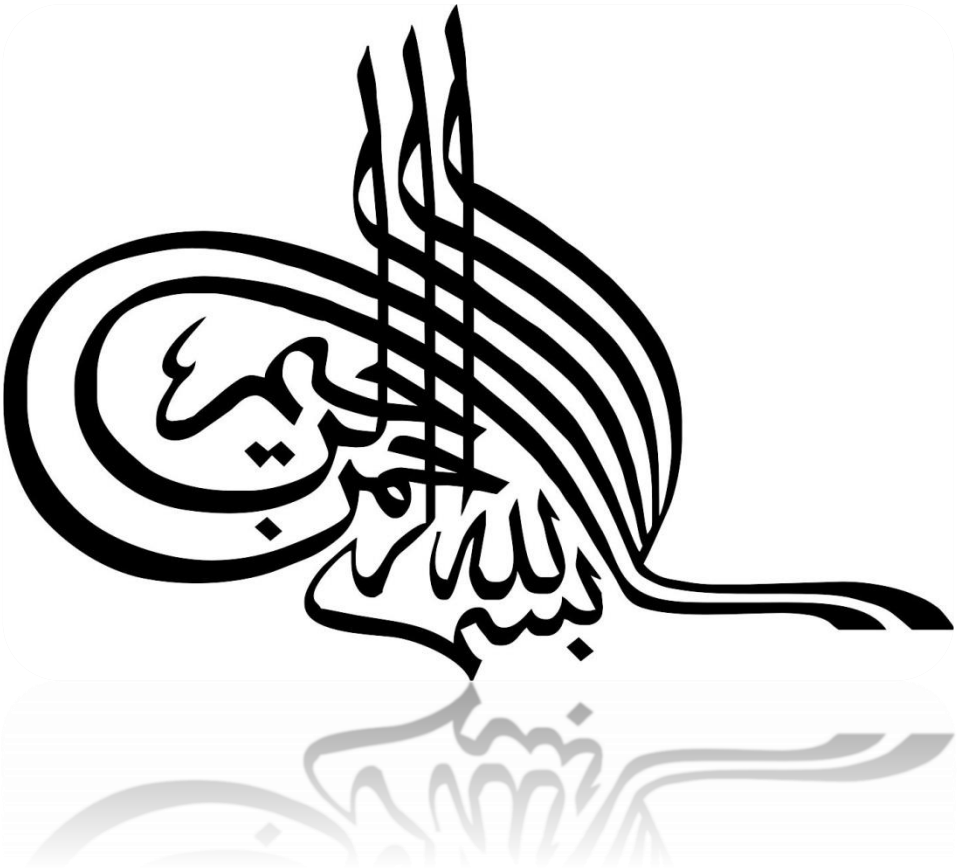

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم کشاورزی

گروه مهندسی آب

(آبیاری و زهکشی)

عنوان

شبیه‌سازی هدایت آبی اشباع با استفاده از الگوریتم GMDH

از:

صدیقه منفرد شاخالی

استاد راهنما:

دکتر مریم نوابیان

استادان مشاور:

دکتر مهدی اسمعیلی ورکی

دکتر علی جمالی

اسفند ۱۳۹۲

سپاس خدای را پرودگارم که مخلوقاتش را به قدرت خویش ابداع کرد و به اقتضای مشیت خویش جامه‌ی هستی پوشاند و هم او که یاری‌اش مرا درسختی‌ها امیدبخش و روح‌افزاست...

سپاس پدر و مادرم را دو هدیه گرانقدر پروردگار که همواره برایم بهترین همراهانند...

سپاس از حمایت‌های بی‌دریغ استادم خانم دکتر نوابیان و استادان مشاور محترم آقایان دکتر اسمعیلی و دکتر جمالی که بهبود پژوهشم را مسبب گردیدند...

سپاس فراوان از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های دلسوزانه رئیس موسسه تحقیقات برنج، آقای دکتر دواتگر وکارشناسان پرتلاش بخش خاک و آب مؤسسه تحقیقات برنج به‌ویژه آقای مهندس احمدزاده و خانم‌ها مهندس رضایی، مهندس شکوری و مهندس بصیری...

سپاس فراوان از اساتید محترم دکتر پیرمرادیان و دکتر اشرف‌زاده که مرا از نظرات ارزشمندشان بهره‌مند گردانیدند...

سپاس فراوان از مساعدت‌های کارشناس گرامی آزمایشگاه آبیاری خانم مهندس پورصفری یکرنگ و کارشناسان محترم گروه خاکشناسی...

سپاس فروان از همه اساتید و مربیان که در طول سال‌های تحصیلم، مسئولیت تعلیم مرا عهده‌دار گردیدند...

در پایان از دوستانم و همه کسانی که مرا در تحقق این پژوهش یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

