

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

گرایش ژئوتکنیک

عنوان پایان نامه:

بررسی ضریب اندرکنش برای شمع های حرارتی در خاک یخ زده

توسط: نیما مینائی

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور: دکتر سید علی قریشیان امیری

تابستان ۱۴۰۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

بررسی ضریب اندرکنش برای شمع‌های حرارتی در خاک یخ‌زده

توسط نیما مینائی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته

مهندسی عمران - ژئوتکنیک در تاریخ مورد تأیید قرار دادند.

۱- استاد راهنما دکتر حسن قاسم‌زاده امضاء

۲- استاد مشاور دکتر سید علی قریشیان امیری امضاء

۳- استاد ممتحن خارجی دکتر امیر حمیدی امضاء

۴- استاد ممتحن دکتر محمدعلی ایرانمنش امضاء

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دکتر محمدعلی ایرانمنش امضاء



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظہارنامہ دانشجو

اینجانب نیما مینائی دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش

ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم

که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان: بررسی ضریب اندرکنش برای شمع‌های حرارتی

در خاک یخ‌زده با راهنمایی اساتید محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده و دکتر سید

علی قریشیان امیری توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش

شده در این پایان‌نامه مورد تأیید است. در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده

اشاره شده است. به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ

نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن

پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد/استادان راهنمای آن است. هرگونه شکل برداری از کل یا بخشی از پایان نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تشکر و قدردانی:

وظیفه خود می‌دانم از تمامی افرادی که به طریقی من را در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، تشکر نمایم.

اساتید ارجمندم، آقای دکتر حسن قاسم‌زاده و آقای دکتر سید علی قریشیان امیری که همواره با گشاده‌رویی پذیرای من بودند و بادقت، حوصله و نکته‌سنجی بنده را در تهیه و تدوین این پایان‌نامه یاری نمودند و از هیچ‌گونه تلاش و کوششی دریغ ننمودند.

در نهایت از خانواده و دوستان عزیزم که در این راه، همواره مایه دلگرمی من بوده‌اند، نهایت سپاس و تشکر را دارم.

چکیده

شمع‌های حرارتی نوعی از شمع‌ها هستند که علاوه بر دارا بودن خواص سازه‌ای شمع‌های معمولی، قابلیت مشارکت در سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان را با بهره‌گیری از دمای ثابت اعماق درونی خاک را دارند. این شمع‌ها به‌عنوان یک فناوری نوین می‌توانند در کاهش مصرف انرژی، به‌ویژه در مناطق سردسیر با خاک یخ‌زده، نقش مهمی ایفا کنند.

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از مدل رفتاری الاستوپلاستیک خاک یخ‌زده - یخ زده به بررسی رفتار و عملکرد خاک یخ‌زده پرداخته شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس دوبعدی، شبیه‌سازی محیط خاک یخ‌زده رسی انجام شده و در تمام مراحل، شبیه‌سازی در شرایط خاک یخ زده نیز تکرار شده است تا با مقایسه دقیق نتایج در هر دو حالت، شناخت کامل‌تر و عمیق‌تری از رفتار خاک یخ‌زده به دست آید. در مرحله بعد، با شبیه‌سازی یک شمع حرارتی و ایجاد یک مدل ترمو هیدرومکانیکی در محیط خاک یخ‌زده، به بررسی رفتار مکانیکی و حرارتی شمع پرداخته شده است.

از آنجایی که در پروژه‌های مرتبط، شمع‌ها معمولاً به‌صورت گروهی اجرا می‌شوند و عملکرد مکانیکی و حرارتی هر یک از شمع‌ها بر شمع‌های مجاور تأثیر می‌گذارد، در گام بعدی با شبیه‌سازی جفت شمع حرارتی در محیط‌های خاک یخ‌زده و یخ زده، به بررسی ضریب اندرکنش ناشی از بار حرارتی و بار مکانیکی محوری و جانبی و مقایسه نتایج در حالت خاک یخ‌زده و یخ زده پرداخته شده است. همچنین، عواملی مانند نسبت طول به قطر شمع، نسبت سختی شمع به خاک، فاصله شمع‌ها از یکدیگر، اثر نسبت پوآسن خاک و اثر وجود بار حرارتی در شمع دریافت‌کننده نیز در این بررسی‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ابتدای هر بخش نیز صحت‌سنجی نتایج با استفاده از روش تحلیلی قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو و همچنین روش پولوس و دیویس انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: خاک یخ‌زده - یخ زده، شمع حرارتی، شبیه‌سازی ترمو هیدرومکانیکی، مدل رفتاری الاستوپلاستیک، ضریب اندرکنش، نرم‌افزار پلکسیس

فهرست مطالب

.....	چکیده.....	ا
.....	فهرست مطالب.....	ب
.....	فهرست اشکال.....	ج
.....	فهرست جداول.....	ر
.....	فصل اول: مقدمه.....	۲
.....	۱-۱ اهمیت و ضرورت موضوع.....	۲
.....	۱-۲ اهداف پژوهش.....	۳
.....	۱-۳ نوآوری‌های پژوهش.....	۴
.....	۱-۴ ساختار پژوهش.....	۴
.....	فصل دوم: مروری بر پیشینه موضوع.....	۶
.....	۱-۲ شمع حرارتی.....	۶
.....	۱-۱-۲ مزیت شمع‌های حرارتی.....	۶
.....	۱-۲-۱ مکانیسم کارکرد شمع‌های حرارتی.....	۷
.....	۱-۲-۳ عملکرد حرارتی شمع حرارتی.....	۸
.....	۱-۲-۴ تغییر شکل حرارتی و مکانیکی در شمع حرارتی.....	۱۲
.....	۱-۲-۵ ظرفیت باربری شمع‌های حرارتی.....	۱۳
.....	۲-۲ خاک یخ‌زده.....	۱۶
.....	۱-۲-۲ پژوهش‌های پیشین بر روی شمع حرارتی در محیط خاک یخ‌زده.....	۱۶
.....	۲-۲-۲ کلیاتی بر مدل رفتای خاک یخ‌زده - یخ نرزه.....	۱۶
.....	۲-۲-۳ سایر مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک ارائه‌شده برای خاک یخ‌زده.....	۱۸
.....	۲-۲-۴ مطالعات تکمیلی صورت‌گرفته بر روی رفتار خاک یخ‌زده.....	۲۰
.....	۳-۲ ضریب اندرکنش.....	۲۵
.....	۱-۳-۲ محاسبه ضریب اندرکنش به روش پولوس و دیویس.....	۲۵
.....	۲-۳-۲ محاسبه ضریب اندرکنش به روش قاسم‌زاده و علی‌بیک‌لو.....	۲۶
.....	۳-۳-۲ محاسبه ضریب اندرکنش شمع‌های حرارتی.....	۳۰
.....	۴-۲ نتیجه‌گیری.....	۳۲

