

پهنه‌بندی زمین‌آماری دمای خاک در محدوده ریشه ذرت تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

فاطمه کاراندیش¹ و علی شاهنظری

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل؛ Karandish_h@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ aliponh@yahoo.com

دریافت: 92/9/3 و پذیرش: 94/1/26

چکیده

دمای خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رشد گیاه بوده و کنترل آن در حد بهینه می‌تواند زمینه نیل به حداکثر محصول را فراهم آورد. دشواری‌های اندازه‌گیری مستقیم این عامل و محدودیت نقاط اندازه‌گیری شده، لزوم استفاده از روش‌های غیرمستقیم در پهنه‌بندی دمای خاک به منظور یافتن مقادیر این پارامتر در نقاط فاقد مقادیر مشاهده‌ای را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. لذا، در این بررسی، کارایی روش‌های زمین‌آمار شامل میانگین متحرک وزنی، کریجینگ معمولی و کوکریجینگ با دو متغیر کمکی رطوبت و هدایت الکتریکی در برآورد دمای خاک تحت سه تیمار آبیاری کامل و آبیاری ناقص ریشه در دو سطح 75 و 55 درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری دما، رطوبت و هدایت الکتریکی از سنسورهای رطوبت‌سنج الکترومغناطیس استفاده شد. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده دمای خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و بر اساس شاخص‌های MAE، RMSE و MBE نشان داد مقدار این شاخص‌ها بین 0/001 تا 0/04 درجه سانتی‌گراد متغیر است. مقدار ناچیز آن‌ها حاکی از اعتبار روش‌های منتخب در این مطالعه در پهنه‌بندی میزان دمای خاک در محدوده ریشه گیاه در هر سه تیمار می‌باشد. با این وجود، میزان شاخص‌های ارزیابی در روش کریجینگ در تمام تیمارها در حد معنی‌داری کمتر از سایر روش‌ها بود. استفاده از متغیر کمکی رطوبت در روش کوکریجینگ در هر سه تیمار، میزان شعاع تأثیر را کاهش داده و استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی منتج به عدم پیوستگی کوواریوگرام متقابل دما و هدایت الکتریکی شده است. لذا، می‌توان مطرح نمود که حتی در شرایط رطوبتی خاص حاکم بر استراتژی آبیاری ناقص ریشه، روش کریجینگ در مقایسه با روش کوکریجینگ با متغیر کمکی رطوبت، خطای تخمین دمای خاک در محدوده ریشه گیاه را در حد معنی‌داری کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری ناقص ریشه، کریجینگ، کوکریجینگ

¹ نویسنده مسئول، آدرس: دانشگاه زابل، دانشکده‌ی آب و خاک، گروه مهندسی آب

مقدمه

خاک بستر اصلی رشد گیاه بوده و دمای آن، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در رشد گیاه است. تغییرات دما با مکانیزم‌های متفاوتی می‌تواند رشد گیاه را تحت تأثیر خود قرار دهد. کاهش دمای خاک از یک سو به دلیل کاهش نفوذ ریشه (لامبرس و همکاران، 1998) و از سوی دیگر با افزایش گرانیروی آب و کاهش سرعت حرکت آب در خاک (کازلوسکی و پالاردی، 1997) می‌تواند جذب آب به وسیله گیاه را تحت تأثیر قرار دهد. افزایش بیش از حد دمای خاک نیز می‌تواند سبب کاهش توانایی ریشه در جذب آب شود (ناینانایاک و همکاران، 2008). تأثیر دمای خاک بر گیاه تنها به کاهش جذب آب منتهی نشده و جذب عناصر غذایی مهم مانند نیتروژن را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد (دانگ و همکاران، 2010). کاهش جذب آب و عناصر غذایی می‌تواند باعث کاهش میزان کلروفیل، کاهش قابلیت هدایت روزنه، افزایش مقاومت سیتوپلاسم و افزایش پتانسیل آب برگ (آفالو و همکاران، 2006) و کاهش میزان خالص فتوسنتز (شوارتز و همکاران، 1997) گردد. بنابراین، با توجه به اهمیت تغییرات دما در خاک، اطلاع از شرایط دمایی به منظور پیش‌بینی، کنترل و بهبود وضعیت در راستای رسیدن به بالاترین عملکرد، لازم و ضروری می‌باشد (کاسوبوچی، 1982).

با توجه به دشواری پایش تغییرات دمایی خاک به دلیل وجود عوامل متفاوت تأثیرگذار مانند شرایط اتمسفری، گیاهی و برخی خواص پویای خاک مثل آلیبدو و رطوبت (کارلسون و همکاران، 1981، پرات و الیت، 1979، پرایس، 1980)، برخی محققان تلاش نموده‌اند تا با کاربرد علم زمین‌آمار، رابطه‌ای بین تعدادی از ویژگی‌های خاک و موقعیت مکانی آنها بیابند (الکاسی، 2002). با این وجود، تعداد تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، محدود می‌باشد. در برخی مطالعات روند تغییرات مکانی و زمانی دما در خاک تحت کشت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه این روند گاهی به صورت مستقیم و مشاهده‌ای در بازه‌های زمانی مشخص (آبزالیموو، 2007، لی و همکاران، 2009) و گاهی به صورت غیرمستقیم و بر اساس مقادیر مربوط به یک و یا چند عامل مؤثر در روند تغییرات دما، صورت گرفته است. به عنوان نمونه، نتایج تعدادی از مطالعات حاکی از آن است که بین میزان دمای خاک و میزان هدایت الکتریکی آن ارتباط معنی‌داری وجود دارد (برویلک و همکاران، 2004، ما و همکاران، 2011). دمای خاک علاوه بر تأثیر مستقیم بر میزان هدایت الکتریکی، به طور غیر مستقیم نیز با تأثیر بر برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی

و بیولوژیکی خاک این عامل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاسوبوچی (1982)، با استفاده از رابطه بین هدایت گرمایی و دما، توزیع دوبعدی دما در لایه‌های سطحی خاک را استخراج نمود. دوان و چن (2010) تأثیر مرحله رشد گیاه بر دامنه تغییرات اختلاف دمای حداقل و حداکثر در خاک را بررسی و اعلام نموده‌اند، این دامنه در مراحل ابتدایی و انتهایی رشد، حداکثر مقدار خود را دارا می‌باشد، در حالیکه در مرحله میانی رشد، تفاوت معنی‌داری بین این دو حد مشاهده نشده است. در برخی مطالعات، مدلی برای شبیه‌سازی روند تغییرات مکانی دما در خاک با استفاده از روش‌های عددی توسعه داده شده است (یوسویکز و همکاران، 1996، تاناکا و ایشیل، 2000). در مجموع، بررسی منابع پیشین حاکی از انجام پژوهش‌های اندکی در شرایط کشت گیاه و به ویژه در محدوده ریشه می‌باشد.

