

# ارائه‌ی روشی جدید برای تعیین جابه‌جایی و نیروی وارد بر شمع‌های نصب شده در شیب‌های خاکی

محمد حاجی عزیزی<sup>۱\*</sup>، احمد رضا مظاهری<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

mhazizi@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۰/۲۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۲۹]

**چکیده-** پایداری شیب‌های خاکی در اثر عوامل مختلف مانند نیروهای زلزله، تغییر تراز سطح آب زیرزمینی، خاکریزی در بالادست شیب و یا خاکبرداری از پایین دست شیب، تهدید می‌شوند. با افزایش نیروهای محرک از مقاومت خاک کاسته شده و در نهایت خاک به مرحله تسلیم می‌رسد. با افزایش نقاط تسلیم، سطح گسیختگی در شیب ایجاد می‌شود و در نهایت باعث ناپایداری شیب خاکی می‌شود. یکی از راهکارهای پایداری شیب‌های خاکی نصب یک ردیف شمع در دامنه شیب است. در این مقاله تلاش شده است بر مبنای سطح گسیختگی اولیه‌ی ایجاد شده در شیب و نیروی‌های جانبی ناشی از وزن گوه گسیختگی و با در نظر گرفتن مشخصات مقاومتی خاک، روشی جدید برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر شمع ارائه شود. سپس جابه‌جایی سر شمع با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل مربوطه محاسبه می‌شود و در نهایت، نتایج حاصل از روش تحلیلی پیشنهاد شده با مقادیر حاصل از روش اجزای محدود مقایسه می‌شود. در این مقاله دو رابطه‌ی تحلیلی جدید پیشنهاد شده است که یکی برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر شمع و دیگری برای محاسبه‌ی جابه‌جایی سر شمع است که در نوع خودکاری جدید و نو است. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج دیگر پژوهشگران درستی آزمایی شده است که هماهنگی خوبی با یکدیگر دارند.

**واژگان کلیدی:** شیب خاکی، نیروی وارد بر شمع، جابه‌جایی شمع، پایداری شمع.

## ۱- مقدمه

استفاده از شمع در پایداری شیب‌های در حال لغزش و یا افزایش پایداری شیب‌های پایدار، یکی از راهکارهای موثر در پایداری شیب‌های خاکی است [۱]. پایداری شیب‌ها با استفاده از شمع به پژوهشگران مختلف و با استفاده از روش‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۲-۶].

در حالت کلی پایداری شیب‌های خاکی با استفاده از شمع قابل تقسیم به سه دسته است. (۱) روش کاهش مقاومت برشی [۷-۸] (۲) روش‌های تعادل حدی [۱۰-۱۲] که استفاده از این روش‌ها منجر به تعیین دقیق سطح گسیختگی می‌شود. (۳) روش‌های تحلیل حدی که بر مبنای تحلیل‌های حد بالا یا

حد پایین است [۱۳-۱۵]. در روش‌های تحلیلی که در آنها از یک ردیف شمع برای پایداری شیب استفاده شده است دو هدف اصلی دنبال می‌شود. اول تعیین ضریب اطمینان شیب با استفاده از نصب شمع، دوم تعیین بار طراحی وارد بر شمع که از نیروها و گشتاورهای اعمال شده بر شمع تعیین می‌شود [۱۶]. تحلیل‌های عددی که در این زمینه صورت گرفته است نشان می‌دهند که بهترین مکان برای نصب یک ردیف شمع برای بالا بردن ضریب اطمینان، محدوده‌ی وسط دامنه‌ی شیب است [۱۷-۱۹].

آیتو و همکارانش [۲] روش تعادل حدی را برای بررسی پایداری شیب‌های مسلح شده به وسیله‌ی شمع پیشنهاد نمودند و نیروی جانبی وارد بر شمع که ناشی از جابه‌جایی

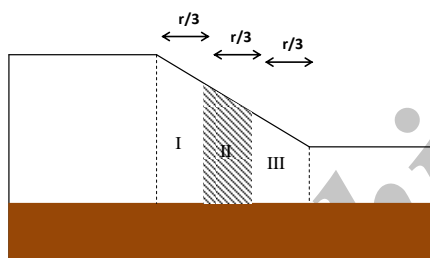
مقایسه شده است که علاوه بر هماهنگی خوب با آنها از جامعیت بیشتری برخوردار است. سپس با توجه به مقدار نیروی وارد بر شمع، مشخصات لازم برای شمع تعیین می‌شود، آنگاه جابه‌جایی سر شمع با استفاده از بسط معادلات دیفرانسیل به دست می‌آید و نتایج حاصل از آن با مقادیر به دست آمده از نرم افزار مقایسه شده است.

فرضیات در نظر گرفته شده برای پیشنهاد رابطه‌ی نیروی وارد بر شمع در این مقاله به ترتیب زیر است،

۱- با توجه به نتایج حاصل از مراجع [۱۷-۱۹] و پژوهش‌های گذشته صورت گرفته در زمینه پایداری شیب‌های خاکی با شمع، زمانی که یک لایه مقاوم در زیر لایه لغزشی وجود دارد [۳۱] مکان مناسب برای نصب شمع در محدوده‌ی وسط شیب در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

۲- رفتار شمع الاستیک در نظر گرفته شده است.

۳- انتهای شمع در حدود ۵ برابر قطر در لایه‌ی پایدار شبروانی نفوذ کرده است.



شکل (۱) محدوده II بهترین محل برای نصب شمع بر اساس تحلیل‌های عددی [۱۷ و ۱۹ و ۳۱]

## ۲- پیشنهاد روش جدید

پایداری شیب‌های خاکی با افزایش نیروهای محرک و یا کاهش نیروهای مقاوم تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. بنابراین ضروری است تا راهکارهای مقاوم سازی برای شیب‌های مشکوک طراحی و اجرا شود تا از ایجاد خسارت در اثر ناپایداری شیب جلوگیری شود. یکی از راه‌های مقابله با ناپایداری شیب‌ها نصب یک ردیف شمع در دامنه‌ی شیب است.