فصل سوم : مدل رفتاری خاک یخزده - یخ نزده	۳۴
۱-۳ دو متغیر تنش در مدل رفتاری خاک یخزده - یخ نزده	۳۵
۲-۳ بررسی کرنش در مدل رفتاری خاک یخزده - یخ نزده	۳۶
۳-۳ پاسخ الاستیک	۳۷
۴-۳ سطوح تسلیم	۳۸
۵-۳ قوانین سخت‌شوندگی	۴۲
۶-۳ قوانین جریان	۴۴
۷-۳ دمای ذوب/انجماد و درجه اشباع آب یخ نزده	۴۵
فصل چهارم : معرفی نرم‌افزار و مراحل شبیه‌سازی	۴۸
۱-۴ انتخاب نرم‌افزار	۴۸
۲-۴ معرفی نرم‌افزار پلکسیس	۴۹
۳-۴ روش حل اجزای محدود	۴۹
۴-۴ مراحل شبیه‌سازی و حل مسئله در نرم‌افزار پلکسیس	۵۰
۵-۴ شبیه‌سازی	۵۰
۱-۵-۴ نوع شبیه‌سازی	۵۰
۲-۵-۴ هندسه مدل	۵۱
۳-۵-۴ خصوصیات و پارامترهای مصالح شبیه‌سازی شده	۵۲
۴-۵-۴ اعمال شرایط مرزی	۵۷
۵-۵-۴ مش‌بندی مدل	۶۰
۶-۵-۴ مراحل محاسباتی و تعیین دقت محاسبات	۶۱
۶-۴ صحت‌سنجی شبیه‌سازی	۶۳
۱-۶-۴ صحت‌سنجی مدل تک شمع	۶۳
۲-۶-۴ صحت‌سنجی مدل جفت شمع	۶۴
۷-۴ جمع‌بندی	۶۸
فصل پنجم: بررسی ضریب اندرکنش برای شمع‌های حرارتی در خاک یخزده	۷۰
۱-۵ تعریف مسئله	۷۰
۲-۵ مدل تک شمع	۷۱
۱-۲-۵ بررسی تغییرات دمایی مدل تک شمع تحت بار حرارتی	۷۱
۲-۲-۵ بررسی تغییر شکل ناشی از بار حرارتی - مکانیکی و مقایسه باحالت بار مکانیکی	۷۵
۳-۲-۵ بررسی تغییر شکل ناشی از بار حرارتی - مکانیکی در خاک یخزده و یخ نزده	۷۸

۳-۵ مدل جفت شمع.....	۸۱
۱-۳-۵ بررسی ضریب اندرکنش ناشی از بار حرارتی - مکانیکی و مقایسه باحالت مکانیکی.....	۸۳
۲-۳-۵ مقایسه ضریب اندرکنش در خاک یخ‌زده و یخ‌زده	۸۷
۳-۳-۵ بررسی ضریب اندرکنش با تمرکز بر نسبت لاغری (نسبت طول به قطر شمع).....	۹۱
۴-۳-۵ بررسی ضریب اندرکنش با تمرکز بر نسبت سختی شمع بر خاک.....	۹۵
۵-۳-۵ بررسی اثر افزایش بار بر تغییر شکل و ضریب اندرکنش.....	۹۸
۶-۳-۵ اثر نسبت پواسن بر ضریب اندرکنش.....	۱۰۲
۷-۳-۵ اثر اعمال بار حرارتی بر شمع دریافت‌کننده.....	۱۰۶
فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادها.....	۱۱۱
۱-۶ خلاصه تحقیق انجام‌شده.....	۱۱۲
۲-۶ خلاصه نتایج به‌دست‌آمده.....	۱۱۳
۳-۶ پیشنهادها برای ادامه کار.....	۱۱۴
پیوست (الف): مدل رفتاری کم - کلی و کم - کلی اصلاح یافته.....	۱۱۵
پیوست (ب): مدل رفتاری پایه بارسلونا.....	۱۱۶
پیوست (پ): بررسی فرض مدل تقارن محوری بر نتایج ضریب اندرکنش و تغییرات دمایی مدل.....	۱۱۷
مراجع پژوهش.....	۱۲۰
واژه‌نامه.....	۱۲۵

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: پیکربندی شمع‌های حرارتی.....	۷
شکل ۲-۲: سامانه شمع‌های حرارتی.....	۸
شکل ۳-۲: نمودار تغییرات دمایی در عمق خاک شهر پکن در طول سال توسط لی و همکاران.....	۹
شکل ۴-۲: نتایج تغییرات دمایی در طول مدل دارای شمع حرارتی توسط قاسم‌زاده و علی وردی.....	۱۰
شکل ۵-۲: نتایج تغییرات دمایی در طول مدل دارای شمع حرارتی توسط دینگ.....	۱۰
شکل ۶-۲: نشست سرشمع در سیکل‌های گرم‌شدن و سردشدن.....	۱۲
شکل ۷-۲: نمودار انتقال بار (توسط الف) مقاومت جداره (ب) مقاومت نوک.....	۱۳
شکل ۸-۲: مراحل رشد لنزهای یخی.....	۲۲
شکل ۹-۲: شکل شماتیک از یخ‌بندان در لایه ۳ پس از انتقال حرارت و آب از طریق لایه ۲، لایه ۱ به یک مخزن آب متصل است.....	۲۳
شکل ۱۰-۲: مدل شمع-خاک در نظر گرفته شده در روش تحلیلی علی‌بیکلو، مدل وینکلر.....	۲۷
شکل ۱۱-۲: شکل شماتیک از نحوه آرایش شمع‌ها در روش قاسم‌زاده و علی‌بیکلو.....	۳۰
شکل ۱۲-۲: مقایسه ضریب اندرکنش شمع حرارتی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی بر اساس مطالعات قاسم‌زاده و همکاران.....	۳۱
شکل ۱۳-۲: بررسی تأثیر افزایش نسبت سختی شمع بر خاک بر مقدار ضریب اندرکنش بر اساس مطالعات قاسم‌زاده و همکاران.....	۳۱
شکل ۱-۳: دید سه‌بعدی سطوح تسلیم در فضای $p^* - q^* - s_c$ در مدل رفتاری خاک یخ‌زده - یخ نرزه.....	۴۰
شکل ۲-۳: تأثیر پارامتر تسلیم m بر روی شکل سطح تسلیم در صفحه $p^* - q^*$ در مقدار $S_{uv} = 0.01$	۴۱
شکل ۳-۳: سیر تغییر سطوح تسلیم باتوجه به فشردگی پلاستیک در صفحات $p^* - S_c$ و $p^* - q^*$	۴۲
شکل ۴-۳: سیر تغییر معمول سطوح تسلیم باتوجه به پدیده تفکیک یخ در صفحات $p^* - S_c$ و $p^* - q^*$	۴۳
شکل ۴-۱: هندسه مدل تک شمع حرارتی با طول ۶ متری.....	۵۲
شکل ۴-۲: شرایط مرزی استاندارد در نرم‌افزار پلکسیس.....	۵۸
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات دما در سطح خاک در طول یک سال میلادی.....	۵۹

