

# مدل سازی عددی رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در خاک‌های مستعد روانگرایی

علی اکبر گلشانی<sup>۱\*</sup>، روشن بیوک آقازاده<sup>۲</sup>، علی عسگری<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [به وسیله‌ی مجله تکمیل میشود]

تاریخ دریافت: [به وسیله‌ی مجله تکمیل میشود]

**چکیده** - در جریان زلزله‌های گذشته روانگرایی خاک و تغییر شکل‌های ناشی از آن، آسیب‌های گسترده‌ای را به پی‌های شمعی وارد آورده است. این آسیب‌ها بیشتر در مناطق ساحلی و یا زمین‌های شیب‌دار مشاهده شده است. بررسی مسئله روانگرایی برای گسترش بنادر شمالی و جنوبی و اجرای سازه‌های ساحلی و فراساحلی در کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در ناحیه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بالا و وجود خاک‌های مستعد روانگرایی در مناطق ساحلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به منظور شناخت جنبه‌های مختلف این پدیده صورت گرفته است، اما هنوز عدم بسیاری از قطعیت‌ها درباره تغییر شکل‌های جانبی خاک و آثار آن بر پی‌های عمیق وجود دارد. در این پژوهش سعی شده با استفاده از تحلیل سه‌بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان و به کارگیری مدل چندصفحه‌ای درآگر- پراگر برای خاک، رفتار گروه شمع‌های مختلف بررسی می‌شود. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار Opensees SP رفتار شمع تکی و گروه شمع (۲×۱، ۳×۱، ۲×۲ و ۳×۳) در پروفیل خاک دو لایه تحت نیروهای زلزله و فشار جانبی ناشی از گسترش جانبی خاک، تغییرات فشار آب حفره‌ای و فشار اندرکنشی میان شمع و خاک بررسی و تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بیشتر عوامل تأثیرگذار بر رفتار شمع و خاک در آیین‌نامه‌های طراحی موجود مانند آیین‌نامه راه ژاپن (Japanese Road Association) لحاظ نشده است و این موارد لزوم بازنگری روش‌های تحلیل و طراحی کنونی را آشکار می‌سازد. همچنین در گروه شمع نیروی جانبی وارد به هر شمع به موقعیت شمع در گروه بستگی دارد که این رفتار ناشی از آثار سایه و همسایگی (اندرکنش) در گروه شمع است.

**واژگان کلیدی:** روانگرایی، گروه شمع، تحلیل عددی همبسته، مدل رفتاری چندصفحه‌ای.

## ۱- مقدمه

این خرابی‌های زمانی که زمین از یک سو با شیب ملایم به جبهه آزاد آب منتهی می‌شود شدیدتر می‌شود. در پدیده گسترش جانبی، زمین‌های مستعد روانگرایی با از دست دادن مقاومت برشی، باعث جابه‌جایی جانبی توده خاک در جهت شیب می‌شود. این جابه‌جایی همراه با اعمال نیروهای برشی محرک نسبتاً بزرگ به پی‌های عمیق و سایر سازه‌های زیرزمینی بوده و موجب خرابی آن‌ها می‌شود. بررسی مسئله روانگرایی برای گسترش بنادر شمالی و جنوبی و اجرای سازه‌های ساحلی و فراساحلی در کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در ناحیه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بالا و وجود خاک مستعد روانگرایی در مناطق ساحلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برای مقابله با خطرات ناشی از روانگرایی راهکارهای مختلفی به وسیله‌ی پژوهشگران ارائه شده است. یکی از این راهکارها که امروزه به شکل وسیع در مناطق مستعد روانگرایی کاربرد دارد استفاده از پی‌های شمعی است. شمع‌ها با طول بیشتر از عمقی که روانگرایی رخ می‌دهد، می‌توانند تکیه‌گاه مطمئنی را فراهم آورند تا خطر جابه‌جایی و نشست‌های غیرقابل قبول ناشی از روانگرایی را کاهش دهند. خرابی سازه‌های متکی بر پی‌های عمیق در زمین‌های روانگرا شونده در بسیاری از زلزله‌های گذشته از جمله نیکاتا ۱۹۶۴، لوماپریتا ۱۹۸۹، منجیل ۱۹۹۰ و کوبه ۱۹۹۵ مشاهده شده است [۱].

هائری و همکاران (۲۰۱۲) [۱] با انجام آزمایش میز لرزان بر روی شمع‌های تکی و گروهی نشان دادند که روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در میدان آزاد و اطراف شمع متفاوت است، در حالت وجود شمع فشار آب حفره‌ای دیرتر به مقدار بیشینه می‌رسد و زودتر زایل می‌گردد. همچنین آن‌ها بیان کردند که فشار جانبی خاک بر روی شمع ناشی از گسترش جانبی خاک روانگرا است و مقدار آن به موقعیت شمع در خاک بستگی دارد.

## ۲- هدف و روش انجام پژوهش

در این پژوهش سعی شده با استفاده از تحلیل سه‌بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان رفتار گروه شمع‌های مختلف بررسی شود. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار Opensees SP رفتار شمع تکی و گروه شمع (۱×۲، ۱×۳، ۲×۲، ۳×۳) در پروفیل خاک دولایه تحت نیروی زلزله و فشار جانبی ناشی از گسترش جانبی ارزیابی شده است. همچنین تغییرات فشار آب حفره‌ای و فشار اندرکنشی میان شمع و خاک بررسی و تحلیل شده است.

## ۳- مراحل انجام پژوهش

شمع‌ها جز در موارد خاص، همیشه به صورت گروهی به کار می‌روند. اندرکنش پیچیده بین شمع‌ها در یک گروه از یک سو و اندرکنش بین شمع و خاک روانگرا از سوی دیگر موجب شده است که مدل‌سازی سیستم خاک و گروه شمع به صورت سه‌بعدی کار پیچیده‌ای باشد. در این پژوهش روش مدل‌سازی، روش تحلیل و پارامترهای خاک براساس مطالعات اولیه الجمال و همکاران است [۸] و [۹].

### ۳-۱- مدل‌سازی سیستم خاک و شمع

در این پژوهش دو لایه خاک هرکدام به ضخامت ۶ متر و از نوع ماسه نودا در نظر گرفته شده است. تراکم نسبی لایه اول ۴۰ درصد و لایه دوم ۸۵ درصد است. مدل رفتاری به کار رفته برای ماسه مدل رفتاری چند صفحه‌ای ارائه شده به وسیله‌ی پریوست (۱۹۸۵) [۱۰] است. این مدل رفتاری به وسیله‌ی یانگ و الجمال (۲۰۰۳) [۱۱] برای در نظر گرفتن اثر روانگرایی و اتساع خاک اصلاح شده است. پارامترها مورد استفاده در این مدل رفتاری برای ماسه نوادا در جدول (۱) ارائه شده است.

اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به منظور شناخت جنبه‌های مختلف این پدیده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف با استفاده از آزمایش‌های میز لرزان، سانتی‌فیوژ، مقیاس واقعی و تحلیل عددی صورت گرفته است، اما هنوز جنبه‌های مختلف رفتار شمع‌ها حین تغییر شکل‌های جانبی ناشی از روانگرایی به دلیل پیچیدگی به صورت کامل شناخته نشده است، به عنوان نمونه، روش مشخصی برای تعیین توزیع فشار ناشی از گسترش جانبی روی شمع‌ها وجود ندارد. در آیین‌نامه JRA (Japanese Road Association) توزیع فشار ناشی از گسترش جانبی به صورت مثلثی است و در هر عمق لایه روانگرا معادل ۳۰ درصد تنش کل در نظر گرفته می‌شود [۲]. در حالی که گزنالس و همکاران (۲۰۰۹) [۳] با انجام آزمایش سانتی‌فیوژ نشان دادند که فشار ناشی از روانگرایی در نزدیکی سطح زمین بیشتر است.

