نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 29، شماره 4، مهر – آبان 1394، ص. 796-787

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 4, Sept.-Oct. 2015, p. 787-796

# پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در حوضه آبخیز ناورود اسالم استان گیلان

محمدرضا خالدیان[1*]- سیدعلی موسوی[2]- حسین اسدی[3]- مهدی نوروزی[4]- محمد علی گلی[5]

تاریخ دریافت: 1392/02/11
تاریخ پذیرش: 1394/03/17

## چکیده

حرکت آب در ناحیه‌ی غیراشباع خاک اغلب با معادله‌ی ریچاردز مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور حل این معادله بایستی شرایط اولیه و مرزی مربوط به فشار آب و هدایت هیدرولیکی خاک به‌صورت توابعی از رطوبت خاک تعیین شود. روش بیرکن به منظور استخراج مشخصات هیدرولیکی و رطوبتی خاک در ناحیه‌ی غیراشباع توسعه یافته است. در این روش از تابع رطوبت خاک ونگونختن با شرایط بوردین و تابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری برای توصیف منحنی‌های مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک استفاده شده است. روش بیرکن، منحنی‌های مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک را که وابسته به بافت خاک است از تحلیل توزیع دانه‌بندی خاک و پارامترهای شکلی را که وابسته به ساختمان خاک است از اندازه‌گیری صحرایی نفوذ تحت بار هیدرولیکی ناچیز، تخمین می‌زند. هدف از پژوهش حاضر تحلیل تغییرات مکانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس حوضه آبخیز است. در این مطالعه حوضه ناورود اسالم با مساحت 307 کیلومتر مربع با فواصل دو کیلومتر شبکه‌بندی شد و در گره‌های ایجاد شده اندازه‌گیری نفوذ با استفاده از تک استوانه بیرکن صورت گرفت. بررسی تغییرات مکانی با نرم‌افزار GS+ و تهیه نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه آبخیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS صورت گرفت. نتایج نشان داد که متوسط هدایت هیدرولیکی اشباع حوضه مورد مطالعه 3/96 سانتی‌متر بر ساعت با ضریب تغییرات 151 درصد بود. میزان شعاع تاثیر 2280 متر و ضریب تبیین مدل نمایی برازش داده شده 0/953 تعیین شد. از نتایج تحقیق حاضر می‌توان در مدیریت کارآمد حوضه آبخیز استفاده کرد.

**واژه‌های کلیدی:** بیرکن، تغییرات مکانی، نفوذ

## مقدمه

ورود آب از سطح مشترک خاک و اتمسفر به داخل خاک بخش غالب و آغازین تعامل پدوسفر و هیدروسفر است (6)، که نقش بسیار مؤثری در چرخه‌ی هیدرولوژی، نوع پوشش گیاهی، اکولوژی منطقه، میزان رواناب، فرسایش و تخریب خاک، انتقال املاح و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارد (12 و 13). ورود آب به خاک توسط یکی از مهم‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی خاک یعنی نفوذ کنترل می‌شود. این فرآیند که به ناحیه‌ی غیر اشباع خاک مربوط می‌شود، رابطه‌ای بین مؤلفه‌های آب سطحی و آب زیرزمینی است و به سبب شناخت و تعیین مؤلفه‌های بیلان آب و انتقال آلودگی از طریق آب در این ناحیه، اهمیت دارد.

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از پارامترهای مهم در ارتباط با حرکت آب و املاح در محیط خاک است (18). افزایش آگاهی افراد بشر نسبت به محیط زیست، توجه بیشتر پژوهشگران به فرآیند حرکت و بازتوزیع آب و املاح در خاک و سفره‌های آب زیرزمینی شده است. همچنین تعیین هدایت هیدرولیکی خاک به منظور تعیین میزان رواناب خروجی از حوضه‌های آبخیز ضروریست.

شناخت فرآیند نفوذ مستلزم تعیین منحنی‌های مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک است. برای تعیین این منحنی‌های مشخصه، روش‌های مختلفی از ساده‌ترین روش‌ها تا روش‌های پیچیده و سطح بالایی که به آزمایش‌های کامل اندازه‌گیری منحنی‌های مذکور با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی نیاز است، می‌توان اشاره کرد (17). یکی از روش‌هایی که تاکنون به‌منظور اندازه‌گیری صحرایی نفوذ در حوضه‌های آبخیز به کار رفته است روش استوانه‌های مضاعف است که بسیار وقت‌گیر بوده و اجرای آن در مناطق پرشیب و صعب‌العبور به دلیل حجم بالای آب مورد نیاز و وزن تجهیزات با مشکلاتی مواجه است (5). حرکت آب در ناحیه‌ی غیراشباع خاک اغلب با استفاده از معادله ارایه شده توسط ریچاردز (24) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور حل معادله‌ی ریچاردز بایستی شرایط اولیه و مرزی مربوط به فشار آب و هدایت هیدرولیکی خاک به صورت توابعی از رطوبت خاک

1، 2، 3، 4 و 5- به ترتیب استادیار، مربی، دانشیار و دانش‌آموختگان کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان
(*- نویسنده مسئول: (Email: khaledian@guilan.ac.ir

تعیین گردند. یکی از روش‌های ساده برای استخراج مشخصات هیدرولیکی و رطوبتی خاک در ناحیه‌ی غیراشباع، روش بیرکن است که توسط هاورکمپ و همکاران (11) ارائه و توسعه یافته است. در این روش از تابع رطوبت خاک ونگونختن با شرایط بوردین و تابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری برای توصیف منحنی مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک استفاده شده است. روش بیرکن با فرض وجود روابط تحلیلی معین برای منحنی‌های مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک، پارامترهای شکلی، که به بافت خاک وابسته است را از تحلیل توزیع دانه‌بندی خاک و پارامترهای مقیاس را که به ساختمان خاک بستگی دارد از آزمایش‌های صحرایی نفوذ تحت بار ناچیز، تخمین می‌زند (11). سادگی این روش استفاده‌ی گسترده از آن را به دنبال داشته است. این روش در حوضه‌های آبخیز واقعی توسط گال و همکاران (8) در حوضه آبخیز بنین در کشور بنین و برود و همکاران (2) در حوضه آبخیز اکیوال در مرکز اسپانیا با مساحت 100 کیلومترمربع مورد استفاده قرار گرفت.

