

## ارزیابی مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC-3L برای شبیه‌سازی دبی رودخانه و تحلیل حساسیت آن در مقیاس‌های زمانی مختلف (مطالعه موردی: حوضه آبریز چالوس)

اصغر عزیزیان<sup>۱</sup> و علیرضا شکوهی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: ۹۵/۴/۱۸، پذیرش: ۹۵/۱۱/۹، نشر آنلاین: ۹۵/۱۱/۱۰)

### چکیده

مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس به علت دارا بودن اساس فیزیکی و در نظر گرفتن عمده فرآیندهای تأثیرگذار در بیلان انرژی و آب حوضه، از قابلیت مناسبی جهت برآورد توزیع مکانی رطوبت و دمای خاک، میزان تبخیر و تعرق و جریان رودخانه‌ای برخوردار می‌باشند. یکی از پرکاربردترین مدل‌هایی که در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، مدل نیمه توزیعی VIC-3L می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC-3L برای شبیه‌سازی دبی رودخانه چالوس در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌باشد. بررسی شاخص کارائی (نش- ساتکلیف) به دست آمده در مراحل واسنجی (۰/۸۴) و صحت‌سنجی (۰/۷۴) حاکی از آن است که مدل مذکور از توانائی مناسبی جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه چالوس برخوردار می‌باشد. همچنین تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی نشان می‌دهد که در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه)، ترتیب پارامترهای تأثیرگذار متفاوت می‌باشد. اما در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین عنوان نمود که مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مدل VIC-3L، پارامترهای  $d2$  (عمق لایه دوم خاک)،  $Ws$  (کسری از حداکثر رطوبت موجود در خاک) و  $Ds$  (کسری از حداکثر جریان زیرسطحی) می‌باشند و پارامترهای دیگر از تأثیر کمتری برخوردار بوده و از آن‌ها می‌توان در طول فرآیند واسنجی صرف نظر نمود.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل حساسیت، شاخص کارائی نش- ساتکلیف، مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس، مدل VIC-3L.

### ۱- مقدمه

حوضه، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، دمای خاک و ... برخوردار می‌باشند. از میان مدل‌هایی که در این زمینه وجود دارد، مدل VIC<sup>۱</sup> از کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشد. اخیراً قابلیت‌هایی به این مدل افزوده شده که به کمک آن‌ها می‌توان اثرات مدیریت منابع آب مانند عملیات بهره‌برداری از مخازن سدها و یا اثرات برداشت آب جهت آبیاری را نیز در مدل‌سازی وارد نمود. نسخه اولیه مدل VIC با الگویی از مدل Xinanjiang و به صورت یک لایه خاک توسط Wood و همکاران (۱۹۹۲) ارائه شد و در مدل GFDL و مدل GCM انستیتوی ماکس پلانک مورد استفاده قرار گرفت (Stamm و همکاران، ۱۹۹۴) و تاکنون نسخه‌های به روز

مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس که به مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی سطح زمین در مقیاس بزرگ می‌پردازند در دهه‌های اخیر گسترش قابل توجهی یافته‌اند (Wood و همکاران، ۱۹۹۲؛ Todini و Dumenil، ۱۹۹۰؛ Miller و Russell) و همکاران، ۱۹۹۷). این مدل‌ها به مدل‌های سطح زمین مورد استفاده در مدل‌های گردش عمومی جو بسیار نزدیک هستند. اما تکیه اصلی آن‌ها بر مدل‌سازی رواناب، جریان رودخانه‌ای و بیلان آبی حوضه می‌باشد. مدل‌های بزرگ مقیاس به علت دارا بودن اساس فیزیکی، توزیعی عمل نموده و با در نظر گرفتن عمده فرآیندهای تأثیرگذار در بیلان انرژی و آب، از قابلیت مناسبی جهت شبیه‌سازی مواردی همچون: توزیع مکانی رواناب در سطح

1. Variable Infiltration Capacity

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۸۸۱۶۴۵۸

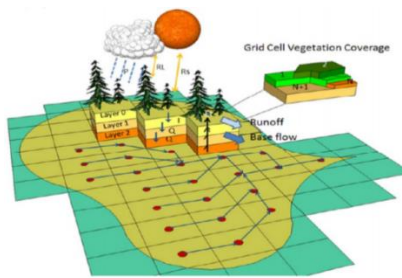
آدرس ایمیل: azizian@eng.ikiu.ac.ir، عزیزیان، (ا. عزیزیان)، shokoohi@eng.ikiu.ac.ir (ع. شکوهی).

