مدل‌سازی جریان ترجیحی با استفاده از مدل موج سینماتیک- پخشی (KDW) در خاک و نقش ماکروپورها در ایجاد آن

محمدرضا میرزایی [۱*] و استفان قوی [۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸)

چکیده

جریان ترجیحی هم از لحاظ محیطی و هم از لحاظ سلامت انسان دارای اهمیت به‌سزایی است. به‌طوری که انتقال سریع آب و در نتیجه آلوده‌کننده‌ها و سموم کشاورزی از این طریق وارد خاک و آب‌های زیرزمینی خواهند شد. درحالی‌که اندازه‌گیری و کمی‌سازی آن بسیار مشکل است. در این تحقیق، با استفاده از نمونه‌های خاک و انجام بارش مصنوعی به‌وسیله یک شبیه‌ساز کوچک باران، سعی در کمی‌سازی میزان جریان ماکروپورها و مدل‌سازی جریان ترجیحی گردید. در این راستا از دو مدل استفاده شد: ۱) مدل موج سینماتیکی ارائه شده توسط جرمان در سال ۱۹۸۴ و ۲) مدل توسعه داده شده آن به نام مدل موج سینماتیکی- پخشی ارائه شده در سال ۲۰۰۳ توسط دیپیترو و همکاران. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده توسط دی پینترو و همکاران دارای دقت بیشتری نسبت به مدل جرمان است. سپس، یک روش ابتکاری جهت محاسبه مقدار ماکروپورها به‌کار گرفته شد. نتایج رگرسیون نشان داد که مقدار آب ترجیحی رابطه معنی‌داری با کل میزان تخلخل خاک ندارد (R2 =۰/۳۶)، و در مقابل با مقدار ماکروپورها با ضریب تبیین R^2= ۰/۷۶ (α <۰/۰۰۱) دارای یک رابطه معنی‌دار است.

واژه‌های کلیدی: جریان ترجیحی، مدل موج سینماتیک، ماکروپور، محیط متخلخل، شبیه‌ساز باران

۱. گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج
۲. انستیتو ملی تحقیقات کشاورزی مرکز اوینیون، آوینیون، فرانسه
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mmirzaei@yu.ac.ir

مقدمه

جریان ترجیحی (جریان کانالی، ماکروپورها یا میان‌بر) در خاک، پدیده فیزیکی حرکت سریع آب، مواد و یا محلول‌ها را در خاک دارای ساختار توضیح می‌دهد (۱۶). این جریان تقریباً در تمامی خاک‌ها، صرف‌نظر از بافت آنها، صورت می‌گیرد (۵ و ۱۸) و اغلب آن را به وجود ماکروپورها ربط می‌دهند.

مطالعات متعددی نشان داده که جریان ترجیحی تأثیر به‌سزایی بر میزان نفوذپذیری در مقیاس‌های مختلف همچون دامنه (۱۷) و حوضه آبخیز (۱۹) دارد که می‌تواند تأثیر مهمی بر انتقال مواد (۱۵) بگذارد. از این‌رو، در مطالعات مربوط به آلودگی‌های خاک، آلودگی حتی تغذیه آب‌های زیر زمینی دارای اهمیت به‌سزایی است.

به‌منظور به مدل درآوردن این پدیده، معمولاً از دو روش استفاده می‌شود: الف) روش تخلل دوگانه و ب) روش موج سینماتیکی. در روش تخلل دو گانه فرض شده است که جریان آب تنها محدود به ماکروپورها و فضای بین ریزدانه‌های خاک می‌شود و در داخل ماتریکس خاک هیچ‌گونه حرکتی را در نظر نمی‌گیرد. در این مدل، فرض می‌شود که قسمت جامد خاک حاوی آب غیرمتحرک (حرکت بسیار کند) بوده که می‌تواند آب را ذخیره و یا با ذرات جامد دیگر خاک تبادل کند. از این روش در مدل هیدروس (۱۴) استفاده شده است. در روش موج سینماتیکی، تخلل خاک به دو قسمت میکروپورها و ماکروپورها تقسیم می‌شود. جریان در میکروپورها بر اساس نیروی مویینگی است. درحالی‌که در ماکروپورها بر اساس نیروی ثقل و درصورتی‌که ماکروپور بسته باشد و آب در انتهای آن جمع شود، به‌طور نسبی به‌وسیله نیروی موئینگی منتقل می‌شود (۱). این جریان معمولاً از طریق یک تابع توانی محاسبه می‌شود. این روش در مدل MACRO توسط جارویس (۱۲) و همچنین توسط گرکو (۱۱) در مدل VIMAC به‌کار برده شده است.

از زمانی‌که تئوری موج سینماتیکی توسط لایت هیل و وایت من (۱۳) ارائه شده است کاربردهای بسیاری در علوم آب و محیط زیست پیدا کرده است. از کاربردهای این تئوری، توضیح رفتار حوضه آبخیز (به‌طور مثال رابطه بارندگی- رواناب، روندیابی جریان و جریان غیراشباع)، آبیاری، هیدرولوژی منطقه غیراشباع بالای سطح ایستابی و هیدرولوژی رودخانه و مناطق ساحلی است. برود و همکاران (۴) یک مدل موج سینماتیکی ژئومورفولوژیکی را برای تخمین سیلاب‌ها در حوضه‌های آبخیز کوچک آلپی در سوئیس ارائه کرده‌اند.

به‌طورکلی خاک‌هایی که دارای ساختار هستند، مسیرهای قابل ملاحظه‌ای برای جریان آب ایجاد می‌کنند و ممکن است حتی قبل از اینکه خلل و فرج کوچک ماتریکس خاک به‌طور کامل اشباع شوند این مسیرها فعال شوند. جریان ترجیحی در ماکروپورهای خاک اعم از ترک‌ها و شکاف‌های موجود در خاک و یا کانال‌های به‌وجود آمده از فعالیت‌های بیولوژیک مانند کرم‌ها و یا ریشه گیاهان، اتفاق می‌افتد (۲ و ۸). میزان قابلیت نفوذ یک خاک توسط وجود ماکروپورها کنترل می‌شود که جریان آب در آنها از نیروی موئینگی پیروی نمی‌کند.

خاک متشکل از یک شبکه تقریباً پیوسته از میکروپورها و ماکروپورها است. تعادل بین نیروی حرکت دهنده جریان (فشار و نیروی ثقل) و نیروهای مقاوم در برابر آن (نیروی اصطکاک بین دیواره‌ها و محلول و نیروی لزوجت) تعیین کننده میزان کل تغییرات در نفوذپذیری خاک و بنابراین میانگین سرعت آب در داخل خلل و فرج خاک است. غلبه هر کدام از این نیروها در جریان آب، بستگی به اندازه خلل و فرج دارد و بر همین اساس، رفتار هیدرولیکی در مقایس‌های مختلف تغییر پیدا می‌کند. جریان کانالی، جریان سریعی است که در خلل و فرج بزرگ‌تر است که بیشتر به‌صورت غالب در فضاهای پیوسته و به‌صورت عمودی هستند.

