تخمین طول منطقه اشباع و زمان پیمایش زیر سطحی دامنه ها بر اساس سه شبیه اشباع پذیری دامنه های مرکب

تورج سبزواری[۱*]، رامتین کریمی[۲]، مهدی کرمی مقدم[۳]

چکیده

دامنه های ابخیزها، در طبیعت دارای هندسه ای مرکب هستند. شکل تصویرافقی (همگرایی، واگرایی و موازی) و میزان انحنای دامنه (مقعر، صاف و محدب)، نه شکل مختلف دامنه های مرکب را تشکیل می دهند. جهت بررسی میزان رواناب سطحی و زیر سطحی دامنه ها، طبق سازگار دانی بلاک نیازمند جداسازی منطقه اشباع از منطقه غیر اشباع است. زمان پیمایش جریان زیر سطحی و سطحی دامنه ها یک فراسنج کلیدی در تخمین رواناب دامنه هادر بسیاری از شبیه های بارندگی-رواناب مانند شبیه های اب نگار واحد لحظه ای هستند. در این تحقیق یک شبیه جدید به نام گاما با هندسه و معادله های ساده تر به کار گرفته شد. در این شبیه معادله هایی تحلیلی جهت محاسبه طول منطقه اشباع (SZL) و زمان پیمایش دامنه های مرکب (STT) ارائه شد. نتایج شبیه اشباع پذیری و زمان پیمایش شبیه پیشنهادی گاما با شبیه زیگما و w که در تحقیقات گذشته ارائه شده بود مقایسه شد. برای ارزیابی دو شبیه گاما و زیگما، شبیه W به عنوان مبنا قرار گرفت و از دو معیار ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE) و ضریب کارایی ناش(CE) استفاده گردید. بوسیله مقدار RMSE برای تخمین SZL طبق شبیه گاما و زیگما به ترتیب ۰,۸۴و ۰,۸۲ متر هستند. بوسیله مقادیر CE برای محاسبه فراسنج STT برای شبیه گاما و زیگما به ترتیب ۰,۷۹ و ۰,۷۲ است که ارزیابی از نوع خوب است. شبیه گاما نتایج بسیار نزدیکی به شبیه زیگما دارد، ولی برای دامنه های واگرا، صاف و محدب پیشنهاد نمی گردد.

واژه های کلیدی: دامنه های مرکب، ، زمان پیمایش زیر سطحی، طول منطقه اشباع

[۱] دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران

[۲] دانش اموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران

[۳] استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

* نویسنده مسئول: Tooraj419@yahoo.com

۱- مقدمه:

تخمین رواناب ابخیزها جهت طراحی بسیاری از سازه های ابی و ابخیزداری از اهمیت خاصی برخوردار است. رواناب مستقیم یک حوضه از سه جزء رواناب سطحی، زیر سطحی و بده پایه تشکیل شده است. سازگار تولید رواناب در ابخیز به دو صورت سازگار هورتونی و دانی-بلاک طبقه بندی می شود. در سازگار دانی-بلاک این جریان زیرسطحی است که منطقه اشباع دامنه های حوضه را ایجاد کرده و جریان سطحی در منطقه اشباع و جریان زیر سطحی در منطقه غیر اشباع دامنه ایجاد می گردند (دانی و بلاک۱۹۷۰الف،ب). در یک ابخیز، هر دو سازگار رواناب می تواند به صورت همزمان وجود داشته باشد. در حوضه های تپه ماهور با پوشش گیاهی مناسب، که دامنه های آنها شیب دار هستند، سازگار رواناب معمولاً از نوع دانی بلاک است و بیشتر رواناب مشاهده شده در شبکه ابراهه های حوضه از نوع رواناب زیر سطحی هستند (اندرسون و برت، ۱۹۷۸هولت وهیبرت، ۱۹۶۳، ۱۹۶۷).

تخمین اب نگار رواناب سطحی و زیر سطحی حوضه را به صورت جداگانه دارد (سبزواری و همکاران،۲۰۱۰؛لی و چنگ،۲۰۰۵).

جدا سازی جریان سطحی و زیر سطحی حوضه ها به دلیل پیچیدگی طبیعت آنها بسیار مشکل بوده و تاکنون روش دقیقی برای جداسازی این دو جریان ارائه نشده است. بیشتر شبیه های بارندگی- رواناب به کار گرفته شده جهت تخمین رواناب سطحی ابخیزها دارای سازگار هورتونی هستند. در سازگار هورتونی، سطح حوضه از بالا اشباع می گردد و عملا کل سطح دامنه ها به عنوان سطح تولید رواناب در نظر گرفته می شود. این سازگار نسبت به سازگار دانی بلاک ساده تر بوده و بین اب شناس ها محبوب تر است. با توجه به اهمیت جریان زیر سطحی در بعضی حوضه ها، سازگار دانی بلاک نیازمند تحقیقات بیشتری است. برای این منظور جداسازی مناطق اشباع و غیر اشباع در یک دامنه در حین بارندگی بسیار مهم است. با توجه به تغییرات شدت بارندگی در طول آن ، تخمین این مناطق پیچیده تر خواهد شد. در این تحقیق شرایط جریان دائمی در نظر گرفته شده است تا از پیچیدگی تغییرات مقدار تغذیه بارندگی به ابخوان به دور باشد. در زمینه پویایی اندرکنش بین منطقه اشباع و غیر اشباع می توان به تحقیقات بیون، ۱۹۸۲؛ فرز و هارلن ۱۹۶۹؛ فرز۱۹۷۱، ۱۹۷۲ اشاره نمود.

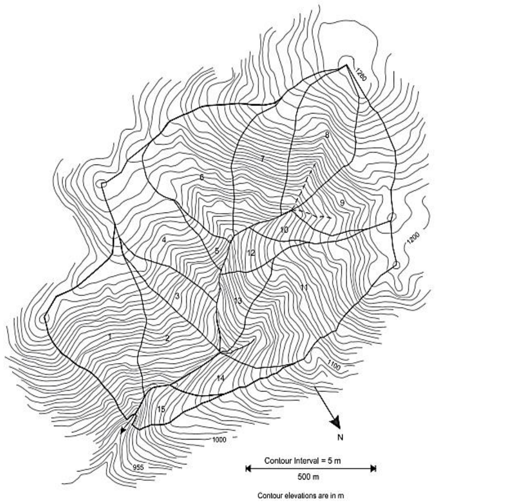
فراسنج هایی زیادی همچون مشخصات خاک (تخلخل، هدایت ابی و ضخامت خاک)، شدت تغذیه بارندگی به خاک، پوشش گیاهی و هندسه و ابعاد دامنه ها برمیزان جریان زیر سطحی دامنه ها موثر است. همه فراسنجهای مزبور بر میزان اشباع پذیری دامنه ها تحت تاثیر جریان زیر سطحی اثر می گذارد.

یکی از شبیه های پیش بینی رواناب سطحی و زیر سطحی ابخیزها که کاربرد وسیعی در تخمین رواناب حوضه های فاقد آمار دارد، شبیه اب نگار واحد لحظه ای زمین ریخت شناسی (GIUH) است. این شبیه قابلیت

شبیه GIUH بر اساس زمان پیمایش جریان سطحی و زمان پیمایش جریان زیر سطحی دامنه های حوضه کار می کند. برای این منظور باید منطقه اشباع در یک دامنه که شامل جریان سطحی است از منطقه غیر اشباع با جریان زیر سطحی جدا گردد. در این شرایط باید یک روش جداسازی منطقه اشباع از منطقه غیر اشباع به شبیه اضافه گردد. یکی از اهداف مطالعه حاضر، همین بحث جداسازی مناطق جریان سطحی و زیر سطحی به خصوص در دامنه های مرکب است.

