دانشکده کشاورزی
رساله دکتری رشته مهندسی آب

مقیاس‌سازی معادله ریچاردز برای خاک‌های غیرمتشابه

مرتضی صادقی

استاد راهنما
دکتر بیژن قهرمان

استادان مشاور
دکتر کامران داوری
دکتر علی‌نقی ضیائی

دی ۱۳۹۱

چکیده

پس از ارائه نظریه محیط‌های متشابه، روش‌های مقیاس‌سازی در فیزیک خاک ظهور یافتند. یکی از کاربردهای مقیاس-سازی، رسیدن به حل عمومی معادله ریچاردز است، به‌نحویکه برای موارد زیادی از جریان رطوبت در خاک‌های غیراشباع کفایت کند. در طول نیم‌قرن گذشته، بسیاری از این دست روش‌ها برای خاک‌های موسوم به "متشابه" ارائه شدند. غالباً خاک‌هایی متشابه در نظر گرفته می‌شوند که دارای هندسه میکروسکپی متشابه یا توابع هیدرولیکی متشابه باشند. این شرط تشابه به‌ندرت در واقعیت برقرار است و به عنوان یک محدودیت برای کاربرد روش‌های مقیاس‌سازی در خاک‌های واقعی محسوب می‌شود. با توجه به این محدودیت، این مطالعه با هدف ارائه روشی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز برای خاک‌های غیرمتشابه انجام شد. در این رساله، دو روش در راستای این هدف ارائه می‌شوند. روش اول از مدل‌های نمایی توابع هیدرولیکی موسوم به گاردنر – کوزنی استفاده می‌کند. برای آزمون این روش، فرآیندهای نفوذ و زهکشی موردنظر قرار گرفتند و معادله مقیاس‌شده ریچاردز به صورت عددی برای پنج خاک برگرفته از مراجع (از شن تا رس) حل گردید. حل‌های به‌دست‌آمده برای گستره وسیعی از شرایط یکسان (مستقل از خاک) بودند که مؤید کارایی این روش پیشنهادی می‌باشد. یک عیب این روش محدود شدن آن به توابع هیدرولیکی نمایی است که غالباً در تشریح مقادیر اندازه‌گیری‌شده در گستره کامل رطوبتی با شکست مواجه می‌شوند. در راستای رفع این محدودیت، روش دوم توسعه یافت که مدل‌های توانی – نمایی را برای توابع هیدرولیکی فرض می‌کند که کاراتر از توابع گاردنر – کوزنی می‌باشند. این روش نیز با حل عددی معادله مقیاس‌شده ریچاردز برای نفوذ و زهکشی در چهار خاک (از شن تا رس) از بانک خاک UNSODA، ارزیابی شد. حل‌های به‌دست‌آمده برای خاک‌های مختلف غالباً یکسان بوده و عدم وابستگی معادله مقیاس‌شده ریچاردز به ویژگی‌های خاک را تأیید نمودند. امکان حل معادله ریچاردز نیز با استفاده از این روش‌های مقیاس‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، حل‌های عددی معادله مقیاس‌شده ریچاردز برای فرآیند نفوذ، با استفاده از یک شکل مقیاس‌شده از معادله سه‌جزئی فیلیپ با ضرایب مستقل از خاک تقریب زده شد. حل تقریبی به دست آمده با استفاده از داده‌های موجود در منابع مربوط به آزمایش‌های نفوذ بر روی یک خاک شنی و دو خاک رسی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این حل می‌تواند برآورد قابل قبولی از مقادیر اندازه‌گیری‌شده نفوذ به دست دهد. همچنین نشان داده شد که این حل تقریب مناسبی از حل عددی معادله ریچاردز ارائه می‌دهد. بنابراین، این روش‌های مقیاس‌سازی می‌توانند به عنوان ابزارهایی نویدبخش برای کاهش محاسبات پیچیده مربوط به حل عددی معادله ریچاردز و نیز احتمالاً برای غلبه بر مشکل تغییرپذیری مکانی خاک‌ها از طریق ارتباط با روش‌های فرامقیاس‌سازی، به کار آیند.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های غیراشباع، توابع گاردنر – کوزنی، توابع توانی – نمایی، نفوذ، زهکشی.