در بسیاری از مدل‌های چرخه‌ی عمومی آب، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در سطح 100 تا 10000 کیلومتر مربع همگن فرض می‌شود. این در حالی است که این ویژگی‌ها در سیستم‌های طبیعی دارای تغییرات مکانی زیادی بوده و همگن و ثابت فرض کردن آن‌ها باعث بروز خطا در محاسبه‌ی جریان سطحی و سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی خواهد شد (2). با شناخت الگوی تغییرات مکانی پارامتر یا پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نیم‌تغییرنما و درون‌یابی مقادیر در نقاط نمونه‌برداری نشده از طریق روش‌های درون‌یابی نظیر وزن‌دهی عکس فاصله و کریجینگ می‌توان نقشه پهنه‌بندی خصوصیات مختلف خاک حوضه آبخیز را تهیه کرده و در مدیریت پایدار حوضه استفاده نمود (1). متقیان و همکاران (20) از تخمین‌گر کریجینگ به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک حوضه آبخیز مرغملک (یکی از زیرحوضه‌های زاینده‌رود) استفاده کرد.

در طرح مطالعه جامع حوضه معرف ناورود در استان گیلان به منظور مدل‌سازی سیلاب‌های حوضه، پهنه‌بندی خصوصیات نفوذ حوضه ضروری است. به‌دلیل صعب‌العبور بودن حوضه و نیاز به جمع‌آوری خصوصیات نفوذ در محل در یک بازه زمانی کوتاه، روش بیرکن انتخاب شد که ملزومات آن به راحتی در سطح حوضه قابل جابجایی است (15 و 16). لذا از این روش برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه و پهنه‌بندی آن استفاده گردید. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در تکمیل بانک اطلاعات حوضه معرف ناورود نیز مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان یک کاربرد عملی از نتایج این مطالعه می‌توان از پهنه‌بندی ایجاد شده برای تامین ورودی مدل‌های توزیعی شبیه‌سازی سیلاب و یا مدیریت حوضه نظیر GSSHA (7) استفاده کرد. دوکانداپا (4) نیز برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک حوضه آبخیز ماهشوارام در هندوستان از روش بیرکن استفاده کرد و به کمک GIS اقدام به پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع حوضه نمود، سپس از نقشه پهنه‌بندی حاصل در تامین ورودی مدل هیدرولوژیکی پاور (10) استفاده کرد.

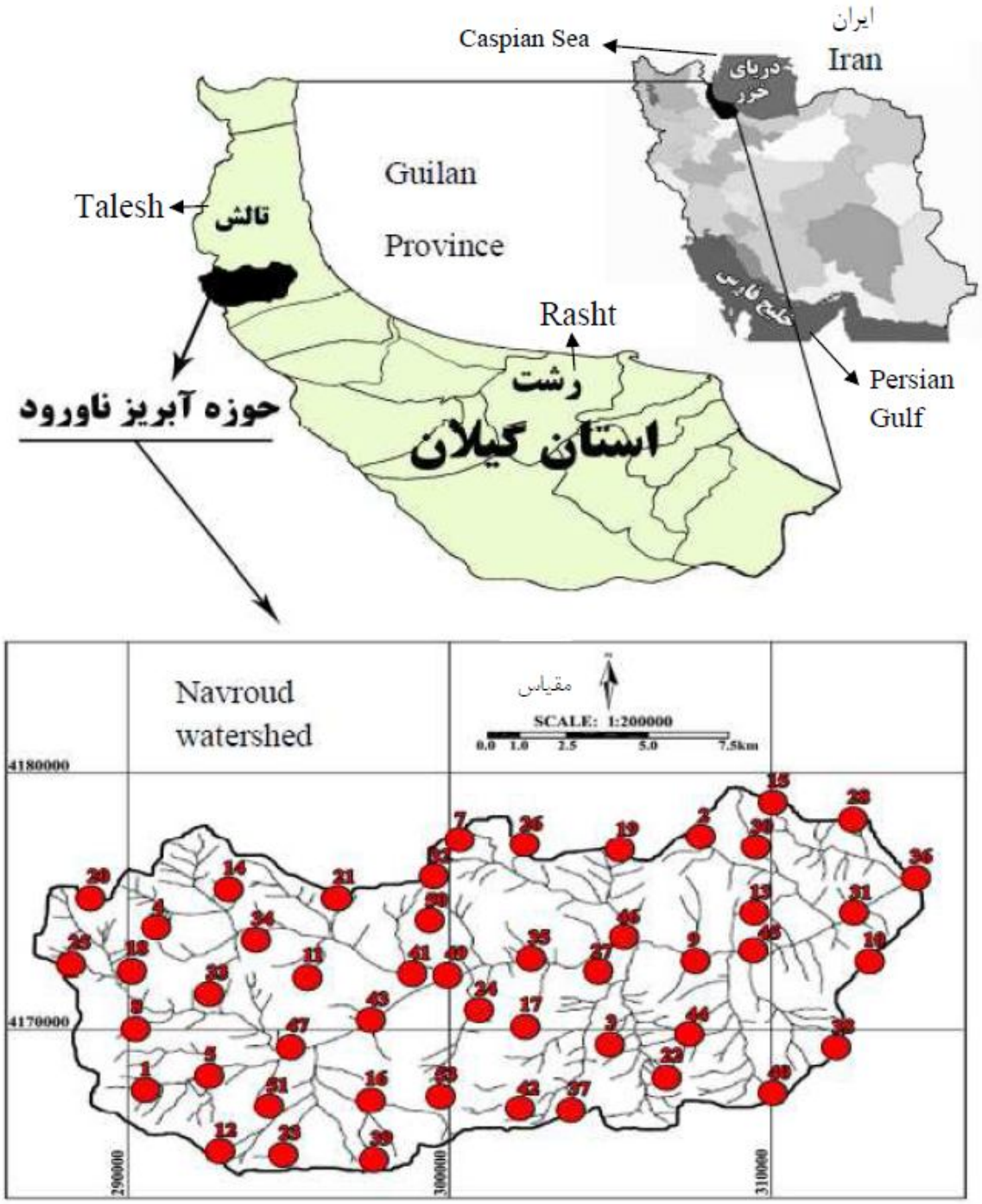
هدف از انجام پژوهش حاضر تحلیل مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع تعیین شده از 50 آزمایش نفوذسنجی بیرکن در مقیاس حوضه آبخیز است تا بتوان با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه را تهیه کرده و در مدیریت حوضه آبخیز از آن استفاده کرد.

