

INVESTIGATION ON SOIL TEMPERATURE REGIME AND FROST DEPTH OF SOIL IN LABORATORY MODEL

E. Rahnama Yami

Msc student of Agro-meteorology, Department
of Irrigation and Reclamation Eng., University
of Tehran, rahnamayam@yahoo.com

A. Khalili

Professor, Department of Irrigation and
Reclamation Eng., University of Tehran,
akhalili@ut.ac.ir - hrahimi@ut.ac.ir

H. Rahimi

Abstract: Freezing depth is one the important climatic indices in the field of agriculture, civil engineering and etc. This parameter depends on different factors such as astronomical factors, temperature of surface air, amount of humidity, soil characteristics such as texture, heat capacity, thermal conductivity, and specific heat. In this study, for investigating the effect of air temperature on freezing dept, a soil freezing apparatus was made which is able to produce temperatures up to -23 °C. To measure and record the soil temperatures at depths of 10, 20, 50, and 70 cm, a direct measurement system was designed. Sensors of the system include electronic thermostat, which was inserted at different depths of soil. Variation of temperature measured by these sensors, were transferred to a transformer, and the results of measurements transferred to a computer in the form of binary codes. These codes were processed by a computer program and converted to a numerical form. After the calibration, several experiments were conducted using soil bins of different textures including clay, clay-sand, and sand a moisture content of 0, 10, and 15 percent. The results of experiments are summarized as following: Freezing depth of soil in dry state (0% moisture content) for soils having smaller pores (such as clay), is less than soils having larger pores (such as sand). The advancing speed of freezing front has also a similar trend. By increasing the soil moisture (0% to 10%), for all soils the depth of freezing and the advancing speed of freezing front were increased. This condition in soils having finer texture is more pronounced than the soils of coarse texture. By increasing the amount of soil moisture content, the clay soil maintains its moisture through out its depth, while in sandy and clay-sandy soils, the moisture content decreasing from top to the bottom (due to drainage). This phenomenon affects the advancing speed of freezing front of these soils. Finally, the correlation between the time of soil freezing (t), and the temperature at different depths during the freezing process (T), was investigated, and concluded that it can be written in the form of
$$\left\{ T = \frac{(a * b) + c * t^d}{b + t^d} \right\}$$
,

which is significant at 1% level for all three types of soils.

بررسی عمق نفوذ یخبندان خاک‌های با بافت مختلف در شرایط آزمایشگاهی

ابراهیم رهنما یامی، علی خلیلی و حسن رحیمی

چکیده: با آگاهی از عمق نفوذ یخبندان و تغییرات دمایی در خاک، می‌توان راهکارهایی مناسب را به منظور کاهش شدت خسارات وارده بر تاسیسات ساختمانی، جاده‌ها و محصولات کشاورزی اتخاذ نمود. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر دمای هوا بر عمق نفوذ یخبندان، یک دستگاه تبرید خاک ساخته شد که قادر به تامین برودتی برابر با

تاریخ وصول: ۸۶/۵/۱۵

تاریخ تصویب: ۸۸/۲/۷

ابراهیم رهنما یامی، کارشناس ارشد سابق هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، rahnamayam@yahoo.com
دکتر علی خلیلی و حسن رحیمی، اساتید گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. akhalili@ut.ac.ir hrahimi@ut.ac.ir

۲۳- درجه سانتیگراد می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری و ثبت داده‌های دمایی در اعماق مختلف ۵۰، ۲۰، ۱۰ و ۷۰ سانتیمتری خاک، یک سیستم اندازه‌گیری مستقیم طراحی گردید، که حسگرهای آن در اعماق خاک نصب و تغییرات دمایی توسط این حسگرها به یک مبدل منتقل و نتایج اندازه‌گیری توسط کامپیوتر ثبت می‌گردند. پس از کالیبره کردن دستگاه، آزمایشهای متعددی در شرایط خاکهای با بافت رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای تحت رطوبت‌های ۰، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک به انجام رسید و نتایج به منظور تعیین عمق یخبندان تحلیل شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در حالت خشک در خاکهای با تخلخل بیشتر (رسی) نسبت به خاکهای با تخلخل کمتر (ماسه) عمق نفوذ یخبندان کمتر بوده و سرعت حرکت جبهه یخبندان در خاک کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار رطوبت خاک در تمامی خاکهای مورد آزمایش، عمق نفوذ یخبندان بیشتر شده و سرعت پیشرفت جبهه یخبندان نسبت به حالت خشک نیز افزایش یافت، که این امر در خاکهایی با بافت ریزتر (رسی) نسبت به خاکهایی با بافت درشت‌تر (ماسه) مشهودتر بود. با افزایش بیشتر رطوبت خاکهای مورد آزمایش، این ویژگی در خاکهای رسی که می‌توانند رطوبت را در خود نگهداری کنند، محفوظ می‌ماند، ولی در خاکهای ماسه‌ای که رطوبت لایه‌های سطحی به دلیل زهکشی از رطوبت اعماق کمتر است، سرعت جبهه یخبندان نیز کم‌تر بوده است. متقابلاً در اعماق بیشتر که رطوبت در آن ذخیره می‌شود سرعت جبهه بیشتر بوده است.

کلمات کلیدی: رس، ماسه، رطوبت خاک، دمای خاک، عمق نفوذ یخبندان

۱. مقدمه

درجه حرارت خاک یکی از ویژگیهای مهم آن بوده و رشد و نمو گیاهان در گرو تغییرات آن می‌باشد. این متغیر دارای تغییرات روزانه و فصلی است. این تغییرات در سطح خاک حداکثر بوده و با افزایش عمق از دامنه نوسانات آن کاسته می‌گردد. تغییرات فصلی درجه تغییرات فصلی درجه حرارت خاک بسیار کند است، در نتیجه همواره اختلاف زمانی طولانی بین درجه حرارت فصلی هوا با خاک وجود دارد. از عمق حدود ۳ متری به بعد دمای خاک تقریباً ثابت می‌ماند و تغییرات درجه حرارت روزانه نیز از عمق ۱۵ سانتیمتری به بعد کم می‌شود [۳].

یخبندان و ذوب شدن یخ منجر به هوادیدگی سنگها، ایجاد ساختمان مناسب در خاک و تسهیل در تنفس ریشه گیاهان می‌گردد. به این ترتیب تهویه خاک، زهکشی و خشک شدن مجدد آن پس از یک بارندگی و تبادلات با جو از طریق تبخیر و در مجموع تمام فعالیت‌های خاک تحت تاثیر وضعیت گرمایی آن قرار دارند. خصوصیات حرارتی خاکها در بسیاری از زمینه‌های کشاورزی، مهندسی و علوم خاک اهمیت زیادی داشته و آگاهی از آن برای مدل‌سازی انتقال حرارت در خاک ضروری می‌باشد. با آگاهی از عمق نفوذ یخبندان و تغییرات دمایی خاک، می‌توان راهکارهایی مناسب را به منظور کاهش شدت خسارات وارده بر تاسیسات ساختمانی، راهها و محصولات کشاورزی اتخاذ نمود. در رابطه با سازه‌ها و به‌طور کلی ابنیه، آگاهی از این خصوصیت خاک، مدیران را قادر می‌سازد تا با نصب زهکش در عمق مناسب و یا اتخاذ سایر تمهیدات از یخ‌زدگی خاک که منجر به تورم و در نتیجه وارد شدن خسارت به سازه می‌شود، جلوگیری نمایند.