دامنه های حوزه ابخیز به صورت طبیعی دارای شکل و هندسه متفاوتی هستند. دامنهها از لحاظ انحنای نیمرخ، به سه شکل محدب، مقعر و صاف و از لحاظ شکل تصویرافقی، به سه شکل همگرا، واگرا و موازی طبقه بندی می‌گردند. به طور کلی ۹ شکل مختلف را می توان برای دامنه ها در نظر گرفت که به این شکلها دامنه های مرکب می گویند. تحقیقات گذشته نشان داده که این هندسه برروی پاسخ جریان سطحی و زیر سطحی دامنه ها تاثیر می‌گذارد. (اریال ۲۰۰۵، تراچ و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۲؛ هیلبرتس و همکاران۲۰۰۴، ۲۰۰۷؛ الوقلین، ۱۹۸۱؛ برن و همکاران، ۲۰۰۵؛ سبزواری و نوروزپور، ۲۰۱۴؛ نوروزپور، ۲۰۱۴؛ سینگ واگیرالیوغلو ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲)

شکل ۱ دامنه های مرکب حوزه ابخیز بوشرانگرز را در استرالیا را نشان می دهد.



شکل ۱: دامنه های مرکب حوضه بوشرانگرز استرالیا

(اریال و همکاران،۲۰۱۴)

همان طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، بسیاری از دامنه ها در طول دامنه تغییرات عرض دارند، و همچنین بر اساس نقشه پستی و بلندی آنها، میزان انحنای کف دامنه ها نیز تغییر می کند. این تغییرات انحنا و شکل تصویرافقی دامنه های مرکب بر پاسخ جریان سطحی و زیر سطحی دامنه ها تاثیر می گذارند. یکی از اهداف این تحقیق بررسی تاثیر این هندسه بر زمان پیمایش زیر سطحی و میزان اشباع پذیری دامنه ها است.

الوقلین (۱۹۸۱) برتخمین منطقه اشباع دامنه ها تحقیق کرد و ثابت نمود که میزان همگرایی یا واگرایی دامنه ها برسطح منطقه اشباع تاثیر می گذارد. تراچ و همکاران (۲۰۰۲) با حل تحلیلی معادله های موج جنبشی در جریان زیر سطحی گروهی معادله های با جمله های ذخیره رطوبت خاک ارائه نمود که قابلیت در نظر گرفتن شکل وهندسه دامنه های مرکب را دارند. براساس تحقیقات آنها دامنه های همگرا نسبت به دامنه های واگرا آرام تر زهکشی می گردند.

اریال و همکاران (۲۰۰۵)، با در نظر گرفتن یک هندسه جدید برای دامنه های مرکب و ارائه شبیه اشباع پذیری w، معادله هایی را برای تخمین طول منطقه اشباع و زمان پیمایش نه دامنه مرکب ارائه نمودند. در شبیه پیشنهادی، شرایط رطوبت اولیه خاک نیز در نظر گرفته شدند. آنها ابتدا تاثیر هندسه دامنه ها برمیزان اشباع پذیری دامنه ها را بررسی کردند و سپس با محاسبه طول منطقه اشباع در شرایط دائمی بارندگی به محاسبه زمان پیمایش جریان زیر سطحی دامنه ها پرداختند. براساس معادله های ارائه شده هر عاملی که بر میزان اشباع پذیری دامنه ها تاثیر بگذارد می تواند برزمان پیمایش زیر سطحی نیز اثر بگذارد. براساس تحقیقات آنها دامنه های واگرا زمان پیمایش دو برابر زمان پیمایش زیر سطحی دامنه های همگرا را نشان می دهند و دامنه های مقعر زمان پیمایش کوچکتری را نسبت به دامنه های صاف و مقعر دارند.

سبزواری و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی میزان اشباع پذیری دامنه های مرکب پرداخت. آنها بر اساس شبیه اشباع پذیری زیگما پیشنهادی بوسیله .تراچ و همکاران (۲۰۰۲) به محاسبه طول منطقه اشباع پرداختند. یک سری معادله های برای تخمین طول منطقه۹ دامنه مرکب ارائه گردید. همچنین معادله هایی برای محاسبه زمان پیمایش زیر سطحی دامنه های مرکب ارائه گردیدند. براساس نتایج، دامنه های محدب کمتر از دامنه های مقعر اشباع گردیده و زمان پیمایش بزرگتری نیز دارند. دامنه های همگرا زودتر از دامنه ها واگرا اشباع شده و زمان پیمایش دامنه های واگرا، دو برابر دامنه های همگرا است.

در این تحقیق یک شبیه اشباع پذیری به نام گاما ارائه می گردد که هندسه ساده تری نسبت به شبیه اشباع پذیری زیگما دارد. این شبیه یک شبیه تحلیلی است و پیچیدگی های حل عددی شبیه زیگما را ندارد. در این تحقیق نتایج شبیه گاما با نتایج شبیه اشباع پذیری و زمان پیمایش زیر سطحی ارائه شده بوسیله اریال و همکاران (۲۰۰۵) و سبزواری و همکاران (۲۰۱۰) مقایسه گردید.

اهداف اصلی این تحقیق به صورت زیر است:

الف) ارائه یک شبیه اشباع پذیری با هندسه ساده تر و کارایی بهتر به نام شبیه گاما جهت جداسازی منطقه اشباع از غیر اشباع دامنه ها و محاسبه زمان پیمایش دامنه های مرکب.

ب) مقایسه شبیه های اشباع پذیری زیگما، گاما با شبیه اشباع پذیری w ارائه شده بوسیله اریال و همکاران (۲۰۰۵).

ج) ارزیابی شبیه اشباع پذیری گاما

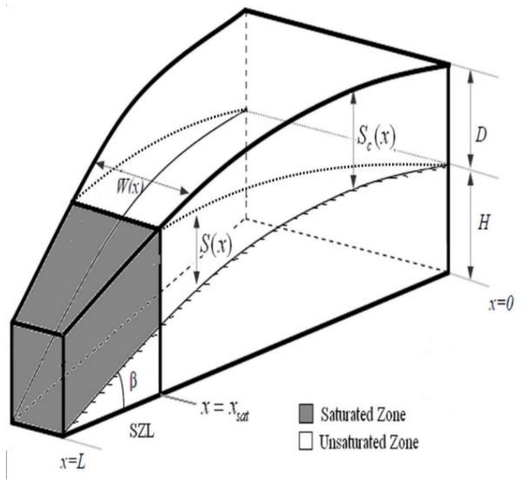
نوآوری تحقیق عبارت است از ارائه یک شبیه کاربردی و ساده جهت تخمین میزان اشباع پذیری دامنه های مرکب ، همچنین تخمین زمان پیمایش جریان زیر سطحی دامنه های ابخیزها. از زمان پیمایش زیر سطحی در شبیه های اب نگار واحد لحظه ای جهت تخمین جریان زیر سطحی دامنه های حوضه استفاده می گردد.