با نصب شمع در دامنه‌ی شیب نیروی مقاوم افزایش می‌یابد و از ناپایداری شیب جلوگیری می‌شود. مقدار نیروی وارد بر

توده خاک است، بر اساس تئوری آیتو و ماتسویی [۲۲] بر مبنای روش تغییر شکل‌های پلاستیک و بررسی جریان پلاستیک خاک میان شمع‌ها ارائه نمودند. در این روش نیروی وارد بر شمع به مشخصات خاک، فشار سربار و فاصله بین شمع‌ها بستگی دارد و این نیرو به مشخصات شمع وابسته نیست [۲-۶]. معادله‌ی ارائه شده به وسیله‌ی آیتو و ماتسویی [۲۲] برای محدوده‌ی مشخصی از فاصله‌ی بین شمع‌ها معتبر است، به گونه‌ای که برای فواصل زیاد و فواصل خیلی کم سازوکار ارائه شده مقادیر قابل قبولی نمی‌دهد [۲۳]. در مدل آیتو و ماتسویی [۲۲] فرض می‌شود خاک اطراف شمع تغییر شکل پذیر است و محدودیت طول شمع و قوس زدگی میان شمع‌ها نادیده گرفته شده است [۲۳-۲۴].

پولس [۳] و لی و همکارانش [۲۶] روشی را پیشنهاد نمودند که در آن شمع به صورت یک تیر ساده و خاک به صورت یک مدل الاستیک پیوسته در نظر گرفته شده است. این روش مقدار نیروی برشی و جابه‌جایی شمع را با فرض حرکت آزاد سطح زمین محاسبه می‌کند. در این مدل مقاومت خاک و شمع و سختی آن‌ها در محاسبه‌ی فشار شمع و خاک به کار برده می‌شود.

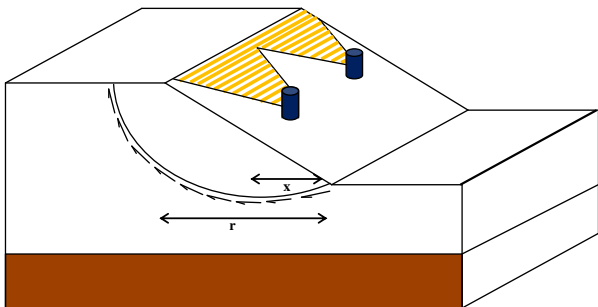
لی و همکارانش [۲۶] با استفاده از فرض حد بالای روش تحلیل حدی، ضریب تسلیم لرزه‌ای را پیشنهاد دادند و با استفاده از تئوری آیتو و ماتسویی [۲۲] نیروی وارد بر شمع را محاسبه کردند.

حاجی عزیزی و مظاهری [۳۱] بهترین مکان برای نصب شمع در شیب‌هایی که یک لایه مقاوم در زیر لایه لغزشی قرار دارد را محدوده‌ی وسط شیب معرفی کرده‌اند.

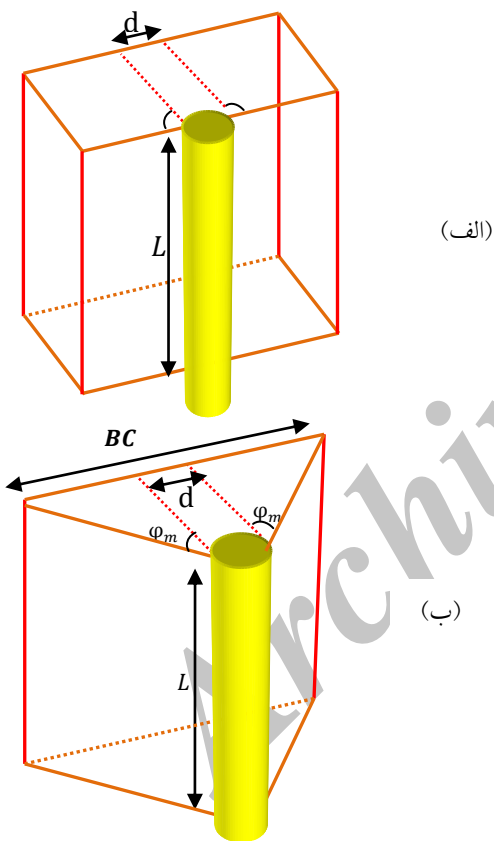
روش‌های مختلفی برای تعیین نیروی وارد بر شمع ارائه شده است که علاوه بر داشتن محاسن، دارای نواقصی همچون عدم دقت لازم در بازه‌های خاصی از فاصله‌ی بین شمع‌ها است.

در این مقاله سعی شده است بر مبنای سطح گسیختگی اولیه‌ی ایجاد شده و نیروی‌های جانبی ایجاد شده ناشی از وزن گوه‌ی گسیختگی و با در نظر گرفتن مشخصات مقاومتی خاک، رابطه‌ی مربوط به محاسبه‌ی نیروی وارد بر شمع پیشنهاد شود که کاری جدید و نو است. نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهاد شده با نتایج حاصل از دیگر پژوهشگران

که  $\alpha$  ضریبی است که بیانگر بخشی از وزن خاک پشت شمع است که بر شمع اعمال می شود. در شکل (۳) گوه ایجاد شده در بالا دست شمع و زاویه مویلایز شده قابل مشاهده است.