## مواد و روش‌ها

### حوضه آبخیز معرف ناورود

حوضه آبخیز ناورود اسالم با مساحت حدود 307 کیلومترمربع (تا دریا)، در منطقه غرب گیلان و در محدوده شهرستان تالش، بین طول‌های جغرافیایی 48 درجه و 35 دقیقه تا 48 درجه و 54 دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی 37 درجه و 36 دقیقه تا 37 درجه و 45 دقیقه شمالی قرار گرفته است. این حوضه در دامنه‌های شرقی سلسله جبال البرز (رشته‌کوه‌های تالش) واقع گردیده و از سمت شمال به حوضه آبخیز کرگانرود، از جنوب به حوضه‌های آبخیز خاله‌سرا و دیناچال، از غرب به حوضه آبخیز آرپاچای و از شرق به دریای خزر متصل گردیده است. راه دسترسی به حوضه از طریق جاده آسفالته و توریستی اسالم به خلخال بوده که از کیلومتر 60 جاده انزلی به تالش، منشعب می‌شود. شکل 1 موقعیت حوضه و محل انجام آزمایش‌های نفوذ را در شهرستان تالش، استان گیلان در ایران نشان می‌دهد.

سرچشمه سرشاخه‌های اصلی رودخانه ناورود از دامنه‌های شرقی رشته‌کوه‌های تالش و کوه‌های حجاب، سطله‌خونی، اسبه ریسه، هفته‌خونی و بوغروداغ آغاز شده و بعد از پیوستن شاخه‌های فرعی دیگر، رودخانه در جهت غرب به شرق به مسیر خود ادامه داده و شش کیلومتر بعد از ایستگاه خرجگیل، از شهر اسالم گذشته و پس از طی چهار کیلومتر دیگر به دریای خزر می‌پیوندد. انشعابات رودخانه ناورود برای آبیاری مزارع برنج که کشت غالب ناحیه می‌باشد، از روستای گیجاو (به فاصله حدود پنج کیلومتر بالاتر از خرجگیل) شروع شده و در فصل آبیاری حدود دو تا سه متر مکعب در ثانیه از آب رودخانه به‌وسیله ده‌ها نهر کوچک و بزرگ، مزارع برنج را در سطحی معادل 2000 هکتار آبیاری می‌نمایند. از کل وسعت حوضه آبخیز ناورود (307 کیلومترمربع)، حدود 41 کیلومترمربع مربوط به دشت و بقیه‌ی آن که حدود 266 کیلومترمربع می‌باشد، مربوط به بخش کوهستانی حوضه تا محل ورود به دشت (ایستگاه خرجگیل) می‌باشد. ناحیه مورد مطالعه شامل محدوده‌ای با ارتفاع بالاتر از 130 متر می‌باشد.




**شکل 1- موقعیت حوضه آبخیز ناورود اسالم در شهرستان تالش، استان گیلان و ایران همچنین محل انجام آزمایش‌های نفوذ در سطح حوضه آبخیز ناورود**

**Figure 1- The position of Navroud-Islam watershed in the city of Talesh, Guilan province, Iran, as well as the positions of infiltration test over the Navroud watershed**

حوضه آبخیز رودخانه ناورود اسالم از سوی شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان به عنوان حوضه معرف منطقه غرب گیلان در نظر گرفته شده و به شبکه ایستگاه‌های اقلیمی و آب‌سنجی متعدد مجهز گردیده است. در این حوضه سه ایستگاه تبخیرسنجی مجهز به باران‌سنج ثبات در خروجی (ایستگاه خرجگیل)، مرکز ثقل (ایستگاه خلیان) و بالا دست (ایستگاه ناو) و دو ایستگاه آب‌سنجی در خروجی و مرکز ثقل حوضه قرار دارد. به علاوه دو ایستگاه باران‌سنجی معمولی (گاوخس و نره بند) و 16 ایستگاه باران‌سنجی ذخیره‌ای در نقاط مختلف حوضه قرار دارند که برای کنترل داده‌ها و محاسبه بیلان آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور تکمیل بانک اطلاعاتی این حوضه، مطالعه حاضر برای پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه صورت گرفت. بدین منظور ابتدا حوضه با فواصل 2×2 کیلومتر شبکه‌بندی گردید و سپس در گره‌های ایجاد شده آزمایش نفوذ با تک استوانه بیرکن اجرا گردید (شکل 1). با توجه به وسیع بودن و صعب العبور بودن حوضه باید تعداد نقاطی انتخاب می‌شد تا در مدت کوتاهی بتوان برداشت داده را تکمیل کرد تا تغییرات زمانی حادث نشده و باعث پوشاندن تغییرات مکانی نشوند.

## روش اجرای آزمایش نفوذ

روش بیرکن (11) یک روش نفوذسنجی سه‌بعدی ساده تحت بار ناچیز (حدود یک سانتی‌متر) است که به‌وسیله یک استوانه با شعاع 5 تا 20 سانتی‌متر اجرا می‌شود. آزمایش صحرایی، داده‌های نفوذ تجمعی نسبت به زمان را فراهم می‌آورد. منحنی دانه‌بندی خاک، رطوبت اولیه، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی نیز مورد نیاز هستند. روش اجرای آزمایش صحرایی به‌صورت گام‌های منظم در زیر آمده است:

تک استوانه بیرکن را روی سطح خاک قرار داده و برای جلوگیری از خروج افقی آب آن‌را به میزان یک تا دو سانتی‌متر داخل خاک فرو می‌برند. پوشش گیاهی یا بقایای آن باید از روی سطح خاک برداشته شوند در حالی‌که ریشه‌ها باقی می‌مانند.

یک نمونه مرکب خاک تا عمق پنج سانتی‌متری از اطراف استوانه نصب شده جمع‌آوری می‌شود. رطوبت اولیه خاک و منحنی دانه‌بندی خاک (9) مشخص می‌شوند. برای تعیین جرم مخصوص حقیقی و ظاهری خاک نیز نمونه‌برداری انجام می‌شود.

