

مقایسه دقت مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری در شبیه‌سازی حرکت آب در بقایای لاشبرگ‌های کف جنگل توسط کد HydroGeoSphere

مجید همپور گورابجیری^{۱*} - علی رسول‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰

چکیده

در یک حوضه آبخیز جنگلی، بقایای کف جنگل شامل لاشبرگ‌ها بوده و نقش محیط متخلخل قبل از خاک معدنی را بازی می‌کند. خصوصیات هیدرولیکی بقایای کف جنگل تا حدودی ناشناخته بوده و نمی‌توان با روش‌های متداول برای خاک، آن‌ها را اندازه‌گیری نمود. در این پژوهش برای شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها از مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ون‌گنوختن و بروکز و کوری همراه با کد HydroGeoSphere استفاده گردید. نمونه‌برداری از لاشبرگ‌ها در سه نوع لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط، در جنگل‌های غرب استان گیلان و به صورت دست نخورده انجام گرفت. ابتدا با استفاده از روش معکوس، ضرایب مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز کوری برآورد شد. سپس با به کارگیری مدل‌های فوق‌الذکر، حرکت آب در لاشبرگ‌ها توسط کد HydroGeoSphere شبیه‌سازی گردید. مقادیر معیارهای آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') و ضریب کارایی اصلاح شده (E') به منظور مقایسه دقت مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری همراه با کد HydroGeoSphere در شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تجزیه آماری نشان داد کمترین حساسیت روش معکوس به پارامتر رطوبت باقیمانده در لاشبرگ‌ها می‌باشد. همچنین نتایج معیارهای آماری نشان داد، مدل ون‌گنوختن با MAE ، $RMSE$ ، d' و E' به ترتیب برابر با $۰/۲۷۵۳$ ، $۰/۱۶۵۹$ ، $۰/۱۸۹۵$ و $۰/۷۷۲۶$ نسبت به مدل بروکز و کوری با MAE ، $RMSE$ ، d' و E' به ترتیب $۰/۳۴۰۰$ ، $۰/۲۲۲۸$ ، $۰/۸۳۷۸$ و $۰/۶۹۸۴$ همراه با کد HydroGeoSphere برای شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها کارآمدتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روش معکوس، محیط متخلخل، مدل‌های هیدرولیکی، معادله ریچاردز

مقدمه

به ۵۰ سانتی‌متر برسد (۱۷). بقایای لاشبرگ کف جنگل به عنوان واسطه‌ای برای جریان آب و انرژی، بین هوا و خاک معدنی سطحی ایفای نقش می‌کند و از این طریق بسیاری از فرایندهای هیدرولوژیکی و بیوشیمیایی موجود در خاک را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (۱۳). نگهداری آب باران توسط بقایای لاشبرگ کف جنگل دارای اثرات ژئومورفولوژیکی و محیطی زیادی است؛ به طوری که در هنگام بارش باران به عنوان یک مخزن موقتی آب عمل کرده و باعث می‌شود که مدت زمان نفوذ آب به خاک معدنی زیرین افزایش یابد و از این طریق باعث افزایش ظرفیت نفوذ خاک شده، جریان آب سطحی و فرسایش ناشی از آن کاهش می‌یابد (۶). نوع درختان موجود در جنگل و خصوصیات مورفولوژی برگ درختان، اعم از پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و یا مخلوطی از پهن‌برگ و سوزنی‌برگ، اثر معنی‌داری بر کمیت و کیفیت این فرایندها خواهد گذاشت (۳). با وجود اهمیت زیاد بقایای لاشبرگ در یک اکوسیستم جنگلی، به دلیل وجود مشکلات در نمونه‌برداری و انجام آزمایشات، نقش این بقایا

در یک اکوسیستم جنگلی، در اثر ریزش برگ درختان و تجمع آنها، لایه‌ای از لاشبرگ سطح خاک معدنی را می‌پوشاند. این لایه علاوه بر برگ‌های خشک درختان شامل خرده‌ریزهای گیاهی، مواد چوبی، ریشه‌های گیاهان، بقایای میکروبی و محصولات حاصل از تجزیه آنها می‌باشد. ضخامت این بقایا با توجه به شرایط آب و هوایی، نوع و تراکم پوشش گیاهی، شرایط توپوگرافی، نوع خاک و همچنین اثرات انسان متغیر بوده و حتی ممکن است در بعضی از نقاط

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(* نویسنده مسئول: Email: mhomapoor@gmail.com)

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

ناپذیر می‌باشد. متداول‌ترین مدل‌ها در این زمینه، مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی دقت این مدل‌ها در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک انجام شده است. اما تحقیقی در مورد مقایسه دقت این مدل‌ها در شبیه‌سازی حرکت آب در محیط متخلخل لاشبرگ‌ها مشاهده نشده است. لذا هدف از این پژوهش مقایسه دقت دو مدل منحنی مشخصه آب و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بروکز و کوری و ون‌گنوختن برای شبیه‌سازی حرکت آب در سه نوع لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط (پهن‌برگ و سوزنی‌برگ) در جنگل‌های غرب استان گیلان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

در این پژوهش نمونه‌هایی از بقایای لاشبرگ کف جنگل، در جنگل‌های غرب استان گیلان، در منطقه اسالم و در سه حوضه جنگلی پوشیده از درختان پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط (پهن‌برگ و سوزنی‌برگ) برداشت گردید. نمونه‌برداری به صورت دست‌نخورده و با استفاده از استوانه‌های پلی‌اتیلن به قطر داخلی ۱۸/۱ و ارتفاع ۵/۸۴ سانتی‌متر (ضخامت لایه لاشبرگ کف جنگل) انجام گرفت. چون استفاده یک نمونه منفرد از لاشبرگ در آزمایش باعث می‌شود که مقدار آب نگهداری شده توسط نمونه، جزئی بوده و در اندازه‌گیری خطا ایجاد نماید، لذا برای تهیه نمونه آزمایشگاهی از هر نوع لاشبرگ (پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط) به تعداد ۷ نمونه برداشته شد. سپس نمونه‌های محتوی لاشبرگ هم‌نوع روی هم گذاشته شده و ستونی به ارتفاع ۴۰/۸۸ سانتی‌متر تشکیل گردید. در این صورت به علت افزایش یافتن ارتفاع مدل، زهکشی از نمونه آزمایشگاهی لاشبرگ به صورت تدریجی انجام شده و مقدار آب ذخیره شده توسط آن افزایش خواهد یافت که بر سهولت و دقت کار می‌افزاید (۶). برای جلوگیری از مخلوط و متراکم شدن لاشبرگ‌ها حین انجام آزمایش، در بین هر کدام از استوانه‌ها یک توری نخی با شبکه‌های به ابعاد ۱/۵ میلی‌متر مربع قرار داده شد (شکل ۱).

اجرای مدل معکوس

در مدل معکوس استفاده شده در این تحقیق از یک مدل پیشرو^۴ به نام کد HydroGeoSphere برای حل معادله جریان استفاده گردید. کد HydroGeoSphere، محصول ۲۰۰۸ دانشگاه واترلو^۵ کانادا بوده و برای حل معادله سه‌بعدی جریان آب از معادله تغییر

نادیده گرفته شده است (۴).