رطوبت خاک، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که می‌تواند دمای خاک را تا حد زیادی کنترل نموده (هلاوینکا و همکاران، 2009) و زمینه مناسب و یا نامناسب برای رشد گیاه را فراهم آورد. لذا اعمال استراتژی‌های مختلف آبیاری به دلیل تغییر در نحوه توزیع مکانی رطوبت، می‌تواند عاملی تأثیرگذار در نحوه تغییرات دما در محدوده ریشه گیاه باشد. آبیاری ناقص ریشه یکی از استراتژی‌های نوین آبیاری در راستای افزایش کارایی مصرف آب است که بر اساس روند تغییرات رطوبت در خاک ابداع شده است (درای و همکاران، 2000). در این شیوه آبیاری، تنها بخشی از ریشه در هر بار آبیاری شده و بخش دیگر خشک باقی می‌ماند. لذا با توجه به شرایط خاص رطوبتی در این روش آبیاری، روند تغییرات دمایی خاک به عنوان تابعی از رطوبت آن نیز می‌تواند متفاوت از سایر روش‌ها باشد. با این وجود بررسی تغییرات مکانی و زمانی این عامل تحت آبیاری ناقص ریشه تاکنون مورد توجه نبوده است. این در حالی است که تغییر دمای خاک اثرات معنی‌داری بر میزان جذب آب و املاح و داشته و به این ترتیب می‌تواند میزان محصول را نیز متأثر سازد. لذا با توجه به اهمیت پایش مکانی دمای خاک در محدوده توسعه ریشه گیاه و از طرف دیگر دشواری اندازه‌گیری دمای خاک در محدوده‌های عمقی مختلف در خاک، در این مطالعه کارایی روش‌های زمین‌آمار در پهنه‌بندی تغییرات مکانی دمای خاک تحت رژیم‌های مختلف آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی طرح و جمع‌آوری داده‌ها

این پژوهش به صورت مزرعه‌ای و در زمینی به مساحت 495 مترمربع (33 متر در 15 متر) واقع در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری روی گیاه ذرت انجام شد. بافت خاک تا عمق 20 سانتیمتری لوم-رسی شنی و سپس تا عمق 100 سانتیمتری لوم رسی بوده است. ذرت کشت شده، رقم دیررس 704 و زمان کشت آن اوایل اردیبهشت ماه با فواصل کشت 20 سانتی‌متر در 60 سانتی‌متر و دوره رشد آن تا زمان رسیدن دانه‌ها 107 روز بوده است. در این بررسی، سه تیمار آبیاری کامل¹ (FI)، آبیاری ناقص (PRD)² در سطح 75 درصد (PRD₇₅) و آبیاری ناقص در سطح 55 درصد (PRD₅₅) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اعمال شد که مساحت هر تیمار در مجموع سه تکرار معادل 165 مترمربع بود. روش آبیاری در این پژوهش، آبیاری قطره‌ای سطحی با فواصل قطره-چکان 40 سانتیمتر و دبی دو لیتر بر ساعت بود. آبیاری تیمار FI به صورت روزانه و با هدف رساندن میزان رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه انجام و عمق آب آبیاری در این تیمار با استفاده از رابطه شماره 1 محاسبه شد:

$$I_n = \sum_{i=1}^m ((\theta_{FCi} - \theta_{BHi}) \times D_i) \quad (1)$$

که در آن: θ_{FCi} درصد حجمی ظرفیت مزرعه در هر لایه، θ_{BHi} درصد حجمی رطوبت خاک قبل از آبیاری در هر لایه، D_i عمق خاک آبیاری شده به میلی‌متر در هر لایه، I_n عمق خالص آبیاری به میلی‌متر و i شماره لایه خاک است. تا قبل از شروع اعمال تیمارها، تمام کرت‌ها آب مساوی و برابر با مقدار محاسبه شده برای تیمار آبیاری کامل دریافت می‌کردند. زمان اعمال تیمار از 55 روز بعد از کاشت تا انتهای فصل رشد (107 روز بعد از کاشت) بوده و تیمارهای PRD₇₅ و PRD₅₅ در هر نوبت آبیاری به ترتیب 75 و 55 درصد از عمق آب محاسبه شده در تیمار آبیاری کامل را در طول دوره اعمال تیمار در نیمی از ریشه دریافت نموده‌اند. به منظور تأمین تمام داده‌های مورد نیاز، دو نوع سنسور رطوبت سنج TDR شامل Decagon TDR و IDRG-T2 در تمام تیمارها نصب شد. قبل از کاشت، سنسورهای یاد شده در لایه‌های مختلف خاک تا عمق 100 سانتیمتر نصب شدند. به منظور

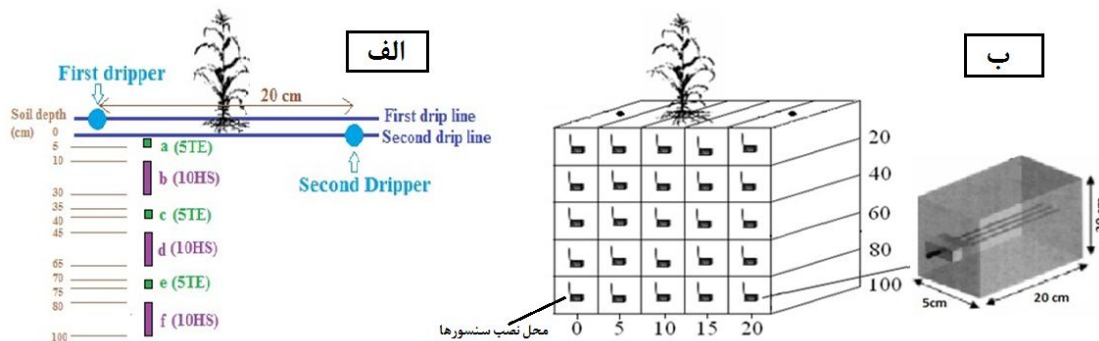
استخراج رابطه بین مقادیر دما و هدایت الکتریکی، شش سنسور Decagon TDR در حفاصل بین قطره چکان و گیاه به صورت عمودی و با فاصله پنج سانتی‌متر از هم در اعماق (a) 0-5، (b) 10-30، (c) 35-40، (d) 45-65، (e) 70-75 و (f) 80-100 سانتیمتر در سه تکرار آبیاری کامل نصب شدند. سنسورهای a، c و e از نوع 5TE (Decagon, USA) برای اندازه‌گیری دما، هدایت الکتریکی و رطوبت و سنسورهای b، d و f از نوع 10HS (Decagon, USA) بوده که تنها برای اندازه‌گیری رطوبت به کار برده می‌شود (شکل 1-الف). همچنین به منظور پهنه‌بندی دمای خاک در تیمارهای مختلف، سنسورهای IDRG-T2 که قادر به اندازه‌گیری همزمان دما و رطوبت خاک می‌باشند، در تمام تیمارها نصب شد.