نتایج آزمایش سانتی‌فیوژ کیمورا و همکاران (۲۰۰۲) [۴] نشان می‌دهد که در زمین‌های شیب‌دار نیروی جانبی اعمالی به شمع‌های مختلف با حرکت به سمت پایین دست کاهش می‌یابد.

های و همکاران (۲۰۰۲) [۵] با انجام آزمایش سانتی‌فیوژ دریافتند، فشار وارد شده بر شمع‌ها بیش از ۳ برابر آیین‌نامه JRA است.

هی و همکاران (۲۰۰۵) [۶] با بهره‌گیری از آزمایش میز لرزان بزرگ مقیاس و مدل‌سازی عددی، رفتار لرزه‌ای شمع‌های تکی و گروهی را در خاک‌های روانگرا مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج برای خاک ماسه‌ای با ضخامت ۱/۷ تا ۵ متر نشان می‌دهد در صورتی که فشار جانبی یکنواخت در نظر گرفته شود، این فشار بین ۱۰ تا ۴۰ کیلوپاسکال است و در صورتی که فشار جانبی به صورت مثلثی در نظر گرفته شود فشار باید ۱/۱ برابر تنش کل خاک در آن عمق در نظر گرفته شود.

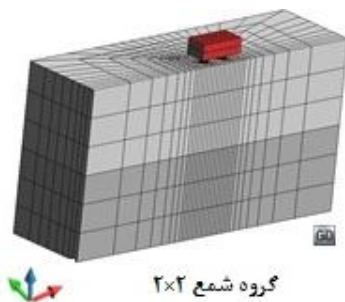
پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی معتمد و همکاران (۲۰۱۰) [۷] روی گروه شمع‌های ۳×۳، ۶×۶ و ۱۱×۱۱ نشان می‌دهد که به شمع‌های ردیف بالادست و پایین دست نیروی جانبی بیشتری نسبت به ردیف میانی وارد می‌شود؛ این رفتار ناشی از جابه‌جایی و سرعت خاک است. همچنین آن‌ها بیان کردند که نیروی وارد به شمع‌های میانی گروه شمع کمتر از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه (JRA 2002) است؛ در حالی که نیروهای وارد به شمع‌های بالادست و پایین دست به مراتب بیشتر از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه (JRA 2002) است.

برای گره‌های موجود در سطح زمین بسته شده است. بقیه مرزها کاملاً نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است.

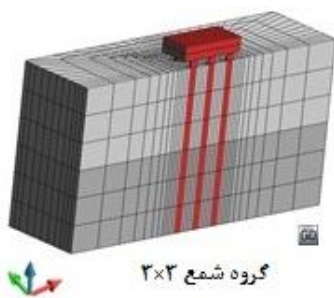
جدول (۱) مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی ماسه Nevada با تراکم‌های نسبی

۴۰ و ۸۵ درصد [۹ و ۱۱]

پارامتر	Dr 40%	Dr 85%
وزن مخصوص اشباع ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۱۹۰۰	۲۱۰۰
مدول برشی مرجع (MPa)	۷۸/۵	۱۳۰
ضریب نفوذ پذیری ( $\frac{m}{s}$ )	$6/6 \times 10^{-5}$	$6/6 \times 10^{-5}$
زاویه اصطکاک (درجه)	۳۱	۴۰
کرنش تسلیم روانگرایی ( $\gamma_r$ )	۱٪	۰٪
$C_1$ پارامتر ثابت	۰/۲۱	۰/۰۳
زاویه PT (درجه)	۲۶/۵	۲۶
$d_1$ پارامتر اتساع	۰/۴	۰/۸
$d_2$ پارامتر اتساع	۲	۵



گروه شمع ۲×۲



گروه شمع ۲×۲

شکل (۱) مش بندی گروه شمع ۲×۲ و ۳×۳

جدول (۲) مشخصات شمع

ماده	ارتفاع (m)	قطر (m)	$I (cm^4)$	$E (kPa)$
بتن	۱۲/۵	۰/۵	۳۰۶۶۴۰	۲۰۰۰۰۰۰۰

شبکه المان محدود به کار رفته شامل یک شبکه سه بعدی با المان‌های ۸ گرهی BrickUP برای مدل‌سازی خاک اطراف شمع است. براساس آنالیز حساسیت و آیین‌نامه‌های طراحی، شمع خاک اطراف خود را تا فاصله ۸ برابر قطر شمع نسبت به محور خود تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۲]. با توجه به این مطلب برای کاهش اثر مرزها روی پاسخ شمع در تمامی مدل‌ها طول مدل ۲۰/۶ متر و عرض آن ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱) چگونگی مش‌بندی برای گروه شمع ۲×۲ و ۳×۳ را نشان می‌دهد.

### ۲-۳- مدل‌سازی گروه شمع

در همه مدل‌ها مقطع شمع به صورت دایره‌ای و با قطر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. این قطر حد پایین برای شمع‌های توربین‌های بادی با توان بین ۵۰ تا ۱۵۰ کیلووات [۱۳] و حد متوسط برای سازه‌ها دیگر مانند ساختمان‌ها و اسکله‌ها است [۱۴].

در این پژوهش شمع‌ها از نوع اتکایی و با طول کلی ۱۲/۵ متر در نظر گرفته شده است که ۰/۵ متر آن در بالای سطح زمین قرار دارد. رفتار تمامی شمع‌ها در مرحله بارگذاری به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. مشابه چنین روندی در مطالعات الجمال [۸] و زانگ [۱۴] نیز استفاده شده است. در جدول (۲) مشخصات مکانیکی شمع ارائه شده است.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده به صورت زیر است:

۱- باتوجه به مقارن بودن مدل فقط نصف محیط، مدل‌سازی شده است (مطابق با شکل ۱).

۲- تغییر مکان مرزهای جانبی موازی با تحریک ورودی در جهت عمود بر جهت لرزش بسته است.

۳- برای مدل‌سازی جعبه انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> گره‌هایی موجود در اطراف مدل به جز صفحه تقارن در یک تراز مشخص، جابه‌جایی یکسانی در جهت‌های X و Z دارند.

۴- مرز پایینی ثابت و بدون تغییر مکان در نظر گرفته شده است و شتاب زلزله به نقاط مرز پایینی وارد می‌شود.

۵- شرایط زهکشی به صورتی است که فقط امکان زهکشی از سطح زمین وجود دارد. به این منظور درجه آزادی مربوط به فشار

<sup>۱</sup> Shear box

[۲۰].

برای تحلیل دینامیکی مدل چهار مرحله زیر در نظر گرفته شده است

[۲۱]:

**مرحله اول:** در این مرحله المان‌های خاک تحت بار ژئواستاتیکی

قرار داده می‌شود تا شرایط طبیعی زمین به وجود آید.

**مرحله دوم:** به منظور بررسی اثر پدیده گسترش جانبی در این

مرحله شیب مدل تعریف می‌شود. برای این کار توزیع بار

یکنواخت در جهت محور X به مدل اعمال می‌شود. در این

پژوهش برای بررسی پدیده گسترش جانبی شیب مدل بین ۰ تا ۶

درجه در نظر گرفته شده است. همچنین در انتهای این مرحله

رفتار مصالح خاک از حالت خطی به غیرخطی تبدیل می‌شود تا

امکان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به وجود آید.

**مرحله سوم:** در این مرحله المان‌های شمع در داخل محیط خاک

و المان‌های کلاهک در بالای سطح زمین تعریف می‌شود و با

اعمال بارهای استاتیکی آنالیز استاتیکی انجام می‌شود تا توزیع

تنش و تغییر مکان در خاک در حالت وجود شمع تعیین شود.

