

# توجیه استفاده از پوشش قیری در کاهش اصطکاک منفی شمع و بررسی

## نتایج آزمایشگاهی موثر

سعید غفارپور جهرمی<sup>۱</sup>

مدرس دانشکده عمران دانشگاه شهید رجایی

دانشجوی دکتری خاک و پی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

اصطکاک منفی جداره شمع، از پدیده‌های منحصر بفرد شمعهای انکابی قرار گرفته شده در خاک‌های نرم و تراکم‌پذیر می‌باشد. این پدیده با اعمال نیروی بسیار بزرگ و بطرف پایین بر شمع، می‌تواند موجب گسیختگی سازه‌ای مصالح شمع و نشست بیش از حد آن می‌گردد، لذا ارائه راه‌حل عملی و کارآمد جهت کاهش این نیرو لازم به نظر می‌رسد. تا کنون روشهای متعدد توسط محققان برای کاهش اصطکاک منفی پیشنهاد شده است که از رایجترین این روشها استفاده از یک لایه نازک قیر بر جداره شمع می‌باشد. وجود لایه قیر بر جداره شمع از تماس مستقیم خاک با شمع ممانعت می‌کند و قیر بعنوان یک عامل کاهش‌دهنده اصطکاک عمل می‌کند. در این مقاله با توجه کارآمدی این روش در استفاده از حداکثر ظرفیت باربری سرویس شمع، نتایج بررسی آزمایشگاهی عملکرد قیر در کاهش اصطکاک منفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با استفاده از قیرهای رایج در ایران، مکانیسم اصطکاک جداره یک شمع پوشیده شده از یک لایه نازک قیر، توسط آزمایش برش مستقیم شبیه‌سازی و مدل می‌شود. نتایج آزمایشها نشان‌دهنده کارایی قابل قبول لایه قیر در کاهش اصطکاک تا حدود ۸۰ درصد می‌باشد، لذا می‌تواند در ایران بعنوان یک روش کاملا اقتصادی، ارزان، عملی و با کارایی بالا مطرح گردد. این روش هم‌اکنون در بسیاری از کشورها بعنوان روش عملی در کاهش نیروی اصطکاک منفی و افزایش بار سرویس شمعها مورد استفاده قرار می‌گیرد اما متأسفانه در کشور ما بعلافت فقدان دانش لازم و قدرت ریسک جایگاه مناسبی نیافته است. کلمات کلیدی: شمع، پوشش قیر، اصطکاک منفی، ظرفیت باربری.

## Excusable of Using Bitumen Coating to Reduce Negative Skin Friction on Piles and Experimental Investigations

Saeed Ghaffarpour Jahromi

Teacher of Shahid Rejayi University

P.h.d Student of Soil and Foundation of Amirkabir University of Technology

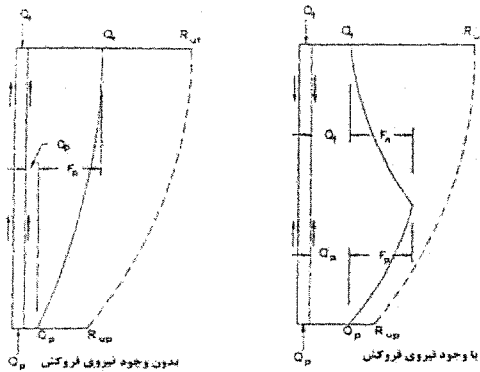
### Abstract:

Negative skin friction is one of the phenomena that always exists on piles. This phenomenon is more important in the case of End-Bearing piles which are placed in compressible soil layers. In many cases it applies very big forces on piles that causes the failure of pile structure and very high settlements. Therefore, we need to find a solution in order to reduce this force. So far many methods have been suggested on this problem. The common method to reduce the said force is using bitumen for coating piles. Bitumen layer prevents direct contact between soil and pile, which results in reduction of friction. There are some criteria to select suitable bitumen with high performance that depend on real condition of bitumen coating. This paper presents a method for selecting suitable bitumen. Verification has been done using common bitumen in Iran and modeling skin friction with direct shear test and decisive parameters on performance of bitumen coatings. During the said test using bitumen coats reduction of more than 80 percent was experienced. Therefore it was concluded that our method can be used as an economical and high efficiency method to increase bearing capacity of the piles to a great extent. Nowadays, strategies are used to reduce negative friction force in many countries, but in unfortunately on our country this has been done rarely because of the little knowledge about it.

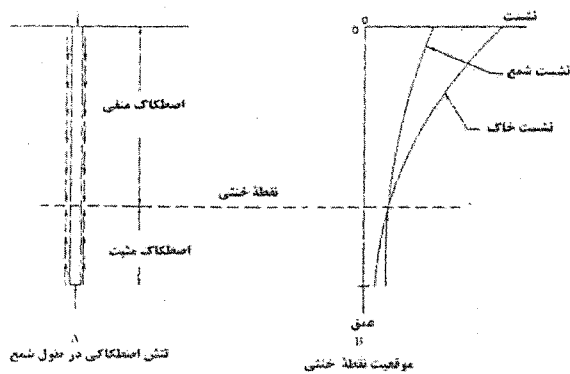
### Keyword

Piles, Bitumen coat, Negative Skin Friction, Bearing Capacity.

<sup>۱</sup> - E\_mail : Ghf\_Saeed@aut.ac.ir



شکل ۱



شکل ۲

اعمال بار بر شمع باعث جابجایی آن به درون خاک می‌شود و تنش برشی در فصل مشترک خاک-شمع به طرف بالا فعال می‌گردد. این طول از شمع تحت تنش اصطکاکی مثبت قرار دارد (شکل a-1). در شمع اتکایی، فرض می‌شود که نوک شمع در لایه سخت نفوذ می‌کند و بدنه آن درخاکی با سختی نسبتاً کمتر (تراکم‌پذیر) قرار گرفته است. تحت این شرایط، با جابجایی رو به پایین خاک اطراف شمع (نشست خاک)، تنش برشی به طرف پایین فعال می‌شود که به اصطکاک منفی جلدی (فروکش) معروف است (شکل b-1). همچنین در شمع اصطکاکی، اصطکاک منفی زمانی ایجاد می‌شود که نشست خاک اطراف شمع بیش از جابجایی شمع باشد. اصطکاک منفی، نیرویی بطرف پایین بر شمع اعمال خواهد کرد که از ظرفیت باربری شمع می‌کاهد و به نیروی فروکش موسوم است (Downdrag) [7]. نیروی ناشی از اصطکاک منفی می‌تواند باعث گسیختگی و شکست مصالح شمع، گسیختگی خاک نوک شمع و یا نشست زیاد ناشی از تغییرشکل الاستیک شمع و نفوذ در لایه باربر گردد. نشست خاک که مولد نیروی اصطکاک منفی است، ناشی از بارگذاری عوامل مختلف بر لایه خاک است: ایجاد خاکریز، پایین رفتن سطح آب زیرزمینی، یخ‌گشایی خاکهای منجمد، نشست خاکریزها تحت اثر وزن خود و یا تحکیم مجدد خاکهای نرم دست خورده شده توسط شمع کوبی [5].