بدین منظور 25 سنسور IDRG-SMS T2 در حفاصل بین دو قطره‌چکان مجاور و تا عمق 100 سانتی-متری مانند آنچه در شکل 1-ب نشان داده شده است نصب شده و داده‌های دما و رطوبت به صورت روزانه و در طول دوره رشد گیاه (107 روز) یک ساعت قبل و بعد از آبیاری قرائت شد. جهت تعیین رابطه دما با رطوبت و هدایت الکتریکی، مقادیر این خصوصیات با استفاده از سنسورهای مختلف در یک بازه زمانی 10 روزه (29 تیر لغایت 7 مرداد 89) در زمان‌های یک ساعت قبل از آبیاری، بلافاصله بعد از آبیاری و در زمان‌های یک، دو، چهار، شش و هشت ساعت بعد از آبیاری به صورت همزمان اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی صحت مقادیر رطوبت و هدایت الکتریکی قرائت شده با سنسورهای TDR، در تیمارهای FI، PRD₇₅ و PRD₅₅ طی هشت نوبت در طول دوره اعمال تیمار (در تاریخ‌های 55، 61، 68، 75، 82، 89، 96 و 103 روز بعد از کاشت) نمونه‌هایی از عمق‌های 10، 30، 50، 70 و 90 سانتیمتری در پای بوته با استفاده از اوگر برداشت شده و مقادیر رطوبت وزنی (با قرار دادن نمونه‌های خاک در آون با درجه حرارت 105 درجه سانتیگراد و به مدت 24 ساعت) و هدایت الکتریکی (با تهیه عصاره اشباع از نمونه‌های خاک) آنها بدست آمد. تعداد نمونه‌های برداشت شده در هر نوبت نمونه‌برداری 15 نمونه بود. سپس این مقادیر با مقادیر برآورد شده هدایت الکتریکی و رطوبت خاک بوسیله سنسورهای Decagon TDR و IDRG SMS T2 در هنگام نمونه-برداری بر اساس معیارهای شاخص همخوانی، دقت، انحراف و مجذور مجموع مربعات خطا (معرفی شده در بند مورد مقایسه قرار گرفت.

1. Full Irrigation (FI)

2. Partial Root zone Drying (PRD)



شکل 1- نحوه استقرار سنسورهای TDR (الف) نحوه استقرار سنسورهای IDRGSMS T-2 (ب)

آمده با روش‌های مختلف، علاوه بر سه معیار فوق، از شاخص همخوانی⁷ نیز طبق رابطه شماره 7 استفاده شد (تافته و سپاسخواه، 2012):

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (|Z(x_i) - M1| + |Z^*(x_i) - M2|)^2} \right\} \quad (5)$$

که در آن، d ، شاخص همخوانی مدل $(0 < d < 1)$ ، $M1$ میانگین مقادیر مشاهداتی و $M2$ میانگین مقادیر محاسباتی می‌باشد. داده‌های بدست آمده در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

نتایج

تحلیل داده‌ها و واریوگرام‌ها

بررسی مقادیر همزمان رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از سنسورهای *Decagon TDR* و *IDRG-T2* و مقایسه آن با رطوبت وزنی محاسبه شده در آزمایشگاه نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد بین مقادیر میانگین و انحراف از معیار داده‌های اندازه‌گیری شده با دو نوع سنسور یاد شده و مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با روش وزنی وجود ندارد (شکل 2). همچنین نتایج تجزیه واریانس دانکن نشان داد که در هیچ یک از تاریخ‌های 55، 61، 68، 75، 82، 89، 96 و 103 روز بعد از کاشت، اختلاف معنی‌داری در سطح 5% بین مقادیر هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و با استفاده از سنسورهای *Decagon 5TE* وجود نداشت. نتایج این بررسی نشان‌دهنده شاخص همخوانی 0/992 بوده و حداکثر میزان شاخص‌های *RMSE*، *MAE* و *MBE* در تاریخ‌های مذکور به ترتیب برابر با 0/0062، 0/0025 و 0/0028 دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. شکل (2) مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در 82 روز بعد از کاشت را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی دمای خاک در منطقه ریشه

پس از جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای، پهنه‌بندی دمای خاک در محدوده توسعه ریشه ذرت در هر تیمار بر اساس روش‌های زمین‌آمار و با استفاده از برنامه *Geostatistics* در محیط *GIS* صورت گرفت. بدین منظور، از روش‌های میانگین متحرک وزنی¹، کریجینگ² و کوکریجینگ³ با دو متغیر کمکی رطوبت و هدایت الکتریکی استفاده شد.

