

## مروری بر چگونگی رفتار پی‌های شمعی تحت اثر تحریک زلزله در خاک‌های روانگرا

آرش رزمخواه، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

سعید تمدن (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،

[st\\_s\\_tamaddon@azad.ac.ir](mailto:st_s_tamaddon@azad.ac.ir)

**چکیده:** تحلیل واکنش لرزه‌ای پی‌های شمعی در پروژه‌های مهندسی اغلب از طریق تحلیل‌های تقریبی انجام می‌شود. تحقیقات اخیر چندین نقطه ضعف را در روش طراحی مرسوم شمعی‌ها شناسایی کرده است: الف) کاهش سختی و در نتیجه کاهش مقاومت شمعی‌ها در اثر روانگرایی خاک اطراف شمعی‌ها، ب) افزایش فرکانس طبیعی سازه به دلیل از بین رفتن تکیه‌گاه جانبی خاک و کاهش نسبت میرایی سازه‌های متکی بر شمع در زمان روانگرایی خاک. این تغییرات در خواص دینامیکی می‌تواند پیامدهای طراحی مهمی در بر داشته باشد. در این تحقیق به بررسی رفتار شمعی‌های یک پل که توسط یک لایه خاک روانگرا در عمق 11 تا 15 متری از سطح زمین محصور شده است پرداخته می‌شود. با توجه به حساسیت موضوع، هدف از نگارش این مقاله مطالعه‌ی واکنش شمعی‌ها با شرایط متفاوت در لایه‌های خاک روانگرا و ارائه‌ی راهکار مناسب جهت مدل‌سازی پل مذکور می‌باشد. در این مقاله به بررسی چهار مدل مطالعاتی مختلف جهت تأثیر پارامترهایی از قبیل تغییرات در طول شمع، شرایط تکیه‌گاهی سر شمع، ضخامت لایه خاک روانگرا و نحوه‌ی مدل‌سازی بر روی واکنش پی‌های شمعی پرداخته شده است و نتایج به‌طور خلاصه نشان می‌دهد پس از تحریک زلزله، تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در تغییر مکان‌های جانبی برای طول‌های متفاوت وجود دارد. همچنین تغییر مکان جانبی برای شمعی‌هایی که دارای مهارشدگی در سر شمع هستند در درون پروفیل خاک خشک بیشتر از خاک روانگرا می‌باشد. همچنین مشاهده شد در پروفیل خاک‌هایی که لایه‌ی روانگرا دارند، همیشه لنگر بیشینه شمع که مبنای طراحی شمعی‌ها می‌باشد در محل اتصال گیردار شمع به سر شمع رخ نمی‌دهد و ممکن است در برخی حالات در مرز لایه روانگرا و غیر روانگرا باشد. همچنین مشاهده شد نزدیک‌ترین راهکار جهت مدل‌سازی زیر سازه پل مورد بررسی استفاده از مدل پیوسته‌ی شمع با خاک اطراف است.

**واژگان کلیدی:** روانگرایی، دینامیک شمع، مدل‌سازی پیوسته خاک-شمع، تحلیل بار افزون و تاریخچه زمانی غیر خطی، تغییر مکان جانبی شمع.

### 1 - مقدمه

رفتار پی‌های شمعی تحت اثر بارگذاری زلزله یک مسئله مهم است که کارایی سازه‌ها را به‌طور گسترده‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. رو سازه و خاکی که شمعی‌ها را احاطه کرده بارهای دینامیکی متفاوتی به شمعی‌ها اعمال می‌کنند و به دلیل رفتار غیر خطی خاک و همین‌طور فشار منفذی آب، سختی و نیروی برشی خاک اطراف در طول زمان تقلیل پیدا می‌کنند؛ بنابراین تحلیل کارکرد شمعی‌ها در لایه‌های خاک روانگرا بسیار پیچیده‌تر از خاک‌های غیر روانگرا می‌باشد.

قرار گرفته در خاک‌های روانگرا به اثرات غیر الاستیک خاک و شمع از لحاظ تجربی و یا تحلیلی پرداخته‌اند؛ اما هنوز تحلیل و مدل‌سازی پیوسته و کاملی که اثر ترکیبی تمامی پارامترهای رو سازه، شمع و خاک را یک‌جا ببیند و محققین در این باره اتفاق نظر داشته باشند انجام نشده است.

در این مقاله تحلیل‌های بار افزون غیر خطی استاتیکی و تاریخچه زمانی غیر خطی در محدوده‌ای گسترده از سیستم‌های خاک-شمع جهت بررسی مشخصات رفتار غیر الاستیک شمع در مراحل متفاوتی از بارگذاری صورت گرفته است و در اکثر مدل‌ها از یک مدل المان محدود (FE) از سیستم خاک-شمع در چارچوب برنامه OpenSees [2] و SAP2000 [3] استفاده شده است [4].

ضعف بزرگی که در برخی مدل‌های رایج در تحلیل شمع‌ها وجود دارد نمایش نامناسب تأثیرات پی بر سازه می‌باشد، به‌خصوص در رابطه با پی‌های شمعی این مسئله به‌وفور مشاهده می‌شود. اغلب پی‌های شمعی با فنرهای تکی برای مدل‌سازی سختی چرخشی و خطی مدل می‌شوند و ترکیب میان فنرها معمولاً نادیده گرفته می‌شود. مدل کردن سختی فنرها با روش‌های ساده شده‌ی تقریبی، عدم قطعیت زیاد و همراه با تخمین دارند؛ بنابراین تصویر کاملی از تأثیرات پی بر سازه در هنگام وقوع لرزش شدید ناشی از زلزله ملزوم به لحاظ کردن مشخصه‌هایی از جمله غیر خطی بودن خاک، فشار سیال ناشی از زلزله، اندرکنش میان شمع‌ها و خاک، اندرکنش اینرسی سازه‌ی فوقانی به همراه اندرکنش دینامیکی میان خود شمع‌ها به‌طور هم‌زمان می‌باشد. تمامی این مشخصه‌ها را می‌توان از طریق تحلیل پیوسته‌ی دینامیکی با تنش مؤثر غیر خطی لحاظ کرد.

هدف این مقاله ارائه‌ی مروری تفصیلی بر چندین مدل مطالعاتی از رفتار پی‌های شمعی در هنگام وقوع زلزله در خاک‌های غیر روانگرا و روانگرا با استفاده از تحلیل پیوسته‌ی تنش مؤثر غیر خطی دینامیکی و ارائه‌ی راهکار مناسب مدل‌سازی شمع و سر شمع برای پل بردستان با توجه به

روانگرایی یکی از بزرگ‌ترین عوامل تخریب ابنیه‌های فنی در زمان وقوع زلزله است [1]. این پدیده به‌عنوان عامل اصلی صدمه به پی‌های شمعی در زمان وقوع زلزله گزارش شده است؛ برای نمونه در آلاسکا سال 1964، لوماپریتا در سال 1989، هایوگوکن نامبو در سال 1995 [1]. پیش‌بینی واکنش لرزه‌ای پی‌های شمعی در لایه‌های خاک با قابلیت روانگرایی دشوار است و عدم قطعیت‌های فراوانی در مکانیسم‌هایی که شامل اندرکنش خاک و سازه فوقانی می‌شود وجود دارد. پس با توجه به حساسیت موضوع و همچنین استخراج دیگر پارامترهای طراحی دو گمانه به عمق هر یک 30 متر در ابتدا و انتهای پل بردستان حفر و پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها مشخص شد از عمق 11 تا 15 متری پتانسیل روانگرایی لایه خاک وجود دارد. بنابراین مبنای نگارش این مقاله بررسی رفتار پی‌های شمعی پل مذکور با توجه به آخرین تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و ارائه‌ی راهکار مناسب بوده است. در دهه‌های اخیر تعداد زیادی آزمایش‌های گریز از مرکز و میز لرزه و همچنین چندین روش جهت درک بهتر رفتار دینامیکی پی‌های شمعی در خاک‌های روان شده بکار گرفته شده است که این تحقیقات را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: بازدیدهای میدانی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

سؤال مهمی که باید در طراحی پی‌های شمعی مطرح شود این است که مشخصات و الگوی آسیب احتمالی وارده به شمع در بخشی از شمع که زیر سطح زمین قرار گرفته چه خواهد بود؟ به‌خصوص پس از وقوع زلزله و هنگامی که شمع‌ها در لایه‌های خاک مستعد روانگرایی قرار گرفته‌اند. پر واضح است که درک بهتری از عملکرد پی شمعی در هنگام بارگذاری ناشی از زلزله نیاز است. درکی که فعل و انفعالات خاک و نیز سازه را لحاظ کند و منجر به پدید آمدن روش‌هایی با محوریت عملکرد شود. این موضوع به‌خصوص در رابطه با شمع‌های قرار گرفته در خاک‌های روانگرا صادق است، اگرچه مواردی از تحقیقات صورت گرفته بر روی شمع‌های

نیازهای طرح می‌باشد. امید می‌رود که این مقاله درک بهتری به نحوه‌ی مدل‌سازی پی‌های شمعی در خاک‌های روانگرا و غیر روانگرا و همچنین اثرات روانگرایی بر پی‌های شمعی به دانش پژوهان ارائه نماید.

### 1-1 - باز دیدهای میدانی

این تحقیقات اساساً به دنبال بررسی پراکندگی الگوهای خرابی، نشست و جابه‌جایی جانبی شمعی‌ها هستند. در زمان وقوع زلزله‌ی نیگاتا در سال 1964 بسیاری از پی‌های شمعی که باید سازه را نگه می‌داشتند به علت روانگرایی خاک اطراف دچار خرابی شدند. بر اساس گفته‌ی هامادا [5] زمین در مجاورت یک ساختمان چهار طبقه حدوداً به اندازه‌ی 1.1 متر حرکت کرد و تغییر مکان جانبی حداکثر شمعی‌های بتنی با قطر 35 سانتی‌متر و طول 6 تا 9 متر حدود 70 سانتی‌متر بود. میزان بالای تغییر مکان جانبی علت خسارت شدید به شمعی در لایه‌های خاک روانگرا و غیر روانگرا بود. موری و همکاران [6] تحقیق حفاری و آزمایش داخلی از شمعی‌های آسیب‌دیده‌ی یک سیلو که به‌شدت در زلزله‌ی هوکایدونانسری - اوکی 1993 آسیب دیده بود انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که آسیب‌ها در سه محل متفاوت رخ داده‌اند: در سر شمعی (برای شمعی‌های با سر ثابت)، در عمق 1 تا 3 متری زیر کلاهک شمعی (برای شمعی‌های با سر آزاد) و در برخورد با لایه‌های روانگرا و غیر روانگرا. این مشاهده توسط دیگران مانند تاجیکاوا و همکاران [7]، شاموتو و همکاران [8] و اونیشی و همکاران [9] تأیید شد.

### 1-2 - آزمایش‌های آزمایشگاهی

در این مقاله از نتایج آزمایش‌های سایر محققین جهت بررسی روش عددی استفاده شده است. این تحقیقات شامل چند آزمایش گریز از مرکز دینامیکی و همچنین آزمایش‌های میز لرزان در مورد سازه‌های با شمعی است که در آن واکنش لرزه‌ای شمعی، خاک و ساختمان‌های فوقانی

بررسی شده است. به‌عنوان مثال یائو و همکاران [10] از آزمایش‌های میزهای لرزان بزرگ استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که حالت گذرای قبل از روان شدن خاک در طراحی شمعی‌ها مهم بوده زیرا که فشار دینامیکی زمین پاسخ حداکثر را در این مرحله نشان می‌دهد. دیگر محققان از جمله ابدون و دوربی [11] سوزوکی و همکاران [12]، تامورا و توکیماتسو [13] و هان و همکاران [14] رفتار دینامیکی پی‌های شمعی در خاک‌های روانگرا شده را با استفاده از آزمایش‌های میزهای لرزان نیز بررسی کرده‌اند.