**مرحله چهارم:** در این مرحله کل مجموعه تحت بار دینامیکی

قرار می‌گیرد.

توجه شود، قبل از تحلیل دینامیکی برای به دست آوردن

فرکانس‌های طبیعی و پارامترهای میرایی برای سیستم تحلیل مودال

صورت گرفته است.

#### ۴- انتخاب شتاب نگاشت‌ها

در تحلیل تاریخچه زمانی کامل، از زلزله‌های ۱۹۸۹ لوماپریتا با

مقیاس ۰/۳g و فرکانس غالب ۱/۰۸ هرتز برای تحریک مدل‌ها

استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت در انتهای مدل و در جهت

طولی (در جهت شیب) اعمال شده است.

#### ۵- راستی آزمایی

برای نشان دادن درستی مدل عددی، آزمایش میز لرزان انجام شده به

وسیله‌ی معتمد [۷] مدلسازی شده است. در این پژوهش فقط نتایج

مربوط به آزمایش شماره ۵ به منظور ارزیابی نتایج مدل عددی به

کار گرفته شده است. گروه شمع مورد استفاده در این آزمایش شامل

۹ شمع با فاصله ۲/۸ برابر قطر شمع است. این شمع‌ها در انتهای

مدل به صورت گیردار و در بالای سطح زمین به صورت آزاد است.

برای در نظر گرفتن اثر سطح مقطع هر گره از گره‌های شمع به

گره‌های خاک اطراف متصل می‌شود. سختی این المان‌ها چندین

برابر المان‌های شمع (در حدود ۱۰۰۰۰ برابر) است. در این

مدلسازی جرم شمع به صورت جرم متمرکز در گره‌های المان

شمع قرار گرفته است. این روش مدلسازی در پژوهش‌های الجمال

و همکاران (۲۰۰۹) [۱۱]، چانگ و همکاران (۲۰۰۹) [۱۵] و

عسگری و همکاران (۲۰۱۳) [۱۶] استفاده شده است. در این

پژوهش کلاهک با استفاده از المان‌های حجمی StdBrick با سه

درجه آزادی انتقالی مدلسازی شده است. برای تعیین ابعاد کلاهک

گروه شمع از آیین‌نامه BS81810 [۱۷] استفاده شده است. رفتار

کلاهک در تمامی مراحل آنالیز به صورت الاستیک خطی است. در

جدول (۳) مشخصات مکانیک مصالح کلاهک ارائه شده است.

جدول (۳) مشخصات مصالح کلاهک

ماده	وزن مخصوص $\frac{ton}{m^3}$	ضخامت (متر)	ضریب پواسون	E (kPa)
بتن	۲/۴	۱/۱	۰/۲۵	۲۰۰۰۰۰۰

### ۳-۳- روش تحلیل

در این پژوهش خاک اشباع بر اساس نظریه بیوت [۱۸] به صورت

یک محیط دو فازه در نظر گرفته شده است. در این روش

تغییر شکل فاز جامد و جریان سیال به صورت همبسته است

همچنین برای مدل کردن رفتار محیط متخلخل اشباع از فرمولاسیون

u-P استفاده شده است که u جابه‌جایی خاک و P فشار سیال

است.

معادلات u-P بر اساس تعریف چن [۱۹] از دو معادله (۱) و (۲)

تشکیل شده است. معادله (۱) معادله مومتم برای کل المان و معادله

(۲) معادله تعادل جرم برای فاز سیال است.

$$M \ddot{U} + \int_V B^T \sigma^s dV - QP - f^s = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Q^T \dot{U} + HP + SP - f^{(p)} = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

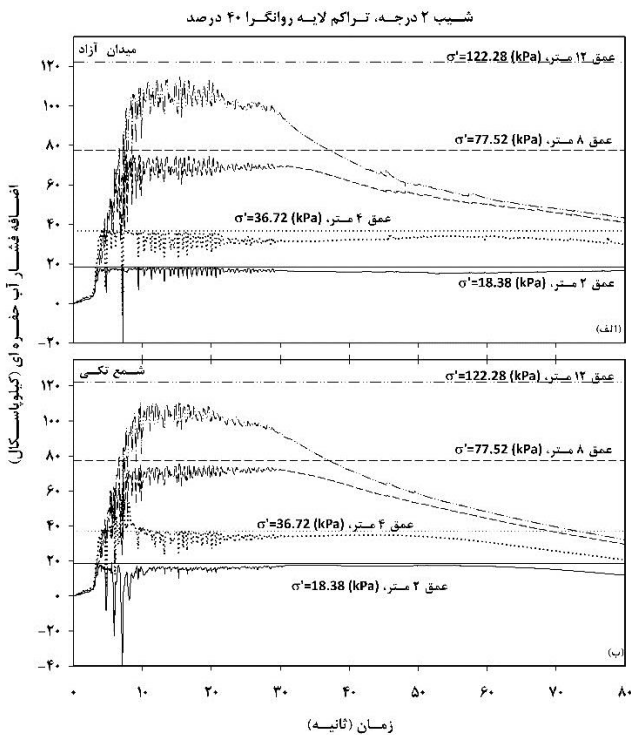
در رابطه (۱) و (۲)، M ماتریس جرم سیستم، B ماتریس کرنش-

جابه‌جایی، Q ماتریس همبستگی دو معادله، S ماتریس تراکم‌پذیری

و H ماتریس نفوذپذیری است. بردارهای  $f^s$  و  $f^p$  شامل تمام آثار

نیروهای حجمی و نیروهای سطحی تعریف شده در مرزها است

(حالت وجود شمع - حالت میدان آزاد) روانگرا می‌شود. همچنین با مقایسه روند تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای مشاهده می‌شود که در حالت وجود شمع زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد. در تفسیر این موضوع می‌توان گفت که در سیستم خاک- شمع عامل اتساع باعث کاهش فشار آب حفره‌ای می‌شود.



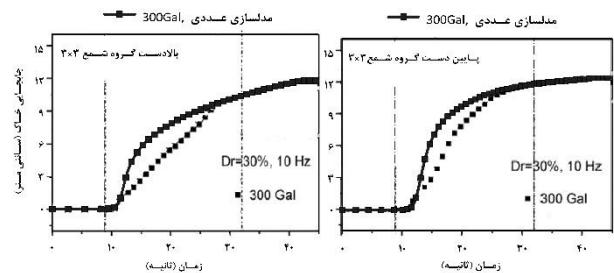
شکل (۴) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در میدان آزاد و شمع تکی

تاریخچه زمانی اضافه فشار آب حفره‌ای در نواحی نزدیک گروه شمع برای عمق‌های ۲، ۴ و ۸ متری در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد شمع زائل شدن فشار آب حفره‌ای زودتر آغاز می‌شود. این رفتار ناشی از افزایش سختی سیستم و تناوب آن افزایش اثر پدیده اتساع با افزایش تعداد شمع است.

