دانشکده علوم کشاورزی
گروه علوم خاک
(فیزیک و حفاظت خاک)

بررسی رابطه مقیاسی بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و برخی از خواص فیزیکی مؤثر بر آن

از:
میثم محمدی

استاد راهنما:
دکتر محمود شعبان‌پور

استادان مشاور:
دکتر محمدحسین محمدی
و
دکتر ناصر دوات‌گر

دی ۱۳۹۱

تقدیم به ساحت مقدس بقیه الله العظم (عج)،

روح مطهر پدرم، تنها حامی من در مشکلاتم مادرم که در طی این سال ها با فداکاری

درس صبر و بردباری را به من آموخت

و

همه کسانی که دوستشان دارم

بر خود لازم می دانم از حامیان همیشگی ام، از **خانواده** عزیزم به ویژه **مادر** مهربانم که عشق و زندگی را از آن ها آموختم، سپاس گزاری کنم. آنان که صدایشان برایم زنگ زندگی است. خالصانه بر آستان پر مهرشان سر فرود می آورم و بر دستانشان بوسه می زنم که تمام هستی من مدیون محبت های بی ادعایشان است.

از استاد بزرگوارم، **جناب دکتر محمود شعبان پور** که راهنمایی این جانب را در طول انجام پایان نامه بر عهده داشتند، و راهنمای علم و ادب بوده و هستند، تشکر می کنم. بی شک بدون وجود راهنمایی های ارزنده شان و دلگرمی های دلسوزانه شان، طی این مسیر برایم ناممکن بود. مسیری که با روشنایی علم و حمایت ایشان به انتها رسید.

از **جناب دکتر محمد حسین محمدی و ناصر دولت گر**، به واسطه مشاوره بی دریغشان با وجود مشغله های فراوان، در این امر، نهایت تشکر را دارم.

مراتب تقدیر و تشکر خود را از اساتید مدعو، **جناب آقای دکتر حسین اسدی و جناب آقای دکتر اکبر فرقانی** که زحمت باز خوانی این تحقیق را بر عهده گرفتند اعلام می دارم.

در پایان، از کلیه کسانی که حتی قدم ناچیزی در راه پیش برد این پژوهش برداشتند و یاریم نمودند، نهایت سپاس گزاری را دارم.

میثم محمدی

دی ماه یک هزار و سیصد و نود و یک

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده فارسی ..... ح
چکیده انگلیسی ..... خ
مقدمه ۲

فصل اول: کلیات و بررسی منابع

۱-۱- تغییرپذیری در خاک ۵
۱-۱-۱- انواع تغییرپذیری مکانی ۵
۱-۲- مقیاس‌بندی ۷
۱-۲-۱- آنالیز طیفی ۹
۱-۳- نظریه فراکتال ۱۰
۱-۳-۱- ویژگی‌های فراکتال‌ها ۱۰
۱-۳-۲- خودتشابهی ۱۱
۱-۳-۳- توصیف ریاضیاتی خودتشابهی آماری ۱۱
۱-۳-۴- بعد خودتشابهی ۱۲
۱-۳-۵- محاسبه بعد خودتشابهی ۱۲
۱-۳-۶- بعد غیر صحیح ۱۳
۱-۳-۷- رابطه مقیاسی ۱۴
۱-۳-۸- آمار فراکتال‌ها ۱۵
۱-۳-۹- کاربرد هندسه فراکتالی در علوم خاک ۱۷
۱-۳-۱۰- کاربرد مدل فراکتالی در صورت‌بندی k_s ۱۸
۱-۳-۱۱- رفتار فراکتالی تغییرپذیری مکانی ۱۹
۱-۳-۱۲- سنجش حافظه ۲۰
۱-۴- مقیاس ۲۱
۱-۴-۱- کوچک سازی مقیاس ۲۱
۱-۴-۲- بزرگ سازی مقیاس ۲۱
۱-۴-۳- مقیاس در علوم خاک ۲۱
۱-۴-۵- تک مقیاسی و چند مقیاسی بودن ۲۲

فصل دوم: مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات ناحیه مورد مطالعه ۲۵
۲-۲- آزمایشات صحرایی، نمونه‌برداری از خاک و آماده سازی نمونه‌ها ۲۵
۲-۳- اندزه‌گیری نفوذپذیری خاک ۲۶
۲-۴- روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۲۷
۲-۴-۱- جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر ۲۷
۲-۴-۲- جرم مخصوص ذرات خاک (ρ_s) ۲۷

۲-۴-۳- توزیع اندازه ذرات اولیه (بافت خاک) ۲۸
۲-۴-۴- میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات ۳۰
۲-۴-۵- توزیع اندازه خاکدانه یا ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر ۳۰
۲-۴-۶- ماده آلی خاک ۳۱
۲-۵- محاسبه ابعاد فراکتالی خصوصیات خاک ۳۲
۲-۵-۱- بعد فراکتالی ذرات اولیه خاک ۳۲
۲-۵-۱-۱- مدل یانگ و همکاران ۳۲
۲-۵-۱-۲- مدل بیرد و همکاران ۳۲
۲-۵-۱-۳- مدل میلان و همکاران ۳۳
۲-۵- محاسبه بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها ۳۳
۲-۶- آنالیزهای آماری ۳۴
۲-۶-۱- آمار کلاسیک ۳۴
۲-۶-۱-۱- توابع رگرسیونی ۳۴
۲-۶-۱-۲- ارزیابی توابع انتقالی ۳۶
۲-۶-۲- آنالیز زمین آماری ۳۷
۲-۶-۳- آنالیز فراکتالی ۳۷
۲-۶-۳-۱- ارزیابی ثبات مقیاسی ۳۸
۲-۶-۳-۲- آنالیز طیفی ۳۹