جرمان (۹) مدل موج سینماتیکی را برای توضیح جریان ترجیحی استفاده کرد. اگرچه مدل موج سینماتیکی در خاک‌های دارای ساختمان مناسب میزان جریان ترجیحی را با تقریب خوبی به‌دست می‌دهد، اما معمولاً مقدار به‌دست‌آمده بیشتر از میزان واقعی است (۱۰). عاملی که در کاهش اثر موج سینماتیکی تأثیر دارد نقش مزوپورها است. این خلل و فرج دارای اندازه‌ای مابین

اندازه ماکروپورها و میکروپورها هستند که نقش مهمی را در جریان ترجیحی ایفا می‌کنند. در مزوپورها نیروی مویینگی می‌تواند قابل ملاحظه باشد. بنابراین حرکت آب در آنها نیز نمی‌تواند تنها بر اثر نیروی ثقل صورت گیرد. در کلاس‌بندی معمول بر اساس قطر، خلل و فرج خاک به سه دسته میکرو (کمتر از ۱۰ میکرون)، مزو (بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرون) و ماکروپورها (بیشتر از ۱۰۰۰ میکرون) تقسیم شده‌اند. مزوپورها و ماکروپورها هر دو جزو خلل و فرج زهکش و جریان کانالی هستند. اما از لحاظ مقیاس زمانی (در مزوپورها جریان با تأخیر) با هم متفاوت هستند. از طرف دیگر نمی‌توان مرز دقیقی بین این دو نوع خلل و فرج تعیین کرد، به این علت که میزان نیروی موئینگی به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد و این میزان یک رابطه معکوس با میزان شعاع خلل و فرج دارد. در حالی‌که میزان نیروی ثقل ثابت است. به‌همین دلیل است که دی‌پیترو و همکاران (۷) پیشنهاد می‌کنند که از اصطلاح تخلخل زهکشی (Draining porosity) استفاده شود که اشاره به تخلخلی می‌کند که پتانسیل شرکت در تشکیل آب ترجیحی را دارند که به آنها منافذ قابل زهکش نیز گفته می‌شود. این توضیح دلالت بر این دارد که در جریان‌هایی که نیروی حرکتی غالب آنها نیروی ثقل است (جریان در ماکروپورها) بایستی تا حدی نیز حرکت آب به‌صورت پخش مویینگی (Capillary dispersion) را مد نظر قرار داد. مدل موج سینماتیکی، مدلی است که به‌طور کامل برای هدایت و گذر جریان است و نمی‌تواند حرکات ناشی از پخش آب، مثلاً در اثر نیروی مویینگی و یا با هر منشأ دیگر، را در نظر بگیرد. علت آن این است که در این مدل فرض شده که جریان منحصراً تابعی از درصد رطوبت یا ظرفیت آب متحرک است. در این راستا دی‌پیترو و همکاران (۷) مدل موج موج سینماتیک – پخشی (kinematic–dispersive wave) که به اختصار KDW نامیده می‌شود را، با اضافه کردن نقش مزوپورها به مدل سینماتیک موجی، ارائه داده‌اند. آنها اظهار داشته‌اند که مدل KDW دارای دقتی بالاتر از مدل سینماتیک موجی است.

مدل‌سازی جریان ترجیحی به نوعی کمک به مدل‌سازی نفوذپذیری انتقال و مواد در داخل خاک است. به‌طوری‌که ماکروپورها مسئول اصلی انتقال سریع آب و مواد هستند. اساس این مطالعه در مدل‌سازی، تحقیق دی‌پیترو و همکاران (۷) است. اما نوع انجام آزمایش و تهیه نمونه خاک متفاوت است. در مطالعه آنها، نمونه‌های ستون خاک با ارتفاع بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر، تحت فشار قرار گرفته و ایجاد ماکروپورها توسط نوعی کرم خاکی صورت گرفته است. درحالی‌که مطالعه حاضر برای پاسخ به این سؤال طراحی شده که آیا این مدل‌سازی را می‌توان برای نمونه‌های دست نخورده خاک، بدون این‌که ماکروپورهای خاک تغییرات اساسی یابند، استفاده کرد؟

مواد و روش‌ها

تئوری

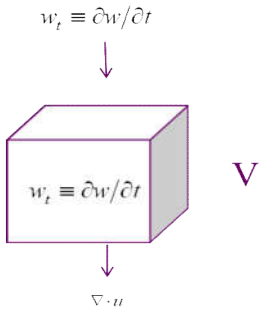
بخش تئوری این تحقیق توسط دی‌پیترو و همکاران (۷) شرح داده شده است که در ادامه به شرح مختصر آن پرداخته شده است.

مدل موج سینماتیکی- پخشی (KDW) جریان ترجیحی از بین منافذ قابل زهکش

فرض کنیم که w نشان دهنده میزان آب حجمی متحرک (که در داخل خلل و فرج زهکش خاک جریان دارد) در حجم V از یک پروفیل خاک باشد. در این‌صورت $w_t \equiv \partial w/\partial t$ مشتق جزئی اول برحسب زمان و u جریان حجمی مربوط به آب متحرک به سمت سطح خارجی در حجم V باشد. اگر فرض کنیم که میکروپروزیته به‌طور کامل اشباع شده است، بنابراین دیگر هیچ تبادلی بین دو نوع تخلخل یعنی بین ماکرو و میکروپروزیته وجود نخواهد داشت. در این‌صورت تغییرات رطوبت به زمان در داخل خاک برابر همان میزان رطوبت ورودی خواهد شد (شکل ۱).

براساس قانون پیوستگی برای جریان w (آب حجمی متحرک در داخل منافذ قابل زهکش) را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot u = 0 \qquad (1)$$



شکل ۱. شماتیکی از جریان ورودی آب (wt) در حالت اشباع بودن خاک و جریان خروجی

که در واقع بیانگر این است که میزان تغییرات رطوبت با توجه به زمان برابر است با همان مقداری که از منافذ قابل زهکش خارج می‌شود.

حال اگر فرض دیگری اضافه شود به این‌صورت که میزان جریان آب حجمی u یک تابع غیرخطی از w و w_t باشد:

$$u = u(w, w_t) \qquad (۲)$$

پس گرادیان مکانی جریان با مشتق‌گیری از u می‌شود:

$$\nabla u = c\nabla w + v_w \nabla w_t \qquad (۳)$$

که در آن میزان c و v_w درصورتی‌که به‌ترتیب w_t و w ثابت باشند داریم:

$$c = \frac{\partial u}{\partial w}\Big|_{w_t=\text{cons tan t}} \quad \text{و} \quad v_w = \frac{\partial u}{\partial w_t}\Big|_{w=\text{cons tan t}}$$

با فرض اینکه جریان آب تنها در جهت عمودی (در جهت Z) به سمت پایین می‌رود، در این‌صورت گرادیان مکانی جریان (∇u) تنها وابسته به مکان Z است بنابراین روابط (۱) و (۳) به‌ترتیب به روابط زیر تبدیل می‌شوند:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \qquad (۴)$$

و

$$\frac{\partial u}{\partial z} = c\frac{\partial w}{\partial z} + v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \qquad (۵)$$

با ترکیب روابط (۴) و (۵)، و قرار دادن معادل $\partial u/\partial z$ از رابطه (۵) در رابطه (۴) داریم:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c\frac{\partial w}{\partial z} = -v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} \qquad (۶)$$

اگر از رابطه (۴) برحسب Z مشتق گرفته شود داریم:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} = -\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۷)$$

با جایگزاری $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ از رابطه (۷) به جای معادل آن یعنی $\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t}$ در طرف دوم رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c\frac{\partial w}{\partial z} = -v_w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۸)$$

با ضرب $\partial u/\partial w$ در دو طرف رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c\frac{\partial u}{\partial z} = v_u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۹)$$

که در آن $v_u = -v_w . \partial u/\partial w = c v_w$ است.