۲- شبیه اشباع پذیری زیگما

ایونس(۱۹۸۰) معادله سطح دامنه های مرکب را به صورت زیر ارائه نمود:

$$z(x,\ y) = E + H(1 - x/L)^n + \omega y^2 \qquad (۱)$$

که در آن z رقوم هر نقطه از دامنه (متر) ، x فاصله افقی هر نقطه از بالادست دامنه (متر) ، y عرض جریان عمود بر جهت جریان اب(متر)، E کمترین رقوم دامنه (متر)، H اختلاف ارتفاع بین نقطه بالادست دامنه و پایین دست دامنه(متر)، L طول افقی کل دامنه، n فراسنج انحنای نیمرخ که نشان دهنده میزان انحنای نیمرخ دامنه ، و ω فراسنج شکل مسطحه است که میزان تغییرات عرض دامنه را نشان می دهد. برای دامنه های مقعر $n > 1$، دامنه های صاف $n = 1$ و دامنه های محدب $n < 1$ می باشد. فراسنج شکل مسطحه برای دامنه های همگرا $\omega > 0$، موازی $\omega = 0$و واگرا $\omega < 0$ می باشد. شکل (۲)، یک دامنه همگرای محدب رابه ضخامت خاک D بر روی سنگ بستر که دارای انحنای مشابه با سطح خاک است نشان می‌دهد. این دامنه تحت یک بارش قرار دارد و به علت نفوذ اب داخل خاک نیمرخ رطوبتی خاک (شکل۲: خطوط خط چین) تشکیل می گردد. نیمرخ رطوبتی داخل خاک به مشخصات خاک، شدت تغذیه بارندگی و هندسه دامنه بستگی دارد. همانطور که مشاهده می شود عرض دامنه از بالادست به سمت پایین دست در حال کاهش بوده و فراسنج W(x) ، مقادیر عرض دامنه را در هر مقطع از سطح دامنه ها نشان می دهد. فرض شده است که عمق خاک در سراسر دامنه ثابت باشد، لذا انحنای سنگ بستر با انحنای سطح طبیعی خاک یکسان است.



شکل۲: شماتیکی از یک دامنه همگرای- محدب

مقدار تابع عرض دامنه، براساس معادله ی ۱ به صورت زیر محاسبه می گردد (طالبی و همکاران،۲۰۰۸):

$$w(x) = c_w \exp\left\{ c_s \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{2-n} \right\} \qquad (۲)$$

$$c_s = \frac{2\omega L^2}{n(2-n)H} \qquad (۳)$$

مقدار c_w عرض دامنه در x=L می باشد. مقدار تابع سطح زهکشی بالادست دامنه به صورت زیر تعریف می گردد:

$$A(x) = \int_0^x w(u)du \qquad (۴)$$

تابع A(x) حل تحلیلی نداشته و فقط به صورت عددی قابل حل است، لذا بسیاری از معادله های اشباع پذیری دامنه ها که تابعی از مساحت زهکشی دامنه هستند، نیز حل تحلیلی نخواهند داشت. شبیه زیگما دارای هندسه پیچیده ای است، لذا حل معادله های اشباع پذیری دامنه های مرکب به سادگی انجام نمی گیرد.

سبزواری و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از نمایه اشباع پذیری ارائه شده بوسیله طالبی و همکاران، ۲۰۰۸، به بررسی میزان اشباع پذیری دامنه های مرکب پرداخت. تابع اشباع پذیری نسبی طبق مطالعه های طالبی و همکاران، ۲۰۰۸ به صورت زیر است:

$$\sigma(x) = \frac{S(x)}{S_c(x)} \qquad (۵)$$

که در آن تابع ذخیره رطوبت خاک $S(x)$، $S_c(x) = w(x)D(x)f$ رطوبت اشباع بیشینه، f تخلخل و $D(x)$ عمق بوسیله خاک است. مطابق شکل ۲ هر نقطه از دامنه که مقدار $(S(x) = S_c(x))$ شود به منطقه اشباع مربوط می‌شود. مقدار تابع ذخیره رطوبت خاک برای شرایط دائمی به صورت زیر است(طالبی و همکاران، ۲۰۰۸):

$$S(x) = \frac{fL}{nkH}(1 - \frac{x}{L})^{1-n} NA(x) \qquad (۶)$$

که در آن N(t) شدت تغذیه به ابخوان وk ضریب هدایت ابی است.

هر نقطه از دامنه که مقدار تابع اشباع پذیری آن برابربا یک باشد ($\sigma = 1$)، آن نقطه، طبق نظریه اشباع پذیری زیگما یک نقطه اشباع محسوب می‌گردد. سطحی از پایین دست دامنه که دارای این شرایط باشد یک سطح

اشباع است که طبق نظریه دانی بلاک جریان سطحی در این سطح جاری خواهد شد.

موقعیت مرز منطقه اشباع (x_{sat}) را باحل معادله زیر می توان محاسبه نمود(سبزواری و همکاران ،۲۰۱۰):

$$\frac{fLN}{nkH}(1-\frac{x_{sat}}{L})^{1-n} A(x_{sat}) = w(x_{sat})Df \qquad (۷)$$

که در آن D عمق خاک است. در معادله ۷ تابع A(x) حل تحلیلی ندارد، لذا حل معادله فقط به صورت عددی امکان پذیر است. معادله ۷ برای دامنه های صاف (n=1) به صورت تحلیلی حل خواهد شد. مقدار مرز منطقه اشباع دامنه های صاف با شکل تصویرافقی های مختلف از معادله ۸ محاسبه می گردد (سبزواری و همکاران ،۲۰۱۰):

$$x_{sat} = \frac{\overline{S}}{2\omega} Ln\,(1+\frac{2\omega kD}{N}) \qquad (۸)$$

که در آن $\overline{S}$ شیب بوسیله، معادله ۸ برای دامنه های صاف وموازی ساده تر می‌گردد و به صورت زیر ساده می گردد:

$$x_{sat} = \frac{kD\overline{S}}{N} \qquad (۹)$$

مقدار طول منطقه اشباع در دامنه های صاف نیز از معادله $SZL = L - x_{sat}$ به دست می آید.

۳- شبیه اشباع پذیری گاما

در این تحقیق یک شبیه اشباع پذیری جدید به نام شبیه گاما ارائه می گردد. این شبیه یکی از دستاوردهای این مطالعه است. شبیه اشباع پذیری گاما برگرفته شده از یک هندسه جدید برای دامنه های مرکب است. این هندسه در تحقیقات برمه و همکاران(۲۰۰۵) و نوربیاتو وبورگا (۲۰۰۸) استفاده شده است. برای ساده سازی در شبیه گاما، تابع عرض دامنه به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$w(x) = c\exp(\ ax) \qquad (۱۰)$$

مقدار c عرض دامنه را در بالادست ها نشان می‌دهد ، a فراسنج شکل تصویرافقی دامنه است که برای دامنه های همگرا $a > 0$ و برای دامنه های واگرا $a < 0$ است.

معادله ۱۰ فقط شکل تصویرافقی دامنه را در نظر می گیرد و برخلاف معادله ۲ انحنای نیمرخ در ان منظور نشده و شکل ساده تری رادارد. مطابق معادله های۴ و ۱۰ ، تابع سطحی زهکشی دامنه به صورت زیر است:

$$A(x) = \frac{c}{a}[\exp(\ ax) - 1] \qquad (۱۱)$$

معادله ۱۱ یک معادله تحلیلی است و مشکلات حل تحلیلی معادله ۴ را ندارد. نوربیاتو وبورگا(۲۰۰۸) در تحقیقاتش بر جریان زیرسطحی دامنه ها و براساس معادله فان و براس(۱۹۹۸) ، معادله نیمرخ انحنای دامنه های مرکب را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$z(x) = \alpha + \beta x + \gamma x^2 \qquad (۱۲)$$

در معادله ۱۲ مقدار β منفی و مقدار $\gamma > 0$ برای دامنه های مقعر، برای دامنه های محدب $\gamma < 0$ ، برای دامنه های صاف $\gamma = 0$ است.