شاپ و همکاران (۱۶) اثرات هیدرولوژیکی بقایای لاشبرگ را در جنگل‌های پوشیده از درختان صنوبر مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که شدت جریان آب خروجی و شدت تبخیر از این بقایا زیاد بوده و خصوصیات هیدرولیکی این بقایا را می‌توان به عنوان شرایط مرزی در خاک سطحی دانست. به طوری که لازم است شبیه‌سازی حرکت آب در بقایای لاشبرگ و خاک سطحی در تماس با آن با هم انجام گیرد. اگی و برانت (۹) طی تحقیقات خود نقش بقایای لاشبرگ را در انتقال آب و انرژی بین هوا و خاک سطحی مورد بررسی قرار دادند و مدلی را برای بررسی حرکت آب و حرارت بین هوا، لاشبرگ و خاک تحت عنوان مدل انتقالی آب- گیاه- اتمسفر^۱ ارائه نمودند. ایشان اظهار داشتند مدل‌سازی حرکت آب و حرارت در خاک‌های جنگلی بدون در نظر گرفتن لایه لاشبرگ روی آن و خصوصیات لاشبرگ‌ها امکان پذیر نمی‌باشد. کاسوگی و همکاران (۶) مدل معکوسی را برای بررسی جریان غیر اشباع آب در بقایای لاشبرگ کف جنگل ارائه نمودند و در مدل معکوس ارائه شده، از معادله جریان غیر اشباع ریچاردز^۲ و معادله لاگ‌نرمال^۳ منحنی مشخصه آب خاک کاسوگی (۵) به عنوان مدل پیشرو استفاده و اظهار کردند مدل معکوس ارائه شده به خوبی جریان آب در بقایای لاشبرگ را شبیه‌سازی کرده و معادله ریچاردز قادر به تشریح جریان غیر اشباع آب در بقایای لاشبرگ می‌باشد. این محققین نشان دادند با توجه به اینکه منحنی مشخصه لاشبرگ‌ها با روش‌های معمول قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد، با روش معکوس می‌توان این منحنی را اندازه‌گیری نمود. رسول‌زاده و هماپور گورابجیری (۱۱) با روش معکوس پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک بروکز و کوری را برآورد کردند. ایشان نشان دادند که زهکشی آزاد شبیه‌سازی شده با پارامترهای مدل بروکز و کوری برآورده شده با روش معکوس، در نمونه لاشبرگ تطابق قابل قبولی را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. در تحقیقی دیگر رسول‌زاده و هماپور گورابجیری (۱۲) با بکارگیری مدل منحنی مشخصه آب خاک ون‌گنوختن و با استفاده از روش معکوس، خصوصیات هیدرولیکی سه نوع لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط را مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش معکوس ارائه شده در برآورد پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک ون‌گنوختن و شبیه‌سازی حرکت آب در هر سه نوع لاشبرگ کارایی قابل قبولی دارد.

برای مدل کردن حرکت آب در محیط‌های متخلخل، استفاده از مدل‌های منحنی مشخصه و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع اجتناب

1- Soil- vegetation- atmosphere transfer

2- Richards' equation

3- Lognormal equation

4- Forward model

5- Waterloo

شکل یافته ریچاردز به صورت زیر استفاده می کند (۱۸).

$$-\nabla \cdot (W_m q) + \sum \Gamma_{ex} + Q = W_m \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_w) \quad (۱)$$

که در آن، W_m نسبت حجمی تخلخل کل (بدون بعد)، q شدت جریان سیال (LT^{-1})، Q تبادل سیال با خارج از محیط شبیه سازی ($L^3L^{-3}T^{-1}$)، θ_s مقدار رطوبت اشباع (بدون بعد)، S_w درجه اشباع محیط متخلخل (بدون بعد) و Γ_{ex} به میزان تبادل حجمی سیال ($L^3L^{-3}T^{-1}$) بین محیط زیرسطحی و تمام بخش های دیگر احاطه شده توسط مدل اشاره دارد و در واحد حجم انواع دیگر محیطها بیان می شود.

مدل معکوس استفاده شده، براساس الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (۷) و با زبان برنامه نویسی ++C نوشته و توسعه داده شده است. به طوری که تابع هدف آن اختلاف شدت جریان خروجی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده از انتهای مدل آزمایشگاهی بوده و به صورت زیر می باشد (معادله ۲).

$$\Phi(q, b) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^n w_{ij} [q_j^*(z, t_i) - q_j(z, t_i, b)]^2 \quad (۲)$$

که در آن، $b(K_s, \theta_r, \theta_s, \dots)$ بردار عوامل مشخصه مجهول، $q_j^*(z, t_i)$ مقادیر اندازه گیری شده زهکشی آزاد یا شدت جریان خروجی از انتهای نمونه ها در زمان t_i ، m و n به ترتیب تعداد سری داده های اندازه گیری شده و تعداد قرائت ها برای هر سری داده و v_j و w_{ij} به ترتیب ضرایب وزنی برای هر قرائت و هر سری از داده های اندازه گیری شده هستند.

در کد HydroGeoSphere طی دو مرحله مجزا از دو مدل هیدرولیکی و گنوختن (۱۹) و بروکز و کوری (۲) استفاده شد. مدل بروکز و کوری برای منحنی مشخصه آب خاک استفاده شده در HydroGeoSphere به صورت زیر است (۱۸):

$$S_w = S_{wr} + (1 - S_{wr})(\alpha\psi)^{-\beta} \quad \text{for } \psi < -\frac{1}{\alpha} \quad (۳)$$

$$S_w = 1 \quad \text{for } \psi \geq -\frac{1}{\alpha}$$

مدل هدایت هیدرولیکی نسبی بروکز و کوری بصورت رابطه زیر در کد HydroGeoSphere استفاده شده است (۱۸):

$$k_r = \left(\frac{(S_w - S_{wr})}{1 - S_{wr}} \right)^{(2/\beta + 4)} \quad (۴)$$

که در آن ها:

α : عکس مکش ورود هوا (L^{-1})

β : شاخص توزیع اندازه منافذ (بدون بعد)

S_w : درجه اشباع (بدون بعد) می باشد که عبارت است از $S_w = \frac{\theta}{\theta_s}$ که در آن θ رطوبت متناظر با مکش (L^{-1}) و θ_s رطوبت اشباع (L^3/L^3) می باشد.

S_{wr} : درجه اشباع رطوبت باقیمانده (بدون بعد) می باشد و از رابطه $S_{wr} = \frac{\theta_r}{\theta_s}$ محاسبه می گردد که در آن θ_r رطوبت باقیمانده در خاک می باشد.

k_r : هدایت هیدرولیکی نسبی محیط (بدون بعد) بوده و عبارت است از $k_r = \frac{k(\theta)}{k_s}$ که در آن $k(\theta)$ و k_s به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اشباع می باشد.

تابع و گنوختن (۱۹) به صورت زیر در کد HydroGeoSphere به کار رفته است (۱۸):

$$S_w = S_{wr} + (1 - S_{wr}) \left(1 + |\alpha\psi|^\beta \right)^{-(1-1/\beta)} \quad \text{for } \psi < 0 \quad (۵)$$

$$S_w = 1 \quad \text{for } \psi \geq 0$$

برای مدل هدایت هیدرولیکی نسبی از مدل و گنوختن - معلم به صورت زیر استفاده گردیده است (۱۸).

$$k_r = \left(\frac{(S_w - S_{wr})}{1 - S_{wr}} \right)^{0.5\Gamma} \left[1 - \left(1 - \frac{(S_w - S_{wr})}{1 - S_{wr}} \right)^{1/(1-1/\beta)} \right]^{(1-1/\beta)^2} \quad (۶)$$

که در آنها α و β پارامترهای شکل مدل و گنوختن بوده و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده است.