- شکل ۴-۴: نمودار تغییرات حرارتی شمع حرارتی در سه مرز بین خاک و شمع در طول یک سال میلادی
۶۰.....
- شکل ۴-۵: کانتور مش بندی مدل
۶۰.....
- شکل ۴-۶: نمودار تغییر شکل - بار تحت بار محوری و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و علی بیکلو.....
۶۳.....
- شکل ۴-۷: نمودار تغییر شکل - بار تحت بار جانبی و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و علی بیکلو.....
۶۴.....
- شکل ۴-۸: نمودار بررسی ضریب اندرکنش تحت بار مکانیکی محوری و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و
علی بیکلو و همچنین پولوس و دیویس.....
۶۵.....
- شکل ۴-۹: نمودار بررسی ضریب اندرکنش تحت بار مکانیکی جانبی و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و
علی بیکلو و همچنین پولوس و دیویس.....
۶۶.....
- شکل ۴-۱۰: نمودار بررسی اثر افزایش طول شمع بر ضریب اندرکنش در خاک یخ نزده تحت بار محوری و
بدون بار حرارتی و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و علی بیکلو و همچنین پولوس و دیویس.....
۶۶.....
- شکل ۴-۱۱: نمودار بررسی ضریب اندرکنش محوری در خاک یخ نزده بدون بار حرارتی در نسبت سختی-
های مختلف و مقایسه نتایج با نتایج قاسم زاده و علی بیکلو.....
۶۷.....
- شکل ۵-۱: نمودار تغییرات دما در عمق خاک در طول ۱۲ ماه سال میلادی در پروژه حاضر در پایان فاز
steady state قبل از ساخته شدن شمع
۷۲.....
- شکل ۵-۲: نتایج تغییرات دمایی در طول مدل دارای تک شمع حرارتی در پروژه حاضر
۷۳.....
- شکل ۵-۳: تغییرات دمایی خاک در عمق ۰/۵ متری در فواصل مختلف از شمع، در طول یک سال پس از
اعمال شمع حرارتی.....
۷۴.....
- شکل ۵-۴: نمودار مقایسه دمایی مدل دارای شمع حرارتی و بدون شمع حرارتی در عمق ۹ متری در
فواصل مختلف از شمع با طول ۱۲ متر.....
۷۵.....
- شکل ۵-۵: نمودار مقایسه تغییر شکل محوری در حالت شمع تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی با حالت
بار مکانیکی در خاک یخ نزده
۷۶.....
- شکل ۵-۶: نمودار مقایسه تغییر شکل محوری در حالت شمع تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی با حالت
بار مکانیکی در خاک یخ نزده
۷۷.....
- شکل ۵-۷: نمودار مقایسه تغییر شکل جانبی در حالت شمع تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی با حالت
بار مکانیکی در خاک یخ نزده
۷۷.....
- شکل ۵-۸: نمودار مقایسه تغییر شکل جانبی در حالت شمع تحت بارگذاری حرارتی - مکانیکی با حالت
بار مکانیکی در خاک یخ نزده
۷۸.....
- شکل ۵-۹: مدل خاک بدون شمع برای بررسی نمودار تنش - کرنش
۷۹.....

- شکل ۵- ۱۰: نمودار مقایسه تنش - کرنش در دو خاک یخزده و یخ نرده با فرض اعمال سختی برابر برای هردو خاک ۸۰
- شکل ۵- ۱۱: نمودار مقایسه تغییر شکل در فواصل مختلف از شمع در خاک یخزده و یخ نرده در سطح خاک تحت بارمحوری - حرارتی ۸۱
- شکل ۵- ۱۲: مدل گروه شمع دوتایی برای $L/D=10$ و $S/D=1.5$ ۸۱
- شکل ۵- ۱۳: تغییرات دمایی در حالت مدل جفت شمع با شمع مرجع تحت بار مکانیکی - حرارتی ($L/D=10$ و $S/D=3$) ۸۲
- شکل ۵- ۱۴: نمودار بررسی ضریب اندرکنش محوری در حالت شمع تحت بارمحوری و حرارتی در خاک یخ نرده ۸۴
- شکل ۵- ۱۵: نمودار بررسی ضریب اندرکنش محوری در حالت شمع تحت بارمحوری و تحت بارمحوری و حرارتی در خاک یخزده ۸۴
- شکل ۵- ۱۶: نمودار بررسی ضریب اندرکنش جانبی در حالت شمع تحت بار جانبی و تحت بار جانبی و حرارتی در خاک یخ نرده ۸۶
- شکل ۵- ۱۷: نمودار بررسی ضریب اندرکنش جانبی در حالت شمع تحت بار جانبی و تحت بار جانبی و حرارتی در خاک یخزده ۸۶
- شکل ۵- ۱۸: نمودار تغییرات ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در حالت خاک یخزده و یخ نرده ۸۸
- شکل ۵- ۱۹: نمودار نرمالایز شده نشست شمع مرجع و دریافت کننده در خاک یخ نرده و یخزده تحت بارمحوری و حرارتی ۸۹
- شکل ۵- ۲۰: نمودار بررسی نشست شمع مرجع و دریافت کننده در خاک یخ نرده و یخزده تحت بارمحوری و حرارتی ۹۰
- شکل ۵- ۲۱: نمودار مقایسه ضریب اندرکنش تحت بار جانبی و حرارتی در خاک یخزده و یخ نرده ۹۱
- شکل ۵- ۲۲: نمودار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در نسبت لاغری های مختلف شمع حرارتی (قطر ثابت ۰/۶ متر و طول متغیر) برای خاک یخ نرده ۹۲
- شکل ۵- ۲۳: نمودار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در نسبت لاغری های مختلف شمع حرارتی (قطر ثابت ۰/۶ متر و طول متغیر) برای خاک یخزده ۹۳
- شکل ۵- ۲۴: نمودار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در نسبت لاغری های مختلف شمع حرارتی (طول ثابت ۶ متری و قطر متغیر) برای خاک یخزده ۹۴
- شکل ۵- ۲۵: نمودار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در نسبت لاغری های مختلف شمع حرارتی (طول ثابت ۶ متری و قطر متغیر) در فواصل ثابت بین دو شمع برای خاک یخزده ۹۵