فصل سوم: نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های نمونه‌های خاک ۴۱
۳-۱-۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۴۱
۳-۱-۲- ابعاد فراکتالی ذرات اولیه خاک ۴۲
۳-۱-۳- ابعاد فراکتالی خاکدانه‌ها ۴۶
۳-۲- رابطه بین ویژگی‌های خاک ۴۶
۳-۲-۱- همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۴۷
۳-۲-۲- همبستگی بین ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و برخی از ویژگی‌های خاک ۴۸
۳-۲-۳- همبستگی بین ابعاد فراکتالی خاکدانه‌ها و برخی از ویژگی‌های خاک ۵۱
۳-۳- شاخص هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۵۳
۳-۳-۱- همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و برخی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک ۵۳
۳-۳-۲- همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و خاکدانه‌ها ۵۴
۳-۴- مدل‌های رگرسیونی ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و خاکدانه‌ها و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۵۵
۳-۴-۱- مدل رگرسیونی ابعاد فراکتالی ذرات اولیه ۵۵
۳-۴-۲- مدل رگرسیونی بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها ۵۸
۳-۴-۳- مدل رگرسیونی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۵۹
۳-۵- آنالیز زمین‌آماری ۶۱
۳-۵-۱- الگوی مکانی k_s ۶۲

۳-۵-۲- الگوی مکانی اجزای بافت خاک ۶۴
۳-۵-۳- الگوی مکانی سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۶۶
۳-۵-۴- تغییرپذیری ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و خاکدانه‌های خاک ۶۷
۳-۵-۵- اعتبار سنجی متقابل ۶۹
۳-۶- خودتشابهی آمار مکانی ۷۰
۳-۶-۱- خود تشابهی آمار مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع ۷۱
۳-۶-۲- خودتشابهی آمار مکانی اجزای بافت خاک ۷۱
۳-۶-۳- خودتشابهی آمار مکانی سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۷۲
۳-۶-۴- خودتشابهی آمار مکانی ابعاد فراکتالی ۷۴
۳-۶-۵- ارزیابی ثبات مقیاسی ۷۵
۳-۶-۶- نتایج آنالیز طیفی ۷۶
۳-۷- نتیجه‌گیری ۷۷
۳-۸- پیشنهادها ۷۹
منابع ۸۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- ذرات کانتور ۱۴
شکل ۲-۱- شمایی از زمین مورد مطالعه ۲۵
شکل ۳-۱- توزیع بافت و کلاس بافتی خاک ناحیه مورد مطالعه ۴۲
شکل ۳-۲- برازش مدل میلان و همکاران در نمودار لاگ/ لاگ توزیع اندازه ذرات چهار نمونه خاک ۴۳
شکل ۳-۳- رابطه بین D_{M1} و D_Y و D_B محاسبه شده (تعداد نمونه= ۷۵) ۴۵
شکل ۳-۴- رابطه بین D_{M2} و D_Y و D_B محاسبه شده (تعداد نمونه= ۷۵) ۴۶
شکل ۳-۵- ارتباط بین ابعاد فراکتالی محاسبه شده از مدل میلان و همکاران با سه متغیر بافت خاک الف) و ب) بعد فراکتالی D_{M1} در مقابل میزان رس و سیلت به ترتیب و ج) بعد فراکتالی D_{M2} در مقابل میزان شن ۵۰
شکل ۳-۶- ارتباط بین ابعاد فراکتالی محاسبه شده از مدل میلان و همکاران با متغیر میانگین هندسی قطر ذرات خاک الف) و ب) بعد فراکتالی D_{M1} و D_{M2} در مقابل میانگین هندسی قطر ذرات ۵۱
شکل ۳-۷- ارتباط بین بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها و الف) میانگین وزن قطر خاکدانه (MWD)، ب) میزان رس، ج) میزان سیلت ۵۲
شکل ۳-۸- مقادیر D_{M1} ، D_{M2} و D_B اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط PTF رگرسیونی ۵۷
شکل ۳-۹- برازش مقادیر D_{mT} اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط تابع انتقالی رگرسیونی ۵۹
شکل ۳-۱۰- مقادیر k_s اندازه‌گیری شده و تخمینی توسط PTF رگرسیونی: الف) PTF1 ب) PTF2 ۶۱
شکل ۳-۱۱- مدل نیم تغییر نمای مربوط به k_s ۶۳