تشکر و قدردانی

حال که مراحل انجام این رساله به پایان رسیده است، خداوند جهان را شاکرم که به من توانایی آموختن و اندیشیدن داد و بعد از خدا بر خود واجب می‌دانم که از تمام کسانی که در این راه مرا یاری و همراهی نمودند، قدردانی کنم. از جناب دکتر بیژن قهرمان استاد راهنمای این رساله به خاطر هر آنچه که از فیزیک خاک و فراتر از آن از درس زندگی به من آموخت، کمال تشکر را دارم. از دکتر علی‌نقی ضیائی و دکتر کامران داوری که با صبر و حوصله مرا در این رساله مشاوره دادند، قدردانی می‌کنم. از Dr Art Warrick و Dr Don Nielsen که در بهبود علمی این اثر نقش مهمی ایفا نمودند، عمیقاً سپاسگزارم. از Dr Klaus Reichardt، دکتر علیرضا سپاسخواه، دوست خوبم بهزاد قنبریان علویجه، Dr Jan Hopmans، Dr Miroslav Kutilek، Dr Dani Or، Dr Harry Vereecken، Dr Martinus van Genuchten، Dr Jirka Simunek، Dr Scott Jones، Dr Yakov Pachepsky، Dr Bob Horton و Dr Jianting Zhu که در طول انجام رساله از نظرات علمی ایشان بهره برده‌ام، تشکر فراوان دارم. از آقایان دکتر فریبرز عباسی، دکتر محمد غفوری و دکتر حجت امامی که از نظرات ارزنده‌شان به عنوان داور رساله استفاده کرده‌ام، کمال امتنان را دارم. از جناب دکتر امین علیزاده دیگر داور این رساله، که افتخار شاگردی‌شان را دارم و حضور ارزشمندشان همواره باعث دلگرمی من بود، بی‌نهایت ممنونم. از همه دوستان خوبم که در طول این سال‌ها باعث دلگرمی و قوت قلب من بوده‌اند، سپاسگزارم. از این که از نام بردن این دوستان خودداری می‌کنم، عمیقاً عذرخواهی می‌کنم، چراکه ترس آن دارم که نام برخی از عزیزان از قلم بیفتد و شرمنده ایشان گردم. از خانواده خوبم که نه تنها در این سال‌ها بلکه همیشه یار و همراه من بوده‌اند، عمیقاً سپاسگزارم. قلمم ناتوان‌تر از آنست که از پریای عزیزم سپاسگزاری کنم. تنها می‌خواهم این اثر را به او تقدیم کنم، به او که در طول انجام این رساله با مهر خویش مرا همراهی نمود ولی امروز از جور فلک در کنار ما نیست. امیدوارم روحش غرق در شادی باشد.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه ۱

فصل دوم- بررسی منابع ۳

فصل سوم- مواد و روش‌ها ۹

فصل چهارم- نتایج و بحث ۱۱

۴-۱- مقیاس‌سازی معادله ریچاردز با استفاده از توابع گاردنر – کوزنی (روش پیشنهادی اول) ۱۱

۴-۱-۱- وابستگی معادلات مقیاس‌شده به ویژگی‌های خاک ۱۴

۴-۱-۲- خاک‌ها و فرآیندهای آزمون ۱۶

۴-۱-۳- فرآیند نفوذ با بار آبی ثابت ۱۸

۴-۱-۴- فرآیند نفوذ با شار ثابت ۲۰

۴-۱-۵- فرآیند زهکشی ۲۱

۴-۱-۶- تأثیر شرایط اولیه ۲۳

۴-۱-۷- محدودیت‌های روش پیشنهادی اول ۲۶

۴-۲- مقیاس‌سازی معادله ریچاردز با به کارگیری توابع توانی – نمایی (روش پیشنهادی دوم) ۲۷

۴-۲-۱- وابستگی معادلات مقیاس‌شده به ویژگی‌های خاک ۳۰

۴-۲-۲- خاک‌ها و فرآیندهای آزمون ۳۱

۴-۲-۳- توابع هیدرولیکی ۳۵

۴-۲-۴- فرآیند نفوذ ۳۶

۴-۲-۵- فرآیند زهکشی ۴۰

۴-۲-۶- محدودیت‌های روش پیشنهادی دوم ۴۳

۴-۳- حل معادله ریچاردز برای نفوذ آب در خاک با استفاده از مقیاس‌سازی ۴۴

۴-۳-۱- اصلاح توابع هیدرولیکی توانی – نمایی ۴۴

۴-۳-۲- حل تقریبی معادله ریچاردز برای نفوذ آب در خاک ۴۵

۴-۳-۳- حل معادله مقیاس‌شده ریچاردز ۴۶

۴-۳-۴- صحت‌سنجی حل تقریبی ۴۸

فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۵۷

پیوست‌ها ۵۹
پیوست الف- حل عددی معادله ریچاردز ۵۹
پیوست ب- اشتقاق توابع هیدرولیکی مقیاس‌شده (۴-۳۶) تا (۴-۳۸) ۶۲
پیوست پ- فهرست اسامی لاتین ۶۳
فهرست منابع ۶۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱. دو محیط متشابه در حالت متشابه طبق تعریف میلر و میلر (۱۹۵۶). λ_1 و λ_2 دو طول مشخصه فیزیکی متناظر باهم می‌باشند. ۳

شکل ٤-۱. رفتار عوامل $\partial F_1/\partial P$ و $\partial F_3/\partial P$ در معادلات (۲-۲۰) و (۲-۲۳) به عنوان تابعی از h^* و P.....۱۶

شکل ٤-۲. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در دو زمان مقیاس‌شده الف) ۰/۱ و ب) ۱ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش واریک – حسین برای فرآیند نفوذ با بار آبی ثابت و شرایط اولیه $h_1^* = -100$. ..۱۹

شکل ٤-۳. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در دو زمان مقیاس‌شده الف) ۰/۱ و ب) ۱ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند نفوذ با بار آبی ثابت و شرایط اولیه $h_1^* = -100$. ۲۰

شکل ٤-٤. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در دو زمان مقیاس‌شده الف) ۰/۱ و ب) ۰/۵ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند نفوذ با شار ثابت و شرایط اولیه $h_1^* = -100$. ۲۱