برای مثال با مقایسه معادله های ۱۲ و ۱، برای مقدار n=2 ارتباط بین فراسنجهای دو معادله به صورت زیر است:

$$\alpha = E + H, \beta = -2H/L, \gamma = H/L^2$$

مقدار شیب محلی در هر نقطه از دامنه برابر است با:

$$S^* = \left|\frac{dz}{dx}\right| = \beta + 2\gamma x \qquad (۱۳)$$

مقدار بده جریان زیر سطحی طبق معادله دارسی به صورت زیر محاسبه می گردد تورچ و همکاران(۲۰۰۲):

$$Q = -k\,\frac{S(x)}{f}\frac{dz}{dx} \qquad (۱۴)$$

مقدار بده زیر سطحی دائمی برابر با Q(x) = NA(x) است، لذا می توان نوشت:

$$S(x_{sat}) = \frac{-NA(x_{sat})f}{k(\beta + 2\gamma x_{sat})} \qquad (۱۵)$$

هر نقطه از دامنه که مقدار ذخیره برابر با ظرفیت ذخیره ($S(x) = S_c(x)$) باشد به منطقه اشباع ارتباط دارد. اگر برای محاسبه مرز منطقه اشباع، مقدار $S(x) = S_c(x) = w(x)D(x)f$ در نظر گرفته شود، می توان نوشت:

$$\frac{-NA(x_{sat})f}{k(\beta + 2\gamma x_{sat})} = w(x_{sat})Df \qquad (۱۶)$$

اگر معادله عرض و مساحت زهکشی را از معادله های ۱۰ و۱۱ در معادله ۱۶ قرار داده و معادله نهایی را جهت محاسبه مرز منطقه اشباع حل گردد، می توان نوشت:

(۱۷)

$$x_{sat} = \frac{2lambertw\left\{\frac{N}{2Dk\gamma}\exp\left(\frac{N+Dak\beta}{2Dk\gamma}\right)\right\}\times Dk\gamma - N - Dak\beta}{2Dak\gamma}$$

در معادله ۱۷،لامبرت حل معادله $w\exp(w) = x$ است که با نرم افزار متلب این قابل محاسبه است. طول منطقه اشباع از معادله $SZL = L - x_{sat}$ محاسبه می گردد.

مرز منطقه اشباع دامنه های موازی-صاف با قرار دادن مقادیر $a = 0, \gamma = 0$ در معادله ۱۷ به صورت زیر به دست می آید:

$$x_{sat} = Dk\beta / N \qquad (۱۸)$$

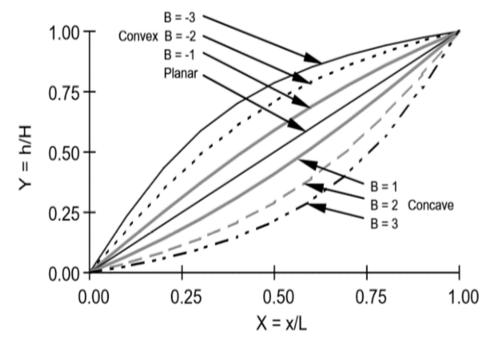
براساس شبیه زیگما مرز منطقه اشباع از معادله $x_{sat} = Dk\bar{S}/N$ بدست آمد که در آن $\bar{S}$ شیب بوسیله دامنه است، که این معادله در حالتی که $\bar{S} = \beta$ باشد با معادله ۱۸ برابر است.

۴- شبیه اشباع پذیری W

اریال و همکاران (۲۰۰۵) برای شبیه سازی شکل هندسه دامنه های مرکب از معادله های هندسی زافلوفسکی و روگوسکی (۱۹۶۹) استفاده کردند. معادله۱ نیمرخ طولی دامنه های مقعر و محدب را نشان می دهند.

$$z = H\left[\frac{\tan^{-1}\{B(X-1)\}}{\tan^{-1}(B)} + 1\right] \qquad Concave \quad B > 0$$
$$z = H\left[\frac{\tan^{-1}\{BX\}}{\tan^{-1}(B)}\right] \qquad Convex \quad B < 0 \qquad (۱۹)$$

که در آن B فراسنج انحنا، X=x/L ، x فاصله هر نقطه از بالادست دامنه ، H اختلاف ارتفاع بین بالادست و پایین دست دامنه است. شکل ۳ انحنای های مختلف ایجاد شده در این هندسه را نشان می دهد.



شکل۳: نیمرخ کف دامنه های موازی، محدب و مقعر برای مقادیر مختلف عامل B

(اریال و همکاران (۲۰۰۵))

اریال و همکاران (۲۰۰۵) با ارائه نمودن یک معادله مفهومی براساس نمایه W، مقدار مرز منطقه اشباع را از حل معادله زیر به دست آوردند:

$$\frac{Xs(2 - Xs + XsCR)}{1 + CR} = 1 - \frac{fDk\bar{s}}{NL}\frac{f(Xs)}{\lambda(Xs)} \qquad (۲۰)$$

که در آن CR نرخ همگرایی دامنه (مقدار CR>1 برای دامنه همگرا، CR=1 برای دامنه موازی و CR<1 برای دامنه واگرا) که برابر نسبت عرض بالادست دامنه به عرض دامنه در خروجی، و Xs طول سطح اشباع بهنجار شده می باشد $(Xs = \frac{x_s}{L})$، $\lambda(X_s)$ تابع شکل تصویر افقی و $f(X_s) = dz/dx$ تابع انحنای پروفیل دامنه است. مقدار $\lambda(X_s)$ از معادله زیر بدست می آید:

$$\lambda(X_s) = (1 + CR)/[2(1 - X_s + X_s CR)] \qquad (۲۱)$$

معادله ۲۰ برای دامنه های مقعر و صاف به معادله زیر تبدیل می گردد (اریا ل و همکاران (۲۰۰۵)):

$$\begin{aligned}&B^2(CR-1)X_s^4 + 2(2B^2 - B^2CR)X_s^3 + (CR - 1 - 6B^2)X_s^2\\&+\left\{2 + 4B^2 + 2B^2CR - \frac{2B}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B} + \frac{2B\times CR}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B}\right\}X_s\\&-1 - CR - B^2 - CR\times B^2 + \frac{2B}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B} = 0\end{aligned} \qquad (۲۲)$$

معادله ۲۲ مرز منطقه اشباع دامنه های مقعر و صاف را با شکل تصویرافقیهای مختلف نشان می‌دهد.

معادله ۲۰ برای دامنه های محدب را به صورت زیر تبدیل می گردد(اریال و همکاران (۲۰۰۵))

(۲۳)

$$\begin{aligned}&B^2(CR-1)X_s^4 + 2B^2X_s^3 + (CR - 1 - B^2 - B^2CR)X_s^2\\&+\left\{2 - \frac{2B}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B} + \frac{2B\times CR}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B}\right\}X_s - 1 - CR + \frac{2B}{\frac{NL}{Dk\bar{s}}\tan^{-1}B} = 0\end{aligned}$$

معادله ۲۳ مرز منطقه اشباع دامنه های محدب با شکل تصویرافقی های مختلف را نشان می‌دهد.

۵- زمان پیمایش زیرسطحی طبق شبیه زیگما

زمان پیمایش جریان زیرسطحی یک فراسنج کلیدی در تخمین رواناب زیرسطحی دامنه های ابخیزها است. در بسیاری از ابخیزها نفوذ پذیری خاک بالاست و جریان زیرسطحی در تولید رواناب مستقیم حوضه نقش موثری دارد.سبزواری وهمکاران(۲۰۱۰) براساس شبیه اشباع پذیری زیگما و معادله دارسی، معادله زیر را برای محاسبه زمان پیمایش زیرسطحی دامنه های مرکب ارائه نمودند:

$$T = \frac{L\ f\left[(1-\frac{x_{sat}}{L})^{2-n}-1\right]}{nk\,\overline{S}(n-2)} \qquad (۲۴)$$

مختصات مرز منطقه اشباع یک فراسنج کلیدی در محاسبه زمان پیمایش است. زمان پیمایش دامنه صاف موازی به صورت زیر ارائه شده است: سبزواری و همکاران (۲۰۱۰)):

$$T = \frac{f}{2k\omega} Ln\,(1+\frac{2\omega kD}{N}) \qquad (۲۵)$$

معادله ۲۵ برای دامنه های صاف موازی به صورت $T = \frac{fx_{sat}}{k\overline{s}}$ در می آید.

