

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۲۹۹۲۷

دانشگاه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

عمران گرایش خاک و پی

محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

استادان راهنما

دکتر رضا پورحسینی

دکتر مهدی فلاح

استاد مشاور

دکتر کاظم برخوردار

اطلاعات بزرگ من  
تمت برآورد

۱۳۸۸/۷/۱

پژوهش و نگارش

محمد آهور

پاییز ۸۷

۱۲۶۹۸۶

تقدیم بہ:

پدر و مادر

آنانکہ حقیقت من، اخلاق من و نام من در دست آنان است و چنین یاد گرفتہ ام کہ وجودم را از

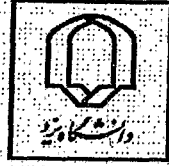
چشمان آنها بنم

## سپاسگزاری

ستایش و سپاس خدای را که به بنده‌ی کمترین خود مجال دیگری برای بهره‌مندی از گوشه‌ای از اقیانوس بی‌کران علم خود داد و در این راه حمایت و راهنمایی‌های جناب آقایان دکتر مهدی فلاح و دکتر رضا پورحسینی سرمایه‌ای بزرگ برای اینجانب بود. چه اگر پی‌گیری و هدایت‌های ایشان نبود سختی راه دو چندان می‌نمود. این سپاس از یکایک اساتیدی است که در راه دانش‌اندوزیم سهیم بوده‌اند علی‌الخصوص استاد مشاور اینجانب جناب آقای دکتر کاظم برخورداری که در محضر ایشان درس علم آموختم. سپاس از پدرم که مهرش بنایی شد برای کسب دانش و مادرم که مهرش در دلم گرمی و مقدس است. از کارشناسان محترم آموزش، خانم منتظر قائم، خانم فتاحی و خانم پیرمحمدزاده سپاسگزارم. از دوست عزیزم محمدحسن کلانتری و خانواده محترم ایشان نهایت امتنان را دارم. از دوستان بزرگووارم حامد رجائیان و رضا شایگان کمال تشکر و قدردانی دارم. در ادامه از دوستان عزیزم علیرضا امین، رسول رفیعی، امید عباسی، مرتضی کریم آبادی، طهماسب فلسفی، رضا شمس آبادی، هادی عزیزی، مازیار زارع پور، مجید توحیدی، علی پادگانگی، رضا هاشمی و مجتبی عابدیان نهایت تشکر و امتنان را دارم.

محمد آهور

یزد-پائیز ۸۷



مدیریت تحصیلات تکمیلی

صور تجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای محمد آہور

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه یزد، در رشته / گرایش : عمران - خاک

تحت عنوان « محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی »

وتعداد واحد: ۶ در تاریخ ۱۳۸۷ / ۹ / ۲۰

امضاء

نام ونام خانوادگی

باحضور اعضای هیات داوران متشکل از :

دکتر رضا پورحسینی - دکتر مهدی فلاح تفتی

۱- استاد راهنما

دکتر کاظم برخوردار

۲- استاد مشاور

دکتر سید محمد تقی المدرسی

۳- داور خارج از گروه

دکتر نادر عبدلی یزدی

۴- داور داخل گروه

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران ، با درجه بسیار خوب و نمره

مورد تصویب قرار گرفت.

به حروف لغفه ، بصفا در نوع صم

به عدد

۱۷/۷۸

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه ( ناظر)

نام ونام خانوادگی : دکتر علی دهقانی

امضاء:

## چکیده

شبکه های عصبی قادر به مدل نگاشت های غیر خطی اند و می توانند روابطی را که برای مشخص نیست درک کنند. در این تحقیق یک مدل شبکه عصبی برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمعه های صلب واقع در رس زهکشی نشده ارائه شده است. مشکل اصلی در تحلیل و طراحی شمعه های تحت بار جانبی رفتار غیر خطی جانبی خاک است زیرا مقاومت نهایی جانبی خاک به میزان حرکت جانبی شمع بستگی دارد. روشهای مختلفی برای مدل رفتار جانبی خاک ارائه شده است که هیچ یک اندرکنش خاک و شمع را در نظر نمی گیرند. مدل استفاده شده در این مقاله یک شبکه چند لایه پیش خور است که توابع محرک آن در لایه مخفی و خروجی توابع زیگموئید است. برای آموزش این شبکه از الگوریتم لوببرگ-مارکواردت استفاده شده است. از ۹ معیار مختلف برای مقایسه مدل شبکه عصبی و روشهای تجربی پیش بینی ظرفیت باربری جانبی شمع استفاده شده است: ماکزیمم، مینیمم، میانگین و انحراف معیار میان ظرفیت باربری جانبی اندازه گیری شده و ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده، میانگین و انحراف معیار نسبت ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده به ظرفیت باربری جانبی اندازه گیری شده، مجذور میانگین مربعات خطای میان ظرفیت باربری جانبی اندازه گیری شده و ظرفیت باربری پیش بینی شده و ضریب همبستگی میان ظرفیت باربری جانبی اندازه گیری شده و ظرفیت باربری پیش بینی شده و احتمال تجمعی برای. برای تعیین متغیرهای ورودی مهم از الگوریتمهای مختلف آنالیز حساسیت استفاده شد. برای نشان دادن اثر فیزیکی هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی شبکه یک دیاگرام تفسیر شبکه ارائه شد.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول ( شمع تحت بار جانبی )
۲	۱-۱. مقدمه
۳	۲-۱. مکانیسم گسیختگی شمعهای تحت بار جانبی
۵	۳-۱. توزیع مقاومت جانبی خاک
۸	۴-۱. محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع
۹	۱-۴-۱. روش برینچ هانسن
۱۰	۲-۴-۱. روش برامز
۱۱	۱-۲-۴-۱. شمعهای واقع در رس
۱۷	۲-۲-۴-۱. شمعهای واقع در خاک دانه‌ای
۲۳	۵-۱. پیش‌بینی بار - جابجایی جانبی شمعهای تحت بار جانبی
۲۷	۱-۵-۱. آنالیز غیر خطی (روش استفاده از منحنی‌های $p-y$ )
۲۸	۶-۱. پیشینه علمی
۳۵	فصل دوم ( پیش‌بینی ظرفیت باربری جانبی شمع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی )
۳۶	۱-۲. شبکه عصبی
۳۶	۱-۱-۲. سلول عصبی (نرون)
۳۷	۲-۱-۲. توابع محرک
۳۸	۱-۲-۱-۲. تابع محرک سیگموئید
۳۹	۲-۲-۱-۲. تابع محرک تانژانت هیپربولیک
۴۰	۳-۲-۱-۲. تابع محرک خطی
۴۱	۲-۲. انتشار برگشت خطا
۴۲	۳-۲. نگاهت زوجهای آموزشی به حدود مناسب

۴۴	۴-۲. تعداد لایه های میانی
۴۵	۵-۲. تعداد نرونهای لایه مخفی
۴۶	۶-۲. سنجش میزان یادگیری و عملکرد شبکه
۴۶	۱-۶-۲. میانگین مربع خطاها
۴۸	۲-۶-۲. ضریب همبستگی بین خروجیهای حقیقی و خروجیهای شبکه عصبی
۵۰	۷-۲. تعمیر پذیری شبکه
۵۳	۸-۲. بیان مساله و روش حل آن
۶۰	۹-۲. آنالیز حساسیت
۶۷	۱۰-۲. دیاگرام تفسیر شبکه (NID)
۶۸	۱۱-۲. مدل شبکه عصبی داس و باسودهار
۷۰	۱۲-۲. آنالیز رگرسیون خطی
۷۳	فصل سوم ( تحلیل آماری و نتایج)
۷۴	۱-۳. مقایسه روشهای تجربی تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع با شبکه عصبی
۷۴	۱-۱-۳. تحلیل آماری
۷۷	۱-۱-۳. روش هانسن
۷۹	۲-۱-۳. روش براز
۸۱	۳-۱-۳. مدل شبکه عصبی داس و باسودهار
۸۲	۴-۱-۳. مدل شبکه عصبی طراحی شده در این تحقیق
۸۴	۲-۱-۳. احتمال تجمعی
۸۶	۲-۳. توزیع نرمال
۸۸	۳-۳. قضیه حد مرکزی
۸۹	۴-۳. آزمون یک ادعا درباره یک میانگین