شکل ۳-۱۲- نقشه توزیع مکانی k_s حاصل از روش کریجینگ ۶۴
شکل ۳-۱۳- مدل نیم‌تغییرنمای متغیرهای بافتی خاک: الف) رس، ب) سیلت، ج) شن و د) میانگین هندسی قطر ۶۵
شکل ۳-۱۴-نقشه توزیع مکانی حاصل از روش کریجینگ الف) رس، ب) سیلت، ج) شن و د) میانگین هندسی قطر ۶۶
شکل ۳-۱۵- مدل‌های نیم‌تغییرنمای مربوط به متغیرهای الف) جرم مخصوص ظاهری، ب) جرم مخصوص حقیقی، ج) کربن آلی و د) MWD ۶۷
شکل ۳-۱۶- مدل‌های نیم‌تغییرنمای مربوط به پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه و خاکدانه: الف) D_{M1}، ب) D_{M2} و ج) D_{mT} ۶۸
شکل ۳-۱۷- نقشه کریجینگ توزیع مکانی: الف) D_{M1}، ب) D_{M2} و ج) D_{mT} ۶۹
شکل ۳-۱۸- نمودار لاگ/ لاگ نیم‌تغییرنمای k_s ۷۱
شکل ۳-۱۹- نمودار لاگ/ لاگ نیم‌تغییرنمای الف) رس، ب) سیلت، ج) شن و د) میانگین هندسی قطر ۷۲
شکل ۳-۲۰- نمودار لاگ/ لاگ نیم‌تغییرنمای الف) جرم مخصوص ظاهری، ب) جرم مخصوص حقیقی، ج) کربن آلی و د) MWD ۷۳
شکل ۳-۲۱- نمودار لاگ/ لاگ نیم‌تغییرنمای ابعاد فراکتالی الف) D_{M1}، ب) D_{M2}و ج) D_{mT} ۷۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱- آمارتوصیفی دو متغیر خروجی ابعاد فراکتالی به کار رفته برای آموزش و ارزیابی توابع ۳۵
جدول ۲-۲- آمار توصیفی دو متغیر خروجی k_s به کار رفته برای آموزش و ارزیابی توابع ۳۵
جدول ۲-۳- دامنه مقادیرD_{var} ۳۸
جدول ۲-۴- محدوده مقادیر H و تفاسیر مربوط به هر دامنه ۳۹
جدول ۳-۱- آماره‌های توصیفی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده ۴۱
جدول ۳-۲- آماره‌های توصیفی پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، محاسبه شده از سه مدل فراکتالی ۴۴
جدول ۳-۳- ماتریس ضرائب همبستگی خطی ساده بین ابعاد فراکتالی PSD، محاسبه شده از سه مدل ۴۵
جدول ۳-۴- آماره‌های توصیفی پارامترهای فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌های خاک ۴۶
جدول ۳-۵- ماتریس ضرائب همبستگی خطی ساده بین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ۴۷
جدول ۳-۶- ماتریس ضرائب همبستگی خطی ساده بین ابعاد فراکتالی محاسبه شده از سه مدل و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۴۹
جدول ۳-۷- ماتریس ضرائب همبستگی خطی ساده بین بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۵۱
جدول ۳-۸- آماره‌های توصیفی شاخص هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از میزان نفوذ نهایی ۵۳
جدول ۳-۹- ضرائب همبستگی خطی ساده بین Lnk_s و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۵۴
جدول ۳-۱۰- ضرائب همبستگی خطی ساده بین Lnk_s و ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و خاکدانه‌ها ۵۵
جدول ۳-۱۱- آماره‌های صحت ارزیابی توابع انتقالی رگرسیونی برای تخمین D_{M1}، D_{M2} و D_B ۵۶
جدول ۳-۱۲- آماره‌های ارزیابی صحت توابع انتقالی رگرسیونی برای تخمین D_{mT} ۵۸
جدول ۳-۱۳- آماره‌های ارزیابی صحت توابع انتقالی رگرسیونی برای تخمین k_s ۶۰
جدول ۳-۱۴- نتایج برازش مدل‌های واریوگرام برای شاخص‌های اندازه‌گیری شده ۶۲
جدول ۳-۱۵- پارامترهای مربوط به اعتبار سنجی مدل‌های درون‌یابی متغیرهای مورد مطالعه ۷۰
جدول ۳-۱۶- مقادیر بعد فراکتالی تغییرپذیری، خطای استاندارد و ضریب تبیین مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۷۰
جدول ۳-۱۷- مقادیر بعد فراکتالی تغییرپذیری، خطای استاندارد و ضریب تبیین مربوط به ابعاد فراکتالی ذرات اولیه و خاکدانه‌های خاک‌های مطالعه شده ۷۴
جدول ۳-۱۸- مقادیر شاخص هورست و نویز صورتی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۷۵