مراحل انجام آزمایش

در انجام آزمایش، ابتدا هر کدام از نمونه های آزمایشگاهی محتوی لاشبرگ کف جنگل با استفاده از یک باران ساز مصنوعی تحت بارش باران قرار گرفتند. شدت بارش اعمال شده روی نمونه لاشبرگ ها به طور متناوب بین ۰ تا ۰/۱ سانتی متر در ثانیه بود (شکل ۱). آبی که از انتهای نمونه آزمایشگاهی زهکشی می شد، توسط یک قیف به داخل یک بشر منتقل شده و به وسیله یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم، جرم آب زهکشی شده در مدت زمان های مشخص (۲۰ ثانیه) به دقت ثبت گردید و از این طریق دبی زهکشی خروجی از نمونه آزمایشگاهی محتوی لاشبرگ در زمان های مختلف آزمایش اندازه گیری شد (شکل ۱). شدت بارش اعمال شده به نمونه لاشبرگ توسط باران ساز و دبی آب زهکشی شده از انتهای نمونه در حین انجام آزمایش، در واقع اطلاعات اولیه مورد نیاز برای شبیه سازی جریان غیر اشباع و تخمین ویژگی های هیدرولیکی بقایای لاشبرگ کف جنگل به روش معکوس می باشد.

چون شرایط اولیه لاشبرگ از جمله رطوبت یا پتانسیل ماتریک معلوم نبوده و اندازه گیری این مقادیر در آزمایشگاه کار بسیار مشکل و

گردید.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (7)$$

$$E' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - O'|} \quad (8)$$

$$d' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O'| + |O_i - O'|)} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (S_i - O_i)^2} \quad (10)$$

که در آن‌ها:

O_i : مقادیر زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده از انتهای مدل آزمایشگاهی.

S_i : مقادیر شبیه‌سازی شده زهکشی آزاد.

O' : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده

n : تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده - برآورد شده شدت جریان می‌باشد.

MAE : میانگین خطای مطلق^۶ است که مقدار آن از صفر تا بی‌نهایت می‌باشد. مقدار صفر نشانگر تطبیق کامل مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری می‌باشد.

E' : ضریب کارایی اصلاح شده^۷ است و محدوده‌ی آن از یک تا منفی بی‌نهایت می‌باشد. E' برابر با یک نشان دهنده برابری مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری بوده و هرچه مقدار آن از یک کمتر باشد دقت مقادیر برآورد شده کمتر می‌باشد.

d' : شاخص مطابقت اصلاح شده^۸ است که که محدوده آن از صفر تا یک است. مقدار d' هرچه بیشتر باشد یعنی مقادیر برآورد شده به مقدار اندازه‌گیری نزدیک‌تر می‌باشد.

$RMSE$: ریشه میانگین مربعات خطا^۹، هرچه کوچک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود (۱۴).

برای مقایسه میانگین دو سری از مقادیر معیارهای آماری در دو حالت استفاده از معادلات ون‌گنوختن و بروکز و کوری از نرم‌افزار SPSS و آزمون t میانگین مشاهدات جفت شده^{۱۰} استفاده شد.

تقریباً غیر ممکن می‌باشد، بنابراین ابتدا اندازه‌گیری زهکشی از نمونه لاشبرگ در شدت بارش ثابت و حالت ماندگار انجام گرفت. سپس آزمایش زهکشی در شدت بارش‌های متفاوت و حالت غیرماندگار انجام شد. مقادیر بارش و دبی خروجی اندازه‌گیری شده در حالت ماندگار و غیر ماندگار، به عنوان داده‌های ورودی، وارد مدل کامپیوتری شدند. تحت این شرایط، مدل کامپیوتری روش معکوس جهت تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک اجرا گردید به طوری که تابع هدف، مینیمم گردد. در این مرحله (مرحله واسنجی) هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع، رطوبت باقیمانده در خاک، α و β پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک ون‌گنوختن (۱۹) و بروکز و کوری (۲) با روش معکوس تخمین زده شد. در مرحله بعد (مرحله اعتبارسنجی) بدون به کارگیری روش معکوس با وارد کردن مشخصات هیدرولیکی تخمین زده شده در کد HydroGeoSphere به عنوان داده‌های ورودی، حرکت آب در لاشبرگ‌ها در حالت غیرماندگار شبیه‌سازی گردید.

برای حل معادلات دیفرانسیلی مانند معادله ریچاردز با روش‌های عددی، میدان حل باید شبکه‌بندی گردد. برای این منظور با استفاده از گریدبیلدر^۱ (۸)، شبکه المان محدود مانند شکل ۱ ایجاد گردید. برای افزایش دقت شبکه‌بندی در جهت عمودی ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

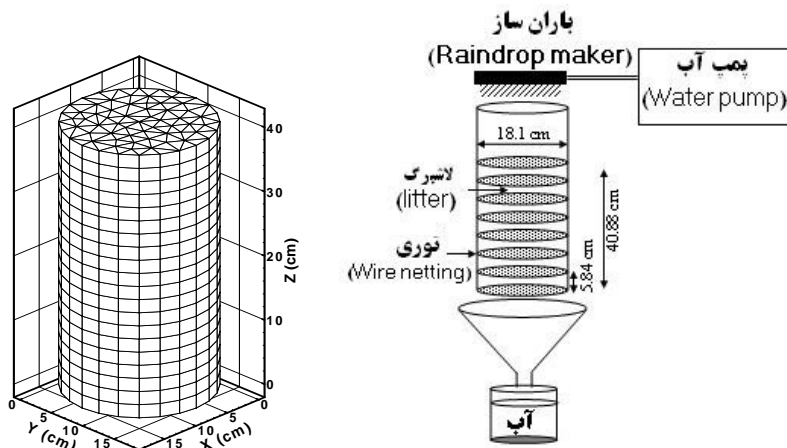
شرایط مرزی در این تحقیق طوری در نظر گرفته شد که فیزیک مسئله را شامل شده و منطبق با واقعیت باشد. لذا در مرز فوقانی در این پژوهش، در حالت ماندگار، شدت جریان ثابت اعمال گردید. در حالت غیر ماندگار مرز فوق، مرز نیومن^۲ در نظر گرفته شد. بطوری‌که در این مرز شدت جریان متغیر^۳ (شدت بارش متغیر) اعمال گردید. در حالت‌های ماندگار و غیر ماندگار، در طرفین استوانه به علت اینکه جریان جانبی در این تحقیق وجود نداشت، شدت جریان صفر^۴ و در مرز پایین زهکشی آزاد^۵ در نظر گرفته شد.