عنوان **صفحه**

مقدمه ۲
۱-کلیات و بررسی منابع ۵
۱-۱- تعریف هدایت هیدرولیکی ۵
۱-۲- عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع ۶
۱-۳- روش‌های اندازه گیری هدایت هیدرولیکی ۸
۱-۳-۱- روش‌های مستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی ۹
۱-۳-۲- روش‌های غیر مستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی ۱۱
۱-۴- توابع انتقالی تعیین خصوصیات خاک ۱۲
۱-۴- ۱- استخراج توابع انتقالی به روش رگرسیون چندگانه ۱۳
۱-۴- ۱-۱- تعیین وجود هم راستایی چندگانه ۱۵
۱-۴-۲- استخراج رگرسیون و گزینش متغیر مستقل ۱۵
۱-۴-۲-۱- گزینش پیش رونده ۱۵
۱-۴-۲-۲- حذف پس رونده ۱۶
۱-۴-۲-۳- رگرسیون گام به گام ۱۶
۱-۴-۳- شبکه عصبی مصنوعی ۱۷
۱-۴-۳-۱- انواع روش‌های آموزشی شبکه‌های عصبی مصنوعی ۲۰
۱-۴-۳-۲- شبکه پرسپترون چند لایه ۲۲
۱-۴-۴- معرفی الگوریتم شبکه عصبی از نوع GMDH ۲۴
۱-۴-۴-۱- تشریح ماهیت شبکه عصبی از نوع GMDH ۲۵
۱-۴-۴-۲- مبنای ریاضی الگوریتم GMDH ۲۵
۱-۴-۵- کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه‌های عصبی ۲۹
۱-۶- مطالعات صورت گرفته پیرامون روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع و عوامل موثر بر آن ۳۰
۱-۶-۱- مطالعات صورت گرفته در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به وسیله مدل‌های رگرسیونی ۳۲
۱-۶-۲- مطالعات صورت گرفته در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به وسیله شبکه‌های عصبی ۳۴
۱-۶-۳- مطالعات صورت گرفته در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به وسیله شبکه‌های عصبی GMDH ۳۸
۲- مواد و روش ها ۴۱
۲-۱- منطقه نمونه‌برداری ۴۱
۲-۲- روش نمونه‌برداری از خاک ۴۲
۲-۳- روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع ۴۵
۲-۴- تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه خاک ۴۶
۲-۴-۱- پراکنده نمودن و پیش تیمارها ۴۶
۲-۴-۲- واسنجی هیدرومتر (نمونه شاهد) ۴۶
۲-۴-۳- پراکنش خاک و اندازه‌گیری‌ها ۴۶
۲-۴-۴- جداسازی بخش شن ۴۷
۲-۴-۵- محاسبات مربوط به تعیین توزیع اندازه ذرات خاک ۴۸
۲-۴-۶- تعیین مقدار رس ۴۹

۲-۴-۷- تعیین مقدار شن ۴۹
۲-۴-۸- تعیین مقدار سیلت ۵۰
۲-۴-۹- تعیین بافت خاک ۵۰
۲-۵- اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک ۵۱
۲-۶- تهیه منحنی رطوبتی ۵۱
۲-۷- اندازه‌گیری کربن آلی ۵۲
۲-۸- تعیین درصد رطوبت اشباع خاک ۵۳
۲-۹- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (EC) ۵۴
۲-۱۰- اندازه‌گیری سدیم ۵۵
۲-۱۱- اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم ۵۶
۲-۱۲- استخراج توابع انتقالی به روش رگرسیون ۵۷
۲-۱۳- استخراج توابع انتقالی به روش شبکه عصبی MLP ۵۷
۲-۱۴- روش استخراج شبکه عصبی مصنوعی GMDH ۵۸
۲- ۱۵- حساسیت سنجی متغیرهای ورودی به شبکه عصبی مصنوعی ۵۸
۲-۱۶- ارزیابی توابع انتقالی ۵۸
۳- نتایج و بحث ۶۱
۳-۱- نحوه مقایسه سه روش استخراج توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع ۶۱
۳-۱-۱- نتایج استخراج توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع طبق الگوی اول ۶۱
۳-۱-۱-۱- رگرسیون خطی چندگانه ۶۱
۳-۱-۱-۲- شبکه عصبی مصنوعی MLP ۷۳
۳-۱-۱-۳- شبکه عصبی مصنوعی از نوع GMDH ۷۵
۳-۱-۲- نتایج استخراج توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع طبق الگوی دوم ۷۷
۳-۱-۲-۱- ارزیابی سه روش استخراج توابع انتقالی در الگوی دوم ۷۸
۳-۲- حساسیت سنجی شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP و GMDH ۸۰
۳-۲-۱- حساسیت سنجی شبکه عصبی مصنوعی MLP ۸۰
۳-۲-۲- حساسیت سنجی شبکه عصبی مصنوعی GMDH ۸۰
۳-۳- نتیجه‌گیری ۸۲
۳-۴- پیشنهادها ۸۳
منابع ۸۷

فهرست جداول

جدول۱-۱- توابع انتقالی کلاسی ارائه شده توسط وستن و همکاران ۱۴
جدول ۱-۲- جدول درستی XOR ۲۲
جدول ۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی اندازه‌گیری و محاسبه شده در این پژوهش..... ۶۳
جدول ۳-۲- نتایج هم‌راستایی پارامترهای مورد استفاده در استخراج توابع انتقالی..... ۷۱
جدول ۳-۳- نتایج ارزیابی معادله رگرسیونی ۷۱
جدول ۳-۴- اطلاعات مربوط به ساختار بهینه در شبکه عصبی پرسپترون ۷۴
جدول ۳-۵- نتایج ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی MLP ۷۴
جدول ۳-۶- اطلاعات ورودی مناسب شبکه عصی از نوع GMDH..... ۷۶
جدول ۳-۷- نتایج ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی از نوع GMDH ۷۶
جدول ۳-۸- مقایسه نتایج ارزیابی دو نوع شبکه عصبی MLP و GMDH در الگوی دوم..... ۷۸
جدول ۳-۹- معادله چندجمله‌ای حاصل از GMDH در الگوی دوم..... ۷۹
جدول ۳-۱۰- خروجی برنامه شبکه عصبی از نوع GA-GMDH ۸۰
جدول ۳-۱۱- ضرایب حساسیت دو نوع شبکه عصبی مصنوعی MLP و GMDH ۸۱

