

تعیین تعداد بهینه حسگرهای رطوبت خاک بر مبنای تحلیل تغییرات مکانی رطوبت برای برنامه‌ریزی آبیاری و حفاظت از منابع آب و خاک

محدثه السادات فخار^۱، بیژن نظری^۲، محمود فاضلی سنگانی^{۳*}

(۱) گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(۲) دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(۳) استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه گیلان،

* نویسنده مسئول مکاتبات، ایمیل: mfazeli@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

چکیده:

تعیین تعداد بهینه حسگر رطوبت خاک گامی اساسی در پایش و حفاظت از منابع آب و خاک است. هدف از تحقیق ارائه روشی برای تعیین تعداد بهینه حسگر رطوبت خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و پایش هوشمند وضعیت آب در خاک بود. در این پژوهش، ۸۷ نمونه خاک به صورت یک شبکه منظم از عمق سطحی (۳۰-۰) سانتی‌متری برداشت شد و مقدار رطوبت در نقاط مهم رطوبتی خاک شامل رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم تعیین شد. سپس تغییرات مکانی نقاط رطوبتی خاک در سه سطح متفاوت از تراکم نمونه بررسی شد. نتایج نشان داد با کاهش تعداد نمونه‌ها از دقت تخمین کاسته شده و اثر قطعه‌ای که نشان‌دهنده افزایش بخش تصادفی و غیرساختاری خصوصیت است، بیشتر می‌شود. در حالت ماکزیمم تراکم نمونه برآزش مدل به طور میانگین ۱/۲٪ درصد بیشتر از تراکم متوسط حسگر و ۲/۷٪ بیشتر از تراکم حداقل بود. کاهش تعداد نمونه در محاسبه واریوگرام باعث افزایش شعاع تأثیر و کاهش نسبت واریانس ساختاردار به غیرساختاردار شد. شعاع تأثیر ظرفیت زراعی در زمانی که تعداد نمونه‌ها در ماکزیمم حالت خود قرار دارد، نسبت به دو حالت دیگر به ترتیب ۳۶/۸٪ و ۳۸/۴٪ کمتر برآورد شده است. با کاهش تعداد نمونه در هکتار، خطای تخمین به شدت افزایش یافت. بر اساس یافته‌ها، استفاده از تعداد حسگر بین ۲۰ تا ۳۰ نمونه در ۱۰۰ هکتار بهترین نتیجه را ایجاد کرده و همچنین روش کریجینگ یک تخمین‌گر ممتاز برای میانمایی رطوبت شناخته شد. روش مطالعه می‌تواند در تعیین تعداد حسگر بهینه برای برنامه‌ریزی آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: حسگرهای رطوبت خاک؛ تغییرات مکانی؛ واریوگرام؛ کریجینگ؛ کوکریجینگ

مقدمه

باغات و مزارع یا تحمیل هزینه سنگین مصرف آب خواهد شد (نامدار خجسته وهمکاران، ۱۳۹۰). در راستای حل چالش مذکور و در جهت کشاورزی پایدار، مدیریت به‌هنگام آبیاری با لحاظ شرایط حاکم بر منطقه شامل خاک و اقلیم، نقش بسیار مهمی در صرفه-جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات باغی و

با توجه به وضعیت بحران کمی و کیفی آب در مناطق مرکزی ایران، لزوم تعیین دقیق‌تر مقدار آب مورد نیاز گیاهان باغی و زراعی امری ضروری است (Nazari et al., 2018). به گونه‌ای که عدم توجه به این مسأله در آینده بسیار نزدیک منجر به نبود آب کافی برای آبیاری

بالاتر از یک اتمسفر به دلیل ورود حباب‌های هوا به داخل تانسومتر، دقت مناسبی ندارند. تانسومترها اگرچه نیاز به واسنجی ندارند، ولی عموماً در خاک‌های شنی کاربرد دقیقتری داشته و البته نیاز به زمان کافی برای به تعادل رسیدن با خاک اطراف دارند (شاهرخ‌نیا، ۱۳۹۵). TDR به عنوان روشی جدید از سرعت و دقت نسبتاً زیادی در اندازه‌گیری رطوبت خاک حتی در خاک‌های شور برخوردار است، ولی کاربرد آن در سطوح وسیع زمان‌بر است (روغنی و همکاران، ۱۳۹۱). پژوهش‌هایی در این زمینه صورت گرفته است، به طوری که (Khorami (2013) در پژوهشی که بر روی خاک‌های شنی انجام داد، نتیجه گرفت که هنگام شروع جریان آب، نیروی موینگی الگوی خیس‌شدگی را کنترل نموده و با افزایش عمق خیس‌شدگی تأثیر نیروی ثقل بیشتر می‌شود. در شروع جریان آب، شدت جریان افقی بیشتر از حرکت عمودی رطوبت برای تمام دبی‌های اعمال‌شده است ولی با گذشت زمان سرعت هر دو کاهش می‌یابد و هنگام توقف آبدی جریان متوقف نشده و میزان جریان عمودی بیشتر از جریان افقی می‌باشد.

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری رطوبت خاک در برنامه‌ریزی آبیاری و به ویژه در سامانه‌های آبیاری هوشمند، لازم است که مطالعاتی در این زمینه صورت گیرد. واضح است که با استفاده از حسگر رطوبت‌سنج و قرارگیری آن در محل مناسب امکان شروع و پایان آبیاری بدون دخالت اپراتور وجود دارد که این امر موجب مصرف بهتر آب می‌شود (Dursun and Ozden, 2011). کاربرد بلوک‌های گچی ارزان‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک است که می‌توان از آنها به تعداد زیاد در تخمین رطوبت خاک استفاده بزرگترین مشکل بلوک‌های گچی حساسیت به شوری محلول خاک است اگرچه عمر مفید بلوک‌های گچی تا ۵ سال ذکر می‌شود، ولی عملاً در خاک‌های شور یا آلی و خاک‌های مرطوب عمر مفیدی بیشتر از یک سال نخواهند داشت (Ganjegunte et al.,