چکیده

بررسی رابطه مقیاسی بین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و برخی از خواص فیزیکی مؤثر بر آن

میثم محمدی

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) یکی از ویژگی‌های حائز اهمیتی است که بر فرآیندهای مهمی نظیر انتقال املاح، انتقال آب در منطقه ریشه و فرآیندهای زیست‌محیطی دیگری از قبیل تبخیر و تعرق، کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی تاثیر می‌گذارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تغییرپذیری مکانی k_s با استفاده از بعد فراکتالی تغییرپذیری و اثرپذیری این متغیر از برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، در اراضی دانشگاه گیلان صورت گرفت. اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک در مزرعه با روش استوانه مضاعف در ۷۵ نقطه یک شبکه نمونه‌برداری منظم انجام گرفت و مقدار سرعت نفوذ پس از رسیدن به حالت تعادل، k_s در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری از عمق cm ۲۵-۰ در محل‌های هر گره صورت گرفت و متغیرهای جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، میزان ماده آلی، میزان سیلت و رس با روش هیدرومتری و توزیع اندازه بخش شن به روش الک تعیین و میانگین هندسی (d_g) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات (σ_g) محاسبه گردید. ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (PSD) با استفاده از سه مدل فراکتالی محاسبه شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) نیز تعیین و بعد فراکتالی آن نیز محاسبه گردید. جهت بررسی رابطه آماری k_s با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه و سایر ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک، توابع رگرسیونی در دو مرحله ایجاد شد و متغیرهای ورودی به مدل با رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام گزینش شدند. صحت و اعتبار مدل با شاخص‌های ME، RMSE و R^2 مورد بررسی قرار گرفت. در بخش زمین‌آمار تغییرپذیری مکانی متغیرهای مورد مطالعه بررسی شد و الگوی نیم‌تغییرنما و نقشه کریجینگ آن ترسیم گردید. بعد فراکتالی تغییرپذیری (خودتشابهی آمار مکانی) (D_{var}) متغیرها با استفاده از لگاریتم‌گیری از مدل نیم‌تغییرنما محاسبه شد و به دنبال آن ثبات مقیاسی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که k_s در تابع انتقالی تشکیل شده با ابعاد فراکتالی توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (PTF1)، با پارامتر D_{M1} (بعد فراکتالی حوزه مقیاسی اول) و در تابع انتقالی تشکیل شده با سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (PTF2)، با MWD همبستگی معنی‌داری داشت. با توجه به شاخص‌های R^2 و RMSE در داده‌های سری آموزش، PTF1 نسبت به PTF2 از صحت کمتری برخوردار بود. نتایج زمین-آمار نشان داد که ساختار تغییرپذیری k_s دارای یک الگوی تناوبی می‌باشد. علی‌رغم عدم وجود همبستگی آماری بین k_s و میزان شن، این دو همبستگی مکانی معنی‌داری با یکدیگر از خود نشان دادند. نتایج آنالیز فراکتالی تغییرپذیری نشان داد که خودتشابهی آمار مکانی k_s تابعی از درجه خودتشابهی بعد فراکتالی خاکدانه‌ها (D_{mT}) بود. نتایج نشان داد که توزیع و تغییرات k_s با توجه به تاثیرپذیری آن از D_{mT} و MWD و بافت، توسط عوامل بافت وساختمانی خاک کنترل می‌شود. بعد فراکتالی تغییرپذیری مکانی تمامی متغیرها بیش‌تر از ۱/۵ بود که نشان‌دهنده همبستگی منفی توالی‌ها در راستای سری نمونه‌ها با یکدیگر بود. نتایج بررسی ثبات مقیاسی نشان داد که متغیرهای تحت مطالعه فاقد ثبات مقیاسی می‌باشند و نوسانات کوتاه دامنه بر آن‌ها تفوق دارد که این عامل را می‌توان به چیرگی عوامل اکتسابی (عوامل مدیریتی) در زمین مورد مطالعه نسبت داد.

کلید واژه‌ها: تغییرپذیری مکانی، مقیاس مشاهده‌ای، خودتشابهی، هندسه فراکتالی، ثبات مقیاسی

Abstract

Study of scale-based relationship between soil saturated hydraulic conductivity and some physical properties affecting on it

Meysam Mohammadi

Soil saturated hydraulic conductivity (k_s) is one of the important properties affectting on important processes such as solute transport, water transport through root zone and other environmental processes like evapotranspiration and quality and quantity of the ground water. This study was conducted with the porpuse of studing the analysis of variability of k_s using variability fractal dimension and its being influenced by some physical properties in a part of University of Guilan lands. Water infiltration was measured in the field using double ring method in a regular sampling grid in 75 point and the infiltration velocity was taken into account as k_s after reaching balance state. Sampling was done at depth of 0-25 cm at each node of the grid followed by measuring soil bulk density, soil particle density, organic matter, clay and silt content using hydrometery method and sand size distribution using sieve method. Geometric mean (d_g) and geometric standard deviation (σ_g) of the soil particle diameter were calculated. Fractal dimension of primary particles were estimated using three fractal models. Mean weight diameter (MWD) of aggregates was also calculated. Fractal dimension of soil aggregates was estimated using one fractal model. Pedo-transfer functions (PTFs) were developed at two steps in order to consider the statistical relationship between k_s and fractal dimensions of soil particle size distribution (PTF1) and other soil physical and chemical properties (PTF2) and independant variables were reduced using stepwise multivariate linear regression. The validation and accuracy of the PTFs were considerd using ME, RMSE and R^2 statistics. Spatial variability of studied variables was described using geostatistical method and semivariograms were calculated and then maped using ordinary kriging. Variability fractal dimension of studied variables was calculated using double logarithmic plot of semivariograms.followed by determining Scale dependency of studied variables. Results showed that k_s had a significant correlation with fractal dimension of soil particle size distribution (D_{M1}) and a significant correlation with MWD in PTF1 and PTF2 respectively. According to R^2 and RMSE values, PTF1 had less accuracy than PTF2 did. Results in geostatistics showed that semivariogram of k_s had a ciclyc pattern. K_s had a significant spatial correlation with sand in spite of poor statistical correlation between them. The results in fractal analysis of variability showed that statistical self-similarity of k_s followed that of soil aggregates fractal dimension (D_{mT}). Results showed that k_s variability and distribution is under control of soil structural and textural factors according to its being influenced by D_{mT}, MWD and texture. Variability fractal dimension of all studied variables was more than 1.5 indicating negative correlated increments across sample series. The results of R/S analysis showed that there was no scale-invariance in variables indicating presence of short range fluctuations dominating on the trend of the variables variability and it could be attributed to acquired factors (management practices).

Keywords: Spatial variability, Observation scale, Self-similarity, Fractal geometry, Scale-invariance

مقدمه

مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است که بر نفوذ آب به خاک، رواناب سطحی، آبشویی آفت‌کش‌ها از اراضی زراعی، انتقال املاح و آلاینده‌ها از مناطق آلوده به آب‌های زیرزمینی، انتقال آب در منطقه ریشه و فرآیندهای دیگر زراعی و زیست‌محیطی مانند تبخیر و تعرق، کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی تاثیر می‌گذارد. این ویژگی از اهمیت زیادی در خصوص تولیدات زراعی و مسائل حفاظتی محیط زیست برخوردار می‌باشد. مقادیر اندک k_s خاک موجب غرقابی شدن سطح اراضی، ایجاد شرایط احیایی در خاک، ایجاد رواناب، فرسایش و به دنبال آن وارد آمدن خسارت زیادی می‌شود [Dexter et al., 2004].