در امر راه‌سازی نیز اثر یخبندان بر عملکرد روبه راه اهمیت زیادی داشته و عوارض آن می‌تواند موجب تخریب آن شود.

همچنین اطلاع از عمق نفوذ یخبندان در پروژه‌های مهندسی مانند احداث پی سازه‌ها و یا نصب تاسیسات و لوله کشی اهمیت اقتصادی زیادی دارد [۲]. در ارتباط با تولید محصولات کشاورزی، عمق نفوذ یخبندان خاک در جوانه زدن گیاهان، فعالیت‌های ریشه، طول دوره رشد گیاه و تولید و گسترش امراض گیاهی نقش بسزایی دارد. رژیم حرارتی همچنین می‌تواند فعالیت میکروبی را بهبود بخشیده و یا در آن وقفه ایجاد نماید. فرآیندهای متعدد فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در خاک به شدت تحت تاثیر دمای آن قرار دارند. جریانهای مایع و گاز نیز متأثر از تغییرات درجه حرارت، بویژه تغییر حاصله در لزوجت و کشش سطحی می‌باشند. واکنش‌های متعدد شیمیایی، مانند انحلال و رسوب کربنات‌ها و سولفات‌ها تحت تاثیر دمای خاک صورت می‌پذیرد [۱-۳].

با توجه به اهمیت پدیده یخبندان خاک در فصل سرما، لزوم شناخت عوامل مؤثر بر این پدیده و چگونگی تغییرات آن در شرایط مختلف آشکار می‌شود. پدیده یخ‌زدگی خاک وابسته به مقدار انرژی سرمایی، مدت زمانی که خاک تحت تاثیر سرما قرار می‌گیرد و ظرفیت حرارتی آن می‌باشد. دو عامل اول، بستگی به موقعیت منطقه و عرض جغرافیایی آن دارند. اما عواملی که بر ظرفیت حرارتی خاک تاثیر گذارند شامل: بافت خاک، مقدار رطوبت، مقدار ماده آلی و میزان تخلخل آن است. ظرفیت حرارتی بمقدار زیادی تحت تاثیر بافت خاک قرار دارد. در هوای مرطوب و خشک، خاکهای رسی ظرفیت حرارتی بالاتری نسبت به خاکهای ماسه‌ای دارند [۱۰]. در سالهای اخیر تلاش‌های بسیاری برای بررسی خصوصیات حرارتی و بویژه انتشار حرارتی خاک صورت گرفته است

۲. مواد و روشها

۲-۱. دستگاه تبرید خاک

دستگاه تبرید خاک ساخته شده در این تحقیق دارای قابلیت تغییر میزان دما (از ۲۳/۷- تا صفر درجه سانتیگراد)، می باشد. اجزاء این دستگاه شامل: کمپرسور یا تولید کننده فشار که یکی از اجزاء سیکل تبرید است، می باشد. کمپرسور، گاز سرمازا را بداخل خود مکش نموده و داخل سیلندر تحت فشار متراکم می سازد. پس از آنکه گاز سرمازا به اندازه کافی متراکم گردید، از طریق لوله رابط به کندانسور هدایت می گردد. گاز متراکم داغ در کندانسور به سرعت گرمای خود را از دست می دهد و پس از خنک شدن، تبدیل به مایع تحت فشار گردیده و از کندانسور خارج و گاز مایع حاصل، از طریق لوله رابط به مخزن دریافت کننده هدایت می گردد سپس گاز مایع خنک وارد تبخیر کننده می گردد. گاز مایع برای تبخیر گرمای محیط را گرفته و در نتیجه محیط اطراف خود را سرد می نماید.

۲-۲. خاک‌های مورد آزمایش

از آنجایی که بافت خاک بر تخلخل آن اثر مستقیم دارد و با افزایش تخلخل میزان هدایت حرارتی خاک کمتر می گردد، در این تحقیق از سه نوع بافت خاک با مشخصات متفاوت استفاده گردید. مشخصات خاکهای مورد استفاده در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.

که به مهمترین آنها در این بخش اشاره می شود. اولین بررسی‌ها برای تعیین عمق نفوذ یخبندان و ذوب آن توسط Stefan (1889) در اقیانوس‌های قطبی صورت گرفت. نشان داده شد که دمای متوسط سالانه زمین با افزایش عمق، زمانی که هدایت حرارتی خاک در حالت انجماد نسبت به حالت غیر منجمد بیشتر است، کاهش می یابد و عمق نفوذ یخبندان در فصول یخبندان به خصوصیات ساختاری برف بستگی دارد [۱۱].

خصوصیات حرارتی و محتوی آب غیر منجمد خاک‌های مختلف را با روش کالریمتری تعیین کرد و نشان داد که مقادیر هدایت حرارتی و گرمای ویژه ارتباط زیادی با دما و محتوی رطوبتی خاک در محدوده دمایی صفر تا ۱۰- درجه سانتیگراد دارند [۸]. بررسی‌های آزمایشگاهی با اندازه‌گیری میدانی در فاصله زمانی زمستان ۱۹۹۹ تا تابستان ۲۰۰۰ توسط بخش هواشناسی ستاد ارتش پایگاه هوایی سوئد انجام شد [۱۲].

هدف این مطالعه ارزیابی روشی جدید برای اندازه‌گیری پیوسته عمق یخبندان در خاک بوده است. رابطه بین عمق یخبندان خاک و دمای ارتفاع دو متری را مورد بررسی قرارداد و نشان داد که این روابط در سطح ۱٪ معنی دار هستند [۱۳]. در تحقیق حاضر به منظور بررسی تاثیر دمای هوا بر عمق نفوذ یخبندان، یک دستگاه تبرید مخصوص خاک ساخته شد که قادر به تامین برودتی برابر با ۲۳- درجه سانتیگراد می باشد.