شکل ٤-۵. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در دو زمان مقیاس‌شده الف) ۱ و ب) ۱۰ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش واریک – حسین برای فرآیند زهکشی از یک ستون خاک خیس با ارتفاع مقیاس-شده $L^* = 1$.....۲۲

شکل ٤-٦. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در دو زمان مقیاس‌شده الف) ۱ و ب) ۱۰ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند زهکشی از یک ستون خاک خیس با ارتفاع مقیاس‌شده L^* $= 1$. ۲۳

شکل ٤-۷. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در زمان مقیاس‌شده ۱ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند نفوذ با بار آبی ثابت و شرایط اولیه الف) $h_1^* = -1000$ و ب) $h_1^* = -10$. ۲۴

شکل ٤-۸. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در زمان مقیاس‌شده ۰/۵ به دستآمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند نفوذ با شار ثابت و شرایط اولیه الف) $h_1^* = -1000$ و ب) $h_1^* = -10$...۲۵

شکل ٤-۹. نیمرخ‌های پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده در زمان مقیاس‌شده ۱۰ به دست آمده از حل معادله ریچاردز مقیاس‌شده با روش پیشنهادی برای فرآیند زهکشی از یک ستون خاک خیس با ارتفاع مقیاس‌شده الف) ۰/۱ و ب) ۵. .....۲۶

شکل ٤-۱۰. تابع هدایت هیدرولیکی خاک‌های ۳۱۴۲ (سمت چپ) و ۱۴۰۰ (سمت راست). نقاط مقادیر اندازه‌گیری-شده، خطهای ممتد برازش تابع توانی (۴-۲۵) (توابع بروکس – کوری و توانی – نمایی) و خط‌چین‌ها برازش معادله (۴-۱۱) (تابع گاردنر) می‌باشند. ۳۵

شکل ٤-١١. منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های ۳۱۴۲ (سمت چپ) و ۱۴۰۰ (سمت راست). نقاط مقادیر اندازه-گیری‌شده، خط‌های ممتد برازش تابع توانی (۴-۱) (تابع بروکس – کوری) و خط‌چین‌ها برازش معادله (۴-۴۳) می-باشند. ۳۶

شکل ٤-١٢. نیمرخ‌های رطوبت مقیاس‌شده با استفاده از روش واریک – حسین برای فرآیند نفوذ با فرض $\theta_1^* = 0.02$ (سمت چپ) و $\theta_1^* = 0.2$ (سمت راست) در زمان مقیاس‌شده $t^* = 0.1$. ۳۷

شکل ٤-١٣. نیمرخ‌های رطوبت مقیاس‌شده با استفاده از روش پیشنهادی برای فرآیند نفوذ با فرض $D_1^* = 1E-4$ (سمت چپ) و $D_1^* = 1E-2$ (سمت راست). ۳۸

شکل ٤-١٤. مقادیر $G = |\Delta h^*| / \Delta z^*$ متناظر با نتایج مقیاس‌شده روش پیشنهادی در شکل (۴-۱۳). ۴۰

شکل ٤-١٥. نیمرخ‌های رطوبت مقیاس‌شده با استفاده از روش واریک – حسین برای فرآیند زهکشی از یک ستون خاک با ارتفاع مقیاس‌شده $L^* = 0.1$ (سمت چپ) و $L^* = 0.5$ (سمت راست) در زمان مقیاس‌شده $t^* = 0.1$. ۴۱

شکل ٤-١٦. نیمرخ‌های رطوبت مقیاس‌شده با استفاده از روش پیشنهادی برای فرآیند زهکشی از یک ستون خاک با ارتفاع مقیاس‌شده $L^* = 0.1$ (سمت چپ) و $L^* = 0.5$ (سمت راست) با فرض $K_1^* = 5E-3$. ۴۲

شکل ٤-١٧. نتایج حل معادله مقیاس‌شده ریچاردز برای خاک‌های مختلف با رطوبت اولیه متناظر با $D_1^* = 1E-1$ (سمت چپ) و $D_1^* = 1E-4$ (سمت راست). A، B و C ضرایب معادله (۴-۵۱) می‌باشند که از بهترین برازش این معادله (خط ممتد) به حلهای مقیاس‌شده به دست آمدند. R^2 ضریب تعیین می‌باشد. ۴۸

شکل ٤-١٨. توابع هیدرولیکی خاک شنی بری و همکاران (۱۹۹۵). نقاط، خط ممتد و خط‌چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری‌شده، توابع توانی – نمایی اصلاح‌شده، روابط (۴-۴۷) و (۴-۴۸)، و توابع ون‌گنوختن – معلم می‌باشند. MAE میانگین خطای مطلق می‌باشد. ۵۰

شکل ٤-١٩. توابع هیدرولیکی خاک رسی بوهنه و همکاران (۱۹۹۳) مربوط به آزمایش ۱.۱. نقاط، خط ممتد و خط-چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری‌شده، توابع توانی – نمایی اصلاح‌شده، روابط (۴-۴۷) و (۴-۴۸)، و توابع ون‌گنوختن – معلم می‌باشند. ۵۱