هر دو رابطه (۶) و (۹) به‌ترتیب روابط غیرخطی هدایتی-پخشی (non-linear convective- dispersive) برحسب w (آب حجمی متحرک داخل تخلخل قابل زهکش) و u (آب حجمی متحرک خروجی) هستند.

تقریب سینماتیکی

دو اصطلاح سمت چپ در رابطه (۹) میزان مشتق مجموع زمانی تابع جریان u(z,t) را نشان می‌دهد که شیب هر منحنی (c) در هر نقطه قرار گرفته در صفحه (z,t) را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها را خطوط مشخصه (characteristic curves) رابطه دیفرانسیل می‌نامند. این اصطلاحات را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{dz}{dt}\cdot\frac{\partial u}{\partial z} \qquad (۱۰)$$

که c=dz/dt است. وقتی‌که v_u برابر با صفر باشد، رابطه (۹) به‌صورت زیر ساده‌تر می‌شود:

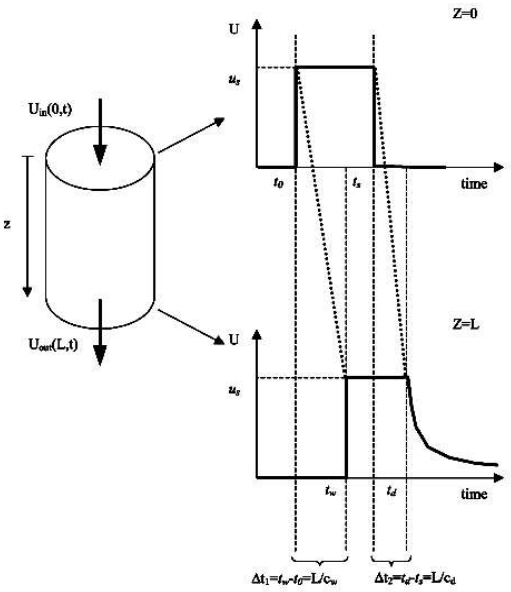
$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + c(w)\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \qquad (۱۱)$$

این مدل موج سینماتیکی به‌صورت گسترده در مدل‌سازی منابع آب استفاده می‌شود (۱ و ۷).

رابطه (۱۱) دلالت بر این امر دارد که تابع u(z,t) در طول منحنی‌های مشخصه به‌صورت ثابت باقی می‌مانند.

برای مقادیر اولیه مسئله داریم:

$$-\infty < z < +\infty, t = 0, u = f(z) \qquad (۱۲)$$



شکل ۲. پیش‌بینی هیدروگراف خروجی بر اساس رابطه (۱۳)، (برگرفته از (۷)).

جرمان (۹) رابطه (۱۱) را با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر حل کرد.

$$\begin{cases} u(z,t)=u_{in}(t), & z=0, \quad t>0 \\ u(z,t)=u_o, & z>0, \quad t=0 \end{cases} \qquad (۱۳)$$

که نشان می‌دهد در زمان $t=0$ میزان جریان $u(z,0)=u_o$ آب تنها به‌میزان آب اولیه در داخل خاک در ارتفاعات مختلف بستگی دارد. در زمان بالاتر از صفر، میزان جریان برابر در مرز ورود ($z=0$) یعنی $u(0,t)$ برابر با میزان جریان ورودی $u_{in}(t)$ است. $u_{in}(t)$ یک جریان با شدت یکنواخت جریان حجمی ورودی با مقدار u_s در طول زمان t_s در مرز آزاد ($z=0$) است بنابراین ورودی به‌صورت یک پالس مربعی می‌باشد. شکل ۲ حل مدل موج سینماتیکی رابطه (۱۳) ارائه شده توسط جرمان (۹) را در یک ستون خاک با ارتفاع Z=L نشان می‌دهد. اگر یک پالس مربعی از آب داخل ستون شود، خروجی با تأخیر زمانی خواهد بود. مدت زمان تأخیری رسیدن جبهه‌های رطوبتی و زهکش در طول L به‌ترتیب $\Delta t_1 = L/c_w$ و $\Delta t_2 = L/c_d$ داده شده است. سرعت‌های c_w و c_d به‌ترتیب سیگنال سرعت متناظر با u_s و $u=(z,t)$ است.

به‌علاوه او فرض کرد که رابطه میزان جریان آب متحرک به‌صورت یک رابطه توانی به‌صورت زیر است:

$$u = aw^b \qquad (۱۴)$$

که در آن a و b [LT^{-1}] دو ضریب مثبت هستند.

ایجاب تصحیح درجه دوم و راه حل‌های عددی برای حل آنها

وقتی‌که $v_u \neq 0$، عبارت درجه دوم در سمت راست رابطه (۹) میزان پخش را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان رابطه (۹) را به‌صورت زیر دوباره نویسی کرد:

$$\frac{du}{dt} = v_u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) نشان می‌دهد که جریان u دیگر در هر مشخصه ثابت نیست و تغییرات آن بستگی به تغییرات مکانی شیب جریان دارد. فرض می‌شود که تابع داده شده در رابطه (۲) به‌صورت زیر است:

$$u = f(w) + g(w_t) \qquad (۱۶)$$

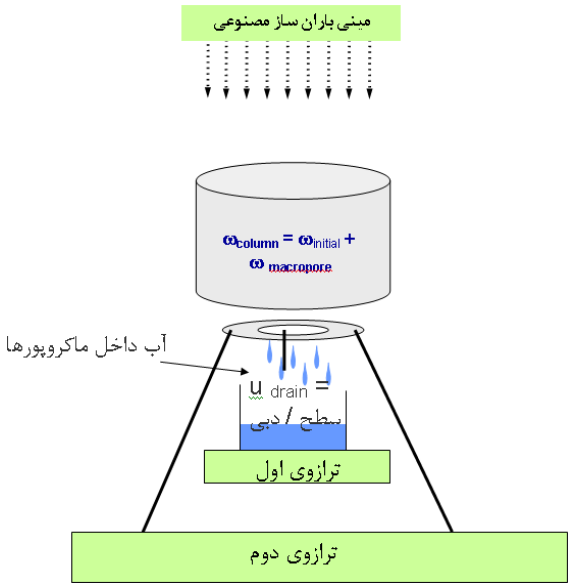
با

$$f(w) = bw^a \quad , g(w_t) = -v_w\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right) \qquad (۱۷)$$

که میزان a، b [LT^{-1}]، و v_w [L] پارامترهای با مقادیر مثبت هستند.

رابطه ۱۶ برای به مدل درآوردن نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری- زهکشی در بسیاری از خاک‌ها توسط دی‌پیترو و همکاران (۷) ارائه شده است که یکی از اهداف ما در این مقاله معرفی کامل این روش و بررسی و ارزیابی آن است.