### 1-3 - مدل‌سازی عددی

کارآمدی ابزار شبیه‌سازی عددی برای بررسی مسائل روانگرایی در سایه‌ی ناکامی‌های مدل‌های فیزیکی به‌کار رفته در شبیه‌سازی‌های تجربی بسیار مهم‌تر و چشم‌گیرتر شده است [15]. از آنجاکه مدل‌سازی عددی دو و سه‌بعدی از جنبه‌ی محاسباتی بسیار پیچیده و وقت‌گیر است، اکثر محققان و طراحان ترجیح می‌دهند که از روش یک‌بعدی وینکلر بر مبنای المان محدود یا روش‌های تفاضل محدود برای تحلیل پی‌های شمعی استفاده کنند. میوا و همکاران [16]، لیاناپاتیرانا و پولوس [17-18]، چانگ و همکاران [19] از محققان نشان دادند که روش یک‌بعدی کم‌وبیش قادر است تغییر مکان جانبی حداکثر و بیشترین لنگر خمشی در پی‌های شمعی را در خاک‌های روانگرا پیش‌بینی کند، اگرچه واضح است که مدل‌های وینکلر قادر به شبیه‌سازی مدل نمونه به شکل صحیح نیست زیرا محاسبه‌ی مقدارهای صحیح برای ضرایب فنرها و میراگرها که با گذشت زمان به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کنند بسیار دشوار است. فین و فوجیتا [20]، کلار و همکاران [21]، اوکا و همکاران [22]، اوزوکا و همکاران [23]، چنگ و جرمیک [24]، از شیوه‌ی سه‌بعدی تفاضل محدود جهت شبیه‌سازی شمعی‌ها در لایه‌های خاکی روانگرا استفاده کردند. هرکدام از این مدل‌ها از میزان دقت متفاوتی

و  $f^{(p)}$  تأثیرات نیروهای بدنه، نیروهای بیرونی و سرعت جریان‌های سیال را شامل می‌شوند.

## 2-1 - مدل سازی ماسه

مدل مصالح یکی از مهم‌ترین اجزای شبیه‌سازی عددی رفتار دینامیکی خاک‌های روانگراست. در این مقاله برای تحلیل مدل اول (مدل پاک و رحمانی) [26] از مدل‌سازی رفتار ماسه با استفاده از یک حالت مدل پلاستیسیته بحرانی دو سطحی توسط دافالیاس و منظری [27] استفاده شده است؛ و برای دیگر مدل‌ها از پارامترهای تجربی و آزمایشگاهی مربوطه استفاده شده که جزئیات آنها در منابع آمده است.

## 3 - تغییرات نفوذپذیری خاک در طول روانگرایی

بسیاری از تحقیقات نشان داده که ضریب نفوذپذیری در طول پدیده‌ی روانگرایی به دلیل تغییر ساختاری در اسکلت خاک به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد [28]. در آغاز روانگرایی دانه‌های خاک ارتباط خود را با یکدیگر به‌طور کامل از دست می‌دهند، و این تغییر، مسیرهای بیشتری برای گذر آب به وجود می‌آورد. به وجود آمدن مسیرهای بزرگ‌تری مانند این، ضریب شکل منفذی و پارامترهای مربوطه را کاهش می‌دهد و در نهایت منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ی ضریب نفوذپذیری می‌شود [28]. میزان افزایش در ضریب نفوذپذیری در زمان وقوع روانگرایی در برخی بررسی‌ها گزارش شده است. شهیر و پاک [29] استفاده از مقدار ثابت ضریب نفوذپذیری در تحلیل عددی منجر به مقدار بسیار کمتری از نشست در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری است. آنها به این نتیجه رسیدند که تلفیق کردن متغیر نفوذپذیری در مدل عددی برای گرفتن فشار منفذی و واکنش نشست یک توده‌ی خاک روانگرا ضرورت دارد.

در نتیجه در این مقاله برای دو مدل تغییرات ضریب نفوذپذیری در مدل‌سازی عددی لایه‌های خاک روانگرا با استفاده از فرمولی که شهیر و پاک [29] پیشنهاد کرده‌اند لحاظ شده است.

برخوردار است. در برخی از این مقاله‌ها فرمول کاملاً ترکیب شده  $(u-p)$  به‌کار گرفته شده است. در فرمول‌های ترکیب نشده تغییر مکان‌های ساختار خاک  $(u)$  و به وجود آمدن فشار آب منفذی  $(p)$  به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. بر اساس تحقیقات، مدل‌های سه‌بعدی قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر اکثر پدیده‌هایی که در بازدید میدانی مشاهده شدند نسبت به مدل‌های تک‌بعدی می‌باشد.

در این مقاله در یکی از مدل‌ها تغییرات نفوذپذیری در شبیه‌سازی سازه‌ی فوقانی، شمع و خاک در نظر گرفته شده است و همچنین جهت شبیه‌سازی رفتار شمع‌های قرارگرفته در خاک‌های روانگرا برای تمامی مدل‌های مطالعاتی از یک تحلیل دینامیکی سه‌بعدی و همچنین از یک روش عددی تأیید شده جهت صحت‌سنجی نیز استفاده شده است.

## 2 - فرمول‌سازی عددی

در این مقاله برای بررسی حالات مورد انتظار شمع در حین زلزله روابط جداگانه‌ای ارائه شده است که دانش پژوهان می‌توانند به منابع مذکور مراجعه نمایند اما در اینجا به یک فرمول استفاده شده جهت مدل‌سازی اسکلت خاک و نفوذ سیال رابطه زینکویچ و شیومی [25] اشاره می‌شود که در این رابطه ترکیب حرکت اسکلت خاک  $(u)$  و تغییر فشار منفذی  $(p)$  مد نظر قرار گرفته است و برای جداسازی متغیرها از روش تفاضل محدود که در روابط (1) و (2) مشخص است استفاده شده است؛ و به کمک نرم‌افزار OpenSees [2] عناصر و مدل‌های مصالح تعریف شده‌اند.

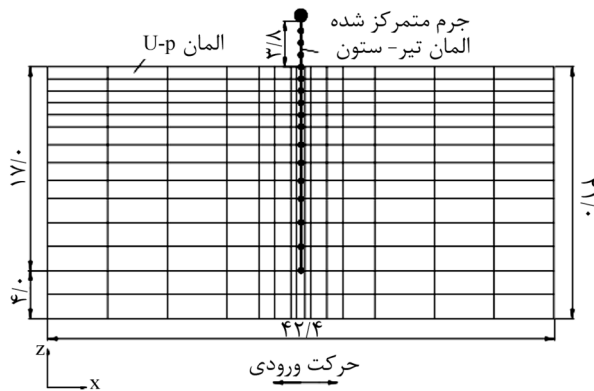
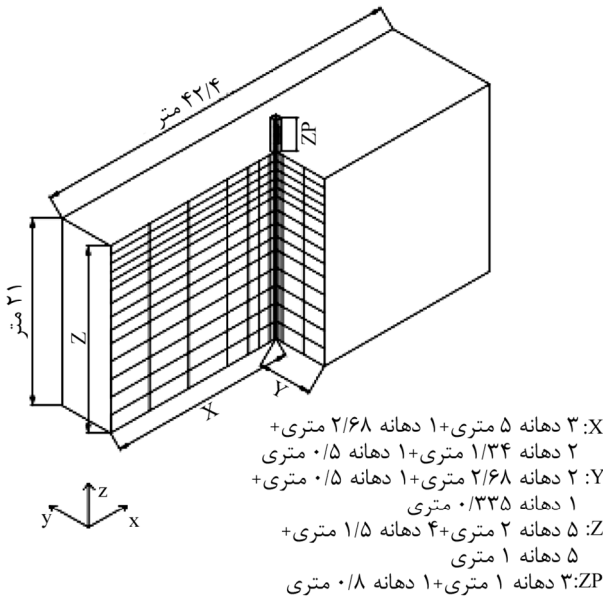
$$M\dot{U} + \int B^T \sigma' dv - QP - f^{(s)} = 0 \quad (1)$$

$$Q^T U + HP + SP - f^{(p)} = 0 \quad (2)$$

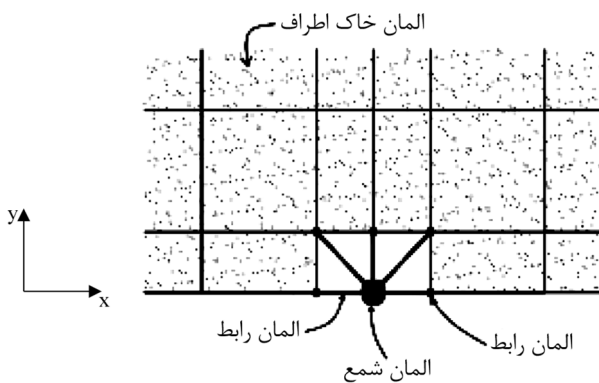
که در آن  $M$  ماتریس جرم،  $U$  تغییر مکان خالص برداری،  $B$  ماتریس تغییر مکان کششی،  $\sigma$  تانسور مؤثر تنش،  $Q$  نشانگر عملگر گرادیان گسسته که معادلات حرکت و جریان را ترکیب می‌کند،  $P$  بردار فشار منفذی،  $S$  ماتریس تراکم پذیری و  $H$  ماتریس نفوذپذیری است. بردارهای  $f^{(s)}$

#### 4 - طراحی مدل سه‌بعدی خاک - شمع (بررسی

موردی مدل پاک و رحمانی) [26]



شکل (1): شبکه المان محدود [26].



شکل (2): اتصال بیرونی بین المان خاک اطراف و المان شمع [26].

خاک به ترتیب 2000 کیلو پاسکال و 0/04 انتخاب شده است. همچنین خاطر نشان می‌شود جهت درک بهتر خصوصیات مکانیکی المان سطح مشترک تعدادی آزمایش میدانی استاتیکی و همچنین یک آزمایش گریز از مرکز در این

برای هر چهار مدل مطالعاتی در این مقاله از مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شده است و کلیات مدل‌سازی کم‌و‌بیش به یک شکل می‌باشد. در این مقاله جهت اختصار فقط به مدل‌سازی یک مدل مطالعاتی پرداخته می‌شود و علاقه‌مندان جهت بررسی دیگر مدل‌ها می‌توانند به منابع این مقاله مراجعه نمایند. در این تحقیق (مدل پاک و رحمانی) لایه‌های خاک توسط المان‌های مکعبی هشت‌گره‌ای با فرمول  $u-p$  که در آن هر گره چهار درجه آزادی دارد که شامل سه درجه تغییر مکان اسکلت خاک و یک درجه فشار منفذی آب می‌باشد (در اپنسیس قالب هشت‌گره‌ای المان  $u-p$  نامیده می‌شود). شمع نیز توسط المان تیر-شمع که برای هر گره 6 درجه آزادی دارند مدل می‌شود. درجات آزادی شمع شامل سه درجه آزادی تغییر مکان و سه درجه آزادی چرخشی می‌باشد. یک جرم متمرکز بر روی سر شمع نماینده‌ی سازه‌ی فوقانی است. شبکه‌ی المان محدود در شکل (1) آورده شده است.