شکل ٤-٢٠. توابع هیدرولیکی خاک رسی بوهنه و همکاران (۱۹۹۳) مربوط به آزمایش ۵.۱. نقاط، خط ممتد و خط-چین به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر اندازه‌گیری‌شده، توابع توانی – نمایی اصلاح‌شده، روابط (۴-۴۷) و (۴-۴۸)، و ون-گنوختن – معلم می‌باشند. ۵۲

شکل ٤-٢١. مقایسه منحنی‌های نفوذ حاصل از معادله (۴-۵۱) (خط ممتد، App)، حل عددی معادله ریچاردز با توابع توانی – نمایی اصلاح‌شده (خط‌چین، REEP) و توابع ون‌گنوختن – معلم (خط – نقطه، REVG) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده (نقاط، M) توسط بری و همکاران (۱۹۹۵) (بالا)، بوهنه و همکاران (۱۹۹۳) در آزمایش ۱.۱ (وسط) و آزمایش ۵.۱ (پایین). ۵۵

فهرست جدول‌ها

جدول ٤-١. پارامترهای بروکس – کوری و گاردنر – کوزنی خاکهای انتخاب‌شده (کاواموتو و همکاران، ۲۰۰۶)..... ۱۷

جدول ٤-٢. شرایط اولیه و مرزی در سه فرآیند آزمون..... ۱۸

جدول ٤-٣. شرایط اولیه و مرزی مقیاس‌شده در سه فرآیند آزمون..... ۱۸

جدول ٤-٤. پارامترهای مدل‌های بروکس – کوری و توانی – نمایی خاک‌های انتخاب‌شده..... ۳۲

جدول ٤-٥. شرایط اولیه و مرزی در دو فرآیند آزمون..... ۳۳

جدول ٤-٦. شرایط اولیه و مرزی مقیاس‌شده در دو فرآیند آزمون..... ۳۴

جدول ٤-٧. ضرایب معادله (۴-۵۱) حاصل از برازش به حل‌های معادله مقیاس‌شده ریچاردز..... ۴۹

جدول ٤-٨. پارامترهای توابع توانی – نمایی اصلاح شده، روابط (۴-۴۷) تا (۴-۴۹)، و توابع ون‌گنوختن – معلم برای خاک‌های مورد مطالعه (اطلاعات خاک‌های شن و رس به ترتیب از مطالعات بری و همکاران (۱۹۹۵) و بوهنه و همکاران (۱۹۹۳) اخذ شده‌اند) و شرایط رطوبتی مرزی و اولیه در آزمایش‌های نفوذ. a، n و m پارامترهای توابع ون-گنوختن – معلم می‌باشند..... ۵۲

فهرست علائم و اختصارات

α	Scale parameter of vanGenuchten functions	پارامتر مقیاس توابع ون‌گنوختن
θ	Soil water content	درصد رطوبت حجمی
θ^*	Scaled soil water content	درصد رطوبت حجمی مقیاس‌شده
θ_s	Saturated water content	درصد رطوبت اشباع
θ_r	Residual water content	درصد رطوبت باقی‌مانده
θ_t	Threshold water content	درصد رطوبت آستانه در توابع توانی – نمایی
θ_0	Boundary water content (in infiltration process)	درصد رطوبت مرزی (در فرآیند نفوذ)
θ_1	Initial water content (in infiltration process)	درصد رطوبت اولیه (در فرآیند نفوذ)
λ	Shape parameter of Brooks – Corey functions	پارامتر شکل توابع بروکس – کوری
CV	Mean coefficient of variations	میانگین ضریب تغییرات
D	Soil water diffusivity	ضریب پخشیدگی آب در خاک
D^*	Scaled diffusivity	ضریب پخشیدگی مقیاس‌شده
D_0	Boundary diffusivity (in infiltration process)	ضریب پخشیدگی مرزی (در فرآیند نفوذ)
G	Gradient of matric potential	گرادیان پتانسیل ماتریک
h	Matric potential	پتانسیل ماتریک
h^*	Scaled matric potential	پتانسیل ماتریک مقیاس‌شده
h_b	Air-entry suction head	پتانسیل ماتریک ورود هوا
h_{cM}	Effective capillary derive	عامل موئینگی مؤثر
h_0	Boundary matric potential (in infiltration process)	پتانسیل ماتریک مرزی (در فرآیند نفوذ)
h_1	Initial matric potential (in infiltration process)	پتانسیل ماتریک اولیه (در فرآیند نفوذ)
I	Cumulative infiltration	مقدار نفوذ تجمعی
I^*	Scaled cumulative infiltration	مقدار نفوذ تجمعی مقیاس‌شده
K	Unsaturated hydraulic conductivity	هدایت هیدرولیکی غیراشباع
K^*	Scaled hydraulic conductivity	هدایت هیدرولیکی مقیاس‌شده
K_s	Saturated hydraulic conductivity	هدایت هیدرولیکی اشباع
K_0	Boundary hydraulic conductivity (in infiltration process)	هدایت هیدرولیکی مرزی (در فرآیند نفوذ)
L	Soil column depth (in drainage process)	ارتفاع ستون خاک (در فرآیند زهکشی)
L^*	Scaled soil column depth (in drainage process)	ارتفاع مقیاس‌شده ستون خاک (در فرآیند زهکشی)