و GFDL در حوضه آبریز کارولینای شمالی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل VIC از توانایی بالاتری نسبت به مدل GFDL جهت شبیه‌سازی دبی خروجی از حوضه برخوردار می‌باشد. همچنین آنالیز حساسیتی که به عمل آوردند نشان داد که پارامترهای مرتبط با دبی پایه، بیشترین تأثیر را بر متغیرهای هیدرولوژیکی مانند: رواناب، تبخیر و رطوبت خاک دارند. Tong و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی چند منبع مختلف بارش بر عملکرد مدل VIC-3L در شبیه‌سازی رواناب روزانه در یک حوضه از کشور چین، پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های TRMM-3B42 و CMORPH نسبت به منابع دیگر موجب شبیه‌سازی هرچه بهتر رواناب خواهد گردید. Liang و Xie (۲۰۰۳) به اصلاح مدل VIC-3L پرداختند و مواردی همچون اندرکنش بین دبی پایه و آب زیرزمینی و تغییرات مکانی خاک در داخل سلول‌های محاسباتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده در حوضه آبریز پین کریک در ایالت پنسلوانیای آمریکا حاکی از عملکرد قابل قبول مدل اصلاح شده جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان رودخانه‌ای و سطح آب زیرزمینی دارد. Bohn و Vivoni (۲۰۱۴) با اصلاح مدل بزرگ مقیاس VIC اقدام به شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق حوضه‌های شمالی کشور کانادا نمودند. نتایج حاصل از ارزیابی خروجی مدل با داده‌های ۵۹ ایستگاه مشاهداتی، حاکی از عملکرد قابل قبول مدل دارد. Xie و همکاران (۲۰۰۷) جهت افزایش کارایی مدل VIC-3L و شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در حوضه‌های آبریز سراسر چین از روش‌های منطقه‌ای برای تخمین پارامترهای مدل استفاده نمودند. این محققین ابتدا کشور چین را از نظر تغییرات آب و هوایی به ناحیه‌های مختلف تقسیم و مدل VIC را در تعدادی از آن‌ها واسنجی نمودند و سپس پارامترهای به دست آمده در این نواحی را در ۱۹ حوضه دیگر مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که این روش نسبت به تخمین اولیه پارامترهای مدل، موجب افزایش کارایی مدل بر اساس شاخص نش-ساتکلیف (در حدود ۳۱/۷-۱/۹٪) شده است.

علی‌رغم توسعه روزافزون استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس در مدل‌سازی بیلان انرژی و بیلان آبی در بسیاری از حوضه‌های سراسر جهان و همچنین استفاده از آن‌ها در مدل‌های گردش عمومی جو، متأسفانه تاکنون مطالعات قابل توجهی در زمینه استفاده از این گونه مدل‌ها در سطح کشور انجام نشده است. در حال حاضر در بسیاری از مطالعات و تحقیقات جاری در سطح کشور از مدل‌هایی همچون WMS، SWAT، HEC-HMS، IHACRES جهت شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه‌ها استفاده می‌نمایند. بسیاری از این مدل‌ها از دیدگاه یکپارچه<sup>۱</sup> جهت مدل-

شده زیادی (Cherkauer و همکاران، ۲۰۰۳؛ Bowling و همکاران، ۲۰۰۴؛ Bowling و Lettenmaier، ۲۰۰۹) از آن ایجاد و در محدوده وسیعی از موضوعات مختلف مانند مدیریت منابع آب حوضه‌ها، اندرکنش بین زمین و اتمسفر، تغییر اقلیم، مدل‌سازی رطوبت خاک و شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه‌ها به کار گرفته شده است. این مدل تک لایه تنها وابسته به سه پارامتر: نفوذ، تبخیر و ضریب فروکش دبی پایه بود. پس از معرفی مدل تک لایه VIC، Liang و همکاران (۱۹۹۴) با در نظر گرفتن دو لایه خاک و نیز لحاظ نمودن تغییرات مکانی پوشش گیاهی و تبخیر در داخل هر سلول مدل دو لایه VIC-2L را معرفی نمودند. در مدل VIC-2L مواردی همچون نفوذ، زهکشی از لایه فوقانی به لایه تحتانی خاک، رواناب سطحی و زیرسطحی برای هر کدام از پوشش‌های گیاهی موجود در یک سلول محاسبه می‌شود. به عنوان یک مدل سطح زمین نیمه توزیعی، مدل VIC شار حرارتی محسوس و نهان (گرمای نهان تبخیر) را با استفاده از روابط فیزیکی محاسبه می‌نماید اما برای نمایش و برآورد رواناب سطحی و دبی پایه از مدل‌های مفهومی (مانند مدل آرنو) استفاده می‌کند. Liang و همکاران (۱۹۹۶) به این نتیجه رسیدند که مدل دو لایه VIC-2L به علت پائین بودن محتوی رطوبتی لایه بالایی و مهم‌تر از آن عدم وجود یک مکانیزم کارا برای انتقال رطوبت از لایه پائین به لایه بالایی خاک، مقادیر تبخیر را کم برآورد می‌کند. در نتیجه این محققین برای اصلاح مدل VIC-2L (جهت در نظر گرفتن پخشیدگی رطوبت بین لایه‌های خاک)، یک لایه ۱۰ سانتی‌متری بر روی لایه فوقانی قبلی (لایه بالایی در مدل دو لایه) لحاظ نمودند. به این صورت مدل سه لایه VIC-3L معرفی گردید. لازم به ذکر است که در حال حاضر در مدل VIC این امکان تعبیه شده که بتوان از تعداد لایه‌های بیشتری نیز استفاده نمود. از آنجائی که این مدل توانایی در نظر گرفتن تغییرات هندسی درون سلولی را دارا نمی‌باشد، یک مدل روندیابی مجزا برای شبیه‌سازی دبی رودخانه توسط Lohmann و همکاران (۱۹۹۶ و ۱۹۹۸) توسعه داده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، نتایج به دست آمده از اجرای مدل VIC را با استفاده از یک مدل روندیابی ساده که بر مبنای تابع انتقال خطی می‌باشد، در شبکه آبراهه‌های حوضه روندیابی می‌کند. تاکنون مطالعات متعددی در مورد کاربرد موفقیت‌آمیز مدل VIC در حوضه‌های مختلف سراسر دنیا گزارش شده است (Nijseen و همکاران، ۱۹۹۷؛ Wood و همکاران، ۱۹۹۷؛ Lohmann و همکاران، ۱۹۹۸؛ Abdulla و همکاران، ۱۹۹۶؛ Bowling و همکاران، ۲۰۰۰؛ Su و همکاران، ۲۰۰۵؛ Su و همکاران، ۲۰۰۶؛ Zhu و همکاران، ۲۰۰۷). به عنوان مثال، Wood و همکاران (۱۹۹۲) به مقایسه دو مدل VIC