۸۹	۳-۴-۱. آزمون فرض آماری
۹۴	۳-۵. نتیجه گیری
۹۶	پیوست الف. تعیین ظرفیت باربری جانبی یک شمع با استفاده از روشهای برامز و هانسن به انضمام برنامه کامپیوتری برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع با استفاده از روش هانسن
۱۰۸	پیوست ب. برنامه کامپیوتری جهت مدلسازی شبکه عصبی و خروجی های آن
۱۶۳	پیوست ج. جدول توزیع نرمال استاندارد
۱۶۵	منابع و مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. مکانیسم گسیختگی شمع کوتاه تحت بار جانبی. الف : شمع سر آزاد ب: شمع سر گیردار ۴
- شکل ۱-۲. مکانیسم گسیختگی شمع بلند تحت بار جانبی. الف : شمع سر آزاد. ب: شمع سر گیردار ۵
- شکل ۱-۳. توزیع مقاومت جانبی شمع واقع در خاک چسبنده ۶
- شکل ۱-۴. تأثیر ضریب شکل و چسبندگی بر روی ضریب مقاومت نهایی جانبی خاک ۷
- شکل ۱-۵. ضرایب  $K_{cz}$ ,  $K_{qz}$  در عمق  $z$  برای شمعهای کوتاه تحت بار جانبی ( هانسن ۱۹۶۱ ) ۸
- شکل ۱-۶. دیاگرام توزیع تنش خاک ، نیروی برشی و ممان خمشی در روش برینج هانسن ۱۰
- شکل ۱-۷. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای بلند واقع در رس ۱۲
- شکل ۱-۸. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای کوتاه واقع در رس ۱۴
- شکل ۱-۹. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای کوتاه سر گیردار واقع در رس ۱۵
- شکل ۱-۱۰. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای سر گیردار با طول متوسط واقع در رس ۱۶
- شکل ۱-۱۱. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای بلند سر گیردار واقع در رس ۱۷
- شکل ۱-۱۲. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای کوتاه سر آزاد واقع در خاک دانه‌ای ۱۸
- شکل ۱-۱۳. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای بلند سر آزاد واقع در خاک دانه‌ای ۱۹
- شکل ۱-۱۴. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای کوتاه سرگیردار واقع در خاک دانه‌ای ۲۰
- شکل ۱-۱۵. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای متوسط سرگیردار واقع در خاک دانه‌ای ۲۱

- شکل ۱-۱۶. دیاگرام توزیع تنش خاک و ممان خمشی در روش برامز برای شمعهای بلند سرگیردار واقع در خاک دانه‌ای
- شکل ۱-۱۷. تعیین معادلات حاکم بر شمع: آلمانی از شمع در عمق Z خاک
- شکل ۱-۲. ساختار یک سلول عصبی (نرون) و تابع تحریک
- شکل ۲-۲. تابع محرک سیگموئید
- شکل ۲-۳. تابع محرک تانزانت هیپربولیک
- شکل ۲-۴. تابع محرک خطی
- شکل ۲-۵. توقف زود هنگام شبکه برای جلوگیری از آموزش مبالغه‌ای
- شکل ۲-۶. میانگین مربع خطای داده‌های آموزش و تست برای ساختارهای با دو نرون در لایه مخفی
- شکل ۲-۷. نمودار شبکه عصبی طراحی شده در این تحقیق
- شکل ۲-۸. میانگین مربع خطای داده‌های آموزش و تست مورد استفاده در آنالیز حساسیت برای ساختارهای با دو نرون در لایه مخفی
- شکل ۲-۹. دیاگرام NID برای شبکه عصبی طراحی شده در این تحقیق
- شکل ۲-۱۰. نمودار شبکه عصبی طراحی شده توسط داس و باسودهار
- فصل سوم
- شکل ۳-۱. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده توسط روش هانسن نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده‌های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش شبکه
- شکل ۳-۲. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده توسط روش هانسن نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده‌های مورد استفاده قرار گرفته در تست شبکه
- شکل ۳-۳. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده توسط روش هانسن نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده‌های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش و تست شبکه
- شکل ۳-۴. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده توسط روش برامز نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده‌های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش شبکه