جدول ۱. مشخصات عمومی خاکهای مورد استفاده در تحقیق

نوع خاک	قطر ذرات (میلیمتر)		تعداد ذرات در گرم	سطح یک گرم از ذرات (سانتیمتر مربع)
	الف	ب		
رس	کوچکتر از ۰/۰۰۲	کوچکتر از ۰/۰۰۲	۹۰۴۶۰۸۵۳۰۰۰	۸۰۰۰۰۰۰
ماسه ریز	۰/۲۵ - ۰/۱	۰/۲ - ۰/۰۲	۴۶۰۰۰	۹۱
مخلوط رس و ماسه	۰/۱ - ۰/۰۰۲	۰/۲ - ۰/۰۰۲	۴۵۱۳۰۴۴۹۵۰	۴۰۰۰۰۴۵

الف: طبقه بندی وزارت کشاورزی آمریکا ب: طبقه بندی بین المللی

جدول ۲. مشخصات مهندسی خاکهای مورد استفاده در تحقیق

نوع خاک	حدود اثر برگ					دانه بندی
	حد روانی	حد خمیری	نمایه خمیری	درصد ماسه	درصد سیلت	
رس	27	14	۱۳	۱۱	۷۴	۱۵
ماسه ریز	۰	۰	NP	۹۲	۸	۰
مخلوط رس و ماسه	52	41	۶	۵۲	۴۱	۷

۲-۳. سیستم اندازه گیری دمای خاک

این سیستم به منظور اندازه گیری همزمان دمای اعماق مختلف خاک طراحی گردیده است. حسگرهای این سیستم در اعماق خاک نصب و تغییرات دمایی توسط این حسگرها به یک مبدل منتقل شده

و نتایج اندازه گیری توسط کامپیوتر ثبت می گردد. پس از کالیبره کردن دستگاه، آزمایشهای متعددی در خاکهای با بافت رسی، رسی- ماسه ای و ماسه ای و رطوبت‌های ۰، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی به انجام رسید و نتایج حاصله به منظور تعیین عمق یخبندان مورد

سطح آن می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دمای اولیه برابر ۱۵ درجه سانتیگراد بوده و پس از گذشت زمانی معادل با ۲۰۰۰ دقیقه، به حالت تعادل نزدیک می‌شود. با کاهش دمای سطح خاک، دمای اعماق مختلف در طول زمان شروع به کاهش می‌نمایند. دمای تعادلی اعماق ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر پس از گذشت مدت زمانی معادل با ۲۳۰۰۰ دقیقه در خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای به ترتیب برابر با (-۴، -۲، +۲ و +۵)، (-۵، -۳، +۲ و +۵) و (-۲، ۰، +۳ و +۵) درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شیب روند تغییرات دمایی وابسته به عمق خاک‌ها و همچنین مدت زمانی است که سطح آنها تحت تاثیر هوای سرد قرار می‌گیرد. به این ترتیب که در اعماق بیشتر (۷۰ سانتی‌متر) نسبت به اعماق کمتر (۱۰ سانتی‌متر)، شیب کمتری مشاهده می‌شود. همچنین در هر عمق پس از گذشت مدت زمان معینی به دمای تعادل می‌رسد. این حالت در اعماق بیشتر نسبت به اعماق کمتر با تاخیر زمانی مواجه است. دمای اعماق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر در زمانهای ابتدایی آزمایش نسبت به اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر دارای اختلاف کمتری هستند، اما با گذشت زمان بیشتر این روند بر عکس می‌شود به گونه‌ای که اختلاف دمایی بین اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر کمتر از اختلاف دمایی بین اعماق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری می‌شود.

تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از اینکه جریان هوای سرد توسط دستگاه تبرید در روی سطح خاک برقرار شد، بسته به مدت دوام سرما و دمای جریان ورودی، سرما در خاک نفوذ می‌کند. با استفاده از این سیستم دمای اعماق مختلف خاک در گام‌های زمانی از پیش تعیین شده بصورت پیوسته اندازه‌گیری شد. سیستم اندازه‌گیری دمای مورد استفاده در این تحقیق از دو بخش به شرح زیر تشکیل شده است:

الف - حسگرهای حرارتی SMT-160-30

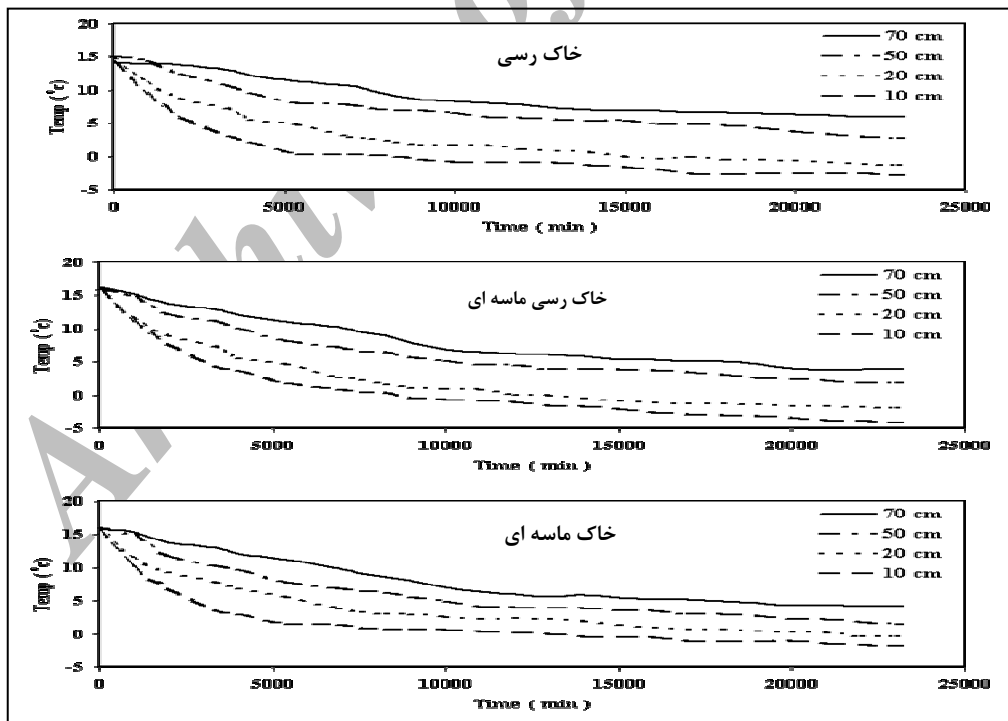
ب - یک دستگاه کامپیوتر برای ثبت داده‌ها

حسگرهای مورد استفاده در این طرح از نوع SMT-160-30 سیکلونی با خروجی دیجیتال می‌باشند. هر سیم خروجی می‌تواند مستقیماً و بدون نیاز به تبدیل A/D به انواع میکروکنترلرها متصل شود.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. روند تغییرات دما در خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای با رطوبت ۰٪

در این حالت تغییرات دمایی خاک‌ها با رطوبت ۰٪، مورد آزمایش قرارگرفت. در شروع آزمایش، دمای تمام اعماق خاک برابر با دما



شکل ۱. روند تغییرات دمای خاک‌های مورد آزمایش در اعماق مختلف بر حسب زمان (رطوبت ۰٪)

اولیه خاک برابر ۱۲ درجه سانتیگراد بوده و بعد از گذشت زمانی معادل با ۲۰۰۰ دقیقه، به حالت تعادل نزدیک می‌شود. با کاهش دمای سطح خاک، دمای اعماق مختلف در طول زمان شروع به کاهش می‌نمایند. دمای تعادلی اعماق ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر

۳-۲. تغییرات دما در خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای با رطوبت ۱۰٪