1. Integrated



شکل ۱- نمائی شماتیک از ساختار مدل بزرگ مقیاس VIC-3L

همچنین فرمول‌بندی مربوط به رواناب زیرسطحی در مدل از مفاهیم مورد استفاده در مدل ARNO بدست آمده است. رواناب کلی سلول به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q = \sum_{n=1}^{N+1} C_n \cdot (Q_{d,n} + Q_{b,n}) \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $Q_{d,n}$  و  $Q_{b,n}$  به ترتیب رواناب سطحی و رواناب زیر سطحی برای  $n$  پوشش گیاهی متفاوت در یک سلول می‌باشند (واحد پارامترهای فوق mm است).  $C_n$ : درصد مربوط به هر کدام از پوشش‌های گیاهی موجود در یک سلول. در مدل VIC فرض بر این است که هیچ‌گونه جریان جانبی به لایه‌های بالائی خاک وارد نمی‌شود و در نتیجه می‌توان انتشار رطوبت در خاک را با معادله (۱) بعدی ریچاردز<sup>۴</sup> مدل‌سازی نمود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $\theta$ : محتوی حجمی رطوبت خاک،  $D(\theta)$ : ضریب پخشیدگی آب موجود در خاک (mm/day)،  $K(\theta)$ : ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (mm/day) و  $z$ : عمق خاک می‌باشد. با در نظر گرفتن عوامل هواشناسی (مانند باران، برف، رطوبت هوا، دمای هوا، سرعت باد و ...) رطوبت کلی خاک در لایه‌های بالائی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} \cdot z_i = I - E - K(\theta) \Big|_{-z_i} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{-z_i} \quad (3) \quad (i=1,2)$$

در رابطه فوق،  $I$ : نرخ نفوذ آب در خاک (mm/day)،  $E$ : تبخیر و تعرق،  $z_1$  و  $z_2$ : عمق خاک در لایه‌های ۱ و ۲ می‌باشند. نرخ نفوذ آب در خاک تفاوت بین بارش (چنانچه در داخل سلول پوشش گیاهی نیز وجود داشته باشد جریان ساقه-ای نیز در نظر گرفته می‌شود) و رواناب سطحی ( $Q_d$ ) می‌باشد. برای لایه تحتانی (لایه ۳) از یک رابطه تجربی، استفاده شده است. رطوبت خاک در این لایه با استفاده از معادله بیلان آب و در نظر گرفتن پخشیدگی بین لایه‌های فوقانی خاک به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

سازی استفاده می‌کنند و توانائی ارائه جزئیات مکانی اجزای بیلان آب و یا بیلان انرژی (مانند توزیع مکانی رطوبت خاک، توزیع مکانی تبخیر و تعرق، دمای خاک، توزیع مکانی رواناب سطحی و زیرسطحی و ...) را دارا نمی‌باشند.