شکل (۲) شکل شماتیک شمع‌های نصب شده در شیب



شکل (۳) گوه ایجاد شده پشت شمع و زاویه اصطکاک مویلایز شده

الف)  $A_2$  ب)  $A_1$

## ۲-۱- محاسبه ی ضریب $\alpha$

همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، مقدار ضریب  $\alpha$  برابر است با نسبت مساحت ذوزنقه ( $A_1$ ) به کل مساحتی که پشت شمع قرار دارد ( $A_2$ ).

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} \quad (۴)$$

شمع تابعی از وزن گوهی گسیختگی است. رابطه‌ی ضریب اطمینان قبل از نصب شمع را می‌توان به ترتیب زیر نوشت.

$$SF_0 = \frac{\text{نیروی مقاوم}}{\text{نیروی محرک}} = \frac{F_C}{F_W} \quad (۱)$$

$SF_0$ : ضریب اطمینان اولیه

$F_C$ : نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک در سطح گسیختگی

$F_W$ : نیروی محرک ناشی از وزن گوه گسیختگی

با نصب شمع، مقدار نیروی مقاوم در صورت کسر رابطه (۱) و ضریب اطمینان افزایش می‌یابد، که ناشی از اضافه نیرویی است که شمع در مقابل حرکت ایجاد می‌کند، که محاسبه ضریب اطمینان پس از نصب شمع در رابطه (۲) نشان داده شده است. در ادامه برای بسط رابطه، می‌توان نیروی وارد بر شمع را به صورت ضریبی از وزن گوهی گسیختگی در نظر گرفت.

$$SF_T = \frac{F_C + F_P}{F_W} \quad (۲)$$

که  $F_P$  نیروی مقاوم ناشی از نصب شمع است. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است وزن خاک بالا دست شمع به صورت گوهی مثلثی بر شمع وارد می‌شود. ابعاد این گوه بر اساس فرضیات ارائه شده به وسیله آشور و اردلان [۱] قابل محاسبه است. بر این اساس گوه بالادست شمع با زاویه  $\phi_m$  تشکیل می‌شود که  $\phi_m$  برابر است با زاویه اصطکاک بسیج شده خاک [۱]. آشور و اردلان [۱] فرض کردند که ابعاد گوهی پشت شمع و مقدار  $\phi_m$  در هر عمقی تغییر می‌کند ولی همواره مقدار زاویه اصطکاک بسیج شده از زاویه اصطکاک خاک کمتر است [۱]. در این پژوهش فرض شده است که ابعاد گوهی گسیختگی از هر عمق تا سطح گسیختگی ثابت است که بدین ترتیب مشکلات مربوط به فواصل خیلی کم و زیاد شمع‌ها مرتفع خواهد شد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود نیروی وارد بر شمع را می‌توان به ترتیب زیر نوشت،

$$F_P = \alpha(SF_T - SF_0)F_W \quad (۳)$$

و قطر شمع کمتر باشد. در این حالت مقدار ضریب  $\alpha$  را می‌توان به ترتیب زیر حاصل کرد (شکل ۴- الف):

$$D_2 < BC - d \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{A_2 - \frac{D_2^2}{2 \tan \phi_m}}{A_2} = 1 - \frac{D_2^2}{2A_2 \tan \phi_m} \quad (8)$$

**فرض دوم:** وقتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها از مقدار اختلاف بین BC و قطر شمع بیشتر باشد. در این حالت مقدار ضریب  $\alpha$  را می‌توان به ترتیب زیر حاصل کرد (شکل ۴- ب)،

$$D_2 > BC - d \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\frac{BC \times (r-x)}{2}}{(r-x) \times (d+D_2)} = \frac{BC}{2(d+D_2)} \quad (10)$$

### ۳- بررسی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش پیشنهاد شده و دیگر روش‌ها

برای درستی آزمایی رابطه‌ی ارائه شده در این مقاله لازم است نتایج حاصل از آن و نتایج دیگر پژوهشگران مقایسه شود. برای این منظور نتایج ارائه شده در سه مقاله‌ای که در سال‌های اخیر انتشار یافته‌اند با نتایج حاصل از این مقاله مقایسه شده‌اند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

جدول (۱) پارامترهای مورد نیاز برای انجام تحلیل‌ها

داده‌های لی و همکارانش [۲۷]		داده‌های روش پیشنهادی در این مقاله	
وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	۲۰	ضریب اطمینان اولیه	(۱/۵) و (۱/۲) و (۱/۱)
فاصله سطح گسیختگی تا سطح زمین (m)	۵	وزن گوه گسیختگی (kN/m)	(۲۶۰۰) و (۲۲۰۰) و (۲۰۰۰)
زاویه اصطکاک (درجه)	(۲۰) و (۲۵) و (۳۰)	ضریب اطمینان نهایی	متغیر با فاصله شمع و زاویه اصطکاک
چسبندگی (kPa)	۱۰	ضریب (Alpha)	متغیر با زاویه اصطکاک
قطر شمع (cm)	۳۰	(r) عرض شیب (m)	۲۰
فاصله شمع‌ها (m)	متغیر	(X) فاصله نصب شمع از پاشنه (m)	۱۰

جدول (۲) مقایسه نتایج تحلیل‌های نظریه ارائه شده با نتایج لی و همکارانش [۲۷]

فاصله بین شمع‌ها	d	$\phi = 30^\circ$		$\phi = 25^\circ$		$\phi = 20^\circ$	
		لی و همکارانش (kN/m)[27]	روش پیشنهادی (kN/m)	لی و همکارانش (kN/m)[27]	روش پیشنهادی (kN/m)	لی و همکارانش (kN/m)[27]	روش پیشنهادی (kN/m)
۰/۲	۰/۳	۷۶۳۴	۱۳۴۵	۱۹۸۳	۸۴۴	۷۸۹	۶۹۱
۰/۳	۰/۳	۲۳۷۲	۱۱۳۳	۹۲۳	۵۸۹	۴۷۹	۵۴۷
۰/۷	۰/۳	۵۴۷	۷۵۶	۳۴۸	۴۳۹	۲۴۹	۲۵۳
۱/۲	۰/۳	۳۳۶	۳۶۷	۲۵۰	۳۳۵	۱۹۸	۲۴۱

