بسم الله الرحمن الرحيم

تعهدنامه‌ی اصالت اثر و رعایت حقوق دانشگاه

تمامی حقوق مادّی و معنوی مترتب بر نتایج، ابتکارات، اختراعات و نوآوری‌هایِ ناشی از انجام این پژوهش، متعلق به دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. نقل مطلب از این اثر، با رعایت مقرّرات مربوطه و با ذکر نام دانشگاه محقق اردبیلی، نام استاد راهنما و دانشجو بلامانع است.

اینجانب **اسماعیل روزبان** دانش‌آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد رشته‌ی **مهندسی کشاورزی -علوم خاک** گرایش **فیزیک و حفاظت** خاک دانشکده‌ی **فناوری کشاورزی و منابع طبیعی** دانشگاه محقق اردبیلی به شماره‌ی دانشجویی **۹۰۳۳٤۳۳۱۰٦** که در تاریخ **۱۳۹۲/۱۲/۰۵** از پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود تحت عنوان **" اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد برخی خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی خاک در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل"** دفاع نموده‌ام، متعهد می‌شوم که:

۱) این پایان‌نامه را قبلاً برای دریافت هیچ‌گونه مدرک تحصیلی یا به عنوان هرگونه فعالیت پژوهشی در سایر دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی و پژوهشی داخل و خارج از کشور ارائه ننموده‌ام.

۲) مسئولیت صحّت و سقم تمامی مندرجات پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود را بر عهده می‌گیرم.

۳) این پایان‌نامه، حاصل پژوهش انجام شده توسط اینجانب می‌باشد.

۴) در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و مقرّرات مربوطه و با رعایت اصل امانتداری علمی، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در متن و فهرست منابع و مآخذ ذکر نموده‌ام.

۵) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده یا هر گونه بهره‌برداری اعم از نشر کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان‌نامه را داشته باشم، از حوزه‌ی معاونت پژوهشی و فنّاوری دانشگاه محقق اردبیلی، مجوزهای لازم را اخذ نمایم.

۶) در صورت ارائه‌ی مقاله‌ی مستخرج از این پایان‌نامه در همایش‌ها، کنفرانس‌ها، سمینارها، گردهمایی‌ها و انواع مجلات، نام دانشگاه محقق اردبیلی را در کنار نام نویسندگان (دانشجو و اساتید راهنما و مشاور) ذکر نمایم.

۷) چنانچه در هر مقطع زمانی، خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن (منجمله ابطال مدرک تحصیلی، طرح شکایت توسط دانشگاه و ...) را می‌پذیرم و دانشگاه محقق اردبیلی را مجاز می‌دانم با اینجانب مطابق ضوابط و مقرّرات مربوطه رفتار نماید.

نام ونام خانوادگی دانشجو:

امضا

تاریخ

دانشکده‌ی فناوری کشاورزی و منابع طبیعی
گروه آموزشی علوم خاک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد
در رشته‌ی علوم خاک گرایش فیزیک و حفاظت خاک

عنوان:

اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد برخی خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی خاک در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل

استاد راهنما:

دکتر شکراله اصغری

استاد مشاور:

دکتر حبیب خداوردی‌لو

پژوهشگر:

اسماعیل روزبان

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که وجود من در گرو وجود با عظمت آنهاست

و

برای این دو عزیز مهربان، ماورایی و قابل ستایش

هر لحظه خدا را سپاس می گویم.

تقدیر و تشکر از

استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر شکراله اصغری که استاد علم و اخلاق بنده بودند، هر لحظه برایم مشکل گشا بوده و همواره با شکیبایی همراهیم کردند.

استادمشاورم جناب آقای دکتر حبیب خداوردی لوکه تجربیات ارزشمندشان همیشه برای من راهگشا بوده است.