2000). یکی از ابزارهای مدیریت به‌هنگام آبیاری، سنجش رطوبت خاک است که با ارایه اطلاعات مفید در خصوص وضعیت رطوبت خاک در هر یک از حالت‌های اشباع، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی منجر به مصرف آب به میزان موردنیاز شده و ضمن توجه به نیاز دقیق رطوبتی هر مرحله از رشد گیاه و صرفه‌جویی در مصرف آب، منجر به حفظ و در مواردی افزایش عملکرد محصول شده و به این ترتیب تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود بهره‌وری آب خواهد داشت (انصاری و حسن‌پور ۱۳۹۴). تراکم، بافت خاک، توپوگرافی و عواملی از این دسته می‌توانند سبب تنوع آبیاری در منطقه موردنظر شود (Duan et al., 2017). روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری در سه گروه عمده طبقه بندی می‌شوند: روش‌های مبتنی بر تعادل آب، روش‌هایی که به نظارت بر میزان آب یا پتانسیل آب خاک متمرکز هستند و روش‌هایی که از اندازه‌گیری وضعیت آب گیاه به عنوان مرجع استفاده می‌کنند (Osroosh et al., 2016). برای تعدادی از خاک‌ها، انتقال آب در خاک کاملاً مشخص است و می‌تواند به راحتی با چشم غیرمسلح دنبال شود. منطقه‌ای را که تغییرات رنگ در نتیجه افزایش مقدار آب صورت می‌گیرد را جبهه رطوبتی می‌نامند. از این جدایی بصری بین خاک روشن خشک و خاک مرطوب تیره، ممکن است یک استنباط شود که خاک در رأس جبهه رطوبتی در حالت اصلی خشک خود قرار دارد و خاک در پشت جبهه رطوبتی به صورتی است که آب به‌طور کامل فضاهای بین منفذی را که از هوا خالی شده را پر کرده است (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۸).

نوترون‌متر یکی از روش‌های دقیق سنجش رطوبت خاک است و اگرچه از نظر سرعت کار، بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد ولی سنگین بودن، گران بودن و خطرات احتمالی ناشی از نشت تابش‌های رادیواکتیو از معایب این وسیله به شمار می‌رود (دوستی، ۱۳۸۶). تانسومترها که در دو نوع جیوه‌ای یا فلزی موجود هستند در پتانسیل

اثر شوری آب آبیاری بر عملکرد دو حسگر ECH2O-10 و Theta Probe بررسی شد نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که شوری خاک، کمتر از یک دسی‌زیمنس بر متر باشد، حسگر ECH2O-10 برآورد صحیحی از مقدار رطوبت خاک خواهد داشت و همین‌طور نتایج این تحقیق برای حسگر Theta Probe نشان داد که شوری تأثیر ناچیزی بر داده‌های خروجی این حسگر دارد (Mahmut and Cevat 2003). یکی از انواع حسگرهای بلوک گچی، حسگرهای watermark است. این تکنولوژی توسط چند شرکت از جمله Irrrometer و Spectrum ارائه شده است که شامل الکترودهایی با مقاومت بالا به خوردگی است که در داخل بافت مشبک قرار گرفته است. گچ استفاده شده در این نوع حسگر منجر به ایجاد محیط بافری برای تعدیل اثرات شوری در خاک و آب کشاورزی می‌گردد. اندازه‌گیری مکش خاک با استفاده از حسگر watermark در دامنه صفر تا ۲۰۰ سانتی‌بار امکان‌پذیر است (قائم‌ی و رحمانی ثقیه، ۱۳۹۳). همچنین در مطالعه انجام شده توسط Heaton (2007) در ۲۰ مزرعه یونجه و به منظور تعیین زمان مناسب آبیاری، سه حسگر watermark در اعماق ۱، ۲ و ۴ فوتی نصب شدند نتایج این پژوهش نشان از دقت بالای ۸۷٪ و میزان بهره‌وری آب به مقدار قابل‌توجهی نسبت به شرایط عادی بیشتر شده است هدف از نصب این حسگرها یافتن نقطه زمانی شروع آبیاری بود در این مطالعه دو سیستم آبیاری غرقابی و ستر پیووت مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه عدم استفاده از این حسگرها در برنامه‌ریزی آبیاری، منجر به بیش آبیاری خواهد شد. بر اساس مطالعه El Marazky و همکاران (2011) در دانشکده کشاورزی عربستان سعودی و اجرای سیستم آبیاری هوشمند با استفاده از سنسور watermark، استفاده از این سنسور برای اتوماتیک‌کردن سیستم آبیاری، مناسب نتیجه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که این سنسورها در عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک قرار گرفته بودند و بر اساس شرایط

مزرعه واسنجی شدند. بر اساس آنچه گفته شد حسگرهای بین‌المللی همچون Watermark دارای خطای کم و حدود ۶ تا ۱۴٪ در تعیین رطوبت خاک هستند به همین دلیل در این پژوهش، به استفاده از حسگرهای مدل ۲۰۰ss پرداخته شد. تامپسون و همکاران برای اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک خاک حسگر Watermark مدل 200ss و تانسومتر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد حسگر Watermark با توجه به معادله کالیبراسیون انجام‌شده در محل آزمایش می‌تواند داده‌های دقیق از پتانسیل ماتریک خاک فراهم کند (Thompson et al, 2006). Nolze و همکاران (2012) به منظور جمع‌آوری داده‌ها از راه دور از یک شبکه وایرلس و حسگرهای Watermark و MPS-1 استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد پیوستگی و جمع‌آوری داده‌ها در این شبکه دورسنجی به خوبی کار می‌کند

هدف از این تحقیق تعیین حداقل تعداد حسگر لازم برای پایش رطوبت در آبیاری هوشمند بوده است. با استقرار تعداد مناسب حسگر رطوبتی، علاوه بر پایش خوب رطوبت، هزینه‌های حسگرها نیز می‌تواند مدیریت شود و همچنین استفاده از تعداد سنسور مورد نیاز در سطح مزرعه سبب اندازه‌گیری دقیق نیاز آبی و منجر به کاهش تلفات و افزایش حداکثری بهره‌وری از منابع آبی و نیروی انسانی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه و نمونه برداری از خاک