برای محاسبه‌ی مساحت  $A_1$  و  $A_2$  لازم است تا مقدار BC (در شکل ۳) محاسبه شود. مبنای محاسبه‌ی BC براساس رابطه‌ی ارائه شده به وسیله‌ی آشور و اردلان [۱] است، که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، با این تفاوت که تغییرات آن در عمق ثابت در نظر گرفته شده است و به زاویه‌ی اصطکاک مویلاز شده خاک در پشت شمع وابسته است که مقدار این زاویه همانطور که گفته شد کمتر از زاویه اصطکاک خاک است و در این پژوهش محدوده آن برابر با رابطه (۵) معرفی شده است که در هیچ حالتی نباید کمتر از ۱۵ درجه در نظر گرفته شود.

$$0.65\phi \leq \phi_m \leq 0.8\phi \quad (5)$$

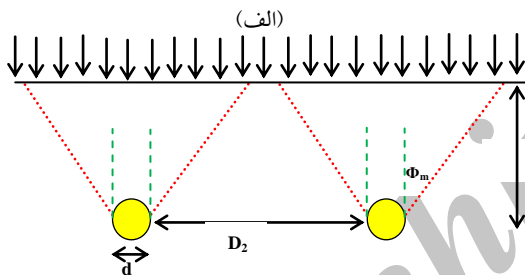
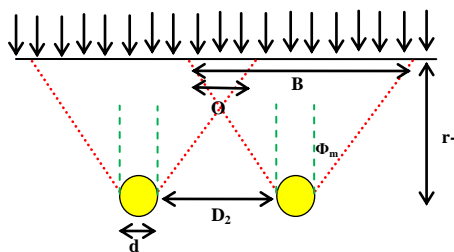
مقدار BC نیز از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید،

$$BC = d + 2(r-x)\tan\phi_m \quad (6)$$

در مواقعی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کم است،  $\phi_m$  مقادیر کوچک و در مواقعی که فاصله‌ی بین شمع‌ها زیاد است،  $\phi_m$  مقادیر بزرگی خواهد داشت. برای محاسبه  $\alpha$  دو فرض در نظر گرفته می‌شود، فرض اول: وقتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها از مقدار اختلاف بین BC

برای حالتی که سر شمع آزاد و فاصله بین شمع‌ها ۳ برابر قطر باشد، برابر با ۸۰۰ کیلو نیوتن است. اگر با استفاده از روش پیشنهاد شده نیروی وارد بر شمع محاسبه شود نتایج حاصل از آن مطابق جدول ۳ خواهد بود. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است نیروی وارد بر شمع با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله برابر با ۸۳۴/۲۴ کیلو نیوتن می‌شود که با نتایج ارائه شده به وسیله‌ی ون و همکارانش [۶] که برابر با ۸۰۰ کیلو نیوتن است همخوانی خوبی دارد.

$$P = 0/042Z - 0/2 \quad (۱۱)$$



(ب)

شکل (۴) حالت های مختلف برای محاسبه ضریب  $\alpha$

الف- فاصله بین شمع‌ها از اختلاف بین BC و قطر شمع کمتر باشد  
ب- فاصله بین شمع‌ها از اختلاف بین BC و قطر شمع بیشتر باشد.

### ۳-۱- مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهاد شده با نتایج

#### مقاله‌ی لی و همکارانش [۲۷]

لی و همکارانش [۲۷] بر اساس رابطه آیتو و ماتسویی [۲۲] نیروی وارد بر شمع‌هایی به قطر ۳۰ سانتی‌متر در فواصل مختلف را محاسبه نموده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، وقتی که فواصل بین شمع‌ها ۲d و بیشتر باشد نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهاد شده در این مقاله هماهنگی خوبی با نتایج ارائه شده به وسیله‌ی لی و همکارانش [۲۷] دارد، اما وقتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کم باشد اختلاف زیادی بین نتایج مشاهده می‌شود. اگر چه اعتبار روابط آیتو و ماتسویی [۲۲] برای فواصل کم، جای سوال بوده است [۱].

### ۳-۲- مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهاد شده با نتایج

#### مقاله‌ی ون و همکارانش [۶]

ون و همکارانش [۶] با استفاده از تحلیل عددی، پایداری یک شیب خاکی با نصب یک ردیف شمع را مورد بررسی قرار دادند و نیروی وارد بر شمع را در نقاط مختلف آن تا رسیدن به سطح گسیختگی، قرائت و به صورت نمودار ارائه کردند. (شکل ۵) اگر بهترین نمودار را بر آن برازش دهیم رابطه‌ی ۱۱ حاصل می‌شود، که با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ نیروی وارد بر شمع که به وسیله‌ی ون و همکارانش [۶]

جدول (۳) مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل شیب بررسی شده به وسیله‌ی ون و همکارانش [۶] و روش پیشنهادی

نوع روش	قطر شمع (m)	فاصله بین شمع‌ها (m)	C (kPa)	Phi (Degree)	phi-m (Degree)	r (m)	x (m)	ALPHA	FS <sub>T</sub>	SF <sub>0</sub>	FW	(Z) (kN)
روش پیشنهادی	۰/۶	۱/۸	۲۳/۹۴	۱۰	۸	۲۳	۱۱/۵	۰/۳۹۵	۱/۷۷	۱/۱۳	۳۳۰۰	۴/۲۴
ون و همکارانش [۶]	۰/۶	۱/۸	۲۳/۹۴	۱۰	*	۲۳	۱۱/۵	*	۱/۷۷	*	*	۸۰۰

پارامترها در این روش استفاده نشده‌اند.