استفاده از معیارهای آماری برای مقایسه کمی دقت شبیه‌سازی دو مدل هیدرولیکی ون‌گنوختن و بروکز و کوری

برای مقایسه کمی شدت جریان خروجی اندازه‌گیری شده با زهکشی آزاد شبیه‌سازی شده با مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری همراه با کد HydroGeoSphere از چهار معیار آماری زیر استفاده

- 6- Mean absolute error
- 7- Modified Coefficient Efficiency
- 8- Modified Index of agreement
- 9- Root mean square error
- 10- Compare Means Paired t test

- 1- Grid builder
- 2- Neumann
- 3- Specified flux
- 4- No flow
- 5- Free drainage



شکل ۱- شمایی از مدل آزمایشگاهی و شبکه به کار رفته در تحقیق برای مدل آزمایشگاهی
Figure 1- Schematic of the experimental device and numerical model mesh

در مدل، به صورت لگاریتمی ارائه شده است.

جداول ۱ الی ۳ نشان می‌دهند، از بین پارامترهای تخمین زده شده، خطای استاندارد پارامتر θ_r در مقایسه با میانگین مقادیر برآورد شده آن، بزرگ بوده، لذا روش معکوس به این پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر در هر دو مدل حساسیت کمتری دارد. بزرگ بودن خطای استاندارد در تخمین پارامترها با استفاده از روش معکوس، مبین دقت کمتر روش معکوس در تخمین آن پارامتر می‌باشد (۱ و ۱۰).

نتایج و بحث

تخمین پارامتر مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری

مقادیر پارامترهای تخمین زده شده با روش معکوس برای ۳ نوع لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط به همراه خطای استاندارد هر کدام از آن‌ها در جداول ۱ الی ۳ نشان داده شده است. چون شرط لازم برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نرمال بودن توزیع آن‌ها می‌باشد، لذا مدل معکوس برای تبدیل داده‌ها از آن‌ها لگاریتم گرفته و مقادیر پارامترهای تخمین زده شده و خطای استاندارد محاسبه شده

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری تخمین زده شده با روش معکوس به همراه خطای استاندارد آن‌ها برای نمونه

لاشبرگ پهن‌برگ (K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_s : رطوبت اشباع، θ_r : رطوبت باقیمانده، α و β پارامتر مدل‌ها)

Table 1. Parameters of van Genuchten and Brooks and Corey models estimated by inverse method along with standard error for broad-litters (K_s : saturated hydraulic conductivity, θ_s : saturated water content, θ_r : residual water content, α and β : shape parameters)

پارامترها Parameters	مدل‌های هیدرولیکی Hydraulic models	مقدار تخمینی Estimated value	خطای استاندارد Standard error
K_s , $\text{Log}_{10}(\text{cm s}^{-1})$	ون‌گنوختن	0.477	1.200
	بروکز و کوری	0.616	2.980
θ_s , $\text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-0.456	0.603
	بروکز و کوری	-0.482	1.200
θ_r , $\text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-1.398	2.690
	بروکز و کوری	-1.420	9.580
α , $\text{Log}_{10}(\text{cm}^{-1})$	ون‌گنوختن	-1.770	0.340
	بروکز و کوری	-0.690	1.320
β , $\text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	0.022	0.028
	بروکز و کوری	-0.921	0.996

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری تخمین زده شده با روش معکوس به همراه خطای استاندارد آن‌ها برای نمونه لاشبرگ سوزنی‌برگ (K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_s : رطوبت اشباع، θ_r : رطوبت باقیمانده، α و β پارامتر مدل‌ها)

Table 2. Parameters of van Genuchten and Brooks and Corey models estimated by inverse method along with standard error for needle-leaved litters (K_s : saturated hydraulic conductivity, θ_s : saturated water content, θ_r : residual water content, α and β : shape parameters)

پارامترها Parameters	مدل‌های هیدرولیکی Hydraulic models	مقدار تخمینی Estimated value	خطای استاندارد Standard error
$K_s, \text{Log}_{10}(\text{cm}^{-1})$	ون‌گنوختن	1.226	7.290
	بروکزو کوری	1.252	6.340
$\theta_s, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-0.495	0.762
	بروکزو کوری	-0.509	2.050
$\theta_r, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-1.770	47.900
	بروکزو کوری	-1.638	29.800
$\alpha, \text{Log}_{10}(\text{cm}^{-1})$	ون‌گنوختن	-1.347	1.430
	بروکزو کوری	-0.923	2.300
$\beta, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	0.025	0.162
	بروکزو کوری	-0.810	1.080

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری تخمین زده شده با روش معکوس به همراه خطای استاندارد آن‌ها برای نمونه لاشبرگ مخلوط (K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_s : رطوبت اشباع، θ_r : رطوبت باقیمانده، α و β پارامتر مدل‌ها)

Table 3. Parameters of van Genuchten and Brooks and Corey models estimated by inverse method along with standard error for mixed litters (K_s : saturated hydraulic conductivity, θ_s : saturated water content, θ_r : residual water content, α and β : shape parameters)

پارامترها Parameters	مدل‌های هیدرولیکی Hydraulic models	مقدار تخمینی Estimated value	خطای استاندارد Standard error
$K_s, \text{Log}_{10}(\text{cm}^{-1})$	ون‌گنوختن	0.140	2.730
	بروکزو کوری	0.121	1.990
$\theta_s, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-0.424	3.320
	بروکزو کوری	-0.407	0.297
$\theta_r, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	-1.770	74.400
	بروکزو کوری	-1.456	3.400
$\alpha, \text{Log}_{10}(\text{cm}^{-1})$	ون‌گنوختن	-1.509	0.895
	بروکزو کوری	-0.719	0.792
$\beta, \text{Log}_{10}(-)$	ون‌گنوختن	0.053	0.110
	بروکزو کوری	-0.697	0.587

هیدرولیکی سه نمونه لاشبرگ به طور مستقیم و به روش بار ثابت، بر اساس قانون دارسی اندازه‌گیری شد. در صورت خطی بودن رابطه بین شدت جریان و شیب هیدرولیکی، جریان آرام و رابطه دارسی برای بررسی حرکت آب در نمونه‌های لاشبرگ مناسب می‌باشد. برای بررسی معتبر بودن قانون دارسی برای جریان آب در بقایای لاشبرگ، سه شیب هیدرولیکی متفاوت برای هرکدام از نمونه‌های لاشبرگ (پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط) اعمال و شدت جریان آب عبوری متناسب با آن اندازه‌گیری گردید. نتایج حاکی از خطی بودن رابطه بین

بنابراین برای تمام لاشبرگ‌ها کمترین دقت مربوط به تخمین پارامتر θ_r می‌باشد. چون روشی برای اندازه‌گیری θ_r در لاشبرگ‌ها وجود ندارد، لذا علیرغم حساسیت کم روش معکوس به این پارامتر، می‌توان مقدار برآورد شده را پذیرفت.

جدول ۴ نشان می‌دهد هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده برای لاشبرگ‌ها نسبت به خاک دارای مقادیر نسبتاً بزرگی می‌باشد. برای بررسی صحت و دقت برآورد مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع لاشبرگ‌ها توسط مدل معکوس، طی آزمایشی جداگانه، هدایت

۱/۳۱۴۷ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد. مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق قابل قبولی را با مقادیر برآورد شده توسط مدل معکوس (جدول ۴) نشان داد.