- شکل ۵-۲۶: نمودار بررسی تغییرات ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در خاک یخزده در نسبت سختی‌های مختلف ۹۶
- شکل ۵-۲۷: نمودار بررسی نشست در شمع مرجع و دریافت‌کننده با کاهش نسبت سختی در فواصل مختلف بین دو شمع در خاک یخزده تحت بارمحوری و حرارتی ۹۷
- شکل ۵-۲۸: نمودار بررسی نشست در شمع مرجع و دریافت‌کننده با کاهش نسبت سختی در فواصل مختلف بین دو شمع در خاک یخ نرزه تحت بارمحوری و حرارتی ۹۷
- شکل ۵-۲۹: مدل اعمال‌شده برای بررسی اثر افزایش بارمحوری و بار جانبی بر ضریب اندرکنش در حالت مدل جفت شمع ۹۸
- شکل ۵-۳۰: نمودار بار نشست تحت بارمحوری و حرارتی در شمع مرجع در دو نوع خاک یخ نرزه و یخزده ۹۹
- شکل ۵-۳۱: نمودار بار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در دو نوع خاک یخزده و یخ نرزه ۱۰۰
- شکل ۵-۳۲: نمودار بار تغییر شکل تحت بار جانبی و حرارتی در شمع مرجع در دو نوع خاک یخزده و یخ نرزه ۱۰۱
- شکل ۵-۳۳: نمودار بار ضریب اندرکنش تحت بار جانبی و حرارتی در دو نوع خاک یخزده و یخ نرزه ۱۰۲
- شکل ۵-۳۴: نمودار ضریب اندرکنش در نسبت پواسن‌های متغیر در خاک یخ نرزه تحت بارمحوری و حرارتی ۱۰۳
- شکل ۵-۳۵: نمودار نشست تحت بارمحوری و حرارتی در شمع دریافت‌کننده برای خاک یخ نرزه در نسبت پواسن‌های مختلف ۱۰۳
- شکل ۵-۳۶: نمودار ضریب اندرکنش تحت بارمحوری و حرارتی در نسبت پواسن‌های متغیر در خاک یخزده ۱۰۴
- شکل ۵-۳۷: نمودار نشست تحت بارمحوری و حرارتی در شمع دریافت‌کننده برای خاک یخزده در نسبت پواسن‌های مختلف ۱۰۴
- شکل ۵-۳۸: تغییرات دمایی در حالت شمع دریافت‌کننده دارای بار حرارتی برای $L/D=10$ و $S/D=5$ ۱۰۶
- شکل ۵-۳۹: تغییرات دمایی در حالت شمع دریافت‌کننده دارای بار حرارتی برای $L/D=10$ و $S/D=10$ ۱۰۷
- شکل ۵-۴۰: نمودار بررسی اثر اضافه‌شدن بار حرارتی در شمع دریافت‌کننده بر ضریب اندرکنش ۱۰۸
- شکل ب-۱: سطح تسلیم مدل رفتاری بارسلونا در فضای p-q-s در حالت دو بعدی ۱۱۶

شکل پ- ۱: نمودار مقایسه شرایط دمایی مدل در ماه ژانویه در حالت متقارن محوری و کرنش صفحه‌ای

۱۱۸.....

شکل پ- ۲: نمودار مقایسه ضریب اندرکنش در حالت متقارن محوری و کرنش صفحه‌ای..... ۱۱۸

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱: پارامترهای دمایی آب و یخ.....	۵۲
جدول ۴-۲: پارامترهای خاک.....	۵۳
جدول ۴-۳: پارامترهای مدل رفتاری خاک یخزده.....	۵۴
جدول ۴-۴: مشخصات هندسی شمع و خاک.....	۵۵
جدول ۴-۵: مشخصات شمع حرارتی.....	۵۵
جدول ۴-۶: مشخصات عایق حرارتی EPS200.....	۵۶
جدول ۴-۷: پارامترهای خاک یخ نزده.....	۵۶
جدول ۴-۸: شرایط مرزی اعمال شده در مرز چپ و راست مدل.....	۵۷
جدول ۴-۹: شرایط مرزی اعمال شده در مرز پایین مدل.....	۵۷
جدول ۴-۱۰: شرایط مرزی اعمال شده در مرز بالای مدل.....	۵۷
جدول ۴-۱۱: تعیین فازبندی محاسبات.....	۶۱
جدول ۴-۱۲: تعیین دقت محاسبات.....	۶۲
جدول ۵-۱: پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده برای تحلیل.....	۸۳
جدول ۵-۲: مقادیر ضریب اندرکنش تحت بارمحوری مکانیکی و حرارتی و بررسی تأثیر بار حرارتی بر ضریب اندرکنش در خاک یخ نزده.....	۸۵
جدول ۵-۳: مقادیر ضریب اندرکنش تحت بارمحوری مکانیکی و حرارتی و بررسی تأثیر بار حرارتی بر ضریب اندرکنش در خاک یخزده.....	۸۵
جدول ۵-۴: جدول بررسی اثر افزایش نسبت پوآسن بر ضریب اندرکنش در خاک یخ نزده.....	۱۰۵
جدول ۵-۵: جدول بررسی اثر افزایش نسبت پوآسن بر ضریب اندرکنش در خاک یخزده.....	۱۰۵
جدول ۵-۶: بررسی اثر بودن بار حرارتی بر روی شمع دریافت کننده بر ضریب اندرکنش در خاک یخ نزده.....	۱۰۸
جدول ۵-۷: بررسی اثر بودن بار حرارتی بر روی شمع دریافت کننده بر ضریب اندرکنش در خاک یخزده.....	۱۰۹