۶–زمان پیمایش زیرسطحی طبق شبیه گاما

براساس شبیه گاما می توان زمان پیمایش زیرسطحی را به صورت ساده تری محاسبه نمود. براساس معادله دارسی میتوان در محیط های متخلخل سرعت اب را داخل خاک به صورت زیر محاسبه نمود:

$$v = \frac{k\ s^*}{f} = \frac{dx}{dt} \qquad (۲۶)$$

با قرار دادن مقدار s* از معادله ۱۳ در معادله ۲۶ وانتگرال گیری آن، مقدار زمان پیمایش در منطقه غیر اشباع برابر است با:

$$T = \frac{-f}{2k\gamma}[\ln(\frac{\beta+2\gamma x_{sat}}{\beta})] \qquad (۲۷)$$

معادله ۲۷ برای دامنه های صاف موازی $(\gamma = 0)$ به صورت زیر نوشته می شود:

$$T = \frac{-fx_{sat}}{\beta k} \qquad (۲۸)$$

$$1+\frac{2\gamma L}{\beta} > 0$$

مقدار $(\gamma < 0)$ همیشه منفی است و مقدار $(\gamma > 0)$ برای دامنه های محدب ومقدار $(\gamma < 0)$ برای دامنه های مقعر است:

$$\gamma < \frac{-\beta}{2L}$$

با جایگزینی مقدار x_{sat} از معادله ۱۷ در معادله های ۲۷ و ۲۸ می توان زمان پیمایش زیرسطحی را محاسبه نمود.

۷– زمان پیمایش زیرسطحی شبیه W

اریال و همکاران (۲۰۰۵) ، معادله ۲۹ را برای محاسبه زمان پیمایش دامنه های مقعر ارائه کردند:

(۲۹)

$$T = \frac{fL}{k\overline{S}}\tan^{-1}(B)[\frac{3+B^2}{3B}-(\frac{BX_s^{\ 3}}{3}-BX_s^{\ 2}+BX_s+\frac{X_s}{B})]$$

آنها همچنین معادله ۳۰ را برای محاسبه زمان پیمایش دامنه های محدب ارائه نمودند:

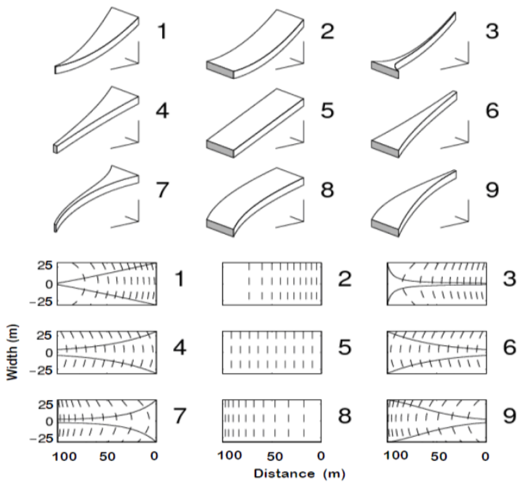
$$T = \frac{fL}{k\overline{S}}\tan^{-1}(B)[\frac{3+B^2}{3B}-(\frac{BX_s^{\ 3}}{3}+\frac{X_s}{B})] \qquad (۳۰)$$

برای محاسبه زمان پیمایش دامنه های صاف موازی از معادله ۳۱ استفاده می گردد:

$$T = \frac{fL}{k\overline{S}}(1-X_s) \qquad (۳۱)$$

۸– مقایسه شبیه های اشباع پذیری دامنه ها

برای بررسی تاثیر هندسه دامنه های مرکب براشباع پذیری ۹ دامنه مرکب طبق مطالعه های سبزواری و همکاران (۲۰۱۰) در نظر گرفته شد. براساس شکل ۴ ، طول همه دامنه ها ۱۰۰متر، زاویه شیب ۱۵ درجه با اختلاف ارتفاع ثابت ۲۶٫۸ متر بین بالادست و پایین دست دامنه، در نظر گرفته شد. مقدار فراسنج انحنای پروفیل(n) بین ۰٫۵ تا ۱٫۵ از دامنه محدب تا مقعر در نظر گرفته شد و مقدار فراسنج شکل تصویرافقی (ω) بین $-H/L^2$ تا $+H/L^2$ برای دامنه ها منظور شده است. جدول ۱ داده های هندسی ۹ دامنه را نشان می دهد.



شکل ۴: شکل سه بعدی دامنه های مرکب
(عرض ماکزیمم دامنه ۲۵ متر، طول دامنه ها ۱۰۰متر)
(طالبی و همکاران ۲۰۰۸)

برای مقایسه بین نتایج سه شبیه زیگما، شبیه W و شبیه گاما باید فراسنجهای شکل هندسی دامنه ها از لحاظ شکل تصویرافقی و انحنای نیمرخ طرح مطالعه هایی تعریف شده با هم مطابقت داشته باشند. برای این منظور باید دامنه های مطابق با جدول۱ به هندسه های دیگر تبدیل گردند. برای این منظور باید مساحت دامنه، طول دامنه، شیب بوسیله، عرض بالادست در هر سه هندسه برای نه دامنه یکسان در نظر گرفته شده و بر این اساس فراسنجهای هندسی شکل تصویرافقی و انحنا محاسبه گردد. به طور مثال معادله های ۱ ، ۱۲ و ۱۹ معادله انحنای دامنه ها برای سه هندسه هستند. با مقایسه نتایج معادله ۱۲ و ۱۹ با معادله ۱ می توان فراسنجهای انحنای B و γ را محاسبه کرد.

جدول۱: مشخصات هندسی دامنه های مرکب (طالبی و همکاران ۲۰۰۸)					
Hillslope Nr.	Profile Curvature	Plan Shape	n	$\omega[10^{-3}m^{-1}]$	Area $[m^2]$
1	Concave	Convergent	1.5	+2.7	2441
2	Concave	Parallel	1.5	0	5000
3	Concave	Divergent	1.5	-2.7	1049
4	Straight	Convergent	1	+2.7	2162
5	Straight	Parallel	1	0	5000
6	Straight	Divergent	1	-2.7	2162
7	Convex	Convergent	0.5	+2.7	1402
8	Convex	Parallel	0.5	0	5000
9	Convex	Divergent	0.5	-2.7	2268

$L = 100\,m, \beta = 15^{\circ},\ \omega = \pm H / L^2$

با مقایسه معادله های ۱، ۱۰ و ۱۷ و معادله های شکل تصویرافقی، معادله های ۲ و ۸ و حل معادله های مزبور به ازای مقادیر مختلف n و ω ، فراسنجهای شبیه w و شبیه گاما مطابق جدول ۲ است. در شبیه w، مقدار ضریب همگرایی(CR) دامنه های مرکب برابربا نسبت عرض دامنه در بالادست به عرض دامنه در پایین دست دامنه در خروجی است، لذا مقدار ضریب CR به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$CR = w(0)/c_w = \exp\left\{\frac{2\omega L^2}{n(2-n)H}\right\} \qquad (۳۲)$$

با در نظر گرفتن $\omega = -H/L^2$ برای دامنه های واگرا مقدار $CR = \exp\left\{\frac{-2}{n(2-n)}\right\}$ و برای دامنه های همگرا با $\omega = H/L^2$، مقدار $CR = \exp\left\{\frac{2}{n(2-n)}\right\}$ است. جدول ۲ فراسنجهای هندسی محاسبه شده را برای شبیه گاما و w نشان می دهد.