شدت جریان و شیب هیدرولیکی بود. مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده با روش بار ثابت، برای سه نوع لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط به ترتیب برابر ۱/۸۶۵۳، ۱۵/۷۹۷ و

جدول ۴- مقادیر پارامترهای مدل‌های ون گنوختن و بروکز و کوری تخمین زده شده با روش معکوس برای نمونه لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط (K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_s : رطوبت اشباع، θ_r : رطوبت باقیمانده، α و β پارامتر مدل‌ها)

Table 4- Parameters of van Genuchten and Brooks and Corey models estimated by inverse method for broad-leaved, needle-leaved and mixed litters (K_s : saturated hydraulic conductivity, θ_s : saturated water content, θ_r : residual water content, α and β : shape parameters)

پارامترها Parameters	مدل‌های هیدرولیکی Hydraulic models	مقادیر تخمینی پارامترها Estimated value of parameters		
		پهن‌برگ Broad-leaved	سوزنی‌برگ Needle-leaved	مخلوط Mixed-stand
K_s (cm^{-1})	ون گنوختن	2.999	16.827	1.380
	بروکز و کوری	4.130	17.865	1.321
θ_s (-)	ون گنوختن	0.350	0.320	0.377
	بروکز و کوری	0.330	0.310	0.392
θ_r (-)	ون گنوختن	0.040	0.017	0.017
	بروکز و کوری	0.038	0.023	0.035
α (cm^{-1})	ون گنوختن	0.017	0.045	0.031
	بروکز و کوری	0.204	0.119	0.191
β (-)	ون گنوختن	1.052	1.059	1.130
	بروکز و کوری	0.120	0.155	0.201

معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب کارایی اصلاح شده (E') و شاخص مطابقت اصلاح شده (d') استفاده گردید. نتایج مقایسات انجام شده با استفاده از چهار معیار آماری برای تمام نمونه‌های لاشبرگ و همچنین میانگین مقادیر MAE ، E' و d' برای هر کدام از نمونه‌های لاشبرگ پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مخلوط در جدول ۵ ارائه شده است.

به طور متوسط برای نمونه لاشبرگ پهن‌برگ میانگین خطای مطلق مدل ون گنوختن کوچک‌تر از مدل بروکز و کوری است. همچنین ضریب کارایی اصلاح شده و شاخص مطابقت اصلاح شده مدل ون گنوختن بزرگ‌تر از مدل بروکز و کوری می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که به طور میانگین مدل ون گنوختن همراه با کد HydroGeoSphere حرکت آب در لاشبرگ‌های پهن‌برگ را بهتر از معادلات بروکز و کوری شبیه‌سازی کرده و خطای کمتری دارد.

میانگین مقادیر معیارهای آماری برای نمونه‌های لاشبرگ سوزنی‌برگ و مخلوط نشان می‌دهد به طور متوسط برای نمونه‌های لاشبرگ سوزنی‌برگ و مخلوط، دقت شبیه‌سازی توسط مدل هیدرولیکی ون گنوختن همراه با کد HydroGeoSphere بیشتر از مدل بروکز و کوری می‌باشد.

مقایسه کیفی شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها با دو

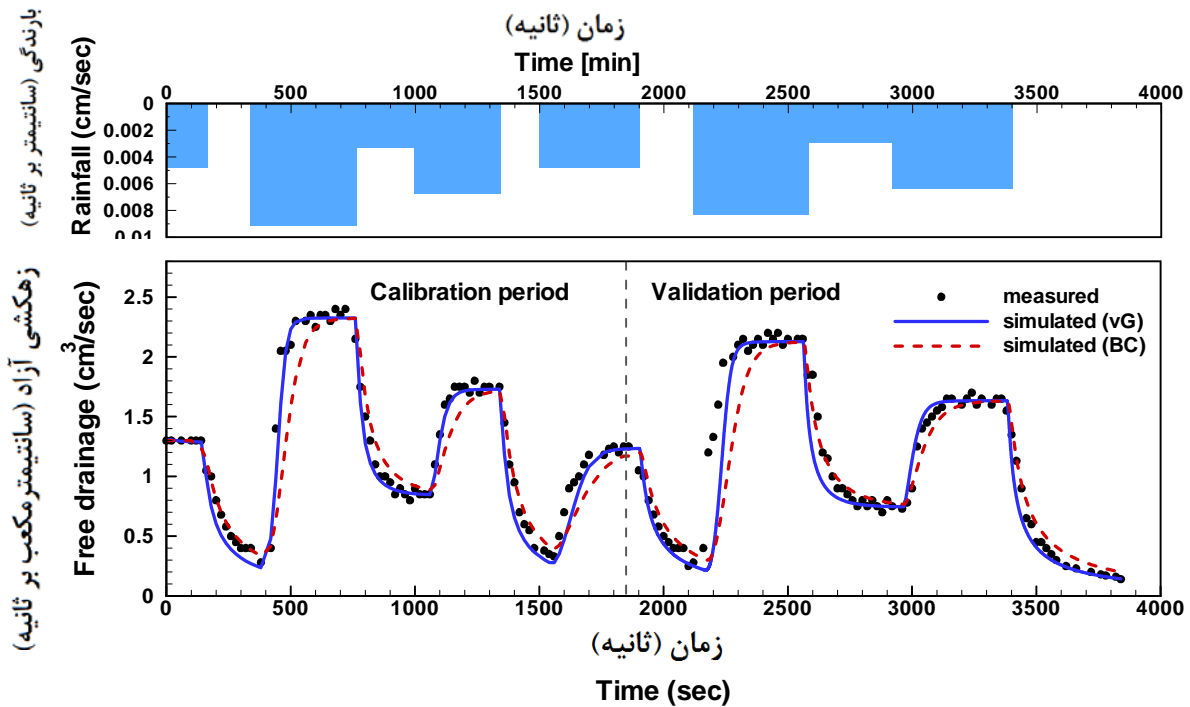
مدل ون گنوختن و بروکز و کوری

مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای نمونه‌ها بطور جداگانه انجام گرفت. برای مقایسه کارایی مدل‌های هیدرولیکی ون گنوختن و بروکز و کوری در شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها، زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دو حالت استفاده از مدل‌های ون گنوختن و بروکز و کوری طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی با هم رسم شدند (شکل‌های ۲ تا ۴). با توجه به این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در بیشتر موارد زهکشی آزاد شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ون گنوختن تطابق بهتری نسبت به زهکشی آزاد شبیه‌سازی شده توسط مدل بروکز و کوری با مقادیر اندازه‌گیری شده، داشته است. مدل بروکز و کوری همراه با کد HydroGeoSphere حرکت آب در لاشبرگ‌ها را نتوانسته بخوبی مدل ون گنوختن شبیه‌سازی کند.