این ویژگی از اهمیت بسیار زیادی در طراحی زهکش‌ها برخوردار می‌باشد و بر جنبه‌های احتمالی اقتصادی و فنی پروژه‌های مربوط به زهکش‌های زیر سطحی بزرگ‌مقیاس تاثیر می‌گذارد. به هرحال اندازه‌گیری این پارامتر یکی از مشکل-ترین مراحلی است که باید برای حل معادله مربوط به فاصله بین زهکش‌ها صورت گیرد [Schwab et al., 1996]. تغییرپذیری این پارامتر به قدری زیاد است که در یافتن مقادیر معرف در محاسبه فاصله بین زهکش‌ها و یا مدیریت خاک مشکل ایجاد می‌کند [Dorsey et al., 1990; Gupta et al., 1993; Mohanty et al., 1994]. اطلاع از حداکثر ظرفیت آبی خاک‌ها در درک و مدل‌سازی فرآیندهای سطحی و زیرسطحی لازم و ضروری می‌باشد. همچنین آگاهی از وضعیت k_s در منطقه غیر اشباع، در تعیین وضعیت فرآیندهای حاکم در این منطقه و برآورد تغذیه آب‌های زیرزمینی ضروری می‌باشد [Keese et al., 2005; Small, 2005]. آگاهی از ناهمگنی[1] مکانی k_s ممکن است باعث بهبودی برآوردهای صورت گرفته در مورد توزیع مکانی تغذیه آب‌های زیرزمینی در مطالعات بزرگ‌مقیاس شود [Faust et al., 2006]. در مطالعات صورت گرفته [Canqui et al., 2002; Olyphant, 2003; Young et al., 2004] تلاش بر این بوده که روندهای کلی مفروض در تغییرات k_s با عمق در مدل‌های هیدرولوژیکی موثر، تعیین شوند، اما هیچ قائده کلی در مورد روندهای مکانی k_s در منطقه غیراشباع مشاهده نشده است [Beven and Kirkby, 1979]. شاید چنین انتظاراتی می‌باید مطابق با فرآیندهای زمین‌شناسی و خاک‌شناسی در هر منطقه باشد. بنابراین تلاش جهت درک هرچه بهتر سرشت تغییرپذیری و ویژگی مقیاسی k_s و برقراری یک رابطه قوی با ویژگی‌های خاک امری ضروری محسوب می‌شود. به علت تغییرات شدید این متغیر نمی‌توان یک همبستگی مکانی خوب برای آن پیدا کرد. به عبارتی نمی‌توان بیان کرد که تا چه بعدی از مکان شباهت رفتاری برای این متغیر وجود دارد. استفاده از زمین آمار در برآورد تغییرپذیری مکانی k_s با مشکلاتی روبرو می‌باشد. زیرا اساس این تکنیک فیزیکی نبوده و تنها قادر به تشریح الگوی مکانی و بیان وجود شباهت رفتاری متغیرهای مورد مطالعه

[1] Heterogeneity

بوده و فاقد قابلیت کمی کردن تغییرپذیری می‌باشد [Goovaerts, 1997]. برای پی بردن به میزان خودتشابهی مکانی و بیان همبستگی مکانی این متغیر با سایر ویژگی‌های خاک لازم است از آنالیز فراکتالی استفاده کرد که در آن بعد فراکتالی شاخصی از درجه خودتشابهی محسوب می‌شود که از این بعد، جهت تبیین رفتار سری داده‌های مکانی استفاده می‌شود.

هدف از اجرای پژوهش حاضر، تحلیل فراکتالی تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. به بیان دیگر هدف پیدا کردن بعد فراکتالی تغییرپذیری مکانی یعنی شباهت رفتاری k_s در مزرعه و همچنین تعیین همبستگی مکانی با خواص پایه خاک و بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها (تعیین اثرپذیری از بعد فراکتالی توزیع اندازه خاکدانه‌ها) می‌باشد.