جدول۲: مقادیر فراسنجهای شبیه گاما و w برای طرح مطالعه هایی						
Hillslope Number	B	CR	a	C	β	γ
1	1.2	14.39	-0.016	50	-0.39	0.001
2	1.2	1	0	30	-0.39	0.001
3	1.2	0.0695	0.036	3	-0.39	0.001
4	0	7.389	-0.016	50	-0.27	0
5	0	1	0	30	-0.27	0
6	0	0.135	0.036	3	-0.27	0
7	-2.5	14.39	-0.016	50	-0.1	-0.001
8	-2.5	1	0	30	-0.1	-0.001
9	-2.5	0.0695	0.036	3	-0.1	-0.001

۹- تحلیل نتایج

میزان اشباع پذیری و زمان های پیمایش زیر سطحی دامنه های مختلف طبق شبیه گاما، زیگما و W با یکدیگر مقایسه می گردند. تشخیص اینکه کدام شبیه به واقعیت نزدیک تر است نیازمند به تحقیقات آزمایشگاهی است. در این تحقیق برای مقایسه بین نتایج سه شبیه از معیار RMSE و ضریب کارایی ناش، CE استفاده شده است. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی در دسترس نیست، برای مقایسه نتایج ، شبیه W به عنوان مبنا قرار گرفت و نتایج دو شبیه گاما و زیگما با آن مقایسه گردیدند. مبنا قرار دادن شبیه W به این معنا است که هدف محاسبه اختلاف نتایج سه شبیه است. مقادیر RMSE و CE از معادله های زیر محاسبه می گردد:

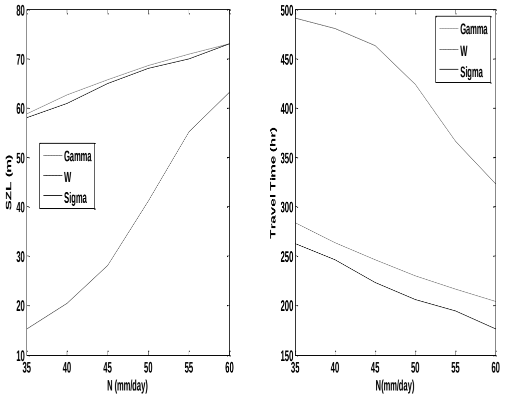
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{C_i}-x_{w_i})^2}{n}} \qquad (۳۳)$$

$$CE=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{C_i}-x_{w_i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_{w_i}-\overline{x_{w_i}})^2} \qquad (۳۳)$$

که در آن x_C مقادیر محاسباتی طبق شبیه گاما و زیگما و x_w مقادیر محاسباتی طبق شبیه w است. $\overline{x_w}$ بوسیله مقادیر x_w است.

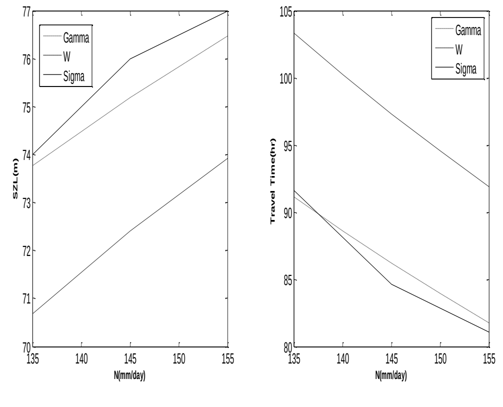
اگر ضریب CE در محدوده $0.75< CE \leq 1$ باشد، نتایج به دست آمده بسیار خوب ، $0.65<CE\leq 0.75$ خوب، $0.5< CE \leq 0.65$ راضی کننده ، $0.4< CE \leq 0.5$ تا حدودی قابل قبول و $CE \leq 0.4$ غیرقابل قبول است.

شدت های تغذیه به لایه خاک در محدوده ای قرار گرفته که سطح اشباع پذیری در پایین دست دامنه ها مشاهده گردد. از آنجا که بعضی از دامنه ها بسیار دیر اشباع می گردند، باید شدت بارندگی را بالا در نظر گرفت. شکل های ۵ تا ۱۳ زمان پیمایش جریان زیر سطحی و طول منطقه اشباع دامنه های مرکب طرح مطالعه هایی را نشان می دهند.



شکل ۵- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه همگرای محدب

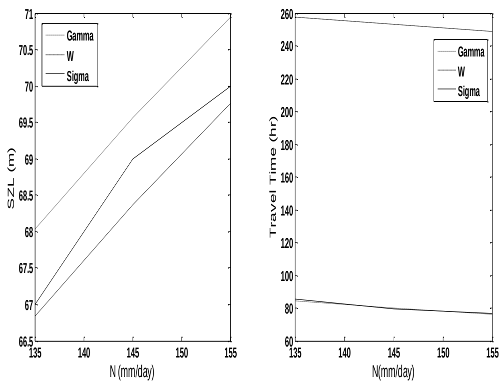
جهت شبیه سازی پاسخ دامنه های همگرای محدب از شدت بارندگی بین ۳۵ تا ۶۰ میلی متر برروز استفاده گردید. این دامنه در شدت تغذیه بارندگی بالاتر دارای طول منطقه اشباع بزرگی گشته و نتایج قابل تحلیل نیستند. شکل ۵ مقادیر زمان پیمایش وطول منطقه اشباع(SZL (Saturated zone length را در دامنه همگرای محدب را نشان می دهد. شبیه زیگما، طول منطقه اشباع بین ۵۸ تا ۷۲ متر را نشان می‌دهد و بیشترین مقادیر SZL را برآوردکرده است. مقدار RMSE برای دو شبیه گاما و زیگما به ترتیب ۳۲,۱ و ۳۱,۳ متراست. مقدار RMSE جهت محاسبه زمان پیمایش جریان زیر سطحی شبیه گاما و زیگما به ترتیب ۱۸۷و ۲۰۹ ساعت است. مقدار CE برای دو روش پیشنهادی مقادیر غیر قابل قبولی محاسبه گردید. در این دامنه نتایج شبیه های گاما و زیگما بسیار به هم نزدیک بودند ولی نتایج این دو روش اختلاف زیادی با شبیه مبنای W داشتند.



شکل ۶- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه همگرای صاف

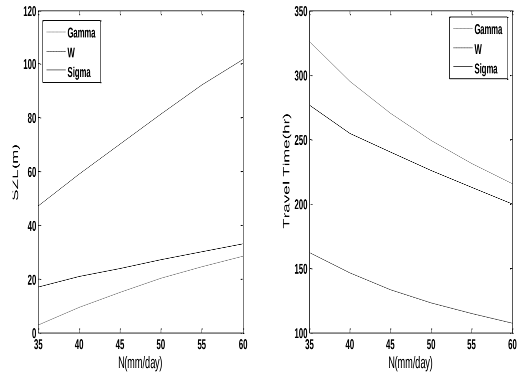
شکل ۶ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه همگرای صاف نشان می دهد. نتایج شبیه اشباع پذیری گاما و زیگما برای دامنه های همگرای صاف تحت شدت تغذیه mm/day۱۳۵ تا ۱۵۵ بسیار نزدیک به هم بودند. مقدار RMSE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب ۲٫۸و ۳٫۳ متر، جهت محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۲۴ و۱۲ ساعت هستند. مقدار CE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب ۰٫۷۴و ۰٫۷۱ متر که نتایج خوب ارزیابی شدند و برای زمان پیمایش به ترتیب ۰٫۶۵ و۰٫۶۲ ساعت محاسبه گشتند که نتایج راضی کننده هستند. در این دامنه نیز شبیه گاما به شبیه زیگما مطابقت خوبی را داشت.

شکل ۷ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه همگرای مقعر نشان می دهد.