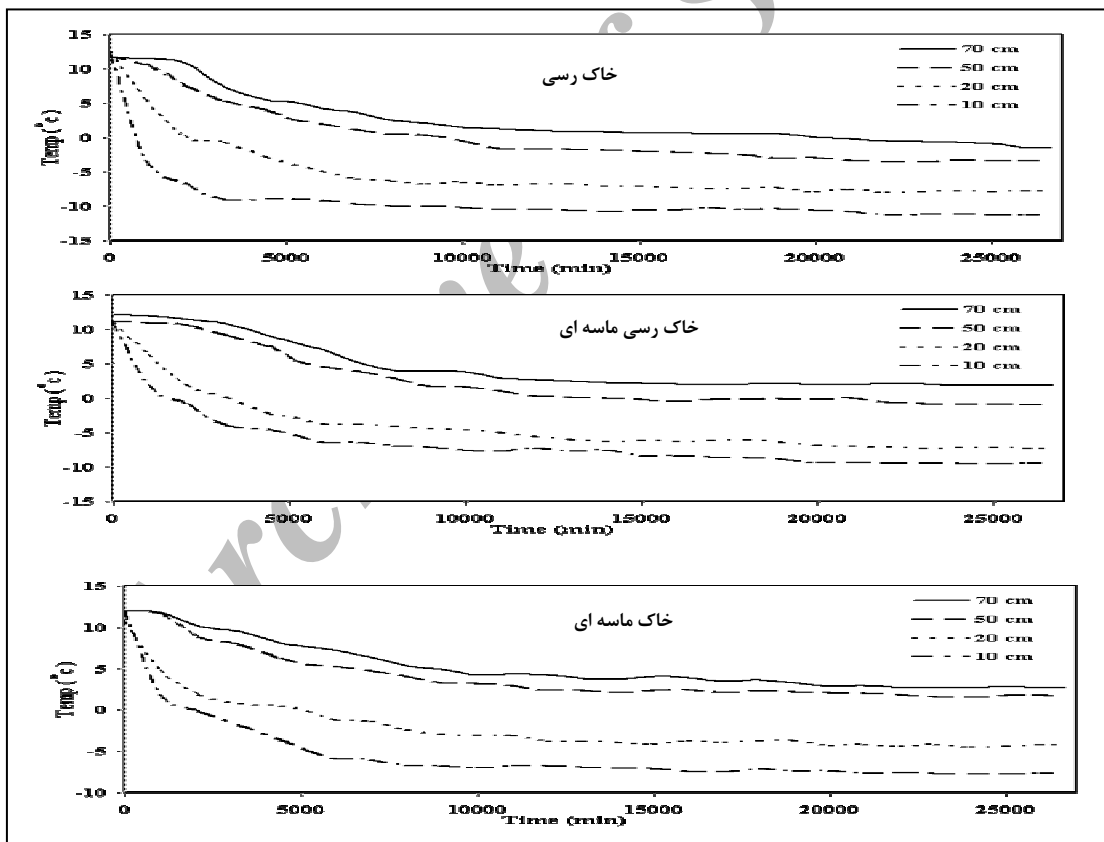
در این حالت تغییرات دمایی خاک‌ها با رطوبت ۱۰٪، مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دمای

رطوبت به خاک، قابلیت هدایت حرارتی آن افزایش یافته و سریع‌تر سرد می‌شود و دمای اعماق مختلف آن در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک کاهش بیشتری را نشان می‌دهد.

۳-۳. روند تغییرات دما در خاک رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای با رطوبت ۱۵٪

در این حالت تغییرات دمایی خاک‌ها با رطوبت ۱۵٪، مورد آزمایش قرار گرفت. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، با کاهش دمای سطح خاک، دمای اعماق مختلف در طول زمان شروع به کاهش می‌نمایند. دمای تعادلی اعماق ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر پس از گذشت مدت زمانی معادل با ۲۷۵۰۰ دقیقه در خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای به ترتیب برابر با (۱۲-، ۸-، ۴- و ۵/۵-، ۹-، ۷-، ۱- و ۳) و (۹-، ۵-، ۴+ و ۵+ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این حالت نیز شیب روند تغییرات دمایی مشابه حالتهای قبل است.

پس از گذشت مدت زمانی معادل با ۲۶۵۰۰ دقیقه در خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای به ترتیب برابر با (۱۲-، ۸-، ۴- و ۱/۵-، ۹-، ۷-، ۱- و ۲) و (۸-، ۴-، ۲+ و ۳+) درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مانند حالت قبل شیب روند تغییرات دمایی وابسته به عمق خاک و همچنین مدت زمانی است که تحت تاثیر هوای سرد قرار می‌گیرد. به این ترتیب که در اعماق بیشتر (۷۰ سانتی‌متر) نسبت به اعماق کمتر (۱۰ سانتی‌متر)، شیب کمتری مشاهده می‌شود. همچنین در هر عمق پس از گذشت مدت زمان معینی به دمای تعادل می‌رسد. این حالت در اعماق بیشتر نسبت به اعماق کمتر با تاخیر زمانی مواجه است. با توجه به شکل (۳)، تغییرات دمایی اعماق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر در زمانهای ابتدایی آزمایش نسبت به اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر کمتر است، اما با گذشت زمان این روند بر عکس می‌شود به‌گونه‌ای که تغییرات دمایی در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر کمتر از تغییرات دمایی در اعماق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری می‌باشد. با مقایسه با شکلهای (۲) و (۳) ملاحظه می‌گردد که با اضافه شدن

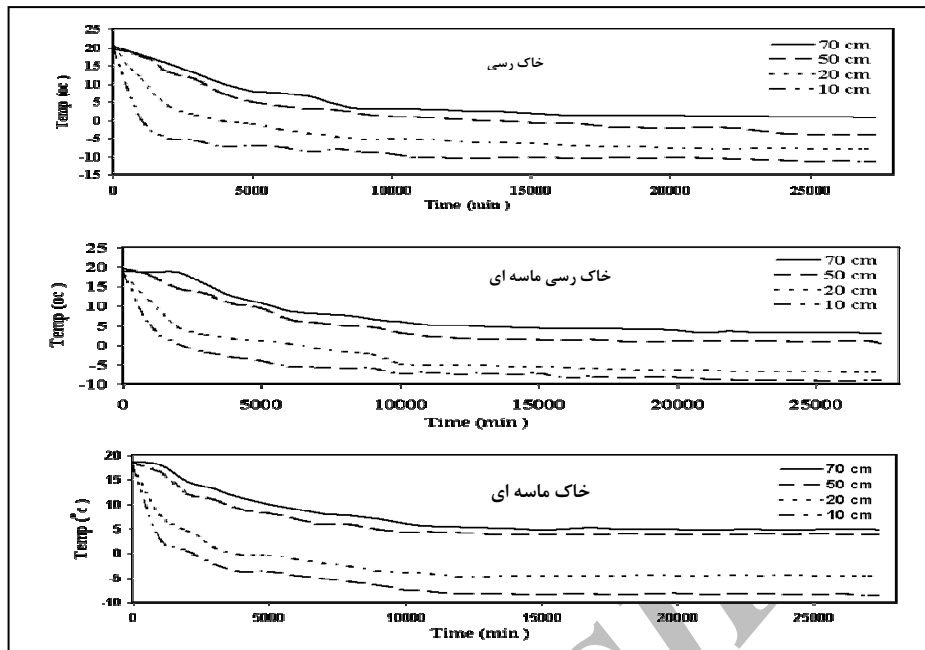


شکل ۲. روند تغییرات دمای خاک‌های مورد آزمایش در اعماق مختلف بر حسب زمان (رطوبت ۱۰٪)

تمامی خاک‌ها یکسان بوده و همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد، برابر ۱۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به شکل، در هر زمان از آزمایش، دمای خاک رسی نسبت به خاک رسی-ماسه‌ای مقدار بیشتری و نسبت به ماسه مقدار کمتری را نشان می‌دهد.