فصل اول

مقدمه

فصل اول: مقدمه

انرژی زمین گرمایی به انرژی حرارتی که در پوسته جامد زمین وجود دارد گفته می‌شود، این گونه انرژی اغلب در جهت تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. با نزدیک شدن به اعماق زمین حرارت به طوری افزایش می‌یابد که درجه حرارت در هسته زمین به بیش از پنج هزار درجه سلسیوس می‌رسد. انرژی زمین گرمایی از داخل کره زمین و انرژی خورشید از خارج کره زمین شرایطی را فراهم می‌کنند که در اعماق چند ده متری از سطح زمین در طول سال دما تقریباً یکنواخت می‌شود. در این اعماق منابع انرژی زمین گرمایی، پتانسیل بسیار زیادی برای مصرف انرژی به طور مستقیم، به خصوص در ارتباط با پی‌های عمیق و پمپ حرارتی دارند، یکی از مزایای استفاده از انرژی زمین گرمایی کاهش کربن دی‌اکسید و آلودگی است [۱].

شمع حرارتی نوعی از پی‌های عمیق است که وظیفه حمایت از پی‌های سازه را با قابلیت تبادل حرارتی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها ترکیب می‌کنند، استفاده از شمع‌های حرارتی در مناطق خاک یخ‌زده یک راهکار امیدوارکننده برای سیستم‌های انرژی پایدار است، به‌ویژه در اقلیم‌های سرد که روش‌های سنتی گرمایش انرژی‌بر و برای محیط‌زیست مضر هستند، شمع حرارتی با استفاده از استخراج گرما از اعماق خاک یخ‌زده و بهره‌گیری از اختلاف دمای ثابت در عمق خاک و اختلاف دمای آن با سطح زمین در مصرف انرژی کمک می‌کند [۲].

خاک یخ‌زده چالش‌های منحصربه‌فردی را برای استفاده از شمع‌های حرارتی ایجاد می‌کند. اندرکنش بین شمع و خاک یخ‌زده اطراف آن به طور قابل توجهی عملکرد حرارتی و پایداری ساختاری سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو ضریب اندرکنش یک پارامتر حیاتی در طراحی و تحلیل شمع‌های حرارتی است، زیرا شامل تعاملات حرارتی، مکانیکی و هیدرولیکی بین شمع و خاک یخ‌زده می‌شود [۳].

۱-۱ اهمیت و ضرورت موضوع

باتوجه به رشد روزافزون جمعیت جهان و بالارفتن مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی و تجاری که عمده مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند و از سوی دیگر تخریب محیط‌زیست اهمیت جایگزینی منابع سوخت فسیلی بیش از پیش نمایان شده است، سالیانه هزینه‌های چشمگیری برای مصارف مختلف گرمایشی و سرمایشی صورت می‌گیرد.

از این رو شمع حرارتی به عنوان یک منبع انرژی پاک می‌تواند یک روش مناسب برای سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها و در نتیجه کاهش مصرف انرژی و آلودگی هوا و هزینه‌های مربوطه باشد، در تمامی پروژه‌هایی که به دلیل محدودیت ظرفیت باربری نیاز به احداث شمع است می‌توان با هزینه کمی شمع‌ها را که فقط کاربری سازه‌ای دارند به شمع حرارتی تبدیل کرد.

از آنجایی که شمع‌ها انرژی خود را از سطح زمین می‌گیرند یک انرژی نامتناهی و تجدیدپذیر بوده‌اند، به این صورت که در چندمتری زیر سطح زمین دما در کلیه فصول سال دارای تغییرات کمی است درحالی‌که بر روی سطح زمین دما تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای را در طول فصول سال دارد، ازاین‌رو با استفاده از شمع‌های حرارتی می‌توان از این اختلاف دما برای ایجاد انرژی در ساختمان‌ها استفاده کرد، در این روش یک سیال رابط دمای زیر سطح زمین را به روی سطح زمین منتقل می‌کند، به‌این‌ترتیب در شمع حرارتی، سیال رابط در زمستان دمای به نسبت گرم زیر زمین را بر سطح آورده و ساختمان را گرم می‌کند و در تابستان دمای به نسبت سرد را از زیر زمین به سطح آورده و ساختمان را خنک می‌کند [۱].

باتوجه‌به اهمیت مصرف انرژی در محیط‌های سردسیری و یخبندان ارزش شمع‌های حرارتی در این محیط‌ها دوچندان بوده و کاهش آلودگی و هزینه‌های مربوطه در این محیط چشمگیرتر است.

۲-۱ اهداف پژوهش

باتوجه‌به نیاز روزافزون جهان به منابع انرژی گرمایشی مسئله گرمایش زمین در اولویت قرار گرفته و یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های موجود در جوامع بین‌المللی است، به‌خصوص در مناطقی که دارای آب‌وهوای سرد و یخبندان در طول سال هستند اهمیت این موضوع دوچندان می‌شود.

هدف اصلی این پروژه مدل‌سازی خاک یخ‌زده دارای شمع حرارتی است؛ ازاین‌رو در گام اول به بررسی مدل‌های رفتاری خاک تحت شرایط بارگذاری ترمو هیدرومکانیکی پرداخته شده و همچنین نرم‌افزاری قدرتمند برای انجام تحلیل انتخاب می‌شود.

در گام بعدی باهدف بررسی تأثیر بار حرارتی موجود در شمع حرارتی به بررسی و مقایسه رفتار شمع حرارتی با شمع عادی بدون حرارت پرداخته شده است.

سومین هدف پژوهش بررسی رفتار خاک یخ‌زده است، خاک یخ‌زده به دلیل تغییرات دمایی و رطوبتی، خصوصیات متفاوتی نسبت به شرایط عادی از خود نشان می‌دهد؛ ازاین‌رو بررسی رفتار خاک یخ‌زده و مقایسه آن با شرایط خاک یخ‌زده از اهداف اصلی این پژوهش است.