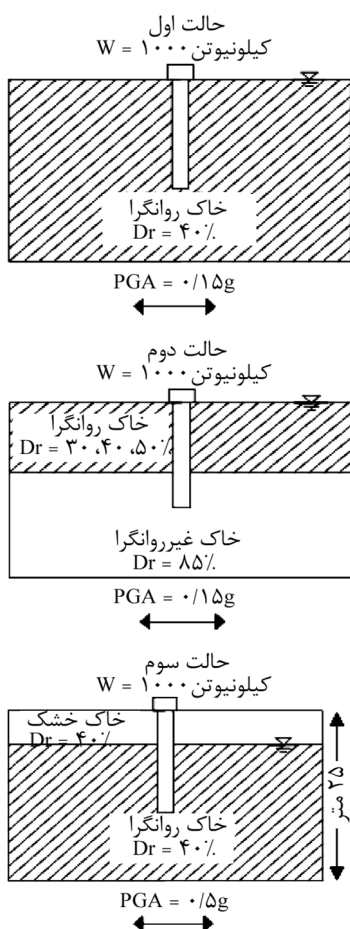
جهت نمایش و مدل‌سازی المان شمع به المان خاک اطراف، از یک المان تیر سخت استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (2) نشان داده شده است این المان‌ها با گره‌هایی در طول شمع نشان داده شده‌اند که معرف خاک اطراف شمع در عمق یکسان می‌باشد. در نقطه‌ی اتصال گره‌های المان خاک سه درجه آزادی انتقالی وجود دارد و سه درجه آزادی چرخشی که آزاد شده‌اند. علاوه بر این تعریف صفحه‌ی لغزش بین المان شمع و المان خاک اطراف با استفاده از المان‌هایی رابط با طول صفر و با دو گره در محل اتصال المان تیر-ستون به خاک امکان‌پذیر می‌باشد و در شکل (2) به نمایش در آمده است. یک مدل مصالح الاستیک کاملاً پلاستیک برای المان‌های رابط به کار رفته است. از این‌رو برای شبیه‌سازی در اپنسیس مدول یانگ و کرنش جاری شدن مصالح جهت تسلیم سریع المان سطح مشترک و در نتیجه منظور نمودن لغزش بین شمع و

رکورد شتاب زلزله 1995 کوبه جهت تحریک ورودی هر دو روش آزمایش گریز از مرکز و شبیه‌سازی جهت مقایسه‌ی پارامترهایی نظیر نسبت فشار آب منفذی اضافی در اعماق 1، 4/5 و 21 متری، لنگر خمشی در اعماق 1 و 2 متری و همچنین نشست در عمق 3 متری استفاده شد و هر سه پارامتر دارای انطباق خوبی برای هر دو روش در شتاب بیشینه بودند.

#### 5 - مطالعه‌ی پارامتری مدل‌های مختلف محققین

#### 5-1 - مدل پیشنهادی خاک - شمع توسط پاک و رحمانی [26]

جهت درک بهتر رفتار دینامیکی شمع قرار گرفته شده در لایه‌های خاک روانگرا، چندین مدل مختلف خاک در ادامه بررسی و مرور شده‌اند. مدل اول مدل پاک و رحمانی [26] می‌باشد که در شکل (4) به نمایش در آمده است.

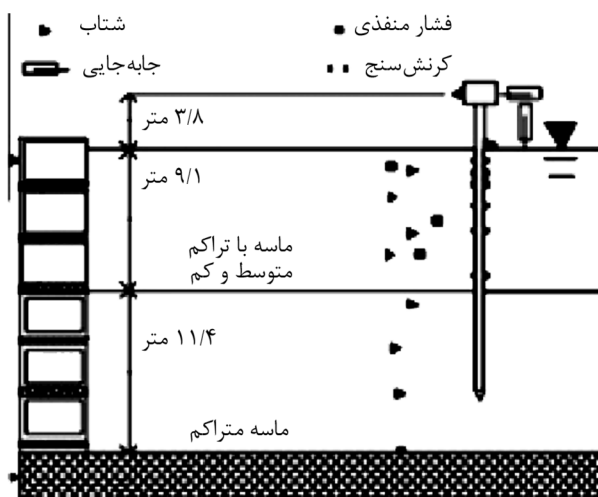


شکل (4): مدل تقریبی پاک و رحمانی [26] برای سه نوع مختلف خاک.

تحقیق استفاده و شبیه‌سازی بر اساس این مطالعات انجام شده است. جهت اطلاعات بیشتر از نحوه‌ی مدل‌سازی می‌توان به مرجع [26] مراجعه کرد.

#### 4-1 - تأیید و صحت مدل عددی

در گام اول مدل عددی الاستیک با حل بسته که در آن یک تک‌شمع در لایه‌های خاک غیر روانگرا تحت بارگذاری استاتیکی عمودی و افقی قرار گرفته بازبینی و تأیید می‌شود و محققانی همچون پولوس و دیویس [30] آریشتونوس و همکاران [31] و کوچوک ارسلان [32] در این زمینه تحقیقاتی را انجام داده‌اند. مقایسه‌ی نتایج نشان‌دهنده‌ی قابلیت مدل عددی در پیش‌بینی نتایج با خطای حداکثر 4% بود. در گام بعدی نتایج یک آزمایش گریز از مرکز بر روی پی‌های شمعی جهت نشان دادن اینکه مدل شمع قابلیت تحلیل تحت بارگذاری دینامیکی را دارد صورت گرفت. برای این منظور آزمایش گریز از مرکز دینامیکی برای شمع که متحمل بار سازه‌ای در ماسه‌ی روانگرا بود توسط ویلسون [33] شبیه‌سازی شد. پروفیل خاک شامل دو لایه افقی از ماسه‌ی اشباع نوادا می‌باشد. لایه‌ی پائینی دارای دانه‌بندی خوب و یکنواخت و با ضخامت 11/4 متر و متراکم و لایه‌ی بالایی با تراکم میانگین و ضخامت 9/1 متری در مقیاس نمونه‌ی اصلی است (شکل 3).



شکل (3): لایه‌بندی مدل آزمایش گریز از مرکز [33].

خاک (p-y spring) مدل‌سازی شده است. مدل تحلیلی حاضر شرایط مرزی در شمع با سر آزاد را مد نظر قرار می‌دهد. همچنین تحلیل حاضر فرض می‌کند که شمع مذکور تحت نشست عمودی پایدار است، در نتیجه شرایط تکیه‌گاهی مفصلی در نوک شمع در نظر گرفته شده است و شمع از نوع بتنی با قطر 60 سانتی‌متر لحاظ شده است.

بر طبق ارزیابی پتانسیل روانگرایی که توسط سرکار [34] به روش بولانگر و ادريس [35] برای منطقه‌ی هالیای هند بر روی خاک‌های ماسه‌ی سیلتی سست و با تراکم متوسط و خاک سیلتی متراکم انجام شد واضح است که لایه‌های خاک به‌شرط بارگذاری زلزله روانگرا هستند. همچنین از خصوصیات فنر غیر خطی (منحنی p-y) انستیتو نفت آمریکا [36] برای تعریف خصوصیات لایه‌های خاک غیر روانگرا استفاده شده است و جهت تعریف چگالی نسبی خاک در محل، از مقدار تجربی آزمایش نفوذ استاندارد پیشنهادی مایرهورف استفاده شده است [37].

فترهای p-y خاک روانگرا از طریق کاهش مقاومت و سختی فنرها با استفاده از فاکتور کاهش مدل‌سازی شده‌اند. مقدار ضریب P در اینجا طبق نظر براندنبرگ [38] 1/50 در نظر گرفته شده است.

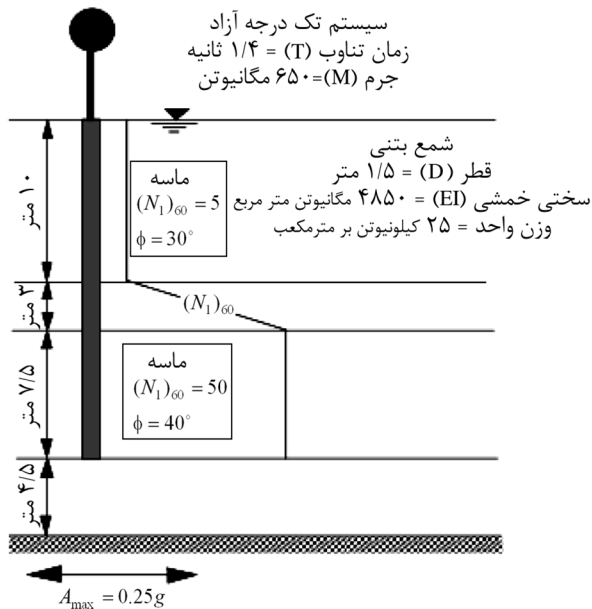
در ادامه یک تحلیل غیر خطی شبه استاتیکی با استفاده از SAP2000 [3] که در اصل یک تحلیل تاریخچه زمانی اصلاح شده می‌باشد، انجام گرفته است. نیروی محوری در تمامی طول بارگذاری جانبی وجود دارد. در تحلیل تاریخچه زمانی میرایی و جرم سیستم اجباراً نزدیک به صفر در نظر گرفته شد تا آن را شبه‌استاتیکی کند. همان‌طور که در شکل (5-ب) آمده است شمع ابتدا در معرض بار کاملاً محوری و پس‌از آن در معرض بار جانبی که به‌صورت خطی در حال افزایش تا حد بیشینه می‌باشد با ثابت نگه‌داشتن بار محوری قرار می‌گیرد. این تحلیل شامل تأثیر تغییر مکان بزرگ P-delta نیز می‌شود. جزئیات روش تحلیل را می‌توان در تحقیقات دش و همکاران [39] یافت.

این مدل با توجه به شکل (4) دارای مشخصات متغیر، از جمله شرایط مرزی سر شمع، طول شمع (L)، ضخامت لایه‌ی خاک روانگرا شده (HL)، تراکم نسبی لایه‌ی خاک روانگرا شده (Dr) و فرکانس حرکت ورودی (f) می‌باشد. در پروفیل اول، زمین شامل یک لایه خاک همگن و روانگرا شده است. در پروفیل دوم زمین دو لایه دارد: لایه‌ی بالایی روانگرا است درحالی‌که لایه‌ی پایینی این‌طور نیست؛ و در حالت سوم زمین دو لایه دارد: لایه‌ی بالایی خشک است و لایه‌ی پایینی اشباع و روانگرا است. در تمامی موارد زمین مسطح است و پدیده‌ی گسترش جانبی محتمل نیست. مهم است توجه کنیم که دامنه‌ی شتاب ورودی حالت سوم با توجه به مقادیر بزرگ‌تر تنش مؤثر در لایه‌ی پایینی از بقیه‌ی موارد بیشتر است. شبکه‌ی المان محدود در شبیه‌سازی پروفیل خاک پیشنهادی به کار رفته است و مقطع شمع مربعی با اضلاع 50 سانتی‌متر در نظر گرفته شده و برای دو حالت مرزی سر شمع که شامل حالت کاملاً آزاد در برابر چرخش و انتقال و حالت آزاد در برابر چرخش و فاقد درجه انتقالی می‌باشد مدل‌سازی شده است. در تمامی حالات بار سازه‌ی فوقانی به‌صورت جرم متمرکز 1000 کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. تحلیل با رکورد سینوسی شتاب یک زلزله به مدت 10 ثانیه و برای شمع‌هایی با طول 15، 25 و 40 برابر عرض شمع و همچنین فرکانس‌های شتاب 1، 3 و 5 هرتز تکرار شد.