۳-۴. روند تغییرات دمایی خاک خشک در عمق‌های مختلف

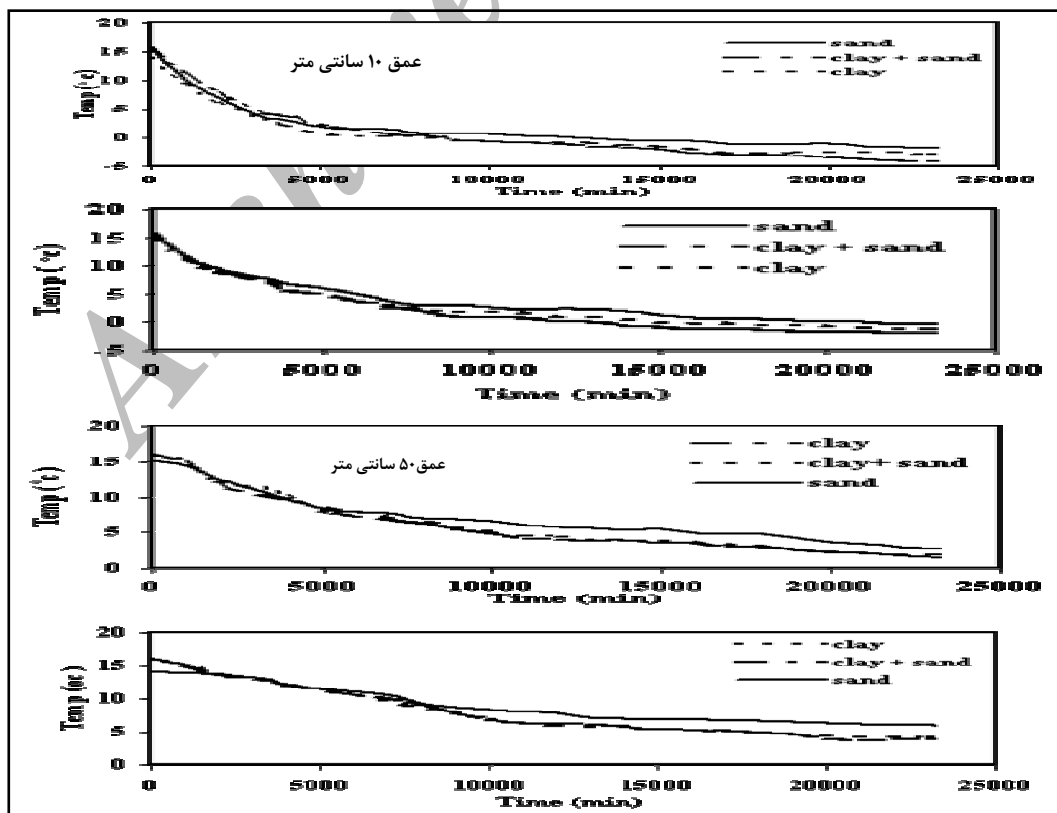
در این قسمت، روند تغییرات دمایی خاک‌های رسی، رسی-ماسه‌ای و ماسه‌ای (در حالت خشک) در اعماق مختلف ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری با یکدیگر مقایسه می‌گردند. در شروع آزمایش دمای



شکل ۳. روند تغییرات دمای خاک های مورد آزمایش در اعماق مختلف بر حسب زمان (رطوبت ۱۵٪)

این پدیده به دلیل بیشتر بودن تخلخل خاک رسی و پایین بودن ضریب هدایت حرارتی هوا می باشد که موجب به تاخیر افتادن جریان سرما به داخل خاک می گردد. در خاک رسی- ماسه ای چون ذرات رس بین ذرات ماسه قرار گرفته و مقدار تخلخل را کاهش می دهند، لذا در این بافت خاک نسبت به دو بافت دیگر هم سرما با

سهولت بیشتری منتقل می شود و هم مقدار آن نسبت به دو خاک دیگر کمتر است. همچنین حداقل دمای مشاهده شده در این آزمایش در خاک های رسی، رسی- ماسه ای و ماسه ای برای اعماق ۷۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰، و ۳ سانتیمتری به ترتیب برابر (۴-، ۵-، ۲-، ۲-، ۳- و ۰)؛ (۲، ۲ و ۳)؛ (۵، ۵، ۶) درجه سانتیگراد است.



شکل ۴. روند تغییرات دمای خاکها در اعماق مختلف بر حسب زمان با رطوبت ۰٪

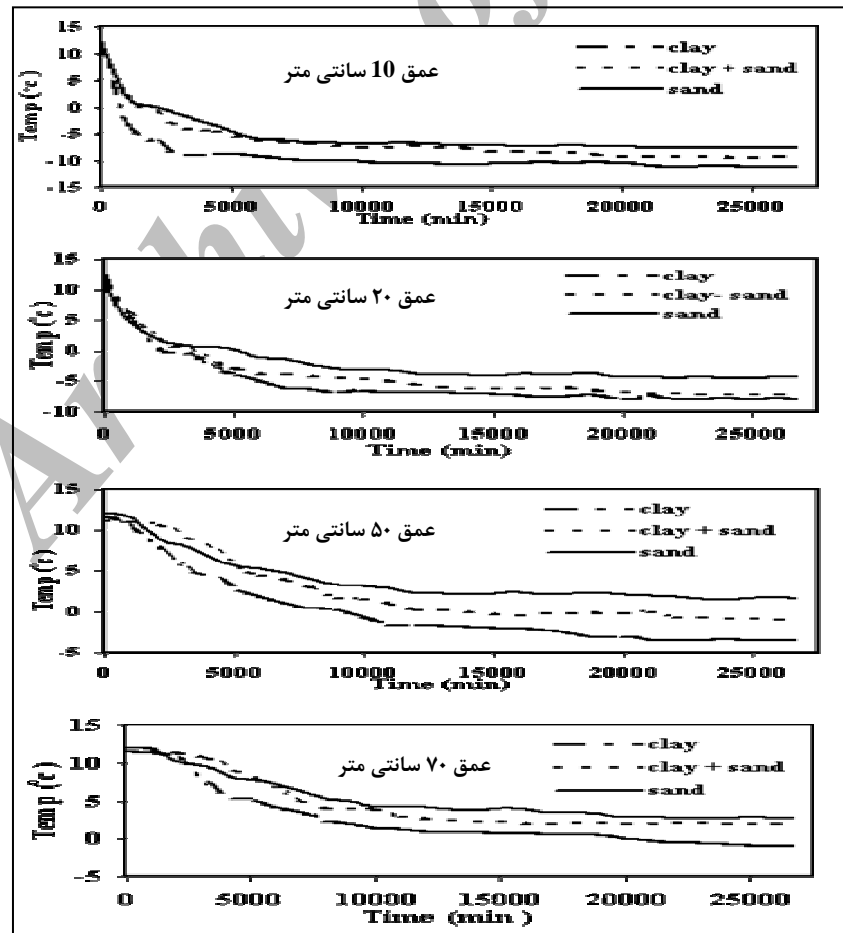
در این حالت، در ابتدا تغییرات دمایی خاک دارای شیب زیاد بوده و به مرور زمان در طول آزمایش، شیب تغییرات تعدیل یافته تا به دمای تعادلی می‌رسد. حداقل دمای مشاهده شده در این حالت در خاک‌های رسی، رسی ماسه ای و ماسه ای برای اعماق ۵۰، ۲۰، ۱۰ و ۷۰ سانتیمتری به ترتیب برابر (۱۲-، ۹-، ۸-)؛ (۸-، ۷-، ۴-)؛ (۴-، ۱- و ۲)؛ (۲-، ۲ و ۳) درجه سانتیگراد می‌باشد.