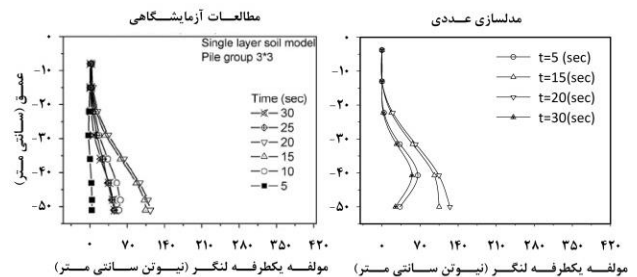
شکل (۶) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۴ و ۸ متری در بالادست، میانه و پایین‌دست گروه شمع ۲×۲ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت در اعماق سطحی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در سمت بالادست و

پایین‌دست اختلاف فاز ۱۸۰ درجه دارد. در توجیه این رفتار می‌توان گفت، هنگامی که خاک نسبت به شمع به سمت راست

همچنین به منظور بررسی اثر پدیده گسترش جانبی بر روی رفتار شمع‌ها گروهی شیب سطح زمین ۵ درجه در نظر گرفته شده است. تحریک ورودی در این آزمایش از نوع سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و بیشینه دامنه ۳۰۰ Gal (۰/۳g) است. [۷] تاریخچه زمانی مولفه یک‌طرفه جابه‌جایی خاک در بالادست و پایین‌دست گروه شمع در شکل (۲) ارائه شده است. همچنین در شکل (۳) پروفیل تغییرات لنگر خمشی میانی ردیف بالادست گروه شمع در زمان‌های مختلف با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش بیانگر توانایی قابل قبول مدل عددی در پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و لنگر خمشی وارد بر شمع است.



شکل (۲) مقایسه جابه‌جایی خاک در بالادست و پایین‌دست گروه شمع ۲×۲ با نتایج آزمایشگاهی

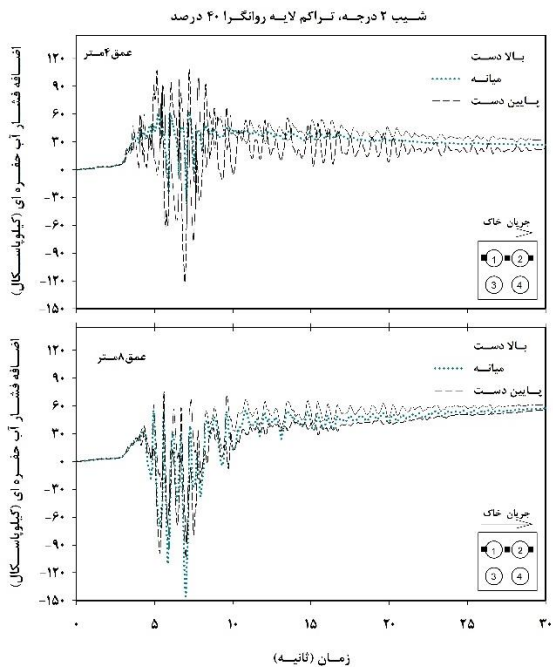


شکل (۳) مقایسه پروفیل لنگر در شمع میانی ردیف بالادست در زمان‌های مختلف

## ۶- نتایج

شکل (۴) تاریخچه زمانی اضافه فشار آب حفره‌ای برای حالت میدان آزاد و حالت وجود شمع (شمع تکی) در عمق‌های ۲، ۴، ۸ و ۱۲ متری را نشان می‌دهد. براساس این نمودارها در هر دو حالت در لایه اول (تا عمق ۶ متری) مقدار اضافه فشار آب- حفره‌ای نزدیک به تنش موثر است. به عبارت دیگر با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت لایه اول در هر دو حالت

یکنواخت در نظر گرفته شده و مقدار آن با تقسیم اختلاف برش در دو سر المان به طول المان به دست می‌آید. این روش در مطالعات لو (۲۰۱۰) [۹] و هی (۲۰۰۹) [۲۳] نیز استفاده شده است.

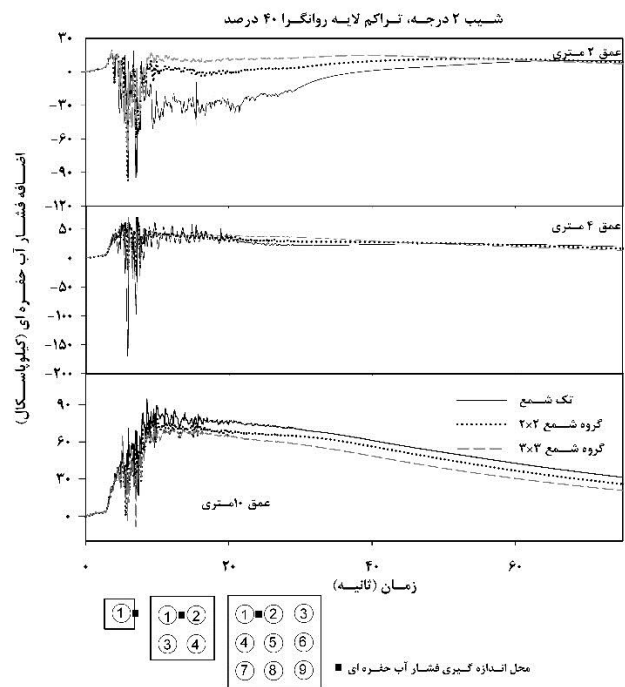


شکل (۶) تغییرات فشار آب حفره‌ای در عمق ۴ و ۸ متری در بالادست، میانه و پایین دست گروه شمع ۲×۲

در شکل (۷) تغییرات فشار جانبی وارد بر شمع شماره ۱، ۴ و ۵ گروه ۳×۳ در عمق ۴ و ۸ متری ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فشار جانبی وارد شده از طرف لایه روانگرا به شمع شماره ۵ گروه ۳×۳ کمتر از شمع شماره ۱ و ۴ است. این رفتار ناشی از آثار سایه و همسایگی<sup>۱</sup> (اندرکنش) در گروه شمع است. همچنین در شمع‌های شماره ۱، ۴ و ۵ فشار جانبی در نیمه پایینی (لایه غیر روانگرا) تقریباً یکسان است در حالی که در لایه روانگرا از لحاظ مقدار اختلاف زیادی دارند. این موضوع نشان می‌دهد که اثر سایه و همسایگی (اندرکنش) در اعماق سطحی در مقایسه با اعماق پایین موثرتر است.

به دلیل هم جهت بودن پدیده گسترش جانبی با تحریک ورودی فشار جانبی به دست آمده شامل مولفه تناوبی ناشی از نیروهای دینامیکی خاک و یک‌طرفه ناشی از نیروی کینماتیکی

حرکت (پایین دست) می‌کند در سمت راست (پایین دست) تنش کششی و در سمت چپ (بالادست) تنش فشاری در خاک ایجاد می‌شود. در پایین دست فشار آب حفره‌ای به خاطر کاهش تنش برشی و نرمال کاهش پیدا می‌کند. اما در بالادست خاک در وضعیت مقاوم قرار گرفته و تنش‌های نرمال و برشی بیشتری اعمال می‌شود و این امر باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عمق تغییرات فشار آب حفره‌ای در بالادست و پایین دست شمع هم فاز است. از مطالب گفته شده در بالا می‌توان نتیجه که در نزدیک سطح زمین تغییرات فشار آب حفره‌ای تابع تغییر شکل نسبی خاک و شمع و در عمق‌های پایین وابسته به رفتار خاک است. این موضوع در پژوهش‌های آزمایشگاهی سوزوکی (۲۰۰۵) [۲۲] نیز مشاهده شده است.