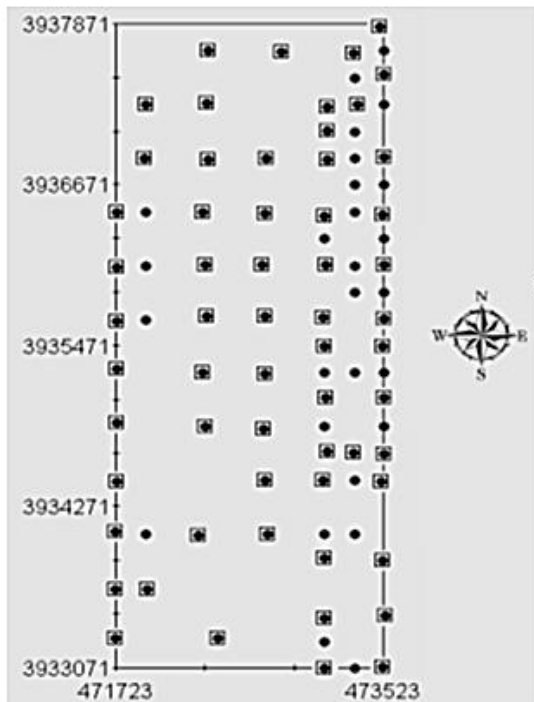
منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی اشتهارد به مساحت ۶۸۰ هکتار می‌باشد که در محدوده ۳۹۳۳۰۷۱ تا ۳۹۳۷۸۷۱ شرقی و ۴۷۱۷۲۳ تا ۴۷۳۵۲۳ شمالی، زون ۳۹ مختصات UTM واقع شده است. این منطقه با میانگین بارندگی سالیانه ۲۰۰ میلی‌متر جزء نواحی خشک به حساب می‌آید و دارای رژیم حرارتی خاک، ترمیک و

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه نمونه‌هایی که به صورت دست‌خورده نمونه‌برداری شده بودند پس از هوا خشک‌شدن و کوبیده‌شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. مقدار خاک موجود در سیلندر که به صورت دست‌نخورده برداشت شده بود، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد و پس از خارج‌شدن از آون با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۱ توزین شد و به این ترتیب وزن خشک نمونه‌ها تعیین گردید. حجم نمونه‌ها نیز معادل حجم رینگ در نظر گرفته شد و با داشتن حجم نمونه و جرم خاک خشک مربوط به آن جرم مخصوص ظاهری نمونه تعیین گردید. نقاط رطوبتی مهم خاک شامل نقطه اشباع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، به ترتیب با تهیه گل اشباع و استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. تحلیل مکانی تغییرات رطوبت با استفاده از تحلیل واریوگرام در محیط نرم‌افزار GIS انجام شد.

رژیم رطوبتی اریدیک می‌باشد. خاک این منطقه بر روی رسوبات واریزه‌ای آبرفتی و مواد مادری دارای بافت سبک (لوم شنی) بوجود آمده است. بخش اعظمی از این منطقه تحت پوشش آتریپلکس و قسمتی نیز تحت کاربری کشت دیم و آبی می‌باشد.

نمونه‌برداری بر اساس یک شبکه نمونه‌برداری منظم صورت گرفت. ابعاد شبکه نمونه‌برداری در بخشی از منطقه مورد مطالعه ۲۰۰×۲۰۰ متر و در بخشی دیگر ۴۰۰×۴۰۰ متر انتخاب گردید. نمونه‌ها از عمق سطحی (۰-۳۰) سانتی‌متری برداشته شد. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده به وسیله سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت گردید.

در هر نقطه سه نمونه دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهایی به ابعاد ۵۵ سانتی‌متر برای تعیین جرم مخصوص ظاهری و مقداری از خاک سطحی برای آنالیزهای فیزیکی برداشته شد. به این ترتیب تعداد ۸۷ نمونه برای انجام آنالیزهای موردنظر به آزمایشگاه منتقل شد.



شکل ۱. توزیع شبکه نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

روش‌های تخمین

کریجینگ و کوکریجینگ

در این پژوهش از دو روش زمین آماری کریجینگ معمولی و کوکریجینگ برای تخمین بافت خاک و دقت حسگر استفاده شد، زیرا هر دو روش، با کمترین خطای تخمین شناخته شده‌اند (Western et al., 2004) کریجینگ یک روش درون‌یابی زمین آماری است که از تابع نیم‌تغییر-نما جهت بیان همبستگی مکانی استفاده می‌کند، نیم‌تغییر-نما به بررسی و شناخت ویژگی‌های ساختاری متغیر ناحیه‌ای می‌پردازد و چگونگی تغییرات آن را بیان می‌کند، اگر نیم‌تغییرنما به سقف معینی برسد و دامنه تأثیر مشخصی داشته باشد، ساختار فضایی و شرایط صدق فرضیه ذاتی می‌تواند وجود داشته باشد (Burgess and Webster, 1980). نیم‌تغییرنما را به صورت رابطه (۱) تعریف کرد.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad (1)$$

$\gamma(h)$: از مقدار نیم‌تغییرنما برای جفت نقاطی است که به فاصله h از هم دارند،
 $N(h)$: تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند،

$z(x_i)$: مقدار مشاهده‌های متغیر x در موقعیت i

$z(x_i + h)$: مقدار مشاهده‌های متغیر در فاصله h از x_i

معادله تخمین که برای کریجینگ ارائه شده به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$Z^*(X) = \sum \lambda_i \cdot (x_i) \quad (2)$$

که در این رابطه $Z^*(x)$ مقدار مشاهده شده متغیر Z^* در نقطه X_i و λ_i وزن یا اهمیت نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه x_i و I تعداد مشاهدات می‌باشد که برای دستیابی به تخمین درست شرط رابطه (۳) باید رعایت شود.

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i \gamma(x_i \cdot x_j) - \mu = \gamma(x_i \cdot x_j) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i = 1$$

در این رابطه $\gamma(x_i, x_j)$ مقداری از واریوگرام است که

متناظر با بردار کمیت x_i و شدت x_j باشد μ ضریب لانگ‌راژ می‌باشد.

روش کوکریجینگ در بعضی از مواقع ممکن است که از یک متغیر به دلایلی مانند مشکل بودن نمونه‌گیری و یا گران بودن اندازه‌گیری آزمایشگاهی، به اندازه کافی نمونه-برداری نشده باشد و براساس آن‌ها نتوان برآورد آماری را با دقت موردنظر انجام داد در چنین مواردی می‌توان با در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین این متغیر و متغیر دیگری، که از آن بخوبی نمونه‌برداری شده است تخمین را اصلاح و دقت آن را بالا برد (Goovaerts, 1999).