نشست خاک تا نقطه خاصی که نقطه خنثی نامیده می‌شود بیش از جابجایی شمع است (شکل ۲). تنش برشی فعال شده تا این عمق، نیروی اصطکاک منفی ( $Q_n$ ) بر شمع اعمال می‌نماید. از این عمق به بعد، جابجایی شمع بیش از نشست خاک است و تنش برشی فعال در این قسمت، نیروی اصطکاک مثبت یعنی مقاومت اصطکاکی ( $Q_p$ ) ایجاد می‌نماید (شکل a-2). با این توضیحات، ظرفیت باربری شمع را چنین می‌توان بیان نمود:

$$Q_{ult} = Q_t + Q_s - Q_n \quad (1)$$

در این رابطه  $Q_t$  مقاومت اتکایی شمع است. در نقطه خنثی حرکت نسبی شمع-خاک صفر فرض می‌شود یعنی جابجایی شمع با نشست خاک در آن عمق برابر است. در شمع اتکایی (شمع متکی بر بستر سخت غیر قابل تراکم)، جابجایی شمع فقط ناشی از تراکم مصالح آن است لذا موقعیت نقطه خنثی در نزدیکی لایه سخت (نوک شمع) قرار دارد و نیروی اصطکاک منفی بیشترین مقدار ممکن را دارد. هرچه قابلیت تراکم و تغییرشکل‌پذیری بستر تحتانی بیشتر باشد، نفوذ و جابجایی شمع در لایه بیشتر است و نقطه خنثی در فاصله بیشتری از نوک قرار می‌گیرد. این فاصله تابعی از منحنی نشست خاک و منحنی جابجایی شمع می‌باشد.

### اصطکاک منفی شمعها:

شرایط مختلفی وجود دارد که می‌تواند باعث فعال شدن اصطکاک منفی شمع گردد. توزیع این تنش در عمق، تابع پارامترهای زیر است [۱]:

- خصوصیات شمع شامل هندسه، روش نصب، مشخصات و خواص سطح مقطع.
- خصوصیات خاک شامل مقاومت، تراکم‌پذیری، عمق لایه و سختی لایه باربر.

- میزان جابجایی و نشست خاک نسبت به شمع و سرعت آن.
  - مدت زمان بین اجرای شمع و بارگذاری.
- باتوجه به موارد ذکر شده در فوق، پیچیدگی‌های زیادی در محاسبه مقدار دقیق نیروی اصطکاک و محاسبه ظرفیت باربری شمع وجود دارد اما کنترل آن در شرایط زیر لازم و ضروری می‌باشد [۱]:
- نشست سطح زمین بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر.
  - نشست سطح زمین بعد از کوبش یا شمع‌کوبی بیش از ۱۰ میلی‌متر.
  - ارتفاع خاکریز ایجاد شده بر سطح زمین بیش از ۲ متر.
  - ضخامت لایه سست تراکم‌پذیر بیش از ۱۰ متر.
  - کشیده شدن سطح سفره آب‌زیرزمینی بیش از ۴ متر.
  - طول شمع بیش از ۲۵ متر.
- روشهای مختلفی توسط محققان جهت محاسبه نیروی اصطکاک منفی ارائه شده است که همگی مبتنی بر فرضیات متفاوت رفتار خاک مجاور شمع و همچنین توزیع نیروی اصطکاک منفی در منطقه نشست می‌باشد. این نیرو با اعمال بار اضافی بر شمع از باربری سرویس شمع می‌کاهد که ارائه راه‌حلی اقتصادی و قابل قبول در کاهش این نیرو لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

### پوشش قیری جداره شمع و کاهش اصطکاک منفی:

راه‌حلهای مختلف جهت کاهش اصطکاک منفی جداره شمع، مورد بررسی محققان بسیاری قرار گرفته است:

۱. پیش‌بارگذاری خاک قبل از کوبش شمع به منظور تسریع نشست [۲].
  ۲. کاهش نشست شمع‌ها با استفاده از گروه شمع [6].
  ۳. استفاده از روش الکترو-اسموزی [۲].
  ۴. استفاده از شمع دوجداره که شمع خارجی نیروی فروکش را تحمل می‌کند و شمع داخلی بار سازه‌ای سرویس را متحمل می‌شود [۲].
  ۵. ساخت شمعی با نوک بزرگ‌تر از قطر شمع و کوبش آن. در این روش فضای ایجاد شده بین جدار شمع و لایه خاک با یک ماده کاهش‌دهنده اصطکاک مثل دوغاب بنتونیت پر می‌شود [۲].
  ۶. ایجاد حفره‌ای با قطری بیش از قطر شمع در خاک و اجرای شمع در آن تا فضای اضافی توسط دوغاب بنتونیت پر شود [۲].
  ۷. پوشش شمع با یک ماده کاهش‌دهنده اصطکاک مثل قیر، ورق پلی‌اتیلن و... [4].
  ۸. افزایش ظرفیت باربری شمع با افزایش قطر، طول یا تعداد شمع تا نیروی فروکش قابل تحمل باشد [۲].
- انتخاب این روش‌ها بر اساس معیارهایی چون هزینه‌اجرا، کارایی و امکانات اجرایی توجیه می‌شود. با ارزیابی و مقایسه این روشها (جدول ۱) مشخص می‌شود که روش اقتصادی، ساده، اجرایی و با کارایی بالا، استفاده از پوشش قیری در کاهش اصطکاک منفی است. توجیه این گفته در زیر تشریح می‌گردد.

کارایی	هزینه اجرا	روش
متوسط تا زیاد	متوسط (زمان زیاد)	پیش‌بارگذاری
متوسط	متوسط - زیاد	گروه شمع
متوسط	زیاد	الکترواسموز
زیاد	زیاد	شمعهای دوجداره
پایین	پایین	نوک بزرگ شده+دوغاب بنتونیت
پایین	متوسط	پیش‌حفری+دوغاب بنتونیت
زیاد	پایین	استفاده از پوشش قیری
متوسط-زیاد	متوسط-زیاد	افزایش طول و قطر شمع

### توجیه کارایی پوشش قیری

ظرفیت باربری یک شمع، مجموع مقاومت اصطکاک و مقاومت اتکالی نوک آن می‌باشد. مقاومت اصطکاک مجموع مقاومت برشی خاک و جدار شمع ( $T_s$ ) در طول شمع است. این مقاومت تابع عوامل مختلف چون: جنس خاک، نوع و جنس شمع، شرایط بارگذاری، شرایط زهکشی، روش اجرا،

چگونگی جابجایی و مقدار جابجایی شمع می‌باشد. ظرفیت باربری بصورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_t \quad (2)$$

در این رابطه  $Q_s$  و  $Q_t$  به ترتیب مقاومت اصطکاکی و مقاومت اتکایی نوک شمع می‌باشد. مقاومت اصطکاکی چنین محاسبه می‌شود:

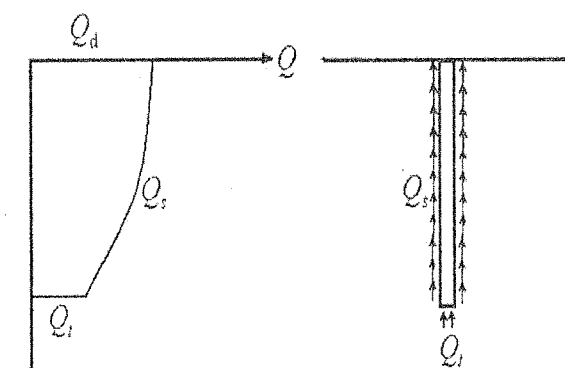
$$Q_s = \int_A r_s A_p(z) dz \quad (3)$$

مقاومت اصطکاکی شمع از روشهای مختلف چون روش  $\beta$  بر اساس تنش موثر، روش  $\alpha$  بر اساس تنش کل، روش  $\lambda$  و همچنین روشهایی چون آیین‌نامه API و CFEM تعیین می‌شود.