- شکل ۳-۵. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط روش برامز نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در تست شبکه
- شکل ۳-۶. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط روش برامز نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش و تست شبکه
- شکل ۳-۷. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل داس و باسودهار نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش شبکه
- شکل ۳-۸. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل داس و باسودهار نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در تست شبکه
- شکل ۳-۹. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل داس و باسودهار نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش و تست شبکه
- شکل ۳-۱۰. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل شبکه عصبی نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش شبکه
- شکل ۳-۱۱. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل شبکه عصبی نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در تست شبکه
- شکل ۳-۱۲. نمودار ظرفیت باربری جانبی پیش بینی شده توسط مدل شبکه عصبی نسبت به ظرفیت باربری جانبی واقعی برای داده های مورد استفاده قرار گرفته در آموزش و تست شبکه
- شکل ۳-۱۳. نمودار احتمال تجمعی برای روشهای مختلف پیش بینی ظرفیت باربری جانبی شمع
- شکل ۳-۱۴. نمودار توزیع نرمال غیر استاندارد ( $Q_p / Q_m$ ) حاصل از شبکه عصبی
- شکل ۳-۱۵. نمودار توزیع نرمال استاندارد شده ( $Q_p / Q_m$ ) حاصل از شبکه عصبی

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱. نتایج آزمایش شمع تحت بار جانبی (رائو و سروش کومار) ۳۱
- جدول ۱-۲. ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی داس و باسودهار ۳۲
- جدول ۱-۳. ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده به روش هانسن ۳۳
- جدول ۱-۴. ظرفیت باربری جانبی پیش‌بینی شده به روش برامز ۳۴
- جدول ۲-۱. ساختار مدل‌های شبکه عصبی به کار رفته در این تحقیق ۴۵
- جدول ۲-۲. داده‌های مورد استفاده در آموزش شبکه ۵۴
- جدول ۲-۳. داده‌های مورد استفاده در تست شبکه ۵۵
- جدول ۲-۴. مرتبه اجرای برنامه برای ساختارهای مورد استفاده در آموزش شبکه ۵۷
- جدول ۲-۵. میانگین مجموع مربعات خطا و ضریب همبستگی برای داده‌های آموزش، تعیین اعتبار و آزمون در مدل‌های شبیه‌سازی شده جهت تعیین بهترین مدل با چهارمتغیر به عنوان ورودی (D,L,e,Cu) ۵۸
- جدول ۲-۶. ضرایب وزنی و بایاسها برای شبکه عصبی مصنوعی مدل شده در این تحقیق ۵۹
- جدول ۲-۷. ضریب همبستگی متغیرهای ورودی و خروجی واقعی ۶۱
- جدول ۲-۸. اهمیت نسبی متغیرهای ورودی شبکه بر اساس الگوریتم گارسون ۶۲
- جدول ۲-۹. اهمیت نسبی متغیرهای ورودی شبکه بر اساس الگوریتم وزنهای ارتباطی ۶۳
- جدول ۲-۱۰. آنالیز حساسیت برای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای ورودی ۶۴
- جدول ۲-۱۱. مدل‌های شبکه عصبی با کاهش پارامترهای ورودی ۶۴
- جدول ۲-۱۲. میانگین مجموع مربعات خطا و ضریب همبستگی برای داده‌های آموزش، تعیین اعتبار و آزمون در مدل‌های شبیه‌سازی شده جهت تعیین بهترین مدل با سه متغیر به عنوان ورودی ۶۶
- جدول ۲-۱۳. ضرایب وزنی و بایاسها برای شبکه عصبی مصنوعی داس و باسودهار ۶۹
- جدول ۲-۱۴. ضرایب رگرسیون روابط خطی مربوط به آنالیز رگرسیون ۷۲