معادله کوکریجینگ به شرح زیر می‌باشد:

$$Z^* = (X_i) = \sum_{e=1}^n \lambda_{ei} \cdot x_i \sum_{k=1}^n \lambda_{k,y} (x_k) \quad (4)$$

که در آن:

$Z^*(X_i)$ = مقدار تخمین زده شده برای نقطه x_i می‌باشد،

λ_i : وزن مربوط به متغیر Z

λ_k : وزن مربوط به متغیر y

$Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده متغیر اصلی،

$y(x_k)$: مقدار مشاهده شده متغیر کمکی

شرح حسگر

Watermark sensor مدل ۲۰۰ss

این حسگر با دانه‌بندی متخلخل، برای اندازه‌گیری و برداشت داده‌های لحظه‌ای و پیوسته رطوبت خاک ساخته شده و با اندازه‌گیری پتانسیل آب خاک برای تصمیم‌گیری شروع و پایان آبیاری و برای خاک مربوطه تنظیم و کالیبره می‌شوند و به خاطر اینکه در طول فصل رشد نیاز به تعمیر پیدا نمی‌کنند، در محل مناسبی قرار می‌گیرند و به-طور اتوماتیک داده‌های مربوط به رطوبت خاک را ارسال می‌کنند و بر مبنای این داده‌ها آبیاری هوشمند راه‌اندازی و تعریف می‌شود (Larson, 1998). در سال ۱۹۷۸ در آمریکا ثبت اختراع شد و بر مبنای مقاومت الکتریکی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌شود. با تغییر مقدار رطوبت خاک مقاومت الکتریکی تغییر، و بر مبنای آن رطوبت خاک اندازه‌گیری می‌شود. حسگر شامل یک

نتایج و بحث

خصوصیات کلی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این منطقه با داشتن بافت خاک لومی و لوم شنی و همچنین تغییرات اندک ارتفاعی دارای شرایط یکنواخت و تقریباً همگنی است که فرضیات پایایی را برای انجام آنالیزهای زمین آماری برآورده می‌سازد. جدول ۱ خصوصیات کلی منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی، داده‌های حاصل جمع‌آوری و آنالیزها و تحلیل‌های آماری بر روی آنها صورت گرفت. تغییرات مکانی و درونبایی برای پارامترهای فیزیکی شامل: درصد ذرات خاک حد ظرفیت، (رس، سیلت و شن)، سه حد رطوبتی شامل درصد رطوبت حجمی اشباع خاک (SP) حد ظرفیت مزرعه (FC) نقطه پژمردگی دائم (PWP) و جرم مخصوص ظاهری خاک (pb) صورت گرفت. نمونه‌برداری به همراه مختصات آنها، نشان می‌دهد پس از جمع‌آوری داده‌ها توصیف‌های آماری آنها شامل میانگین، واریانس، مقادیر ماکزیمم و مینیمم، کشیدگی، چولگی و درصد ضریب تغییرات صورت گرفت که نتایج خلاصه آماری مربوط برای پارامترهای مورد بررسی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جفت الکتروود است که در یک ماده متخلخل با مقاومت بالا در برابر خوردگی قرار گرفته است. با برقراری جریان مقاومت دو سر الکتروود اندازه گیری می‌شود (Irrometer, 2010).

ارزیابی کارایی تخمین‌گر

بررسی صحت کارکرد روش‌های مذکور بر اساس شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین مربع خطا (MSE) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت (تافته و همکاران، ۱۳۹۶).

تعیین تعداد حسگر مورد نیاز

برای تعیین تعداد حسگر لازم الگوی واریوگرام و درونبایی پارامترهای مورد مطالعه سه سطح متفاوت از تراکم نمونه در نظر گرفته شد. در سطح اول همه نمونه‌ها، در سطح دوم ۴۵ حسگر و در سطح سوم ۳۰ نمونه برای تعیین واریوگرام و درونبایی در نظر گرفته شدند. نتایج تأثیر تغییر تعداد نمونه، بر پارامترهای واریوگرام و همچنین ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر واقعی و تخمینی با استفاده از تخمینگر کریجینگ، در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات کلی منطقه مورد مطالعه

خصوصیت	بافت خاک	EC(ds/m)	PH	%CaCO ₃
دامنه تغییرات	لوم شنی-لوم	۰/۱۸-۱/۸	۷-۷/۹	۱/۷-۱۳/۵

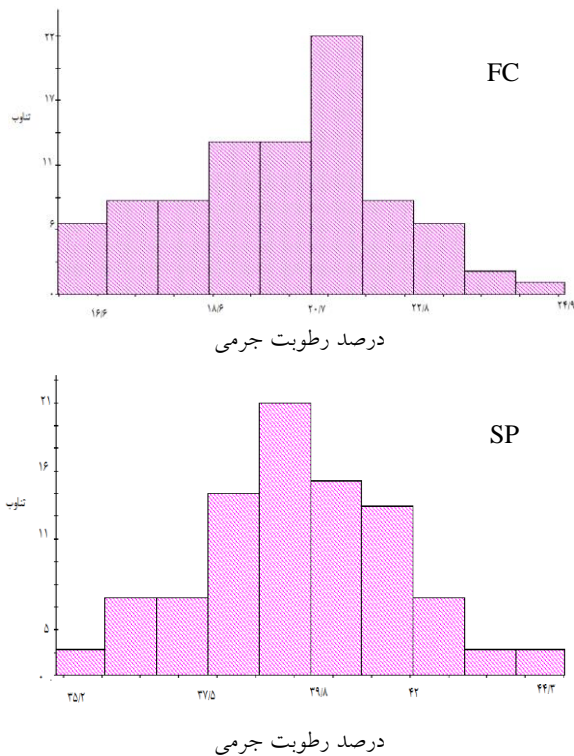
جدول ۲. خلاصه آماری پارامترهای مورد مطالعه

پارامتر	تعداد	میانگین	واریانس	مقدار ماکزیمم	مقدار مینیمم	کشیدگی	چولگی	% ضریب تغییرات
درصد حجمی SP	۸۷	۳۹/۵۵	۳/۷۵	۴۴/۳۰	۳۵/۲۰	-۰/۲۰	۰/۰۹	۵/۱۰
درصد حجمی FC	۸۷	۲۰/۱۰	۳/۷۱	۲۴/۹۰	۱۶/۵۰	-۰/۶۱	-۰/۱۰	۹/۶۰
درصد حجمی PWP	۸۷	۱۳/۱۳	۳/۸۸	۱۶/۵۰	۹/۸۰	-۰/۷۲	-۰/۳۳	۱۵/۱۰۷
وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)	۸۷	۱/۵۰	۰/۰۰۷	۱/۷۳	۱/۳۴	-۰/۲۹	۰/۴۱	۵/۳۳
درصد رس	۸۷	۱۷/۲۰	۱۸/۳۸	۲۵/۵۰	۹/۱۰	-۰/۹۵	-۰/۰۵	۲۴/۸۸
درصد سیلت	۸۷	۱۱/۲۰	۲۶/۲۴	۳۵/۹۰	۱۰/۸۰	۰/۱۸	۰/۵۷	۴۶/۴۲
درصد شن	۸۷	۶۲/۷۰	۳۹/۵۲	۷۴/۵۰	۴۳/۱۰	۰/۲۹	-۰/۷۲	۱۰/۰۰