از داور محترم جناب آقای دکتر مجید رئوف جهت قبول زحمت داوری پایان نامه اینجانب نهایت سپاس و امتنان را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: روزبان نام: اسماعیل

عنوان پایان‌نامه: اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد برخی خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی خاک در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل

استاد راهنما: دکتر شکراله اصغری

استاد مشاور: دکتر حبیب خداوردی‌لو

مقطع تحصیلی: **کارشناسی ارشد**

رشته: علوم خاک گرایش: فیزیک و حفاظت خاک

دانشگاه: محقق اردبیلی دانشکده: فناوری کشاورزی و منابع طبیعی

تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۱۲/۰۵ تعداد صفحات: ۱۰۳

چکیده: اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک وقت‌گیر، هزینه‌بر و گاهی اوقات به دلیل خطاهای آزمایشی و عدم یکنواختی خاک غیرواقعی است. از طرفی، این ویژگی‌ها را می‌توان از روی ویژگی‌های زودیافت خاک با استفاده از توابع انتقالی (PTF) خاک برآورد نمود. هدف از این پژوهش ارائه مدل‌های رگرسیونی بر اساس ویژگی‌های زودیافت خاک برای برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک شامل: مقاومت مکانیکی، پارامترهای α و n در مدل منحنی رطوبتی وان‌گنوختن، میانگین وزنی قطر خاکدانه و منحنی مشخصه رطوبتی خاک در خاک‌های جنگلی فندقلوی اردبیل بود. بر این اساس ۷۵ نمونه خاک از جنگل‌های فندقلوی اردبیل برداشته شد و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی روی آنها صورت گرفت. داده‌ها به طور تصادفی به دو سری داده‌های آموزشی (۶۰ داده) و داده‌های آزمونی (۱۵ داده) تقسیم شدند. برای ایجاد مدل‌های رگرسیونی از نرم افزار Minitab و روش گام به گام استفاده شد. بهترین تابع انتقالی برای رطوبت اشباع (θs) با استفاده از پارامترهای ورودی شامل کربن آلی، جرم ویژه ظاهری نسبی و کربنات کلسیم معادل حاصل شد. مقادیر d، ME، RMSE و BVTO برای تخمین رطوبت اشباع به ترتیب برابر ۰/۸۵، ۰/۰۰۳۵-، ۰/۰۲۳۳ و ۰/۰۰۰۵ بود. پس از تابع انتقالی θs، توابع انتقالی θ_{FC} و θ_{100kpa} با داشتن بیشترین مقادیر d و کمترین مقادیر ME، RMSE و BVTO به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۰۱۷۸، ۰/۰۱۱۳، ۰/۰۴۶۵ و ۰/۵۲، ۰/۰۳۱۷، ۰/۰۰۲۲ و ۰/۰۰۱ نسبت به دیگر توابع دقت بالاتری داشتند. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی در تخمین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک نسبت به دیگر پارامترهای دیریافت کارآمدتر بودند.

کلید واژه‌ها: توابع انتقالی خاک، منحنی مشخصه رطوبتی، مقاومت مکانیکی خاک، جنگل‌های فندقلو

فهرست مطالب

شماره و عنوان مطلب | شماره صفحه

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- توابع انتقالی خاک ٤

۱-۳- اهداف پژوهش..... ۱۱

۱-٤- ضرورت و اهمیت پژوهش ۱۱

فصل دوم: مروری بر منابع

۲-۱- پارامترهای دیریافت خاک ۱۳

۲-۱-۱- ظرفیت ذخیره آب خاک ۱۳

۲-۱-۲- محدوده رطوبتی با کمترین محدویت (LLWR) ۱۸

۲-۱-۳- شاخص کیفیت فیزیکی خاک ۱۹

۲-۲- پارامترهای زودیافت خاک ۲۲

۲-۲-۱- بافت خاک ۲۲

۲-۲-۲- جرم ویژه ظاهری خاک ۲۲

۲-۲-۳- کربن آلی خاک (SOC)..... ۲۳

۲-۲-٤- تخلخل..... ۲۳۲۳

۲-۲-۵- پایداری خاکدانه..... ۲۳

۲-۲-٦- مقاومت فروروی خاک ۲٦

۲-۲-۷- آبگریزی خاک ۲۷

۲-۳- روش‌های غیرمستقیم برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک ۲۹
۲-۳-۱- توابع انتقالی خاک ۲۹
۲-۳-۲- روش‌های نیمه فیزیکی ۳۳
۲-۳-۳- روش مدل‌سازی معکوس ۳۳
۲-٤- مروری بر مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده در برآورد خصوصیات خاک ۳٤
۲-۵- جمع‌بندی ٤۳