فهرست اشکال

شکل۱-۱- شمایی از آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع به‌روش بار ثابت ۱۰
شکل ۱-۲- شماتیک آزمایش بار افتان ۱۰
شکل ۱-۳- شمایی از لایه‌ها و ورودی‌های یک شبکه عصبی پرسپترون سه لایه ۲۱
شکل ۱-۴- نمایی از محاسبه خروجی در نرون لایه‌ها در شبکه عصبی با ساختار پرسپترون چند لایه..... ۲۳
شکل ۱-۵- نمایی از توابع جزئی لایه‌ی اول ۲۷
شکل ۱-۶- راهبرد اساسی آموزش در الگوریتم GMDH ۲۸
شکل ۲-۱- تصویری از منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری ۴۱
شکل ۲-۲- نحوه برداشت و آماده‌سازی نمونه خاک‌های مورد مطالعه ۴۴
شکل ۲-۳- اجزای دستگاه بار افتان مورد استفاده در پژوهش ۴۵
شکل ۲-۴- مراحل انجام آزمایش تعیین توزیع اندازه ذرات ۴۸
شکل ۲-۵- پراکنش بافتی نقاط نمونه‌برداری شده در این پژوهش ۵۰
شکل ۲-۶- مراحل آزمایش تعیین نقاط رطوبتی نمونه‌های مورد مطالعه ۵۲
شکل ۲-۷- چگونگی تغییر رنگ در هر مرحله آزمایش تعیین کربن آلی ۵۳
شکل ۲-۸- تعیین هدایت الکتریکی عصاره اشباع ۵۴
شکل ۲-۹- منحنی واسنجی فلیم فتومتر در قرائت سدیم ۵۵
شکل ۲-۱۰- نحوه تغییر رنگ در آزمایش تعیین کلسیم به روش تیتراسیون ۵۷
شکل ۳-۱- نمایش نرمال بودن پارامترهای مورد استفاده در استخراج معادله‌های رگرسیون ۶۴
شکل ۳-۲- مقایسه هدایت هیدرولیکی اشباع مشاهده‌ای و تخمینی بر پایه معادله ۳-۹..... ۷۲
شکل ۳-۳- مقایسه هدایت هیدرولیکی اشباع مشاهده‌ای و تخمینی بر پایه معادله ۳-۱۰..... ۷۲
شکل ۳-۴- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی MLP ومشاهده‌ای- الگوی اول سری ۱ ..... ۷۵
شکل ۳-۵- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی MLP ومشاهده‌ای- الگوی اول سری ۲..... ۷۵
شکل ۳-۶- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی GMDH و مشاهده‌ای-الگوی اول سری ۱..... ۷۷
شکل ۳-۷- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی GMDH و مشاهده‌ای- الگوی اول سری ۲..... ۷۷
شکل ۳-۸- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی MLP و مشاهده‌ای- الگوی دوم..... ۷۹
شکل ۳-۹- مقایسه مقادیر برآورد شبکه عصبی مصنوعی GMDH و مشاهده‌ای- الگوی دوم..... ۷۹

چکیده

شبیه‌سازی هدایت آبی اشباع با استفاده از الگوریتم GMDH

صدیقه منفرد شاخالی

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که نقش عمده‌ای در طراحی پروژه‌های زهکشی و توسعه‌ی پایدار کشاورزی دارد. برای اندازه‌گیری این پارامتر روش‌های مستقیم مختلفی وجود دارد که همگی وقت‌گیر، هزینه‌بر و در مواردی دشوار می‌باشد و به دلیل تغییرات زیاد مکانی آن، اندازه‌گیری نقطه‌ای نمی‌تواند نماینده واقعی از ویژگی‌های خاک باشد. به‌همین دلیل محققان بسیاری درصدد تخمین این پارامتر با استفاده از روش‌های غیر مستقیم مانند ایجاد توابع انتقالی برآمده‌اند. در برازش توابع انتقالی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این پژوهش از سه روش رگرسیون خطی چندگانه (به روش گام به گام) و دو نوع شبکه عصبی مصنوعی، پرسپترون چند لایه و دسته بندی گروهی داده‌ها (GMDH) بهره گرفته شد. بدین منظور نمونه برداری‌های صحرایی از مناطق غربی حوزه سفیدرود در استان گیلان صورت گرفته و از این میان ۴۰ نمونه مورد مطالعه قرار گرفت. هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان، به‌صورت دست نخورده، بافت به روش هیدرومتری و الک، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر، ماده آلی به روش والکلی بلک، سدیم به روش فلیم فتومتری، کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شدند. همچنین به بررسی اثر عواملی همچون هدایت الکتریکی، نسبت جذبی سدیم، دما و ماده آلی در کنار دیگر خصوصیات مؤثر شناخته شده، در بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع پرداخته شد. خصوصیات فیزیکی شناخته شده مؤثر مورد استفاده در این پژوهش، اثری مشابه با مطالعات پیشین بر روی هدایت هیدرولیکی اشباع نشان دادند. با توجه به نتایج ارزیابی با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا، از میان سه روش مذکور، GMDH در بهبود برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع نقش مؤثری داشت (R^2=۰/۹۰۷ و RMSE=۰/۱۶). با تحلیل حساسیت بر روی نتایج حاصل از شبکه عصبی پرسپترون و GMDH، مشاهده شد که سه پارامتر نسبت سیلت به رس، نسبت جذبی سدیم و هدایت الکتریکی بیشترین تأثیر را بر هدایت هیدرولیکی اشباع داشتند.

واژه‌های کلیدی: بار افتان، پرسپترون، رگرسیون خطی چند گانه، نمونه دست نخورده، شوری

مقدمه

مقدمه

هدایت آبی اشباع یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که در مطالعات و طراحی پروژه‌های کشاورزی (تعیین سرعت نفوذ، مقدار نفوذ عمقی، پروژه‌های زهکشی زیرزمینی، طراحی و مدیریت آبیاری)، مدل‌های هیدرولوژیکی، محیط زیست و ژئوتکنیکی کاربرد دارد [مشعل و همکاران ۱۳۹۰؛ نوابیان و همکاران ۱۳۸۶]. با توجه به وقت‌گیر بودن، هزینه زیاد و نیاز به امکانات ویژه برای اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی خاک و به‌دلیل تغییرات زیاد زمانی- مکانی مشخصات خاک، اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای نمی‌توانند نماینده واقعی ویژگی‌های خاک باشند، مگرآنکه تعداد بسیار زیادی نمونه‌برداری صورت پذیرد [مسکینی و همکاران، ۱۳۸۹؛ مشعل و همکاران ۱۳۹۰].