۳-۶. روند تغییرات دمایی خاک در عمق‌های مختلف تحت رطوبت ۱۵٪

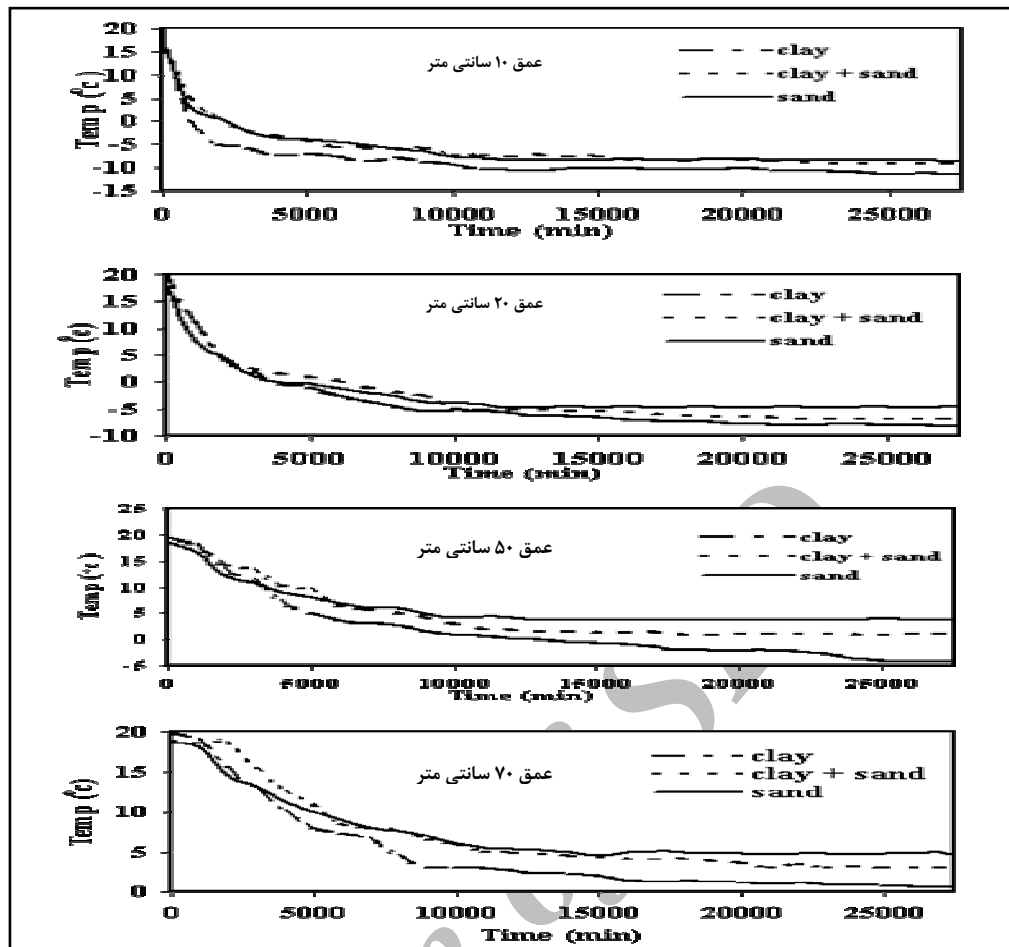
روند تغییرات دمایی خاکهای رسی، رسی-ماسه ای و ماسه ای با رطوبت ۱۵٪ در اعماق مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است، همانطور که مشاهده میشود با افزایش رطوبت به ۱۵٪، روند تغییرات دمایی خاک‌های مختلف مشابه با خاک با رطوبت ۱۰٪ و تفاوت قابل ملاحظه ای بین خاک ماسه ای با دو خاک دیگر (که حاوی ذرات رس می باشند) است. دلیل این تفاوت رفتار در قسمت قبل تشریح شد. حداقل دمای مشاهده شده در این آزمایش در خاک‌های رسی، رسی ماسه ای و ماسه ای برای اعماق ۵۰، ۲۰، ۱۰ و ۷۰ سانتیمتری به ترتیب برابر (۱۲-، ۹- و ۹-)؛ (۸-، ۷- و ۵-)؛ (۴-، ۰ و ۴)؛ (۳، ۰ و ۵) درجه سانتیگراد می‌باشد.

۳-۵. روند تغییرات دمایی خاک در عمق‌های مختلف با رطوبت ۱۰٪

مشابه حالت قبل روند تغییرات دمایی خاکهای رسی، رسی ماسه ای و ماسه ای با رطوبت ۱۰٪ در اعماق مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. با افزایش رطوبت از صفر به ۱۰٪، روند تغییرات دمایی خاک‌های مختلف متفاوت با حالت خشک (۰٪ رطوبت) می‌باشد. به این ترتیب که در خاک ماسه ای به دلیل بالا بودن ضریب زهکشی نسبت به دو خاک دیگر، آب موجود در لایه‌های بالایی خاک به طرف لایه‌های پایین‌تر حرکت نموده و موجب افزایش تخلخل اشغال شده توسط هوا در لایه‌های بالاتر نسبت به دو خاک دیگر می‌شود. در صورتی که در دو خاک رسی و رسی-ماسه ای، آب جذب ذرات خاک شده و کمتر زهکشی می‌شود و در نتیجه دمای این خاک‌ها در مقایسه با خاک ماسه ای در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی متری در هر زمان از آزمایش، کمتر می‌باشد. در خاک رسی ماسه ای در اعماق ۵۰ و ۷۰ سانتیمتری به دلیل توزیع یکنواخت رطوبت و همچنین بالا بودن ظرفیت گرمایی آب نسبت به خاک دمای آن بیشتر از دو خاک دیگر است این پدیده تا زمان حدود ۵۰۰۰ دقیقه صادق است که دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی هوا نسبت به آب می‌باشد.



شکل ۵. روند تغییرات دمایی خاکها در اعماق مختلف بر حسب زمان با رطوبت ۱۰٪



شکل ۶. روند تغییرات دمای خاکها در اعماق مختلف بر حسب زمان با رطوبت ۱۵٪

معادلات برازش داده شده بر داده‌های آزمایشی در اعماق خاکهای مختلف در شرایط رطوبتی صفر، ده و پانزده درصد به همراه ضرایب همبستگی (R^2) مربوطه نشان داده شده است.