در حالت ایده‌آل فرض می‌شود که با کوبش شمع در یک خاک هموزن، تمامی مقاومت اصطکاکی و مقاومت نوک با اعمال بار و جابجایی شمع بطور کامل فعال می‌شوند (شکل ۳). شرط لازم برای فعال شدن این مقاومتها، وجود تغییرمکان نسبی لازم بین شمع و خاک است بطوری که جابجایی شمع باید بیش از نشست خاک باشد (شکل ۵). حال اگر بنا به دلایلی، نشست خاک تا عمق مشخصی بیش از شمع باشد، تنش اصطکاک منفی بر جداره شمع ایجاد می‌شود. این پدیده زمانی قطعی خواهد بود که شمع متکی بر یک بستر سخت باشد و خاک اطراف شمع دچار نشست گردد (شکل ۵). در این اشکال مقادیر  $Q_d$ ،  $Q_s$ ،  $Q_n$  و  $Q_t$  به ترتیب بار سرویس، مقاومت اصطکاکی مثبت، مقاومت اصطکاکی منفی و مقاومت نوک می‌باشد. برای حصول شرایط تعادل باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$Q_d + Q_n = Q_s + Q_t \quad (4)$$

اگر شرایط بارگذاری بر خاک به گونه‌ای باشد که خاک دچار نشست تحکیمی زیاد گردد، و شمع نیز به یک بستر مقاوم و سخت متکی باشد (بیش از سه برابر قطر در بستر سخت نفوذ کرده باشد)، بدلیل سختی متفاوت خاک و شمع، نشست خاک در لایه‌های فوقانی بیش از جابجایی شمع است لذا وجود اصطکاک منفی بر جداره قطعی است (شکل ۵).



شکل ۳: شمع تحت اثر اصطکاک مثبت

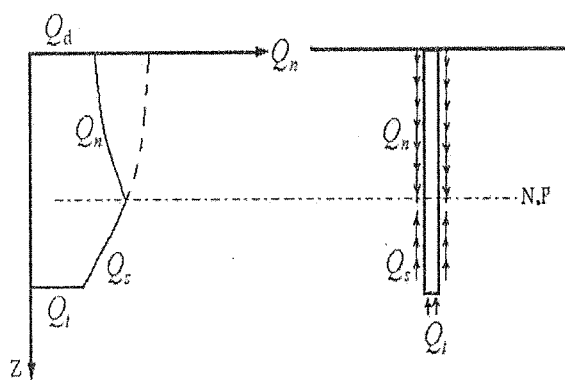
تا عمقی از شمع که اصطکاک منفی بر شمع عمل می‌نماید (نقطه خنثی)، تنش محوری در شمع افزایش می‌یابد و با تنشهای ناشی از بار سرویس افزوده می‌شود (شکل ۴). با افزایش تنش محوری، در طراحی سازه شمع نیاز است قطر شمع نیز افزایش یابد. با افزایش قطر، سطح جانبی نیز بیشتر می‌شود که با نیروی اصطکاک منفی رابطه مستقیم دارد. لذا افزایش قطر کمکی به حل مسئله نمی‌کند بلکه لازم است به نوعی تنش اصطکاکی منفی کاهش یابد.

حداکثر باری که می‌توان به عنوان بار سرویس بر شمع اعمال نمود چنین بیان می‌شود:

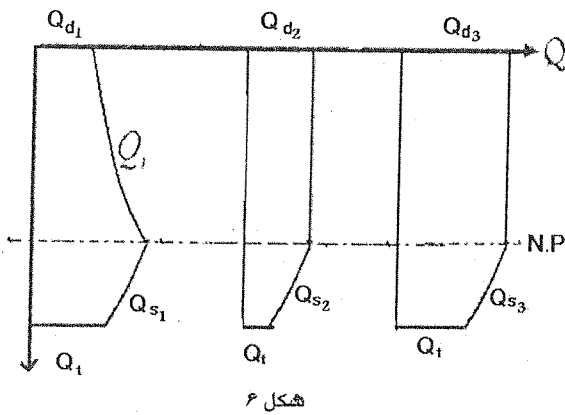
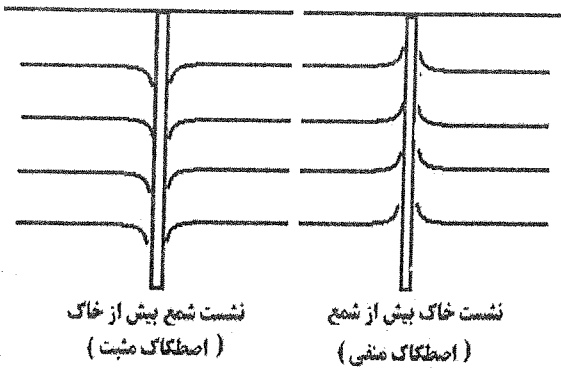
$$Q_{ult} = Q_d = Q_t + Q_s - Q_n \quad (5)$$

با توجه به رابطه فوق مشخص است که اصطکاک منفی ظرفیت باربری سرویس شمع را کاهش می‌دهد.

برای حذف تنش اصطکاک منفی جدار شمع لازم است شمع جابجایی و نشست بیشتری نسبت به خاک مجاور داشته باشد (شکل ۵). نشست سطح زمین در بسیاری موارد، گاهی تا ده‌ها سانتیمتر می‌رسد، لذا حذف کامل اصطکاک منفی جداره نیازمند جابجایی شمع به همین مقدار است که این مقدار نشست، باعث گسیختگی شمع می‌گردد. در چنین شرایطی باز هم ارائه راه‌حلی جهت کاهش اصطکاک منفی منطقی و ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۴: شمع تحت اثر اصطکاک منفی



با کاهش و حذف نیروی اصطکاک منفی، ظرفیت باربری سرویس شمع نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است بار سرویس بیشتری را می‌توان در زمان حذف اصطکاک منفی بر شمع وارد نمود.

در محاسبات کاربردی، تنش اصطکاک منفی با تنش اصطکاک مثبت از نظر مقدار یکسان فرض می‌شود همچنین نتایج محققان نشان داده است که در خاکهای تحکیمی، تا عمقی حدود  $\frac{2}{3}$  طول شمع، تنش اصطکاک منفی بر جدار

شمع وجود دارد (شکل ۴). این بدان معنی است که  $\frac{2}{3}$  ظرفیت باربری اصطکاک شمع نه تنها حذف شده است بلکه به همین مقدار از ظرفیت باربری باقیمانده نیز کاسته می‌شود.

در شرایطی که اصطکاک منفی وجود ندارد ظرفیت باربری برابر است با (شکل ۳):

$$Q_{ult} = Q_t + \int_0^l r_s A_p z dz = Q_t + (r_s A_p l) \quad (6)$$

در شرایطی که  $\frac{2}{3}$  طول شمع تحت اثر اصطکاک منفی

باشد داریم:

$$Q_s = \int_0^{\frac{l}{3}} r_s A_p z dz = \frac{1}{3} r_s A_p l \Rightarrow Q_n = \int_0^{\frac{2l}{3}} r_s A_p z dz = \frac{2}{3} r_s A_p l \Rightarrow$$

$$Q_{ult} = Q_t + Q_s - Q_n = Q_t - \frac{1}{3} r_s A_p l \quad (7)$$

با مقایسه روابط ۶ و ۷ مشخص می‌شود که ظرفیت باربری سرویس در اثر اصطکاک منفی شدیداً کاهش یافته است. مقدار

مقاومت اصطکاک در ظرفیت باربری از مقدار  $(r_s A_p l)$  به مقدار  $(-\frac{1}{3} r_s A_p l)$  کاهش می‌یابد.