### ۳-۳- مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهاد شده با نتایج

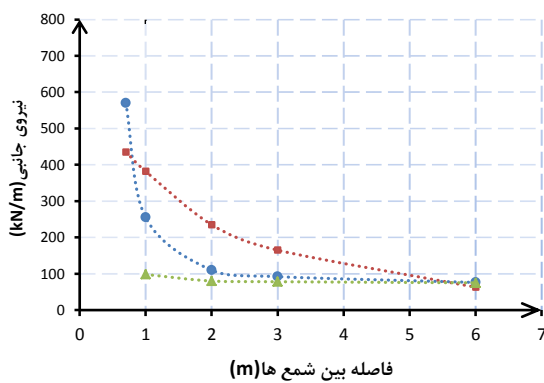
#### مقاله‌ی کومار و هال [۲۹]

کومار و هال [۲۹] با استفاده از رابطه‌ی آیتو و ماتسویی [۲۲] روش ساده‌ای برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر شمع ارائه دادند. سپس نتایج حاصل را با آیتو و ماتسویی [۲۲] مقایسه نمودند. با توجه به شکل ۶ اگر چه روش پیشنهادی در این مقاله برای مواقعی که فاصله‌ی شمع‌ها بین ۲ تا ۵ متر است مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد، ولی در حالتی که فاصله‌ی بین شمع‌ها کم باشد نتایج بهتر و واقعی‌تر است.

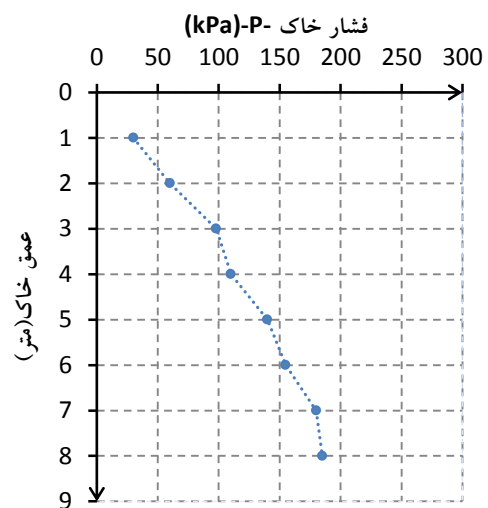
مشخصی از نیروی وارد بر شمع در بالا دست است که این نسبت با رابطه‌ی ۱۲ معادل است (شکل ۷).

پارامتر  $\eta$  به عوامل مختلفی از قبیل قطر شمع، فاصله‌ی شمع‌ها، زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک، موقعیت قرار گیری شمع و زاویه شیب بستگی دارد و با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ قابل محاسبه است [۱۶ و ۲۱ و ۲۴ و ۳۰].

آیتو و ماتسویی [۲۲] .....  
روش پیشنهادی .....  
روش ساده شده [۲۹] .....



شکل (۶) مقایسه‌ی نتایج روش کومار و هال [۲۹]، آیتو و ماتسویی [۲۲] و روش پیشنهادی در این مقاله

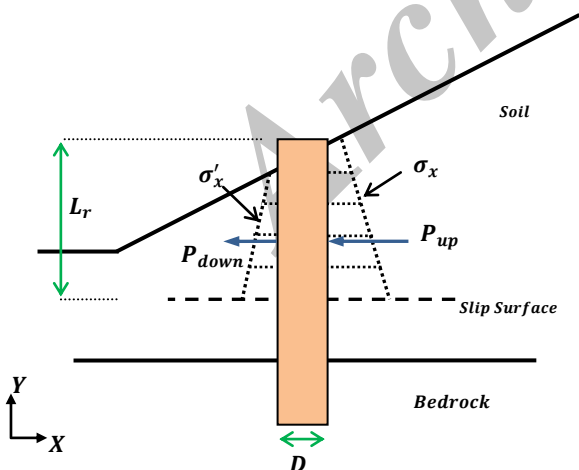


شکل (۵) نتایج ارائه شده به وسیله‌ی ون وهمکارانش ۶ همکارانش [۶]

### ۴- محاسبه جابه‌جایی سر شمع

همان گونه که گفته شد در استفاده از شمع به منظور پایدار نمودن شیب‌های خاکی فرض بر این است که شمع به اندازه کافی (۵ برابر قطر) در لایه‌ی پایدار خاک نفوذ کرده است. نفوذ کافی شمع در لایه‌ی پایدار باعث می‌شود تا شمع در مقابل حرکت شیروانی مانند یک تیر طره عمل نماید و در سر شمع بیشترین جابه‌جایی ایجاد شود. در این قسمت به روابط مربوط به محاسبه‌ی این جابه‌جایی پرداخته می‌شود.

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در دانشگاه آکرون [۱۶ و ۲۱ و ۲۴ و ۳۰] نیروی وارد بر شمع در پایین دست نسبت



شکل (۷) نمایی شماتیک از توزیع تنش روی شمع در بالای سطح

گسیختگی [۱۶]

$$\eta = \frac{P_{down-slope}}{P_{up-slope}} \quad (12)$$

$$X = X_P + X_M \quad (17)$$

$X_P$  = جابه‌جایی ناشی از نیروی گسترده

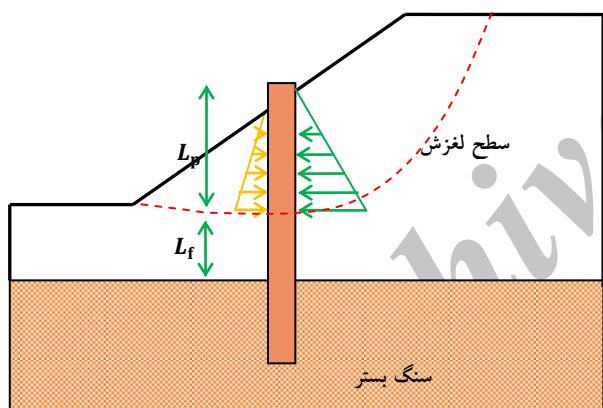
$X_M$  = جابه‌جایی ناشی از گشتاور

$$F_{\text{Acting Force}} = \frac{qL_p}{2} \rightarrow q = \frac{2F_{\text{Acting Force}}}{L_p} = \frac{2(1-\eta)\alpha(SF_T - SF_0)F_W}{L_p} \quad (18)$$