## 5-2 - مدل مطالعاتی توسط سرکار و همکاران [34] بر پایه‌ی مدل تیر روی فونداسیون غیر خطی وینکلر

یک مدل «تیر بر بستر غیر خطی وینکلر»<sup>1</sup> نسبتاً ساده اما تفصیلی جهت بررسی واکنش یک پی شمعی معمولی تحت ترکیب بار محوری و جانبی تهیه شده است (شکل 5-الف). تحلیل مدل BNWF از طریق تئوری المان محدود بر اساس نرم‌افزار CSI 2004 - SAP 2000 [3] انجام شده است. خاک احاطه‌کننده‌ی شمع به شکل فنرهای جانبی

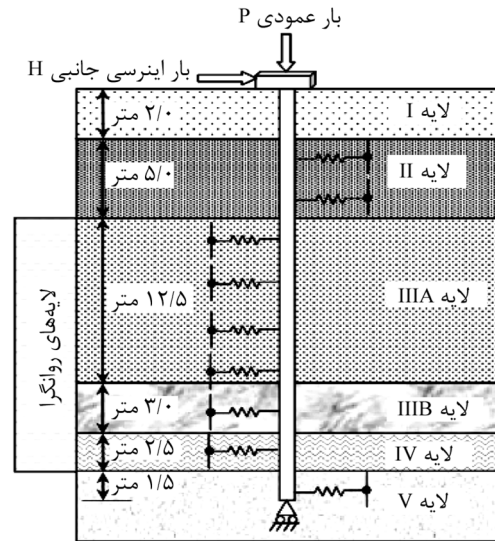
شده در بالای سازه نمایانگر بخشی از جرم ساختمان است. هدف از جانمایی جرم بر روی شمع مدل سازی تقریبی اندرکنش اینرسی میان سازه فوقانی و پی شمعی می باشد. غیر خطی بودن خاک و تأثیرات فشارهای لرزه ای سیال به صورت مداوم در حین تحلیل لحاظ شده است. شتاب حداکثر رکورد شتاب ورودی 0/25 شتاب ثقل زمین (g) و تا 0/4 شتاب ثقل زمین (g) در سطح افزایش یافته است. تحلیل های مؤثر این سیستم برای دو حالت انجام گرفته است که شامل اندرکنش های اینرسی و اینرسی و همین طور اندرکنش های اینرسی به تنهایی می شود. تحلیل آخر شامل جرم سازه ای فوقانی نمی شود. داده های به دست آمده از این دو نمونه تحلیل برای ارزیابی اهمیت اندرکنش اینرسی مورد مقایسه قرار گرفتند.



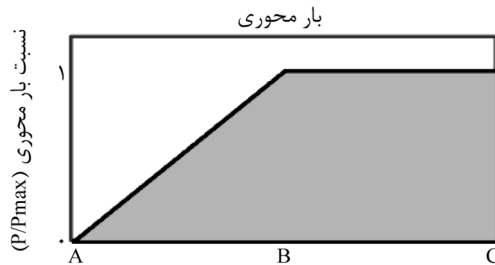
شکل (6): مدل سازه-خاک-شمع [41].

#### 4-5- مدل مطالعاتی استفاده شده در این تحقیق

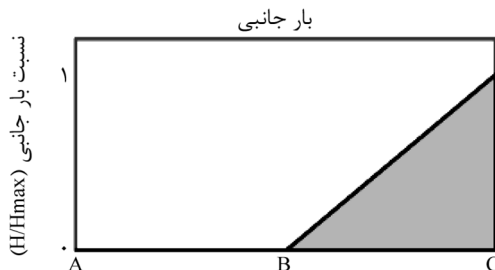
ارتفاع شمع های مورد مطالعه در پل بردستان 30D) قطر شمع می باشد) و پروفیل خاک به صورت ساده شده منطبق بر نتایج آزمایشگاه مکانیک خاک مطابق شکل (7) دارای سه لایه با لایه های روانگرا در عمق 11D تا 15D در زیر سطح زمین می باشد. در محاسبات سازه از شمعی به قطر 1



(الف)



زمان  
(ب)



زمان  
(پ)

شکل (5): (الف) مدل مورد استفاده ی خاک- شمع در مطالعه، (ب) الگوی بار دینامیکی محوری مورد استفاده در مطالعه و (پ) الگوی بار جانبی دینامیکی مورد استفاده در مطالعه [34].

#### 3-5- مدل مطالعاتی لیم فین بر پایه ی مطالعات

ایشی هارا [40-41]

در این مدل هر ستون توسط یک شمع نگهداری می شود. به طور کلی انتظار می رود 5 تا 10 متر بالایی پروفیل خاک در هنگام لرزش شدید دچار روانگرایی شوند. مدل دلخواه جهت تحلیل در شکل (6) آورده شده است. جرم متمرکز نشان داده



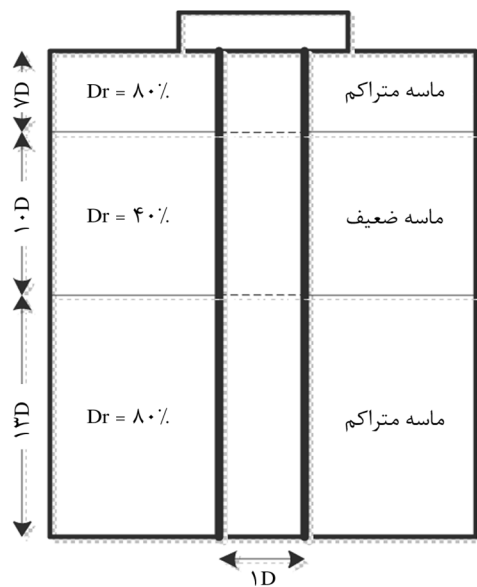
گیرداری سر شمع و در سر شمع برای شمع‌های با سر گیردار مشاهده می‌شود. برای حالت دوم لنگر خمشی حداکثر در دو نقطه به وجود می‌آید، اول در مکانی که برای مورد اول شرح داده شد و دیگری در سطح مشترک لایه‌های روانگرا و غیر روانگرا، اگرچه برای مورد سوم لنگرهای خمشی مضاعف نیز در لایه‌ی پایینی روانگرا مشاهده می‌شود. ثانیاً با بررسی تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های جانبی و لنگر خمشی، می‌توان نتیجه گرفت که برای هر سه مورد، تغییر مکان جانبی حداکثر شمع پس از رخ دادن روانگرایی لایه‌های خاک به دست می‌آید. این موضوع در مورد لنگر خمشی حداکثر که در پایین لایه‌ی روانگرا مشاهده می‌شود، نیز صادق است؛ اگرچه لنگر خمشی حداکثر در نزدیکی بالای شمع در اولین لحظات بارگذاری دینامیکی قبل از روانگرایی به وجود می‌آید. نتایج در شکل (8) به تصویر درآمده است. نتایج فوق برای شمع با ارتفاع 40 برابر عرض شمع نیز در شکل (8) قابل مشاهده است. ایشی‌هارا [40] نشان داده که نیروهای ساکن که نیروهای غالب قبل از رخداد روانگرایی هستند مسئول اصلی ایجاد لنگر خمشی در نزدیکی سر شمع می‌باشند و نیروهای متحرک که نیروهای غالب پس از رخداد روانگرایی هستند باعث لنگر خمشی ایجاد شده در سطح مشترک لایه‌های روانگرا و غیر روانگرا هستند. این موضوع از طریق روش عددی ثابت شده است.

## 6-2 - واکنش شمع برای مدل مطالعاتی سر کار و همکاران

[34]

توزیع لنگر خمشی به همراه عمق شمع از تحلیل شبه استاتیکی که در بخش قبلی به آن اشاره شد به دست آمده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که لنگر پدید آمده در مقطع شمع در اعماق حدود  $2/5$  تا  $7/5$  متر بیشتر از ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در این اعماق ضریب اطمینان در برابر شکل‌گیری مفصل پلاستیک کمتر از  $1/0$  خواهد بود، در نتیجه باعث گسیختگی مقطع می‌شود (شکل 9).

متر با مقطع دایره استفاده شده است بنابراین در ادامه‌ی این تحقیق نیز از شمعی به قطر 1 متر استفاده می‌شود. جهت مدل‌سازی خاک-شمع از روش تیر بر بستر خطی وینکلر ( $BNWF$ ) و با مدل‌سازی المان تیر-ستون غیر خطی استفاده شده است. برای نشان دادن رفتار چرخه‌ای بتن و فولاد به ترتیب از مدل کنت-پارک [42] و منگوتو-پینتو کمک گرفته شده است. سر شمع یک‌بار با انتقال جانبی و چرخش و یک‌بار فاقد انتقال جانبی و چرخش مدل‌سازی شده است. رفتار بار-تغییر مکان به صورت رفتار توأم الاستیک-پلاستیک تعریف شده است. در نهایت در این مقاله تحلیل‌های بار افزون غیر خطی استاتیکی در محدوده‌ای گسترده از سیستم‌های خاک-شمع جهت بررسی تأثیر روانگرایی بر رفتار غیر الاستیک شمع‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.



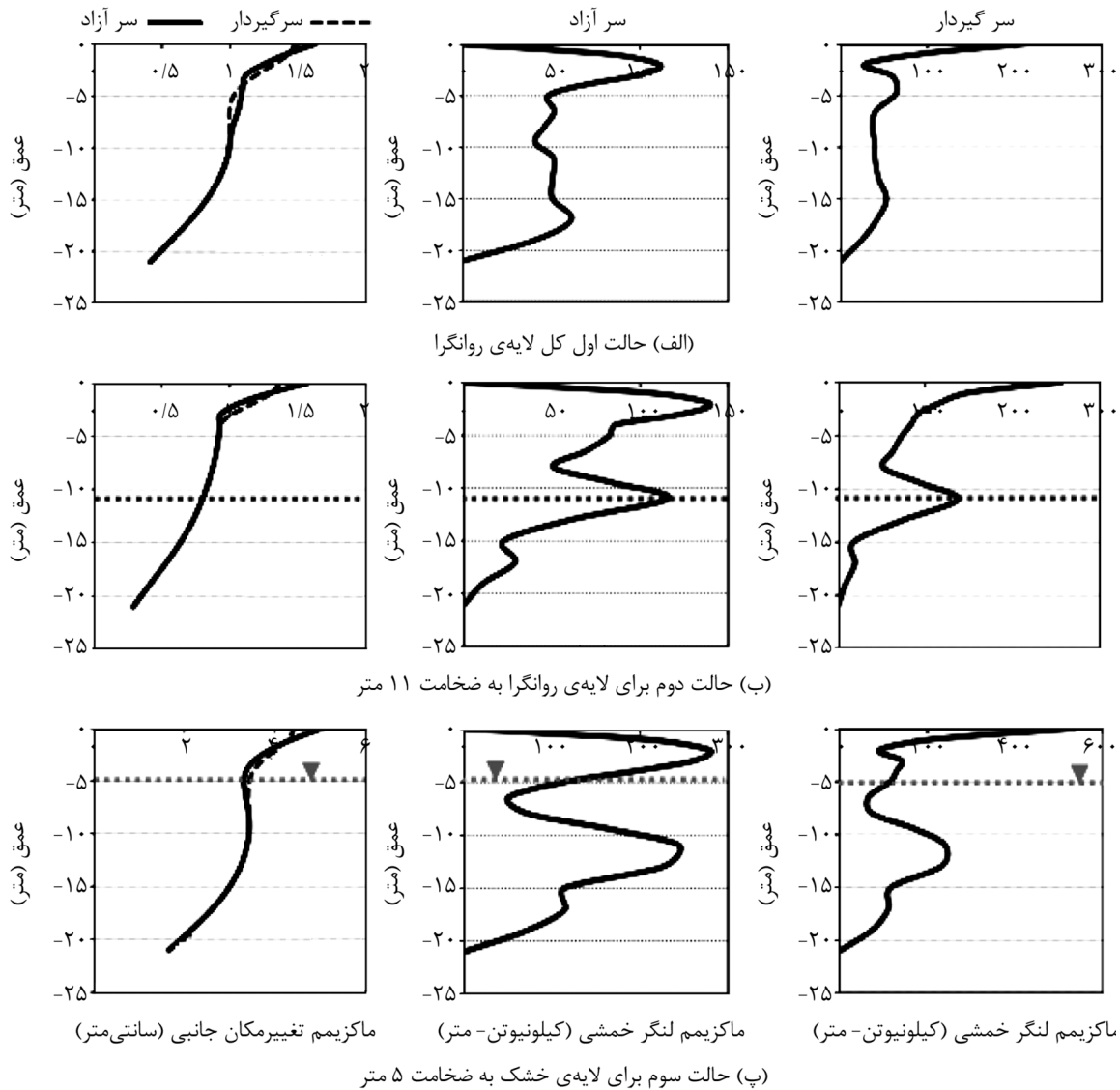
شکل (7): پروفیل خاک مورد مطالعه ( $Dr$  = چگالی نسبی).