حال نشان می‌دهیم که با استفاده از پوششهای قیری می‌توان تا حد زیادی ظرفیت بهره‌برداری شمع را تحت بار سرویس افزایش داد. نتایج تحقیقاتی نشان می‌دهند اگر لایه قیر با ضخامت مناسب بر جداره شمع ایجاد شود، می‌تواند مقاومت اصطکاک در فصل مشترک خاک و شمع را حتی تا ۹۰ درصد نیز کاهش دهد و به حدود ۱۰ درصد مقاومت برشی خاک برساند. در این شرایط و با فرض اینکه شمع تا عمق  $\frac{2}{3}$  طول با یک لایه قیر پوشانده شده است، ظرفیت باربری چنین

محاسبه می‌شود:

$$Q_s = \int_0^{\frac{l}{3}} r_s A_p z dz = \frac{1}{3} r_s A_p l \Rightarrow Q_n = \int_0^{\frac{2l}{3}} (10\% r_s) A_p z dz = \frac{2}{30} r_s A_p l \Rightarrow$$

$$Q_{ult} = Q_t + Q_s - Q_n = Q_t + \frac{4}{15} r_s A_p l \quad (8)$$

با مقایسه رابطه ۷ و ۸ مشخص می‌شود که ظرفیت باربری اصطکاکی از مقدار  $(-\frac{1}{3}r_s A_p l)$  تا  $\frac{4}{15}r_s A_p l$  حدود ویسکوزیته  $\eta$  است. افزایش می‌یابد.

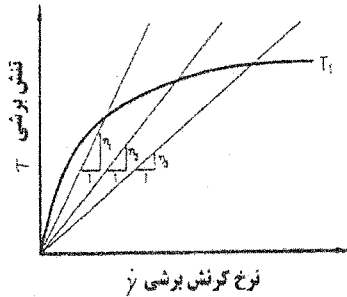
### انتخاب مناسب‌ترین قیر:

انتخاب قیر مناسب مستلزم شناخت رفتار قیر است. رفتار قیر متفاوت از خاک است و بصورت ویسکوز غیرخطی مدل می‌شود. رفتار برشی قیر وابسته به نرخ کرنش برشی  $(\dot{\gamma})$  و ویسکوزیته  $\eta$  است:

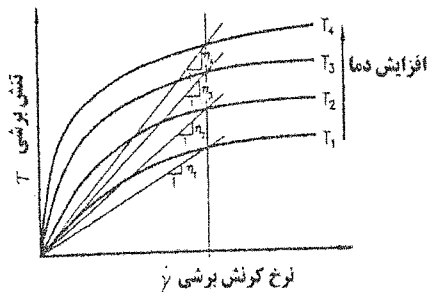
$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (9)$$

ویسکوزیته قیر با تغییرات دما و نرخ کرنش برشی دچار نوسان می‌شود:  
 • در دمای ثابت، افزایش نرخ کرنش برشی با افزایش تنش برشی و کاهش ویسکوزیته همراه است (شکل ۷).

• در نرخ کرنش برشی ثابت، کاهش دما باعث افزایش ویسکوزیته می‌گردد (شکل ۸).



شکل ۷: تاثیر نرخ کرنش برشی بر ویسکوزیته



شکل ۸: تاثیر دما بر ویسکوزیته

پارامترهای چندی در انتخاب قیر مناسب موثرند:

- ۱- تنش برشی خاک (در طول شمع)
  - ۲- نوع خاک و توزیع اندازه ذرات (آزمایش دانه‌بندی)
  - ۳- وزن مخصوص خاک
  - ۴- دمای خاک (میانگین دمای سالیانه هوا)
  - ۵- نرخ نشست خاک بصورت تابعی از زمان (آزمایش تحکیم با توجه به شرایط زهکشی)
  - ۶- دمای هوا در زمان ایجاد پوشش، مدت زمان قبل از کوبش و زمان کوبش شمع
  - ۷- تغییر شکل لایه قیر قبل از کوبش و در زمان کوبش
- جزئیات بیشتر در انتخاب قیر مناسب در مرجع ۱ تشریح شده است.

### بررسی آزمایشگاهی عوامل موثر

کارایی لایه قیر در کاهش اصطکاک تابع عوامل مختلفی است که رفتار قیر و خاک تاثیرگذارترین عامل و پارامترهای دیگر در ارتباط با اندرکنش این دو سنجیده می‌شوند. این عوامل عبارتند از:

- نوع خاک و اندازه ذرات (دانه‌بندی و بزرگترین قطردانه)، سرعت بارگذاری و نشست، وزن مخصوص، تراکم و دمای خاک.
  - نوع قیر، ویسکوزیته، درجه نرمی، درجه نفوذ، دمای محیط، ضخامت لایه قیری و سرعت اجرای شمع.
- با توجه به اثر عوامل مختلف در تنش اصطکاکی جداره شمع، تلاش شد تا با انجام تست‌های آزمایشگاهی، عوامل مهم در رفتار ماتریس خاک-قیر - جداره با استفاده از قیرهای رایج در ایران مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای چندی در این آزمایشها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند که عبارتند از: ضخامت لایه قیری، تغییرات تنش عمودی (تاثیر تنش افقی در اعماق خاک)، نوع قیر، تغییرات دما، دانه‌بندی خاک، تغییرات نرخ کرنش برشی و تاثیر نیروهای سیکلی شمع.

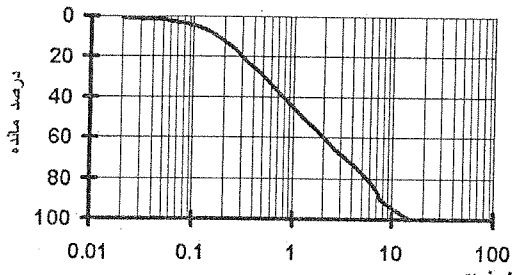
### مصالح مصرفی:

انجام آزمایشها با استفاده از قیرهای مرسوم و پرکاربرد در بازار ایران انجام شدند. دو نوع قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ که به راحتی در دسترس بوده و به سهولت قابل تهیه می‌باشند، در این آزمایشها مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که تنوع قیرهای تولیدی در کشور زیاد است، نمی‌توان مشخصات و رفتار یکسانی برای آنها تصور نمود، لذا مشخصه‌های رفتاری آنها از طریق

نوع قیر	درجه نرمی	درجه نفوذ	دمای اشتعال
قیر ۶۰-۷۰	۵۲	۶۶	۲۸۵
قیر ۸۵-۱۰۰	۴۲	۹۲	۲۴۵

آزمایش تعیین می‌شوند. این آزمایشها شامل آزمایش اشتعال، آزمایش تعیین درجه نرمی، آزمایش تعیین درجه نفوذ و آزمایش ویسکوزیته قیر است. نتایج این آزمایشها در جدول ۲ آمده است.

