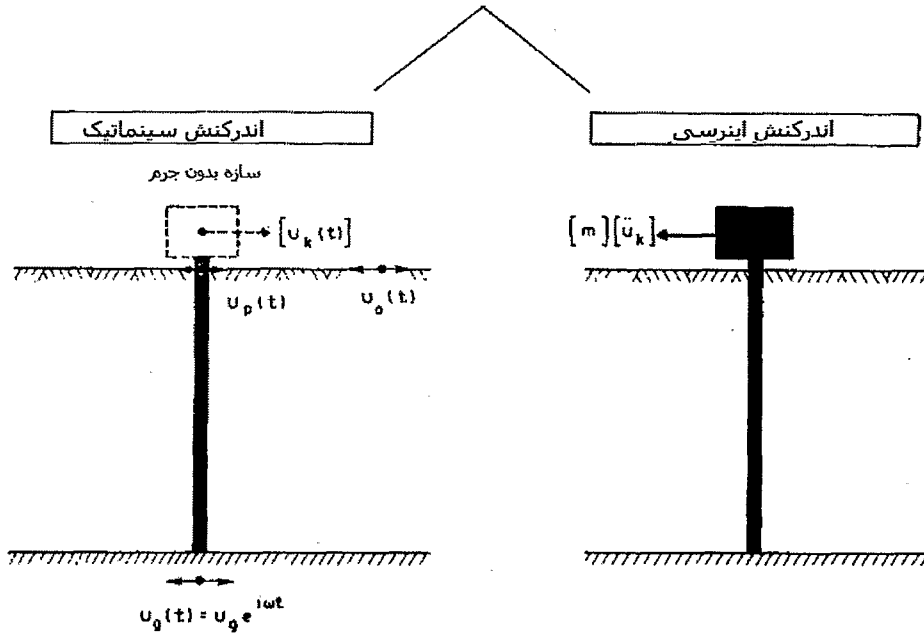
شکل ۱-۱ مساله اندرکنش را در یک شمع منفرد نشان می دهد. حرکت زمین به صورت  $U_g(t) = U_0 e^{i\omega t}$  میباشد که باعث ایجاد حرکتی چون  $U_0(t) = U_0 e^{i\omega t}$  شده است. مساله را میتوان همچون شکل ۱-۲ به دو مساله دیگر تقسیم کرد که لازم است حل شوند. شکل سمت راست ۱-۲ نشان دهنده اندرکنش اینرسی و شکل سمت چپ نشان دهنده اندرکنش جنبشی می باشد. به طریق مشابه می توان اندرکنش اینرسی را نیز به دو زیر مساله که در شکل ۱-۳ آمده است تقسیم نمود. در حقیقت با روش ذکر شده سیستم شمع و خاک را به چندین زیر مساله که هر کدام مستقل از دیگری هستند تقسیم کرده ایم و در انتها جواب ها را بر روی یکدیگر سوار خواهیم کرد.

<sup>1</sup> Kinematic Interaction

<sup>2</sup> Inertial Interaction



شکل ۱-۱: مساله اندرکنش خاک و شمع [۴]



شکل ۲-۱: تقسیم مساله به دو زیر مساله اندرکنش اینرسی (سمت راست) و اندرکنش جنبشی (سمت چپ) [۴]