## 6 - واکنش شمع برای مدل‌های مطالعاتی مختلف

### 6-1 - واکنش شمع برای مدل مطالعاتی پاک و رحمانی

[26]

این تحلیل برای شمع‌هایی با طول 15، 25 و 40 برابر عرض شمع، توسط پاک و رحمانی تکرار شد، در رابطه با این نتایج می‌توان چندین برداشت کرد که اولاً در مورد حالت اول لنگر خمشی حداکثر در عمق 2 متری برای شمع‌های بدون



شکل (8): بیشینه تغییر مکان جانبی و بیشینه لنگر خمشی برای شمع با سر آزاد و گیردار در برابر چرخش [26].

هنگامی است که سر شمع نسبت به چرخش مهار شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هنگام طراحی یا ارزیابی پی‌های شمعی در خاک‌های بالقوه روانگرا برای بارگذاری زلزله مهم است که یک بررسی مبتنی بر واقعیت از مهارشده‌گی سر شمع در برابر چرخش داشته و نیز از وجود لنگرهای بزرگ‌تر در سطح مشترک میان لایه‌های نرم و سخت آگاه باشیم. در برخی سایت‌ها ممکن است یک لایه‌ی ضخیم از خاک غیر روانگرا بر روی ناحیه‌ی دچار روانگرایی وجود داشته باشد. یک لایه‌ی رویی سخت در سایت مورد مطالعه استفاده شده است. لنگر برای این مورد در لحظه‌ی تغییر مکان حداکثر سر شمع در شکل (10) نشان داده

پس هنگامی که روانگرایی خاک برای حرکت به وجود آمده در سایت را لحاظ می‌کنیم، مقطع شمع 60 سانتی‌متر به نظر نامناسب می‌آید.

### 3-6- واکنش شمع برای مدل مطالعاتی لیام فین بر پایه‌ی مطالعات ایشی‌هارا [40-41]

جابه‌جایی‌ها هنگامی که سر شمع در برابر چرخش آزاد است بیشتر از دو برابر می‌شوند. لنگر حداکثر زمانی در سر شمع رخ می‌دهد که سر شمع در برابر چرخش مهار شده است، لنگر حداکثر در مرز میان خاک‌های سخت‌تر و نرم‌تر رخ می‌دهد. این لنگر تقریباً برابر با لنگر سر شمع در

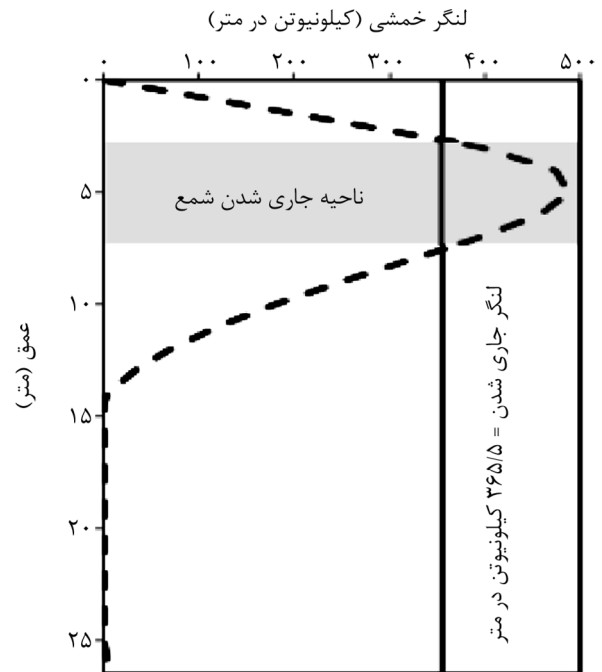
لنگرها در سر شمع و در سطح مشترک میان لایه‌های خاک نرم و سخت 30% در مقایسه با موردی که لایه‌ی بالایی سخت وجود ندارد افزایش یافته است.

#### 6-4- واکنش شمع برای مدل مطالعاتی مورد استفاده در این تحقیق

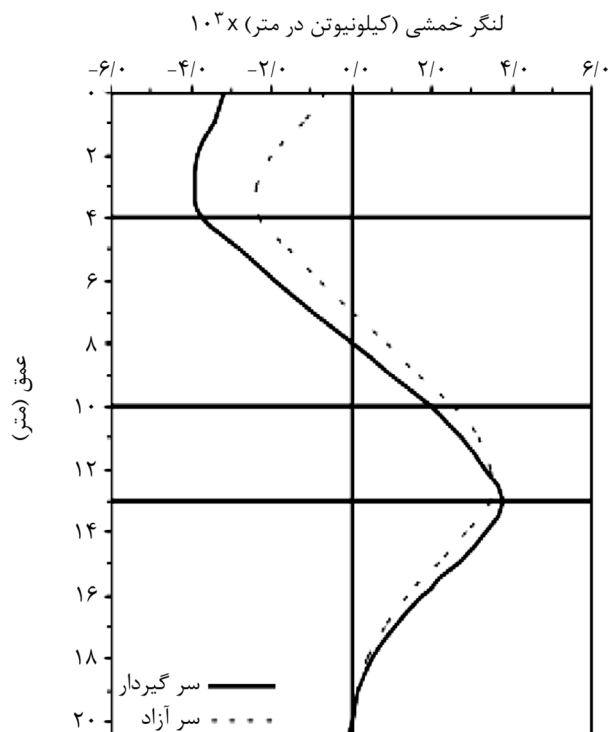
در این تحقیق از تحلیل بار افزون استاتیکی غیر خطی به دو دلیل استفاده شده است. اول آنکه گستره‌ای از نتایج با سرعت زیادی در دسترس خواهند بود و دوم استفاده‌ی فراگیر این تحلیل در عملیات طراحی رو سازه و زیر سازه است. در تمامی تحقیق‌های اشاره شده در این مقاله جهت نمایش و تعریف خصوصیات آسیب‌پذیری شمع در زیر سطح زمین از نمایش توزیع لنگر خمشی استفاده شده است. در همین راستا در تحقیق پیش رو سعی شده است تغییرات لنگر خمشی و همچنین تغییرات لنگر خمشی در برابر نیروی محوری با توجه به روانگرایی لایه‌ای از پروفیل خاک موجود، جهت تعیین محل مفاصل پلاستیک و در نهایت طراحی قابل اعتماد شمع مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

می‌دانیم هنگامی که نیروی محوری از بار بحرانی کمانش شمع ( $P_{cr}$ ) بیشتر شود خیز سر شمع و لنگر خمشی حداکثر در شمع بزرگ‌تر می‌شود. همچنین در حین رخداد روانگرایی همچنان که خاک سختی خود را از دست می‌دهد بار الاستیک کمانشی ( $P_{cr}$ ) کاهش می‌یابد. اگر یک بار ثابت محوری را بر روی شمع فرض کنیم، با کوچک شدن  $P_{cr}$ ، نسبت  $P/P_{cr}$  افزایش خواهد یافت؛ بنابراین با افزوده شدن این نسبت خیز سر شمع و لنگر خمشی هم افزایش خواهند یافت. زمانی که نسبت مذکور به یک نزدیک شود ضریب بزرگنمایی لنگر خمشی بزرگ می‌شود و این امر باعث پایین آمدن ظرفیت لنگر پلاستیک در مقابل بار جانبی می‌شود و ناگهان تغییر مکان سر شمع بدون هیچ‌گونه افزایش باری بیشتر می‌شود. این مشخصه اهمیت در نظر گرفتن بار محوری در طراحی شمع را نشان می‌دهد.

شده است؛ مانند موارد قبلی نتایج برای دو حالت سر شمع از جمله حالت ثابت بودن سر شمع و آزاد بودن آن در برابر چرخش نشان داده شده است. لایه‌ی بالایی سخت باعث افزایش لنگر خمشی بر شمع در هنگام تحریک زلزله می‌شود.



شکل (9): توزیع لنگر خمشی در ارتفاع شمع [34].



شکل (10): توزیع لنگر خمشی در تغییر مکان حداکثر شمع [41].

در شکل (11-ب) توزیع لنگر خمشی به همراه عمق شمع حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی نمایش داده شده است. می توان مشاهده کرد که لنگر موجود در مقطع شمع با سر آزاد در اعماق حدود  $+0/5$  تا  $-7/2$  بیشتر از ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع و برای شمع با شرایط گیرداری در سر شمع در ارتفاع  $+1$  نزدیک به لنگر پلاستیک می باشد؛ بنابراین برای بحرانی ترین شمع پل مذکور، مقطع دایره ای با قطر یک متر زمانی که تحت تحریک زلزله روانگرایی مطلق داریم مناسب نیست.

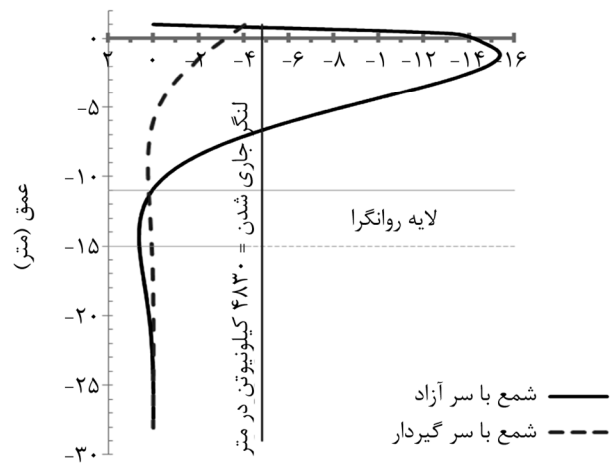
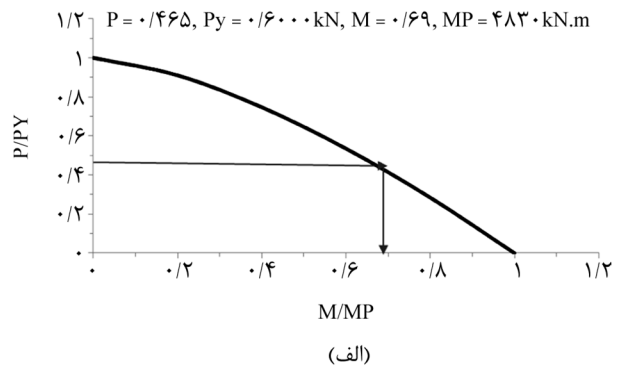
### 7 - واکنش خاک در مدل های مطالعاتی مختلف

#### 7-1 - مدل مطالعاتی پاک و رحمانی [26]

برای بررسی تأثیر پی های شمعی بر روی واکنش خاک اطراف، نتایج نشان می دهد تاریخچه زمانی فشار منفذی آب که در نزدیکی شمع محاسبه شده با مواردی که در سایت محاسبه شده متفاوتند. درحالی که پس از تحریک (برای 10 تا 20 ثانیه)، تاریخچه های زمانی بسیار به هم شبیه می شوند. همچنین تفاوت میان تاریخچه های زمانی در اعماق بسیار دورتر از سر شمع (برای مثال، عمق 15 متر) در هر دو محل کاهش می یابد. به نظر می رسد واکنش دینامیکی سازه ی فوقانی مسئول رفتار مشاهده شده باشد. به علاوه تغییر مکان جانبی خاک اطراف شمع با تغییر مکان جانبی خاک در سایت قبل از روانگرایی زمین مقایسه شده است. نتایج در شکل (12) برای موارد اول و دوم آمده است (نتایج به دست آمده برای مورد اول همانند نتایج به دست آمده برای مورد دوم می باشد).