فصل اول

کلیات و مرور منابع

۱-۱- تغییرپذیری در خاک

خاک تابعی از تعداد بسیار زیادی از فاکتورها، شرایط و فرآیندهای در گذار است. خاک تابعی از عوامل اصلی مانند مواد مادری، اقلیم، موجودات زنده، پستی و بلندی و زمان می‌باشد که شکل دهنده خاک به صورت مستقیم، وابسته و یا تعاملی با یکدیگر هستند. فاکتورهای تشکیل‌دهنده خاک می‌توانند در دامنه‌ای از مقیاس‌های زمانی عمل نمایند و در درون هر فاکتور، مجموعه‌ای از مقیاس‌های مکانی وجود داشته باشد که در تعامل و کنش و بر هم کنش با یکدیگر می‌باشند [محمدی، ۱۳۸۹]. تغییرپذیری یکی از ویژگی‌های اساسی بوده و تاثیر مهمی بر فرآیندهای حاکم در خاک می‌گذارد. ویژگی‌های خاک از یک نقطه به نقطه دیگر متغیر می‌باشند بنابراین درک تغییرپذیری مکانی، کاربرد مهمی در زمینه کشاورزی، علوم زیست‌محیطی، هیدرولوژی و علوم زمین دارد. مطالعات صورت گرفته در خصوص تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک در اکثر موارد، نشان داده است که تغییرات قابل توجهی در خصوص ویژگی‌های هیدرولیکی خاک وجود دارد [Nielsen et al., 1973; Russo and Bouton, 1992]. به‌طور کلی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک نشان دهنده تعاملات موجود مابین فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بوده که در دامنه گسترده‌ای از مقیاس‌های مکانی و زمانی حاکم می‌باشند. پاره‌ای از این فرآیندها به طور گسترده به لحاظ مکانی متغیر می‌باشند و از آن‌ها به عنوان فرآیند-های بلنددامنه[1] (کوچک مقیاس) یاد می‌شود در حالی که فرآیندهای دیگر دارای تغییرات اندکی می‌باشند که از این‌رو به آن‌ها فرآیندهای کوتاه‌دامنه[2] (بزرگ‌مقیاس) می‌گویند [Si, 2003]. مقیاس‌های این فرآیندها از مقیاس‌های مکانی حدود چند سانتی‌متر تا ده‌ها کیلومتر و مقیاس‌های زمانی آن‌ها ازچند ثانیه تا چندین دهه وسعت دارد.

۱-۱-۱- انواع تغییرپذیری مکانی

تغییرپذیری مکانی همراه با مقیاس مکانی حاکم در طول پاره‌ای از دامنه‌های تغییرپذیری خاک را می‌توان متشکل از دو نوع تغییرپذیری شامل تغییرات ساختاری[3] و تصادفی دانست. تغییرات ساختاری آن دسته از تغییراتی قلمداد می‌شوند که قابل تبیین بوده و الگوی آن‌ها دارای نظم خاصی می‌باشد. در حالی که تغییرات تصادفی غیرقابل حل قلمداد می‌شوند و به‌طور جزئی نیز قابل پیش‌بینی نمی‌باشند ولی دارای ویژگی‌های آماری قابل پیش‌بینی می‌باشند. با این حال، تغییراتی که در قدرت‌های تفکیک پایین به‌صورت تصادفی مشاهده می‌شوند، با ارتقا مقیاس مشاهده‌ای می‌توانند از خود ساختار، سازمان و الگو بروز نمایند [محمدی، ۱۳۸۹].

[1] High-frequency
[2] Low-frequency
[3] Functional variations

کاربرد مستقیم تئوری فیزیک خاک در پیش‌بینی جریان آب و انتقال املاح در مقیاس مزرعه‌ای، به‌دلیل وجود تغییر-پذیری مکانی زیاد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با مشکل روبرو شده است[Warrick and Nielsen, 1980; Jury et al., 1991]. هدایت هیدرولیکی اشباع یک پارامتر مکانی در نظر گرفته می‌شود که دارای مقادیر تصادفی می‌باشد در حالی که پارامترهای دیگر خاک از قبیل میزان رطوبت باقی مانده θ_r، میزان رطوبت اشباع θ_s و پتانسیل آب خاک ψ ، ثابت درنظر گرفته می‌شوند [Bresler and Dagan, 1983].

ناهمگنی ذاتی خاک (مانند عوامل تشکیل دهنده خاک) و نیز عوامل غیرذاتی (مانند مدیریت خاک) باعث تغییرات مکانی k_s می‌گردد، لذا ممکن است این ویژگی هیدرولیکی خاک در فواصل مکانی اندک، بسیار متغیر باشد [Sobieraj et al., 2004]. تغییرپذیری k_s خاک‌ها به عنوان تابعی از فرآیندهای مستقل که در مقیاس‌های زمانی و مکانی، متفاوت عمل می‌نمایند، مورد توجه قرار گرفته است [McBratney, 1998]. تغییرپذیری زیاد با مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ [Davis et al., 1999] و تغییرپذیری اندک با مقیاس‌های کوچک مشخص می‌شود [Eldridge et al., 1994]. مقادیر زیاد تا متوسط تغییرپذیری شامل فرآیندهایی است که در مقیاس توپوگرافی و واحدهای نقشه‌برداری خاک رخ می‌دهد که در این مقیاس به k_s خاک در هر واحد یک مقدار ثابت نسبت داده می‌شود، در حالی که فرآیندهای بیولوژیکی که تاثیر قابل توجهی بر چگونگی حرکت آب دارند دارای تغییرپذیری اندک در مقیاس‌های کوچک می‌باشند. فرآیندهایی که در یک مقیاس غالب هستند ممکن است در مقیاس‌های دیگر اثر معنی‌داری نداشته باشند. به این مفهوم که اهمیت فرآیندهای کوچک مقیاس (مانند فرآیندهای بیولوژیکی) تحت‌الشعاع فرآیندهایی که در مقیاس‌های بزرگ مثل توپوگرافی رخ می‌دهند قرار می‌گیرند و بالعکس تغییرات k_s در مقیاس بزرگ، این تغییرات را در مقیاس‌های کوچک پنهان می‌کند. تلفیق فرآیند-های با مقیاس متفاوت که به طور همزمان رخ می‌دهند اغلب منجر به تغییرات نامنظم و غیرخطی k_s می‌شود [Burrough., 1983a; Burrough., 1983b; Phillips., 1993]. مک‌برتنی [McBratney, 1998] این تلفیق را در قالب نظریه سلسله مراتب آشیانه‌ای[1] مورد بررسی و تشریح قرار داده است. بوروف [Burrough, 1983] وابستگی مقیاسی[2] در تغییرپذیری تعداد زیادی از ویژگی‌های خاک را ارزیابی و بیان کرد مقیاس مشاهده‌ای عبارت است از مقیاسی که درآن تغییرات مکانی به‌صورت تصادفی (بدون تبعیت از الگو یا نظم خاصی) در می‌آیند.