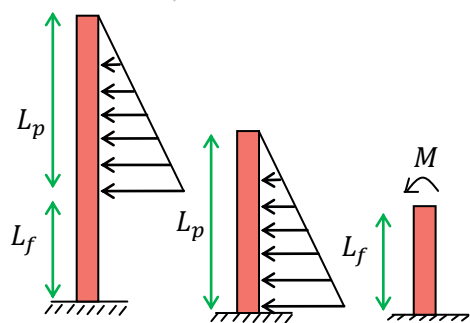
برای قسمت فوقانی شمع در بالای سطح گسیختگی معادله دیفرانسیل زیر حاکم است [۲۳].

$$EI \left( \frac{d^4 x}{dy^4} \right) = q(y) \quad (19)$$

بنابراین با انتگرال‌گیری متوالی از معادله‌ی  $q(y)$  و اعمال شرایط مرزی می‌توان مقدار جابه‌جایی سر شمع را محاسبه نمود. با محاسبه‌ی جابه‌جایی سر شمع برای دو حالت نشان داده شده در شکل (۹) می‌توان جابه‌جایی کل را محاسبه نمود.



شکل (۸) شکل شماتیک توزیع تنش بالادست و پایین دست شمع



شکل (۹) اصل جمع آثار قوا برای محاسبه جابه‌جایی سر شمع

برای محاسبه‌ی جابه‌جایی سر شمع، با محاسبه ضریب  $\eta$  مشخص بودن نیروی وارد بر شمع در بالا دست (رابطه ۱۴) می‌توان مقدار نیروی منتقل شده به پایین دست را محاسبه نمود. با داشتن مقادیر دو نیروی بالا دست و پایین دست (و تفریق آنها از یکدیگر) می‌توان مقدار نیرویی که موجب جابه‌جایی شمع می‌شود را محاسبه نمود. (رابطه ی ۱۶). حال با داشتن نیرویی که موجب جابه‌جایی شمع می‌شود می‌توان مقدار جابه‌جایی سر شمع را محاسبه نمود. همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است طول شمع بالای سنگ بستر به دو قسمت، بین سطح گسیختگی و سنگ بستر ( $L_f$ ) و بین سطح گسیختگی و سطح زمین ( $L_p$ ) تقسیم می‌شود.

$$\eta = -0.272c^{0.153}(\tan \beta)^{-0.429} \left( -1.17 + 1.114 \frac{S}{D} \right) \times \left( e^{(-0.578 \tan \phi)} \right) (0.065 + 0.876D) \times \left( -0.252 + 0.61 \xi - 0.57(\xi^2) \right) \quad (13)$$

که  $\eta$  عددی بین صفر و یک است ( $0 \leq \eta \leq 1$ )

$C$  = چسبندگی خاک (psi)

$\phi$  = زاویه اصطکاک خاک

$\beta$  = زاویه شیب

$D$  = (فوت) قطر شمع

$S$  = (فوت) فاصله بین شمع‌ها

$\xi = \frac{x}{r}$  = موقعیت نصب شمع‌ها

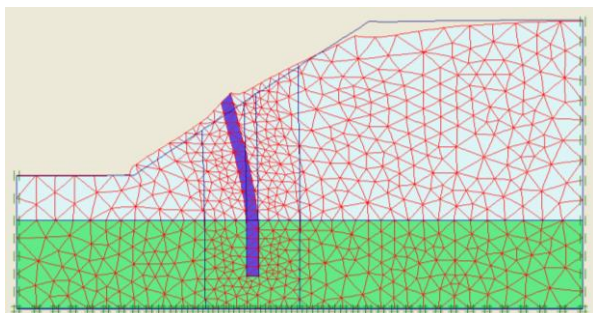
$$F_{\text{up-slope}} = \alpha(SF_T - SF_0)F_W \quad (14)$$

$$F_{\text{Down-slope}} = \eta F_{\text{up-slope}} = \eta \alpha(SF_T - SF_0)F_W \quad (15)$$

$$F_{\text{Acting force}} = F_{\text{up-slope}} - F_{\text{Down-slope}} \rightarrow F_{\text{Acting force}} = (1 - \eta)\alpha(SF_T - SF_0)F_W \quad (16)$$

برای محاسبه جابه‌جایی می‌توان با استفاده از اصل جمع آثار قوا تاثیر نیروی وارد بر بالای سطح گسیختگی و گشتاور حاصل از آن نیرو بر قسمت زیر سطح گسیختگی را محاسبه نمود.

مشاهده می‌شود مقادیر محاسبه شده برای جابه‌جایی سر شمع با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ هماهنگی خوبی با مقادیر حاصل از تحلیل عددی پلاکسیس دارد. در شکل (۱۰) شبکه‌ی تغییر شکل یافته‌ی شیروانی قابل مشاهده است.