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱- مواد و وسایل به کار رفته در تحقیق ٤۵
۳-۲- منطقه مورد مطالعه ٤٦
۳-۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های زودیافت خاک ٤۷
۳-۳-۱- اندازه‌گیری ضریب آبگریزی خاک ٤۸
۳-۳-۲- مقاومت مکانیکی خاک (SMR) ٤۹
۳-٤- اندازه‌گیری ویژگی‌های دیریافت خاک ۵۰
۳-٤-۱- رطوبت خاک در مکش‌های صفر، ۱۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال ۵۰
۳-٤-۲- رطوبت‌های ظرفیت مزرعه (FC)، پژمردگی دائم (PWP) ۵۰
۳-٤-۳- آب قابل استفاده گیاه (PAW) و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) . ۵۰
۳-٤-٤- میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه ۵۲
۳-٤-۵- برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی وان‌گنوختن (۱۹۸۰) ۵۲
۳-٤-٦- شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف (s_p) ۵۳
۳-۵- همراستایی چندگانه و نرمال کردن داده‌ها ۵٤
۳-٦- گزینش مناسب‌ترین ترکیب از متغیرهای مستقل در برآورد پارامترها ۵۵

۳-۷- معیارهای ارزیابی ۵٦

فصل چهارم: نتایج و بحث

٤-۱- دامنه تغییرات ویژگی‌های زودیافت و دیریافت اندازه‌گیری شده در خاک‌های مورد مطالعه ۵۹

٤-۲- اشتقاق توابع انتقالی رگرسیونی.....٦۷

٤-۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....۸۲

٤-۳-۱- نتیجه‌گیری.....۸۲

٤-۳-۲- پیشنهادها ۸۳

منابع و مآخذ ۸٤

فهرست جداول

شماره و عنوان جدول | شماره صفحه

جدول ۳-۱: وسایل و مواد به کار برده شده در تحقیق.....٤٥
جدول ٤-۱: آماره‌های توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزشی و آزمونی...٥٩
جدول ٤-۲: ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل ٦٢
جدول ٤-۳: ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و وابسته ٦٤
جدول ٤-٤: توابع انتقالی بدست آمده بر مبنای ویژگی‌های زودیافت خاک ٦٨
جدول ٤-٥: آماره‌های ارزیابی مدل‌های مختلف توابع انتقالی رگرسیونی ٧٧

فهرست اشکال

شماره و عنوان شکل | شماره صفحه

شکل ۱-۱: تعداد مقالات توابع انتقالی و تعداد ارجاعات مقالات توابع انتقالی از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۹ ..... ٦

شکل ۲-۱: منحنی مشخصه رطوبتی در خاک‌های رسی و شنی ١٤

شکل ۲-۲: نمایی از ساختار شبکه عصبی ۳۰

شکل ۳-۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ٤٦

شکل ٤-۱ : نمودار رگرسیون خطی تک متغیره رابطه کربن آلی (OC) با میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD). ۷۰

شکل ٤-۲: نمودار رگرسیون خطی تک متغیره رابطه رطوبت اشباع با جرم ویژه ظاهری نسبی (D_{b-rel}). ۷۱

شکل ٤-۳: نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده بهترین توابع انتقالی خاک بر اساس داده‌های آموزشی ۸۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، نیاز بشر به تولید غذا و فشار بر عرصه‌های طبیعی را افزایش داده است. لذا، بهره‌برداری غیراصولی و تغییر کاربری‌ها سبب تخریب اکوسیستم‌ها شده است. این رشد بی‌رویه جمعیت و همچنین نیاز مبرم به اطلاعات از منابع زمینی و خاک، مدیریت اصولی را در راستای منابع زمینی و خاک می‌طلبد. برای مدیریت اصولی نیاز به آمار و اطلاعات جهت کسب مواد غذایی و حفاظت و حمایت از منابع وجود دارد. یکی از راه‌های ایجاد تعادل میان جمعیت رو به رشد و تولید مواد غذایی برای رفع نیازهای فزاینده جوامع بشری، اولویت دادن و گسترش فعالیت‌های کشاورزی از طریق افزایش تولید این بخش بوده و وجود آب و خاک مناسب از عوامل اصلی این فعالیت‌ها هستند (اینارد و همکاران، ۲۰۰٤). بهره‌برداری علمی و اصولی آب و خاک مستلزم افزایش شناخت و آگاهی همه سطوح دخیل در نحوه استفاده از آب و خاک به منظور تغذیه صحیح گیاهی و به تبع آن امنیت غذایی و تغذیه سالم انسان است.