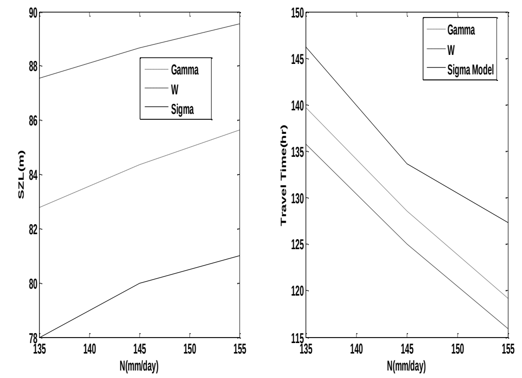
شکل ۷- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه همگرای مقعر

نتایج محاسبه طول منطقه اشباع برای دامنه های همگرای مقعر برای سه شبیه بسیار به هم نزدیک بوده اند. مقادیر RMSE شبیه اشباع پذیری شبیه گاما و زیگما به ترتیب ۱٫۱۸ و ۰٫۴ متر هستند. با اینکه مقدار CE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب .۹۰و ۰٫۹۳ متر شدند که نتایج بسیار خوبی هستند، جهت محاسبه زمان پیمایش غیر قابل قبول بودند زمان پیمایش شبیه زیگما و گاما کاملا بر هم منطبق گردید، ولی نتایج زمان پیمایش شبیه W اختلاف بسیار زیادی را با دو شبیه دیگر نشان دادند. مقدار RMSE شبیه گاما و زیگما ۱۷۲ ساعت است. به طور کلی، شبیه گاما در دامنه های همگرا با انحناهای مختلف نتایج نزدیکی را با شبیه زیگما نشان داد.



شکل ۸- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه موازی مقعر

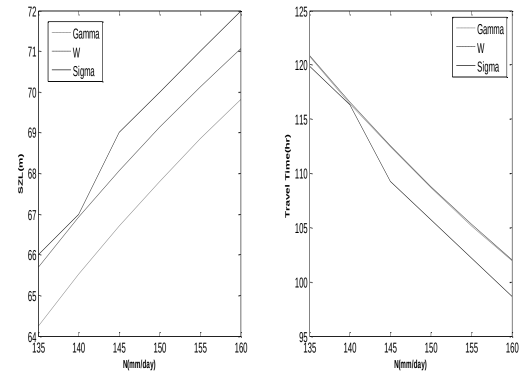
شکل ۸ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه موازی مقعر نشان می دهد. مقادیرRMSE و SZL برای شبیه های گاما و زیگما به ترتیب ۵۹٫۳و ۵۲ متر هستند و مقادیر RMSE برای محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۱۳۵و ۱۰۴ ساعت هستند. مقدار CE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب ۰٫۷۰و ۰٫۶۲ متر که نتایج راضی کننده بوده و جهت محاسبه زمان پیمایش نتایج قابل قبول نبودند. در این دامنه نیز نتایج شبیه گاما به شبیه زیگما نزدیک است.



شکل ۹- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه موازی محدب

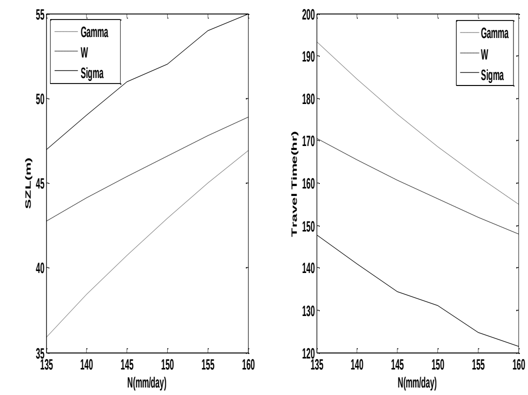
شکل ۹ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه موازی محدب نشان می دهد. بیشترین نتایج SZL مربوط به شبیه W بین ۸۷ تا ۹۰ متر بود، و کمترین نتایج مربوط به شبیه زیگما بین ۷۸ تا ۸۲متر بود. نتایج شبیه گاما تقریبا بوسیله دو شبیه دیگر است. مقادیرRMSE و SZL برای شبیه های گاما و زیگما به ترتیب ۴٫۳و ۹ متر هستند و مقادیر RMSE برای محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۳٫۶و ۱۰٫۳ ساعت هستند. معیار CE شبیه گاما و زیگما

جهت محاسبه SZL به ترتیب ۰٫۸۶و ۰٫۷۹ متر، که نتایج بسیار خوب ارزیابی می گردند و جهت محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۰٫۸۸ و۰٫۸۰ ساعت هستند که نتایج بسیار خوب ارزیابی شدند.



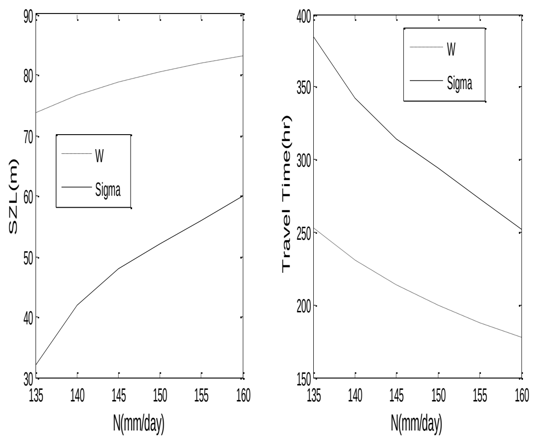
شکل ۱۰- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه موازی صاف

شکل ۱۰ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه موازی صاف نشان می دهد. مقادیرRMSE و SZL برای شبیه های گاما و زیگما به ترتیب ۱٫۴و ۰٫۷۴ متر است، مقادیر RMSE برای محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۰٫۱۱و ۲٫۶۳ ساعت است. CE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب ۰٫۹۰و ۰٫۹۳ متر، که نتایج بسیار خوب بودند و جهت محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۰٫۹۹ و۰٫۹۳ ساعت، هستند که نتایج بسیار خوب ارزیابی شدند. بر اساس نتایج، سه شبیه مطابقت بسیار خوبی را برای دامنه های موازی صاف نشان دادند.



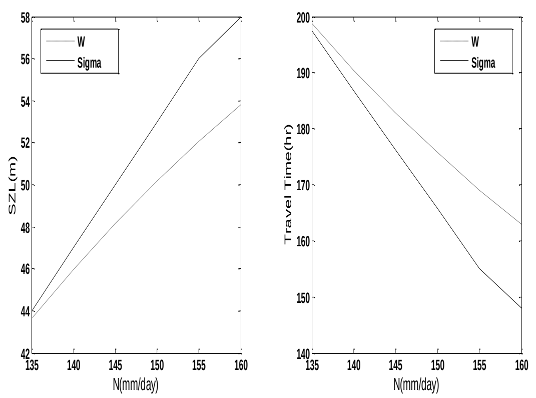
شکل ۱۱- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه واگرای مقعر

شکل ۱۱ مقادیر زمان پیمایش و SZL را در دامنه واگرای مقعر نشان می دهد. مقادیرRMSE و SZL برای شبیه های گاما و زیگما به ترتیب ۴٫۶و ۵٫۵ متر هستند و مقادیر RMSE برای محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۱۵٫۴و ۲۵٫۵ ساعت می باشند. CE شبیه گاما و زیگما جهت محاسبه SZL به ترتیب ۰٫۹۲و ۰٫۹۱ متر که نتایج بسیار خوب بودند و جهت محاسبه زمان پیمایش به ترتیب ۰٫۷۸ و۰٫۷۲ ساعت هستند که نتایج بسیار خوب ارزیابی شدند. بر اساس نتایج به دست آمده می توان گفت که شبیه گاما مطابقت بهتری را نسبت به شبیه زیگما برای دامنه های واگرای مقعر را نشان می دهد.



شکل ۱۲- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه واگرای محدب

نتایج شبیه گاما برای دامنه های واگرای محدب همگرا نشد، و این شبیه نتوانست نتایج مناسبی را برای این دامنه محاسبه نماید. شبیه زیگما دارای RMSEبرابر ۳۱٫۴ بود. CE شبیه زیگما غیر قابل قبول ارزیابی شد. اختلاف نتایج این شبیه با شبیه W معنی دار و زیاد بود. نتایج شبیه گاما برای دامنه های واگرای صاف نیز همگرا نشد. شکل های ۱۲ و ۱۳ نتایج شبیه زیگما و W را برای دامنه های واگرای محدب و واگرای صاف به ترتیب نشان می دهند.