به‌دلیل تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع، تعیین مقادیر دقیق برای پیش‌بینی درست جریان آب به خاک و طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی مشکل می‌باشد [Moustafa, 2000]. ویژگی‌هایی مانند خلل و فرج درشت خاک، شکاف‌ها، کرم‌راهه‌ها و اختلال‌های دیگر موجود در خاک که در اثر فعالیت‌های مکانیکی و بیولوژیکی حاصل می‌شوند، تأثیر زیادی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارند. از این رو پیش‌بینی این پارامتر بسیار مشکل می‌باشد [Haverkamp et al., 1999; Takele and Si Bing, 2005]. همچنین این پارامتر به برخی خصوصیات شیمیایی خاک مانند تغییرات لزجت و چگالی سیال نیز بستگی دارد. بنابراین توجه پژوهشگران به استفاده از روش‌های غیر مستقیم معطوف شده است. یکی از مزیت‌های روش‌های غیرمستقیم، برآورد مشخصات هیدرولیکی خاک بر پایه متغیرهایی با روش اندازه‌گیری آسان‌تر و کم خطاتر است. در روش‌های غیرمستقیم، ویژگی‌های دیریافت خاک مانند، پارامترهای منحنی مشخصه‌ی رطوبتی و هدایت آبی با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت، درصد رس، سیلت و شن، چگالی ظاهری، درصد مواد آلی خاک و غیره تخمین زده می‌شوند. توابع انتقالی اولین بار توسط بوما [Bouma, 1989] پیشنهاد شد. انتخاب متغیرهای مناسب به‌عنوان ورودی این توابع، در پیش‌بینی مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از روش‌های استخراج توابع انتقالی استفاده از رگرسیون خطی چندگانه می‌باشد. توابع انتقالی رگرسیونی تنها قادر به تعیین اثرات مستقیم متغیرهای مستقل است و در مواردی که اثرات غیرمستقیم نقش مهمی را بر عهده دارند، روش مناسبی نمی‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان یک روش نوین استخراج توابع انتقالی برای برآورد هدایت آبی اشباع مورد توجه قرار گرفته است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی GMDH[1] که از انواع شبکه‌های عصبی‌اند، جلوه‌ای از الگوریتم GMDH می‌باشند که به فرم خاصی بیان شده‌اند. استفاده از این شبکه‌های عصبی در پیاده‌سازی الگوریتم GMDH باعث اتعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی آن، به‌واسطه به‌وجود آمدن ساختارهای شبکه‌ای متفاوت و همچنین زمینه‌ای برای سهولت در ایجاد نرم‌افزار کامپیوتری شده‌است. به‌طور کلی به‌کار بردن شبکه‌ها در این الگوریتم باعث ساده‌تر و منطقی شدن تحلیل مدل‌ها و یا توابع جزئی به روش‌های گوناگون شده، که این امر منجر به تنوع در انتخاب مدل بهینه در راستای کاهش میزان خطای مدل و نیز محتوای تابع ریاضی مدل می‌شود. این نوع از شبکه‌های عصبی برخلاف شبکه‌های عصبی معمول رابطه بهینه میان پارامتر وابسته و مستقل را به‌صورت معادله ریاضی ارائه می‌نماید که رویکرد مناسبی جهت کاربردی نمودن نتایج شبکه عصبی می‌باشد. همچنین تحقیقات صورت گرفته تخمین بهتر شبکه عصبی GMDH را نسبت به انواع دیگر شبکه عصبی مصنوعی تأیید نموده‌اند.

با توجه به تعدد پارامترهای مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، نقش پارامترهای ورودی در بهبود تخمین توابع انتقالی و همچنین لزوم دستیابی به روش‌های نوین استخراج توابع انتقالی اهداف مورد نظر این پژوهش به شرح زیر در نظر گرفته شد:

۱) امکان‌سنجی بهبود برآورد هدایت آبی اشباع با استفاده از پارامترهای جدید (شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک در نقاط عطف و رطوبت در نقطه عطف، دمای خاک، پارامترهای شیمیایی خاک شامل شوری، ماده آلی، نسبت جذب سدیم)

۲) مقایسه روش‌های ایجاد توابع انتقالی رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون و الگوریتم GMDH و انتخاب روش دقیق‌تر

۳) حساسیت‌سنجی هدایت آبی اشباع نسبت به پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

1- Group Method of Data Handling

فصل اول

کلیات و
بررسی منابع

۱-کلیات و بررسی منابع

به‌منظور آشنایی با مفاهیم مورد استفاده در پژوهش در این فصل به ارائه تعاریفی در مورد هدایت هیدرولیکی و عوامل مؤثر بر آن، روش‌های متداول اندازه‌گیری مستقیم و تخمین به‌روش غیر مستقیم هدایت هیدرولیکی، توابع انتقالی و روش‌های استخراج آن پرداخته می‌شود و در نهایت تحقیقات صورت گرفته در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

۱-۱-تعریف هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی توانایی خاک برای انتقال آب است [Klute, 1986]. هدایت هیدرولیکی اشباع [1] یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که در فهم و پیش‌بینی مقادیر نفوذ آب در خاک، مقدار نفوذ عمقی، طراحی زهکش‌ها، کنترل رواناب‌های سطحی، آب‌شویی مزارع کشاورزی، انتقال آلودگی‌های سطحی به آب‌های زیرزمینی، مطالعات مدل‌سازی، فرسایش، صعود مویینگی، انتقال املاح، جریان آب به‌درون زهکش‌ها و دیگر فرآیندهای هیدرولوژیکی مؤثر است.

هدایت هیدرولیکی تحت تأثیر خصوصیات خاک و سیال است. مقادیر متفاوت ذرات رس، سیلت، شن، مواد آلی و آهک از عوامل تأثیرگذار بر ساختمان خاک و ایجاد خاکدانه در خاک می‌باشند. با بهبود وضعیت ساختمان خاک، اندازه خاکدانه‌ها بزرگ‌تر شده باعث افزایش حجم منافذ ریز درون خاکدانه‌ای، کاهش جرم ویژه ظاهری خاک و افزایش میزان حجم آب در رطوبت‌های بالا و در نتیجه باعث افزایش حرکت آب در خاک می‌شود. بنابراین هدایت هیدرولیکی خاک به‌طور مستقیم و غیر مستقیم تحت تأثیر ساختمان خاک، بافت خاک، مواد آلی، درصد آهک، جرم ویژه ظاهری، رطوبت در مکش ۰/۳ بار و تخلخل کل خاک است. همچنین هدایت هیدرولیکی به توزیع اندازه خلل و فرج هدایت کننده آب بستگی دارد، به‌طوریکه در حالت اشباع تمامی خلل و فرج در هدایت آب نقش دارند. لازم به‌ذکر است که اندازه و شکل ذرات خاک تعیین کننده فضای خالی در خاک می‌باشد [عالمی، ۱۹۸۱].