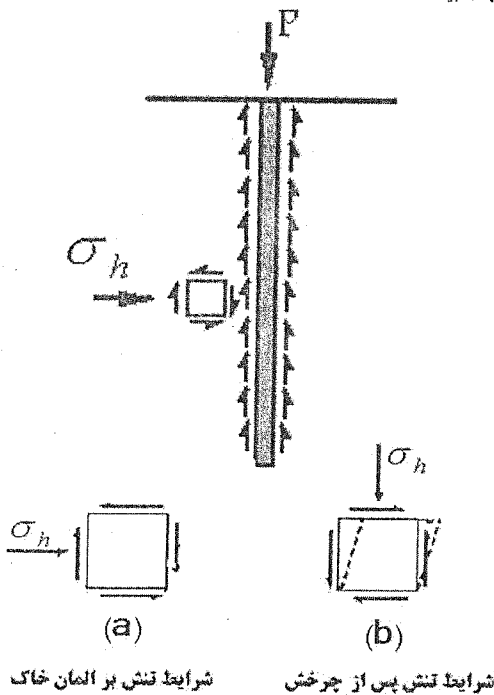
با توجه به حساسیت رفتاری تنش اصطکاکی جداره شمع به نوع خاک و همچنین امکان استنتاج از نتایج آزمایشها، لازم است که کلیه آزمایشها تحت شرایط یکسان با استفاده از یک نوع خاک صورت پذیرد. لذا از یک نوع خاک دانه‌ای ماسه‌ای SP با منحنی دانه‌بندی شکل ۹ در کلیه آزمایشها استفاده گردید. این خاک از گودبرداری محلی در عمق ۶ متری تهیه شد. این خاک به سه رده مختلف تقسیم شدند. خاک از ۳ نوع الک ۴، ۱۰، ۱۶ با حداکثر ابعاد ۴/۷۶، ۲ و ۱/۱۹ میلی‌متر گذرانده شدند تا اندازه بزرگترین دانه در هر نمونه خاک متفاوت باشد.



### انتخاب نوع آزمایش:

اعمال بار محوری بر شمع باعث ایجاد تغییرمکان و جابجایی شمع می‌گردد. این جابجایی باعث فعال شدن تنش برشی در فصل مشترک خاک و شمع می‌گردد. اگر در فصل مشترک خاک و شمع، المانی از خاک را در نظر بگیریم، تنشهای اعمالی بر آن مطابق شکل ۱۰ خواهد بود. با چرخش ۹۰ درجه این المان مقدار تنش ثابت است ولی شرایط تنش نسبت به المان تغییر می‌کند.

اعمال تنش برشی بر المان خاک باعث تغییر شکل آن می‌شود که این شرایط را می‌توان با آزمایش برش ساده (Simple Shear Test) مدل نمود. از آنجا که در بررسی اثر اصطکاک منفی فقط اندازه‌گیری مقاومت اصطکاکی مد نظر است، آزمایش برش مستقیم برای مدل کردن رفتار اصطکاکی صحیح به نظر می‌رسد. با توجه به نواقص زیاد آزمایش برش مستقیم و عدم امکان ایجاد تغییر شکل المان خاک، ممکن استفاده از این آزمایش منطقی به نظر نیاید ولی این آزمایش می‌تواند پارامترهای مقاومتی خاک را با دقت خوبی تعیین نماید.



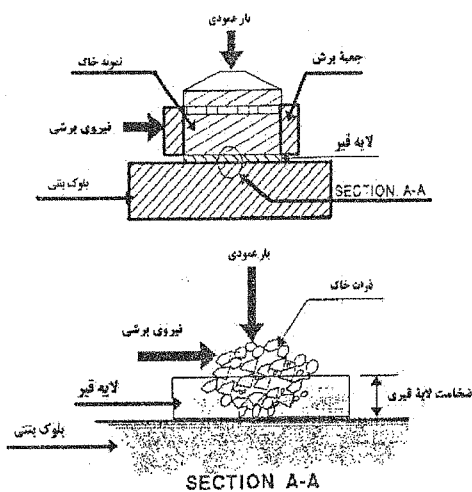
شکل ۱۰

### ساخت نمونه‌های آزمایش:

در این تحقیق از دستگاه برش مستقیم ۱۰×۱۰ استفاده گردید تا بتوان اصطکاک بین خاک + قیر + شمع را با تهیه نمونه‌هایی خاص مدل کرد. شبیه‌سازی مکانیسم اصطکاک جدار شمع و پوشش قیری به هنگام حرکت نسبی آنها، با ساخت بلوک بتنی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱/۲ سانتیمتر انجام شد. درون بلوک بتنی شبکه‌ای از مفتول سیمی قرار داده شد تا در اثر فشار مرحله ساخت و در طول آزمایش دچار شکست نگردند. سطح بلوک بتنی با لایه نازکی از قیر پوشیده و در نیمه پایینی جعبه برش قرار داده می‌شود.

سپس نیمه بالایی جعبه برش با احتیاط و در یک فاصله معین از سطح بتن پایین آورده شد. از آنجا که برش در ضعیفترین صفحه ممکن و در فصل مشترک خاک و قیر رخ می‌دهد، لازم است فاصله طوری تنظیم شود که برش در این

صفحه اتفاق افتد. در صورت عدم توجه به محل صفحه برش در طول آزمایش، اگر برش در خاک رخ دهد مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به تنش اصطکاکی ذرات خاک و اگر برش در قیر رخ دهد، مقادیر مربوط به قیر می‌باشد. بنابراین در این مورد باید



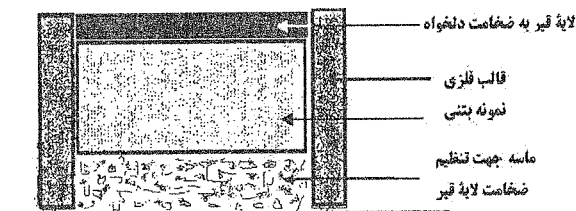
شکل ۱۱

بررسی نتایج آزمایشها:

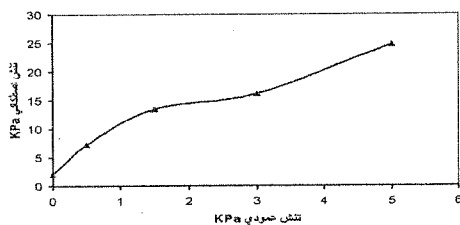
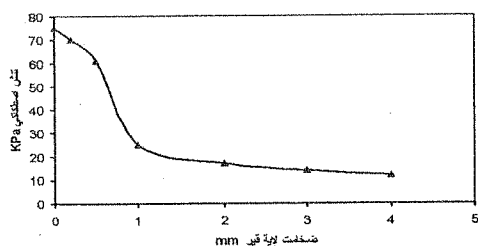
تأثیر ضخامت لایه قیر

با استفاده از قیر ۷۰-۶۰ لایه نازکی به ضخامت‌های مختلف روی چند بلوکهای بتنی ایجاد شد. با ساخت قالب فلزی و تنظیم فاصله بین لبه قالب فلزی و سطح بلوک مطابق شکل ۱۲، لایه قیر به ضخامت دلخواه ایجاد می‌شد. بلافاصله پس از ریختن قیر، سطح آن با یک تیغه فلزی کاملاً صاف می‌شد. لایه قیر به ضخامت ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر روی بلوک ایجاد شدند. از آنجا که امکان ایجاد ضخامت‌های کمتر از ۱ میلی‌متر با استفاده از این روش قدری مشکل بود، نمونه بتنی در درون قیر مذاب فرو برده و بلافاصله بیرون کشیده می‌شدند تا ضخامت نازکی از قیر در سطح آن باقی بماند. آزمایش برش مستقیم تحت شرایط یکسان به شرح زیر انجام گرفت:

- تنش عمودی برابر ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع
- نرخ اعمال تنش برشی برابر ۰/۰۸ میلی‌متر در دقیقه
- نوع قیر ۶۰/۷۰ از نوع تجاری
- خاک ماسه‌ای SP با حداکثر اندازه ۲ میلی‌متر
- شرایط آزمایش در حالت اشباع
- دمای آزمایش برابر  $18 \pm 2$  درجه سانتیگراد.



نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، در شکل ۱۳ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه قیر، تنش برشی کمتر می‌گردد. لایه قیر توانست تنش اصطکاکی را تا ۸۰ درصد کاهش دهد. تنش برشی با افزایش ضخامت تا حد مشخصی کاهش می‌یابد. اگر ضخامت قیر از حدی بیشتر گردد (۳ میلی‌متر)، عملاً تأثیری زیادی در کاهش بیشتر تنش برشی ندارد و اگر ضخامت لایه کمتر از ۱ میلی‌متر باشد، دیگر هیچ کاهش تنش اصطکاکی نداریم.



شکل ۱۳

تأثیر تنش عمودی

تأثیر فشار جانبی خاک اعماق زمین بر پوشش قیری را می‌توان در این آزمایشها با تغییر تنش عمودی تعیین نمود زیرا در آزمایش برش مستقیم، تنش عمودی بیانگر تنش افقی است. ایجاد یک خاکریز ۶ تا ۱۰



متری، باعث اعمال تنش افقی بر جداره شمع می‌شود لذا مقادیر ۰/۵ و ۱/۵ و ۳ و ۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بعنوان تنش عمودی آزمایش، انتخاب شدند. شرایط یکسان در این آزمایشها عبارتند از:

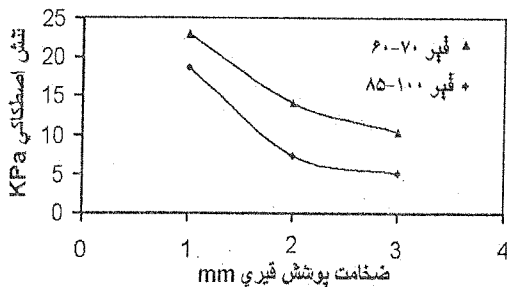
- ضخامت لایه قیر ۳ میلیمتر
- نرخ اعمال تنش برشی برابر ۰/۰۸ میلیمتر در دقیقه
- نوع قیر ۶۰/۷۰ از نوع تجاری
- خاک ماسه‌ای SP با حداکثر اندازه ۲ میلیمتر
- دمای آزمایش برابر  $18 \pm 2$  درجه سانتیگراد
- شرایط آزمایش در حالت اشباع

نتایج حاصل در شکل ۱۴ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش عمودی، مقدار تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. در تنش عمودی ۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مقدار تنش برشی به طور ناگهانی افزایش یافت که علت این امر می‌تواند ناشی از نفوذ ذرات خاک در لایه قیر و بروز رفتار الاستو-اصطکاکی در ماتریس خاک-قیر باشد.

### تاثیر نوع قیر

رفتار قیر در شرایط مختلف، وابسته به عوامل زیادی است. تاثیر نوع قیر بر مقدار تنش اصطکاکی جداره با استفاده از قیرهای رایج در ایران، قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ انجام شد. کلیه آزمایشها تحت شرایط یکسان و بر تعدادی نمونه مشابه انجام شد و فقط نوع قیر در آنها متفاوت بود. شرایط یکسان آزمایشها عبارتند از:

- تنش عمودی برابر ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع
- ضخامت لایه قیر ۲ میلیمتر
- نرخ اعمال تنش برشی برابر ۰/۰۸ میلیمتر در دقیقه
- خاک از نوع با حداکثر اندازه ۲ میلیمتر
- شرایط آزمایش در حالت اشباع
- دمای آزمایش برابر ۱۸ درجه سانتیگراد.



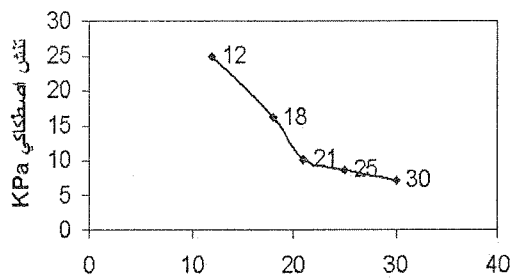
شکل ۱۵

شکل ۱۵ نتایج این آزمایشها نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که رفتار متفاوت قیرها در مقابل تنش اصطکاکی، به مقدار زیادی وابسته به نوع قیر است. سختی قیر با

درجه نفوذ آن بیان می‌شود، درجه نفوذ کم بیانگر قیر سخت و درجه نفوذ زیاد نشانه قیر نرم است. هرچه قیر نرمتر باشد (درجه نفوذ بیشتر) تاثیر بیشتری در کاهش تنش اصطکاکی جداره دارد و بالعکس. حساسیت قیرها نسبت به تغییرات دما با درجه نرمی بیان می‌شود. درجه نرمی بالا نشانگر حساسیت کم قیر در مقابل تغییرات دما می‌باشد، یعنی درجه نفوذ و ویسکوزیته آن کمتر دچار تغییر می‌گردد. در نتیجه شکل ۱۵ نشان می‌دهد که قیر ۸۵/۱۰۰ تنش برشی را در مقایسه با قیر ۶۰/۷۰ بیشتر کاهش می‌دهد.

### تاثیر تغییرات دما

رفتار برشی قیر نسبت به تغییرات دما بسیار حساس است. تغییر دما باعث تغییر ویسکوزیته و به تبع آن تغییر در کرنش برشی و تنش برشی قیر می‌گردد. آزمایشهایی بر تعدادی نمونه مشابه و در شرایط یکسان انجام گردید. آزمایشها انجام شده در دماهای ۱۲، ۱۸، ۲۱، ۲۵، ۳۰ درجه سانتیگراد انجام شدند. تغییرات دما روی نمونه‌ها بر اساس امکانات موجود آزمایشگاه و تحت شرایط اشباع با استفاده از آب با تغییرات حدود  $\pm 1$  درجه ایجاد شدند. قبل از انجام آزمایش نمونه‌ها به مدت حداقل ۳۰ دقیقه در آبی که دمای آن برابر با دمای انجام آزمایش بود، نگهداری شدند تا در طول آزمایش تغییرات دمای نمونه اندک باشد. شرایط یکسان حاکم بر آزمایشها به صورت زیر بودند:



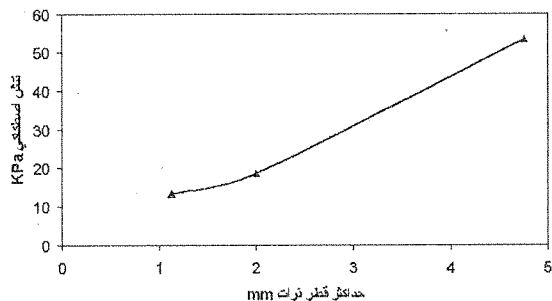
شکل ۱۶

نتایج حاصل در شکل ۱۶ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما، تنش اصطکاکی را کاهش می‌دهد. مقدار و شدت کاهش تنش برش، به حساسیت قیر نسبت به دما وابسته است. تغییر اندک دما، تنش اصطکاکی را به مقدار زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش دما از ۱۲ درجه به ۱۸ درجه، تنش اصطکاکی را ۴۰ درصد کاهش و افزایش دما به ۲۱ درجه تنش اصطکاکی را ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. در دمای ۲۵ درجه تنش اصطکاکی ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

نسبت کاهش تنش اصطکاکی با افزایش دما مقدار مشخص و معینی ندارد و به نوع قیر وابسته است. تغییر دما باعث تغییرات بسیار وسیعی در مشخصه‌های رئولوژیکی و مقدار ویسکوزیته قیر می‌شود که با تغییر نرخ کرنش برشی، رفتار برشی لایه قیر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اگر دما از حد مشخصی بالاتر رود و باعث نرمی بیش از حد قیر و روان شدن آن گردد، ذرات خاک براحتی در چنین پوششی نفوذ کرده و خود را به جداره شمع می‌رسانند و باعث بالا رفتن تنش اصطکاکی می‌گردد.