شکل (۱۰) شبکه‌ی تغییر شکل یافته‌ی شیروانی و شمع

جدول (۵) نتایج جابه‌جایی سر شمع،

حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی و نرم افزار پلاکسیس

$\eta$	جابه‌جایی رابطه‌ی پیشنهادی (mm)	جابه‌جایی تحلیل عددی پلاکسیس (mm)
۰/۱۹	۸۴	۹۴

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر شمع پیشنهاد شده است که علاوه بر هماهنگی خوب آن با دیگر روش‌های پیشنهادی، در فواصل کم و خیلی زیاد بین شمع‌ها مقادیر قابل قبولی می‌دهد. روش پیشنهاد شده برای تعیین نیروهای وارد بر شمع جواب‌های منطقی و قابل قبولی ارائه می‌دهد که این نتایج در زمانی که فواصل شمع بیشتر از سه برابر قطر شمع باشد بیشتر از نتایج حاصل از روش آیتو و ماتسویی است ولی در فواصل کم که روش آیتو و ماتسویی نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. نتایج این روش منطقی به نظر می‌رسد. همچنین یک رابطه‌ی تحلیلی برای تعیین تغییر مکان سر شمع در دامنه‌ی شیب ارائه شده است که هماهنگی خوبی

مقدار جابه‌جایی برای حالت (الف) از شکل ۹ برابر با مقداری است که در رابطه‌ی ۲۰ ارائه شده است.

$$X_P = \frac{8qL_P^4}{60EI} = \frac{4(1-\eta)\alpha(SF_T-SF_0)F_W L_P^3}{15EI} \quad (20)$$

مقدار جابه‌جایی حالت (ب) برابر است با

$$X_M = \frac{(1-\eta)\alpha(SF_T-SF_0)F_W L_P L_F^2}{6EI} \quad (21)$$

از طرفی داریم:

$$X = X_P + X_M =$$

$$\frac{4(1-\eta)\alpha(SF_T-SF_0)F_W L_P^3}{15EI} + \frac{(1-\eta)\alpha(SF_T-SF_0)F_W L_P L_F^2}{6EI}$$

$$X = \frac{(1-\eta)\alpha(SF_T-SF_0)F_W L_P}{60EI} (16L_P^2 + 10L_F^2) \quad (22)$$

برای درستی آزمایشی رابطه‌ی فوق به حل یک مثال پرداخته شده است.

### ۴-۱- حل یک مثال برای محاسبه‌ی جابه‌جایی سر شمع

در این مثال یک شیروانی به ارتفاع ۱۴ متر و شیب ۳۵ درجه مورد تحلیل قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود شیروانی از دو لایه تشکیل شده است که مشخصات مصالح این لایه‌ها و شمع در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۴) مشخصات مصالح شیروانی و شمع

	$\gamma(kN/m^3)$	$c(kN/m^2)$	$\phi$	$E(kN/m^2)$
خاک ناپایدار	۱۹	۲۰	۱۰	$1/2 \times 10^4$
خاک پایدار	۲۲	۵۰	۵۰	$7 \times 10^4$
شمع	۲۴	الاستیک	الاستیک	$2 \times 10^7$

با محاسبه‌ی تغییر مکان سر شمع از رابطه‌ی ۲۲ و روش اجزای محدود پلاکسیس، مقادیر مشخصی برای تغییر مکان جابه‌جایی سر شمع به دست آمده است که این مقادیر به همراه مقدار  $\eta$  در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه



- Geotech Geoenviron Eng, ASCE 1997;123(4):314-23.
- 12- Huang CC, Tsai CC, Chen YH. "Generalized method for three-dimensional slope stability analysis", J Geotech Geoenviron Eng, ASCE 2002;128(10):836-48.
  - 13- Chen WF. "Limit analysis and soil plasticity", New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
  - 14- Ausilio E, Conte E, Dente G. "Stability analysis of slopes reinforced with piles", Comput Geotech, 2001, 591-611.
  - 15- Nian TK, Chen GQ, Luan MT, et al. "Limit analysis of the stability of slopes reinforced with piles against landslide in non-homogeneous and anisotropic soil", J Geotech Geoenviron Eng, ASCE 2008, 45:1092-103
  - 16- Liang R, Erfani Joorabchi A, Li L. "Design Method for Drilled Shaft Stabilization of Unstable Slopes", Geo-Congress, ASCE, 2013
  - 17- Won J, You K, Jeong S, Kim S "Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems", Comput Geotech, 2005 304-315
  - 18- Wei WB, Cheng YM "Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles", Comput Geotech, 1176-1185
  - 19- Cai F, Ugai K. "Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles", Soils Found, 2000, 73-84
  - 20- Newmark N M. "Effects of earthquakes on dams and embankments" Geotechnique, 1965, 139-160.
  - 21- Joorabchi A E, Liang R, Li L. "Yield acceleration and permanent displacement of a slope reinforced with a row of drilled shafts", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 68-77
  - 22- Ito T, Matsui T. "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles", Soils Found, 1975, 43-59
  - 23- Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos L, Gazetas G. "Hybrid Method for Analysis and Design of Slope Stabilizing Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012.
  - 24- Liang R Y, Yamin M M. "Three dimensional finite element study of arching behavior in slope / drilled shafts system", Int J Numer Anal Methods Geomech 2010, 1157-68.
  - 25- Hassiotis S, Chameau JL, Gunaratne M. "Design method for stabilization of slopes with piles", J Geotech Geoenviron Eng ASCE 1997, 314-23.
  - 26- Lee CY, Hull TS, Poulos HG. "Simplified pile-slope stability analysis", Comput Geotech 1995, 1-16.
  - 27- Li X; He S; Wu Y. "Seismic Displacement of Slopes Reinforced with Piles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010.
  - 28- Broms, B. "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", J. Soil Mech. Found. Div, 1964, 123-156.