* آنالیزهای آزمایشگاهی این خصوصیات را برای ۸۷ نقطه

که خصوصیات نقطه پژمردگی دائم، درصد شن و جرم مخصوص ظاهری خاک از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند. برای تبدیل این داده‌ها به فرم نرمال، این داده‌ها به شکل لگاریتمی تغییر داده شد که در این حالت تبعیت از شکل توزیع نرمال را دارا بودند. لذا آنالیزها بر روی شکل لگاریتمی داده‌ها انجام و پس از انجام محاسبات به شکل اصلی برگردانده شدند.

شکل (۲) نمودار توزیع احتمال نرمال برای دو خصوصیت حد ظرفیت مزرعه و درصد رطوبت اشباع نشان داده شده است.



شکل ۲. هیستوگرام‌های فراوانی برای دو خصوصیت FC و SP

با توجه به اهمیت بافت خاک و لزوم توجه به اجزاء تشکیل‌دهنده آن در محل قرارگیری حسگرها ابتدا به بررسی وضعیت آماری هریک از اجزاء تشکیل‌دهنده خاک پرداخته شد. مقایسه ضریب تغییرات (معیار پراکندگی) این پارامترها نشان‌دهنده این است که پارامتر درصد سیلت بیشترین میزان تغییرات، $6/42$ ، و درصد رطوبت اشباع دارای کمترین میزان تغییرات $5/10$ ، می‌باشند همچنین مقادیر ضریب تغییرات برای پارامترهای درصد حجمی رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری، حد ظرفیت مزرعه و درصد شن نشان می‌دهد که داده‌های این پارامترها از یک‌نواختی مناسبی برخوردار است در حالیکه پارامترهای نقطه پژمردگی دائم و درصد رس دارای پراکندگی زیادی می‌باشند. دو آماره کشیدگی و چولگی نشان می‌دهند که داده‌های پارامترهای مورد نظر به توزیع نرمال نزدیک است ولی برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها نیاز به تست نرمالیتیه برای داده‌هاست پارامتر درصد حجمی رطوبت اشباع کمترین انحراف مقادیر آماره‌های کشیدگی و چولگی را از توزیع نرمال و خصوصیت درصد شن با داشتن بالاترین مقدار ضریب چولگی و درصد رس با بیشترین مقدار ضریب کشیدگی بیشترین انحراف را توزیع نرمال در بین این خصوصیات از خود نشان دادند. برای نمایش گرافیکی توزیع داده‌ها هیستوگرام‌های فراوانی این خصوصیات نیز رسم گردید که به عنوان نمونه برای دو خصوصیت SP و FC در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها تست نرمالیتیه بر روی داده‌ها انجام شد. نتایج بررسی نرمال بودن داده‌ها نشان داد

جدول ۳. مقایسه دقت تخمین گره‌های مورد بررسی در تخمین مقادیر خصوصیات فیزیکی مورد بررسی

تخمین‌گر	خصوصیت	MSE	MAE	R ²
کریجینگ معمولی	درصد حجمی SP	۲/۸۶	۱/۱۷	۰/۷۹
	درصد حجمی FC	۱/۶۵	۰/۸۸	۰/۷۵
	درصد حجمی PWP	۳/۸۳	۱/۴۶	۰/۴۵
کو کریجینگ معمولی	درصد حجمی SP	۲/۵۸	۱/۲۱	۰/۶۸
	درصد حجمی FC	۱/۳۶	۱/۰۵	۰/۶۱
	درصد حجمی PWP	۴/۳۴	۱/۸۲	۰/۳۳

با توجه به سطح مورد مطالعه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برآورد دقیق تعداد حسگر مورد نیاز با توجه به سطح مورد مطالعه به تخمین گر انتخابی نیز کاملاً وابسته است به طوری که طبق محاسبات صورت گرفته و مطالعات انجام شده روش کریجینگ در محاسبه تعداد حسگر مورد نیاز در منطقه از جایگاه دقت بالایی برخوردار بوده و نتایج قابل قبولی را ایجاد کرده است و لزوماً افزایش تعداد حسگر در سطح منطقه نشان از دقت بالا نخواهد بود و عدم محاسبه و عدم انجام مطالعات دقیق صرفاً سبب ایجاد هزینه گزاف برای کشاورزان خواهد داشت.

نتایج اثر تعداد حسگر

نتایج تأثیر تغییر تعداد حسگر، بر پارامترهای واریوگرام و همچنین ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر واقعی و تخمینی با استفاده از تخمینگر کریجینگ، در جدول ۵ آمده است.

برای بررسی اثر تعداد حسگر بر تغییر الگوی واریوگرام و درونیایی پارامترهای مورد مطالعه سه سطح متفاوت از تعداد حسگرها در نظر گرفته شد.

نتایج این جدول نشان می‌دهد که کاهش تعداد حسگر، تغییراتی را در پارامترهای واریوگرام و دقت ($C0$) تخمین وارد می‌کند. با کاهش حسگر از دقت تخمین کاسته شده و باعث افزایش مقدار اثر قطعه‌ای می‌شود، که نشان‌دهنده افزایش بخش تصادفی و غیرساختاری خصوصیت می‌گردد که خود باعث کاهش دقت درونیایی خواهد شد به طوری که در زمانی که تعداد حسگر در حالت ماکزیمم نسبت به حالت متوسط ۴۲ عدد بیشتر بوده برآزش مدل به طور میانگین ۱/۲٪ درصد بیشتر و نسبت به زمانی که حداقل تعداد حسگر قرار داده شده ۲/۷٪ بیشتر نشان داده می‌شود و به طور کلی کاهش تعداد حسگر در محاسبه واریوگرام باعث افزایش شعاع تأثیر و کاهش نسبت واریانس ساختاردار به غیرساختاردار برای اکثر خصوصیات شده است به طوری که شعاع تأثیر ظرفیت

همان گونه که در جدول (۳) دیده می‌شود، خصوصیتی که توزیع مکانی مناسبی نشان ندادند دارای خطای استاندارد بیشتری نیز می‌باشند. دو تخمین گر، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ معمولی، به ترتیب از دقت بیشتری در برآورد مقادیر خصوصیات مورد مطالعه دارا بودند. به طوری که در بررسی ضریب تبیین در هر دو تخمین گر کریجینگ معمولی ۱۲٪ به طور میانگین برآوردی بهتر از کوکریجینگ داشته است که نشان از برتری این تخمین گر در منطقه مورد مطالعه است.