حوضه مورد مطالعه در این تحقیق حوضه آبریز رودخانه چالوس می‌باشد. هدف از این تحقیق علاوه بر نشان دادن توانایی مدل VIC-3L در ارزیابی بیلان حوضه‌ای متنوع از نظر نوع بارش مشتمل بر مناطق سرد و خشک با رژیم برفی در بخش‌های علیای حوضه، سرد و خشک با رژیم برفی-بارانی در میانه حوضه و معتدل و مرطوب با رژیم بارانی در بخش‌های پایینی حوضه در مجاورت دریای خزر، یافتن حساس‌ترین پارامترهای مدل مزبور است. بررسی حساسیت VIC-3L از این نظر مهم است که مدل مزبور در مجموع دارای بیش از ۲۱ پارامتر نیازمند واسنجی می‌باشد که می‌تواند برای کاربرد هر مدلی عاملی محدود کننده به شمار آید. با نشان دادن حساس‌ترین پارامترهای مدل مزبور در یک حوضه متنوع از نظر اقلیم، رژیم بارش، خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، مانند حوضه آبریز رودخانه چالوس، می‌توان عملاً تعداد پارامترهای واسنجی را به حداقل قابل قبول، از نظر دقت برآورد، کاهش داد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- ساختار مدل VIC-3L

ویژگی‌های بارز مدل VIC را می‌توان به نحوه در نظر گرفتن تغییرات پوشش گیاهی در یک سلول، در نظر گرفتن چند لایه خاک با مقادیر نفوذ متغیر و محاسبه دبی پایه به صورت تابع غیر خطی ارتباط داد. در شکل (۱) طرح کلی از مدل VIC به همراه پوشش‌های گیاهی مختلف و سه لایه خاک نشان داده شده است. در این مدل تبخیر و تعرق با استفاده از معادله پنمن-مانتیش<sup>۲</sup> که در آن تبخیر و تعرق تابعی از تابش خالص و کمبود فشار بخار آب می‌باشد، محاسبه می‌گردد. در این مدل متناسب با هر پوشش گیاهی یک لایه مربوط به تاج پوشش گیاهان<sup>۳</sup> و سه لایه خاک در نظر گرفته می‌شود. لایه Canopy وظیفه جذب بخشی از بارش ورودی به سطح هر سلول را دارد که در این مدل به صورت تابعی از شاخص سطح برگ در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۲- مدل‌سازی رطوبت خاک و رواناب

مدل VIC از نظریه منحنی نفوذ متغیر (Andreadis و همکاران، ۲۰۰۹) برای محاسبه میزان نفوذ و رواناب در سطح یک سلول محاسباتی استفاده می‌کند.

4. Richards

2. Penman-Monteith  
3. Canopy

زیرسطحی روزانه که توسط مدل VIC و در هر سلول تولید می‌شوند ابتدا با استفاده از یک هیدروگراف واحد مثلثی به خروجی هر سلول منتقل شده و سپس در شبکه آبراه‌ها روندیابی شده تا به خروجی حوضه برسد. انتقال آب در آبراهه نیز با استفاده از یک مدل روندیابی ساده خطی که از فرم خطی شده معادله سنت ونانت تبعیت می‌کند، انجام می‌پذیرد. در این مدل فرض بر این است که انتقال جریان به خارج از سلول فقط در قالب جریان آبراه‌های صورت می‌گیرد. فرم موج دیفیوژن<sup>۵</sup> معادله سنت ونانت<sup>۶</sup> به شرح زیر می‌باشد که در آن پارامترهای  $C$  و  $D$  به ترتیب مبین سرعت و ضریب پخشیدگی موج می‌باشند (Lohmann و همکاران ۱۹۹۶):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - C \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (۸)$$

با حل معادله سنت ونانت و استفاده از انتگرال پیچشی رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$Q(x, t) = \int_0^t U(t-s)h(x, s)ds \quad (۹)$$

در رابطه فوق، مقدار  $h(x, t)$  برابر است با:

$$h(x, t) = \frac{x}{2t\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(Ct-x)^2}{4Dt}\right) \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق،  $h(x, t)$  تابع پاسخ ضربه‌ای معادله سنت ونانت می‌باشد.

#### ۴-۲- محدودده مطالعاتی

حوضه رودخانه چالوس یکی از حوضه‌های مهم ورودی به دریای خزر با مساحتی در حدود ۱۶۳۲ کیلومتر مربع، محیط ۳۰۹ کیلومتر و دامنه تغییرات ارتفاعی ۰/۱۰ تا ۴۲۶۱ متر (از سطح آب دریای آزاد) می‌باشد. حوضه این رودخانه در بالادست جنگل با پوشش کم و در مناطق میانی با پوشش متوسط و در قسمت‌های انتهایی جنگل با پوشش متراکم است. منبع تغذیه این رودخانه نزولات جوی بوده و در جهت جنوب غرب به شمال شرق جریان دارد. در شکل (۲) موقعیت حوضه آبریز رودخانه چالوس و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک موجود در حوضه نشان داده شده است.

#### ۴-۲-۵- تهیه داده‌های مدل VIC-3L

##### ۴-۲-۵-۱- پوشش گیاهی

نقشه مربوط به پوشش گیاهی مورد استفاده در این تحقیق از داده‌های ماهواره MODIS (سال ۲۰۰۲) که توسط محققین دانشگاه بوستون و در ابعاد سلولی یک کیلومتری ایجاد شده، تهیه گردید.