#### تاثیر تغییرات دانه‌بندی

شکل، اندازه و توزیع ذرات یک خاک (دانه‌بندی خاک)، رفتار اصطکاکی ماتریس خاک-قیر-جداره شمع را تحت تاثیر قرار می‌دهد. قطر بزرگترین دانه خاک بیشترین اثر را بر پوشش قیری دارد. نفوذ این ذرات در پوشش قیری باعث افزایش سختی لایه قیر و تنش برشی اصطکاکی می‌شود. نفوذ ذرات خاک در لایه قیر در طول زمان صورت می‌پذیرد لذا تاثیر نفوذ را باید با آزمایشهای دقیق و کامل و مبتنی بر زمان مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق خاک مورد نظر از نظر بزرگترین قطر دانه از سه نوع الک متفاوت گذرانده شد: حداکثر اندازه ۴/۷۶، ۲ و ۱/۱۲ میلیمتر. تاثیر بزرگی قطر ذره نسبت به لایه قیر، تحت شرایطی مشابه و یکسان مورد بررسی قرار گرفت:



شکل ۱۷

- تنش عمودی برابر ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع
- نرخ اعمال تنش برشی برابر ۰/۰۸ میلیمتر در دقیقه
- نوع قیر ۶۰/۷۰ و از نوع تجاری
- شرایط آزمایش در حالت اشباع
- ضخامت لایه قیر ۲ میلیمتر
- دمای آزمایش برابر ۱۸ درجه سانتیگراد

نتایج حاصل در شکل ۱۷ آمده است. آنچه مشخص است اندازه

و نوع دانه‌بندی ذرات خاک، از عوامل مؤثر در تنش اصطکاکی می‌باشد. با بزرگتر شدن قطر ذرات خاک، تنش اصطکاکی نیز به طور محسوسی افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به درگیری و نفوذ بیشتر ذرات خاک در پوشش قیری و افزایش تنش اصطکاکی دانست. در نتیجه باید گفت که در خاکهای درشت دانه، نفوذ ذرات خاک در لایه قیر باید کنترل شود تا کارایی و عملکرد مناسبی در کاهش اصطکاک داشته باشد.

تاثیر لایه قیری در کاهش نیروی اصطکاک منفی توسط مشخصات شمع، خاک و ماده قیری کنترل می‌شود. در خاکهای ریزدانه رفتار لایه قیری به میانگین سرعت نشست لایه خاک وابسته است، در حالی که در خاکهای درشت دانه، ذرات خاک به

آهستگی در پوشش قیری نفوذ کرده و باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در تنش اصطکاک می‌گردند و لایه قیری در این مرحله بعنوان یک ماده ویسکو-اصطکاکی با مشخصات بسیار پیچیده رفتار میکند.

### تاثیر نرخ کرنش (سرعت نشست خاک):

تاثیر نرخ کرنش در رفتار برشی قیر کاملاً روشن و مشخص است. نرخ کرنش بیانگر سرعت نسبی نشست خاک و شمع است. فرآیند تحکیم و نشست لایه خاک با سرعت بسیار کندی صورت می‌گیرد لذا سرعت بارگذاری شمع نیز به همین نسبت پایین است. در این تحقیق با انجام چند آزمایش اولیه، در مورد نرخ بارگذاری نمونه‌ها تصمیم‌گیری شد. همانطور که در شرح آزمایش‌های قبلی گفته شد انجام کلیه آزمایشها در نرخ کرنش  $0.08/1$  میلیمتر در دقیقه انجام گردید. هرچند این سرعت در مقابل سرعت نشست خاک، نسبتاً بزرگ است. با کاهش سرعت بارگذاری (کاهش نرخ کرنش برشی)، مقاومت اصطکاکی نیز کمتر می‌شود (با فرض ثابت بودن ویسکوزیته). در این آزمایشها، نرخ کرنش برشی  $(\dot{\gamma})$  برابر با نرخ تغییر مکان یادداشت شده نیمه بالایی جعبه برش در نظر گرفته شد. تاثیر نرخ کرنش برشی  $(\dot{\gamma})$  بر حداکثر مقاومت اصطکاکی همانند اثر تغییرات دما است. افزایش نرخ کرنش برشی تا مقدار  $10$  برابر باعث افزایش مقاومت برشی پوشش قیری تا حد  $2$  تا  $3$  برابر گردید. بر این اساس تمامی آزمایشها تحت نرخ برشی ثابت انجام شد و نتایج نیز با هم مقایسه گردید.

### تاثیر نفوذ ذرات خاک در رفتار پوشش قیری:

یکی از مهمترین عوامل موثر کارایی پوشش قیری در کاهش اصطکاک، ضخامت لایه و بحث نفوذ ذرات خاک در آن است. ذرات خاک تحت اثر تنش افقی در طول زمان در لایه قیر نفوذ می‌کنند. بحرانی‌ترین زمان نفوذ ذرات زمانی است که سرعت نشست حداکثر باشد. پس از تراکم اولیه سرعت نشست بطور پیوسته و یکنواخت کاهش می‌یابد. اگر سرعت نشست کم باشد و خاک نیز رسی باشد، یک لایه نازک قیر کافی است تا تنش اصطکاکی را کاهش دهد. نوع و مشخصات قیر، حداکثر اندازه ذرات خاک و دمای خاک، از عوامل موثر نفوذ ذرات در طول عمر مفید لایه قیر است. پوشش قیری جهت حفظ کارایی خود باید ضخامت حداقلی داشته باشد.

شرایط نشست تحکیمی و بروز پدیده اصطکاک منفی بیشتر در خاکهای ریزدانه رخ می‌دهد لذا ذرات درگیر با پوشش قیری، ریزدانه و در حد اندازه حداکثر  $2$  میلیمتر می‌باشند. در چنین شرایطی که بحث نفوذ ذرات بدلیل کوچک بودن قطر مطرح نیست، لایه بسیار نازک  $2$  تا  $3$  میلیمتری قیر، جهت کاهش اصطکاک منفی شمعها کافی است ولی با توجه به احتمال وجود ذرات بزرگ و نفوذ آنها، ضخامت لایه باید حداقل  $10$  میلیمتر در نظر گرفته شود. در خاک‌های درشت‌دانه، ضخامت پوشش قیری باید بتواند نفوذ ذرات را تحمل نموده و کارایی خود را از دست ندهد. در چنین خاکهایی ضخامت لازم بیش از  $10$  میلیمتر است و ایجاد آن از نظر اجرایی بسیار مشکل است.