شکل (۷) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در طول زمان به ازای تعداد شمع‌های مختلف

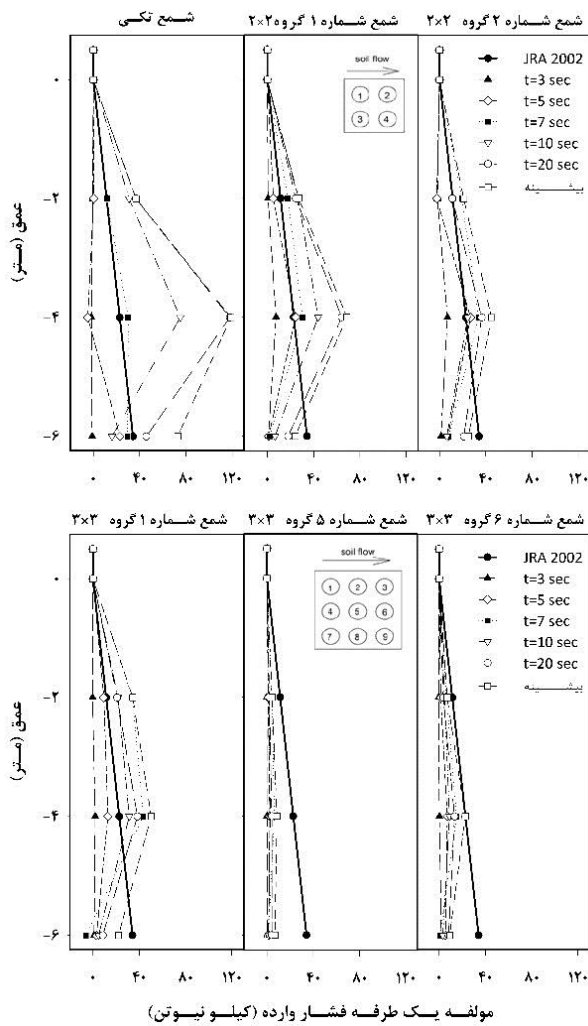
## ۶-۱- فشار جانبی

محاسبه فشار وارد شده به شمع از سوی خاک روانگرا حین گسترش جانبی از اهمیت زیادی در بررسی اندرکنش شمع و خاک دارد. در این پژوهش نیز این مسئله مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش فشار جانبی وارد به هر المان شمع به صورت

<sup>۱</sup> Shadow and Neighboring Effects

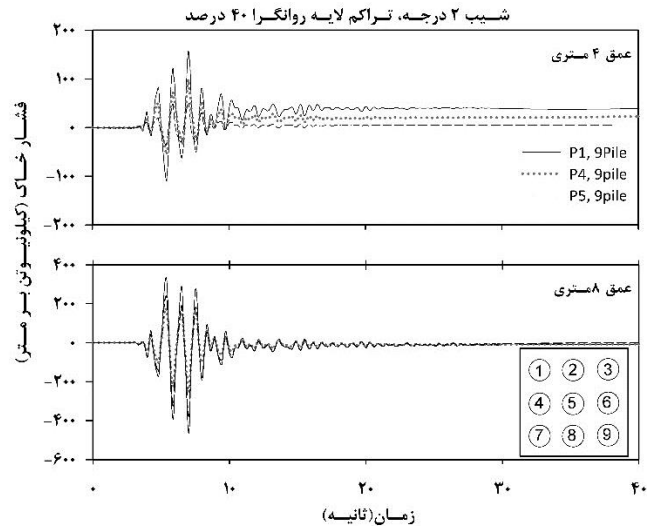


ملاحظه می‌شود، در آغاز تحریک فشار وارد شده به شمع‌ها بسیار ناچیز بوده و تقریباً برابر صفر است. اما با شروع روانگرایی و به دنبال آن تغییر شکل جانبی خاک، فشار جانبی وارد به شمع‌ها شدیداً افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد شمع حداکثر فشار جانبی خاک کاهش می‌یابد. برای نمونه، با افزایش تعداد شمع از ۴ به ۹ بیشینه فشار جانبی در شمع شماره ۱، ۲۶٪ کاهش یافته است. دلیل این



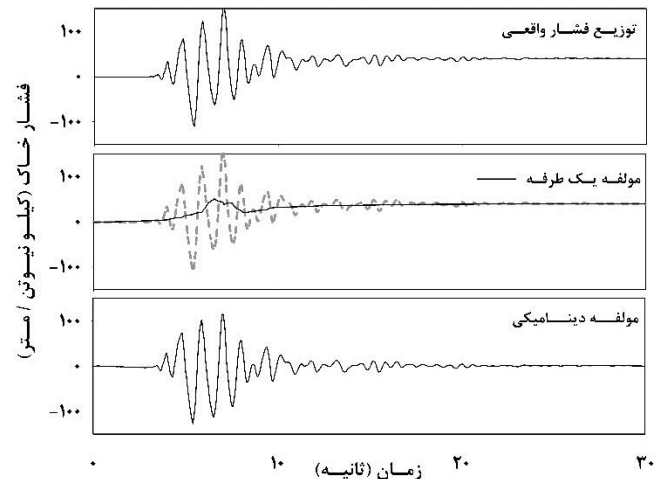
شکل (۹) پروفیل تغییرات فشار جانبی وارد به شمع‌های تکی و گروهی (شیب زمین ۲ درجه)

امر را می‌توان به علت اثر اندک‌کنشی شمع‌ها و هم‌پوشانی میدان تنش و جابه‌جایی خاک اطراف گروه شمع دانست. با مقایسه فشارهای وارد شده با آیین‌نامه (Japanese Road Association) می‌توان نتیجه گرفت که اثر تعداد و موقعیت شمع‌ها



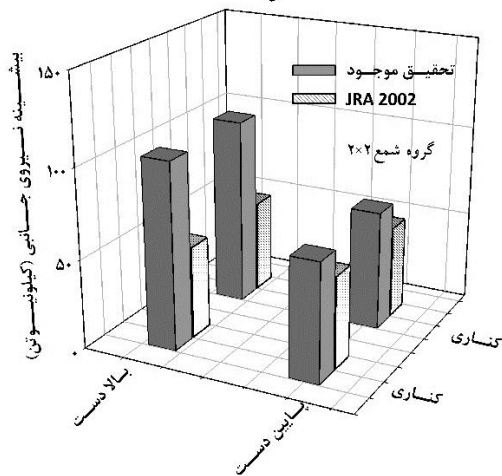
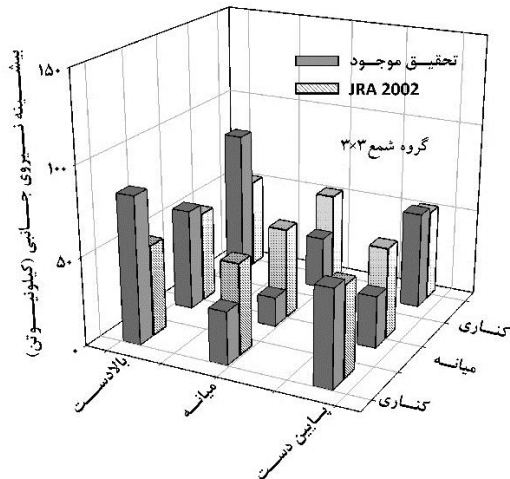
شکل (۷) تغییرات فشار جانبی وارد به شمع‌های ۱ و ۵ گروه شمع ۳×۳ در عمق ۴ و ۸ متری

خاک است. با توجه به این که در پدیده گسترش جانبی جابه‌جایی‌های بزرگ ناشی از مولفه یک‌طرفه فشار جانبی است. در این پژوهش فقط مولفه یک‌طرفه فشار جانبی در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن مولفه یک‌طرفه از روش رگرسیون محلی استفاده شده است. شکل (۸) چگونگی تجزیه فشار جانبی را نشان می‌دهد.