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial t} \cdot (z_3 - z_2) = K(\theta) \Big|_{z_2} + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_2} - E - Q_b \quad (۴)$$

چنانچه خاک لخت باشد، عبارت مربوط به تبخیر و تعرق ( $E$ ) صفر در نظر گرفته می‌شود. زیرا در این حالت هیچ‌گونه تبخیری از لایه تحتانی صورت نمی‌گیرد. در غیر این صورت، اگر اعماق در نظر گرفته شده برای توسعه ریشه گیاهان به لایه تحتانی نیز برسد، بایستی عبارت مربوط به تبخیر و تعرق ( $E$ ) مورد توجه قرار گیرد. از آنجائی که لایه نازک روئی (لایه ۱) دارای پتانسیل نگهداشت آب کمی می‌باشد، رواناب سطحی در هر گام زمانی برای کل لایه بالائی خاک (لایه‌های ۱ و ۲) توسط رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد (Liang و همکاران، ۱۹۹۶):

$$Q_d = \begin{cases} P - z_2 \cdot (\theta_s - \theta_2) + z_2 \cdot \theta_s \cdot \left(1 - \frac{i_0 + P}{i_m}\right)^{1+b}, & P + i_0 \leq i_m \\ P - z_2 \cdot (\theta_s - \theta_2), & P + i_0 \geq i_m \end{cases} \quad (۵)$$

در رابطه فوق،  $i_0$ : ظرفیت نفوذ نقطه‌ای (mm)،  $i_m$ : حداکثر ظرفیت نفوذ در یک سلول (mm)،  $\theta_s$ : تخلخل خاک و  $b$ : پارامتر شکل نفوذ، می‌باشند. همچنین بین پارامترهای مذکور روابط زیر برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} i_0 &= i_m (1 - (1 - A)^{1/b}) \\ i_m &= (1 + b_i) \cdot \theta_s \cdot |z| \end{aligned} \quad (۶)$$

در رابطه  $A$ : بخشی از سطح که در آن ظرفیت نفوذ کمتر از  $i_0$  است. رابطه مورد نظر برای محاسبه جریان زیرسطحی نیز بر مبنای روابط مورد استفاده در مدل آرنو و به شرح زیر می‌باشد:

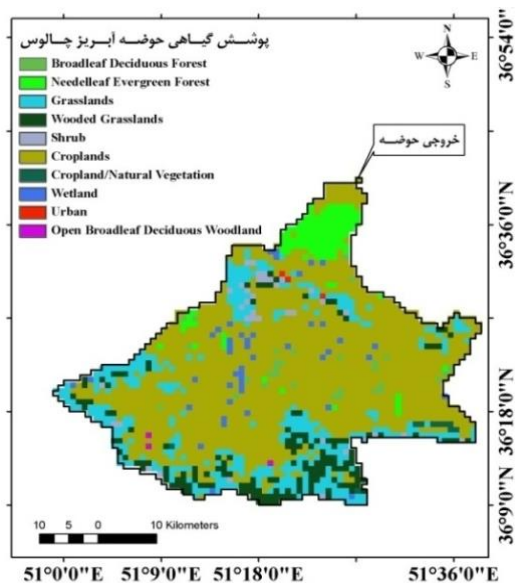
$$Q_b = \begin{cases} \frac{D_s D_m}{W_s \theta_s} \cdot \theta_s, & 0 \leq \theta_3 \leq W_s \theta_s \\ \frac{D_s D_m}{W_s \theta_s} \cdot \theta_s + \left(D_m - \frac{D_s D_m}{W_s}\right) \left(\frac{\theta_3 - W_s \theta_s}{\theta_s - W_s \theta_s}\right)^2, & \theta_3 \geq W_s \theta_s \end{cases} \quad (۷)$$

$Dm$ : حداکثر جریان زیرسطحی (mm/day)،  $D_s$ : کسری از پارامتر  $Dm$  و  $W_s$ : کسری از حداکثر رطوبت موجود در خاک که در آن دبی پایه غیرخطی آغاز می‌شود. منحنی فروکش جریان پایه هنگامی که رطوبت موجود در لایه ۳ کمتر از  $W_s \theta_s$  باشد به صورت خطی و در غیر این صورت غیر خطی محاسبه خواهد بود. جزئیات مربوط به پارامترهای مذکور در بخش واسنجی مدل ارائه شده است.