منحنی‌های u(w) مشاهده شده دارای حالت پسماند (hysteretic) هستند، به‌طوری‌که به ازای مقادیر ثابت w، مقدار u در حین نفوذپذیری کوچک‌تر از مقادیر u در حین زهکش است. دی‌پیترو و همکاران (۷) فرض کردند که یک نیروی اینرسی در حین مراحل انتقالی نفوذپذیری و زهکش توسعه می‌یابد، این نیرو متناسب است با میزان افزایش (و به‌همین ترتیب کاهش) میزان آب حجمی و در حالت پایدار صفر است. عبارت اصلاحی



شکل ۳. نمایش شماتیکی از نحوه انجام آزمایش صورت گرفته در این مطالعه، ترازوی اول فقط برای اندازه‌گیری میزان آب زهکش شده و ترازوی دوم میزان آب ستون را نشان می‌دهد.

$g(w_t)$ با مشتق اول زمانی میزان آب متناسب است. این عبارت اصلاحی در حین نفوذپذیری (افزایش w) به‌صورت منفی، صفر در شرایط پایدار (ثابت بودن w) و در حین زهکش (کاهش w) مثبت است.

نحوه آزمایش

خاک استفاده شده در این مطالعه خاک لومی رسی (clay loam) بوده و آزمایشات مربوطه در پایلوت آزمایشی و آزمایشگاه فیزیک خاک انستیتو ملی تحقیقات کشاورزی در شهر اوینیون در جنوب فرانسه انجام شده است. از یک متر مربع زمین که قبلاً تحت کشت گندم بوده است، تعداد ۱۴ نمونه خاک تهیه شد. نمونه‌های خاک، توسط سیلندری دایره‌ای شکل با قطر ۱۵ و طول تقریبی ۷ سانتی‌متر برداشت شدند. این سیلندرهای نمونه‌برداری، جهت آزمایش Wind (۱) و همچنین آزمایش موج سینماتیک در آزمایشگاه مذکور دارای استاندارد لازم است. هنگام برداشت نمونه‌های خاک، سعی شد که ساختمان خاک داخل نمونه حفظ شود. طرح نمونه‌گیری تصادفی است و در حدود ۲۵ درصد سطح پلات آزمایشی را در بر می‌گیرد.

روی این نمونه‌ها آزمایش نفوذپذیری- زهکش صورت گرفت. قبل از انجام این آزمایش ابتدا نمونه‌ها به حالت اشباع در آورده شدند؛ سپس حدود دو ساعت قبل از شروع آزمایش برای هر نمونه، به نمونه اجازه زهکش شدن داده شد تا آبی که در داخل ماکروپورها وجود دارد تخلیه شود. نحوه انجام آزمایش در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نمونه روی یک سه پایه قرار گرفته و یک شبیه‌ساز باران کوچک بر بالای آن نصب می‌شود. از پمپی کوچک که دارای دورهای متغیر با قابلیت تنظیم شدت بارندگی از شدت‌های پایین تا بارش با شدت‌های بالاتر است، برای تنظیم شدت جریان ورودی به خاک استفاده می‌شود. در سطح زیرین سیلندر نمونه، قیفی قرار داده شده که آب خروجی حاصل از زهکش را به درون ظرفی جهت اندازه‌گیری میزان شدت جریان خروجی هدایت می‌کند.

دو ترازوی دقیق یکی در زیر مخزن آب زهکش شده و دیگری در زیر نمونه خاک قرار می‌گیرد. هر دو این ترازوها توسط یک نرم‌افزار از طریق کامپیوتر کنترل می‌شوند و در هنگام آزمایش، منحنی تغییرات وزنی و اختلاف عددی دو ترازو به‌صورت برخط از طریق نمایشگر کامپیوتر قابل مشاهده و

ردگیری است. از طرف دیگر گام زمانی ثبت داده‌ها قابل تنظیم بود که در این مطالعه ثبت داده‌ها به‌طور هم‌زمان برای ورودی و خروجی هر ۱۰ ثانیه یک‌بار صورت گرفته است. میزان رطوبت ثبت شده برای ستون خاک به‌صورت زیر خواهد بود:

$$w = w_{initial} + w_{macropore} \qquad (۱۸)$$

w برحسب گرم نشان دهنده میزان جرم آب در داخل نمونه، $w_{initial}$ (gr) جرم آب اولیه که مقدار آن کمی کمتر از اشباع خواهد بود و درنهایت $w_{macropore}$ وزن آب داخل ماکروپورها است که دارای حرکت نسبتاً سریع در خاک است. میزان جریان خروجی نیز با توجه به مساحت و مقدار آب خروجی که به‌وسیله ترازوی اول ثبت می‌شود، محاسبه می‌شود.

در این آزمایش دانستن شدت بارندگی ضرورتی ندارد. چیزی که مهم است انجام تغییرات تدریجی در شدت بارندگی از کم به زیاد در چندین مرحله است. ضرورت دیگر اینکه بارندگی نبایستی دارای انرژی جنبشی زیادی باشد، در غیر این صورت با تغییر در سطح خاک باعث ایجاد سله می‌شود. لایه نازک سله‌های سطحی، از طرفی، خود دارای نفوذپذیری بسیار پایین بوده و از طرف دیگر باعث مسدود شدن ماکروپورها خواهند شد. در واقع در این آزمایش خصوصیات خاک سطحی تا حدی نادیده گرفته شده و تنها به عامل اصلی به‌وجود آمدن ماکروپورها یعنی ساختمان خاک اهمیت داده می‌شود. به‌طور مثال در این آزمایش بایستی دقت کرد که ترک‌های بزرگ در سطح خاک موجود نباشد؛ البته با توجه به اشباع بودن خاک، ترک‌های ناشی از تغییر حجم در نمونه به ندرت دیده خواهد شد.

شروع آزمایش، با شروع بارندگی در شدت پایین است. ابتدا شدت پایینی انتخاب می‌شود و با شدت ثابت پایین به‌وسیله شبیه‌ساز بارش مصنوعی روی سطح خاک بارش صورت می‌گیرد. آب بعد از نفوذ در داخل خاک و طی طول ستون خاک از سمت دیگر به‌صورت جریان خروجی زهکش می‌شود. در ابتدا کم‌کم به‌میزان خروجی اضافه شده تا پس از مدتی تغییرات آب خروجی ثابت شود. در این حالت میزان خروجی حداکثر عبور آب با توجه به شدت ورودی را خواهد داشت. عمل ثابت شدن جریان خروجی زمانی خواهد بود که چندین داده ثبت شده خروجی عددی یکسان داشته و اختلاف خروجی‌های پشت سرهم صفر و یا خیلی نزدیک به صفر شود. سپس دوباره میزان شدت بارندگی را تا حدی افزایش می‌دهیم و دوباره صبر می‌کنیم تا این میزان ثابت شود. در واقع با این‌عمل سیستم به حالت پایدار و تعادل رسیده و حداکثر دبی مربوط به این شدت جریان از ماکروپورها جریان می‌یابد. همان‌طور که در بخش تئوری مطرح شد، جریان در داخل ماتریس خاک با سرعت بسیار پایین در حرکت است و جریان خروجی در واقع همان جریان آب در ماکروپورها یا جریان ترجیحی است. این‌عمل به‌همین صورت و در چندین مرحله ادامه می‌یابد. هنگامی‌که روی سطح خاک، آب نگهداشت سطحی مشاهده شد، آزمایش متوقف می‌شود. در این زمان میزان شدت ورودی از میزان ظرفیت نفوذ بیشتر بوده بنابراین مقداری از جریان به رواناب یا آب سطحی تبدیل می‌شود.