معیارهای ارزیابی و تجزیه آماری

برای بررسی دقت روش‌های زمین‌آمار و یا انتخاب عامل مناسب در آنها از روش ارزیابی تقاطعی استفاده شد. در این روش مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمینی توسط روش‌های مورد استفاده، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. انتخاب روش برتر بر اساس سه معیار میانگین قدر مطلق خطا⁴، میانگین خطای انحراف⁵ و مجموع مربعات باقیمانده خطا⁶ به شرح روابط شماره 4، 5 و 6 صورت گرفت (تقیان و رحیمی، 2008).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (3)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2 \right\}^{0.5} \quad (4)$$

که در آنها: *MAE*، میانگین قدر مطلق خطا، *MBE*، میانگین خطای انحراف، *RMSE*، مجموع مربعات باقیمانده خطا، $Z(x_i)$ ، مقدار مشاهده‌ای، $Z^*(x_i)$ ، مقدار برآورد شده متغیر و n تعداد داده‌ها می‌باشد. در این مطالعه به منظور بررسی همخوانی دو سری داده بدست

1. Weighted Moving average (WMA)

2. Kriging

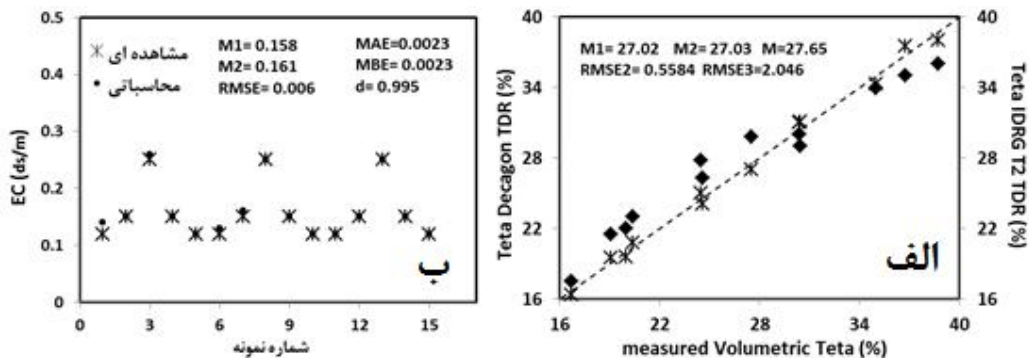
3. Co-Kriging

4. Mean Absolute Error (MAE)

5. Mean Bias Error (MBE)

6. Root Mean Square Error (RMSE)

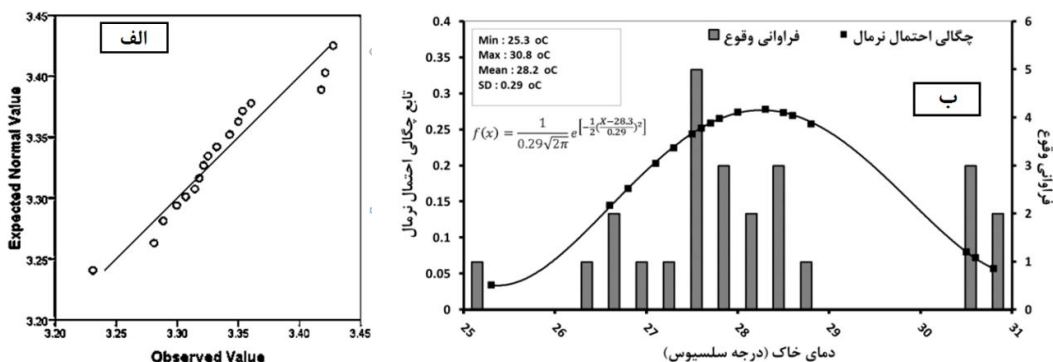
7. Index of Agreement



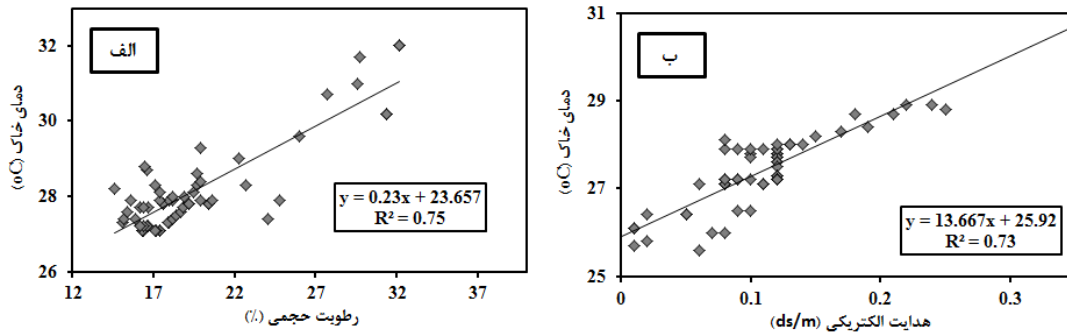
شکل 2- مقایسه مقادیر رطوبت خاک به روش وزنی و برآورد شده با دو نوع TDR (الف) و مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای هدایت الکتریکی (ب)

با ضریب تبیین 0/73 بین میزان تغییرات هدایت الکتریکی با تغییرات دما و همچنین یک رابطه خطی با ضریب تبیین 0/75 بین مقادیر تغییرات رطوبت و تغییرات دمای خاک وجود دارد (شکل 4). وجود روابط معنی‌دار بین مقادیر دمای خاک و دو خصوصیت هدایت الکتریکی و رطوبت خاک در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (برویلک و همکاران، 2004، ما و همکاران، 2011، مورگان و همکاران، 2001، هلاوینکا و همکاران، 2009). بر این اساس این دو خصوصیت به عنوان متغیرهای کمکی در روش کوکریجینگ استفاده شد.

اگرچه نتایج بررسی نمودار Q-Q دمای خاک و منحنی فراوانی و تابع چگالی احتمال نرمال این عامل در برخی روزهای مورد بررسی حاکی از نرمال بودن داده‌ها در سطح اعتماد 95 درصد است (شکل 3 به عنوان نمونه در 82 روز بعد از کاشت)، اما این شرایط برای کلیه داده‌های بدست آمده وجود نداشت. لذا، نظر به اهمیت شرط نرمال بودن داده‌ها در استفاده از روش‌های زمین‌آمار، مقادیر این داده‌ها با استفاده از روش لگاریتم، نرمال شده و مقادیر چولگی و کشیدگی آنها به کمتر از 0/5 کاهش داده شد. بررسی مقادیر همزمان میزان هدایت الکتریکی، دما و رطوبت خاک با استفاده از سنسورهای رطوبت-سنج الکترومغناطیس Decagon 5TE نشان داد یک رابطه خطی



شکل 3- نمودار Q-Q (الف) و فراوانی و احتمال وقوع داده‌ها (ب)



شکل 4- رابطه مقادیر دما با رطوبت (الف) و هدایت الکتریکی (ب)

می‌گیرد (برویلک و همکاران، 2004، ما و همکاران، 2011)، اما در این مطالعه، استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی در برآورد دمای خاک منتج به عدم پیوستگی مکانی واریوگرام متقابل دما و هدایت الکتریکی شد. این نتیجه امکان استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی در پهنه‌بندی دمای خاک با روش کوکریجینگ را علیرغم وجود ارتباط معنی‌دار بین این دو خصوصیت، غیرممکن می‌سازد. این نتیجه می‌تواند به دلیل تغییر مقیاس پهنه‌بندی در مطالعه حاضر و محدود نمودن آن به منطقه ریشه گیاه باشد. تأثیر وسعت منطقه مطالعاتی در انتخاب روش زمین‌آماري در درون‌یابی یک عامل خاص در مطالعه‌ای دیگر نیز گزارش شده است (تقیان رحیمی، 2008).