در نهایت روابط همبستگی بین مدت زمانی (t) که خاک تحت تاثیر دمای پایین قرار دارد و دمای اعماق خاک (T) مورد تحلیل قرار

گرفت و مشاهده گردید که این روابط به صورت $T = \frac{(ab) + ct^d}{b + t^d}$

و در سطح یک درصد معنی دار می‌باشند. در جدول (۳) تا (۵)

جدول ۳. معادلات برازش یافته بر روند تغییرات دما در اعماق مختلف خاکها تحت رطوبت ۱۰٪

ضریب همبستگی	معادله	نوع	عمق	خاک	ردیف
۰/۹۷	$T = \frac{(14.99 \times 4223.45) + (-3.93692 \times t^{1.104478})}{4223.45 + t^{1.104478}}$	MMF	۱۰		۱
۰/۹۸	$T = \frac{(16.99 \times 911.76) + (-3.6516496 \times t^{0.8588165})}{911.76 + t^{0.8588165}}$	MMF	۲۰		۲
۰/۹۸	$T = \frac{(16.42 \times 1819.45) + (-0.077816302 \times t^{0.8779659})}{1819.45 + t^{0.8779659}}$	MMF	۵۰	رسی	۳
۰/۹۶	$T = \frac{(16.52 \times 1481) + (1.2967727 \times t^{0.81413404})}{1481 + t^{0.81413404}}$	MMF	۷۰		۴
۰/۹۸	$T = \frac{(18.2 \times 550.2) + (-7.50391 \times t^{0.794514})}{550.2 + t^{0.794514}}$	MMF	۱۰	رسی ماسه‌ای	۵
۰/۹۹	$T = \frac{(18.51 \times 403.4) + (-8.6434213 \times t^{0.72093313})}{403.4 + t^{0.72093313}}$	MMF	۲۰		۶

۰/۹۸	$T = \frac{(15.95 \times 47163.7) + (0.73504895 \times t^{1.253892})}{47163.7 + t^{1.253892}}$	MMF	۵۰	۷
۰/۹۷	$T = \frac{(16.36 \times 4766.92) + (-0.715063 t^{0.93445947})}{4766.92 + t^{0.93445947}}$	MMF	۷۰	۸
۰/۹۶	$T = \frac{(13.73 \times 133417 + (-1.18227 \times t^{1.547726}))}{133417 + t^{1.547726}}$	MMF	۱۰	۹
۰/۹۸	$T = \frac{(17.73 \times 395.52) + (-3.4006567 \times t^{0.74844314})}{395.52 + t^{0.74844314}}$	MMF	۲۰	۱۰
۰/۹۸	$T = \frac{(15.6 \times 43356.4) + (0.303992551 \times t^{1.2437206})}{43356.4 + t^{1.2437206}}$	MMF	۵۰	۱۱
۰/۹۷	$T = \frac{(16.5 \times 4140.8) + (-1.0747755 \times t^{0.91345338})}{4140.8 + t^{0.91345338}}$	MMF	۷۰	۱۲

T^1 : دما (درجه سانتی‌گراد)، t : زمان (دقیقه)

جدول ۴. معادلات برازش یافته بر روند تغییرات دما در اعماق مختلف خاکها تحت رطوبت ۱۰٪

ضریب همبستگی	معادله	نوع	عمق	خاک	ردیف
۰/۹۸	$T = \frac{11.991539 \times 1222.8268 + (-11.122893 \times t^{1.116588})}{1222.8268 + t^{1.116588}}$	MMF	۱۰		۱
۰/۹۸	$T = \frac{13.17 \times 6899.106 + (-8.78744928 \times t^{1.18744})}{6899.106 + t^{1.18744}}$	MMF	۲۰		۲
۰/۹۸	$T = \frac{12.06 \times 136351.9 + (-4.72894 \times t^{1.419311})}{136351.9 + t^{1.419311}}$	MMF	۵۰	رسی	۳
۰/۹۵	$T = \frac{13.06 \times 136387.5 + (-1.4854 \times t^{1.414188})}{136387.5 + t^{1.414188}}$	MMF	۷۰		۴
۰/۹۶	$T = \frac{8.3 \times 133416.6 + (-8.42037 \times t^{1.616})}{133416.6 + t^{1.616}}$	MMF	۱۰		۵
۰/۹۷	$T = \frac{9.8 \times 133416 + (-6.57081 \times t^{1.523246})}{133416 + t^{1.523246}}$	MMF	۲۰		۶
۰/۹۵	$T = \frac{12 \times 133415.9 + (-1.83435 \times t^{1.391573})}{133415.9 + t^{1.391573}}$	MMF	۵۰	رسی ماسه‌ای	۷
۰/۹۵	$T = \frac{13.72 \times 133419.8 + (-1.197875 \times t^{1.373286})}{133419.8 + t^{1.373286}}$	MMF	۷۰		۸
۰/۹۸	$T = \frac{12 \times 136387.9 + (-7.07 \times t^{1.575})}{13637.9 + t^{1.575}}$	MMF	۱۰		۹
۰/۹۷	$T = \frac{9.2 \times 136387.8 + (-4.12498 \times t^{1.524})}{136387.8 + t^{1.524}}$	MMF	۲۰		۱۰
۰/۹۷	$T = \frac{13.1 \times 196258 + (2.05 \times t^{1.53616})}{196258 + t^{1.53616}}$	MMF	۵۰	ماسه‌ای	۱۱
۰/۹۶	$T = \frac{13.12 \times 113843.35 + (2.3278885 \times t^{1.409687})}{113843.35 + t^{1.409687}}$	MMF	۷۰		۱۲

T^1 : دما (درجه سانتی‌گراد)، t : زمان (دقیقه)

جدول ۵. معادلات برازش یافته بر روند تغییرات دما در اعماق مختلف خاکها تحت رطوبت ۱۵٪