#### ۴-۳- مدل روندیابی جریان

این مدل در اصل زمان تمرکز مورد نیاز جهت رسیدن رواناب به خروجی یک سلول و نیز زمان تمرکز جریان آبراه‌های (در شبکه آبراه‌ها) را محاسبه می‌نماید. رواناب سطحی و

5. Diffusion Wave  
6. Saint-Venant Equation

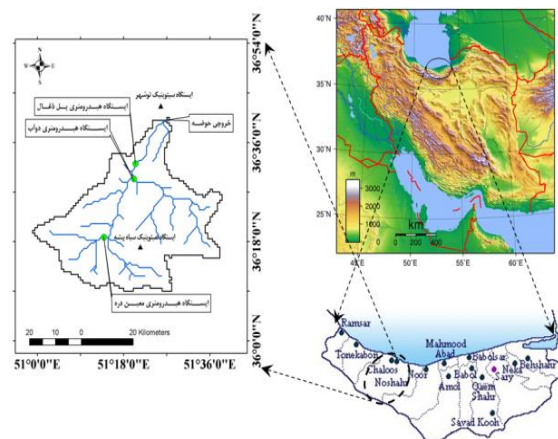


شکل ۳- نقشه پوشش گیاهی حوضه آبریز رودخانه چالوس

این فایل حاوی پارامترهایی است که عمده آن‌ها فرآیند تبخیر و تعرق (از سطوح گیاهان) را کنترل می‌کنند. از مهم‌ترین پارامترهای مذکور می‌توان به شاخص سطح برگ، ضریب آلبدو، حداقل مقاومت روزنه‌ای<sup>۷</sup>، مقاومت ساختاری گیاه<sup>۸</sup>، طول زبری، طول جابجایی<sup>۹</sup> و حداقل تابش با طول موج کوتاه (RGL) که در آن فرآیند تعرق رخ می‌دهد، اشاره نمود. همچنین برای پارامترهایی همچون شاخص سطح برگ و ضریب آلبدو از تصاویر ماهواره Modis بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ استفاده به عمل آمد. در جدول (۱) برخی از پارامترهای مهم مرتبط با هر کدام از پوشش‌های گیاهی مختلف نشان داده شده است.

#### ۵-۲-۲- نقشه خاک

در این تحقیق و با توجه به عدم دسترسی به نقشه‌های خاک حوضه آبریز چالوس، از نقشه‌های خاک ۵ آرک دقیقه (سازمان جهانی غذا و کشاورزی/ یونسکو استفاده شد. در شکل (۴) توزیع مکانی بافت‌های مختلف خاک در حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است. پارامترهای مختلفی از خصوصیات خاک جهت مدل-سازی بیلان رطوبت و رواناب مورد نیاز می‌باشد که می‌توان برخی از آن‌ها را با توجه به بافت غالب از روی خصوصیات خاک و یا توابع کتابخانه‌ای استخراج نمود و برخی دیگر را نیز در طول فرآیند واسنجی مدل به دست آورد. مهم‌ترین پارامترهایی که از طریق توابع کتابخانه‌ای و یا از روی خصوصیات بافت خاک به دست می‌آیند در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- حوضه آبریز رودخانه چالوس و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک

این محققین برای طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف پوشش گیاهی از تکنیک طبقه‌بندی IGBP استفاده نموده‌اند. بر اساس این تکنیک، برای پوشش گیاهی‌های سراسر جهان ۱۷ کلاس مختلف می‌توان تصور شد که عبارتند از:

- ۱) جنگل‌های سوزنی برگ همیشه سبز
- ۲) جنگل‌های پهن برگ همیشه سبز
- ۳) جنگل‌های سوزنی برگ ریز
- ۴) جنگل‌های برگ ریز
- ۵) جنگل‌های مختلط
- ۶) درختچه‌های متراکم
- ۷) درختچه‌های کم تراکم
- ۸) دشت‌های پوشیده از علف و پر درخت
- ۹) دشت‌های پوشیده از علف و درختان دور از هم
- ۱۰) علفزار (چمنزار)
- ۱۱) تالاب‌های دائمی
- ۱۲) اراضی کشاورزی
- ۱۳) اراضی شهری و ساخته شده
- ۱۴) اراضی با پوشش طبیعی- کشاورزی
- ۱۵) اراضی پوشیده از برف و یخ
- ۱۶) اراضی لم‌یزرع و تنک
- ۱۷) سطوح آبی

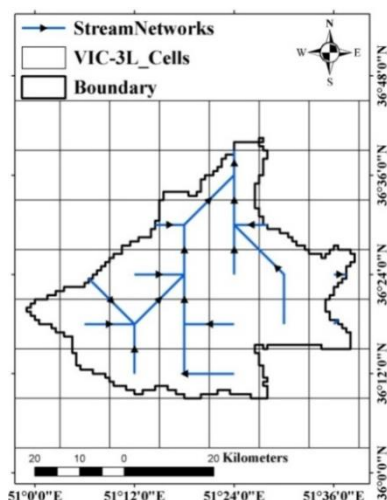
بررسی پوشش گیاهی حوضه آبریز چالوس حاکی از آن است که پوشش‌های گیاهی غالب محدوده مطالعاتی عبارتند از: اراضی کشاورزی، جنگل‌های برگ ریز پهن برگ، جنگل‌های سوزنی برگ همیشه سبز، علفزار، درختچه‌های متراکم و علفزارهای پوشیده از درخت. در شکل (۳) نقشه پوشش گیاهی حوضه آبریز چالوس با ابعاد سلولی یک کیلومتر نشان داده شده است.