نحوه انجام مدل‌سازی

در بخش تئوری دو فرض برای مدل‌سازی جریان ترجیحی ارائه شد.

۱. فرض اول توسط: جرمان (۹) بیان می‌کند که جریان ترجیحی تابعی توانی و تک‌متغیره از میزان آب متحرک (w) در خاک است که به‌عنوان مدل موج سینماتیکی نامیده می‌شود و رابطه آن به‌طور خلاصه به‌صورت زیر است:

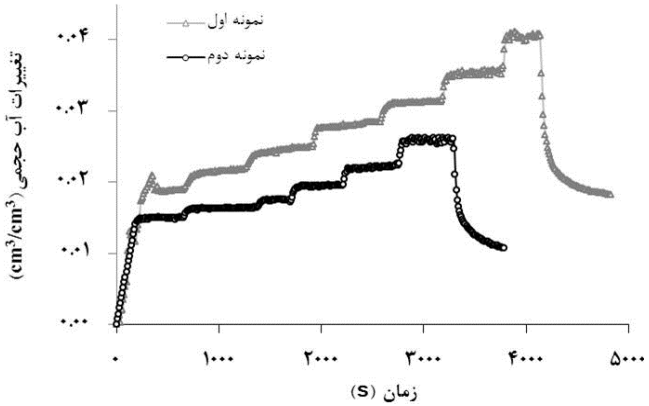
$$u(w) = f(w) = bw^a \qquad (۱۹)$$

دارای دو پارامتر a و b که بایستی تعیین شوند.

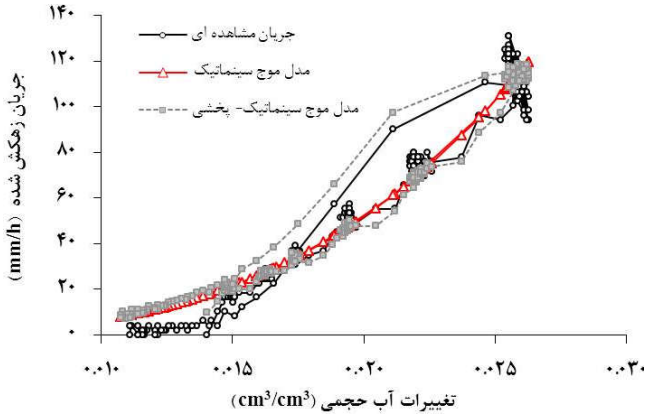
۲. فرض دوم توسط دی‌پیترو و همکاران (۷) که جریان ترجیحی یک عبارت توانی به‌همراه یک عبارت اصلاحی (روابط ۱۶ و ۱۷ دارای سه پارامتر a، b، V به‌منظور مد نظر قرار دادن مقدار جریان حاصل از پخش که با عنوان مدل موج سینماتیکی- پخشی از آن نامبرده می‌شود.

$$u = f(w) + g(w_t) = bw^a - v_w\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right) \qquad (۲۰)$$

دارای ۳ پارامتر a، b و V_w که بایستی تعیین شوند.



شکل ۴. داده‌های مربوط به آزمایش نفوذپذیری- زهکش در دو نمونه، حالت پلکانی به‌وجود آمده برای رسیدن به حالت تعادل در خروجی، در نمونه اول هفت مرحله دبی ثابت و در نمونه دوم شش مرحله تغییر دبی انجام شده است تا اینکه روی سطح خاک نگهداشت سطحی دیده شود.



شکل ۵. حالت پسماند به‌وجود آمده در نمودار جریان خروجی (u_i) در حین آزمایش نفوذپذیری-زهکش و برازش به‌دست آمده از دو مدل برای به‌دست آوردن هیستری که به‌صورت یک حلقه است. مقادیر در شاخه زهکش در پسماند به‌وجود آمده بزرگ‌تر از مقادیر شاخه نفوذپذیری هستند.

برای تخمین پارامترها با استفاده از ماژول Solver در نرم‌افزار آفیس اکسل از الگوریتمی برای حداقل کردن مجذور میانگین مجموع مربعات اختلاف مقادیر تخمینی نسبت مقادیر واقعی (RMSE) استفاده شد که به نوعی نشان‌دهنده دقت و یا خطای هر مدل نیز است که فرمول آن برای فرض اول و دوم به‌ترتیب به‌صورت روابط (۲۱) و (۲۲) می‌شود:

$$RMSE_1 = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i \left(u_i - \left(bw_i^a\right)\right)^2} \qquad (21)$$

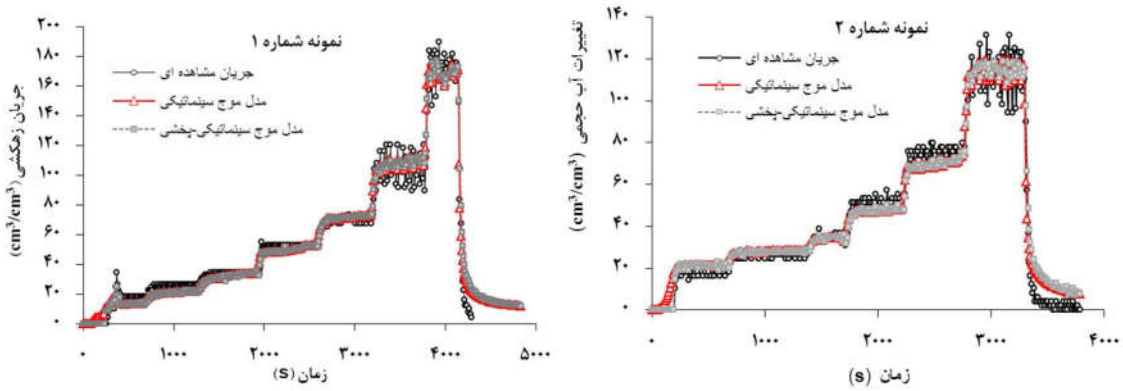
$$RMSE_2 = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i \left(u_i - \left(bw_i^a - v_w \frac{\partial w}{\partial t}|_i\right)\right)^2} \qquad (22)$$

که در آنها N تعداد مقادیر مشاهده‌ای، u_i جریان مشاهده شده در انتهای ستون در زمان i و w_i میانگین آب متحرک اندازه‌گیری شده در زمان i است.

نتایج

مدل‌سازی آب ترجیحی با استفاده از روش موج سینماتیکی

انجام عملیات نفوذپذیری- زهکش در نمونه‌های خاک که در بالا شرح داده شد باعث به‌وجود آمدن حالت پلکانی در نمودار تغییرات زمانی میزان آب موجود در نمونه خاک (dw/dt) (شکل ۴) و همچنین میزان جریان خروجی (شکل ۶) در مقابل زمان می‌شود. با توجه به ساختار خاک و ماکروپورهای موجود در آن



شکل ۶. منحنی به‌دست آمده از دو مدل برازش داده شده موج سینماتیکی و موج سینماتیکی- پخشی برای نمونه‌های شماره ۱ و ۲ و مقایسه آنها با داده‌های واقعی: شاخه زهکش داده‌های مشاهده‌ای دارای شیب بیشتری است.