در مطالعه روابط آب و خاک دو حالت کلی در نظر گرفته می‌شود: یکی حالت اشباع که در آن فقط ذرات خاک و آب وجود دارد و دیگری حالت غیراشباع است که در آن علاوه بر آب و خاک، هوا نیز موجود می‌باشد. در دهه‌های اخیر، به دلیل افزایش مصرف مواد آلاینده مانند کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها برای افزایش تولید در واحد سطح، پژوهش درباره جریان غیراشباع آب در خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین موضوع‌های پژوهشی، در زمینه فیزیک خاک و هیدرولوژی مطرح شده است. از طرفی، افزایش نگرانی عمومی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی در اثر تخلیه زیر سطحی فاضلاب‌های شهری و صنعتی نیز به تحقیقات بیشتر در محیط‌های غیراشباع انجامیده است (عباسی، ۱۳۸٦). ویژگی‌های هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک تعیین می‌کند که چه مقدار از آب سطحی به درون خاک نفوذ کرده و چه مقدار به رواناب تبدیل می‌شود. بنابراین فرآیندهای جریان غیراشباع بسیار مهم و پیچیده بوده و باید به صورت کمّی بیان شوند (مطلبی و همکاران، ۱۳۸۹).

معادله ریچاردز (۱۹۳۱) و معادله گرین- امپت (۱۹۱۱) برای مدل‌سازی جریان آب در ناحیه غیر اشباع خاک استفاده می‌شوند (نازرول اسلام و همکاران، ۲۰۰۶). کاربرد هر دو معادله به درک خصوصیات هیدرولیکی خاک در حالت غیر اشباع نیاز دارد. خصوصیات هیدرولیکی خاک، ورودی‌های ضروری جهت به دست آوردن مدل آب- خاک هستند. مدل‌هایی که فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و محصول را شبیه‌سازی می‌کند می‌تواند برای پیش‌بینی رژیم آب- خاک جهت اهداف آبیاری، حرکت شیمیایی جهت نظارت محیطی و عملکرد محصول جهت مدیریت کشاورزی به کار رود (ورهاگن، ۱۹۹۷).

آگاهی از خصوصیات هیدرولیکی خاک برای خیلی از کاربردها در هیدرولوژی، کشاورزی، هواشناسی، اکولوژی، حفاظت محیط زیست (توماسلا و همکاران، ۲۰۰۳) و توسعه مدل‌های جریان آب و املاح (پان و همکاران، ۲۰۱۲) مورد نیاز است. مدل‌سازی رژیم‌های رطوبتی و حرکت مواد مغذی یک ابزار مهم در ارزیابی تاثیرات کارکردهای مدیریتی مختلف روی عملکرد محصول و کیفیت محیط زیست به حساب می‌آید (ورهاگن، ۱۹۹۷؛ ورهاگن و بوما، ۱۹۹۸). پارامترهای هیدرولیکی جهت کاربردهای مدل شبیه‌سازی سیستم‌های کشت، حرکت آب زیرزمینی، فرسایش آبی، حفاظت خاک و دیگر فرآیندها مورد نیاز است (آکوتیس و دوناتلی، ۲۰۰۳). بیان کمّی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک غیراشباع در بسیاری از مطالعات مربوط به جریان در محیط‌های متخلخل که از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح استفاده می‌کنند، ضروری است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

خصوصیات مکانیکی خاک نیز از جنبه‌های مهندسی و کشاورزی تاثیر بسزایی در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی دارد. فشردگی یا مقاومت خاک به عنوان یک ویژگی مکانیکی خاک می‌تواند اثر منفی بر رشد گیاه، آب ذخیره شده در خاک، کارایی استفاده آب توسط گیاه، ویژگی‌های رشد و نمو گیاه، توسعه و توزیع ریشه در خاک، جذب مواد غذایی توسط ریشه و سرانجام عملکرد گیاه داشته باشد (گهری و همت، ۱۳۸٦). بنابراین ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک هستند که برآورد آنها در اکثر مطالعات آب و خاک اهمیتی ویژه دارد.

روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای متداول زیادی جهت اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی در دسترس هستند. متاسفانه اکثر این روش‌ها خیلی وقت‌گیر و پرهزینه هستند (وستن و همکاران، ۲۰۰۱؛ رومانو و پالادینو، ۲۰۰۲؛ مردون، ۲۰۱۰). علاوه بر این به دلیل تغییرپذیری زمانی و

مکانی بالای ویژگی‌های هیدرولیکی (نیلسن و همکاران، ۱۹۷۳)، تعداد زیادی از نمونه‌ها مورد نیاز هستند (مینانسی و مک‌براتنی، ۲۰۰۲). به همین جهت، اخیراً، روش‌های غیرمستقیم به عنوان راهکاری مناسب برای رفع نسبی این مشکلات و به عنوان یک جایگزین برای اندازه‌گیری مستقیم، ارائه شده‌اند که در آن خصوصیات هیدرولیکی از داده‌های زودیافت خاک برآورد می‌شوند (بوما، ۱۹۸۹؛ وستون و همکاران، ۲۰۰۱). روش‌هایی که برای این اهداف ممکن است استفاده شوند شامل مدل‌های آماری توزیع اندازه منافذ، مدل‌های معکوس[1] و مخصوصاً توابع انتقالی خاک[2] هستند (اسخاپ و همکاران، ۲۰۰۱). مدل‌های توزیع اندازه منافذ به طور شاخص، هدایت هیدرولیکی غیراشباع را مبتنی بر توزیع، اتصال و اعوجاج منافذ برآورد می‌کنند (معلم، ۱۹۷٦؛ بروکس و کوری، ۱۹٦٤؛ وان‌گنوختن، ۱۹۸۰). مدل‌های معکوس ترکیب یک مدل عددی از معادله ریچاردز (۱۹۳۱) با یک الگوریتم بهینه‌سازی جهت تخمین پارامترهای ناشناخته از سری زمان‌های مشاهده شده نفوذ، حجم آب و یا افت فشار است (کول و همکاران، ۱۹۸۷؛ سیمونک و وان‌گنوختن، ۱۹۹٦؛ عباس‌پور و همکاران، ۱۹۹۷).

۱-۲- توابع انتقالی خاک

اخیراً توابع انتقالی در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی توسط محققان مختلف مثل محققان خاک-شناسی، هیدرولوژیست‌ها و مهندسان کشاورزی و محیطی مورد استفاده قرار گرفته است (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ مینانسی و مک‌براتنی، ۲۰۰۲؛ مینانسی و همکاران، ۲۰۰٤). تخمین غیرمستقیم خصوصیات هیدرولیکی از بافت خاک و یا اطلاعات تاکسونومی خاک (مثل توزیع اندازه ذرات، تخلخل و کربن آلی) با استفاده از مدل‌های رگرسیونی موسوم به توابع انتقالی خاک (PTFs) توسط محققان مختلف (مثل اسخاپ و لیج، ۱۹۹۸؛ راولز و براکنسیک، ۱۹۸۹؛ وان‌گنوختن و همکاران، ۱۹۹۹) انجام گرفته است. توابع پیش‌بینی کننده فضایی خاک[3] و توابع انتقالی خاک، توابع پیش‌بینی کننده‌ای هستند که می‌توانند داده‌های پایه‌ای خاک مثل توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و مقدار ماده آلی را به خصوصیات مکانیکی خاک همچون مقاومت فروروی[4] خاک و مقاومت برشی[1] خاک تبدیل کند (خلیل-مقدم و همکاران، ۲۰۰۹).

1-Inverse modeling
2- Pedotransfer functions
3-Soil spatial prediction functions
4-Penetration resistance