با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود دارد. با داشتن مقدار ضریب اطمینان اولیه و ضریب اطمینان نهایی مورد نیاز برای شیروانی و همچنین وزن گوه گسیخته شده می‌توان مقدار نیروی وارد بر هر شمع را محاسبه نمود. بهترین مکان برای نصب شمع که برای پایداری شیب نصب می‌شود یک سوم میانی از دامنه‌ی شیب است. با تعیین نیروی وارد بر شمع و با استفاده از اصل تجمیع آثار قوا می‌توان جابه‌جایی سر شمع را با دقت خوبی محاسبه نمود. در مجموع، رابطه‌ی پیشنهادی در این مقاله مکمل رابطه‌ی آیتو و ماتسویی است که ضعف آن را در فواصل کم بین شمع‌ها مرتفع کرده است.

## ۶- مراجع

- 1- Ashour M, Ardalan H. "Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction" Computers and Geotechnics 2012
- 2- Ito T, Matsui T, Hong PW. "Design method for stabilizing piles against landslide one row of piles", Soils Found 1981.21-37.
- 3- Poulos HG. "Design of reinforcing piles to increase slope stability", Can Geotech J 1995, 808-18.
- 4- Chen LT, Poulos HG. "Piles subjected to lateral soil movements", J Geotech Geoenviron Eng ASCE 1997;123(9):80 .
- 5- Zeng S, Liang R. "Stability analysis of drilled shafts reinforced slope", Soils Found 2002;42(2):93-102.
- 6- Won J, You K, Jeong S, Kim S. "Coupled effects in stability analysis of soil-pile systems", Comput Geotech 2005;32(4):304-15.
- 7- Wei WB, Cheng YM. "Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles", Comput Geotech 2009;36:1176-85.
- 8- Kourkoulis R, Gelagoti F. "Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights", J Geotech Geoenviron Eng, ASCE 2011; 137(7):663-77.
- 9- Huang M, Wang H, Sheng D Liu Y. "Rotational-translational mechanism for the upper bound stability analysis of slopes with weak interlayer", Comput Geotech, 2013
- 10- Alkasawneh W, Malkawi AH, Nusairat JH, et al. "A comparative study of various commercially available programs in slope stability analysis", Comput Geotech, 2008
- 11- Hassiotis H, Chameau JL, Gunaratne M. Design method for stabilization of slope with piles. J

31- Hajiazizi M, Mazaheri A H. "The Use of the line segments slip surface for location optimization of pile in stabilization of earth slopes", International Journal of Civil Engineering, Volume 13,2015, 14-27.

29- Kumarh S & Hall M "An approximate method to determine lateral force on piles or piers installed to support a structure through sliding soil mass" Geotechnical and Geological Engineering, 2006.  
30- Robert Liang, Lin Li. "Reliability based design for drilled shafts for slope stabilization", Geotechnical Special Publication, ASCE,GSP;2013;2004-13.

Archive of SID

Research Note:

## **A New Method for Estimating of displacement and Lateral Force Acting on Stabilizing Piles in Earth Slope**

**M. Hajiazizi<sup>1\*</sup>, A. R. Mazaheri<sup>2</sup>**

1- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Division, Dept. of Eng., Razi University

2- Ph.D Students, Geotechnical Eng. Division, Dept. of Eng., Razi University

mhazizi@razi.ac.ir

### **Abstract:**

What should be considered at the beginning of any stabilization process besides slope safety is the minimization of expenses. Therefore, excavation on slope upstream and/or filling slope downstream and/or moderating slope angle are the primary and effective stabilization methods. If these methods cannot provide the desirable factor of safety it would be necessary to put effort in other methods such as increasing soil strength parameters, draining surface water and sub-surface (ground) water at embankments, and installing retaining walls and piles. Implementation of these solutions is usually costly and sometimes in order to achieve a desirable factor of safety it is necessary to combine one or several methods. Anyway, the aforementioned solutions are aimed at mitigating the driving force behind ruptures and/or increasing resistive forces. Slopes stabilization methods can be studied as empirical, analytical, and numerical methods. This classification has been so far used by researchers and has undergone numerous studies. One of the methods used for improving resistive forces is the installation of piles in earth slopes. Installing piles for stabilizing susceptible earth slope is an effective way of preventing the imbalance of force and instability. Stabilizing effect by using pile is provided by the passive resistance of the pile below the slip surface and load transfer from the sliding mass to the underlying stationary soil or rock formation through the piles due to soil arching mechanism. Moreover, slope stability and optimizing pile location by installing a row of piles have been studied by many researchers. The piles are embedded in the stable soil by the length  $5D$  ( $D$ =pile diameter), because the zone of influence of each pile has been demonstrated not to exceed  $5D$  and the length of the pile is restricted to  $10D$ . Huang et al. have studied the Shuping landslide in the Gorges Dam Reservoir which was active in 2003. They installed instruments at different parts of the landslide and recorded landslide behaviors under the influence of rainfall and changes in the dam reservoir water level for 10 consecutive years. The slope motion velocity was about 0.5 mm per day.

In this paper a new method is presented for estimating of displacement and lateral force acting on stabilizing piles in earth slopes. The growth mechanism of lateral force acting on stabilizing piles in a row due to the surrounding ground undergoing plastic deformation is discussed, and its theoretical analysis is carried out considering the interval between the piles (Ito and Matsui, 1975). Several methods have been proposed to determine the force exerted on the pile in addition to having the merits, defects such as lack of accuracy required in a particular interval between the piles. In this paper with regarded to initial slip surface and acting force due to weight of failed soil is proposed lateral force acting on piles. The assumptions are considered in this paper are,

1. The suitable location for installing of piles is middle of slope.
2. The pile behavior is considered as elastic.
3. The soil behavior is considered as elastoplastic.
4. The pile tip is embedded in the stable soil by the length  $5D$ .

**Keywords:** Earth Slope, Lateral force on pile, Pile displacement, Stabilization.