جدول ۱-۳. مقایسه روشهای مختلف پیش بینی ظرفیت باربری جانبی شمع ۷۶

جدول ۲-۳. مقادیر (P50) و (P90) مربوط به روشهای مختلف پیش بینی ظرفیت باربری جانبی شمع ۸۶

# فصل اول

شمع تحت بار جانبی

شمعها اغلب تحت بارهای مایل قرار دارند. این بارها برآیند بارهای محوری و جانبی وارد بر شمع هستند. بارهای جانبی ممکن است ناشی از فشار آب، باد و یا خاک باشد. در گذشته طراحان فکر می‌کردند که شمع فقط می‌تواند بار محوری را تحمل کند. آنان در یک گروه شمع برای محاسبه بار محوری وارد بر هر شمع از روشهای ترسیمی استفاده می‌کردند و برای اینکه چند ضلعی نیروها بسته شود نیاز به حداقل یک شمع مایل در گروه شمع بود اما امروزه محققان دریافته‌اند که شمعهای قائم علاوه بر بار محوری قابلیت تحمل بار جانبی را نیز دارند و دیگر نیازی به طراحی شمع مایل به مفهوم قبلی نمی‌باشد، با این حال اگر ظرفیت باربری جانبی برای تحمل بار جانبی کافی نباشد امروزه نیز از شمعهای مایل استفاده می‌کنند [۲۶]. در طراحی شمعهای تحت بار جانبی لازم است که ظرفیت سازه‌ای شمع و تغییر شکل‌های خاک در قبال بارهای جانبی مد نظر قرار گیرند. بدین منظور لازم است تا شناخت کافی درباره گسیختگی شمع تحت بار جانبی داشته باشیم. ظرفیت حدی جانبی شمع قائم از طرق زیر می‌تواند محدود شود [۳]:

۱. بار وارده از ظرفیت خاک تجاوز کند که ماحصل آن جابجایی افقی بزرگ شمع و در نهایت شکست فونداسیون را در بر دارد ( معیار ژئوتکنیکی ).

۲. در نتیجه بار جانبی ممکن است که ممان خمشی در شمع موجب بروز تنشهای بزرگی در مصالح شمع شود و شکست سازه را به دنبال داشته باشد ( معیار سازه‌ای ).

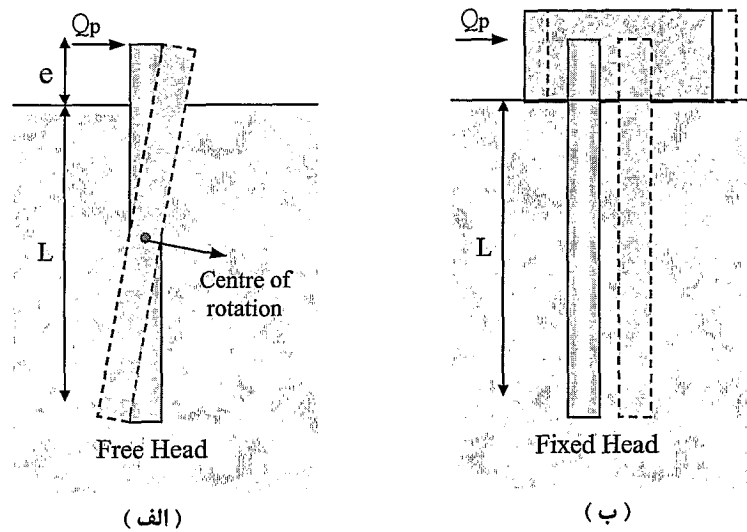
۳. تغییر مکان جانبی بیش از حد سر شمع با مقادیر مجاز روسازه سازگاری نداشته باشد ( معیار جابجایی ).