برای شروع آزمایش نفوذ، یک حجم مشخص از آب (مثلا 100 میلی‌لیتر) در زمان صفر به درون استوانه ریخته می‌شود و زمان مورد نیاز برای نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود. برای جلوگیری از به‌هم خوردن سطح خاک از یک صفحه توری استفاده شد (شکل 2). زمانی‌که حجم اولیه آب به‌طور کامل به داخل خاک نفوذ کرد، حجم مشخص دیگری به درون استوانه ریخته می‌شود و زمان مورد نیاز برای نفوذ یادداشت می‌شود (زمان تجمعی). به همین ترتیب اضافه کردن حجم‌های بعدی و یادداشت زمان ادامه می‌یابد تا هشت الی 15 حجم آب درون استوانه ریخته شود و زمان مورد نیاز یادداشت می‌شود. در تحقیق حاضر حجم 100 میلی‌لیتر و به تعداد حداقل 12 بار به کار برده شد. با این حجم آب، لایه سطحی خاک اشباع می‌گردید (22).

به‌منظور شناسایی وضعیت خاک حوضه در کنار آزمایش صحرایی نفوذپذیری به روش بیرکن در 50 نقطه مختلف حوضه، نمونه‌های خاک نیز در این 50 نقطه تهیه و در آزمایشگاه، بافت آن تعیین گردید. تعیین بافت و توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر و با قرائت کامل انجام شد (9).

پس از به‌دست آوردن منحنی نفوذ (نظیر شکل 3)، به‌منظور استخراج هدایت هیدرولیکی اشباع، نرم‌افزاری به‌نام بست (17) نیاز می‌باشد که دسترسی به این نرم‌افزار به دلیل هزینه‌بر بودن مقدور نبود. لذا برای استخراج هدایت هیدرولیکی اشباع اقدام به تهیه سه برنامه در محیط برنامه‌نویسی فرترن براساس الگوریتم ارائه شده توسط لاساباتر و همکاران (17) گردید تا با استفاده از داده‌های برداشت شده و منحنی نفوذ تجمعی-زمان، ابتدا پارامترهای شکلی و پارامترهای مقیاسی و سپس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع تعیین شود. در این روش از تابع رطوبت خاک ونگونختن با شرایط بوردین و تابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری برای توصیف منحنی مشخصه‌ی هیدرولیکی خاک استفاده شد. برای اطلاع خوانندگان خلاصه‌ای از الگوریتم مورد استفاده در ادامه ارایه می‌گردد، برای اطلاعات بیشتر به لاساباتر و همکاران (17) مراجعه گردد. در روش مورد استفاده تخمین ویژگی‌های منحنی‌های مشخصه هیدرولیکی خاک در دو مرحله شامل تخمین پارامترهای شکل و تخمین پارامترهای اندازه انجام می‌شود که الگوریتم هر مرحله طی گام‌های زیر انجام می‌شود:

الف- تخمین پارامترهای شکل

گام 1- تخمین پارامترهای شکل منحنی توزیع دانه‌بندی خاک

گام 2- تخمین بعد فرکتالی محیط

گام 3- محاسبه پارامترهای شکل منحنی‌های مشخصه هیدرولیکی خاک

ب- تخمین پارامترهای اندازه

گام 1- محاسبه ضرایب مورد نیاز

گام 2- محاسبه حداکثر مقدار پارامتر قابلیت جذب آب

گام 3- تخمین مقادیر پارامتر قابلیت جذب آب و هدایت هیدرولیکی اشباع با فرض نقاط شروع جریان ماندگار مختلف در آزمایش نفوذ بیرکن

گام 4- محاسبه زمان پایان جریان غیرماندگار و انتخاب مقادیر معتبر پارامتر قابلیت جذب آب و هدایت هیدرولیکی اشباع به ازای آن

گام 5- محاسبه سایر پارامترهای اندازه

**پهنه‌بندی**

اگر برای پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع در حوضه آبخیز از زمین آمار استفاده شود، ابتدا باید به تحلیل پراکندگی مکانی داده‌های هدایت هیدرولیکی اشباع پرداخته شود. برای این‌کار از نرم‌افزار GS+ ویرایش 5.1.1استفاده شد. با توجه به این‌که بهتر است توزیع داده‌ها نرمال باشد لذا برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کلموگروف-اسمیرنف به کمک نرم‌افزار SPSS استفاده شد و در صورت عدم تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال، می‌توان با تبدیل لگاریتمی با پایه طبیعی توزیع داده‌ها را به توزیع نرمال نزدیک‌تر کرد. پس از تعیین شاخص‌های نیم‌تغییرنمای[1] هدایت هیدرولیکی اشباع، برای درون‌یابی دو روش وزن‌دادن عکس فاصله و کریجینگ اعتبارسنجی شدند. سپس اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS شد. برای طبقه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع از طبقه‌بندی ارایه شده توسط بای‌بوردی (3) با ادغام زیر گروه‌ها استفاده شد. در این روش گروه خاک دارای هدایت هیدرولیکی اشباع از صفر تا دو سانتی‌متر بر ساعت به عنوان گروه نفوذپذیری کند، گروه خاک دارای هدایت هیدرولیکی اشباع از دو تا شش سانتی‌متر بر ساعت به عنوان گروه نفوذپذیری متوسط و بالاخره گروه خاک دارای هدایت هیدرولیکی اشباع شش سانتی‌متر بر ساعت و بالاتر به عنوان گروه نفوذپذیری تند طبقه‌بندی شد.

## نتایج و بحث

به کمک آمار کلاسیک توصیف آماری داده‌ها شامل میانه، کمینه، بیشینه، واریانس و انحراف معیار صورت گرفت. جدول 1 آماره‌های مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک حوضه آبخیز ناورود در نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک 1/07 گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. بالا بودن ضریب تغییرات درصدهای شن، لای و رس (31-21 درصد) نشان‌دهنده تنوع بافت خاک حوضه آبخیز ناورود اسالم می‌باشد. با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی خاک خصوصیتی است که بیشتر تحت تاثیر بافت و ساختمان خاک است لذا می‌توان انتظار داشت که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز مانند بافت خاک دارای تنوع باشد که در ادامه در مورد آن بحث شده است.