در نهایت با مدل‌کردن جفت شمع حرارتی و غیرحرارتی در خاک یخ‌زده و یخ‌زده به مقایسه ضریب اندرکنش در شرایط مختلف پرداخته شده است.

با داشتن مقدار ضریب اندرکنش شمع - خاک - شمع در هر مسئله مربوط به گروه شمع، اعم از تحلیل عملکرد و یا طراحی، امکان محاسبه اضافه نشست هر شمع را در اثر بارگذاری شمع‌های مجاور، علاوه بر نشست شمع تحت تأثیر بار اعمال شده به خود شمع، میسر می‌شود [۴].

۳-۱ نوآوری‌های پژوهش

- در مطالعات قبلی شمع حرارتی، به بررسی رفتار این شمع در حالت خاک معمولی و یخ نزده پرداخته شده است، در این پژوهش خاک یخ‌زده در نرم‌افزار پلکسیس دوبعدی ۲۰۲۴ نسخه اول^۱ مدل شده و به بررسی رفتار این خاک پرداخته شده است و سپس با مدل کردن شمع حرارتی در این نوع خاک به تحلیل رفتار شمع حرارتی در خاک یخ‌زده پرداخته شده است.
- در پژوهش‌های قبلی صورت‌گرفته بر روی ضریب اندرکنش در حالت شمع مکانیکی تمرکز شده است، در این پژوهش ضمن بررسی حالت شمع مکانیکی با شمع حرارتی در خاک یخ‌زده، به بررسی این ضریب در خاک یخ‌زده نیز پرداخته شده است.
- در مطالعات قبلی به بررسی اثرات خصوصیات و پارامترهای مکانیکی و حرارتی شمع بر ضریب اندرکنش خاک انجام شده است، اما در این مطالعه با بررسی تمامی شرایط قبلی در هر دو نوع خاک یخ‌زده و یخ نزده به بررسی تفاوت ضریب اندرکنش در دو نوع خاک پرداخته شده است.

۴-۱ ساختار پژوهش

- پژوهش حاضر در شش فصل تهیه شده است:
- فصل اول: به بیان مسئله پرداخته شده و در مورد اهمیت موضوع و اهداف این پژوهش صحبت شده است.
- فصل دوم: به طور مختصر به بررسی مطالعات پیشین در ارتباط با شمع حرارتی و کلیاتی در مورد رفتار خاک یخ‌زده پرداخته شده است و در پایان روش‌های محاسبه ضریب اندرکنش برای صحت‌سنجی نتایج بیان شده است.
- فصل سوم: به معرفی و بررسی جامع رفتار خاک یخ‌زده و مدل رفتاری خاک یخ‌زده – یخ نزده که برای شبیه‌سازی رفتار این خاک در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، پرداخته شده است.
- فصل چهارم: در این فصل پس از معرفی نرم‌افزار پلکسیس و روش حل این نرم‌افزار، شرایط موردنیاز برای مدل‌سازی و مراحل شبیه‌سازی صورت‌گرفته بررسی شده است و در انتهای فصل جهت اطمینان از درستی شبیه‌سازی به صحت‌سنجی نتایج با مراجع موجود پرداخته شده است.
- فصل پنجم: فصل بررسی پژوهش در مدل انجام‌گرفته و تحلیل نتایج است، در این فصل ضریب اندرکنش در شرایط مختلف خاکی و شمع با بررسی تأثیر عوامل مختلف تحلیل شده است.
- فصل ششم: در این فصل به طور خلاصه به بررسی پژوهش صورت‌گرفته پرداخته شده است و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت پیشنهادهایی برای ادامه کار بیان شده است.

¹ PLAXIS 2D 2024.1

فصل دوم

مروری بر پیشینه موضوع

فصل دوم: مروری بر پیشینه موضوع

هدف اصلی این پژوهش بررسی ضریب اندرکنش در خاک یخزده دارای شمع حرارتی است، در سال‌های اخیر مطالعات مناسبی بر روی شمع‌های حرارتی و ضریب اندرکنش صورت گرفته است، از این رو در این فصل ابتدا به صورت مختصر به بررسی شمع‌های حرارتی و مطالعات صورت گرفته بر روی این شمع‌ها پرداخته شده است، در گام بعدی از آنجایی که خاک یخزده رفتار پیچیده‌ای در مقایسه با سایر خاک‌ها از خود نشان می‌دهد به بررسی رفتار خاک یخزده و بیان مدل رفتاری‌های ارائه شده برای این خاک پرداخته و در نهایت مطالعات صورت گرفته بر روی ضریب اندرکنش و روش‌های پیشنهادی محاسبه این ضریب بررسی شده است.

۱-۲ شمع حرارتی

۱-۱-۲ مزیت شمع‌های حرارتی

همان‌طور که در فصل اول گفته شد، یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی و جایگزینی انرژی پاک با سوخت‌های فسیلی استفاده از شمع‌های حرارتی است که علاوه بر باربری سازه‌ای می‌تواند مقداری از انرژی سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها را تأمین کند.

شمع‌های حرارتی ابتدا در سال ۱۹۸۴ میلادی در کشور اتریش مورد استفاده قرار گرفتند، و پس از آن با گذشت سال‌ها در کشورهای همچون سوئد، دانمارک، آلمان، فنلاند و... گسترش یافتند، طبق تحقیقات انجام شده در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ استفاده از این شمع‌ها افزایش ۱۰ درصدی داشته است که نتیجه آن کاهش انتشار کربن دی‌اکسید به میزان بیش از ۶ هزار تن در سال ۲۰۱۲ و ۸۰۰۰ تن در سال ۲۰۱۷ است [۱].

دینگ^۱ و همکاران طی مطالعه‌ای که بر روی مزیت‌های شمع حرارتی در قسمت‌های خاک یخزده کشور چین داشتند عنوان کردند که حدود ۰/۱ درصد از مساحت زمین این کشور را خاک یخزده شامل می‌شود و تقاضای گرمایش زیاد است و با استفاده از انرژی پاک شمع حرارتی حدود ۳۰ الی ۷۰ درصد در بحث‌های گرمایشی و حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد در سرمایش می‌توان در مصرف انرژی صرفه جویی کرد [۵].