شکل ۱۳- زمان پیمایش و طول منطقه اشباع در دامنه واگرای صاف

۱۰–جمع بندی :

جداسازی منطقه اشباع با جریان سطحی از منطقه غیر اشباع با جریان زیر سطحی در دامنه ها در بسیاری از شبیه های بارندگی رواناب که با سازگار دانی-بلاک کار می کنند از اهمیت بالایی برخوردار است. این طولها در محاسبه زمان پیمایش سطحی و زیر سطحی در این شبیه ها به کار می رود. در این تحقیق سه شبیه به نام های گاما، زیگما و w برای محاسبه زمان پیمایش و طول منطقه اشباع دامنه های مرکب ارائه شده اند. معادله های هندسی دامنه ها از جمله معادله شکل تصویرافقی و انحنای نیمرخ دامنه ها در هر شبیه متفاوت بوده اند. در این تحقیق یک شبیه به نام گاما پیشنهاد گردید و نتایج ان با دو شبیه دیگر ارزیابی شد. شبیه گاما دارای هندسه ساده تری نسبت به دو شبیه دیگر است.

شبیه گاما می تواند اثر شکل تصویرافقی و انحنای نیمرخ را برای میزان اشباع پذیری و زمان پیمایش در نظر بگیرد. براساس نتایج به دست آمده واکنش دامنه های مرکب در شبیه های گاما، زیگما و w متفاوتند. در این تحقیق نتایج سه شبیه برای نه دامنه مرکب به ازاء مقادیر مختلف بارندگی محاسبه گردیده و مورد مقایسه قرار گرفتند. به طور کلی یک روند مشخص دربازه واکنش نه دامنه مرکب مشاهده نشد. در بیشتر دامنه ها شبیه گاما نتایج نزدیکی با شبیه زیگما داشت. در دامنه های واگرای محدب و صاف شبیه گاما نتوانست کارا باشد. برای ارزیابی نتایج شبیه ها از دو معیار RMSE وضریب کارایی شبیه ناش CE استفاده گردید. بوسیله مقادیر معیار برای نه دامنه محاسبه گردید. مقدار بوسیله معیار RMSE برای نه دامنه طبق شبیه گاما برای محاسبه طول منطقه اشباع ۱۵متر ، برای محاسبه زمان پیمایش ۷۷ ساعت است. مقدار بوسیله معیار RMSE برای نه دامنه طبق شبیه زیگما برای محاسبه طول منطقه اشباع ۱۴٫۶متر، برای محاسبه زمان پیمایش ۵۱ ساعت است. مقدار بوسیله فراسنج ضریب کارایی شبیه CE برای شبیه گاما برای طول منطقه اشباع ۰٫۸۴متر و برای زمان پیمایش ۰٫۷۹ است. مقدار بوسیله فراسنج ضریب کارایی شبیه CE برای شبیه زیگما برای طول منطقه اشباع ۰٫۸۲متر و برای زمان پیمایش ۰٫۷۲ است. براساس این نتایج می توان گفت که شبیه گاما، که یک شبیه ساده تر است، نتایج بسیار نزدیکی، شبیه پیچیده گاما دارد، و پیشنهاد می گردد که در شبیه های بارندگی از شبیه زیگما با هندسه و معادله های ساده تر استفاده گردد.

منابع:

1) Anderson MG, Burt TP. 1978. Towards more detailed field monitoring of variable source area. Water Resources Research 14: 1123–1131.

2) Aryal, S.K., O'Loughlin, E.M., and Mein, R.G. 2005. A similarity approach to determine response times to steady-state saturation in landscapes. Adv. Water Resour., 28, 99–115.

3) Berne, A., R. Uijlenhoet and P. A. Troch, 2005. Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry, Water Resour. Res., 41, W09410.

4) Beven, K. 1982. On subsurface stormflow: prediction with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows, Water Resour. Res., 18 (6), 1627–1633.

5) Dunne T, Black RD. 1970a. Partial-area contributions to storm runoff in a small New England watershed. Water Resources Research 6: 1296–1311.

6) Dunne T, Black RD. 1970b. An experimental investigation of runoff production in permeable soil. Water Resources Research 6: 478–490.

7) Evans I. S ,1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband. 36: 274-295.

8) Fan, Y., Bras, R., 1998. Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow. Water Resour. Res. 34 (4), 921–927.

9) Freeze, R.A. 1971. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. Water Resour. Res., 7, 929–941.

10) Freeze, R.A. 1972a. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 1. Baseflow contributions to channel flow. Water Resour. Res., 8, 609–623.

11) Freeze, R.A. 1972b. Role of subsurface flow in generating surface

runoff: 2. Upstream source areas. Water Resour. Res., 8, 1272–1283.

12) Freeze, R.A., and Harlan, R.L. 1969. Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model. J. Hydrol., 9, 237–258.

13) Hewlett JD, Hibbert AR. 1963. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. Journal of Geophysical Research 68: 1080–1087.

14) Hewlett JD, Hibbert AR. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In International Symposium on Forest Hydrology, Sopper WE, Lull HW (eds). Pergamon Press: Oxford; 275–290.

15) Hilberts, A., E. Van Loon, P. A. Troch and C. Paniconi,2004. The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope, J. Hydrol., 291, 160-173.

16) Hilberts, A., P. A. Troch, C. Paniconi and J. Boll ,2007. Low-dimensional modeling of hillslope subsurface flow: the relationship between rainfall, recharge, and unsaturated storage, Water Resour. Res., 43, W03445.

17) Norbiato D., Borga. M, 2008. Analysis of hysteretic behaviour of a hillslope-storage kinematic wave model for subsurface flow , Advances in Water Resources journal, 31 , 118–131

18) Noroozpour S, Saghafian B, Akhondali AM, Radmanesh F ,2014. Travel time of curved parallel hillslopes. Hydrol Res J 145(4), 190–199. doi:10.2166/nh.2013.171.

19) Lee, K.T., and Chang, C.H., 2005. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. Journal of Hydrology 311:91–105.

20) O'Loughlin EM. 1981. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. J Hydrol;53:229–46.

21) Sabzevari T, Talebi A, Ardakanian R and Shamsai A, 2010. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes, Hydrol. Earth Syst. Sci.14: 891–900.

22) Sabzevari T. Noroozpour.S,2014 .Effects of hillslope geometry on surface and subsurface flows, Hydrogeology Journal 22: 1593–1604, DOI 10.1007/s10040-014-1149-6

23) Singh VP, Agiralioglu N ,1981a. Diverging overland flow: analytical solutions. Nord Hydrol 12(2):81–89

24) Singh VP, Agiralioglu N, 1981b. Diverging overland flow, application to natural watersheds. Nord Hydrol 12(2):99–110

25) Singh VP, Agiralioglu N (1982) Lag time for diverging overland flow. Nordic Hydrol 13:39–48.

26) Troch, P., van Loon, E., Hilberts, A., 2002. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow. Adv. Water Resour. 25, 637–649.

27) Troch, P., A. van Loon, and A. Hilberts .,2004, Analytical solution of the linearized hillslope-strorage Boussinesq equation for exponential hill- slope width functions, Water Resour. Res., 40, W08601.

28) Talebi A, Troch P. A and Uijlenhoet R ,2008. A steady-state analytical hillslope stability model for complex hillslopes. Hydrol. Process, 22:546-553.

29) Zaslavsky, D., and Rogowski, AS. , 1969. Hydrologic and morphologic implications of anisotropy and infiltration in soil profile development. Soil Sci Soc Am Proc; 33(4):594–599.