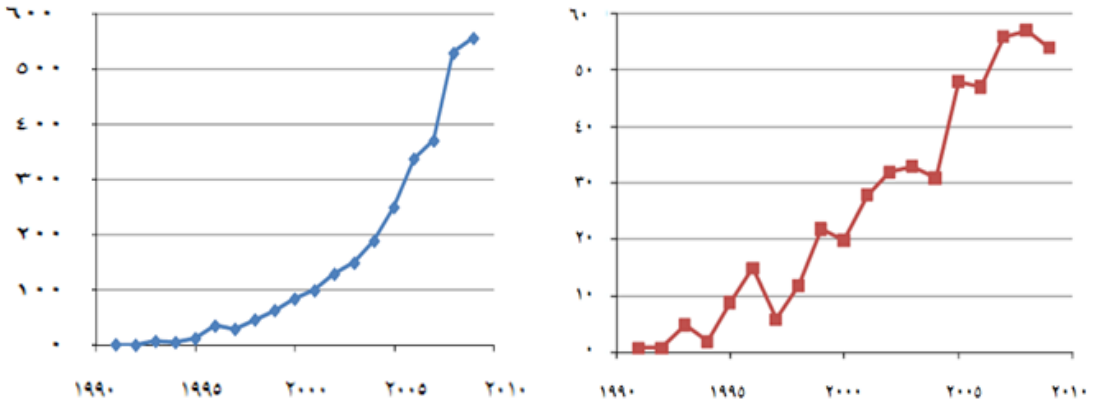
مفهوم توابع انتقالی خاک به مدت زیادی برای تخمین ویژگی‌های دیریافت خاک به کار رفته است (مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۰۲). تلاش اولیه برای استفاده از چنین پیش‌بینی‌هایی حاصل مطالعه بریگس و مک‌لان (۱۹۰۷) است که بعداً توسط بریگس و شانتز (۱۹۱۲) اصلاح شد. آنها ضریب پژمردگی را به صورت تابعی از اندازه ذرات تعریف کردند. با معرفی مفاهیم ظرفیت زراعی (FC[۲]) و نقطه پژمردگی دائم (PWP[۳]) توسط ویهمایر و هندریکسون (۱۹۲۷)، طی دوره‌های ۱۹۸۰-۱۹۵۰ تحقیقات به سمت همبستگی توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و مقدار ماده آلی با مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و مقدار آب قابل دسترس گرایش پیدا کرد. در دهه ۱۹۶۰، مقالات مختلف با تخمین FC، PWP و ظرفیت آب قابل دسترس (AWC[٤]) در یک سری از مقالات توسط سالتر و ویلیامز (b و a ۱۹۶۵، ۱۹۶۷ و ۱۹۶۹) و سالتر و همکاران (۱۹۶۶) به طور قابل ملاحظه‌ای توزیع پیدا کرد. آنها رابطه بین کلاس‌های بافت و ظرفیت آب قابل استفاده را بیان کردند که امروزه به عنوان توابع انتقالی کلاسی[٥] شناخته می‌شوند. آنها توابع مرتبط با توزیع اندازه ذرات و AWC را نیز توسعه دادند که امروزه به عنوان توابع انتقالی پیوسته[٦] شناخته می‌شوند. در دهه ۱۹۷۰، تحقیقات جامع‌تری با استفاده از بانک‌های اطلاعات بزرگ صورت گرفت. یک مثال خوب در این مورد مطالعه خاک توسط هال و همکاران (۱۹۷۷) در انگلستان است؛ در این مطالعات این محققان، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، مقدار آب قابل دسترس و ظرفیت تهویه‌ای را به عنوان تابعی از کلاس بافتی بیان کردند، به علاوه توابع پیوسته را با تخمین این خصوصیات آب- خاک به دست آوردند. در آمریکا، گوپتا و لارسون (۱۹۷۹) ۱۲ تابع مرتبط با توزیع اندازه ذرات و مقدار ماده آلی با مقدار رطوبت در محدوده پتانسیل ٤- تا ۱۵۰۰ KPa- را توسعه دادند. کلاپ و هورنبرگر (۱۹۷۸) مقادیر میانگینی برای پارامترهای یک تابع نمایی منحنی خصوصیت رطوبتی، ضریب جذبی[۷] و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای کلاس‌های بافتی مختلف استخراج کردند. احتمالاً در اولین تحقیق از این نوع پژوهش‌ها، بلومن (۱۹۷۷ و ۱۹۸۰) روابطی تجربی برای بدست آوردن مقادیر پارامترهای مدل هیدرولیکی بروکس و کوری (۱۹٦٤) را با استفاده از توزیع اندازه

1-Shear strengh
2-Field capacity
3-Permanent wilting point
4-Available water content
5 -Class PTFs
6 -Continuous PTFs
7 - Sorptivity

ذرات خاک ارائه کرد. لامپ و نیب (۱۹۸۱) از آلمان واژه Pedfunction را معرفی کردند. اما بوما و وان لانن (۱۹۸٦) واژه function Transfer را بکار بردند. در سال ۱۹۸۹ بوما به دلیل جلوگیری از سردرگمی و همچنین تمایز اینگونه توابع در فیزیک خاک از سایر بخش‌های خاک‌شناسی نخستین بار واژه Pedotransfer function را برای بیان وابستگی بین منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی با پارامترهای اساسی خاک معرفی کردند. توابع انتقالی از خصوصیات اصلی و پایه خاک به عنوان ورودی استفاده می‌کند و توابع هیدرولیکی را به عنوان خروجی تولید می کند (بوما، ۱۹۸۹؛ وستون و همکاران، ۲۰۰۱).