اسمیت و دیکراژر [Smith and Diekkruger, 1996] جریان عمودی تک‌بعدی به منطقه غیریکنواخت را مورد مطالعه قرار دادند و ناهمگنی خاک را با استفاده از توزیع پارامترهایی که روابط مربوط به ویژگی‌های خاک را تشریح می‌کنند درنظر گرفتند. گووینداراژ و همکاران [Govindaraju et al., 2001] نفوذپذیری را در مقیاس مزرعه‌ای در خاک‌های

[1] Nested hierarchy
[2] Scale-dependency

ناهمگن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تغییرپذیری مکانی k_s را که توسط یک پارامتر تصادفی لوگ نرمال همبسته همگن نشان داده می‌شود، مورد بررسی قرار دادند. کیم و همکاران [Kim et al., 1997] اهمیت ناهمگنی هیدرولیکی خاک بر ذخیره آب منطقه غیراشباع را بااستفاده از مدل بروکس و کوری و بر اساس چهارچوب راه حل‌های تحلیلی تقریبی مورد بررسی قرار دادند. چن و همکاران [Chen et al., 1994] معادله ریچاردز در حالت افقی را برای میانگین اشباع آب و کراس‌کواریانس k_s و حالت اشباع را در هر لایه افقی خاک در یک مزرعه ناهمگن بسط دادند. روش مورد استفاده محدود به عدم قطعیت حاصل از تغییرپذیری مکانی k_s می‌باشد.

یکی از مشکلات اساسی موجود، آگاهی از نحوه تغییرپذیری مکانی خاک‌ها و عوامل موثر بر آن می‌باشد. تغییرپذیری توابع هیدرولیکی خاک‌ها، تحلیل روابط آب و خاک را در خاک‌های ناهمگن[1] و ناهمروند[2] با مشکل مواجه می‌کند [Warrick et al., 1977]. در تعریف و تعیین و کمی‌سازی این تغییرپذیری، روش‌هایی وجود دارد که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲- مقیاس‌بندی

میلر و میلر [Miller and Miller, 1956] برای تخمین تغییرپذیری خاک‌ها، نظریه‌ای را که بر اساس قوانین جریان ویسکوز در محیط‌های متخلخل پایه‌گذاری شده بود ارائه دادند. در این نظریه فرض بر این بود که اگر ساختار میکروسکوپی دو خاک از نظر هندسی متشابه باشند، تفاوت نسبی آن‌ها را می‌توان با استفاده از نسبت‌هایی از یک طول مشخصه فیزیکی بیان نمود. بعدها دانشمندان بر پایه این نظریه روش‌های مقیاس‌بندی[3] را توسعه دادند.

مقیاس‌بندی ابزاری را جهت ارتباط دادن ویژگی‌های مربوط به انواع متفاوتی از خاک‌ها یا نقاط مختلف با استفاده از فاکتورهای تبدیل ساده که فاکتور مقیاسی[4] نامیده می‌شوند، فراهم می‌آورد. این ابزار تکنیکی سودمند در تشریح تقریبی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از جمله پتانسیل ماتریک ψ_m ، هدایت هیدرولیکی غیراشباع $k(\theta)$ و نیز ویژگی‌های اشتقاق یافته از این پارامترها از قبیل نفوذ و زهکشی به حساب می‌آیند [Simmonson et al., 1979: Sharma et al., 1980]. توزیع فراوانی و ساختار مکانی همبسته فاکتورهای مقیاسی، تغییرپذیری را در صحرا، تشریح کرده و در نتیجه منجر به سادگی قابل توجه و درک سریع و نیز تسهیل مدل‌سازی یک حوزه ناهمگن در خصوص واکنش-های هیدرولوژیکی آن می‌شود [Pachepsky et al., 2003; Nielsen et al., 1998; Peck et al., 1977; Sharma

[1] Heterogeneous
[2] Anisotropic
[3] Scaling
[4] Scaling factor

and Luxmoore, 1979; Warrick and Amoozegar-Fard, 1979; Ahuja et al., 1984]. از مقیاس‌بندی همچنین می‌توان به طور معکوس جهت برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از اندازه‌گیری این ویژگی‌ها در یک نقطه مشخص و داده‌های محدود در نقاط دیگر استفاده کرد [Ahuja et al., 1985; Williams and Ahuja, 1991]. اساسا دو روش در اشتقاق فاکتورهای مقیاسی وجود دارند که عبارت از (۱) تکنیک تحلیل ابعادی (۲) روش تجربی می‌باشند [Tillotson and Nielsen, 1984].

اساس روش تحلیل ابعادی، وجود شباهت فیزیکی در سیستم می‌باشد، در حالی که روش تجربی، که نرمال کردن تابعی نیز نامیده می‌شود، بر اساس تحلیل رگرسیونی شکل گرفته است [Pachepsky et al., 2003]. برای تبیین کمی تغییر-پذیری مکانی روش‌هایی ازقبیل زمین‌آمار، آنالیز طیفی[۱]، آنالیز موجی[۲]، آنالیز چندفراکتالی[۳]، سری زمانی[۴] و آنالیز مجموعه-های فازی[۵] وجود دارد. نظریه محیط‌های متشابه[۶] میلر و میلر [Miller and Miller, 1956] و روش‌های فراکتالی تیلر و ویتکرافت [Tyler and Weatcraft, 1990]، ریو و اسپوزیتو [Rieu and Sposito, 1991] و هانت و ژی [Hunt and Gee, 2002a,b]، نمونه‌هایی از روش اول می‌باشند. اکثر کارهای مقیاس‌بندی شده که در بالا ذکر شده، موجب بسط مفهوم مقیاس‌بندی محیط‌های متشابه برای خاک‌های زراعی شده‌اند که عموما با به کارگیری فرضیات تجربی و بااستفاده از روش رگرسیونی، نامتشابه می‌باشند.