کینگ و همکاران^۲ در سال ۲۰۲۴ به بررسی عملکرد فصلی یک سیستم پمپ حرارتی شمع حرارتی^۳ پرداخته و همچنین به پیش‌بینی بار حرارتی ساختمان با استفاده از روش‌های مختلف پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که پمپ حرارتی شمع حرارتی سرعت سریع‌تری نسبت به پمپ حرارتی منبع هوا دارد و

^۱ Ding et al.

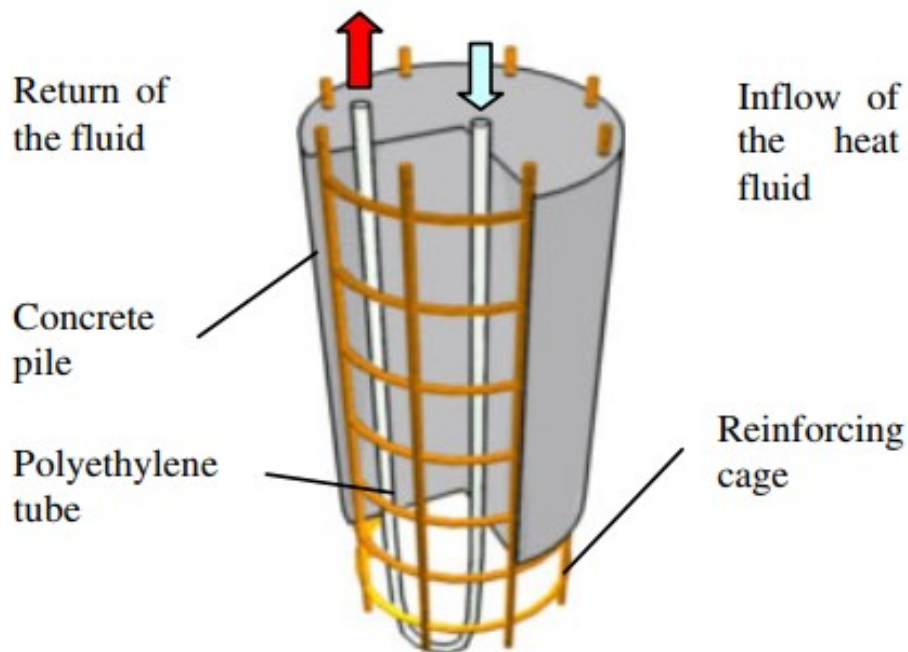
^۲ Kong et al.

^۳ Energy Pile Heat Pump System (GSHP)

ضریب عملکرد متوسط^۱ (ضریبی برای بیان کارایی سیستم به معنای نسبت توان خروجی بر توان ورودی) سیستم پمپ حرارتی شمع حرارتی ۳/۷۸ بود که ۴۰ تا ۵۰/۲ درصد بیشتر از ضریب عملکرد پمپ حرارتی با منبع هوا^۲ (۲/۵ تا ۲/۷) بود و این حاکی از آن است که سیستم می‌تواند مقدار بیشتری انرژی گرمایی یا سرمایی را با مصرف انرژی کمتری تولید کند. به عبارت دیگر، با ضریب عملکرد بالاتر، سیستم با مصرف انرژی کمتر، کارایی بیشتری ارائه می‌دهد [۶].

۲-۱-۲ مکانیسم کارکرد شمع‌های حرارتی

مطابق با شکل ۱-۲ ساختمان شمع حرارتی دارای دو بخش است که این دو بخش عبارت‌اند از: شمع بتنی یا فولادی که در قسمت خارجی شمع حرارتی است و مسئولیت باربری سازه را بر عهده می‌گیرد و بخش دوم که در این شمع‌ها اضافه می‌شود لوله‌های انتقال جریان است که درون بخش سازه‌ای قرار گرفته است و وظیفه بحث انتقال حرارت و انرژی را بر عهده دارد، در این فناوری یک سیال انتقال‌دهنده حرارت که عموماً آب و یا اتیلن گلیکول (در برخی شرایط همراه با ضد یخ) است درون لوله‌ها جریان می‌یابد و انتقال جریان حرارت را انجام می‌دهد، این انتقال جریان توسط یک پمپ حرارتی با توان ناچیز انجام می‌گیرد [۷].

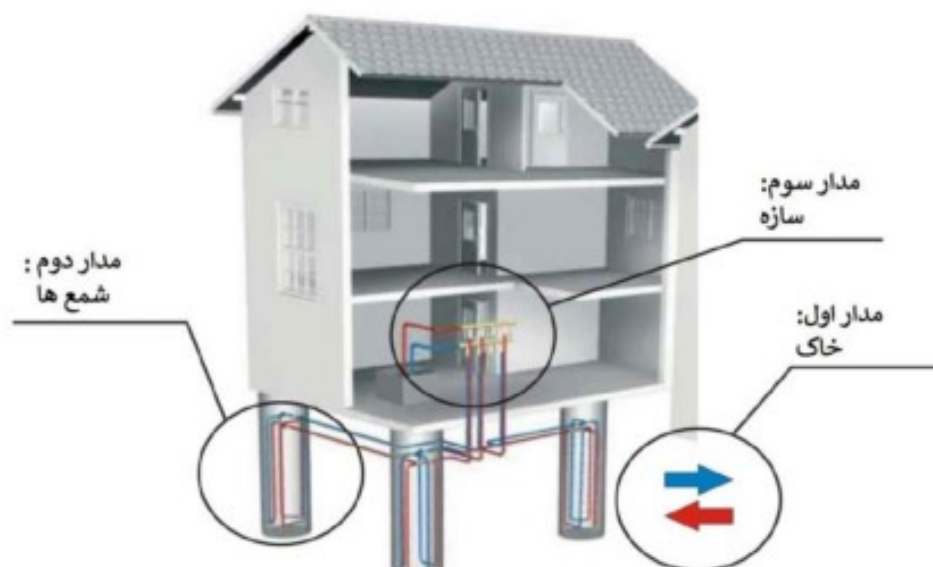


شکل ۱-۲: پیکربندی شمع‌های حرارتی [۸]

^۱ COP

^۲ ASHP

مطابق شکل ۲-۲ در اتصال شمع حرارتی به زمین ۳ مدار اصلی وجود دارد که اولی برای انتقال حرارت بین خاک و سازه دومی بین سازه و پمپ حرارتی و سومی بین پمپ حرارتی و سامانه گرمایشی و سرمایشی ساختمان است، لوله‌هایی از جنس پلی‌اتیلن که درون آنها سیال‌های انتقال‌دهنده حرارت جریان دارد، درون زمین قرار می‌گیرد، پمپ حرارتی با مسئولیت ایجاد جریان درون لوله‌ها بین مدار دوم و سوم ارتباط ایجاد می‌کند [۹].