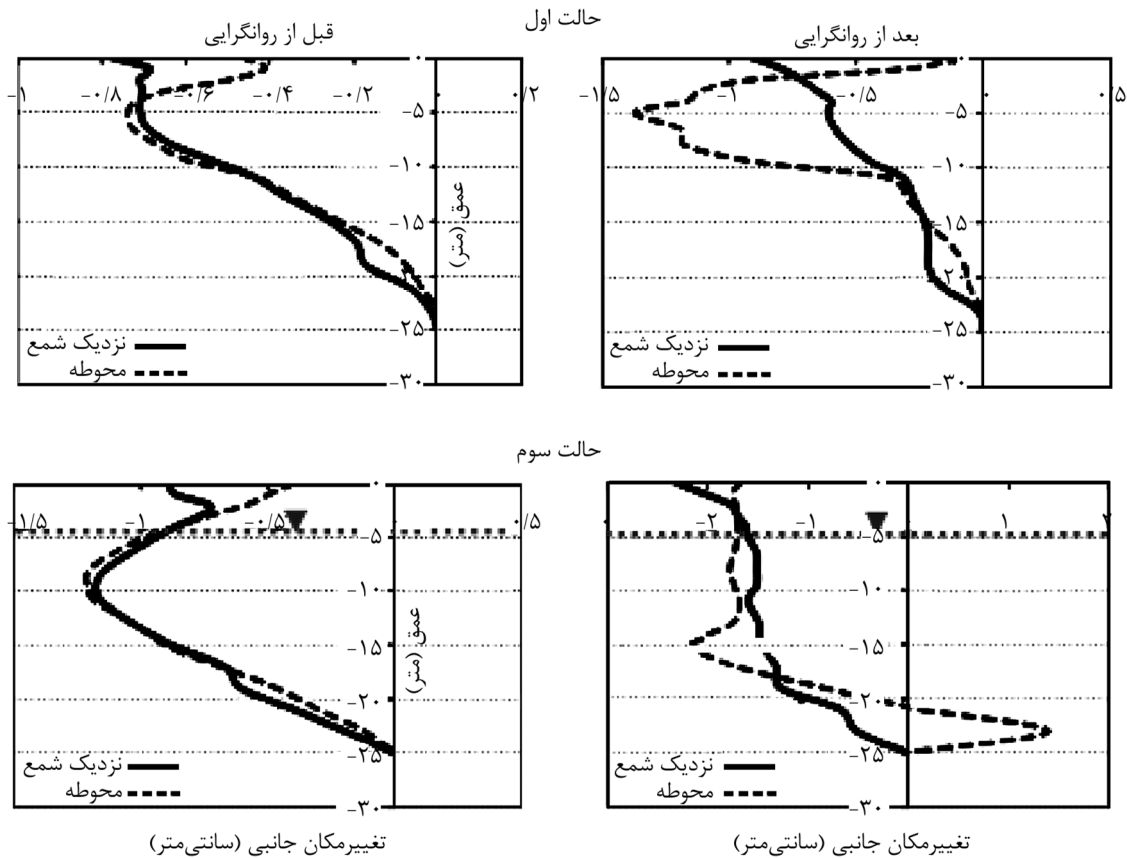
مشاهده شد که توسعه ی تغییر مکان جانبی خاک نزدیک شمع و خاک موجود در سایت یک روند مشابه را قبل از اینکه زمین روانگرا شود دارند، درحالی که تفاوت فاحشی میان تغییر مکان جانبی خاک اطراف شمع و خاک سایت پس از وقوع روانگرایی وجود دارد. بر این اساس به نظر می رسد که واکنش دینامیکی شمع به طور کامل با واکنش دینامیکی خاک پس از روانگرایی تفاوت دارد.

در این تحقیق بار کمانشی اولیبر برای بحرانی ترین شمع پل بردستان محاسبه شده و در نتیجه نسبت بار عمودی به بار بحرانی  $(P/P_{cr})$  برابر  $0/034$  حاصل شده است که خوشبختانه نزدیک به یک نیست. همچنین جهت بررسی مقدار لنگر پلاستیک تحت اثر ترکیب تلاش های داخلی از رابطه ی هیمان [43] استفاده شده است که به صورت  $\left(\frac{P}{P_y}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_p}\right) = 1$  تعریف می شود  $(P_y$  برابر با بار فشاری فروریختگی در غیاب خمش و  $M_p$  برابر با ظرفیت لنگر پلاستیک در غیاب نیروی محوری می باشد). شکل (11-الف) گراف مربوط به معادله ی هیمان [43] می باشد که اغلب به عنوان سطح تسلیم برای مفصل پلاستیک تحت اثر همزمان فشار و لنگر بیان می شود و نقاط درون سطح تسلیم حاکی از عدم عبور مقدار تنش از تنش تسلیم می باشد.



لنگر (کیلونیوتن در متر)  $\times 10^3$   
(ب)

شکل (11): الف) سطح جاری شده برای بحرانی ترین شمع تحت فشار و خمش بر اساس معادله ی هیمان [43]. ب) توزیع لنگر خمشی در عمق شمع (حاصل از تحلیل غیر پیوسته).



شکل (12): مقایسه‌ی تغییر مکان جانبی خاک نزدیک شمع و خاک سایت در قبل و بعد از روانگرایی برای حالت‌های اول و سوم [26].

اینرسی با برداشتن جرم سازه‌ی فوقانی انجام شده‌اند. نتایج جابه‌جایی‌های شمع و زمین محوطه برای موردی که در آن لایه‌ای با سطح سخت وجود دارد در شکل (13) نشان داده شده است. مشخص است که لایه با سطح سخت همانند یک بدنه‌ی صلب در زمان جابه‌جایی حداکثر سر شمع که پس از رخ دادن روانگرایی پیش می‌آید در حرکت است. همچنین به نظر می‌رسد لایه‌ی مذکور، شمع را به جلو می‌راند، طوری که شمع و لایه‌ی سطحی به اندازه‌ی یکسانی دچار جابه‌جایی می‌شوند. متعاقباً هنگامی که لایه‌ی سخت سطحی موجود است لنگرهای اینرسی سر شمع در شکل (14) نشان می‌دهد که لنگرها در حالت تحلیل بدون سازه‌ی فوقانی کمی بیشتر از تحلیل با سازه‌ی فوقانی هستند.

این موضوع نشان می‌دهد که در این مورد لنگرهای اینرسی (بدون سازه‌ی فوقانی) بر واکنش لنگر پی غالب‌اند. به‌وضوح روشن است که عدم لحاظ کردن تأثیرات اینرسی می‌تواند در برآورد تلاش‌های برشی و خمشی جهت طراحی پی تأثیر منفی بگذارد.

## 2-7 - مدل مطالعاتی سرکار و همکاران [34]

نسبت فشار منفذی آب در اعماق متفاوت از زمین جهت بررسی میزان روانگرایی در طول عمق شمع محاسبه شده است و اوج دامنه‌ی تحریک زلزله با توجه به رکورد اعمال شده به سایت در زمان 40 ثانیه مشاهده شد و در این زمان نسبت فشار آب منفذی در عمق 7/5 متری به 1 می‌رسد. این بدان معناست که خاک با اعمال تاریخچه زمانی تا عمق 7/5 متر کاملاً روانگرا شده است. تغییر مکان همیشه سر شمع در مرحله‌ی پس از رخداد روانگرایی در حدود 2/5 میلی‌متر مشاهده شد.

## 3-7 - مدل مطالعاتی لیام فین بر پایه‌ی مطالعات

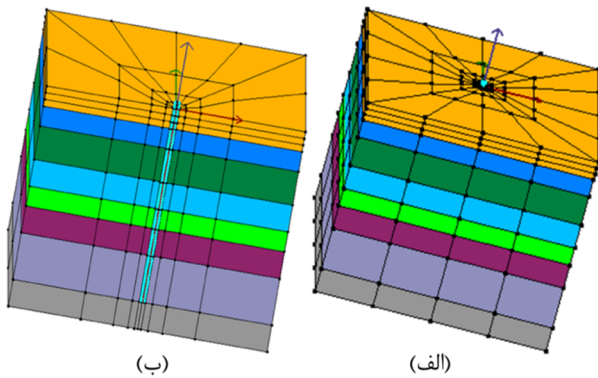
ایشی‌هارا [40-41]

تحلیل‌های اینرسی در شمعی با قطر 1/5 متر برای ارزیابی اهمیت اندرکنش اینرسی انجام شده است. تحلیل‌ها با و بدون لایه‌ی سطحی سخت با گیرداری در برابر چرخش و بدون گیرداری در برابر چرخش انجام شده است. تحلیل‌های

مدلی هستیم که توان درک رفتار غیرخطی خاک، محاسبه فشار سیال ناشی از تحریک زلزله و اندرکنش میان شمع و خاک اطراف را داشته باشد.

در همین راستا جهت مدل سازی روانگرایی در بازه زمانی، مطابق با مدل های مورد استفاده ی سایر محققین در این مقاله، می توان از یک مدل اجزای محدود سه بعدی پیوسته که قادر به شبیه سازی رفتار خاک در هنگام رخداد روانگرایی را داشته باشد کمک گرفت.

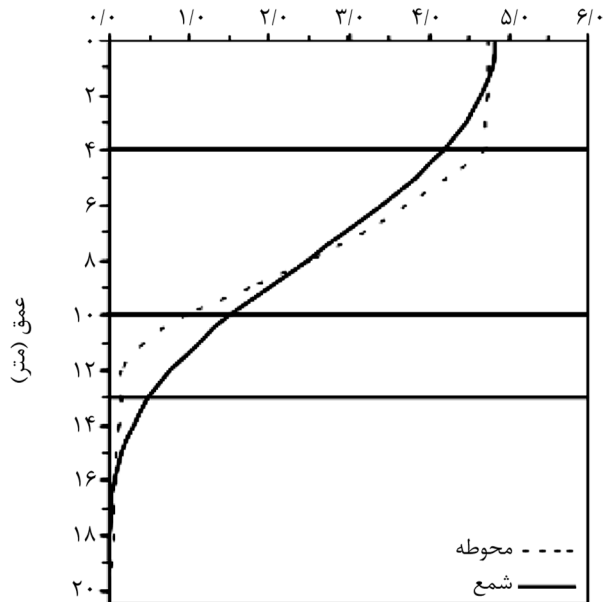
در این قسمت به جهت حساسیت موضوع، مطالبی که در ارتباط با مدل سازی در بالا اشاره شد و همچنین عدم قابلیت اطمینان منحنی های  $p-y$  بکار رفته در تحلیل استاتیکی غیر خطی و دینامیکی با نرم افزار SAP2000، از مدل سه بعدی پیوسته با کمک نرم افزار OpenSees مطابق شکل (15) استفاده شد. ارتفاع و قطر شمع پل مورد بررسی به ترتیب 30 و 1 متر در شکل (15-ب) قابل مشاهده است؛ همچنین طول، عرض و ارتفاع مدل پیوسته ی سه بعدی شکل (15-الف) به ترتیب برابر با 30، 30 و 33 متر می باشد.



شکل (15): (الف) مدل اجزای محدود سه بعدی پیوسته برای شمع تکی. (ب) نمای سه بعدی شمع در میان لایه های خاک (نیم فضا).