در مقابل نظریه میلر و میلر، روش‌های زمین‌آماری از قبیل آنالیز واریوگرام و کریجینگ قرار داشته که بر مبنای هیچ نظریه فیزیکی پایه‌گذاری نشده‌اند و بنابراین هیچ توضیح و تبیینی از پدیده‌های مشاهده شده فرآهم نمی‌آورند، اما به سادگی الگوی مکانی یک متغیر را در حداکثر فاصله‌ای که با آن متغیر خودهمبسته[۷] می‌باشد توصیف می‌کند. زمین‌آمار شباهت مکانی را بررسی کرده و ابزاری را در تشریح این شباهت مکانی و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در مکان‌هایی که اندازه‌گیری در آن‌ها صورت نگرفته فرآهم می‌آورد [Isaaks and Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997].

تغییرپذیری مکانی و مقیاس‌بندی k_s با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آماری [Bosch and west, 1998; Wilson et al., 1989] و نظریه محیط‌های متشابه مورد مطالعه قرار گرفته است [Zavattaro et al., 1999]. روش‌های زمین‌آماری در توصیف وابستگی مکانی k_s و تعیین میزان همبستگی آن با سایر ویژگی‌های خاک، کارآیی لازم را دارد [Kravchenko

[1] Spectral analysis
[2] Wavelet analysis
[3] Multifractal analysis
[4] Time series
[5] Fuzzy-sets analysis
[6] Similar media theory
[7] Autocorrelated variable

[Sobieraj and Elsenbeer, 2002] سوبیراژ و السنبیر et al., 1999. در مطالعه تغییرپذیری مکانی k_s با روش‌های زمین‌آماری در یک کاتنا دریافتند که وابستگی شدید انواع خاک در طول این کاتنا به توپوگرافی و به دنبال آن ویژگی‌های اولیه خاک، در وابستگی k_s به توپوگرافی نمود پیدا نمی‌کند و در نتیجه این فقدان وابستگی را به اثر مهم تخلخل درشت حاصل از بیوتوربیشن نسبت دادند.

۱-۲-۱- آنالیز طیفی

تغییرپذیری مکانی خاک دارای الگوهایی است که بسیاری از این الگوهای مکانی، ترکیبی از تغییرات در مقیاس‌های مختلف می‌باشند. تقسیم‌بندی تغییرپذیری مکانی به مقیاس‌های مختلف، به مشخصه‌سازی مقیاس‌های غالب مکانی کمک می‌کند. آنالیز طیفی یکی از ابزارهایی است که بر اساس فراوانی، واریانس مکانی را به مقیاس‌های مکانی تقسیم‌بندی می‌کند. از آنالیز طیفی می‌توان در تعیین میزان تغییرپذیری در یک فراوانی ویژه و همچنین در مشخص کردن الگوهای تناوبی عمده بهره جست. در آنالیز طیفی مقادیر حوزه مکانی به مقادیر حوزه فراوانی تبدیل می‌شوند. الگوهای چرخه‌ای مکانی و تغییرپذیری تناوبی به صورت خوشه بروز پیدا می‌کنند و در حوزه فراوانی به اوج می‌رسند. شکل کلی واریانس در برابر فراوانی برای الگوهای مکانی فاقد تغییرپذیری چرخه‌ای[1] و تناوبی، مشخص کننده ساختار مکانی می‌باشد. متغیرهایی که دارای توزیع تصادفی هستند در طول تمام فراوانی و مقیاس‌ها دارای واریانس برابر خواهند بود [Brillinger, 2001; Javis and Mitra, 2001; Kachanoski et al., 1985; Koopmans, 1974; Webster, 1977]. در آنالیز طیفی از نویزها یا نوفه‌ها استفاده می‌گردد. این نویزها توسط توان طیفی آن‌ها تبیین می‌شوند که از قواعد توانی معکوس ساده تبعیت می‌کنند. نویزها می‌توانند فراکتالی باشند که در حضور این نویزها، طیف‌های توان فاقد مشخصه بوده و با قاعده توانی معکوس مقیاس‌بندی می‌شوند. تبعیت این طیف‌های توانی از قانون توانی معکوس، ناشی از ذات خودمتشابه سیستم مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین فرکانس‌ها همانند فراکتال‌ها، مطابق با قواعد توانی مقیاس‌بندی می‌شوند. طیف توان نویز سفید[2] با فراوانی (فرکانس) ارتباطی ندارد و در تمامی فراوانی‌ها یکسان باقی می‌ماند. محاسبه بعد فراکتالی این نویز در فضای فاز یکسان است. تابع انتگرالی نویز سفید را نویز قهوه‌ای[3] می‌گویند. مقادیر دیگری از نویز موسوم به نویز صورتی[4] وجود دارد که دارای گستره زیادی در فرآیندهای طبیعی بوده و اهمیت زیادی در مدل‌سازی شرایط نوسانی و اغتشاش دارد [Mandelbrot, 1967; Shlesinger, 1987; Petropulu et al., 2000].

[1] Cyclic variability
[2] White noise
[3] Brown noise
[4] Pink noise