این عملیات را می‌توان تا زمان مشاهده آب در سطح خاک ادامه داد. به‌علت خرابی یکی از ترازوها، چهار نمونه مورد ارزیابی قرار نگرفتند و نتایج مربوط به ۱۰ نمونه خاک در این تحقیق آورده شده است. در گام بعدی اقدام به مدل‌سازی این جریان شد.

به‌دست آوردن پارامترهای مدل و صحت‌سنجی مدل

پارامترهای مربوط به مدل در هر دو فرض با استفاده از داده‌های آزمایش نفوذپذیری- زهکشی برای هر نمونه با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲) و به‌کار بردن الحاقیه Solver در نرم‌افزار اکسل و با حداقل کردن مقدار RMSE تعیین شدند.

پس از به‌دست آوردن مقادیر پارامترها و با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) جریان زهکش در زمان‌های مختلف برای هر دو مدل به‌دست آمد. سپس، جریان خروجی (u) به‌عنوان تابعی از میزان آب متحرک داخل خاک (w) در هر دو مرحله نفوذپذیری و زهکش، بر روی یک نمودار رسم شد (برای نمونه شکل ۵). این‌کار برای تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. رابطه u(w) یک رابطه هیستریک است، به‌طوری‌که برای یک مقدار ثابت از جریان خروجی دارای دو عدد مختلف یکی در شاخه نفوذپذیری و دیگری در شاخه زهکشی است.

شکل (۵) برای نتایج مربوط به یک نمونه آورده شده است. حلقه به‌وجود آمده نشان می‌دهد که الگوی نفوذپذیری (شاخه صعودی هیدروگراف جریان خروجی) نسبت به الگوی زهکش متفاوت است. همانطور که دیده می‌شود فرض دوم توانسته است تا حدودی هیستری مورد نظر را ترسیم کند. در فرض اول $u(w) = f(w)$ به ازای هر مقدار w تنها یک مقدار از u را خواهیم داشت، در نتیجه شیب شاخه نفوذپذیری و زهکش تقریباً برابر بوده و به جای یک حلقه، یک خط برازش داده شده است که خود نشان می‌دهد این روش به تنهایی نمی‌تواند پیچیدگی فرایند را توضیح دهد. درحالی‌که معادله (۱۶) یعنی اضافه کردن جزء جریان پخشی به موج سینماتیک تطابق خوبی با حلقه مورد نظر دارد.

نکته‌ای که در این جا قابل ذکر است، برای یک مقدار ثابت آب متحرک در داخل خاک مقادیر عدد در شاخه نفوذپذیری کوچک‌تر از شاخه زهکش است، چیزی که در شکل‌های (۵) و نیز (۶) با توجه به شیب زیاد شاخه زهکش دیده می‌شود. این مسئله متفاوت با تحقیقات دیگر محققان (۷) است. معمولاً شاخه زهکش دارای شیب کمتر و برای یک مقدار معین آب متحرک دارای مقادیر خروجی کمتری نیز است. علت این امر می‌تواند به نوع انجام این آزمایش برگردد. در دیگر مطالعات هیدروگراف خروجی یک رگبار مصنوعی با شدت مشخص، در انتهای ستون اندازه‌گیری و ثبت شده است درحالی‌که در این مطالعه در طی یک رویداد بارش، شدت بارش مصنوعی به‌صورت گام‌به‌گام افزایش یافته‌است تا زمانی‌که مقداری نگهداشت سطحی روی نمونه خاک ایجاد شود. احتمالاً همین امر سبب می‌شود در انتهای آزمایش مقداری آب از کناره‌ها (محل اتصال سیلندر و خاک)

جدول ۱. پارامترهای به‌دست آمده با استفاده از مدل اول و مدل دوم با فرض اصلاحی به همراه میزان مجذور میانگین مجموع مربعات خطای حساب شده برای هر نمونه و مدل

شماره نمونه	پارامترهای مدل موج سینماتیکی (فرض اول)		پارامترهای مدل موج سینماتیک- پخشی (فرض دوم)			RMSE	
	a(-)	logb (mm/h)	a(-)	logb (mm/h)	V (mm)	فرض اول	فرض دوم
۱	۳/۳۱	۶/۸۳	۳/۳۲	۶/۸۵	۲۲/۳۵	۷/۷۷	۶/۸۷
۲	۳/۰۶	۶/۹۲	۳/۰۸	۶/۹۶	۲۸/۶۷	۶/۵۸	۵/۵۷
۳	۳/۲۱	۷/۲۳	۳/۲۴	۷/۲۹	۴۵/۴۹	۸/۵۴	۶/۳۸
۴	۲/۷۰	۶/۵۲	۲/۶۹	۶/۵۱	۱۳/۴۹	۱۳/۷۲	۱۳/۶۸
۵	۹/۷۵	۱۶/۷۳	۹/۷۵	۱۶/۷۳	۴۹/۴۲	۱۱/۴۵	۱۱/۳۱
۶	۲/۲۹	۶/۶۵	۲/۲۹	۵/۶۵	۲۱/۰۷	۶/۲۳	۵/۸۹
۷	۳/۲۸	۶/۷۸	۳/۴۰	۶/۷۳	۱۵/۴۰	۵/۹۳	۴/۷۰
۸	۲/۸۱	۵/۸۴	۲/۷۹	۵/۸۸	۲۶/۷۰	۱۳/۰۷	۱۲/۳۰
۹	۳/۷۹	۷/۸۲	۳/۸۳	۷/۸۹	۳۷/۲۸	۶/۷۶	۵/۸۰
۱۰	۳/۷۹	۷/۸۲	۲/۳۷	۵/۹۴	۶۲/۳۳	۵/۰۴	۲/۷۲

به‌صورت جریان سریع باعث افزایش جریان خروجی شود. به همین علت نیز به نظر می‌رسد هر دو مدل گرچه برازش مناسبی را داده‌اند اما نتوانسته‌اند به‌خوبی شاخه زهکش را برازش دهند.

با مقایسه مقادیر RMSE در جدول ۱ برای هر دو مدل، فرض دوم (در نظر گرفتن اثر پخش) در تمامی ۱۰ نمونه خاک دارای خطای کمتری نسبت به فرض اول است که نشان می‌دهد افزودن اثر پخش باعث افزایش دقت تخمین هیدروگراف جریان زهکش خروجی شده است.

نقش ماکروپورها در جریان ترجیحی

همان‌طور که در بالا ذکر شد، ماکروپورها مسئول ایجاد جریان ترجیحی هستند؛ بنابراین فرض کلی این است که هرچه مقدار ماکروپورها در خاک بیشتر باشد، جریان ترجیحی بیشتری وجود خواهد داشت. تعیین میزان ماکروپورها در خاک عملاً کاری بسیار مشکل است گرچه روش‌هایی در حال حاضر همچون استفاده از ردیاب‌های رنگی و تکنیک‌های اسکن مثلاً به‌وسیله اشعهٔ x استفاده می‌شود، اما هر یک تحت شرایط خاصی قابل انجام است. آلیر و همکاران (۳) مروری بر این روش‌ها دارند که برای مطالعه بیشتر قابل استفاده است. در این مطالعه با یک عمل ابتکاری میزان ماکروپورهای خاک تعیین شده است، گرچه ایراداتی به روش مذکور در این قسمت وارد است اما می‌تواند تقریبی از میزان ماکروپورها بدهد.