بنابراین ظرفیت باربری جانبی شمع بر اثر ظرفیت برشی خاک، ظرفیت سازه‌ای مقطع و جابجایی جانبی مجاز شمع محدود می‌گردد. به عبارتی طراحی شمعها تحت اثر بارافقی بر اساس دو معیار صورت می‌گیرد: ۱- ظرفیت باربری نهایی افقی شمع ۲- تغییر مکان مجاز افقی سر شمع [۱ و ۲].



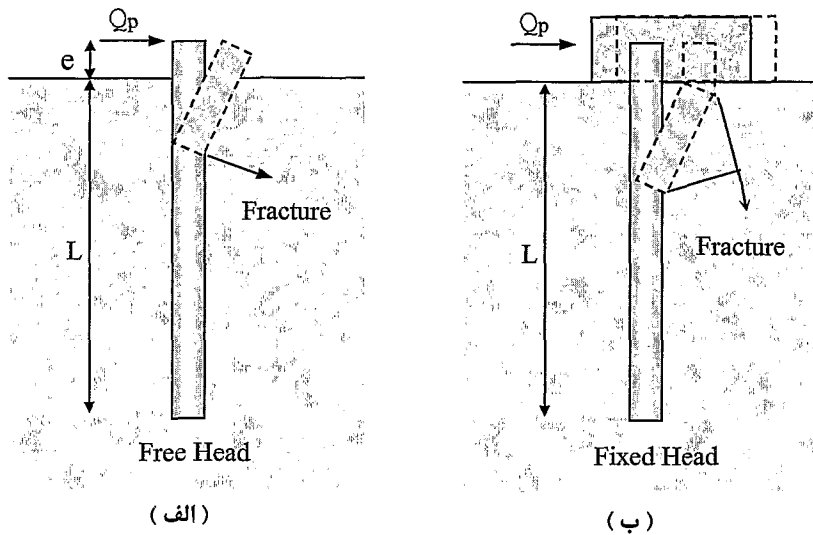
## ۱-۲. مکانیسم گسیختگی شمعهای تحت بار جانبی

مکانیسم گسیختگی شمعهای کوتاه تحت بار جانبی در مقایسه با شمعهای بلند متفاوت است و به طور کلی به طول شمع، ظرفیت باربری خاک، نوع خاک و شرایط مرزی سر شمع (گیرداری یا آزادی سر شمع) بستگی دارد. وقتی که یک شمع تحت بار جانبی قرار می‌گیرد، در ابتدا سهم عمده‌ای از بار توسط قسمت‌های فوقانی خاک تحمل می‌شود و مقدار کمی از بار به لایه‌های تحتانی انتقال می‌یابد. با افزایش بار خاک لایه‌های بالایی به حالت خمیری می‌رسد و بار بیشتری به لایه‌های تحتانی منتقل می‌شود. اگر شمع کوتاه و سر شمع آزاد باشد، در اثر اعمال بار جانبی بزرگ، حول نقطه‌ای در امتداد طول خود دوران می‌کند و خاک مجاور شمع به حالت مقاوم می‌رسد. شمع در این حالت تحت فشار جانبی مقاوم خاک در بالا و پایین نقطه دوران ولی در دو جهت قرینه است گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که فشار جانبی خاک در بالا و پایین مرکز دوران از ظرفیت باربری جانبی آن تجاوز کند (شکل ۱-۱ الف). اگر شرایط سر شمع به گونه‌ای باشد که از دوران سر شمع کوتاه جلوگیری کند آنگاه تمام طول شمع به صورت یکنواخت انتقال می‌یابد و تحت فشار جانبی خاک قرار می‌گیرد (شکل ۱-۱ ب).



شکل ۱-۱. مکانیسم گسیختگی شمع کوتاه تحت بار جانبی. الف: شمع سر آزاد ب: شمع سر گیردار

شمعهای بلند انعطاف پذیرند و نحوه گسیختگی خاک برای یک شمع بلند با نحوه گسیختگی یک شمع کوتاه و صلب متفاوت است. ظرفیت باربری جانبی خاک برای این شمعها بزرگ است لذا دوران یا انتقال در شمع به وجود نمی‌آید و گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که سازه شمع گسیخته شود (شکل ۱-۲) [۲۱]. به طور کلی صلبیت و انعطاف پذیری شمع به سختی خاک و شمع بستگی دارد ولی در عمل شمعهای با نسبت طول مدفون به قطر بیش از ۱۲ را شمع بلند در نظر می‌گیرند [۱].