شکل ۲-۲: سامانه شمع‌های حرارتی [۹]

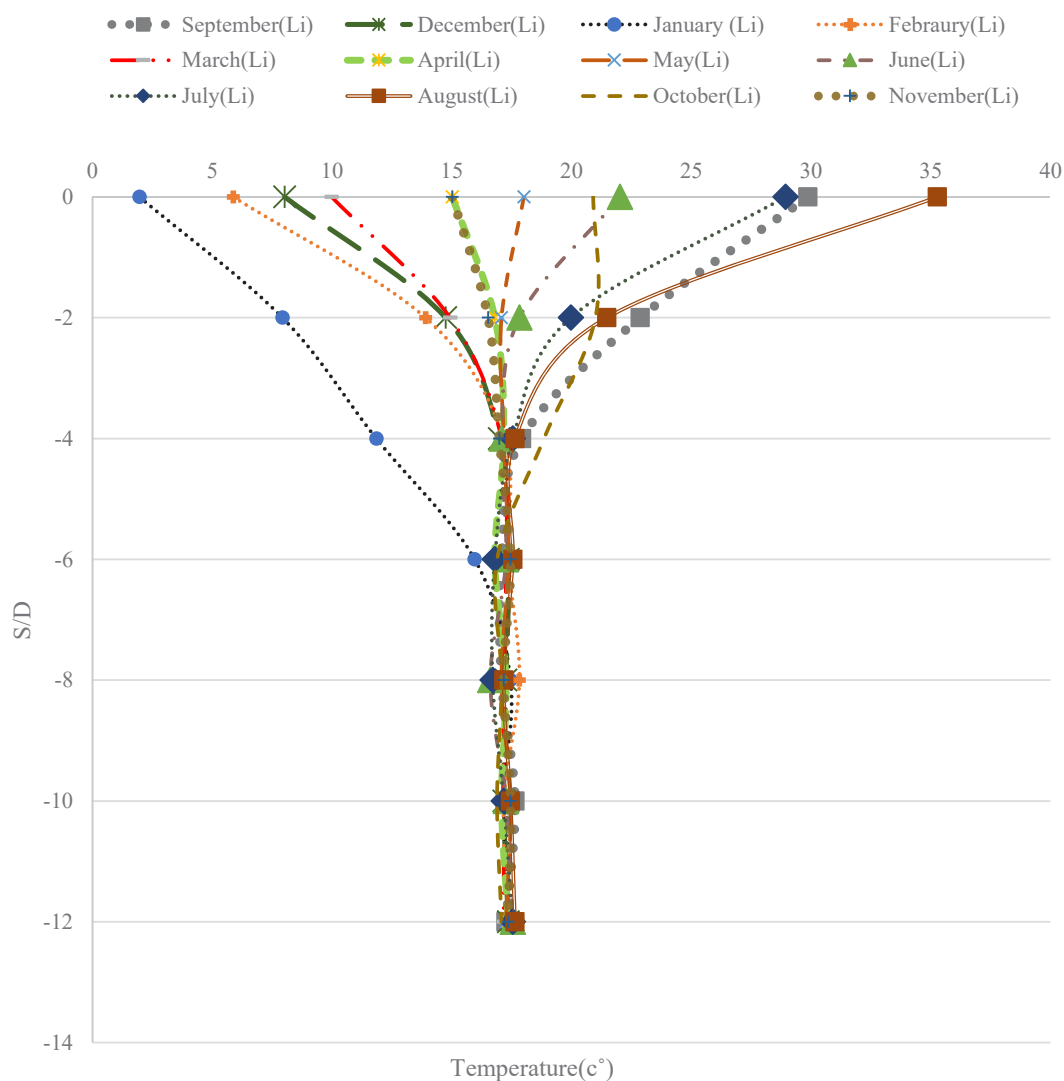
۲-۱-۳ عملکرد حرارتی شمع حرارتی

لی و همکاران^۱ به بررسی عملکرد شمع‌های حرارتی و تغییرات دمایی در اعماق خاک پرداختند و بیان کردند که دمای خاک در اعماق درونی به یک مقدار ثابت در طول سال می‌رسد؛ اما تغییرات دمایی در سطح خاک متغیر است و بیشترین تغییرات دمایی را در سطوح بالایی خاک مشاهده می‌شود [۱۰]. با رفتن به درون خاک و افزایش عمق به تدریج این تغییرات دمایی کاسته می‌شوند به طوری که در یک عمق خاص دمای خاک ثابت می‌شود و در طول سال تغییرات دمایی را تجربه نمی‌کند، این مقدار دمای ثابت در اعماق خاک در تمامی فازها و در تمامی فصول در طی سال حتی بعد از ساخت شمع نیز پایدار است، لی و همکاران با استفاده از تحلیل آزمایشگاهی و اندازه‌گیری میدانی دمای خاک در طول سال برای خاک پکن در شکل ۲-۳ به این نتیجه رسیدند که دمای خاک در اعماق بیشتر از ۶ متری به مقدار ثابتی در طول سال می‌رسد و در فصول سرد دمای سطح خاک و هوا کمتر از درون خاک بوده و در فصول گرم

^۱ Li et al.

سطح خاک دمای بالاتری را تجربه می‌کند و شمع حرارتی در این شرایط وظیفه انتقال سرما از درون خاک در فصل تابستان و انتقال گرما در فصل زمستان را بر عهده می‌گیرد [۱۰].

از سویی آیدین و همکاران^۱ نیز همین مطالعه را بر روی نمونه خاکی در استانبول انجام دادند و در آن دمای خاک در عمقی حدوداً ۹ متری به تعادل رسیده بود، ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که نوع خاک و شرایط محیطی و دمایی در تعادل دمایی خاک موردنظر در اعماق تأثیرگذار بوده است و بسته به آن ممکن است عمق ثابت‌شدن تغییرات دمایی متفاوت باشد [۱۱].



شکل ۲-۳: نمودار تغییرات دمایی در عمق خاک شهر پکن در طول سال توسط لی و همکاران [۱۰]

^۱ Aydin et al.