MAE	Mean absolute error	میانگین خطای مطلق
m	Shape parameter of vanGenuchten functions	پارامتر شکل توابع ون‌گنوختن
n	Shape parameter of vanGenuchten functions	پارامتر شکل توابع ون‌گنوختن
P	Shape parameter of Brooks – Corey functions	پارامتر شکل توابع بروکس – کوری
q	Water flux	شار جریان رطوبت
q^*	Scaled water flux	شار جریان رطوبت مقیاس‌شده
s	Shape parameter of Exponential – Power functions	پارامتر شکل توابع توانی – نمایی
t	Time	زمان
t^*	Scaled time	زمان مقیاس‌شده
v	Shape parameter of Brooks – Corey functions	پارامتر شکل توابع بروکس – کوری
z	Soil depth	عمق خاک
z^*	Scaled soil depth	عمق خاک مقیاس‌شده
z_0	Length scaling factor	عامل مقیاس طول

فصل اول– مقدمه

یک مشکل اساسی پیش روی دانشمندان علوم مرتبط با خاک نحوه برخورد با تغییرپذیری خاک‌هاست. این تغییر-پذیری به‌ویژه در توابع هیدرولیکی خاک‌ها، به طور عمده شامل منحنی مشخصه رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع، تحلیل روابط جریان آب در خاک را به‌ویژه در خاک‌های ناهمگن با مشکل مواجه می‌کند (واریک و همکاران، ۱۹۷۷). به منظور غلبه بر این مشکل، نظریه "محیط‌های متشابه" توسط میلر و میلر (۱۹۵۶) مطرح گردید.

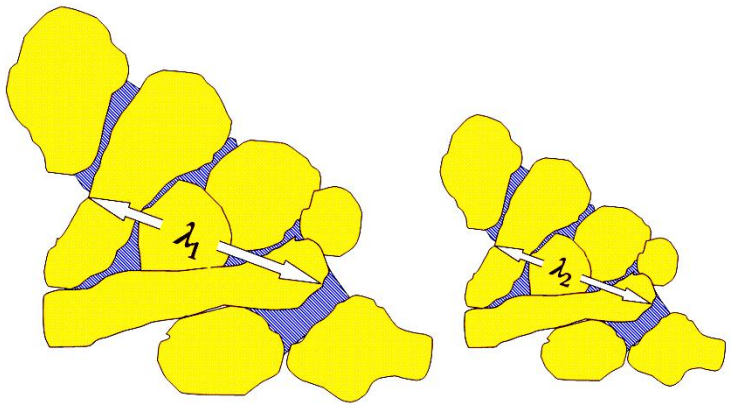
با تکیه بر نظریه محیط‌های متشابه، مفهوم مقیاس‌سازی در دانش فیزیک خاک ظهور یافت که امروزه به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بیان تغییرپذیری توابع هیدرولیکی خاک شناخته می‌شود. یکی از کاربردهای مهم مقیاس‌سازی در فیزیک خاک، مقیاس‌سازی معادله ریچاردز می‌باشد که به منظور دستیابی به یک شکل عمومی و مستقل از خاک از این معادله صورت می‌گیرد. در نتیجه، می‌توان از یک حل منفرد معادله مقیاس‌شده ریچاردز برای خاک‌ها و شرایط مختلفی استفاده نمود. بر این اساس، روش‌های مقیاس‌سازی به کاهش حجم محاسبات پیچیده عددی کمک قابل ملاحظه‌ای می‌کنند (واریک و حسین، ۱۹۹۳).

یک محدودیت عمده در روش‌های موجود مقیاس‌سازی معادله ریچاردز این است که این روش‌ها برای خاک‌های متشابه (دارای تشابه هندسی و یا تشابه در شکل توابع هیدرولیکی) قابل کاربرد هستند. وجود شرط تشابه یک محدودیت بزرگ در کاربرد این روش‌ها در شرایط واقعی محسوب می‌شود. چراکه در واقعیت و در برخورد با خاک‌های طبیعی، فرض تشابه خاک‌ها به ندرت اعتبار می‌یابد. این مساله در مناطق وسیع‌تر و با تغییرپذیری مکانی زیادتر (مثلاً در سطح یک حوضه آبریز) نمایان‌تر می‌باشد. به همین منظور و برای رفع محدودیت مذکور، این تحقیق بر پایه این فرضیه

که "امکان حذف شرط تشابه در مقیاس‌سازی معادله ریچاردز وجود دارد"، شکل گرفت. هدف عمده از انجام این رساله، ارائه روشی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز بدون نیاز به شرط تشابه برای خاک‌ها بوده است. در نتیجه این تحقیق، دو روش برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز حاصل گردید (صادقی و همکاران، ۲۰۱۲a، ۲۰۱۲b) که در فصل‌های بعدی تشریح خواهند شد.