تعیین ماکروپورها برحسب درصد

برای این‌کار نیاز به پارامترهای زیر است که روش به‌دست آوردن آنها نیز ذکر شده است

- رطوبت اولیه (θ_{init}): در حالتی که ماکروپورهای خاک خالی از آب هستند، وزن کل نمونه- وزن نمونه خشک شده (در آون در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد)
- جرم حجمی ظاهری (ρ_d): از تقسیم وزن خشک خاک به حجم سیلندر
- تخلخل خاک (P): برای تمامی نمونه‌ها مقدار جرم حجمی واقعی خاک ρ_s= ۲/۶۸ فرض شده است و با استفاده از فرمول $P = ۱ - \frac{\rho_d}{\rho_s}$ که خود شامل ماکرو و میکروپورهاست.

جدول ۲. مقدار ماکروپور فعال در داخل هر نمونه و پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه آن

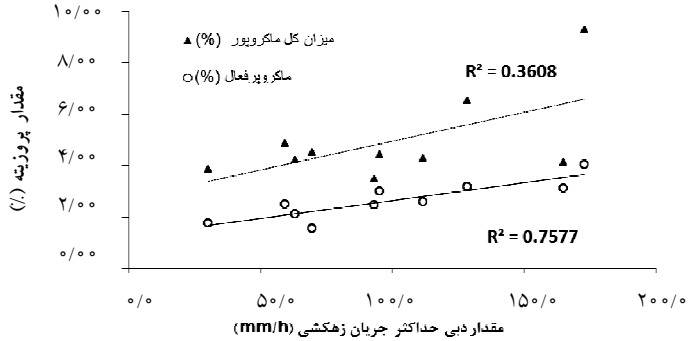
شماره نمونه	θ_{init} (٪)	ρ_d	تخلخل (P) (٪)	میزان ماکروپور (٪)	$\Delta\theta_{max}$ (٪)	q_{max} (mm/h)	ماکروپور فعال (٪)
۱	۳۹/۲۴	۱/۳۸	۴۸/۵	۹/۲۶	۴/۰۵	۱۷۲/۹	۴/۰۵
۲	۴۷/۷۰	۱/۲۹	۵۱/۸	۴/۱۰	۳/۱۴	۱۶۵/۰	۳/۱۴
۳	۴۴/۵۰	۱/۳۰	۵۱/۰۰	۶/۵۰	۳/۱۷	۱۲۸/۶	۳/۱۷
۴	۴۱/۲۵	۱/۴۱	۴۵/۵	۴/۲۵	۲/۵۹	۱۱۱/۸	۲/۵۹
۵	۴۲/۰۰	۱/۵۲	۴۶/۴	۴/۴۰	۲/۱۰	۹۵/۳	۳/۰۰
۶	۴۴/۵۵	۱/۳۹	۴۸/۰۰	۳/۴۵	۲/۴۷	۹۳/۰۰	۲/۴۷
۷	۴۵/۵۲	۱/۳۴	۴۹/۹۰	۴/۴۸	۱/۵۶	۶۹/۶	۱/۵۶
۸	۴۴/۸۰	۱/۳۵	۴۹/۲۰	۴/۲۰	۲/۱۲	۶۳/۲۰	۲/۱۲
۹	۴۵/۸۷	۱/۳۴	۵۰/۷۰	۴/۸۳	۲/۴۹	۵۹/۴۰	۲/۴۹
۱۰	۴۸/۱۶	۱/۲۸	۵۲/۰۰	۳/۸۴	۱/۷۷	۲۹/۹۰	۱/۷۷

حال اگر تمامی تخلخل دارای آب باشد یعنی تمامی ماکروپورها و میکروپورها پر از آب هستند و خاک اشباع شده است.

- مقدار کل ماکروپور یک نمونه خاک (M): حال اگر مقدار تخلخل خاک (P) را از مقدار رطوبت اولیه (θ_{init}) خاک کم کنیم، مقدار تقریبی تخلخل خاک به‌دست خواهد آمد.
- مقدار ماکروپورهای فعال یک نمونه خاک (MP_{act}): از آنجایی‌که تمامی ماکروپورها در هدایت جریان ترجیحی دخالت مستقیم ندارند مانند مواقعی که انتهای یک ماکروپور بسته باشد، بنابراین بایستی مقدار تخلخل فعال در انتقال آب ترجیحی را تعیین کرد. برای این‌کار از مقادیر ثبت شده در طی آزمایش شبیه‌ساز باران استفاده می‌کنیم. از آنجایی‌که مقادیر لحظه‌ای وزن آب در موجود در داخل سیلندر ثبت شده است (هر ثانیه یک داده)، حداکثر ماکروپور فعال را زمانی خواهیم داشت که نمونه خاک دارای حداکثر دبی خروجی و یا به‌عبارتی حداکثر رطوبت لحظه‌ای باشد. بنابراین در هر مورد حداکثر دبی خروجی (q_{max}) و تغییرات حداکثر رطوبت ترجیحی لحظه‌ای ($\Delta\theta_{max}$) برای هر نمونه به‌طور جداگانه ثبت شد. بنابراین مقدار ماکروپور فعال یک نمونه خاک از رابطه زیر به‌دست آمد:

$MP_{act} = \theta_{init} + \Delta\theta_{max}$ مقادیر ذکر شده در جدول ۲ آورده شده است.

پیش فرض این بوده است که میزان دبی ترجیحی عبور کرده از خاک در خلال آزمایش رابطه‌ای مستقیم با مقدار تخلخل درشت یا همان میزان ماکروپور خاک دارد. به همین دلیل در اولین گام نمودار شکل (۷) برای بررسی آن رسم شد. همان‌طور که دیده می‌شود میزان ضریب تعیین بین مقدار دبی حداکثر خروجی از نمونه خاک با میزان کل ماکروپور (R^2= ۰/۳۶) رابطه معنی‌داری را نشان نمی‌دهد درحالی‌که این میزان برای ماکروپورهای فعال دارای رابطه معنی‌داری با مقدار ضریب تبیین R^2 = ۰/۷۵۶ است که نشان می‌دهد وجود ماکروپورهای بیشتر در یک خاک، الزاماً نشان‌دهنده وجود جریان ترجیحی با شدت بیشتر نیست بلکه عامل مهم ماکروپورهای فعال در یک خاک تعیین کننده میزان حداکثر آب ترجیحی عبور کرده هستند. از طرف دیگر میزان حداکثر آب ترجیحی که از سطح خاک عبور می‌کند را می‌توان برابر با همان میزان هدایت هیدرولیکی قرار داد. از نکات دیگر این تحقیق همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود در این آزمایش حداکثر میزان ماکروپور فعال حدود ۴/۰۵ درصد



شکل ۷. برازش خطی میزان مقدار دبی حداکثر خروجی از نمونه خاک با مقدار کل ماکروپور و میزان ماکروپور فعال