مقایسه کمی شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها با دو مدل

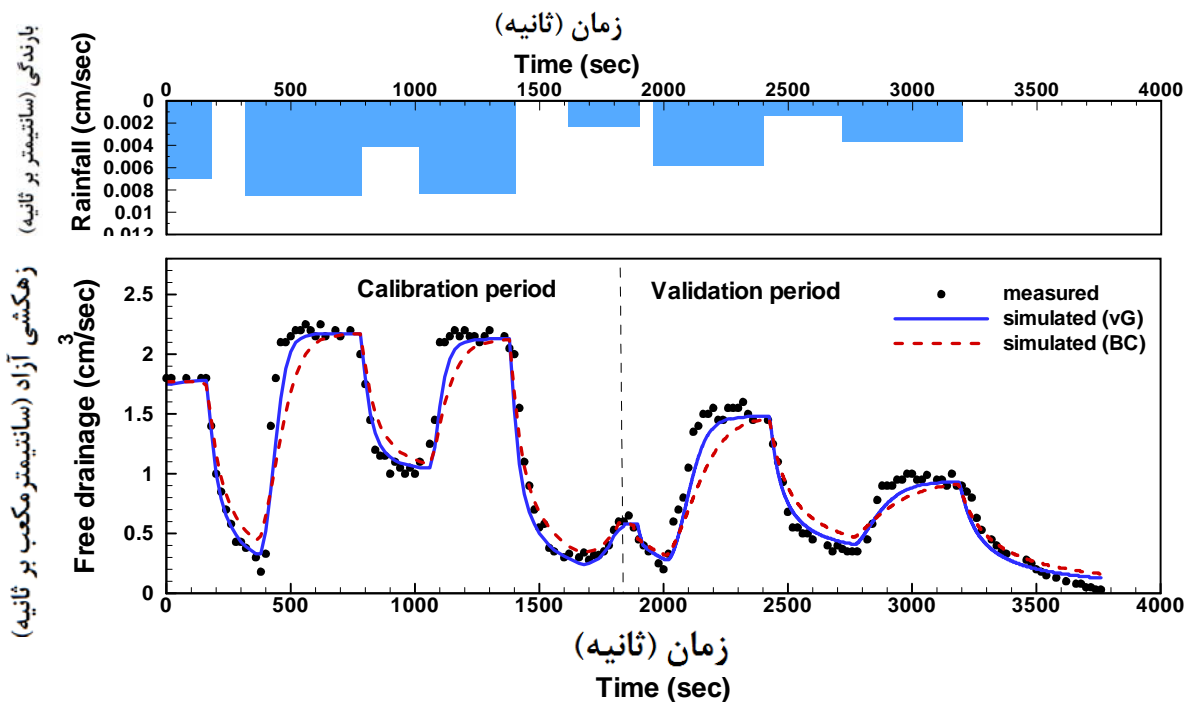
ون گنوختن و بروکز و کوری

برای مقایسه کمی مقادیر زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های ون گنوختن و بروکز و کوری، از چهار



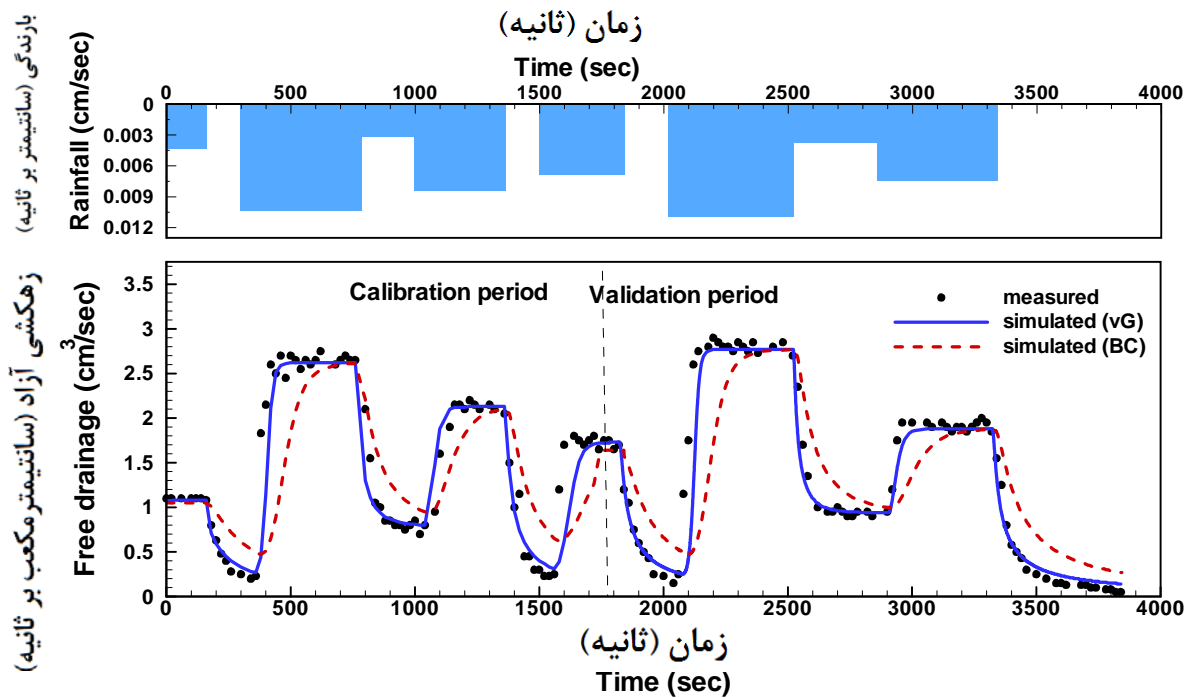
شکل ۲- زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با کد HydroGeoSphere با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن (vG) و بروکز و کوری (BC) برای نمونه لاشبرگ پهن‌برگ

Figure 2. Observed and simulated free drainage by HydroGeoSphere using van Genuchten and Brooks and Corey models for broad-leaved sample



شکل ۳- نمودار زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با کد HydroGeoSphere با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن (vG) و بروکز و کوری (BC) برای نمونه لاشبرگ سوزنی‌برگ

Figure 3. Observed and simulated free drainage by HydroGeoSphere using van Genuchten and Brooks and Corey models for needle-leaved sample



شکل ۴- نمودار زهکشی آزاد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با کد HydroGeoSphere با استفاده از مدل‌های ون گنوختن (vG) و بروکز و کوری (BC) برای نمونه لاشبرگ مخلوط

Figure 4. Observed and simulated free drainage by HydroGeoSphere using van Genuchten and Brooks and Corey models for mixed-stand sample

نتیجه‌گیری کلی

کدهای کامپیوتری مختلف مانند Hydrus و HydroGeoSphere، برای مدل کردن حرکت آب در خاک از مدل‌های هیدرولیکی ون گنوختن و بروکز و کوری همراه با معادله دیفرانسیلی ریچاردز استفاده می‌کنند. مقبولیت مدل ون گنوختن بیشتر از مدل بروکز و کوری بوده و در مدل‌سازی حرکت آب در خاک بیشتر به کار می‌رود. توانایی این مدل‌ها همراه با معادله دیفرانسیلی ریچاردز و برتری آن‌ها نسبت به هم، در مدل‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌های جنگل‌ها کمتر مورد مقایسه قرار گرفته است. در این پژوهش، توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌های برگ‌پهن، سوزنی‌برگ و مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو مدل به همراه معادله دیفرانسیلی ریچاردز قادر به شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌های کف جنگل می‌باشند. مقایسه کلی میانگین دو سری از مقادیر معیارهای آماری در دو حالت استفاده از مدل‌های هیدرولیکی ون گنوختن و بروکز و کوری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و از طریق آزمون t میانگین مشاهدات جفت شده انجام گرفت (جدول ۵). نتایج نشان داد که در مجموع، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق مدل ون گنوختن، کوچک‌تر از مدل بروکز و کوری می‌باشد. همچنین