فصل دوم– بررسی منابع

بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، دو خاک را می‌توان متشابه نامید به شرطی که یک عامل مقیاس مانند γ وجود داشته باشد که بتواند یک خاک را به خاک دیگر تبدیل کند. با این تعریف، دو محیط متشابه دارای درجه تخلخل برابر و دارای منافذ و ذرات دو به دو متشابه خواهند بود. در این نظریه، نسبت دو طول مشخصه فیزیکی متناظر از دو محیط می‌تواند به عنوان عامل مقیاس یک محیط را به محیط دیگر تبدیل نماید. در شکل (۲-۱) دو محیط که طبق تعریف میلر و میلر (۱۹۵۶) متشابه می‌باشند، نشان داده شده است. در این شکل عامل مقیاس λ_2/λ_1 می‌تواند محیط اول را به محیط دوم تبدیل نماید. این دو محیط همچنین از نظر وضعیت رطوبتی دارای درصد رطوبت برابر و یا طبق تعریف میلرها در "حالت متشابه" قرار دارند.



شکل ۲-۱. دو محیط متشابه در حالت متشابه طبق تعریف میلر و میلر (۱۹۵۶). λ_1 و λ_2 دو طول مشخصه فیزیکی متناظر باهم می-باشند.

بر اساس روابطی مانند موبینگی و پوازیه، پتانسیل ماتریک (h) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک (K) به ترتیب با معکوس و مربع شعاع منافذ خاک متناسب می‌باشند. بنابراین، بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، h و K در N خاک متشابه در حالت متشابه می‌توانند به صورت زیر مقیاس شوند:

$$\gamma_1 h_1 = \gamma_2 h_2 = ... = \gamma_N h_N = h^* \qquad (۱-۲)$$

$$\frac{K_1}{\gamma_1^{\,2}} = \frac{K_2}{\gamma_2^{\,2}} = ... = \frac{K_N}{\gamma_N^{\,2}} = K^* \qquad (۲-۲)$$

که در این روابط γ_i عامل مقیاس محیط iام و h^* و K^* به ترتیب پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی مقیاس‌شده می‌باشند که برای خاک‌های متشابه در حالت متشابه یکسان‌اند.

با ارائه مفهوم محیط‌های متشابه، میلر و میلر (۱۹۵۶) آنگاه مفهوم "جریان‌های متشابه" را با مقیاس‌سازی معادلات دارسی و پیوستگی مطرح نمودند. آن‌ها اظهار داشتند که جریان آب در دو خاک متشابه تحت شرایط مرزی و اولیه مقیاس‌شده یکسان، متشابه خواهد بود.

کلوت و ویلکینسون (۱۹۵۸) کارایی نظریه میلرها را با آزمایش بر روی پنج نمونه خاک شنی که دارای منحنی‌های توزیع اندازه ذرات متشابه ولی دارای میانگین اندازه ذرات مختلف بودند، آزمودند. آن‌ها میانگین اندازه ذرات خاک‌ها را به عنوان طول مشخصه فیزیکی متناظر در خاک‌های متشابه تعریف و توابع هیدرولیکی این خاک‌ها را مقیاس نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که توابع هیدرولیکی مقیاس‌شده برای همه خاک‌ها تقریباً یکسان می‌باشند. ویلکینسون و کلوت (۱۹۵۹) نیز نظریه میلرها را برای مقیاس‌سازی فرآیندهای آب در خاک آزمودند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های نفوذ، توزیع مجدد و زهکشی بر روی خاک‌های متشابه کلوت و ویلکینسون (۱۹۵۸) و مشاهده نتایج مقیاس‌شده یکسان برای خاک‌های مختلف، مفهوم جریان‌های متشابه میلرها را معتبر خواندند.

به منظور کاربردی ساختن نظریه میلرها، واریک و همکاران (۱۹۷۷)، سیمونز و همکاران (۱۹۷۹)، ووگل و همکاران (۱۹۹۱)، و کوزوگی و هاپمنز (۱۹۹۸) از جمله محققینی بودند که تعاریف مختلفی از محیط‌های متشابه ارائه

نمودند. اگرچه این تعاریف در جزئیات متفاوت می‌باشند، در همگی آن‌ها تشابه خاک‌ها به تشابه در شکل توابع هیدرولیکی (برابری در پارامتر شکل آن‌ها) وابسته می‌باشد. همچنین این محققین اظهار داشتند که عوامل مقیاس به دست آمده از منحنی مشخصه و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌توانند متفاوت باشند. صادقی و قهرمان (۱۳۸۹) هم به صورت نظری و هم با مطالعه بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان دادند که تشابه خاک‌ها لزوماً منجر به برابری عوامل مقیاس به دست آمده از منحنی مشخصه و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع نمی‌شود. آن‌ها این برابری را اثر درستی روابطی مانند مووینگی و پوازیه در خاک‌ها دانسته و یک معیار کمّی برای بررسی این درستی ارائه نمودند.

طی چهار دهه اخیر، روش‌های مقیاس‌سازی با تکیه بر مفهوم محیط‌های متشابه، در دانش فیزیک خاک توسعه فراوانی پیدا کردند و به طور عمده در دو حوزه به کار گرفته شدند: الف) برای بیان تغییرپذیری مکانی توابع هیدرولیکی خاک‌ها (واریک و همکاران، ۱۹۷۷، ووگل و همکاران، ۱۹۹۱، آهوجا و ویلیامز، ۱۹۹۱، شوسه و موهنتی، ۱۹۹۸، تولی و همکاران، ۲۰۰۱، داس و همکاران، ۲۰۰۵، ناستا و همکاران، ۲۰۰۹، صادقی و همکاران، ۱۳۸۹، قهرمان و همکاران، ۱۳۹۰الف، شلوتر و همکاران، ۲۰۱۲) و ب) برای اشتقاق حل‌های عمومی فرآیندهای آب در خاک مانند نفوذ (شارما و همکاران، ۱۹۸۰، رسول‌زاده و سپاسخواه، ۲۰۰۳، قهرمان و همکاران، ۱۳۹۰ب)، تبخیر (کوزاک و آهوجا، ۲۰۰۵) و جابه-جایی املاح (شوکلا و همکاران، ۲۰۰۲، صادقی و جونز، ۲۰۱۲).