پس از تعیین کلاس‌های پوشش گیاهی، بایستی پوشه مربوط به پوشش گیاهی را تهیه نمود.

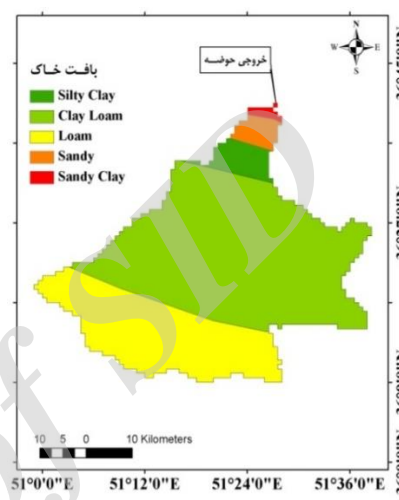
7. Minimum Stoma Resistance  
8. Architectural Resistance  
9. Displacement Length

جدول ۱- پارامترهای مرتبط با پوشش‌های گیاهی مختلف (Su و همکاران، ۲۰۰۵)

نوع پوشش	مقاومت ساختاری (s/m)	حداقل مقاومت روزنه‌ای (s/m)	ضریب آلبیدو	طول زبری (m)	طول جابجایی (m)	$R_{GL}$ ( $w/m^2$ )	شاخص سطح برگ
Evergreen Needle leaf Forest	۶۰	۲۵۰	۰/۱۲	۱/۴۷۶	۸/۰۴	۳۰	۳/۰۴ - ۴/۴۰
Deciduous Broad leaf Forest	۶۰	۱۵۰	۰/۱۸	۱/۲۳۰	۶/۷۰	۳۰	۱/۵۲ - ۵/۰۰
Wooded Grass lands	۴۰	۱۲۵	۰/۱۹	۰/۴۹۵	۱/۰۰	۷۵	۲/۲۰ - ۳/۸۵
Closed Shrub lands	۵۰	۱۳۵	۰/۱۹	۰/۴۹۵	۱/۰۰	۷۵	۲/۲۰ - ۳/۸۵
Grass lands	۲۵	۱۲۰	۰/۲۰	۰/۰۷۴	۰/۴۰	۱۰۰	۲/۲۰ - ۳/۸۵
Crop lands	۲۵	۱۲۰	۰/۱۰	۰/۰۰۶	۱/۰۱	۱۰۰	۰/۰۲ - ۵/۰۰



شکل ۵- شبکه جهت جریان حوضه آبریز رودخانه چالوس



شکل ۴- نقشه بافت خاک حوضه آبریز رودخانه چالوس

همان طور که از شکل (۶) ملاحظه می‌گردد، سلول‌هایی که دارای مقادیر ۱ می‌باشند کاملاً در داخل حوضه بوده و سلول‌هایی که دارای مقادیر کمتری از یک می‌باشند (مانند ۰/۳۱ و یا ۰/۶۶) تنها بخشی از آن‌ها (و با همان درصدی که در شکل مزبور دیده می‌شود) در بیلان آبی حوضه مورد نظر مشارکت می‌نمایند.

#### ۵-۲-۴- نقشه جهت جریان و شبکه آبراهه‌ها

در مدل روندیابی برای معرفی شبکه آبراهه‌ها جهت جمع‌آوری و انتقال رواناب هر کدام از سلول‌ها از شبکه جهت جریان<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. به همین منظور بایستی برای سلول‌های محاسباتی مدل VIC شبکه جهت جریان استخراج گردد. نتایج به دست آمده در این تحقیق و تحقیقات دیگر (Xie و Liang، ۲۰۰۳؛ Reed، ۲۰۰۳) نشان می‌دهد که شبکه جریان به دست آمده از این الحاقیه‌های مرسوم مانند ArchHydro و HEC-GeoHMS، در ابعاد سلولی بالا چندان مناسب نبوده و به هیچ وجه نشان دهنده شبکه جریان واقعی نمی‌باشد.

#### ۵-۲-۳- شبکه محاسباتی مدل VIC-3L

اساس مدل VIC تقسیم‌بندی حوضه آبریز به تعدادی سلول است به طوری که با استفاده از اطلاعات خاک‌شناسی و پوشش گیاهی هر سلول، بیلان انرژی و آبی هر سلول به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. طبق نظر توسعه دهندگان این مدل مناسب‌ترین ابعاد سلول جهت مدل‌سازی در حوضه‌هایی با مساحت حوضه آبریز چالوس بین ۶ تا ۲۵ کیلومتر می‌باشد. در این تحقیق با توجه به ابعاد یک کیلومتری برای پوشش گیاهی و ۰/۰۸۳۳۳ درجه برای خاک لازم است ابعاد سلول‌های محاسباتی از ۰/۰۸۳۳۳ درجه بیشتر باشد که مطابق توصیه‌ها و تجربیات موجود ابعاد سلولی ۰/۱ درجه (معادل ۱۱ کیلومتر) به عنوان نزدیک‌ترین و مناسب‌ترین ابعاد سلولی در حوضه آبریز چالوس انتخاب گردید. با توجه به این که بخشی از سلول‌های شبکه رستری تشکیل شده در مرزهای حوضه قرار می‌گیرند لازم است برای تعیین سهم سلول‌های مزبور در بیلان آبی حوضه، رستری تحت عنوان Fraction تهیه گردد (شکل (۵)).