با توجه به مطالب بیان شده لازم است ذکر شود که ذرات خاک به آرامی و در طول زمان در لایه قیر نفوذ می‌کنند و مشخصه‌های رفتاری لایه را تحت تاثیر قرار می‌دهند، اما سرعت نفوذ بسیار کند و آرام است، بطوری که بدلیل ثابت بودن دما در اعماق زمین، آزمایشهای محققان نشان داده است که خاکی با حداکثر اندازه  $2$  میلیمتر در طول مدت  $50$  سال، حدود  $10$  میلیمتر در لایه نفوذ خواهد کرد.

### رفتار شمعهای قیرپوش شده تحت اثر نیروهای سیکلی:

رفتار شمعهای پوشش شده با قیر تحت بارهای سیکلی هنوز در مراحل اولیه تحقیقات محققان قرار دارد. می‌توان پیش‌بینی کرد که اعمال بار سیکلی، در فصل مشترک خاک و شمع تغییر مکان سیکلی ایجاد می‌کند و به تبع آن تنش سیکلی برشی در فصل مشترک خاک-قیر-شمع بوجود می‌آید. تغییر مکان سیکلی شمع در زمان حرکت رو به پایین باعث حذف تنش اصطکاکی منفی و در زمان حرکت رو به بالا باعث افزایش تنش اصطکاک منفی بر شمع می‌شوند. این پدیده در چند سیکل اول بسیار محسوس بوده و با کم شدن تراکم خاک اطراف شمع در هر سیکل، از شدت آن کاسته می‌شود. شدت تغییرات تنش به مقدار زیادی به مقدار تغییر مکان هر سیکل وابسته است.

در هر سیکل اعمال شده بر شمع، بدلیل افزایش تغییرمکان نسبی شمع و خاک، نفوذ ذرات خاک در پوشش قیری افزایش خواهد یافت. لذا احتمال از بین رفتن کارایی پوشش قیری پس از اعمال بار سیکلی بر شمع وجود دارد. با از بین رفتن اثر لایه قیری در کاهش اصطکاک، شمع تحت تاثیر نیروی اصطکاک منفی قرار خواهد گرفت. چنین شمع‌ی ظرفیت باربری کششی بیشتری نسبت به ظرفیت باربری فشاری دارد یعنی یک شمع بدون پوشش قیری و تحت اثر اصطکاک منفی دارای ظرفیت باربری کششی بیشتری نسبت به یک شمع قیر پوش شده است.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی:

تاثیر پوشش قیری در کاهش اصطکاک با مشخصات شمع، خاک و قیر کنترل می‌شود. پارامترهای زیادی در رفتار ماتریس خاک-قیر-بتن دخالت دارند و باید در انتخاب قیر مناسب و کارآمد مورد توجه قرار گیرد. با بررسی آزمایشگاهی اثر این پارامترها در رفتار برشی پوشش قیری در اندرکنش خاک و جدار بتنی شمع مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

۱. لایه قیر تا حد زیادی توانست تنش اصطکاکی را کاهش دهد. ضخامت کم لایه قیر، عملاً تاثیری در کاهش اصطکاک ندارد و علت آن نفوذ ذرات خاک در لایه نازک قیر و عدم کارایی آن می‌باشد. با افزایش ضخامت لایه قیر، تنش اصطکاکی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. اگر دانه‌بندی خاک تغییر نکند، فقط تا حد مشخصی می‌توان با افزایش ضخامت لایه قیری، تنش اصطکاکی را کاهش داد.
  ۲. هر چه تنش عمودی وارد بر پوشش قیری (تنش افقی وارد بر جداره شمع) بیشتر باشد، بعلت نفوذ ذرات خاک در پوشش قیری، تنش اصطکاکی بیشتر می‌شود.
  ۳. قیر مورد استفاده باید از یک طرف به حد کافی نرم باشد تا بتواند تنش اصطکاکی را کاهش دهد و از طرفی به حد کافی سخت باشد تا از نفوذ بیش از حد ذرات خاک به درون خود جلوگیری کند.
  ۴. با افزایش نرخ اعمال تنش برشی (نرخ کرنش برشی بر پوشش قیری)، مقاومت برشی اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد.
  ۵. تغییرات دما با عت تغییر رفتار قیر می‌شود. افزایش دما باعث نرمی قیر و نفوذ سریعتر ذرات خاک در آن می‌شود که در نتیجه سختی و تنش اصطکاکی افزایش می‌یابد.
  ۶. ذرات خاکی که در تماس مستقیم با پوشش قیری هستند، در اثر فشار وارده و در طول زمان به آهستگی در لایه قیری نفوذ می‌کنند. در این شرایط ضخامت لایه قیر باید متناسب با ذرات خاک و دانه‌بندی خاک انتخاب شود.
- با توجه به این نتایج و حساسیت پوشش قیری در کاهش اصطکاک، در مقیاس آزمایشگاهی، پوشش قیری توانست تا ۸۰ درصد اصطکاک را کاهش دهد. در عمل و تحت شرایط واقعی، تاثیر لایه قیر ممکن است دچار تغییر گردد لذا شاید این ایده به نظر برسد که از یک روش جایگزین و با مزایای زیر نسبت به پوشش قیری استفاده شود:
- عملکرد آن باید در تماس مستقیم بین سطح شمع و خاک مجاور باشد.
  - بادوام و با مقاومت برشی کم باشد تا اصطکاک جداره را کاهش دهد.
  - نسبت به دست‌خوردگی و تغییرات دما همانند پوشش قیری حساس نباشد.
  - در مقابل ذرات خاک و نفوذ آنها، کارایی خود را حفظ کند.
  - روش اجرایی ساده و مقرون به صرفه داشته باشد.

ایجاد لایه قیر در طولی از شمع که اصطکاک مثبت حاکم است (پایین‌تر از عمق نقطه خنثی)، کاملاً غیرمفید و غیراقتصادی است زیرا وجود اصطکاک مثبت این طول به ظرفیت باربری کمک می‌کند. ایجاد پوشش قیری باعث افزایش هزینه بین ۱۵ تا ۴۰ درصد می‌گردد ولی می‌تواند ظرفیت باربری سرویس را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. این روش بطور وسیع در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی متأسفانه در کشور ما بعلت دانش اندک، قدرت ریسک کم و عدم توجه کافی به موضوع اصطکاک منفی، جایگاهی مناسبی نیافته است.

مراجع:



- [۱] سعید غفارپور جهرمی و دکتر شاهکار شاهنگیان، "تاثیر بکارگیری پوشش‌های قیری در کاهش اصطکاک منفی شمعها"، رساله کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۰)
- [۲] سعید غفارپور جهرمی و دکتر شاهکار شاهنگیان، "روشهای مختلف کاهش نیروهای فروکش بر جداره پی‌های عمیق" سمینار کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۰)

- [3] Briaud, J. L., "Group effect in the Case of Downdrag." Geotechnical Engineering Congress, Geotechnical special Publication No. 27, ASCE, 1991.
- [4] Briaud, J. L., "Bitumen Selection for Reduction of Downdrag on Piles." Geotechnical and Geoenvironmental Eng. J., Vol. 123, No. 12, 1997.
- [5] Davisson, M. T., "Negative skin Friction in Piles and Design Decisions." 3<sup>rd</sup> Inter. Conf. On Case Histories in Geo. Eng., Rolla, Vol. 3, 1993.
- [6] F. Kuwabara and H. G. Poulos, "Downdrag Forces In Group of Piles", Jour. Of Geotechnical Eng., Vol. 115, No. 6, 1988.
- [7] Little J. A., "Downdrag on Piles : Review and Recent Experimentation." Geotechnical Special Publication, Vol. 2 N. 40, 1994.