در حوزه کاربرد اول، مقیاس‌سازی با بیان تغییرپذیری مکانی خاک‌ها با استفاده از یک (یا دو یا نهایتاً سه) عامل مقیاس نسبت به یک منحنی مرجع (یا میانگین) به عنوان ابزاری قدرتمند در جهت کاهش تعداد پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی جریان غیراشباع در خاک‌های ناهمگن، به کار گرفته می‌شود. از این طریق، مقیاس‌سازی به کاهش قابل ملاحظه‌ای در حجم محاسبات عددی و زمان شبیه‌سازی می‌انجامد و به علاوه در روش‌های مدلسازی معکوس، اولاً به کاهش اندازه‌گیری‌های مورد نیاز و ثانیاً به کاهش عدم قطعیت پارامترهای تخمین‌زده شده، کمک چشمگیری می‌کند (به عنوان مثال، عباسی و همکاران (۲۰۰۳)). به همین دلیل است که در یکی از مطرح‌ترین مدل‌های شبیه-سازی جریان در خاک‌های غیراشباع، HYDRUS (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۵)، از مقیاس‌سازی به عنوان یک ابزار استاندارد برای تشریح تغییرپذیری مکانی خاک‌ها استفاده می‌شود.

یکی از کاربردهای مهم مفهوم مقیاس‌سازی در فیزیک خاک (در حوزه کاربرد دوم)، مقیاس‌سازی معادله حاکم بر جریان آب در خاک‌های غیراشباع، موسوم به معادله ریچاردز (ریچاردز، ۱۹۳۱) می‌باشد که از ترکیب معادلات دارسی و پیوستگی به دست می‌آید و در حالت یک‌بعدی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial h}{\partial z} - K \right) \qquad (۳-۲)$$

که q شار جریان رطوبت، θ درصد رطوبت حجمی خاک، h پتانسیل ماتریک، K هدایت هیدرولیکی غیراشباع، z عمق خاک و t زمان می‌باشد.

مقیاس‌سازی معادله ریچاردز به منظور دستیابی به حل‌های عمومی و مستقل از خاک صورت می‌گیرد، به‌نحویکه بتوان از یک حل منفرد این معادله (برای یک خاک و شرایط مشخص) برای خاک‌ها و شرایط مختلفی استفاده نمود. روش‌های متعددی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز برای شرایط مختلف و با ارائه تعاریف متفاوت از عوامل مقیاس، ارائه شده‌اند (رِیچارد و همکاران، ۱۹۷۲، واریک و آموزگار–فرد ۱۹۷۹، یانگز و پرایس، ۱۹۸۱، واریک و همکاران، ۱۹۸۵، اسپوزیتو و جوری، ۱۹۸۵، ووگل و همکاران، ۱۹۹۱، کوتیلک و همکاران، ۱۹۹۱، واریک و حسین، ۱۹۹۳، وو و پن، ۱۹۹۷، صادقی و همکاران، ۲۰۱۱). از یک نقطه نظر، روش‌های مقیاس‌سازی معادله ریچاردز می‌توانند به دو گروه تقسیم شوند (کوتیلک و نیلسن، ۱۹۹۴).

گروه نخست شامل روش‌هایی است که در آن‌ها عوامل مقیاس از توابع هیدرولیکی خاک‌ها مشتق می‌شوند به - نحویکه منجر به توابع هیدرولیکی مقیاس‌شده یکسان برای خاک‌های متشابه گردند. بنابراین، عوامل مقیاس در این روش‌ها کمیّت‌های ثابتی برای هر خاک و مستقل از شرایط مرزی و اولیه می‌باشند. با استفاده از این روش‌ها، حل‌های مقیاس‌شده معادله ریچاردز برای خاک‌های متشابه تنها زمانی یکتا خواهند بود که شرایط مرزی و اولیه مقیاس‌شده در این خاک‌ها یکسان باشند. شرط مذکور به عنوان یک محدودیت برای این روش‌ها محسوب می‌شود. روش‌های واریک و آموزگار–فرد (۱۹۷۹)، واریک و همکاران (۱۹۸۵) و ووگل و همکاران (۱۹۹۱) مثال‌هایی از این دست می‌باشند.

در گروه دوم، عوامل مقیاس علاوه بر در نظر گرفتن توابع هیدرولیکی خاک‌ها، شرایط و مرزی اولیه حاکم بر حل را نیز مدنظر قرار می‌دهند، به‌نحویکه شرایط مرزی و اولیه مقیاس‌شده در همه حالات ثابت و تغییرناپذیر باشند. برتری عمده این روش‌ها در مقایسه با روش‌های گروه نخست این است که حل‌های مقیاس‌شده معادله ریچاردز به شرایط مرزی و اولیه وابسته نخواهند بود. اما در مقایسه با روش‌های گروه نخست، این روش‌ها به فرآیندهای آبی و یا مدل‌های هیدرولیکی خاصی محدود می‌شوند.