پس از تعیین منحنی نفوذ تجمعی- زمان (شکل 2)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استخراج گردید. خلاصه آماره‌های نتایج هدایت هیدرولیکی اشباع در 50 نقطه اندازه‌گیری شده در جدول 2 آورده شد. میانگین هدایت هیدرولیکی خاک حوضه آبخیز ناورود 3/96 سانتی‌متر بر ساعت بود. براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط بای‌بوری (2) گروه نفوذ خاک حوضه در طبقه متوسط قرار می‌گیرد. ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک حوضه 151 درصد بود که نظیر بافت خاک حوضه دارای تنوع بالایی است. مالانتس و همکاران (18) هدایت هیدرولیکی یک خاک لوم شنی دارای خلل و فرج درشت را در آزمایشگاه بررسی کردند. این کار با نمونه‌برداری از خاک توسط یک استوانه به طول 5/1 سانتی‌متر و قطر 5 سانتی‌متر صورت گرفت. تعداد نمونه‌ها 60 عدد بود. ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک سطحی 619 درصد گزارش شد که بیش از ضریب تغییرات مشاهده شده در مطالعه حاضر است که می‌تواند به دلیل تفاوت اقلیم و روش اندازه‌گیری باشد. مولا و مک براتنی (23) با بررسی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده در منابع مختلف دامنه ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را 48 تا 352 درصد گزارش کردند و این خصوصیت خاک را دارای تغییرپذیری بالا معرفی کردند در صورتی که برای pH این دامنه دو تا 15 درصد ذکر شد و این خصوصیت به عنوان یک خصوصیت با تغییرپذیری کم معرفی شد. ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع پژوهش حاضر در محدوده معرفی شده توسط مولا و مک براتنی قرار می‌گیرد. بالا بودن ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه آبخیز ناورود نشان‌دهنده تغییرات زیاد پارامتر مذکور در حوضه مورد مطالعه است، بنابراین نیاز به استفاده از آمار مکانی برای تحلیل تغییرات وجود دارد.

شکل 3 نیم‌تغییرنمای هدایت هیدرولیکی اشباع در حوضه آبخیز ناورود را نشان می‌دهد. نیم‌تغییرنمای حاصل با استفاده از نرم‌افزار GS+ ترسیم شده است. با توجه به اینکه براساس آزمون کلموگرف-اسمیرنف توزیع داده‌ها نرمال نبوده لذا از روش تبدیل لگاریتمی (پایه طبیعی) برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده گردید. نتایج نشان‌دهنده عدم وجود روند ناهمسانگردی بود. شاخص‌های آماری نظیر ضریب تبیین (0/953)، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه (0/42) و مجموع مربعات باقیمانده (0/0057 سانتی‌متر بر ساعت) نشان از برازش مناسب مدل نمایی دارد. اقبال و همکاران (14) در مطالعه خود روی هدایت هیدرویکی اشباع خاک در یک مزرعه پنبه با مساحت 162 هکتار از 209 نمونه با فاصله 79/4 متر استفاده کردند. آنها نیز برای تجزیه و تحلیل مکانی هدایت هیدرویکی اشباع از مدل نمایی استفاده کردند. طبق طبقه‌بندی ارایه شده اگر نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه کمتر از 25 درصد باشد وابستگی مکانی قوی، اگر از 25 تا 75 درصد باشد وابستگی مکانی متوسط و اگر بیش از 75 درصد باشد وابستگی مکانی ضعیف است (19). وابستگی مکانی در مطالعه مورد اشاره با توجه به شاخص تعریف شده متوسط (50-27 درصد) گزارش شد. در پژوهش حاضر شعاع تاثیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک 2280 متر تعیین گردید، که بسیار بزرگ‌تر از مقدار گزارش شده در مطالعه اقبال و همکاران (14) می‌باشد.

1- Semivariogram

جدول 1- آماره‌های مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک حوضه آبخیز ناورود برای 50 نقطه

Table 1- Statistics related to the soil physical properties of Navroud watershed for 50 points

| | میانه Median | کمینه Minimum | بیشینه Maximum | واریانس Variance | انحراف معیار Standard deviation |
|---|---|---|---|---|---|
| درصد شن Sand (%) | 38 | 15 | 62 | 140 | 11.85 |
| درصد لای Silt (%) | 32.5 | 18 | 51 | 49.9 | 7.06 |
| درصد رس Clay (%) | 30 | 17 | 47 | 43.6 | 6.60 |
| جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($gr/cm^3$) | 1.07 | 0.8 | 1.5 | 0.05 | 0.21 |

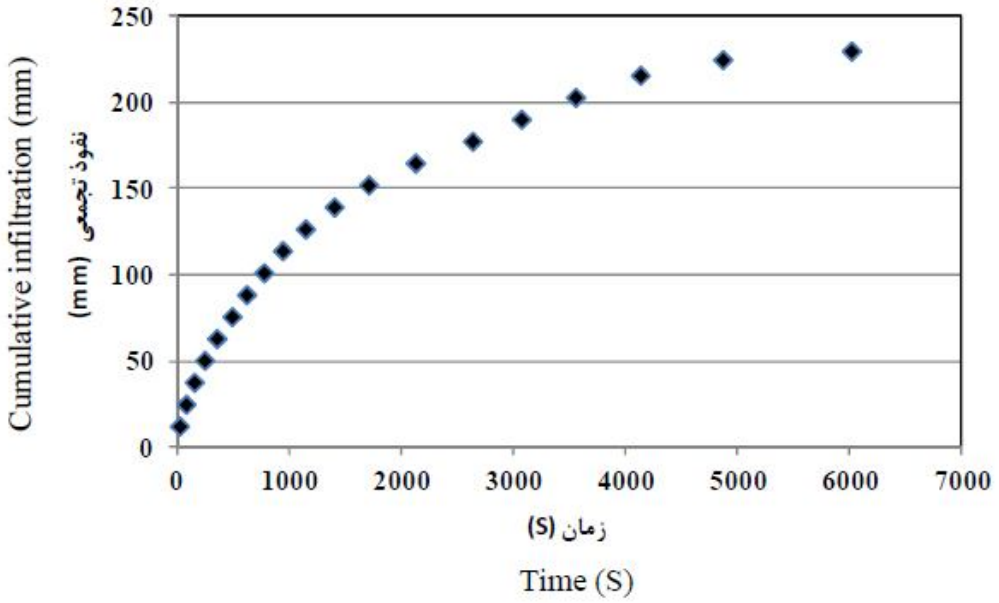
جدول 2- آماره‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده با روش بیرکن ($cm\ hr^{-1}$)