شکل (۸) تجزیه فشار جانبی به مولفه یک طرفه و سیکلی برای شمع شماره ۱ گروه شمع ۳×۳ برای عمق ۴ متری

شکل (۹) تغییرات فشار یک‌طرفه وارد شده از طرف خاک روانگرا را در طول شمع تکی، شمع ۱ و ۲ گروه ۲×۲ و شمع‌های ۱، ۵ و ۶ گروه شمع ۳×۳ را در لحظات مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که



شکل (۱۰) بیشینه مقدار نیروی یک‌طرفه وارد از طرف خاک و مقدار پیشنهادی آیین‌نامه JRA برای شمع‌های مختلف

در این روابط  $I_{CL}$  و  $I_{CT}$  به ترتیب شاخص توزیع در جهت طولی و عرضی،  $I_C$  شاخص توزیع برای هر شمع،  $Q_{Row}^{Mean}$  میانگین نیروی وارد به هر ردیف در گروه شمع،  $Q_{Average}$  و  $Q_i^{MAX}$  به ترتیب میانگین و بیشینه نیروی وارد به هر شمع،  $n$  و  $m$  به ترتیب تعداد کل شمع و تعداد شمع در هر ردیف است. در این روش برای تعیین نیروی جانبی وارد شده به هر شمع باید شاخص توزیع به دست آمد از رابطه (۸) را در میانگین نیروی وارد بر گروه شمع ( $Q_{Average}$ ) ضرب شود.

شکل (۱۱) ضریب مشارکت هر شمع در گروه شمع ۲×۲ و گروه شمع ۳×۳ را نشان می‌دهد. همچنین به منظور بررسی این ضرایب با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه در این شکل ضریب مشارکت آیین‌نامه JRA نیز ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ردیف بالادست در هر گروه بیشترین ضریب مشارکت را دارد. در گروه شمع ۳×۳، شمع میانی کمترین

با وجود اهمیت، در روش پیشنهادی آیین‌نامه مذکور لحاظ نمی‌شود. این نتایج به وسیله‌ی پژوهشگران دیگر نیز مشاهده شده است. به عنوان نمونه، هائری و همکاران (۲۰۱۲) [۱] با انجام آزمایش میزلرزان مشاهده کردند که نیروی وارد شده به شمع بالادست گروه شمع ۳×۱ بیشتر از آیین‌نامه و شمع میانی و پایین دست کمتر از آیین‌نامه است.

به منظور بررسی بیشتر پاسخ شمع‌های گروهی به پدیده گسترش جانبی، تاریخچه زمانی مولفه یک‌طرفه نیروی جانبی وارد به هر شمع با استفاده از رابطه ۳ تعیین شده است.

$$F(t) = \int_{z=0}^{z=h} P(z,t) dz \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)  $H$  ضخامت لایه روانگرا،  $P(z,t)$  فشار جانبی وارد بر شمع است.

در شکل (۱۰) بیشینه مقدار نیروی یک‌طرفه وارد از طرف خاک و مقدار پیشنهادی آیین‌نامه JRA برای شمع‌های مختلف مقایسه شده است. با دقت در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود نیروی وارد شده به هر شمع به موقعیت شمع در گروه بستگی دارد. به عنوان نمونه در گروه شمع ۳×۳ نیروی وارد شده به شمع شماره ۵ حدوداً ۰/۲، نیروی وارد شده بر شمع شماره ۱ است. همچنین مشاهده می‌شود نیروی وارد شده به شمع شماره ۱، ۵۶٪ بیشتر از آیین‌نامه JRA است. در حالی که اثر سایه و همسایگی در گروه موجب شده است که در شمع شماره ۵ مقدار نیروی ایجاد شده کمتر از آیین‌نامه JRA باشد. برای تعیین میزان مشارکت هر شمع از کل نیروی وارد شده به گروه شمع از روش ارائه شده به وسیله‌ی معتمد (۲۰۰۹) [۷] استفاده شده است. این روش دارای دو شاخص  $I_{CT}$  و  $I_{CL}$  است که با استفاده از روابط ۴ تا ۸ تعیین می‌شوند.

$$I_{CL} = \frac{Q_{Row}^{Mean}}{Q_{Average}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$I_{CT} = \frac{Q_i^{Max}}{Q_{Row}^{Mean}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Q_{Average} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{i(max)}}{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

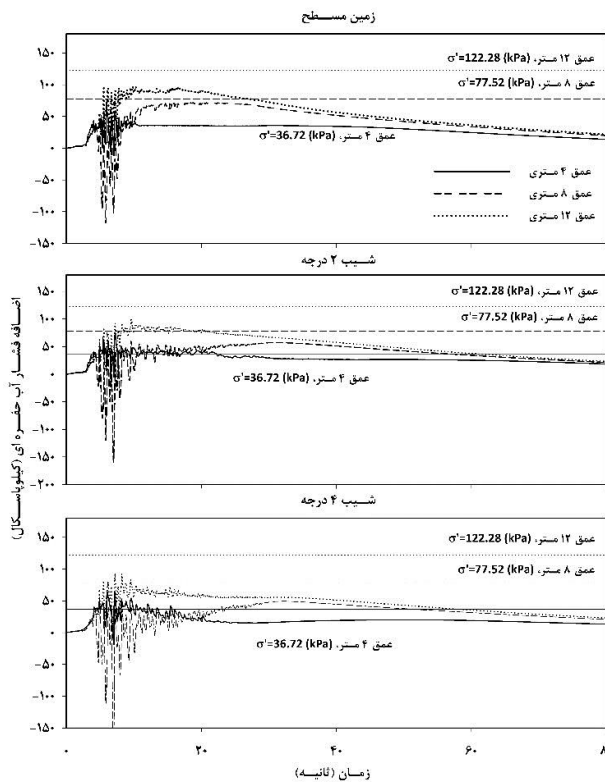
$$Q_{Row}^{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{i(max)}}{m} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$I_C = I_{CL} \times I_{CT} \quad \text{رابطه (۸)}$$



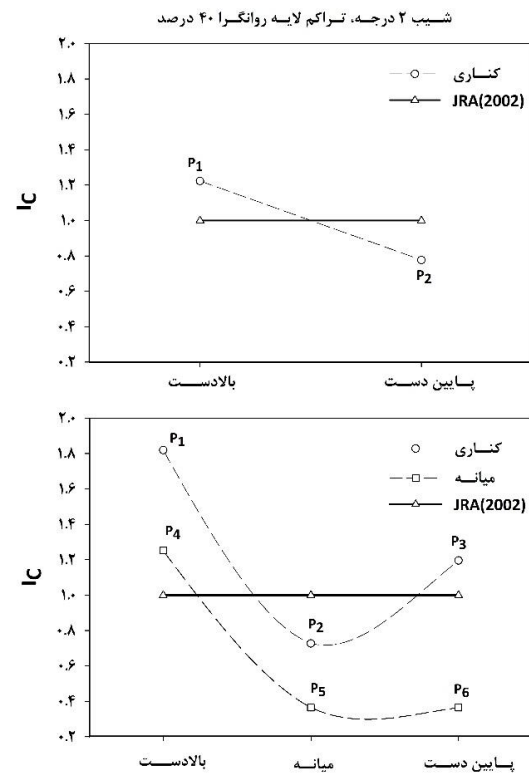
علت مشابهت نتایج فقط نتایج گروه شمع ۲×۲ ارائه می‌شود. طبق این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش شیب فشار آب حفره‌ای کمتری تولید شده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر آغاز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش شیب مکش‌های ایجاد شده در تغییرات فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. مشابه این نتایج در مطالعات عسگری (۲۰۱۳) [۱۶] نیز مشاهده شده است.

در شکل (۱۳) بیشینه جابه‌جایی کلاهدک گروه شمع‌های انتخابی به‌ازای شیب‌های مختلف ارائه شده است همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش شیب جابه‌جایی کلاهدک افزایش می‌یابد. با دقت در شکل (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که در زمین‌های شیب‌دار به علت کاهش و زودتر زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای جابه‌جایی خاک و شمع باید کاهش یابد. دلیل این تناقض را می‌توان ناشی از تأثیر تنش برشی استاتیکی در راستای شیب دانست. این تنش برشی ناشی از وزن توده خاک است که باعث افزایش جابه‌جایی در زمین‌های شیب‌دار می‌شود.