هدایت هیدرولیکی شامل دو نوع هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع است. در هدایت هیدرولیکی اشباع، تنها بخش جامد (اجزای خاک) و مایع (آب) وجود دارد و به‌دلیل پربودن تمامی منافذ از آب، هدایت هیدرولیکی تقریبا ثابت می‌باشد. در جریان غیر اشباع، هدایت هیدرولیکی متغیر بوده و با کاهش آب خاک، به علت اینکه منافذ کاملاً پر از آب نبوده و دارای هوا می‌باشند، کاهش می‌یابد. در این حالت سه فاز جامد، مایع و گاز در خاک وجود دارد. در هر دوی این حالت‌ها، جریانی از آب

1 - Saturated Hydraulic Conductivity (K_s)

مایع از لابلای ذرات خاک صورت می‌گیرد. با این تفاوت که در حالت اشباع قسمت عمده جریان از منافذ درشت خاک[1] عبور می‌کند و کمتر در برخورد و تماس با ذرات خاک قرار می‌گیرد. حال آنکه در حالت غیر اشباع بسته به اینکه خاک تا چه اندازه غیر اشباع باشد، جریان آب از منافذ ریزتر خاک[2] عبور کرده و در نتیجه با اصطکاک بیشتری با ذرات خاک روبروست. به همین دلیل جریان در حالت اشباع سریع و زیاد و در حالت غیر اشباع بسته به درجه خشکی خاک کند و اندک می‌باشد. با این وجود در هر دو حالت، عامل اصلی که باعث حرکت یک مولکول آب از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر می‌شود اختلاف پتانسیل هیدرولیکی است که ممکن است بین دو نقطه وجود داشته باشد. در بعضی خاک‌ها، هدایت هیدرولیکی در تمام جهات یکسان است. معمولاً در این حالت هدایت هیدرولیکی در مسیر جریان تغییر می‌کند. هدایت هیدرولیکی عمودی خاک اغلب با هدایت هیدرولیکی افقی آن به‌دلیل تفاوت‌های عمودی در بافت، ساختار و تخلخل به موجب رسوب لایه‌ای یا توسعه افقی و فعالیت‌های بیولوژیکی آن متفاوت می‌باشد. خاکی که هدایت هیدرولیکی آن وابسته به مسیر می‌باشد ناهمسان‌گرد[3] گویند. هدایت هیدرولیکی در جهت افقی با K_h، در جهت عمودی با K_v و در جهت بینابین به عنوان جریان شعاعی با K_r نشان داده می‌شود. مقدار K_r برای جریان شعاعی اغلب با میانگین‌گیری هندسی یا لگاریتمی از K_h و K_V به‌دست می‌آید [Boumans, 1976].

$$K_r = \sqrt{(K_h \times K_v)} \qquad (۱-۱)$$

$$\text{Log } K_r = 0.5 \, (\log K_h + \log K_v) \qquad (۱-۲)$$

۱-۲-عوامل مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع

هدایت هیدرولیکی اشباع به عوامل متعددی از جمله خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، اقلیم، عملیات شخم و زرع، کاربری اراضی، دینامیک ریشه و فعالیت موجودات زنده خاک بستگی دارد [Fuentes et al., 2004]. ویژگی‌هایی مانند خلل و فرج درشت خاک، شکاف‌ها، کرم‌راهه‌ها و منافذ دیگر موجود در خاک که در اثر فعالیت‌های مکانیکی و بیولوژیکی حاصل می‌شوند، تأثیر زیادی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارند. از جمله خصوصیات فیزیکی می‌توان به تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ و هندسه منافذ اشاره کرد [Ahuja et al., 1984; Hillel, 1982]. همچنین این پارامتر به تغییرات لزجت و چگالی سیال نیز بستگی دارد. دمای آب ورودی به خاک یا تغییر دمای خاک از طریق تأثیر بر لزجت (μ) و

1 - Macro - pores

2 - Micro - pores

3 - Anisotropic

چگالی (ρ) سیال، به‌طور مستقیم بر هدایت هیدرولیکی تأثیر دارد. این ارتباط بدین صورت بیان شده‌است [Caron et al., 2002; Haverkamp et al., 1999]:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه k نفوذپذیری ذاتی خاک و $\frac{g}{\mu}$ سیالیت یا روانی مایع می‌باشد. چه در حالت اشباع و چه در حالت غیر اشباع جریان آب به خاک به‌وسیله رابطه دارسی و به‌صورت زیر بیان می‌شود [Skaggs and Van Schilfgaarde, 1999]:

$$V = - K\frac{\Delta H}{L} \quad (۴-۱)$$

در رابطه فوق V سرعت جریان (متر بر ثانیه)، L طول مسیر حرکت آب (متر) و H پتانسیل کل آب خاک یا بار هیدرولیکی (متر) می‌باشند.

باور [Baver, 1938] K_s را به‌صورت تابعی از تخلخل غیر کاپیلاری (غیر مویینه‌ای) پیشنهاد داده‌است:

$$K_s = f\ [\text{Porosity factor}] \quad (۵-۱)$$

که فاکتور تخلخل، تخلخل غیر مویینه‌ای در مکش ورود هوا می‌باشد. این رابطه K_s را وابسته به توزیع اندازه ذرات خاک معرفی می‌کند. آرونوویسی و اونیل [Aronovici, 1946; O'Neal, 1949] K_s را وابسته به بافت خاک معرفی می‌کنند. همچنین ویلیامز ویژگی‌های هیدرولیکی متفاوت خاک را به دلیل خصوصیات متمایز آن بیان نمود [Williams, 1983]. تالسما و فیلینت [Talsma and Flint, 1958] رابطه‌ای غیرخطی میان مجموع رس و سیلت و K_s زیر سطحی در عمق‌های مختلف در جنوب شرقی استرالیا پیدا کرده و برای حل مشکلات زهکشی سفالی استفاده نمود. این محققان رابطه‌ای میان K_s، pH و EC نیافتند.