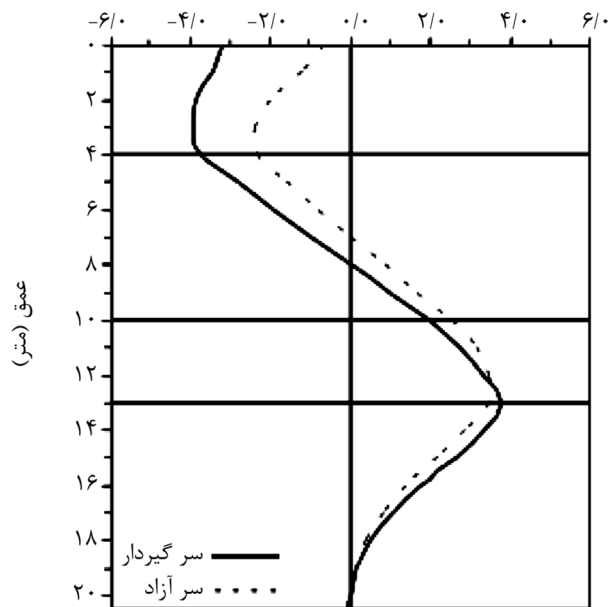
بسیاری از ویژگی های مدل سازی اجزای محدود در تحقیق سرکار و همکاران [34] قابل مشاهده است. در ادامه ی تحلیل استاتیکی غیر خطی برای سایت پروژه ی پل بردستان انجام و واکنش سیستم خاک-شمع محاسبه شده است. پس از تحلیل بار افزون مشاهده شد بیشترین شتاب خاک مربوط به عمق

تغییر مکان جانبی (سانتی متر)



شکل (13): تغییر مکان شمع و زمین محوطه در بیشترین جابه جایی سر شمع [41].

لنگر خمشی (کیلو نیوتن در متر)  $10^3 \times$

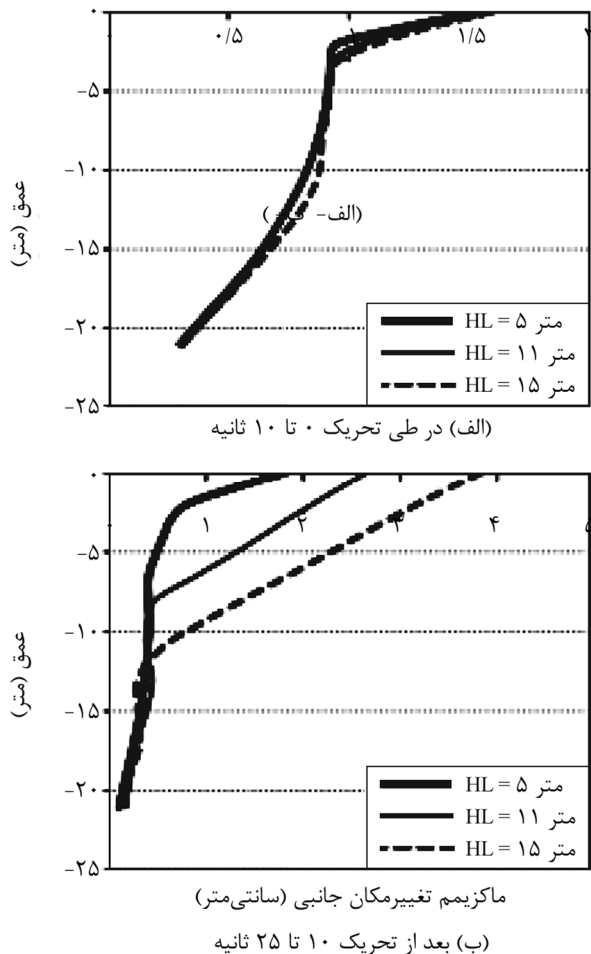


شکل (14): لنگر اینرسی در تغییر مکان بیشینه سر شمع [41].

#### 4-7 - مدل مطالعاتی مورد استفاده در این تحقیق

از آنجاکه رفتار دینامیکی شمع مثل تغییر در لنگر، نیروی برشی، پیرو و میرایی بستگی به زمان لازم جهت رسیدن به روانگرایی دارد، با توجه به متغیر بودن این زمان، نسبت به تحریک زلزله و ویژگی های مختلف خاک، نیازمند

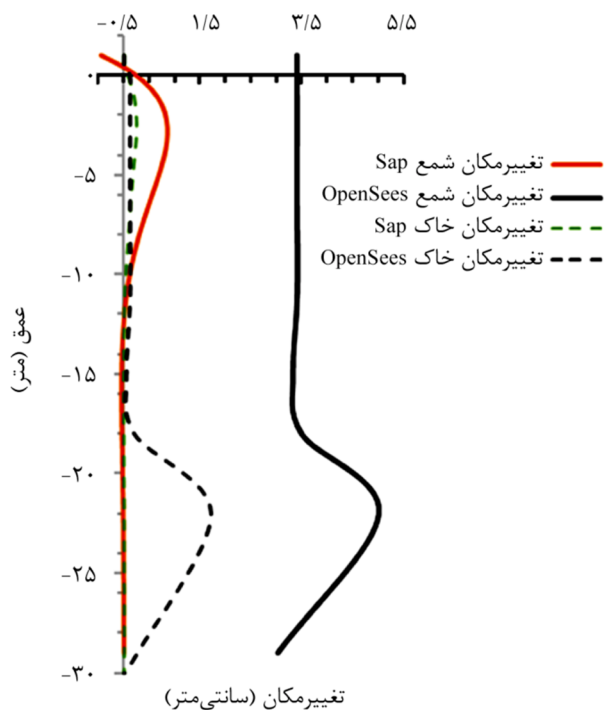
تحلیل مکرر ضخامت لایه‌های روانگرا (HL) در اعماق 5، 11 و 15 متری برای شمعی به طول 40 برابر عرض مقطع (معادل 21 متر) پرداخته شده است. این پارامتر فقط برای حالت دوم بررسی شده است. شکل (17) تغییر مکان جانبی حداکثر را برای ضخامت‌های متفاوت لایه‌های روانگرا نشان می‌دهد.



شکل (17): تغییرات بیشینه تغییر مکان جانبی بر ضخامت‌های مختلف لایه‌های روانگرا در حالت 2 [26].

در ادامه این نتیجه حاصل شد که ضخامت لایه‌های خاک روانگرا تأثیر اندکی بر تغییر مکان جانبی حداکثر شمعی در زمان رخ دادن تحریک (از 0 تا 10 ثانیه) دارد در حالی که تغییرات چشمگیری پس از بازه ی تحریک (از 10 تا 25 ثانیه) مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده دو برابر شدن ضخامت لایه‌ی روانگرا منجر به دو برابر شدن تغییر مکان جانبی شمعی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد

18- و مقدار نسبت فشار آب منفذی اضافی در عمق 11- تا 16- به بیش از عدد 1 می‌رسد و این بدان معناست که در اعماق مذکور خاک کاملاً روانگرا شده است. در نتیجه تحت این شرایط به بررسی تغییر مکان شمعی و خاک اطراف شمعی (مرز شمعی با خاک محوطه) با استفاده از خروجی نرم‌افزار SAP2000 و OpenSees، تحت شرایط گیرداری کامل در سر شمعی پرداخته شده است و نتایج در شکل (16) قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر مکان شمعی و خاک اطراف شمعی از تحلیل SAP2000 با تحلیل محیط پیوسته OpenSees با هم متفاوت می‌باشد و همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه هر دو تغییر مکان از هر دو روش تحلیل در ناحیه‌ای غیر از ناحیه‌ی روانگرایی پروفیل خاک رخ داده است.



شکل (16): تغییر مکان شمعی و خاک اطراف شمعی برای هر دو مدل تحلیلی (پیوسته و غیر پیوسته).

### 8 - تأثیر ضخامت لایه‌ی خاک روانگرا بر عملکرد شمعی

در این قسمت به دلیل کامل نبودن نتایج و عدم تمرکز دیگر مطالعات بر روی این پارامتر، فقط به بررسی تحقیقات پاک و رحمانی [26] پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از

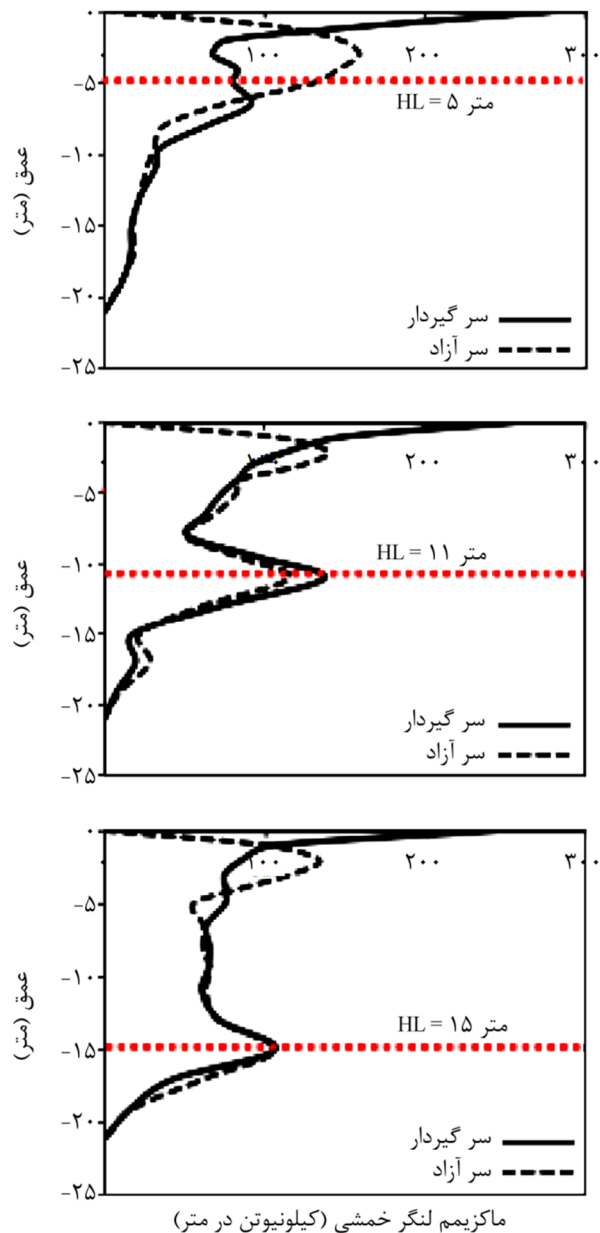
لنگر خمشی حداکثر در سطح مشترک لایه‌ی روانگرا و غیر روانگرا مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد هنگامی که ضخامت 5 متر است اختلاف 40% میان مقدار به‌دست‌آمده برای سر شمع آزاد و مقدار به‌دست‌آمده برای سر شمع ثابت وجود دارد؛ اگرچه برای ضخامت 11 متر و 15 متر اختلاف به‌ترتیب در حدود 14% و 0% است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد هنگامی که ضخامت لایه‌ی روانگرا از یک‌چهارم طول شمع بیشتر می‌شود لنگر خمشی در سطح مشترک، به شرایط مرزی در سر شمع بستگی ندارد. شایان ذکر است که لیاناپاتیرانا و پولوس [17] این نتیجه‌گیری را برای ضخامت یک‌سوم کل توده خاک با استفاده از مدل وینکلر گزارش کردند.

### 9 - نتیجه‌گیری

در روند تحلیل پل بردستان واقع در استان بوشهر نویسندگان این مقاله با چالش رفتار شمع‌های پل درون یک لایه خاک روانگرا مواجه شدند؛ از این‌رو این مقاله به دنبال آن است که درک بهتری از عملکرد پی‌های شمعی قرار گرفته در توده خاک‌های با قابلیت روانگرایی ارائه کند. بدین‌منظور به بررسی چندین مدل دقیق عددی شمع در خاک‌های روانگرا توسط سایر محققین و دو مدل تحلیلی توسط نویسندگان مقاله بر مبنای محیط پیوسته (با مدل‌سازی مستقیم خاک) و محیط غیر پیوسته پرداخته شده است. مطالعه‌ی پارامتریک برای پروفیل‌های متفاوت خاک در غالب چهار مطالعه‌ی جداگانه انجام شد. برای هر پروفیل تأثیر طول شمع، ثابت سر شمع و ضخامت لایه‌ی روانگرا بر عملکرد شمع بررسی شده است. خلاصه‌ای از نتایج و یافته‌های هر چهار مدل مطالعاتی در زیر آورده شده است.