شکل (۱۲) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در فاصله بین دو شمع گروه ۲×۲ به‌ازای شیب‌های مختلف زمین

ضریب مشارکت را دارد که این موضوع ناشی از اثر محصور شدگی شمع‌های ردیف میانی به وسیله‌ی شمع‌های ردیف بالادست و پایین‌دست است. همچنین با مقایسه ضرایب مشارکت به دست آمده با آیین‌نامه مشاهده می‌شود ضریب مشارکت ردیف میانی در گروه شمع ۳×۳ کمتر از آیین‌نامه است. در حالی که ضریب مشارکت ردیف بالادست حدوداً ۱/۲ برابر در گروه شمع ۲×۲ و ۱/۵ برابر در گروه شمع ۳×۳ است.



شکل (۱۱) ضریب مشارکت برای گروه شمع ۲×۲ و ۳×۳

## ۲-۶- شیب زمین

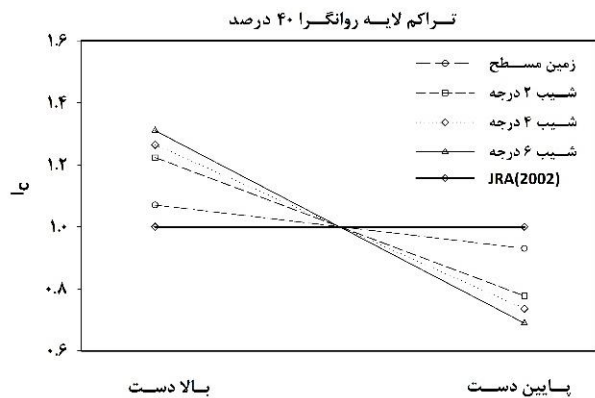
تغییر شکل‌های جانبی معمولاً در زمین‌هایی شیب‌دار رخ می‌دهد. در این پژوهش به منظور بررسی این موضوع شیب زمین ۳، ۶ و ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است که تقریباً معادل شیب‌های ۲، ۴ و ۶ درجه است.

شکل (۱۲) تاریخچه زمانی تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در فاصله بین دو شمع گروه ۲×۲ در عمق‌های ۴، ۸ و ۱۲ متری از سطح، برای شیب‌های ۰، ۲ و ۴ درجه را نشان می‌دهد (به

شکل (۱۴) میانگین نیروی یک‌طرفه وارد به گروه شمع مختلف به ازای شیب‌های ۰، ۲، ۴ و ۶ درجه را نشان می‌دهد همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در زمین‌های مسطح نیروی جانبی کمتری به گروه شمع وارد می‌شود در حالی که در زمین‌های شیبدار مقدار نیروهای وارد شده به شدت افزایش می‌یابد.

با مقایسه فشارهای وارد شده با مقدار پیشنهادی آیین‌نامه JRA مشاهده می‌شود که آیین‌نامه به ازای شیب‌های مختلف مقادیر ثابتی را پیشنهاد می‌کند. در حالی که نتایج تحلیل بیانگر افزایش نیروی جانبی با افزایش شیب است.

دیگر نیز به دست آمده است). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در زمین‌های مسطح نیروی جانبی وارد به شمع‌های بالادست و پایین‌دست اختلاف ناچیزی دارد در حالی که در زمین‌های شیبدار این مقدار افزایش می‌یابد در توضیح این رفتار می‌توان گفت که در زمین‌های شیبدار با شروع روانگرایی و تغییر شکل جانبی، شمع‌های بالادست به وسیله شمع‌های بالادست در برابر جابه‌جایی‌های خاک محافظت می‌شوند و این امر باعث کاهش نیروی جانبی وارد به شمع‌های پایین‌دست می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش شیب شمع‌های بالادست سهم بیشتری از نیروی جانبی وارد به گروه شمع را تحمل می‌کنند و این موضوع باید در طراحی در نظر گرفته شود.

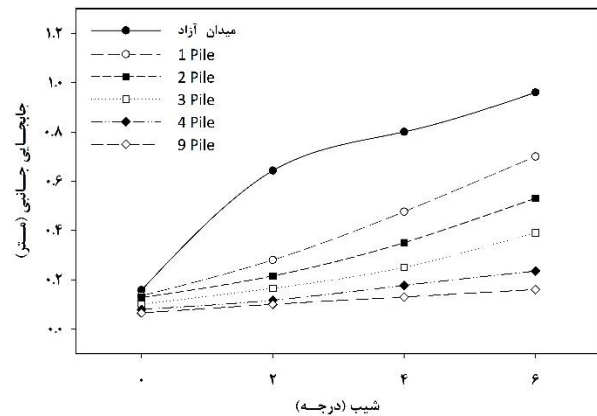


شکل (۱۵) ضریب مشارکت شمع‌های بالادست و پایین دست گروه شمع ۲x۲ به ازای شیب مختلف

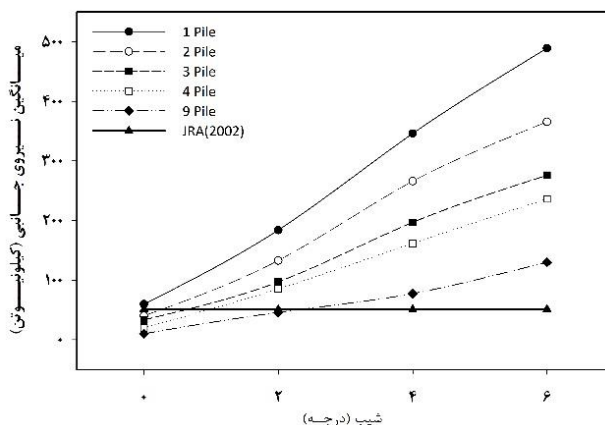
## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار شمع تکی و گروه شمع (۱x۱، ۲x۱، ۳x۱، ۲x۲ و ۳x۳) در پروفیل خاک دو لایه تحت نیروی زلزله و فشار جانبی ناشی از گسترش جانبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به شکل خلاصه، نتایج به دست آمده از بخش‌های مختلف این پژوهش به صورت زیر ارائه می‌شود:

- ۱- تنش برشی ناشی از وزن توده خاک و رفتار اتساعی خاک دو عامل مهم است که روند تغییرات جابه‌جایی را کنترل می‌کند. عامل اول اثر افزایشی و عامل دو اثر کاهش بر روی روند جابه‌جایی دارد.
- ۲- نیروی جانبی ایجاد شده در شمع‌های گروهی به عواملی همچون شیب زمین، مشخصات مکانیکی و هندسی خاک، و تعداد شمع در گروه بستگی دارد. و این موضوع باید در طراحی گروه شمع‌ها در نظر گرفته شود.



شکل (۱۳) تأثیر شیب زمین بر روی حداکثر جابه‌جایی سرشمع در گروه شمع محدود و نامحدود



شکل (۱۴) میانگین نیروی وارد به گروه شمع محدود و نامحدود به ازای شیب‌های مختلف

برای مقایسه ضریب مشارکت شمع‌های بالادست و پایین دست گروه شمع ۲x۲ به ازای شیب‌های مختلف می‌توان به شکل (۱۴) مراجعه کرد (شایان ذکر است که نتایج مشابهی برای گروه شمع‌های

World Conference on Earthquake Engineering, 2008, PP 12-17.

[7] Motamed R., Sesov V., Towhata I. and Anh N. T., "Experimental modeling of large pile groups in sloping ground subjected to liquefaction-induced lateral flow: 1-G shaking table tests", Soils and foundations, Vol 50, 2011 PP 261-279.