لاودی و پیل [Loveday and Pyle, 1973] همبستگی مناسبی میان شاخص پراکندگی و K_s در خاک‌های جنوب شرقی استرالیا ارائه نمود. این یافته‌ها به‌خوبی اشاره به رابطه میان K_s و ذرات و توزیع اندازه ذرات می‌کند و راهی برای تخمین K_s توسط توابع انتقالی پیشنهاد می‌دهد. کلپ و هورن برگر جدولی را برای میزان هدایت هیدرولیکی اشباع و بافت خاک ارائه داده‌اند که در آن با کاهش اندازه ذرات خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش می‌یابد. در آن جدول بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع متعلق به بافت‌های ماسه‌ای درشت وکمترین آن متعلق به بافت ماسه‌ای فشرده است [Clap and Hornberger, 1978]. کاهش هدایت هیدرولیکی در اثر افزایش چگالی ظاهری در تعدادی از مطالعات گزارش شده‌است [Perrone and Madramootoo, 1994; Meek et al., 1992]. در استرالیا تلاش‌هایی برای تخمین این پارامتر از

شکل ظاهری زمین (مورفولوژی زمین) [Mc Kezie et al., 1991; Mckenzie and Jacquier, 1997]، و خصوصیات اساسی خاک [Bristow et al.,1999; Smetem and Bristow, 1999] انجام گرفته‌است.

نسبت جذب سدیم [1] یکی دیگر از شاخص‌های مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد. سدیم [Na^+] از نظر اثر آن بر خاک جزو کاتیون‌های بسیار با اهمیت می‌باشد. در شرایطی که سدیم به‌شکل تبادلی [$EX.\ Na^+$] وجود داشته باشد، بر خصوصیات فیزیکی خاک و به‌ویژه ساختمان آن اثر نا مطلوب می‌گذارد. وجود مقدار زیاد سدیم محلول باعث افزایش نسبت جذب سدیم و در نتیجه پراکنده شدن ذرات خاک از یکدیگر شده که منجر به کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. در این شرایط مشکلات ثانویه‌ای نظیر ایجاد لایه سخت به‌خصوص در بخش فوقانی نیمرخ خاک، رشد و افزایش علف‌های هرز، کمبود اکسیژن و فقدان تهویه مناسب نیز ممکن است به‌صورت هم‌زمان و در نتیجه تخریب ساختمان در لایه سطحی خاک به‌وجود آید. همچنین کمبود کلسیم در مقایسه با مقادیر زیاد یون سدیم (نسبت بیشتر از ۳ به ۱ سدیم به کلسیم)، این مشکل را تشدید می‌نماید.

دو عامل عمده در کاهش هدایت هیدرولیکی خاک‌های رسی عبارتست از پراکندگی و انبساط رس‌ها. فشار انبساط مانند فشار اسمزی ناشی از تفاوت غلظت یون‌ها بین سطوح رس‌ها و آب موجود در خارج از لایه‌ی دوگانه پخشیده می‌باشد. برای محاسبه‌ی فشار انبساط، فرض می‌شود که ذرات رس به‌طور موازی قرار گرفته‌اند و لایه‌ی دوگانه‌ی پخشیده رس‌های همجوار هم‌پوشی دارند. همچنین در محاسبه فشار انبساط باید اطلاعات سطح ویژه ذرات، نوع کاتیون تبادلی، غلظت یون محلول در خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و دانسیته بار لایه‌ای رس وجود داشته باشد. شاخص مهم دیگر، شوری یا غلظت املاح محلول در آب آبیاری است. اثر شوری آب و سدیمی خاک بر هدایت هیدرولیکی اشباع پیچیده بوده و بهتر است SAR و EC به‌همراه یکدیگر جهت ارزیابی مشکلات نفوذپذیری خاک مورد بررسی قرار گیرند [Levy et al., 2005]. همچنین محققان در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های شالیزاری رطوبت ظرفیت مزرعه و میانگین هندسی قطر ذرات، مهم‌ترین عوامل مؤثر در برآورد K_s می‌باشند [مسکینی و همکاران، ۱۳۸۹].

۱-۳-روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی به‌طور کلی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. روش مستقیم اندازه‌گیری، در دو مقیاس آزمایشگاه و میدانی قابل تعریف است. روش غیر مستقیم در سه گروه کلی نمونه‌های توزیع اندازه خلل و فرج [نمونه‌های فیزیکی-تجربی]، روش معکوس و توابع انتقالی دسته‌بندی می‌شود.

1 - Sodium Adsorpsion Ratio [SAR]

۱-۳-۱-روش‌های مستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی

در روش اندازه‌گیری مستقیم در مقیاس آزمایشگاهی بسته به بافت خاک و روی نمونه‌های دست‌خورده[۱] و دست‌نخورده[۲]، آزمایش به دو روش متداول بار ثابت[۳] و بار افتان[۴] انجام می‌شود. روش بار ثابت براساس کاربرد مستقیم معادله دارسی در یک ستون خاک اشباع در یک مقطع عرضی یکنواخت می‌باشد. در این روش نمونه‌ای از خاک به طول L و سطح مقطع A انتخاب و مطابق شکل (۱-۱) آب از یک طرف وارد و از طرف دیگر نمونه خارج می‌شود. آزمایش طوری تنظیم می‌شود که اختلاف سطح آب در دو قسمت ورودی و خروجی (h) همواره ثابت باقی بماند. چنانچه در مدت t حجمی از آب به اندازه V از نمونه خارج شود، با استفاده از معادله دارسی هدایت هیدرولیکی از رابطه (۱- ۶) محاسبه می‌شود:

$$K=\frac{VL}{hAt} \qquad (۶-۱)$$

در این رابطه واحدهایی که برای اجزای مختلف آن به‌کار می‌رود تعیین کننده واحد مربوط به K نیز خواهد بود. مثلاً اگر L و h بر حسب سانتیمتر، V بر حسب سانتیمتر مکعب و A بر حسب سانتیمتر مربع و t بر حسب ساعت باشد واحدی که برای K به‌دست می‌آید، سانتیمتر بر ساعت است. این روش جهت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک‌های سبک به‌کار می‌رود. در روش بار افتان جریان ورودی آب به داخل نمونه از یک لوله باریک پر از آب تأمین شده و آب از طرف دیگر نمونه خارج می‌شود. در این روش بار آبی به‌تدریج کاهش می‌یابد. در روش بار افتان نیز، همانند بار ثابت، قانون دارسی حکم‌فرماست. چنانچه مطابق شکل (۱-۲) سطح مقطع لوله آب ورودی a و در مدت t سطح آب در این لوله مطابق شکل از H_0 به H_1 پائین افتاده باشد، هدایت هیدرولیکی از رابطه (۱-۷) قابل محاسبه است:

$$K= 2.3 \frac{a\,l}{At} \log \frac{H_0}{H_1} \qquad (۷-۱)$$

در این رابطه A سطح مقطع نمونه و واحد به‌دست آمده برای K بستگی به انتخاب واحدهای مربوط به سطح مقطع، طول نمونه و زمان اندازه‌گیری دارد. از این روش در مواردی که خاک سنگین باشد، استفاده می‌شود. در روش اندازه‌گیری صحرایی هدایت هیدرولیکی در محیط غیر اشباع می‌توان به روش‌های استوانه مضاعف، چاهک وارونه و در محیط اشباع به روش چاهک، پمپاژ، نفوذسنج تک حلقه‌ای[۵]، روش نفوذ سنج گلف [۶]و نفوذ سنج ورود هوا[۷] اشاره کرد. در طرح‌های اجرایی، بیشتر از روش‌های

1 - Disturbed

2 - Undisturbed

3 -Constant- head permeameter method [CHP]

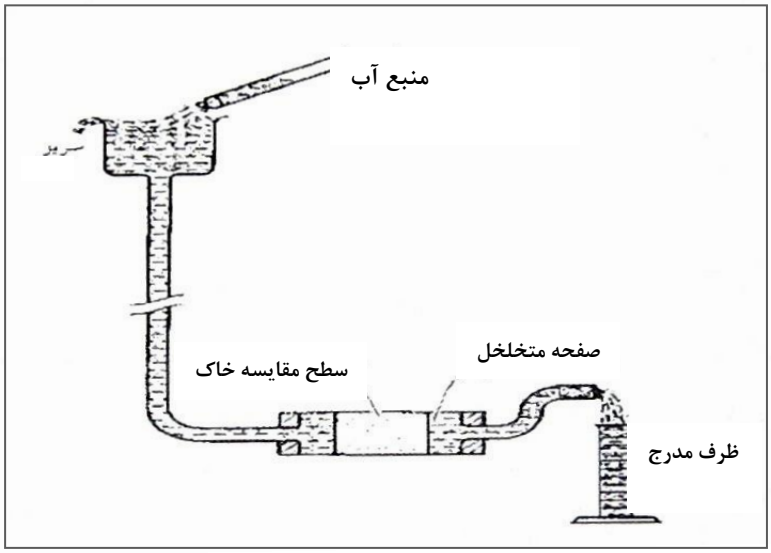
4 - Falling- head permeameter method or Velocity permeameter method [FHP]

5 - Single Ring Pressure Infiltration [PI]

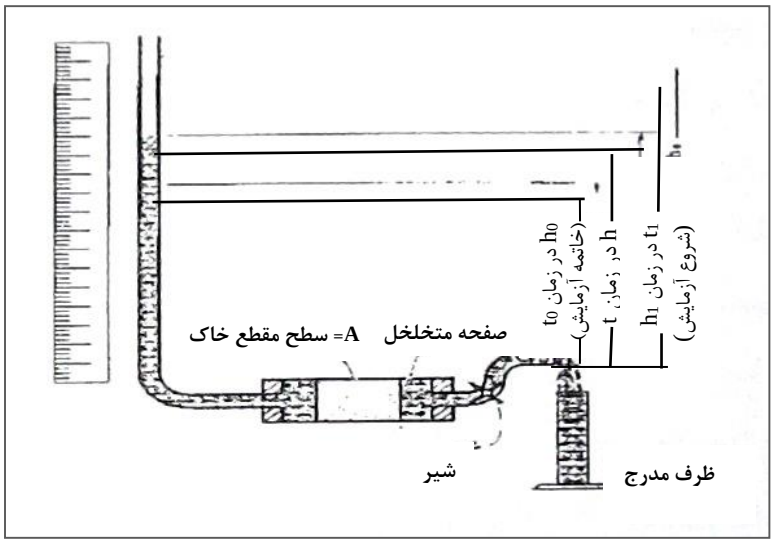
6 - Guelph Permeameter [GP]

7 - Air Entry Permeameter [AEP]

صحرایی و در امور تحقیقاتی بیشتر از روش‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. پایه و اساس اغلب روش‌های صحرایی متداول مبتنی بر دستیابی به جریان پایا می‌باشد [Reynolds, 1993; Reynolds and Elrick, 1986; Reynolds and Elrick 1990]. لزوم دستیابی به جریان پایا در روش‌های صحرایی، استفاده از این روش‌ها را در خاک‌های سنگین بافت و با هدایت هیدرولیکی کم محدود می‌کند. زیرا ایجاد جریان پایا در این خاک‌ها زمان زیادی را می‌طلبد [Elrick and Reynolds, 1992b,1992a].



شکل ۱-۱- شمایی از آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع به‌روش بار ثابت



شکل ۱-۲- شماتیک آزمایش بار افتان

به‌طور کلی محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی تحت بار ثابت (پایا) عبارتند از، نیاز به زمان طولانی برای نصب دستگاه، زمان‌بر بودن اندازه‌گیری‌ها، حجم زیاد آب مورد نیاز (۱۰۰۰ لیتر یا بیشتر) و لزوم حداقل دو نفر برای هر اندازه‌گیری [برزگر، ۱۳۸۰].