Table 2- Statistics on saturated hydraulic conductivity measured with Beerkan method ($cm\ hr^{-1}$)

| میانه Median | کمینه Minmum | UTMX | UTMY | بیشینه Maximum | UTMX | UTMY | واریانس Variance | CV (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.8 | 0.1 | 297510 | 4170414 | 32 | 306695 | 4168164 | 35.8 | 151 |

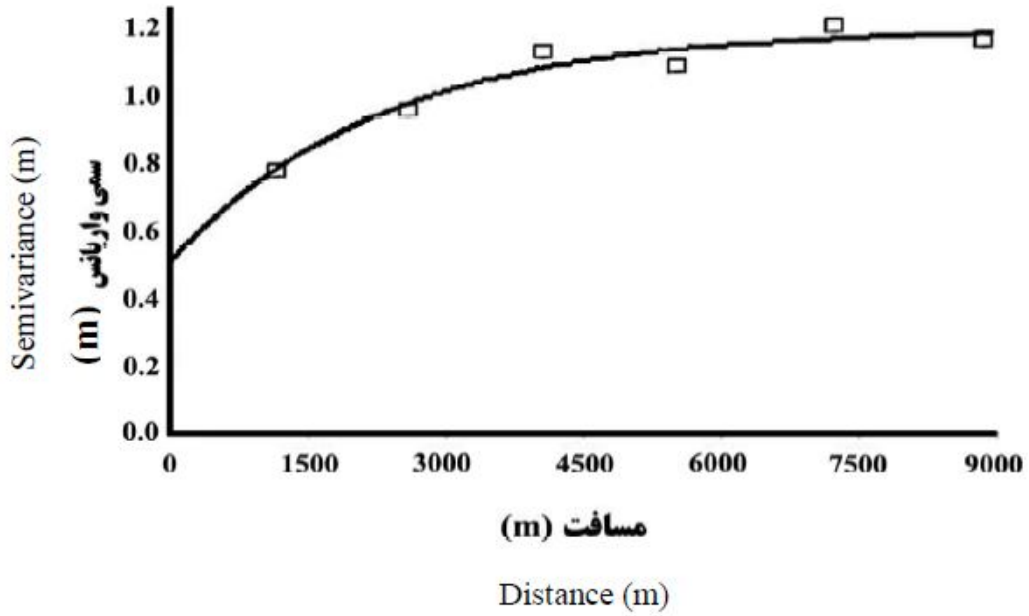
CV: ضریب تغییرات

CV: Coefficient of Variation




شکل 2- نمونه‌ای از منحنی نفوذ تجمعی-زمان در حوضه آبخیز ناورود ( با موقعیت: (4170086 و 298268)، جرم مخصوص ظاهری: 1/19 گرم بر سانتی‌مترمکعب، هدایت هیدرولیکی اشباع: 2/52 سانتی‌متر بر ساعت، درصد شن، لای و رس به ترتیب: 34، 51 و 15 و دارای بافت خاک لوم رسی سیلتی)

Figure 2- Example of the cumulative infiltration-time curve in the Navroud watershed (Position (298268:4170086), bulk density: 1.19 g $cm^{-3}$, saturated hydraulic conductivity: 2.52 cm $hr^{-1}$, sand (%): 34, silt (%): 51, clay (%): 15, soil texture: silty clay loam)




**شکل 3- نیم‌تغییرنمای هدایت هیدرولیکی اشباع در حوضه آبخیز ناورود برمبنای متغییرهای نرمال شده**

**Figure 3- Semivariogram of saturated hydraulic conductivity based on normalized values in Navroud watershed**

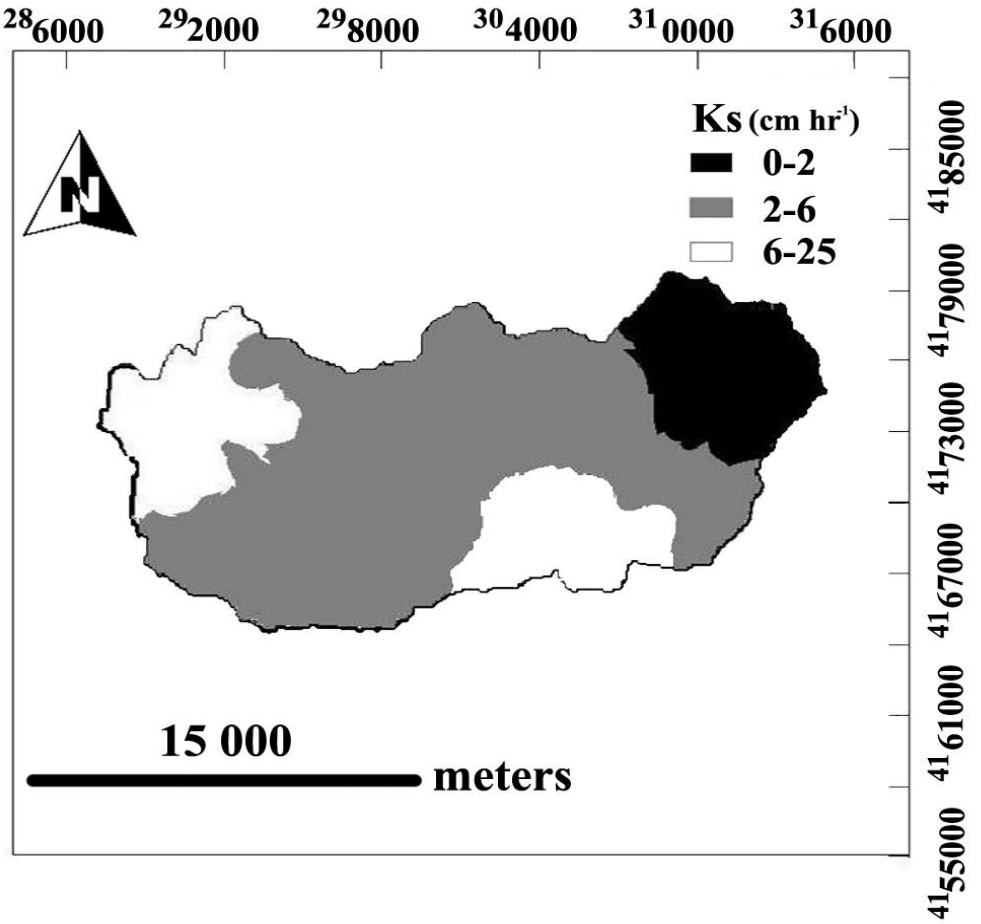
کلاس وابستگی مکانی نظیر مطالعه مورد اشاره متوسط می‌باشد. متقیان و همکاران (20) در مطالعه خود در حوضه آبخیز مرغملک با مساحت 97 کیلومتر مربع و با فواصل اندازه‌گیری یک کیلومتری شعاع تاثیر هدایت هیدرولیکی اشباع را 3850 متر گزارش کردند. مبارک و همکاران (21) شعاع تاثیر را در یک مزرعه ذرت به مساحت 0/1 هکتار 30 متر گزارش کردند. فاصله اندازه‌گیری‌ها 4/5×4/5 متر بود. تفاوت مقدار شعاع تاثیر تحقیق حاضر با مقادیر گزارش شده سایر محققین به دلیل متفاوت بودن مساحت منطقه مورد مطالعه (307 کیلومترمربع)، مقیاس مطالعه (مزرعه یا حوضه آبخیز) و فاصله بین نقاط اندازه‌گیری است.