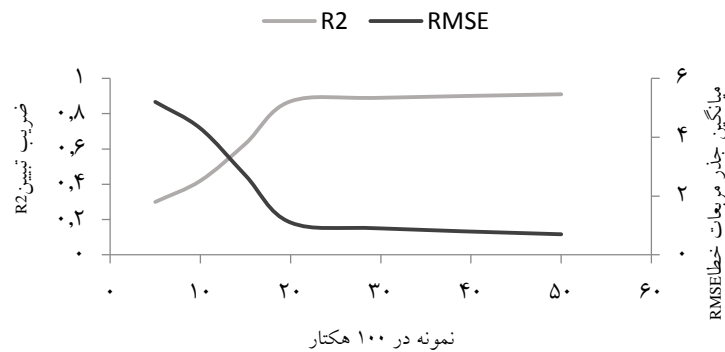
همچنین با استفاده از داده‌های زیرنموداری برحسب میزان دقت تخمین برحسب تعداد حسگر در جدول (۴) نشان داده شده است. نتایج حاصل از تخمین تعداد حسگر بیانگر این است که در زمانی که چگالی نمونه ۵۰ عدد در هر ۱۰۰ هکتار، مقدار RMSE برابر با ۰/۷ و مقدار R^2 ۰/۹۱ و زمانی که تعداد نمونه ۲۰ عدد در هر ۱۰۰ هکتار است مقدار RMSE برابر با ۱/۱ و مقدار R^2 برابر ۰/۸۷ است که نشان از دقت قابل قبول حسگرها با توجه به کاهش تعداد نمونه در هکتار است و به بیانی می‌توان به عنوان حالت ایده‌آل نسبت به دیگر موارد در نظر گرفت.

جدول ۴. دقت تخمین برحسب تعداد حسگر استفاده شده

نمونه در ۱۰۰ هکتار	RMSE	R^2
۵۰	۰/۷	۰/۹۱
۳۰	۰/۹	۰/۸۹
۲۰	۱/۱	۰/۸۷
۱۵	۲/۷	۰/۶۳
۱۰	۴/۳	۰/۴۲
۵	۵/۲	۰/۳

همچنین نتایج حاصل از تخمین تعداد سنسور در شکل (۳) نشان داد زمانی که تعداد نمونه ۵ عدد در هر هکتار باشد، مقدار RMSE برابر است با ۵/۲ و مقدار R^2 ۰/۳ می‌باشد که این نتایج نشان‌دهنده آن است که با کاهش تعداد نمونه در هکتار خطای تخمین در آن به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین محاسبه تعداد دقیق حسگر

زراعی در زمانی که تعداد حسگر در ماکزیمم حالت خود قرار دارد نسبت به دو حالت دیگر به ترتیب ۳۶/۸٪ و ۳۸/۴٪ کمتر برآورد شده است و حتی در مورد خصوصیت جرم مخصوص ظاهری در تعداد کم حسگر باعث شد تا نتوان الگوی مکانی ساختار داری برای داده‌ها در نظر گرفت.



شکل ۳. نمودار تغییرات دقت تخمین برحسب تعداد حسگر استفاده شده

جدول ۵. مقایسه سطح تعداد حسگر بر روی پارامترهای واریوگرام و دقت تخمین

اعتبارسنجی	RSS	برازش مدل	نسبت واریانس	دامنه تاثیر	مقدار آستانه	اثر قطعه‌ای	متغیر	تراکم نمونه
۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۹۸	۰/۹۹	۲۲۰۱	۶/۰۳	۰/۰۱	FC	حسگر زیاد
۰/۵۰	۰/۱۰۷	۰/۹۶	۰/۵۷	۳۶۰۳	۶/۶۵	۳/۰۲	PWP	
۰/۷۲	۰/۲۴	۰/۹۵	۰/۹۹	۳۷۷	۴/۳۱	۰/۰۱	Sp	
۰/۴۴	۷/۳۱	۰/۹۸	۰/۵۲	۷۹۷	۰/۰۱	۰/۰۰۶	pb	
۰/۳۱	۴۸/۴	۰/۷۹	۰/۵۰	۴۵۲۳	۳۰/۸۷	۱۵/۴۳	درصد رس	حسگر متوسط
۰/۶۲	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۹۰	۳۰۱۳	۵/۴۵	۰/۰۸	FC	
۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۹۴	۰/۶۳	۲۱۶۸	۷/۷	۲/۸۵	PWP	
۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۹۵	۰/۹۸	۴۱۲	۴/۶	۰/۱	sp	
۰/۳۴	۱/۸۳	۰/۸۳	۰/۵۴	۶۷۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	pb	حسگر کم
۰/۲۵	۴/۳۵	۰/۹۴	۰/۶۶	۴۱۳	۲۶/۹	۹/۰۵	درصد رس	
۰/۴۲	۱/۸۸	۰/۹۰	۰/۸۵	۳۰۴۷	۵/۴۵	۰/۰۸	FC	
۰/۱۹	۲/۳۵	۰/۸۸	۰/۶۳	۱۰۸۵	۷/۷	۲/۸۵	PWP	
۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۹۱	۰/۷۹	۴۶۱	-	۱/۰۷	sp	حسگر کم
-	-	-	-	-	-	-	Pb	
۰/۲۴	۲۳/۶	۰/۹۳	۱	۱۰۸۶	۲۶/۰۸	۰/۰۱	درصد رس	

Dursun و Semih (۲۰۱۱) در کشور ترکیه از سیستم وایرلس در کنترل خودکار آبیاری قطره استفاده نموده‌اند، آنها مصرف آب را با استفاده از خودکارسازی بهینه کرده‌اند. آزمایشات آنها با استفاده از چند حسگر و قرارگیری در چند منطقه مزرعه صورت گرفته است که این حسگرها استفاده از تکنولوژی وایرلسی با مرکز کنترل در ارتباط بوده‌اند، که حاکی از آن است، استفاده از این حسگر سبب کاهش هزینه‌ها و بهره‌وری مفید در مصرف آب می‌شود (Dursun and Semih, 2011).