تحلیل واریوگرام‌های تجربی در جهت‌های مختلف نشان‌دهنده وجود ناهمسانگردی در داده‌ها است. لذا، از واریوگرام تجربی همه‌جانبه برای تمامی وقایع استفاده شد. جدول (1) نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف واریوگرام براساس معیار مجموع مربعات باقیمانده (RSS) را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که روش کروی واریوگرام بهتری را در مقایسه با روش‌های گوسی و نمایی ارائه داده است. الکاسی (2002) نیز کمتر بودن خطای برازش مدل کروی بر واریوگرام تجربی مقادیر دمای خاک را گزارش نموده است. تحلیل واریوگرام‌های بدست آمده نشان داد که اگرچه در بسیاری از مطالعات، مقدار هدایت الکتریکی به عنوان یک خصوصیت مناسب در پهنه‌بندی دمای خاک در مقیاس‌های بزرگ مورد استفاده قرار

جدول 1- نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف واریوگرام بر اساس معیار RSS

میزان RSS در مدل‌های مختلف			متغیر	تیمار
گوسی	نمایی	کروی		
0/124	0/106	0/106	T	FI
0/99	0/25	0/24	T & θ	
پیوستگی مکانی ندارد			T & EC	PRD ₇₅
$7/9 \times 10^{-6}$	$9/4 \times 10^{-6}$	$2/3 \times 10^{-6}$	T	
$4/3 \times 10^{-3}$	$4/0 \times 10^{-3}$	$3/9 \times 10^{-3}$	T & θ	PRD ₅₅
پیوستگی مکانی ندارد			T & EC	
$1/6 \times 10^{-7}$	$3/9 \times 10^{-6}$	$6/7 \times 10^{-8}$	T	PRD ₅₅
$2/6 \times 10^{-3}$	$2/7 \times 10^{-3}$	$2/1 \times 10^{-3}$	T & θ	
پیوستگی مکانی ندارد			T & EC	

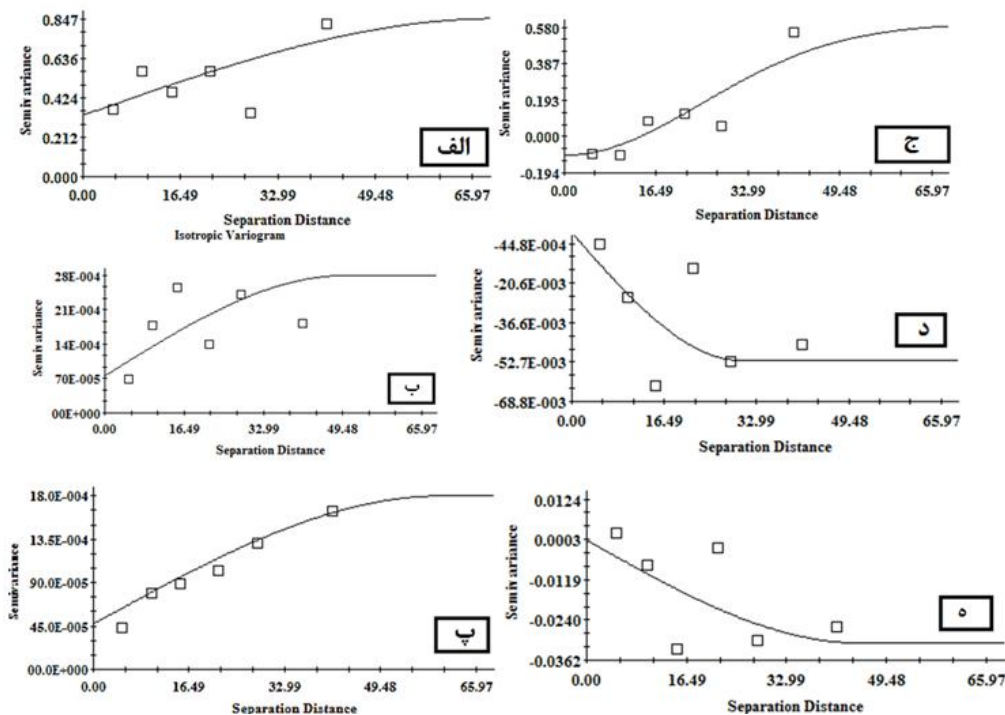
بوده و میزان ساختار مکانی را نشان می‌دهد. بر اساس این معیار، مقادیر بیشتر از 0/75 نشان‌دهنده همبستگی قوی ضعیف، بین 0/5 تا 0/75 همبستگی مکانی متوسط و کمتر از 0/5 همبستگی مکانی قوی می‌باشد. این نسبت در تمام واریوگرام‌های تئوری در تیمارهای FI و PRD₅₅ کمتر از 0/75 بوده و لذا دارای ساختار مکانی متوسط

شکل (5) واریوگرام‌های تئوری و تجربی مقادیر دمای خاک و واریوگرام‌های متقابل دما و رطوبت خاک در تیمارهای مختلف را به عنوان نمونه در تاریخ 82 روز بعد از کاشت و جدول (2) خصوصیات مدل‌های برازش داده شده به واریوگرام‌های تجربی برای تمام تیمارها را نشان می‌دهد. معیار کامباردلا و همکاران (1994) نسبت $\frac{C_0}{C_0+C}$

2). این اختلاف به ویژه در آبیاری کامل بیشتر از تیمارهای آبیاری ناقص ریشه مشهود است. نتایج نشان داد میزان پیوستگی واریوگرام دما بالاتر از مقدار متناظر آن در واریوگرام‌های متقابل دما و رطوبت بوده و استفاده از متغیر کمکی رطوبت تا حدی باعث افزایش خطای تخمین در هر سه تیمار شده است. لذا، استفاده از متغیر کمکی رطوبت تأثیر مثبتی در افزایش پیوستگی مکانی واریوگرام‌ها در هیچ‌یک از تیمارها نداشته است.