از کل حجم خاک را تشکیل داده است که نقش اصلی در انتقال آب در داخل خاک را بر عهده دارد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل ارائه شده توسط جرمان (۹) و مدل دی‌پیترو و همکاران (۷) برای مدل‌سازی آب ترجیحی (یا به عبارت دیگر یک مدل نفوذپذیری) مورد بررسی قرار گرفتند. مدل German (۹) تنها بر اساس تئوری موج سینماتیک بوده است. درحالی‌که استفاده از داده های آزمایشگاهی به‌دست آمده از ستون خاک و یا لایسیمترها نشان از اثر پخش (dispersion) دارد (۶). مدل دی‌پیترو و همکاران (۷) بر پایه تئوری موج سینماتیکی بوده و علاوه بر آن اثر مربوط به پخش نیز در آن دیده شده است. این مدل نشان‌دهنده رابطه بین میزان آب متحرک در داخل خاک با میزان جریان منافذ قابل زهکش است. از طرف دیگر نشان داده شد که یک رابطه پسماند (Hysteric) بین آنها وجود دارد که می‌توان آن را با استفاده از رابطه غیرخطی حجم آب (موج سینماتیکی) و مشتق اول آن (پدیده پخش) به مدل در آورد. این مطالعه نشان داد که افزودن اثر پخش می‌تواند دقت مدل سینماتیکی در پیش‌بینی میزان جریان زهکش خروجی را افزایش دهد؛ و می‌توان از آن برای تعیین هیدروگراف خروجی در شدت‌های مختلف استفاده کرد. البته مدل ارائه شده نتوانست به همان دقتی که دی‌پیترو و همکاران (۷) به آن اشاره داشته‌اند شاخه نزولی جریان زهکش خروجی را بازسازی کند که علت آن می‌تواند تفاوت انجام آزمایش در این تحقیق با آزمایش آنها باشد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی دو مسئله یعنی استفاده از شدت‌های ثابت بارش مصنوعی در در هر آزمایش و به‌دست آوردن هیدروگراف خروجی برای همان شدت و همچنین در نظر گرفتن میزان رطوبت اولیه خاک انجام شود. از طرف دیگر اثر این دو بر روی پارامترهای مدل نیز بررسی شود. به‌نظر می‌رسد اثر شخم بر روی ماکروپورها در زمین‌های کشاورزی و ارزیابی استفاده از این مدل گام بعدی محسوب شود.

سپاسگزاری

با تشکر از مرکز انستیتو ملی تحقیقات کشاورزی اوینیون فرانسه و خانم دی پیترو که داده‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک خاک این مؤسسه تهیه شده است.

منابع مورد استفاده

۱. میرزایی، م. ر. ۱۳۹۰. به‌دست آوردن خصوصیات هیدرودینامیکی خاک- منحنی نگهداشت آب و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک- با روش Wind: مزایا و معایب. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تبریز.

2. Alaoui, A., P. Germann, N. Jarvis, and M. Acutis. 2003. Dual-porosity and kinematic wave approaches to assess the

degree of preferential flow in an unsaturated soil. *Hydrological Sciences Journal* 48(3): 455-472.
3. Allaire, S. E., S. Roulier and A. J. Cessna. 2009. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology* 378(1-2): 179-204.
4. Allaire, S. E., S. Roulier and A. J. Cessna. 2009. Quantifying Preferential Flow in Soils: A Review of Different Techniques. *Journal of Hydrology* 378(1-2): 179-204.
5. Berod, D., V. Singh and A. Musy. 1999. A geomorphologic kinematic-wave (GKW) model for estimation of floods from small alpine watersheds. *Hydrological Processes* 13: 1391–1416.
6. Dekker, L. W., C. J. Ritsema, O. Wendroth, N. Jarvis, K. Oostindie, W. Pohl, M. Larsson and J. P. Gaudet. 1999. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. *Journal of Hydrology* 215: 4–22.
7. Di Pietro, L. and P. Germann. 2001. Testing kinematic wave solutions for flow in microporous soils against a lattice-gas simulation. *Soil Science Society of America Journal* 56: 147–168.
8. Di Pietro, L., S. Ruy and Y. Capowiez. 2003. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves. *Journal of Hydrology* 278(1-4): 64-75.
9. Ethz, D. 2001. Mechanisms controlling macropore flow during infiltration dye tracer experiments and simulations. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
10. Germann, P. 1985. Kinematic wave approximation to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions ASAE* 28: 745–749.
11. Germann, P. F., L. Di Pietro and V. P. Singh. 1997. Momentum of flow in soils assessed with TDR-moisture readings. *Geoderma* 80(1-2): 153-168.
12. Greco, R. 2002. Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment: model development and applications. *Journal of Hydrology* 269(3-4): 150-168.
13. Jarvis, N. J. 1994. The MACRO Model Version 3.1—Technical Description and Sample Simulations. Reports and Dissertations no. 19. Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
14. Lighthill, M. and G. Whitham. 1995. On Kinematic Waves: 1. Flood Movement in Long Rivers. Series A. Royal Society, London.
15. Šimůnek, J., M. T. V. Genuchten and M. Sejna. 2006. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department of Environmental Sciences, University of California, California.
16. Simunek, J., O. Wendroth and M. T. Van Genuchten. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology* 272(1-4): 14-35.
17. Singh, V. P. 2001. Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective. *Hydrological Processes* 15(4): 671-706.
18. Uchida, T., K. Kosugi and T. Mizuyama. 1999. Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. *Journal of Hydrology* 222(1-4): 18-36.
19. Wang, Z., J. Feyen and C. J. Ritsema. 1998. Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. *Water Resources Research* 34: 2169–2182.
20. Zehe, E., H. Elsenbeer, F. Lindenmaier, K. Schulz and G. Bloschl. 2007. Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research* 43(7): 1-12.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 22, No. 4, Winter 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Preferential Flow Modeling Using Kinematic-Dispersive Wave Model and the Role of Macrospores

M. R. Mirzaei[1*] and S. Ruy[2]

(Received: November 23-2016 ; Accepted: January 8-2018)

Abstract

Preferential flow is of great importance in the environment and the human health. So, rapid water transportation and consequently, pollutants and pesticides leak out and get into the groundwater, making it very difficult to measure and quantify. To quantify and describe the preferential flow, two gravity-driven models were used: 1) kinematic wave model (KW) introduced by Germann in 1985), and 2) kinematic dispersive wave (KDW) model developed by applying a second-order correction to the Germann's model by Di Pietro et al. in 2003. So, the experimental data was obtained using the laboratory mini-rainfall-simulator over cylindrical soil samples at the laboratory. Their parameters were obtained using Solver add-ins in the Excel software. Then, the results were compared using the root-mean-square error (RMSE). The results showed that the KDW model could better predict the preferential flow (with lower RMSE). Also, the regression results showed 1) there was no significant relation between the preferential flow and the total porosity, and 2) there is a significant relation between the preferential flow and the macrospores.

Keywords: Preferential flow, Kinematic-dispersive wave model, Soil drainage hydrographs, Macrospores, Mini rainfall simulator

1. Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.
2. National Institute for Agricultural Research, Avignon, France.
*: Corresponding Author, Email: mmirzaei@yu.ac.ir