در پژوهشی دیگر Edison (۲۰۱۱) سیستم کنترل هوشمند آبیاری قطره‌ای را با استفاده از حسگر رطوبت-سنج طراحی نموده است. این سیستم بر مبنای حجم رطوبتی خاک که توسط حسگر مربوطه اندازه‌گیری می‌شود نیاز آبی گیاه را مشخص و با استفاده از تابلو کنترل پمپ را جهت آبیاری براساس زمان‌بندی که به سیستم داده شده است بکار انداخته و آبیاری را انجام می‌دهد که نتایج حاکی از بازدهی بالای این سیستم است.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی، یکی از اولویت‌های کشور کاهش و بهینه‌نمودن مصرف آب بخصوص در زمینه کشاورزی می‌باشد که سهم بزرگی از مصرف آب کشور را به خود اختصاص می‌دهد. هوشمندسازی مزارع در جهت استفاده بهینه از منابع آبی امری ضروری است. در این پژوهش با استفاده از دو شاخص آماری کریجینگ و کوکریجینگ به بررسی تعداد حسگر موردنیاز برای دستیابی به بیشترین بهره‌وری و استفاده مطلوب از تعدادی حسگر با توجه به بافت خاک پرداخته شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که با استفاده از حسگرهای رطوبت خاک و با بررسی مدل‌های تخمینی کریجینگ و کوکریجینگ می‌توان حداقل تعداد حسگر موردنیاز برای برنامه‌ریزی آبیاری را تعیین نمود.

نتایج اعتبارسنجی تقاطعی نیز نشان می‌دهد که اگر چه کاهش حسگر باعث کاهش مقدار R^2 شده است لیکن نتایج کاهش حسگر از حسگر زیاد به متوسط نتایج نزدیک به هم دارند به طوری که در حالت ظرفیت زراعی با میزان اختلاف ۰/۰۵ درصد و در حالیکه با کاهش حسگر به سطح حسگر کم‌دقت ارزیابی به شدت کاهش می‌یابد و حدود ۲۵٪ نسبت به حالت ماکزیمم کاسته شده است.

Winter و همکاران (۲۰۰۶) مطالعاتی را در زمینه آبیاری قطره‌ای و نحوه آبیاری در ایالات متحده انجام داده‌اند که منجر به طراحی سیستم آبیاری توسط کنترل زمان آبیاری شده است، نتایجی که آنها کسب نموده‌اند این است که بهینه‌شدن مصرف آب قابل‌ملاحظه است، آنها همچنین خساراتی که در اثر آبیاری بیش از حد به گیاهان و زمین وارد می‌شود متوقف نموده‌اند، این نتایج بدست آمده متناسب با سیستم قطره‌ای براساس حسگر کنترل زمانی بوده است که نشان از اهمیت استفاده از حسگر در بهینه‌سازی مصرف آب را بیان می‌کرد.

در پژوهشی Frueh و Hopmans (۱۹۹۷) به منظور شناسایی دقت حسگرهای چندسطحی در ستون خاک آزمایشگاه و خاک سنگریزه‌ای در مزرعه با بکارگیری دو روش، حسگرهای TDR را واسنجی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد خطای ابزاری برآورد رطوبت حجمی به وسیله دستگاه TDR کمتر از $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ است. در هر دو مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مزرعه‌ای اگر حسگرها به‌طور مجزا واسنجی شوند نتایج مناسبی بدست خواهد آمد. همچنین، اگر حسگرهای TDR مربوط به هر عمق به‌طور مجزا واسنجی شوند و با نتایج حاصله از نوترون‌متر مورد مقایسه قرار گیرند، خطای استاندارد $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و یا کمتر و ضریب همبستگی بین ۰/۶۳ تا ۰/۹۲ متغیر است (Frue and Hopmans, 1977) که با نتایج بدست آمده از این پژوهش در جهت ضرورت هوشمندسازی به جهت افزایش بهره‌وری نزدیک بوده است.

به طوری که در بازه بین ۱۵-۱۶ نمونه در هکتار ضریب تبیین و میانگین جذرمربعات در نزدیک‌ترین حالت ممکن قرار داشته و نتیجه مطلوبی را در جهت استفاده حداکثری ایجاد می‌کند. و همچنین روش کوکریجینگ با حدود ۱۱ درصد برآورد کمتر نسب به روش کریجینگ به عنوان روش برتر منطقه شناخته نشد و استفاده از این شاخص‌ها سبب بهبود فرآیند برنامه‌ریزی آبیاری و همینطور باعث کاهش میزان تلفات آب شده و از نظر اقتصادی نیز تعداد حسگر انتخابی را مقرون به صرفه‌تر می‌نماید.

در این تحقیق تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی خاک شامل درصد ذرات خاک، میزان رطوبت حجمی در نقاط حد اشباع (SP) ظرفیت مزرعه (FC) نقطه پژمردگی دائم (PWP) و جرم مخصوص ظاهری خاک (pb) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مورد بررسی قرار گرفت و درونیایی و پهنه‌بندی مقادیر این متغیرها با استفاده از

روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ انجام شد. با بررسی دقت این تخمین گرها با یکدیگر در سه سطح متفاوت حسگر کم، حسگر متوسط و حسگر زیاد مورد برآزش قرار گرفت به طوری که برآزش مدل برای حالت حسگر زیاد در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی نسبت به حسگر کم حدود ۸ درصد بیشتر بوده است که در یک بیان کلی می‌توان روش کریجینگ را یک تخمینگر برتر اعلام نمود، زیرا علاوه بر اینکه به تخمین نارایب کمک می‌کند، برآوردی از حداقل تخمین را نیز ارائه می‌دهد و نتایج قابل قبولی را در جهت برآورد تعداد حسگر در اختیار قرار می‌دهد.