هستند. اما این نسبت در کواریوگرام دما و رطوبت در تیمار FI کمی بیشتر از 0/75 می‌باشد. الکاسی (2002) نیز وجود یک ساختار مکانی مناسب در هنگام استفاده از روش کریجینگ را به اثبات رسانده است.

وجود پیوستگی مکانی در شعاعی بیشتر از فاصله داده‌های مشاهده‌ای امکان استفاده از روش‌های زمین‌آمار در این مطالعه را فراهم می‌سازد (جدول 2). همچنین، میزان شعاع تأثیر در واریوگرام دما، بالاتر از مقدار آن در واریوگرام‌های متقابل دما و رطوبت خاک می‌باشد (جدول



شکل 5- واریوگرام تئوری دما در تیمارهای FI (الف)، PRD₇₅ (ب) و PRD₅₅ (پ) و واریوگرام متقابل دما و رطوبت در تیمارهای FI (ج)، (د) PRD₇₅ و (ه) PRD₅₅

جدول 2- خصوصیات واریوگرام‌های تئوری منتخب

تیمار	واریوگرام	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	شعاع تأثیر
FI	T	کروی	0/33	0/85	70
	T & θ	کروی	0/1	0/6	35
	T & EC		پیوستگی مکانی ندارد		
PRD ₇₅	T	کروی	$7/5 \times 10^{-4}$	$2/8 \times 10^{-3}$	50
	T & θ	کروی	-1×10^{-4}	$-5/2 \times 10^{-2}$	30
	T & EC		پیوستگی مکانی ندارد		
PRD ₅₅	T	کروی	$7/4 \times 10^{-4}$	$1/8 \times 10^{-3}$	60
	T & θ	کرو	$2/1 \times 10^{-3}$	$-2/8 \times 10^{-3}$	40
	T & EC		پیوستگی مکانی ندارد		

ارزیابی روش‌های زمین‌آمار منتخب

نتایج ارزیابی روش‌های زمین‌آمار منتخب در این مطالعه به عنوان نمونه برای 82 روز بعد از کاشت در جدول (3) ارائه شده است. مقادیر اندک معیارهای ارزیابی، اختلاف غیرمعنی‌دار بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و در نتیجه اعتبار روش‌های زمین‌آمار برای تخمین مقادیر دمای خاک را نشان می‌دهد. اگرچه بالا بودن مقادیر ضرایب همبستگی و انطباق بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده دمای خاک با روش‌های زمین-آمار منتخب در این بررسی، حاکی از دقت بالای این روش‌ها در تخمین مقادیر دمای خاک در نقاط فاقد داده می‌باشد، اما نتایج تجزیه واریانس دانکن در سطح معنی-داری پنج درصد نشان داد میزان معیارهای ارزیابی در روش کریجینگ اغلب در حد معنی‌داری کمتر از میزان آن در سایر روش‌ها بود. همچنین، بررسی تابع توزیع تجمعی احتمال دمای واقعی و برآورد شده در محل نصب سنسورهای IDR-G-SMS-T2 در طول دوره اعمال تیمار نیز نشان می‌دهد تابع مربوط به مقادیر برآورد شده با استفاده از روش کریجینگ، روند مشابه‌تری را به مقادیر مشاهده‌ای در مقایسه با سایر روش‌های درون-یابی دنبال می‌کند. این توابع برای تیمار FI در تاریخ 82 روز بعد از کاشت به عنوان نمونه در شکل (6) ارائه شده است. لذا، نتایج این مطالعه، امکان استفاده از این روش‌ها در مقیاس‌های کوچک و در محدوده توسعه ریشه گیاه را نیز تأیید می‌کند.

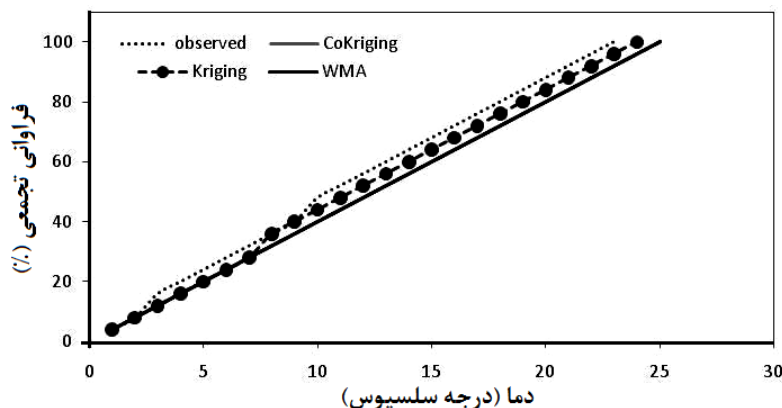
از آنجایی که در تیمار آبیاری ناقص ریشه، در هر نوبت آبیاری، کل حجم آب تنها به یک سمت ریشه هدایت می‌شود، لذا دامنه تغییرات رطوبتی در بخش آبیاری شده در تیمار آبیاری ناقص ریشه بیشتر از مقدار آن در سمت مشابه در تیمار آبیاری کامل خواهد بود، لذا وجود اختلاف معنی‌دار بین معیارهای ارزیابی روش کوکریجینگ با متغیر کمکی رطوبت با روش کریجینگ در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه، نشان می‌دهد که در شرایط تغییرات رطوبتی زیاد، عدم استفاده از متغیر کمکی رطوبت، نتایج بهتری را در پهنه‌بندی دمای خاک ارائه خواهد نمود. همچنین جدول (3) نشان می‌دهد که روش میانگین متحرک وزنی (WMA) در حد معنی‌داری در سطح پنج درصد میزان خطای تخمین را در مقایسه با روش کریجینگ افزایش داده است. با این وجود، عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر میانگین و انحراف از معیار داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در هر سه تیمار نشان داد که روش‌های منتخب در این مطالعه به خوبی قادر به درون‌یابی مقادیر دما در منطقه مطالعاتی در هر سه تیمار می‌باشد.