[8] Elgamal A., Lu J. and Forcellini D., "Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol 135, 2009, PP 1672-1682.

[9] Lu J., Yang Z. and Elgamal A., OpenSeesPL 3D lateral pile-ground interaction: User's manual, University of California, San Diego (<http://neesforge.nees.org/projects/OpenSeesPL>), 2010.

[10] Prevost, J. H., "A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 4, 1985 P 9-17.

[11] Elgamal, A., Z. Yang, E. Parra and A. Ragheb, "Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils", Journal of Plasticity, 2003, Vol 19, P 883-905.

[۱۲] رحمانی امین، ۱۳۸۸ «تحلیل رفتار دینامیکی شمع‌ها در خاک‌های مستعد روانگرایی»، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد عمران خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعت شریف.

[13] GHRE Power website (<http://www.ghrepower.co.uk>).

[14] Zhang, J. and T. C. Hutchinson, "Inelastic pile behavior with and without liquefaction effects". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 36, 2012 pp 12-19.

[15] Cheng, Z. and B. Jeremić, "Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 29, 2003, P 1405-1416.

[16] Asgari A., Oliaei M. and Bagheri M., "Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 51, 2013, PP 77-96.

[17] Reynolds C. E., Steedman J. C. and Threlfall A. J., Reynolds's Reinforced Concrete Designer's Handbook, Taylor & Francis, 2007.

[18] Biot, M. A.. "Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media" Journal of applied physics, vol. 33, 1962, pp 1482-1498.

۳- در گروه شمع نیروی جانبی وارد به هر شمع به موقعیت شمع در گروه بستگی دارد. این رفتار ناشی از آثار سایه و همسایگی در گروه شمع است.

۴- با افزایش شیب، شمع‌های بالادست سهم بیشتری از نیروی جانبی را تحمل می‌کنند و این موضوع باید در طراحی شمع‌ها در نظر گرفته شود.

۵- با مقایسه میانگین نیروی جانبی وارد شده به گروه شمع با مقدار پیشنهادی آیین‌نامه JRA مشاهده شده که آیین‌نامه به ازای شیب‌های مختلف مقادیر ثابتی را پیشنهاد می‌کند؛ در حالی که نتایج تحلیل بیانگر افزایش نیروی جانبی با افزایش شیب است. همچنین آیین‌نامه گفته شده ضریب مشارکت یکسانی برای شمع‌های پیشنهاد می‌کند در حالیکه نتایج این پژوهش نشان می‌دهد شمع‌های بالادست ضریب مشارکت بیشتری نسبت به شمع‌های پایین دست و میانی دارند.

۶- تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای ملاک مناسبی برای ارزیابی جابه‌جایی و نیروهای وارده به شمع نیست.

## ۸- مراجع

[1] Haeri S. M., Kavand A., Rahmani I. and Torabi H., "Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 38, 2012, PP 25-45.

[2] JRA (2002); Specifications for highway bridges Japan Road Association highway bridges. Preliminary English Version; Prepared by Public Works Research Institute (PWRI) and Civil Engineering Research Laboratory (CRL), Japan, November

[3] Gonzalez L, Abdoun T, "Dobry R. Effect of soil permeability on centrifuge modeling of pile response to lateral spreading" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2009;35(1):62-73

[4] kimura, M., makino, H., okawa, k., Kamei, H. and Zhang, F. "Bearing capacity of a group pile foundation with inclined piles under lateral loading" Proc. of JSCE, 722/III-61, 2002, PP 97-107.

[5] Haigh SK, Madabhushi SPG. "Centrifuge Modelling of Lateral Spreading past Pile Foundations". International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2002; St John's, Newfoundland, Canada

[6] He, L., A. Elgamal, M. Hamada and J. Meneses, "Shadowing and group effects for piles during earthquake-induced lateral spreading", . In: Proc. 14th

[22] Tokimatsu, K., H. Suzuki and Y. Suzuki. Back-calculated  $p$ - $y$  relation of liquefied soils from large shaking table tests. In: 4th International Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2001 pp 1-6..

[23] He, L., A. Elgamal, T. Abdoun, A. Abe, R. Dobry, M. Hamada, J. Menses, M. Sato, T. Shantz and K. Tokimatsu,. Liquefaction-induced lateral load on pile in a medium Dr Sand layer. Journal of Earthquake Engineering, vol. 13,2009 pp 916-938

[19] Chan, A. H.-C., " A unified finite element solution to static and dynamic problems of geomechanics", University College of Swansea, 1988.

[20] Jeremic, B., Development of geotechnical capabilities in OpenSees, EERI,2001.

[21] Lu, J. Yang, Z. and Elgamal, A., "OpenSeesPL 3D lateral pile-ground interaction: User's manual", University of California, San Diego (<http://neesforge.nees.org/projects/OpenSeesPL>), 2010.

# Numerical Modeling of Seismic Behavior of Piles In Liquefiable Soil

Aliakbar Golshani<sup>1\*</sup>, Roshan biukaghazadeh<sup>2</sup>, Ali Asgari<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University

2- M.Sc. Student of Geotechnical Engineering, Tarbiat Modares University

3- PhD Student of Geotechnical Engineering, Tarbiat Modares University

golshani @ modares.ac.ir

## Abstract:

The lateral spreading of mildly sloping ground and the liquefaction induced by earthquakes can cause major destruction to foundations and buildings, mainly as a result of excess pore water pressure generation and softening of the subsoil. During many large earthquakes, soil liquefaction results in ground failures in the form of sand boils, differential settlements, flow slides, lateral spreading and loss of bearing capacity beneath buildings. Such ground failures have inflicted much damage to the built environment and caused significant loss of life. The risk of liquefaction and associated ground deformation can be reduced by various ground improvement methods, including densification, solidification (e.g., cementation), vibro-compaction, drainage, explosive compaction, deep soil mixing, deep dynamic compaction, permeation grouting, jet grouting, pile group and gravel drains or SCs. Nowadays, using pile foundation is one of the popular solution for soils vulnerable to liquefaction. The pile with enough length more than liquefiable soil depth can reduce the large deformation and unacceptable settlements. Liquefaction and lateral deformation of the soil has caused extensive damage to pile foundations during past earthquakes. Several examples of significant damages in pile foundation have been reported in the literature from the 1964 Niigata, 1983 Nihonkai-Chubu, 1989 Manjil and 1995 Kobe earthquakes. These damages have been observed mainly in coastal areas or sloping ground. Evaluation of liquefaction in order to develop the northern and southern ports and implement coastal and offshore structures in Iran is of particular importance due to locating in a high seismic hazard zone and Liquefactable soil in coastal areas. Although, in recent years, many studies have been conducted to understand the various aspects of this phenomenon, yet a lot of uncertainties have remained about the lateral deformations of the soil and its effects on deep foundations. In this study, the behavior of pile groups ( $2 \times 1$ ,  $1 \times 3$ ,  $2 \times 2$  and  $3 \times 3$ ) was evaluated using fully coupled three-dimensional dynamic analysis. Therefore, the influence of effective parameters such as number of piles, ground slope angle of soil and pile behavior has been studied using the finite element software Opensees SP v2.4. Results indicate that most of the factors affecting the behavior of the pile, soil is not considered in the current design codes (such as JRA 2002) and these issues indicate the need to revise the current design and analysis methods. Lateral Pressures compared to that of JRA regulations show that these regulations cannot exactly predict pressures on pile and pile groups. Altogether comparing the results of numerical models of this research to various laboratory observations indicate that the use of numerical method can be reliable to predict the behavior of the soil and pile qualitatively and quantitatively using the appropriate constitutive model and parameters for soil and pile.

**Keywords:** Liquefaction soil, pile group, fully coupled numerical analysis, multi-surface-plasticity constitutive model.