تعداد مقالات توابع انتقالی از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۸، هر ساله با یک نرخ ۷ /۳ مقاله در سال افزایش پیدا کرده است (شکل ۱-۱). اما، به نظر می‌رسد تعداد مقالات اخیر در سال ۲۰۰۹ افت پیدا کرده است. ضمنا تعداد ارجاعات این مقالات نیز به سرعت افزایش پیدا کرده است (شکل ۱-۱) (مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۱۱).

با توجه به کاربردی بودن این توابع طی پنج دهه اخیر، تلاش‌های گروهی در کشورهای توسعه یافته منجر به گردآوری بانک‌های اطلاعاتی بزرگی از خصوصیات هیدرولیکی و اصلی خاک شده که از توابع انتقالی قدرتمند توسعه پیدا کرده‌اند. برای مثال، وستون و همکاران (۱۹۹۹) توابع انتقالی را با استفاده از بانک اطلاعاتی HYPRES[1] توسعه دادند که شامل ۵۵۲۱ مجموعه از داده‌های خاک سراسر اروپا است. به طریق مشابه، راولز و همکاران (۱۹۸۲) توابع انتقالی را با استفاده از ۵۳۵۰ مجموعه از خصوصیات هیدرولیکی خاک توسعه دادند.



شکل ۱-۱: تعداد مقالات توابع انتقالی (سمت راست) و تعداد ارجاعات مقالات توابع انتقالی (سمت چپ) از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۹ (مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۱۱).

1 - Hydraulic Properties of European Soils

باتجس (۱۹۹٦) توابع انتقالی را با استفاده از بانک اطلاعاتی WISE[1] توسعه داد کـه شـامل ٤٣٥٣ پروفیل خاک از سراسر دنیا است. بانک‌های اطلاعاتی دیگـری همچـون UNSODA (لـیج و همکـاران، ۱۹۹٦؛ نمس و همکاران، ۲۰۰۱) GRIZZLY (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۹۷) با داده‌هایی از بخـش‌هـای مختلف سراسر دنیا و HYPRES (لیلی، ۱۹۹۷؛ وسـتون و همکـاران، ۱۹۹۹)، از کشـورهای اروپـایی و پایگاه داده USDA-NRCS (ستاد بررسی خاک[2]، ۲۰۱۰a) نیز ایجاد شده‌اند. چنین بانک‌هـای اطلاعـاتی بزرگ مبتنی بر خصوصیات هیدرولیکی خاک و توابع انتقالی قدرتمنـد در خیلـی از کشـورهای در حـال توسعه در دسترس نیست. ایران نیز مثل خیلی از کشورهای دیگر، داده‌های هیدرولیکی خاک کافی بـرای تهیه توابـع انتقـالی منطقـه‌ای جهـت کاربردهـای مـدل‌سـازی کشـاورزی و محیطـی مربوطـه را نـدارد (خداوردی‌لو و همکاران، ۲۰۱۱). معمولاً توابع انتقالی با دقت قابل قبولی قابل تعمـیم بـرای خـاک‌هـای سایر مناطق نیستند اگرچه این‌ها از بانک‌های اطلاعاتی بزرگ توسعه یافتـه‌انـد (تیـتج و تـاپکن‌هنریچـز، ۱۹۹۳؛ کرنلیس و همکاران، ۲۰۰۱؛ نمس و همکاران، ۲۰۰۳).

کرنلیس و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که یک تابع انتقالی اگر با یک منطقه زمین‌شناسـی کـه در آنجا توسعه یافته، به کار رود عملکرد بهتری دارد. هدنت و توماسلا (۲۰۰۲) نشان دادند که توابع انتقالی توسعه یافته در شرایط معتدل تحت اقلیم مرطوب حاره‌ای برزیل کـارکرد ضـعیفی دارد. نتـایج مشـابهی توسط لی و همکاران (۲۰۰۷) به دست آمده است.