نحوه توزیع مکانی دما در محدوده ریشه در تیمارهای مختلف پس از آبیاری

پس از تعیین روش منتخب درون‌یابی، نقشه توزیع مکانی دما در محدوده ریشه قبل و بعد از آبیاری در هر سه تیمار FI، PRD₇₅ و PRD₅₅، با استفاده از روش کریجینگ در محیط GIS تهیه شد.

جدول 3- نتایج ارزیابی روش‌های زمین‌آمار منتخب

روش منتخب	روش زمین‌آمار				معیارهای ارزیابی	تیمار
	CoKrig-Temperature	CoKrig-Teta	Kriging	WMA		
Kriging	-	0/01a	0/006b	0/01a	MAE	FI
	-	-0/004a	-0/004a	-0/003b	MBE	
	-	0/018a	0/012b	0/017a	RMSE	
Kriging	-	0/008b	0/007b	0/03a	MAE	PRD ₇₅
	-	-0/002a	-0/001b	-0/002a	MBE	
	-	0/012b	0/011b	0/036a	RMSE	
Kriging	-	0/01a	0/006b	0/01a	MAE	PRD ₅₅
	-	-0/004a	-0/004a	-0/003b	MBE	
	-	0/018a	0/012b	0/017a	RMSE	



شکل 6- تابع تجمعی توزیع دما در محدوده ریشه

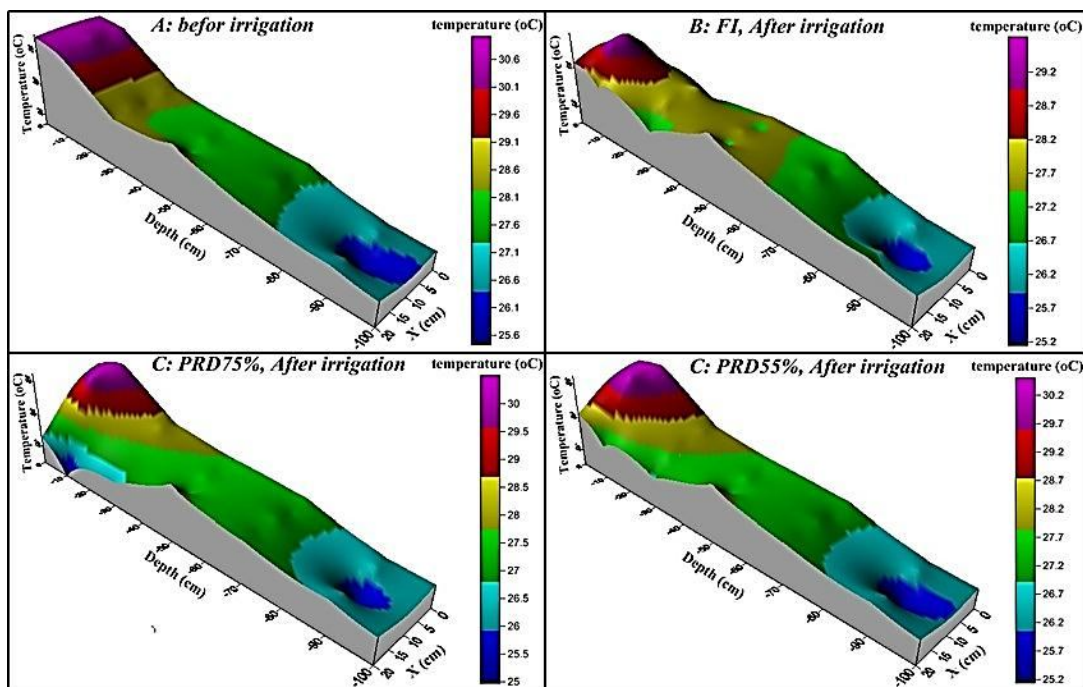
آب تقریباً مشابه در بخش مرطوب تیمار PRD₅₅ و بخش متناظر آن در تیمار FI، منتج به روند تغییرات دما یکسان در این دو تیمار شده است.

نتیجه گیری

وجود پیوستگی مکانی در شعاعی فراتر از فاصله بین نقاط مشاهده‌ای امکان استفاده از روش‌های زمین‌آمار در این مطالعه را مهیا می‌سازد. مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده دمای خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و بر اساس شاخص‌های RMSE، MAE و MBE در این مطالعه حاکی از اعتبار روش‌های منتخب در پهنه‌بندی میزان دمای خاک در محدوده ریشه گیاه در هر سه تیمار می‌باشد. با این وجود نتایج آنالیز واریانس دانکن در سطح پنج درصد نشان داد میزان شاخص‌های ارزیابی در روش کریجینگ در تمام تیمارها در حد معنی‌داری کمتر از سایر روش‌ها بود. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از متغیر کمکی رطوبت در روش کوکریجینگ در هر سه تیمار میزان شعاع تأثیر را کاهش داده و استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی منتج به عدم پیوستگی کواریوگرام متقابل دما و هدایت الکتریکی شد. لذا می‌توان بیان داشت حتی در شرایط رطوبتی خاص حاکم بر استراتژی آبیاری ناقص ریشه، روش کریجینگ در مقایسه با روش کوکریجینگ با متغیر کمکی رطوبت، خطای تخمین دمای خاک در محدوده ریشه گیاه را در حد معنی‌داری کاهش می‌دهد. نظر به اهمیت دما در کنترل رشد گیاه و میزان جذب آب و املاح به وسیله ریشه گیاه، نتایج این پژوهش می‌تواند در بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی در شرایط دمایی و نقش آن در رشد و عملکرد گیاه سودمند باشد.

شکل (7) نقشه‌های مذکور را در 82 روز بعد از کاشت (حد واسط دوره اعمال تیمار) نشان می‌دهد. در این تاریخ، در تیمارهای آبیاری ناقص ریشه، دومین قطره چکان (20) در حال تراوش و محل اولین قطره چکان (0) خشک می‌باشد. اما در تیمار FI هر دو قطره‌چکان در حال تراوش می‌باشد. نقشه‌های بدست آمده نشان می‌دهد روش کریجینگ به خوبی تمایز استراتژی‌های مختلف آبیاری (FI، PRD₇₅ و PRD₅₅) و تأثیر آن در نحوه تغییرات دما در محدوده ریشه بعد از آبیاری را منعکس می‌سازد. بررسی نقشه‌های توزیع مکانی دما نشان داد بیشترین تغییرات دما بعد از آبیاری در بخش مرطوب هر تیمار بوده و میزان تغییرات دما در قسمت‌هایی که آبی دریافت نداشته‌اند در حد معنی‌داری (پنج درصد) کمتر از مقدار آن در بخش‌هایی که آب دریافت نموده‌اند بود. همچنین بررسی نقشه‌های به دست آمده، نشان‌دهنده بالاتر بودن دامنه نوسانات دمایی در بخش مرطوب تیمار PRD₇₅ در مقایسه با بخش متناظر در تیمار FI می‌باشد. این در حالی است که این اختلاف بین تیمارهای PRD₅₅ و FI معنی‌دار نیست. همچنین شکل (7) تغییرات یکسان دما در دو سمت تیمار FI را نشان می‌دهد.