ضریب کارایی اصلاح شده و شاخص مطابقت اصلاح شده مدل ون گنوختن بزرگ‌تر از مدل بروکز و کوری می‌باشد. لذا می‌توان گفت از نظر کمیت عددی مقدار خطا، مدل ون گنوختن به همراه معادله ریچاردز دارای خطای کمتری در شبیه‌سازی حرکت آب در لاشبرگ‌ها نسبت به مدل بروکز و کوری می‌باشد. اما مقایسه آماری خطاها (معیارهای آماری) با آزمون t نشان داد در مقادیر معیارهای آماری، اختلاف معنی‌داری از نظر آماری در سطح احتمال ۱ درصد وجود ندارد (جدول ۵). لذا می‌توان نتیجه گرفت با اینکه مدل ون گنوختن همراه با کد HydroGeoSphere حرکت آب در لاشبرگ‌ها را با خطایی کمتر از مدل بروکز و کوری شبیه‌سازی کرده ولی از نظر آماری اختلاف معیارهای آماری در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار نمی‌باشد. رسول‌زاده (۱۰) در تحقیق خود از معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطا برای مقایسه زهکشی آزاد شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های ون گنوختن و بروکز و کوری استفاده کرده و در نتایج خود اظهار داشت که معادله ریچاردز به همراه معادله ون گنوختن در شرایط زهکشی آزاد مشابه، بهتر از مدل بروکز و کوری حرکت آب در خاک را مدل می‌کند. در حالی نتیجه این پژوهش نشان داد برای مدل کردن حرکت آب در لاشبرگ‌های جنگل‌ها مدل ون گنوختن نسبت به مدل بروکز و کوری ارجحیت ندارد.

جدول ۵- مقادیر معیارهای آماری برای مقایسه شبیه‌سازی زهکشی آزاد با کد HydroGeoSphere با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن و بروکز و کوری

Table 5- Statistical criteria values for comparing simulated free drainage by HydroGeoSphere code using van Genuchten and Brooks and Corey

RMSE	d'	E'	MAE	مدل‌های هیدرولیکی Hydraulic models	نمونه لاشبرگ Forest floor sample
0.1283	0.9146	0.8231	0.0900	ون‌گنوختن	پهن‌برگ تکرار اول
0.2369	0.8418	0.6951	0.1551	Brooks and Corey	First replication of broad-leaved
0.2899	0.8641	0.6999	0.1705	ون‌گنوختن	پهن‌برگ تکرار دوم
0.2537	0.8500	0.7072	0.1664	Brooks and Corey	Second replication of broad-leaved
0.5879	0.8332	0.6496	0.3207	ون‌گنوختن	پهن‌برگ تکرار سوم
0.4662	0.8288	0.6872	0.2862	Brooks and Corey	Third replication of broad-leaved
0.2033	0.9065	0.8114	0.1237	ون‌گنوختن	سوزنی‌برگ تکرار اول
0.3531	0.8102	0.6424	0.2346	Brooks and Corey	First replication of needle-leaved
0.1730	0.9152	0.8345	0.1111	ون‌گنوختن	سوزنی‌برگ تکرار دوم
0.2469	0.8534	0.7331	0.1791	Brooks and Corey	Second replication of needle-leaved
0.3624	0.9471	0.8975	0.1944	ون‌گنوختن	سوزنی‌برگ تکرار سوم
0.3664	0.9436	0.8912	0.2063	Brooks and Corey	Third replication of needle-leaved
0.3245	0.8788	0.7589	0.1812	ون‌گنوختن	مخلوط تکرار اول
0.3298	0.9525	0.9074	0.1778	Brooks and Corey	First replication of mixed-stand
0.2972	0.8024	0.5939	0.2261	ون‌گنوختن	مخلوط تکرار دوم
0.2963	0.8022	0.6196	0.2118	Brooks and Corey	Second replication of mixed-stand
0.1113	0.9434	0.8842	0.0752	ون‌گنوختن	مخلوط تکرار سوم
0.5108	0.6576	0.4025	0.3878	Brooks and Corey	Third replication of mixed-stand
0.3354 (0.2331)	0.8706 (0.0411)	0.7242 (0.0893)	0.1937 (0.1171)	ون‌گنوختن	میانگین پهن‌برگ (انحراف معیار)
0.3189 (0.1278)	0.8402 (0.0107)	0.6965 (0.0101)	0.2026 (0.0726)	Brooks and Corey	Mean of broad-leaved (Standard deviation)
0.2462 (0.1017)	0.9229 (0.0214)	0.8478 (0.0446)	0.1431 (0.0449)	ون‌گنوختن	میانگین سوزنی‌برگ (انحراف معیار)
0.3221 (0.0655)	0.8691 (0.0681)	0.7556 (0.1259)	0.2067 (0.0278)	Brooks and Corey	Mean of needle-leaved (Standard deviation)
0.2443 (0.1160)	0.8749 (0.0706)	0.7457 (0.1456)	0.1608 (0.0775)	ون‌گنوختن	میانگین مخلوط (انحراف معیار)
0.3790 (0.1154)	0.8041 (0.1474)	0.6432 (0.2533)	0.2591 (0.1127)	Brooks and Corey	Mean of mixed-stand (Standard deviation)
0.2753 (0.1469)	0.8895 (0.0491)	0.7726 (0.1052)	0.1659 (0.0770)	ون‌گنوختن	متوسط مقادیر معیارها (انحراف معیار)
0.3400 (0.0966)	0.8378 (0.0861)	0.6984 (0.1496)	0.2228 (0.0737)	Brooks and Corey	Mean of criteria (Standard deviation)

و فرج ممتد و قطور داخل توده لاشبرگ، بالاترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از هر دو مدل ون‌گنوختن و بروکز و کوری تخمین زده شد (جدول ۴). مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی هدایت

نتایج مقادیر پارامترهای تخمینی نشان داد تمام نمونه‌های بقایای جنگلی دارای مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع بالایی می‌باشند. در لاشبرگ سوزنی‌برگ نیز به دلیل شکل ظاهری لاشبرگ و وجود خلل

(۶).

بقایای لاشبرگ کف جنگل به دلیل دارا بودن هدایت هیدرولیکی اشباع بالا، قدرت نفوذ آب باران را در حد بالایی نگه می‌دارند. بنابراین لایه لاشبرگ موجود در کف جنگل‌ها اثرات محیطی و ژئومورفولوژیکی مؤثری را خواهد داشت. از بین رفتن لایه لاشبرگ موجود در کف جنگل‌ها چه از طریق آتش‌سوزی، قطع درختان یا پدیده‌های دیگر باعث کاهش حفاظت خاک سطحی و تخریب فیزیکی ساختمان خاک شده و مقدار رواناب سطحی و فرسایش خاک را به طور فزاینده‌ای افزایش می‌دهد (۱۵).

هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت تطابق قابل قبولی را با مقادیر برآورد شده توسط مدل معکوس با استفاده از هر دو مدل ون‌گنوختن و بروکز و کوری داشت. در تحقیقی مشابه کاسوگی و همکاران (۶) برای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل لاشبرگ با استفاده از مدل هیدرولیکی لاگ نرمال، از مدل معکوس استفاده نموده و نشان دادند مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع لاشبرگ‌ها به طور نسبی بیشتر از خاک بوده و تقریباً مشابه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های سنگریزه‌ای است. در بین لاشبرگ‌ها هم هدایت هیدرولیکی اشباع لاشبرگ سوزنی‌برگ بیشتر از بقیه لاشبرگ‌ها بود

منابع

- 1- Augeard B., Assouline S., Fonty A., Kao C., and Vauclin M. 2007. Estimating hydraulic properties of rainfall induced soil surface seals from infiltration experiments and X-ray bulk density measurements. *Journal of Hydrology*, 341: 12-26.
- 2- Brooks R.H., and Corey A.J. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology*. Paper 3. Colo State University, Fort Collins, Colo.
- 3- Catharina J.E., Nabuur, s G., Verburg P.H., and de Waal R.W. 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implication for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 256: 482-490.
- 4- Greiffenhagen A., Wessolek G., Facklam M., Renger M., and Stoffregen H. 2005. Hydraulic functions and water repellency of forest floor horizons on sandy soils. *Geoderma*, 132: 182-195.
- 5- Kosugi K. 1997. A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution. *Journal of forest research*, 2(1): 1-8.
- 6- Kosugi K., Mori K., and Yasuda H. 2001. An inverse modeling for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor. *Journal of Hydrology*, 246: 96-108.
- 7- Marquardt D.W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- 8- McLaren R.G. 2004. GRID BUILDER. A pre-processor for 2-D, Triangular element, finite-element programs. Groundwater Simulation Group, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- 9- Ogee J., and Brunet Y. 2002. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 255: 212-233.
- 10- Rasoulzadeh A. 2009. Evaluation of parameters estimation using inverse method in unsaturated porous media. 10th International Agricultural Engineering Conference (IAEC), 7-10 December, Thailand.
- 11- Rasoulzadeh A., and Homapoor Ghoorabjiri M. 2011. Estimation of hydraulic properties of forest floor using inverse method. *International Agricultural Engineering Journal*, 20(2): 976-979.
- 12- Rasoulzadeh A., and Homapoor Ghoorabjiri M. 2013. Comparing hydraulic properties of different forest floors. *Hydrological Processes*. DOI:10.1002/hyp.10006.
- 13- Redding T. E., Hannm K.D., Quideau S.A., and Devito K.J. 2005. Particle density of Aspen, Spruce, and Pine forest floor in Alberta, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 1503-1506.
- 14- Salazar O., Wesstrom I., and Joel A. 2008. Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management*, 95: 1135-1143.
- 15- Sato Y., Kumagai T.O., Kume A., Otsuki K., and Ogawa sh. 2004. Experimental analysis of litter layers- the effect of rainfall conditions and leaf shapes. *Hydrological Processes*, 18: 3007-3018.
- 16- Schaap M.G., Bouten W., and Verstraten J.M. 1997. Forest floor water content dynamics in a Douglas fir stand. *Journal of Hydrology*, 201: 368-383.
- 17- Sharratt B.S. 1997. Thermal conductivity and water retention of a black spruce forest floor. *Soil Science Society of America Journal*, 162: 576-682.
- 18- Therrien R., McLaren R.G., and Sudicky E.A. 2008. HydroGeoSphere: A Three Dimensional model describing fully- integrated subsurface and surface flow and solute transport. University of Waterloo, Canada. pp 349.
- 19- van Genuchten M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.

Comparison of Accuracy of van Genuchten and Brooks & Corey models for Simulating Water Flow in Forest Floor using HydroGeoSphere Code

M. Homapoor Goorabjiri^{1*} - A. Rasoulzadeh²

Received: 21-02-2015

Accepted: 21-12-2015

Introduction: The forest residuals play an important role in runoff rate, soil erosion, and soil infiltration capacity of protecting mineral (surface) soils from the direct impact of raindrops. By intercepting rainfall, the forest residuals serve as a temporary reservoir and allows more time for infiltration into the mineral soil beneath (Kosugi et al., 2001). Hydraulic properties of forest residuals were unknown to some extent and could not be measured with similar methods used for mineral soil. In recent years, several studies on the forest floor have been published (Kosugi et al., 2001; Schaap et al., 1997). The objective of this study was the comparison of accuracy of van Genuchten and Brooks & Corey models for simulating water flow in forest floor using the HydroGeoSphere Code of broad-leaved, needle-leaved and mixed-stand floor. First, saturated hydraulic conductivity, porosity, and water retention curve parameters (van Genuchten equation) which were unknown parameters in the forest floor were estimated by inverse method. Second, estimated hydraulic properties were compared statistically.

Materials and methods: Forest floor samples were collected from broad-leaved (beech and others), needle-leaved (coniferous) and mixed-stand (coniferous and broad-leaved) trees in Guilan province, Iran. In the laboratory, a plastic wire-netting, composed of 0.3 mm diameter was attached to the bottom of each core sample to support forest floor. Then the samples were piled up to make long columns of 18.1 cm in inner diameter and about 40.88 cm in height. Artificial rainfall experiments were conducted on top of the columns and free drainage from the bottom of columns was measured in the laboratory. Applied rainfall intensities were randomly changed in the range of 0-0.01 cm/sec. Drainage at the bottom of the tray was collected and measured using an electronic balance. First, a constant intense rain was applied to reach to steady state condition as a constant discharge rate from the bottom was established in order to accurately define the initial condition required for the numerical simulation of unsaturated water flow. After reaching to state steady experiment, transient condition was carried out. In transient condition, the random rainfall experiment was conducted and the transient discharge rate from the bottom was continuously monitored. In this study, we developed an inverse method for estimating parameters based on the Levenberg-Marquardt (Marquardt 1963) minimization algorithm in the C++ programming language along with HydroGeoSphere (Therrien et al., 2008) as a forward model. The model was used to address two specific issues. First, it was used to estimate the hydraulic conductivity, porosity, and soil water retention curve parameters (van Genuchten and Brooks & Cory equations) which were unknown parameters in the unsaturated porous media. Second the water flow in the forest floor was simulated using van Genuchten and Brooks & Cory equations along with HydroGeoSphere code.

Results and discussion: The results of calibration periods showed that the estimated free drainage using the optimized parameters exhibits a good fitting with the observed free drainage for all treatments. The good agreement between simulated and observed free drainage in the validation period for all the forest floor samples illustrated that the estimated hydraulic properties efficiently characterized the unsaturated water flow in forest floor. So one could conclude that Richards' equation along with Brooks & Cory and van Genuchten's retention functions can successfully describe the unsaturated water flow in the forest floors.

Estimated hydraulic properties succeeded to reproduce the observed free drainage in the transient condition, indicating van Genuchten functions along with Richards' equation can be used to simulate water flow in the entire forest floors. The results of the study showed that the forest floor samples have large saturated hydraulic conductivity values like light soils. The results showed that inverse method was not sensitive to residual water content. Also the results showed that HydroGeoSphere code along with van Genuchten's retention function with $RMSE$ 0.2753 mimics free drainage better than Brooks & Corey's retention function with $RMSE$ 0.3400 but

1- Former M.S. Student of Soil science Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(*- Corresponding Author Email: mhomapoor@Gmail.com)

2- Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

there is no significant difference ($P < 0.01$) between these soil water retention functions for simulation of water flow in the forest floor samples.

Conclusion: In the forested watershed, forest floor consists of differing kind of litter. Therefore, hydraulic properties of the forest floor, maybe different. Hydraulic properties were estimated by inverse method for three kinds of forest floor. Estimated hydraulic properties succeeded to reproduce the observed free drainage in the transient condition, indicating van Genuchten functions along with Richards' equation can be used to simulate water flow better than Brooks & Corey's retention function in the entire forest floors.

Keywords: Hydraulic models, Inverse method, Porous media, Richards' equation