تا امروز بیشترین تحقیقات در مـورد توابـع انتقـالی در زمینـه تخمـین میـزان آب خـاک (منحنـی خصوصیات رطوبتی)، هدایت هیدرولیکی و خصوصیات هیدرولیکی خاک صورت گرفته است (وسـتون و همکاران، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱). دلیل این نوع توجه، تعدد پارامترهـا، نبـود روش‌هـای مـدون انـدازه‌گیـری پارامترها، دشواری و هزینه زیاد از یک سمت و از سوی دیگر نیاز مدل‌های جدید مطالعـه حرکـت آب و املاح در خاک به پارامترهای هیدرولیکی خاک مـی باشـد. از ایـن رو مـدل‌هـای بسـیاری بـرای بـرآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک ارائه شده است. اگرچه بیشتر توابـع انتقـالی جهـت بـرآورد خصوصـیات هیدرولیکی خاک توسعه یافته است، اما آنها فقط به ویژگی‌های هیدرولیکی محدود نشده و این موضوع مانع نشده است که در سایر شاخه‌های علم خاک‌شناسی کاربرد و کارایی نداشـته باشـد. از ایـن‌رو توابـع

1 -The World Inventory of Soil Emission Potentials
2 -Soil Survey Staff

متعددی (جدول ۱-۱) برای برآورد بسیاری از خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از خصوصیات ساده‌تر خاک نیز ارائه شده است (مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۰۲).

توابع انتقالی به سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند (عباسی و همکاران، ۲۰۱۱): توابع انتقالی کلاسی (باکر و الیسون، ۲۰۰۸)، توابع انتقالی نقطه‌ای[1] (قنبریان- علویجه و میلان، ۲۰۱۰) و توابع انتقالی پارامتریک[2] (سانترا و داس، ۲۰۰۸).

توابع انتقالی کلاسی برای برآورد مقدار میانگین پارامترهای هیدرولیکی خاک برای هر کلاس بافتی خاک استفاده می‌شوند. این توابع انتقالی بصورت ارزان ایجاد شده‌اند، اما دقت‌شان کمتر از توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک است. در تخمین نقطه‌ای، مقدار رطوبت در یک نقطه خاص منحنی رطوبتی (θ,h) تخمین زده می‌شود. این نقاط ممکن است مقدار رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی (FC) و پژمردگی دائم (PWP)، که به ترتیب مربوط به مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال است، و یا هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) (سالکاو و همکاران، ۱۹۹٦)، یا ظرفیت آب قابل استفاده (AWC) که اختلاف بین رطوبت (FC) و (PWP) است (باتجس، ۱۹۹٦؛ سالکاو و همکاران، ۱۹۹٦)، یا مقدار رطوبت در یک پتانسیل ماتریک مشخص (باتجس، ۱۹۹٦؛ پاچپسکی و همکاران، ۱۹۹٦)، یا هدایت هیدرولیکی در یک پتانسیل ماتریک مشخص باشد (تامری و همکاران، ۱۹۹٦). شکل عمومی این توابع به صورت رابطه ۱-۱ ارائه شده است (فرخیان فیروزی و همایی، ۱۳۸٤):

$$\theta_h = a\ sand + b\ silt + c\ clay + d\ organic\ matter + e\ dry\ bulk\ density + \ldots + x \qquad (۱-۱)$$

که در آن: θ_h مقدار رطوبت در پتانسیل ماتریک h و a، b، c و e ضرایب همبستگی معادله‌اند. متغیر x می‌تواند هر یک از ویژگی‌های زودیافت خاک باشد.

در توابع انتقالی پارامتریک، پارامترهای مدل‌های هیدرولیکی (θ_h و K_h) مانند مدل وان‌گنوختن (۱۹۸۰)، گاردنر و همکاران (۱۹۷۰) و مدل بروکز و کوری (۱۹٦٤) تخمین زده می‌شود (کای- هوا و همکاران، ۲۰۱۱). سپس این پارامترها با استفاده از توابع انتقالی با خصوصیات اصلی زودیافت خاک ارتباط داده می‌شوند. برتری عمده توابع پارامتریک نسبت به توابع نقطه‌ای در آن است که می‌توان آنها را مستقیماً در مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به کار گرفت (وستن و همکاران، ۲۰۰۱).

1-Point PTFs
2- Parametric PTFs