۱-۳-۲-روش‌های غیرمستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی

امروزه با توجه به وقت‌گیر بودن، هزینه زیاد و نیاز به امکانات ویژه برای اندازه‌گیری‌های مستقیم خصوصیات هیدرولیکی خاک، علی‌رغم اطمینان و دقت نسبتاً بالای آن، توجه پژوهشگران به روش‌های غیرمستقیم معطوف شده‌است. یکی از مزیت‌های روش‌های غیرمستقیم به‌دست آوردن برآوردی از تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع بر پایه متغیرهایی با روش اندازه‌گیری آسان‌تر (پارامترهای زودیافت) است [Ahuja et al., 1989]. این روش‌ها در سه گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- نمون‌های توزیع اندازه خلل و فرج [نمون‌های فیزیکی-تجربی][1]: مانند معلم [Mualem, 1976]، بروکز و کوری [Brooks and Corey,1964] و ون گنوختن [Van Genuchten, 1980]، که به‌طور عمده هدایت هیدرولیکی غیر اشباع را بر اساس توزیع، میزان ارتباط و پیچ‌خوردگی منافذ تخمین می‌زنند.

۲- روش معکوس[2]: در این روش به‌جای اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک همچون هدایت هیدرولیکی، سایر متغیرهای جریان نظیر توزیع مقدار رطوبت در پروفیل خاک و سرعت نفوذ اندازه‌گیری می‌شود. روش معکوس، ترکیب یک نمون رقمی[3] از معادله ریچاردز با یک الگوریتم بهینه برای تخمین پارامترهای مجهول از سری‌های زمانی مشاهده شده نفوذ، مقدار رطوبت و یا بار فشار می‌باشد.

۳- توابع انتقالی[4]: روشی غیرمستقیم برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک از ویژگی‌های فیزیکی (مانند توزیع اندازه ذرات،جرم مخصوص ظاهری، نقاط رطوبتی خاص، ویژگی‌های کانی شناسی نوع رس، مقدار ماده آلی و کربن آلی)، خصوصیات شیمیایی خاک، وضعیت زمین نما[5] مانند شیب و انحناء سطح زمین و خصوصیات مکانیکی آن مانند ساختمان و مدیریت خاک با دقت برآوردی مناسب و با مشخصه صرفه‌جویی در زمان و هزینه استفاده می‌نماید.

1 - Pore- size distribution models
2 - Inverse methods
3 - Numerical Model
4 - Pedo- transfer function
5 - Landscape

۱-۴-توابع انتقالی تعیین خصوصیات خاک

توابع انتقالی توسط بوما [Bouma, 1989] برای توصیف روابط کمی بین برخی خصوصیات دیریافت خاک و سایر خصوصیاتی که به‌سادگی قابل اندازه‌گیری هستند به‌کار برده شد. ویژگی‌های دیریافت، ویژگی‌هایی هستند که اندازه‌گیری مستقیم آنها مستلزم صرف وقت، هزینه و زحمت زیادی می‌باشد. از طرفی این ویژگی‌ها در نمون‌سازی‌ها و کارهای مدیریتی منابع خاک و آب مورد نیاز می‌باشند. از جمله ویژگی‌های دیریافت خاک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع می‌باشد. ویژگی‌های زودیافت خصوصیاتی از خاک هستند که اندازه‌گیری مستقیم آنها آسان و ارزان بوده و به‌طور معمول در مطالعات و گزارشات خاکشناسی ثبت می‌شوند.

انتخاب متغیرهای مناسب به‌عنوان ورودی توابع انتقالی، در توانایی پیش‌بینی مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نمس و همکاران [Nemes et al., 2002] دریافتند که اهمیت داده‌هایی که به‌عنوان ورودی توابع انتقالی مورد استفاده قرار می‌گیرد بیشتر از چگونگی تهیه توابع است. معمول‌ترین ورودی‌های توابع انتقالی، داده‌های بافت خاک (مقدار شن، سیلت و رس) و جرم مخصوص ظاهری هستند [Pucket et al., 1985; Wosten et al., 1999]. با توجه به اثر شناخته شده ماده آلی بر خصوصیات هیدرولیکی خاک، برخی محققین ماده آلی را به‌عنوان یکی از متغیرهای ورودی توابع انتقالی به‌کار بردند [Wosten et al., 1999; Rawls et al., 1983].

توابع انتقالی خاک را می‌توان در دو دسته عمده توابع انتقالی کلاسه شده و پیوسته تقسیم بندی نمود. در توابع انتقالی کلاسه شده، خصوصیات هیدرولیکی برای یک کلاس بافتی مشخص، با این فرض که خاک‌های مشابه، خصوصیات هیدرولیکی مشابهی نیز دارند، محاسبه می‌گردد. این توابع ویژگی‌های افق یا تیپ خاک را به‌عنوان متغیرهای رگرسیونی در نظر می‌گیرند، در حقیقت این توابع ویژگی‌های مربوط به خواص هیدرولیکی دارای کلاس‌های بافتی مختلف ارائه می‌دهند (جدول ۱-۱). توابع انتقالی کلاسی را توابع ساده و ارزان برای استفاده توصیف می‌کنند، زیرا فقط کلاس بافتی خاک اندازه‌گیری می‌شود. دقت این توابع در مقایسه با توابع انتقالی پیوسته کمتر است [Wosten et al., 1995].

در توابع انتقالی پیوسته، ویژگی‌های زود یافت خاک مانند درصد کربن آلی، فراوانی نسبی ذرات خاک و درصد کربنات کلسیم را به‌عنوان متغیرهای رگرسیونی در نظر می‌گیرند. اگرچه دقت این توابع نسبت به توابع انتقالی کلاسی بیشتر است ولی هزینه آن نیز بیشتر می‌باشد. برای ارزیابی و کاربرد توابع انتقالی، صحت و اعتبار آنها با تطابق مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده مورد سنجش قرار می‌گیرد. برای ارزیابی صحت توابع از داده‌هایی استفاده می‌شود که در بسط توابع نیز به‌کار رفته‌اند و برای سنجش اعتبار توابع از داده‌هایی غیر از داده‌های به‌کار رفته در بسط این توابع استفاده می‌شود. این توابع خود به سه دسته توابع فیزیکی- تجربی، نقطه‌ای و پارامتریک تقسیم‌بندی می‌گردند.