با توجه به مطرح شدن روش‌های جدید میانایی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی کارایی روش‌های دیگر نیز در تعیین تعداد سنسور بهینه مورد بررسی قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

- انصاری، ح و حسن پور، م. ۱۳۹۴. طراحی و ساخت REC-P55 برای خواندن رطوبت خاک، دما و شوری. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۹ (۱): ۳۲-۴۳.
- تافته. الف، امداد م. غالبی. س. ۱۳۹۶ تعیین مناسبترین شرایط آبیاری نواری به‌منظور افزایش راندمان کاربرد آب با استفاده از مدل SRFR مجله مهندسی آبیاری و زهکشی. ۸ (۳۰): ۲۰۰-۲۱۰.
- دوستی. م. ۱۳۸۶. مدیریت آبیاری گلخانه با استفاده از روش‌های جدید اندازه‌گیری رطوبت خاک. اولین کارگاه بهبود بهره‌وری استفاده از آب در گلخانه، ۱۸ مهر، کرج، ایران، ۱۸ ص.
- روغنی. م. امام جمعه. ر و کمالی. ک. ۱۳۹۱. بررسی و ساخت سنسورهای دفن شده TDR و ارزیابی عملکرد آن در کاهش رطوبت خاک. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. (۱۷): ۵۳-۶۲.
- زارع ابیانه. ح، خسرای. الف، ابراهیمی پاک. ن. الف، تافته. الف. و جوزی. م. ۱۳۹۸. انتخاب مدل بهینه نفوذ آب به خاک (مطالعه موردی: سرزمین‌های جهاد نصر استان خوزستان). مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲): ۲۹۱-۳۰۴.
- شاهرخ-نیا، م. ۱۳۹۵. اصول و ابزار برنامه‌ریزی آبیاری برای مزارع و باغات. شورای تحقیقات و تحقیقات مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس. ۲۵ (۴): ۳۵-۴۷.
- قائم‌الف. الف، و رحمانی ثقیه. ج. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد سنسورهای هوشمند به عنوان یک رویکرد جدید برای تعیین میزان رطوبت خاک. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۸ (۱): ۱۶-۲۵.
- نامدار خجسته، د، شرفا، م، اسکندری، ز. و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۹۰. اثرات رس و شوری بر مقدار حجم حجمی آب با استفاده از بازتاب سنجی حوزه زمانی. مجله تحقیقات خاک ایران (علوم خاک و آب سابق). ۲۵ (۲): ۱۰۳-۱۱۲.

- Burgess, T.M., and Webster, R. 1980. Optimal interpolation., and isarithmic mapping of soil properties. *European Journal of Soil Science*. 31 (2): 315-331.
- Dursun, M. and Semih, O. 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Academic Journals*. 6 (7): 1573-1582.
- Duan, F.; Liu, J.; Fan, Y.; Chen, Z.; Han, Q. and Cao, H. 2017. Influential Factor Analysis of Spraying Effect of Light Hose-Fed Traveling Sprinkling System. *The Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 35: 541–546.
- Ganjugunte, G.K, Sheng, Z. and Clark, J. 2012. Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater. *Applied Water Science*. 2: 119-125.
- El Marazky, M.S, Fawzi, S.M. and Al-Ghobari, H. 2011. Evaluation of soil moisture sensors under intelligent irrigation systems for economical crops in arid regions. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 6 (2): 287-300.
- Frueh, W.T. and Hopmans, J.W. 1977. Soilmoisture calibration of a TDR multilevel probe in gravely soils. *Soil Science*. 162: 554-565.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*. 89 (1-2): 1-45.
- Heaton, K. 2007. Soil moisture management with water mark sensors. Utah State University Extension, Kane and Garfield County Agent, February 6-7.
- Hanson, R.B., Orloff, S. and Pters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture*. 54, 38-42.
- Irrrometer. 2010. Watermark Soil Moisture Sensor – Model 200SS. Specification Document. Irrrometer company, Inc. P. O. Box 2424, Riverside, CA 92516. <http://www.irrometer.com>.
- Khorami, M. Alizadeh, A. and Ansari, H. 2013. Simulation of water movement and moisture redistribution under drip irrigation systems using hydrus 2D/3D. *Journal of. Water and Soil*. 27 (4): 692-702.
- Larson, G.F. 1985. Electrical sensor for measuring moisture in landscape and agricultural soils. U. S. Patent 4,531,087. Date of Patent: July 23.
- Mahmut, C. and Cevat, K. 2003. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Hydrology*. 272: 238-249.
- Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M.R. and Keshavarz, M., 2018. Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural water management*, 208, pp.7-18.
- Nolz, R., Kammerer, G. and Cepuder, P. 2012. Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agricultural Water Management*. 116: 12– 20.
- Osroosh, Y., Peters, R.T., Campbell, C.S. and Zhang, Q. 2016. Comparison of Irrigation Automation Algorithms for Drip-Irrigated Apple Trees. *Computers and Electronics in Agriculture*. 128: 87–99.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Aguera, T., Valdez, L.C. and Fernandez, M D. 2006. Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science Journal*. 24: 185–202.
- Western, A.W., Zhou, S.-L., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, G. and Wilson, D.J. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*. 286 (1-4): 113-134.
- Winter, C., Soylemez, N., Trivedi, j., Pickens, N., Craig, C. and Vaidyanathan, V. 2006. Design of a sensor based smart sprinkler system. *Proceedings of the international journal management engineering - intertech conference*, Kean university, New jersey, October 19-21.



ISSN 2251-7480

Investigation of the optimal number of soil moisture based on spatial variation of moisture for irrigation planning and soil and water resources conservation

Mohadese Sadat Fakhar¹, Bijan Nazari² and Mahmood Fazeli Sangani^{3*}

1) Dept. Water Sciences and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2*) Associated Professor of Water Engineering Department, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3) Assistant Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran.

*Corresponding author email: mfazeli@guilan.ac.ir

Received: 05-10-2020

Accepted: 03-07-2021

Abstract

The development of an accurate for monitoring the soil moisture is very important step in soil and water conservation activities and studies. The purpose of this study is to provide solutions to optimally determine the number of sensors required to monitor soil moisture bases on geostatistical approaches and intelligent monitoring of the water status in soil. In this research, 87 samples were taken as a regular network from the surface depth (0-30) cm. Three levels of the samples number were considered. By decreasing the samples number, the estimation accuracy decreases and the component effect increases, that indicates an increase in the random and non-structural part of the property. With the high sample number, the fitness of the model was 1.2% and 2.7% more than when the average and the minimum sample number. Reducing the samples has increased the radius of effect and decreased the ratio of structural to non-structural variance of properties. So the radius of effect of field capacity when the sensors number is at its maximum level is 36.8% and 38.4% less than the other two levels, respectively. As the samples number decreases, the estimation error increases sharply. Based on the findings, the use of between 20 and 30 sensors per 100 hectares produced the best results. The kriging method was an excellent estimator for moisture mediation. The proposed method can be used in determining the optimal sensors number for irrigation planning.

Keywords: Soil moisture sensors; Spatial changes; Variogram; Kriging; Cokriging.