پس از تعیین شاخص‌های نیم‌تغییرنمای هدایت هیدرولیکی اشباع، برای درون‌یابی دو روش وزن‌دادن عکس فاصله و کریجینگ معمولی اعتبارسنجی شدند که نتایج نشان دهنده برتری روش کریجینگ معمولی بر وزن دادن عکس فاصله بود (جذر میانگین مربعات خطای 8/97 با روش کریجینگ معمولی در مقایسه با 9/75 با روش وزن دادن عکس فاصله).

با استفاده از داده‌های خروجی نرم‌افزار GS+ نقشه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه آبخیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید (شکل 4). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نفوذپذیری خاک در سطح حوضه آبخیز دارای تغییرات مکانی زیادی است و از مقادیر بسیار ناچیز در جنوب‌شرقی حوضه تا مقادیر بالا به ویژه در بخش‌های جنوبی و شمال‌غربی حوضه متغیر است. ضریب همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع و درصد شن، لای و رس به‌ترتیب 0/04-، 0/01 و 0/07 بود، بنابراین هدایت هیدرولیکی کمتر تحت تاثیر بافت خاک قرار گرفته است و بیشتر تحت تاثیر ساختمان خاک بوده است چرا که این دو خصوصیت خاک بر هدایت هیدرولیکی اشباع موثرند. کاربری اراضی (کوهستان، مرتع و جنگل)، درصد مواد آلی خاک و جرم مخصوص ظاهری خاک (ضریب همبستگی با هدایت هیدرولیکی اشباع برابر 0/45-) می‌توانند نقش مهم‌تری در تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک داشته باشند.

## نتیجه‌گیری کلی

یکی از اطلاعات مورد نیاز در مدیریت یک حوضه آبخیز هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است. تعیین تغییرپذیری مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس حوضه آبخیز علیرغم دشواری زیاد یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای تهیه نقشه‌های دقیق از خصوصیات هیدرولیکی حوضه آبخیز است. هدف از انجام پژوهش حاضر تحلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حوضه آبخیز ناورود اسالم گیلان است. پس از تحلیل مکانی داده‌ها، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع تهیه گردید. از نقشه ارائه شده می‌توان در مدیریت بهینه حوضه آبخیز نظیر تعیین میزان رواناب خروجی از حوضه و میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده کرد.




**شکل 4- نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع در سطح حوضه آبخیز ناورود**

**Figure 4- Zoning map of saturated hydraulic conductivity over the Navroud watershed**

## منابع


1- Arslan H. 2012. Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. Agricultural Water Management, 113(2012):57-63.

2- Braud I., Haverkamp R., Arrue J.L., and Lopez M.V. 2003. Spatial variability of soil surface properties and consequences for the annual and monthly water balance of a semiarid environment (EFEDA Experiment). Journal of Hydrometeorology, 4:121–137.

3- Bybordi M. 1993. Principles of Irrigation Engineering. Vol. 1. Water and Soil Relationship. Tehran University Press. N° 1449/1. (in Persian)

4- De Condappa D. 2005. Etude de l'écoulement d'eau à travers la zone non-saturée des aquifères de socle à l'échelle spatiale du bassin versant. Application à l'évaluation de la recharge au sein du bassin versant de Maheshwaram, andhar Pradesh, Inde. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France (in French with English abstract)

5- Delleur J.W. 2007. The Handbook of Groundwater Engineering. Second edition. CRC Press, New York, 1342 p.

6- Dingman S.L. 2002. Physical Hydrology. 2nd edition, Prentice-Hall Inc. USA.

7- Downer C.W., and Ogden F.L. 2004. GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. Journal of Hydrologic Engineering, 9(3):161-174.

8- Galle S., Angulo Jaramillo R., Braud I., Boubkraoui S., Bouchez J.M., de Condappa D., Derive A., Gohoungssou G., Haverkamp R., Reggiani P., and Soria-Ugaldes J. 2001. Estimation of soil hydrodynamic properties of the