رِیچارد و همکاران (۱۹۷۲) روشی از این دست را برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز تنها در شرایط نفوذ افقی در خاک‌های یکنواخت ارائه نمودند. سیمونز و همکاران (۱۹۷۹) نیز روشی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز برای فرآیند توزیع مجدد ارائه نمودند. آن‌ها فرض کردند که توابع هیدرولیکی خاک‌ها از مدل‌های نمایی پیروی می‌کنند. کوتیلک و همکاران (۱۹۹۱) یک شکل مقیاس‌شده از معادله ریچاردز برای شرایط نفوذ با شار مرزی ثابت ارائه کردند، به‌نحویکه در این روش حل‌های مقیاس‌شده نسبت به شار مرزی تغییرناپذیر می‌باشند. واریک و حسین (۱۹۹۳) نیز حل‌های مقیاس-شده دیگری برای شرایط نفوذ با شار و بار آبی مرزی ثابت و همچنین برای شرایط زهکشی از یک ستون متناهی ارائه نمودند. در هر دو مطالعه اخیر، فرض گردید که توابع هیدرولیکی خاک‌ها از مدل‌های توانی بروکس و کوری (۱۹۶۴) پیروی می‌کنند.

صادقی و همکاران (۲۰۱۱) با نگاهی جدید به روش‌های گروه دوم، روشی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز در شرایط توزیع مجدد ارائه نمودند، به‌نحویکه این روش به شکل خاصی از توابع هیدرولیکی محدود نشود و امکان استفاده از همه مدل‌های ارائه شده برای توابع هیدرولیکی در حل معادله ریچاردز وجود داشته باشد. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این روش، حل‌های مقیاس‌شده معادله ریچاردز مستقل از شرایط اولیه بوده و برای گستره وسیعی از خاک‌ها یکتا می‌باشند.

همان‌طور که در فصل قبل ذکر شد، یک محدودیت عمده در روش‌های موجود مقیاس‌سازی معادله ریچاردز این است که کاربرد این روش‌ها به خاک‌های متشابه (دارای تشابه هندسی و یا تشابه در شکل توابع هیدرولیکی) محدود می‌شود که قیدی بزرگ برای کاربرد در شرایط واقعی (خاک‌های غیرمتشابه) محسوب می‌شود. بر این اساس در این

رساله، روش‌هایی برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز برای خاک‌های غیرمتشابه معرفی می‌شود. این روش‌ها به طور عمده در توابع هیدرولیکی استفاده شده و تعریف عوامل مقیاس تفاوت دارند که به برتری‌ها و محدودیت‌های هر یک اشاره خواهد شد.

فصل سوم– مواد و روش‌ها

در طول انجام این رساله، دو روش متفاوت برای مقیاس‌سازی معادله ریچاردز به دست آمد. در روش اول، با فرض توابع هیدرولیکی نمایی موسوم به گاردنر – کوزنی و تغییر مقیاس متغیرهای معادله ریچاردز، شکلی مقیاس‌شده از این معادله به دست آمد که دارای شکل یکسان با معادله اصلی می‌باشد. در فصل بعد جزئیات اشتقاق این روش ارائه می‌شود و هم به صورت نظری و هم به صورت عددی نشان داده می‌شود که حل این معادله مقیاس‌شده برای گستره وسیعی از خاک‌های غیرمتشابه یکسان می‌باشد.

به منظور ارزیابی کارایی این روش در خاک‌های غیرمتشابه، نتایج حاصل از این روش و روش واریک و حسین (۱۹۹۳) با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. بدین منظور پنج خاک غیرمتشابه از کلاس‌های بافتی مختلف از مطالعه کاواموتو و همکاران (۲۰۰۶) انتخاب شدند. ارزیابی‌های واریک و حسین (۱۹۹۳) برای هر دو روش واریک – حسین و پیشنهادی انجام شد. معادله مقیاس‌شده ریچاردز به صورت عددی حل گردید. ازآنجاکه مدل‌های عددی رایج (مانند HYDRUS و SWAP) توابع هیدرولیکی گاردنر – کوزنی را شامل نمی‌شوند، برای انجام حل عددی، برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شد. حل عددی با روش تفاضل‌های محدود با طرح کاملاً ضمنی استفاده‌شده در مدل HYDRUS یک‌بعدی (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۵) صورت گرفت. جزئیات این طرح در پیوست (الف) آمده است.

همانند واریک و حسین (۱۹۹۳)، سه فرآیند آزمون در نظر گرفته شد: ۱) فرآیند نفوذ با بار آبی ثابت به داخل یک خاک خشک با رطوبت اولیه یکنواخت، ۲) فرآیند نفوذ با شار ثابت به داخل یک خاک خشک با رطوبت اولیه یکنواخت، ۳) فرآیند زهکشی از یک ستون خاک خیس با رطوبت اولیه یکنواخت.