شکل ۱-۲. مکانیسم گسیختگی شمع بلند تحت بار جانبی. الف: شمع سر آزاد. ب: شمع سر گیردار

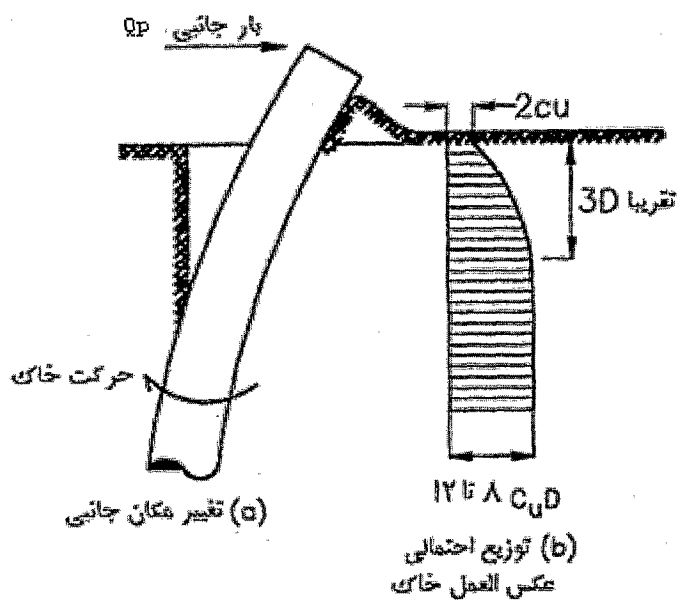
### ۱-۳. توزیع مقاومت جانبی خاک

برای محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع لازم است تا مقاومت جانبی نهایی خاک و نحوه توزیع آن در امتداد طول شمع را بدانیم. برای خاک کاملاً چسبنده مقاومت جانبی نهایی ( $P_u$ ) از سطح زمین تا حدود ۳ برابر قطر شمع افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت باقی می‌ماند (شکل ۱-۳). وقتی که  $P_u$  ثابت می‌شود، انهدام جانبی در صفحه افقی باعث خمیری شدن خاک حول شمع می‌شود و مقدار  $P_u$  از نظریه خمیری بدست می‌آید. مقدار مقاومت جانبی نهایی ضریبی از چسبندگی خاک است [۲۱]:

$$P_u = K_c \cdot C_u \quad (1-1)$$

$K_c$  ضریب مقاومت جانبی است که به نسبت چسبندگی شمع به چسبندگی خاک ( $C_a / C_u$ ) و به مقطع شمع بستگی دارد. مهمترین پارامتر مربوط به مقطع شکل ضریب شکل می‌باشد. در شکل ۱-۴ تأثیر ضریب شکل بر  $K_c$  برای  $C_a / C_u = 0$  و  $C_a / C_u = 1$  نشان داده شده است. با دقت

کافی می‌توان مقادیر مربوط به  $(C_a / C_u)$  بین صفر و یک را با درونیابی خطی بدست آورد. منحنی-های شکل ۱-۴ با استفاده از نظریه خمیری و برای مقطع شمع لوزی شکل بدست آمده است، اما می‌توان آنرا با همین ضریب شکل به طور محافظه کارانه برای شکلهای دیگر بکار برد. با این وجود، در اکثر متون علمی مکانیک خاک، مقاومت جانبی در عمق خاکهای کاملاً چسبنده با هر مقدار  $C_a / C_u$  و هر شکل مقطع،  $9C_u$  در نظر گرفته می‌شود [۱ و ۲].



شکل ۱-۳. توزیع مقاومت جانبی شمع واقع در خاک چسبنده