برای هر چهار تحقیق انجام گرفته لنگر بیشینه برای شمع‌هایی با شرایط گیرداری در سر شمع و مدفون در پروفیل خاک بدون لایه‌ی روانگرا، در سر شمع و برای شمع‌های فاقد گیرداری در سر شمع، لنگر بیشینه تقریباً در

پس از بازه‌ی تحریک، شمع‌ها به‌شدت تحت کنترل خاک روانگرا شده‌ای هستند که آنها را احاطه کرده، در نتیجه لایه‌ی خاک روانگرای ضخیم‌تر به شکل قابل‌توجهی تغییر مکان جانبی را که می‌تواند در شیوه‌های طراحی بر اساس عملکرد پر اهمیت باشد تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل (18) پوش لنگر خمشی حداکثر شمع سر ثابت و آزاد برای لایه‌های روانگرا (HL) با ضخامت‌های 5، 11 و 15 متر برای شمعی به طول 21 متر را نشان می‌دهد.



شکل (18): پوش لنگر خمشی برای طول 40 برابر عرض شمع با سر شمع ثابت و آزاد در حالت 2 (B عرض شمع است) [26].



حل چالش رفتار شمع‌های پیل بردستان یا پروژه‌های مشابه در خاک‌های روانگرا راهکار مدل‌سازی پیوسته مناسب‌تر به نظر می‌رسد؛ بنابراین جهت طراحی ایمن، مطالعه و تحقیق با مدل‌های پیشرفته‌تر پلاستیسیته خاک و شمع در هنگام تحریک زلزله با تکیه بر شرایط روانگرایی پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

1. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 348-422.
2. Mazzoni, S., McKenna, F., and Fenves Gregory, L. (1999) *Open System for Earthquake Engineering Simulation User Manual*. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, <http://OpenSees.berkeley.edu>.
3. SAP 2000: V10.1. *Integrated Software for Structural Analysis and Design*. Computer and Structures Inc (CSI), Berkeley, California, USA, August 2004.
4. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, MH., and Fenves, GL. (2010) *Open System for Engineering Simulation User-Command-Language Manual*. version 2.0. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California.
5. Hamada, M. (1992) 'Large ground deformation and their effects on lifelines: 1983 Nihokai-Chubu earthquake'. In: Hamada M, O'Rourke T, editors. *Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance during Past Earthquake, (I): Japanese Case Studies*. 4-1, 4-85 [Chapter 4].
6. Mori, S., Namuta, A., and Miwa, S. (1994) Feature of liquefaction damage during the 1993 Hokkaido Nanseioki earthquake. In: *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Conference of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1005-1008.
7. Tachikawa, H., Fujii, S., Onishi, K., Suzuki, Y., Isemoto, N., and Shirahama, M. (1998) Investigation and analysis of pile foundation located on Kobe Port Island. In: *Proceedings of*

فاصله‌ی 2 متری از بالای شمع رخ می‌دهد. مشخص شد زمانی که لایه یا توده‌ای از پروفیل خاک دچار روانگرایی می‌شود محل لنگر بیشینه می‌تواند در قسمت روانگرا، مرز لایه‌ی روانگرا و لایه‌ی سخت یا درون لایه‌ی سخت متغیر باشد. همچنین نشان داده شد ضخامت لایه‌ی روانگرا در مورد ذکر شده می‌تواند تأثیرگذار باشد.

در این مقاله تحلیل انجام شده بر اساس محیط غیر پیوسته (مدل SAP) و محیط پیوسته (مدل OpenSees) نشان داد محل تغییر مکان جانبی بیشینه شمع و خاک مجاور شمع، برای هر دو تحلیل متفاوت و در نواحی غیر از ناحیه‌ی روانگرا رخ می‌دهد. همچنین با توجه به نمودار لنگر خمشی مشخص شد جهت لنگر خمشی شمع در لایه‌ی روانگرا تغییر کرده و نقطه‌ی عطف در لایه‌ی روانگرا به وجود خواهد آمد. برای تمامی حالات نشان داده شده، طول شمع و ضخامت لایه‌ی روانگرا تأثیر اندکی بر تغییر مکان جانبی حداکثر در حین تحریک زلزله دارد، اگرچه هنگامی که تحریک ورودی تمام می‌شود تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در مقادیر حداکثر در تغییر مکان‌های جانبی برای طول‌های متفاوت شمع وجود دارد. همین‌طور نشان داده شد که طول شمع هیچ تأثیری بر مکان لنگر خمشی حداکثر ندارد.

هنگامی که چرخش سر شمع در همه‌ی جهات مهار می‌شود تغییر مکان جانبی حداکثر شمع قرار گرفته شده در لایه‌های خاک خشک در مقایسه با لایه‌های خاک اشباع روانگرا بسیار بیشتر کاهش می‌یابد؛ اما لنگر خمشی حداکثر در خاک‌های اشباع به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی نتیجه می‌گیریم که در زمین روانگرا مهار سر شمع منجر به به‌وجود آمدن لنگر خمشی بزرگ‌تر در سر شمع می‌شود اگرچه باعث کاهش تغییر مکان جانبی شمع می‌شود. در تمامی مدل‌های تحلیلی پارامتری که به آن اشاره نشده مقدار عددی دقیق ضریب ترک‌خوردگی شمع بتنی در هنگام تحریک زلزله برای محاسبه‌ی ممان اینرسی مؤثر و ثابت پیچشی مؤثر است. با توجه به نتایج حاصل‌شده جهت

17. Liyanapathirana, D.S. and Poulos, HG. (2005) Seismic lateral response of piles in liquefying soil. *Journal of Geotech. Geoenviron Eng.*, (1311), 1466-1479.
18. Liyanapathirana, D.S. and Poulos, H.G. (2009) Analysis of pile behaviour in liquefying sloping ground. *Journal of Comput Geotech*, **37**, 115-124.
19. Chang, D.W., Lin, B.S., and Cheng, SH. (2007) Dynamic pile behaviors affecting by liquefaction from EQWEAP analysis. *4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki Greece, 1336.
20. Finn, W.D.L. and Fujita, N. (2002) Pile in liquefiable soils: seismic analysis and design issues. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **22**, 731-742.
21. Klar, A., Baker, R., and Frydman, S. (2004) Seismic soil-pile interaction in liquefiable soil. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **24**, 551-564.
22. Oka, F., Lu, CW., Uzuoka, R., and Zhang, F. (2004) Numerical study of structure-soil-group pile foundations using an effective stress based liquefaction analysis method. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Canada: Vancouver, 3338.
23. Uzuoka, R., Sento, N., and Kazama, M. (2007) Three-dimensional numerical simulation of earthquake damage to group-piles in a liquefied ground. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **27**, 395-413.
24. Cheng, Zh. and Jeremic, B. (2009) Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **29**, 1404-1416.
25. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T. (1984) Dynamic behavior of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution. *Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **8**, 71-96.
26. Pak, A. and Rahmani, A. (2012) Dynamic behavior of pile foundations under cyclic loading in liquefiable soils. *Journal of the 33<sup>rd</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, (1), 811-812.
8. Shamoto, Y., Sato, M., Futaki, M., and Shimazu, S. (1996) Site investigation of post liquefaction lateral displacement of pile foundation in reclaimed land. *Tsuchi to Kiso*, **44**(3), 25-27.
9. Onishi, K., Namba, S., Sento, N., Horii, K., Tatsumi, Y., and Oh-Oka, H. (1996) Investigation of failure and deformation modes of piles throughout overall length. *Tsuchi to Kiso*, **45**, 24-26.
10. Yao, S., Kobayashi, K., Yoshida, N., and Matsuo, H. (2004) Interactive behavior of soil-pile- superstructure system in transient state to liquefaction by means of large shake table tests. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **24**, 397-409.
11. Abdoun, T. and Dobry, R. (2002) Evaluation of pile foundation response to lateral spreading. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **22**, 1051-1058.
12. Suzuki, H., Tokimatsu, K., Sato, M., and Abe, A. (2005) Factor affecting horizontal subgrade reaction of piles during soil liquefaction and lateral spreading. *Journal of Geotechnical SP*, **145**, ASCE, 1-9.
13. Tamura, S., Tokimatsu, K. (2005) Seismic earth pressure acting on embedded footing based on large-scale shaking table tests. *Journal of Geotechnical SP*, **145**, ASCE, 83-95.
14. Han, J., Kim, S.R., Hwang, J.I., and Kim, M.M. (2007) Evaluation of the dynamic characteristics of soil-pile system in liquefiable ground by shaking table tests. *4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, 1340.
15. Cheng, Zh. and Jeremic, B. (2009) Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **29**, 1404-1416.
16. Miwa, S., Ikeda, T., and Sato, T. (2005) Damage process of pile foundation in liquefied ground during strong ground motion. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **26**, 325-336.

- of 4<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
38. Brandenberg, S.J. (2005) *Behaviour of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground*. Ph.D. Thesis, University of California at Davis, California, USA.
  39. Dash, SR., Bhattacharya, S., and Blakeborough, A. (2010) Bending-buckling interaction as a failure mechanism of piles in liquefiable soils. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **30**, 32-39.
  40. Ishihara, K. (1997) Terzaghi oration: geotechnical aspects of the 1995 Kobe earthquake. In: *Proceedings of ICSMFE*, Hamburg, 2047-2042.
  41. Liam Finn, W.D. (2015) An overview of the behavior of pile foundations in liquefiable and non-liquefiable soils during earthquake excitation. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **68**, 69-72.
  42. Kent, D.C. and Park, R. (1971) Flexural members with confined concrete. *Journal of Structural Division*, **97**(7), 1960-1990.
  43. Heyman, J. (1996) *Elements of the Theory of Structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
  - Computers and Geotechnics, **40**, 114-126.
  27. Dafalias, YF. And Manzari, MT. (2004) Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering Mec.*, **130**(6), 622-634.
  28. Shahir, H. (2009) *A Performance-Based Approach for Design of Ground Densification for Mitigation of Liquefaction*. Ph.D. Dissertation, Sharif University of Technology.
  29. Shahir, H. and Pak, A. (2009) Variation of permeability during liquefaction and its effects on seismic response of saturated sand deposits. *8<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering*, Shiraz, Iran.
  30. Polos, H.G. and Davis, E.H. (1980) *Pile Foundation Analysis and Design*. New York, NY: John Wiley and Sons [Chapters 8 and 15].
  31. Trochanis Aristonous, M., Bielak, J., and Christiano, P. (1991) Three-dimensional nonlinear study of piles. *Journal of Geotech Geoenviron Engineering*, **117**(3), 429-447.
  32. Kucukarsalan, S. (1999) *Linear and Non-Linear Soil-Pile-Structure Interaction under Static and Transient Impact Loading*. Ph.D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, 1999, 188-198 [Chapter 6].
  33. Wilson, D.W. (1998) *Soil Pile Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay*. Ph.D. Dissertation, University of California at Davis.
  34. Sarkar, R., Bhattaharya, S., and Maheshwari, B.K. (2014) Seismic requalification of pile foundations in liquefiable soils. *Journal of Indian Geotech*, **44**(2), 183-195.
  35. Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2005) Evaluating cyclic failure in silts and clays. *Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference*, Osaka, Japan.
  36. API (2003) *American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*.
  37. Meyerhof, G.G. (1957) Discussion on soil properties and their measurement. *Proceedings*