بررسی نقشه‌های توزیع مکانی دمای خاک نشان داد که بخش عمده تغییرات دمایی در هر سه تیمار پس از آبیاری در محدوده 0-40 سانتیمتر اتفاق افتاده است. این نتیجه با یافته‌های ناصر (1984) که دامنه نوسانات دمایی در لایه سطحی را به دلیل تغییرات رطوبتی بیشتر گزارش نموده‌اند، همخوانی دارد. دلیل اصلی تفاوت روند تغییرات دما نسبت به عمق در تیمار PRD₇₅ با FI، نفوذ بیشتر آب به لایه‌های پایینی در تیمار PRD₇₅ در مقایسه با تیمار شاهد بوده که موجب تغییرات بیشتر دما به ویژه در لایه 40-60cm شده است. این در حالی است که دریافت حجم



شکل 7- پهنه‌بندی میزان دمای خاک در روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از روش کریجینگ در 82 روز بعد از کاشت

فهرست منابع:

1. Al-Kayssi, A.W., 2002. Spatial variability of soil temperature under greenhouse conditions. *Renew. Eng.* 27: 453-462.
2. Abzhalimov, R. Sh., 2007. Calculation of the negative-temperature distribution of soils over the depth of frost. *Soil mech. and Foun. Engineering.* 44(1): 31-37.
3. Aphalo, P. J., Lahti, M., Lehto, T., Repo, T., Rummukainen, A., Mannerkoski, H., and Finer, L., 2006. Responses of Silver Birch Saplings to Low Soil Temperature. *Silva Fennica* 40(3) research articles.
4. Brevilk, B., Fenton, T. E., and R. Horton. 2004. Effect of Daily Soil Temperature Fluctuations on Soil Electrical Conductivity as Measured with the Geonics® EM-38. *Earth and Environ. Sci. Precis. Agric.* 5(2): 145-152.
5. Carlson, T. N., Dodd, J. D., Benjamin, S. G., Cooper, J. N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. *J. Appl. Meteorol.* 21(1):67-87.
6. Dong, Sh., Scagel, C. F., Cheng, L., Fuchigami, L., Rygielwicz, P. T., 2010. *Tree Physiol.* 21 (8): 541-547.
7. Dry, P.R., Loveys, B.R., During, H., 2000. Partial drying of the rootzone of grape. 2. Changes in the patterns of root development. 39: 9-12.
8. Duan, W., Chen, L., 2010. Spatiotemporal distribution pattern of soil temperature in forest gap in *Pinus koraiensis*-dominated broadleaved mixed forest in Xiao Xing'an Mountains, China. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World.
9. Hlavinka, P., Trnka, M., Balek, J., Zalud, Z., Hayes, M., Svoboda, M., and Eitzinger, J., 2009. Modeling of soil water content and soil temperature at selected U.S. and central European stations using SoilClim model. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-11217.
10. Kasubuchi, T., 1982. Heat conduction of soil.

11. Kozlowski, T.T., Pallardy, S.G., 1997. *Physiology of Woody Plants*. Academic Press, San Diego.
12. Lambers, H., Chapin, III F.S. & Pons, T.L. 1998. *Plant physiological ecology*. Springer, New York. ISBN 0-387-98326-0.
13. Li, Sh., Yang, W., and Zhang, X., 2009. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system. *Appl. Therm. Eng.* 29(17-18): 3679-3686.
14. Ma, R., McBratney, A., Whelan, B., Minasny, B., and M. Short. 2011. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Earth and Environ. Sci. Precision Agric.* 12(1): 55-66.
15. Morgan, C.L.S., J.M. Norman, R.P. Wolkowski, B. Lowery, G.D. Morgan, and R. Schuler. 2001. Two Approaches to Mapping Plant Available Water: EM-38 Measurements and Inverse Yield Modeling [CD-ROM]. In: P.C. Robert et al. (ed.) *Precision Agriculture. Proc. Int. Conf., 5th, Minneapolis, MN. 16–19 July 2000*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. Maggio, 2004.
16. Nainanayake, A., Ranasinghe, C. S., Tennakoon, N. A., 2008. Effects of drip irrigation on canopy and soil temperature, leaf gas exchange, flowering and nut setting of mature coconut (*Cocos nucifera* L.). *J.Natn.Sci.Found.* 36 (1): 43-50.
17. Nasser, G. 1984. Studies on soil temperature in relation with some agricultural practices under Assuit climatic conditions. M. Sc. Thesis, Faculty of Agriculture – Assuit University, 320p.
18. Pratt, D. A., Ellyett, C. D., 1979. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. *Remote Sens Environ.* 8:151–68.
19. Price J. C., 1980. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer soil moisture and evaporation. *Water Resour. Res.* 16:787–95.
20. Saghafian, B., and Rahimi Bondarabadi, S. 2008. Validity of Regional Rainfall Spatial Distribution Methods in Mountainous Areas. *J.eng. Hydrol.* 13(7): 531-540.
21. Swarcz, P. A., Fahey, T. J., and Dawson, T. E., 1997. Seasonal air and soil temperature effects on photosynthesis in red spruce (*Picea rubens*) saplings. *Tree Physiol.* 17: 187-194.
22. Tanaka, I., Ishil, Y., 2000. Numerical simulation of soil temperature distribution in controlling soil temperature in a sidge by circulating water in buried pipes. *Journal of agric. Meteorol.* 56(2): 101-109.
23. Tafteh, A., Sepaskhah, A.R., 2012. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agric. Water Manage.* 113: 19– 29.
24. Usowicz, B., Kossowski, P., Baranowski, P., 1996. Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields. *Soil and Tillage Res.* 39: 85-100.