ردیف	خاک	عمق	نوع	معادله	ضریب همبستگی
۱		۱۰	MMF	$T = \frac{(21.5 \times 217.27) + (-11.43 \times t^{0.87117542})}{217.27 + (t^{0.87117542})}$	۰/۹۸
۲		۲۰	MMF	$T = \frac{(21.9 \times 1649.99) + (-10.2364 \times t^{0.985546})}{1649.99 + (t^{0.985546})}$	۰/۹۷
۳	رسی	۵۰	MMF	$T = \frac{(20.2 \times 532940.5) + (-3.48688 \times t^{1.603312})}{532940.5 + (t^{1.603312})}$	۰/۹۹
۴		۷۰	MMF	$T = \frac{(21 \times 532940.7) + (-.58981 \times t^{1.59029})}{532940.7 + (t^{1.59029})}$	۰/۹۷
۵		۱۰	MMF	$T = \frac{(19.4 \times 766.6) + (-9.57898 \times t^{0.965789})}{766.6 + (t^{0.965789})}$	۰/۹۷
۶		۲۰	MMF	$T = \frac{(20 \times 1551.417) + (-8.5317 \times t^{0.96861})}{1551.417 + (t^{0.96861})}$	۰/۹۸
۷	ماسه‌ای	۵۰	MMF	$T = \frac{(18.9 \times 24040126) + (0.572394 \times t^{2.29694})}{24040126 + (t^{2.29694})}$	۰/۹۸
۸		۷۰	MMF	$T = \frac{(20.16 \times 24040126) + (2.906039 \times t^{2.017416})}{24040126 + (t^{2.017416})}$	۰/۹۸
۹		۱۰	MMF	$T = \frac{(15.68 \times 678.13) + (-8.9593668 \times t^{0.95546874})}{678.13 + (t^{0.95546874})}$	۰/۹۷
۱۰		۲۰	MMF	$T = \frac{(16.2 \times 6888) + (-3.939 \times t^{1.2256})}{6888 + (t^{1.2256})}$	۰/۹۸
۱۱	ماسه‌ای	۵۰	MMF	$T = \frac{(17.44 \times 24040126) + (3.74692 \times t^{2.101196})}{24040126 + (t^{2.101196})}$	۰/۹۹
۱۲		۷۰	MMF	$T = \frac{18.85 \times 5796810.7 + (4.847448 \times t^{1.9136623})}{5796810.7 + t^{1.9136623}}$	۰/۹۸

T^1 : دما (درجه سانتی‌گراد)، t : زمان (دقیقه)

۴. نتیجه‌گیری

نتایج کلی حاصل از این تحقیق را می‌توان بشرح زیر جمع بندی نمود. در خاک رسی با افزایش رطوبت عمق نفوذ یخبندان افزایش یافته و همچنین سرعت پیشروی جبهه یخبندان زیاد می‌شود. در نمونه خاک مخلوط رسی و ماسه‌ای با افزایش رطوبت از صفر به ده درصد عمق نفوذ یخبندان و سرعت پیشروی جبهه یخبندان افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد ولی با افزایش رطوبت به پانزده درصد این دو

متغیر افزایش محسوسی نشان نمی‌دهند. در خاک ماسه ای با افزایش رطوبت از صفر به ده درصد عمق نفوذ یخبندان و سرعت پیشروی جبهه یخبندان افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد ولی با افزایش رطوبت به پانزده درصد این دو عامل تغییری قابل ملاحظه نمی‌کنند. در حالتی که خاک خشک است، در خاک رسی- ماسه ای عمق نفوذ یخبندان و سرعت پیشروی جبهه یخبندان بیشتر از خاک رسی و در خاک رسی بیشتر از خاک ماسه ای است.

- [8] Usowicz, B., Usowicz, L., "Thermal Conductivity of Soils-Comparison of Experimental Results and Estimation Methods". KuK. uni- freiburg. de/hosted/hosted/eurosoil2004/full papers/id795_usowicz_full.pdf, 2004.
- [9] Wierenga, P.J., Nilsen D.R., Hagan R.M., "Thermal Properties of Soil Based Upon Field and Laboratory Measurements". Soil Science Society of America Proceedings, 33, 1999, pp. 354-360.
- [10] Flerchiger, G.N., Saxton. K.E., "Simultaneous Heat and Water Model of a Freezing Snow- Residue-Soil System I. Theory and Development". Trans. Amer. Soc. of Agric. Engr., 32(2): 1989, 565-571.
- [11] Flerchiger, G.N., Saxton. K.E., "Simultaneous Heat and Water Model of a Freezing Snow- Residue-Soil System II. Field Verification". Trans. ASAE., 32: 1989b , pp. 573-578.
- [12] Jansson, P.E., "Soil Water and Heat Model. Technical Description". Rep. No.165, Dept. Soil., Swedish univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, 1991

[۱۳] آقاشریعتمداری، ز.، تعیین عمق نفوذ یخبندان در چند نمونه اقلیمی و تیپ خاکی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش هواشناسی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.

در حالتی که رطوبت خاک به ده درصد وزنی می‌رسد دو متغیر عمق نفوذ یخبندان و سرعت پیشروی جبهه یخبندان در خاک رسی بیشتر از مخلوط خاک رسی و ماسه ای و در این مخلوط بیشتر از خاک ماسه ای است. در خاک رسی چون آب جذب ذرات خاک شده و همچنین در بین خلل و فرج ذرات خاک باقی می ماند و از طرفی چون قابلیت انتشار حرارتی یخ بیشتر از هوا است، لذا با افزایش رطوبت خاک رسی، قابلیت انتقال حرارتی آن افزایش یافته و در نتیجه سرعت پیشروی جبهه یخبندان و عمق نفوذ آن بیشتر می گردد ولی در خاک ماسه ای بدلیل زهکشی شدن، آب قابل ملاحظه ای بین ذرات باقی نمی ماند و لذا سرعت پیشروی جبهه یخبندان در این خاک با رطوبت ده درصد کمتر از خاک رسی است. تغییرات در رطوبت پانزده درصد نیز شبیه رطوبت ده درصد می باشد. در خاک ماسه ای به دلیل بالا بودن ضریب زهکشی نسبت به دو خاک دیگر، آب موجود در لایه‌های بالایی خاک به طرف پایین حرکت نموده و موجب افزایش تخلخل در لایه های بالاتر نسبت به دو خاک دیگر می‌شود. در صورتی که در دو خاک رسی و رسی ماسه ای، آب جذب ذرات خاک شده و کمتر زهکشی می شود و در نتیجه دمای این خاک‌ها در مقایسه با خاک ماسه ای در هر زمان از آزمایش، کمتر می‌باشد.

مراجع

- [1] Bristow, K.I., "Measurement of Thermal Properties and Water Content of Unsaturated Sandy Soil Using Dual-Probe Heat-Pulse Probes". Agricultural and forest meteorology, 89 , 1998, pp.75-84.
- [2] Hass, W.M., Winters, L.H., "Freezing Degree-Days and Forest Penetration Under Roads". In Proceeding, 3rd International Specialty Conference on Cold Regions Engineering , Edmonton, Alberta, 1984, pp. 1151-1165.
- [3] Jansson, P.E., "Soil Water and Heat Model. Technical Description". Rep. No.165, Dept. Soil., Swedish univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, 1991.
- [4] Nidal, H., Abu-Hamdeh., "Thermal Properties of Soils as Affected by Density and Water Content". Biosystems Engineering. 86(1). 2003, pp. 97-102.
- [5] Noborio, K., Mc Innes K.J., Heilman J.L., "Two-Dimensional Model for Water, Heat and Solute Transport in Furrow- Irrigated Soil". I Theory, II Field evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J., 60, 1996, pp. 1001-1021.
- [6] Thomas, H.P., Trat, R.G., "Two- Dimensional Simulation of Freezing and Thawing in Soils". In Proceedings, 3rd International Specialty Conference on Cold regions Engineering, Edmonton, Alberta, 1989, pp. 265-274.
- [7] Usowicz, B., "Studies on the Dependence of Soil Temperature on its Moisture in Field". Ph.D. Thesis(in polish). Academy of Agriculture, Lubline, 1991.