Donga watershed (CATCH Benin). In Proceedings of the GEWEX 4th International Conference, 10–14 Sept. 2001. Pierre Simon Laplace Institute, Paris, France.
9- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. In: J.H. Dane. And G.C. Topp. (Eds), Methods of soil analysis, Part 4- Physical methods. Agronomy Monograph, vol. 9. ASA and SSSA. Madison. WI. Pp 255-293.
10- Haverkamp R., Angulo R., Braud I., de Condappa D.I., Debionne S., Gandola F., Roessle S., Ross P.J., Sander G., Vachaud G., Vardo N., Viallet P., and Zin I. 2004. POWER: Planner Oriented Watershed modeling system for Environmental Responses. Development and first implementation. Final report AgriBPMWater, Projet CEE n° EVK1-1999-000117, Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement. Grenoble Cedex 9, France.
11- Haverkamp R., Arrue J.L., Vandervaere J.P., Braud I., Boulet G., Laurent J.P., Taha A., Ross P.J., and Angulo-Jaramillo R. 1996. Hydrological and thermal behavior of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): experimental study, analysis and modeling. Project UE, No. EV5C-CT 92 00 90.
12- Hillel D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press. Sand Diego, CA.
13- Hillel D. 2010. Soil Physics and Environment, translated by: Ghahraman B. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, Iran. N° 572. (in Persian)
14- Iqbal J., Thomasson A., Jenkins J.N., Owens P.R., and Whisler F.D. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. Soil Science Society of America Journal, 69:1338-1350.
15- Khaledian M. 2011. Introducing a simple technic to measure soil infiltration properties. P. 1-3. In Proceeding of the 11th Scientific-Research Congress of Guilan University, 9-11 May 2011. University of Guilan, Rasht, Iran. (in Persian).
16- Khaledian M., Moussavi S.A., Assadi H., and Nowrouzi M. 2011. Determination of saturated hydraulic conductivity using Beerkan method in watershed to use in Hydrological model. p. 1-5. In Proceeding of the 12th Iranian Soil Sciences Congress, 3-5 Sep. 2011. University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian with English abstract)
17- Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Soria-Ugalde J.M., Cuenca R., Braud I., and Haverkamp R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. Soil Science Society of America Journal, 70:521–532.
18- Mallants D., Mohanty D.B.P., and Feyen J. 1996. Spatial variability of hydraulic properties in a multilayered soil profile. Soil Science, 161(3):167-181.
19- Mohammadi J. 2006. Geostatistics. Pelk Press, Tehran. (in Persian)
20- Motaghian H.R., Karimi A., and Mohammadi J. 2008. Analysis of spatial variability of specific physical and hydraulic properties of soil on a catchment scale. Water and Soil Journal, 22(2):432-446. (in Persian with English abstract)
21- Mubarak I., Angulo-Jaramillo R., Mailhol J.C., Ruelle P., Khaledian M., and Vauclin M. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent? Agricultural Water Management, 97:1517-1526.
22- Mubarak I., Mailhol J.C., Angulo-Jaramillo R., Ruelle P., Boivin P., and Khaledian M. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. Geoderma, 150:158-165.
23- Mulla D.J., and McBratney A.B. 2002. Soil spatial variability. In M. E. Sumner, (ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, London, pp. A321-A352.
24- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1:318–333.

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 4, Sept.-Oct. 2015, p. 787-796

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 29، شماره 4، مهر – آبان 1394، ص. 796-787

# Mapping of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Navroud-Assalem Watershed in Guilan Province

**M.R. Khaledian[1]* - S.A. Moussavi[2] – H. Asadi[3] – M. Norouzi[4] – M. Aligoli[5]**

Received: 01-05-2013
Accepted: 07-06-2015

**Introduction:** With increasing awareness of human beings towards the environment, researchers pay more attention to process and redistribution of water flow and solute transport in the soil and groundwater. Moreover, determination of soil hydraulic conductivity is necessary to determine the runoff from basins. Water movement within the unsaturated zone is often described by the formulae proposed by Richards. To solve this equation, initial and boundary conditions of the hydraulic conductivity and the soil water pressure should be determined as functions of soil water content. Beerkan method was developed to identify retention and hydraulic conductivity curves. In this method, van Gunechten with Burdine condition and Brooks and Corey equations were used to describe water retention and hydraulic conductivity curves. Recognition of the spatial pattern of studied parameter using semivariogram and then preparing zoning map with interpolation methods such as IDW and kriging can help us in relevant watershed management. The aim of this study was to spatial analyze of saturated hydraulic conductivity from 50 infiltration tests at watershed scale using Beerkan method and then preparing zoning map for the Navroud watershed.

**Materials and Methods:** Navroud-Assalem watershed with an area of about 307 $km^2$ is located in the west part of Guilan province, within the city of Talesh. Of the total watershed area of Navroud, about 41 $km^2$ is plains and the rest of it is about 266 $km^2$, corresponding to the mountainous area. The study area includes an area with a height above 130 m. In order to complete the database of the studied watershed the present study was designed to assess soil saturated hydraulic conductivity. In this study, a 2×2 km network was designed in Navroud watershed with a surface area of 307 $km^2$, and then infiltration tests were carried out in each node using single ring of Beerkan. Beerkan method derives shape parameters from particle-size distribution and normalization parameters from infiltration test with a near zero pressure head. Evaluation of spatial variation was done using GS+ and zoning map was prepared with ArcGIS software. Statistical evaluation of recorded data was done using SPSS software package.

**Results and Discussion:** Results showed that the soil bulk density was of 1.07 gr $cm^{-3}$ in average. Furthermore, the results showed that the average of saturated hydraulic conductivity ($K_s$) in the watershed was of 3.96 cm $hr^{-1}$ with a coefficient of variation of 151%. The watershed $K_s$ is classified in the moderate class. Regarding the high value of $K_s$ variation coefficient, using geostatistics is necessary to analyze $K_s$ spatial variation. The results indicate the absence of the anisotropy. Using GS+ software, exponential model was fit on the empirical variation ($r^2$=0.953 and RSS=0.0057 cm $hr^{-1}$). The effective range was of 2280 m. The difference between the amounts reported by other studies and this study was because of the effect of the difference in the study area (307 km, in this study), scale (the field or watershed) and the distance between measured points. Two usual methods of interpolation including inverse distance weighting and ordinal kriging were verified. The results showed that ordinal kriging performed better than inverse distance weighting method (RMSEs for ordinal kriging and inverse distance weighting were 8.97 and 9.75, respectively). Zoning map of $K_s$ was prepared according to the results of GS+ software using ArcGIS software. The correlation coefficients between $K_s$ and sand, silt and clay percents were -0.04, 0.01 and 0.07, which demonstrate a weak effect of soil texture on the $K_s$ as compared with soil structure. The correlation coefficient of the soil bulk density with $K_s$ was of -0.45 which demonstrate a stronger effect as compared with the soil texture.

**Conclusions:** The results of this study can be used to proper management of watersheds. One of the main information needed to manage a watershed is $K_s$. Determining the spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity at watershed scale in spite of its difficulty is one of the main prerequisite parameters to provide detailed maps of a watershed. The aim of this study was to analyze the spatial variability of $K_s$ in Navroud-Assalem watershed, Guilan province. After analyzing spatial data, using ordinary kriging interpolation method, zoning map of $K_s$ was prepared. This map can be used to find the optimal management of watershed, such as determining the amount of basin runoff and groundwater recharge.

**Keywords:** Beerkan, Infiltration, Spatial variation

1, 2, 3, 4, 5- Assistant Professor, Lecture, Associate Professor and Former MSc Students of Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Respectively
(*- Corresponding Author Email: khaledian@guilan.ac.ir)