جدول ۲- خصوصیات و پارامترهای مرتبط با بافت خاک (Rawls و همکاران، ۱۹۹۸)

بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	ظرفیت مزرعه	نقطه پژمردگی (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	تخلخل	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)	شیب منحنی مشخصه <i>b</i>
سیلتی-رسی	۱/۳۵	۰/۳۷	۰/۲۵	۰/۴۹	۲/۹۵	۹/۷۶
رس لومی	۱/۴۳	۰/۳۴	۰/۲۱	۰/۴۶	۱/۷۷	۸/۰۲
لومی	۱/۴۹	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۴۳	۱/۹۷	۵/۳
ماسه‌ای	۱/۴۹	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۴۳	۳۸/۴۱	۴/۱
ماسه رسی	۱/۵۷	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۴۱	۱/۱۹	۱۳/۰

۲) پارامتر  $D_s$ : این پارامتر به صورت کسری از پارامتر  $D_m$  که در آن دبی پایه غیرخطی شروع می‌شود، می‌باشد.

۳) پارامتر  $W_s$ : کسری از حداکثر رطوبت موجود در لایه تحتانی خاک می‌باشد که در آن دبی پایه غیر خطی رخ می‌دهد. این پارامتر مبین میزان تخلیه آب ذخیره شده در لایه سوم خاک و مشارکت آن در دبی پایه می‌باشد.

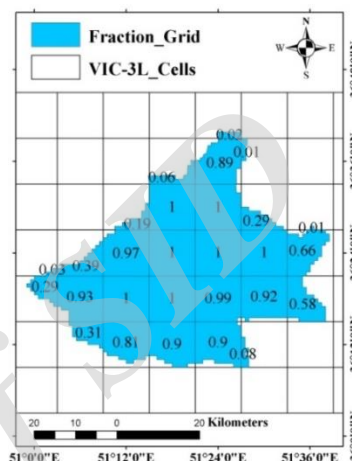
۴) پارامتر  $b_{inf}$ : این پارامتر نشان دهنده شکل منحنی ظرفیت نفوذ متغیر می‌باشد. این پارامتر کنترل کننده مقدار آبی است که می‌تواند در خاک نفوذ کند.

۵) پارامتر  $d_1, d_2, d_3$ : این پارامترها مربوط به اعماق خاک بوده و بسیاری از خروجی‌های مدل را دستخوش تغییر قرار می‌دهند.

مدل روندیابی نیز دارای پارامترهایی است که بایستی برخی از آن‌ها که از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند، در فرآیند واسنجی به دست آیند. این پارامترهای مهم عبارتند از: سرعت موج، ضریب پخشیدگی و اجزای هیدروگراف واحد. Lohmann و همکاران (۱۹۹۶) براساس تجربیاتی که در حوضه وسر<sup>۱۳</sup> در آلمان به دست آوردند محدوده مناسب برای سرعت موج و ضریب پخشیدگی را بترتیب بین ۱ تا ۳ متر بر ثانیه و ۲۰۰ تا ۴۰۰۰ متر مربع بر ثانیه پیشنهاد نموده‌اند.

### ۳- نتایج

۳-۱- شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوضه به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل VIC از داده‌های روزانه ثبت شده ایستگاه هیدرومتری پل ذغال در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۰۳ (با مقیاس زمانی روزانه) برای واسنجی و از داده‌های ثبت شده در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شکل (۷) نشان داده شده است. در جدول (۳) نیز پارامترهای بهینه به دست آمده در مرحله واسنجی ارائه شده است. همچنین در جدول (۴) نیز مقادیر شاخص‌های آماری به دست آمده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی ارائه گردیده است.



شکل ۶- شبکه Fraction حوضه چالوس

بدین منظور در این پژوهش یک الگوریتم ویژه به نام RTLS<sup>۱۱</sup> جهت استخراج شبکه جریان در ابعاد سلولی بالا توسعه داده شد است. نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم برای حوضه آبریز رودخانه چالوس در شکل (۵) نشان داده شده است.

### ۵-۲-۵- داده‌های هواشناسی

مهم‌ترین داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل VIC-3L عبارتند از: بارش روزانه (میلی‌متر)، حداقل و حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و رطوبت هوا در محدوده حوضه آبریز چالوس ۱۲ ایستگاه بارانسنجی و دو ایستگاه سینوپتیک موجود می‌باشد که از اطلاعات آن‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ جهت مدل‌سازی استفاده گردید.

### ۶-۲- واسنجی پارامترهای مدل VIC و مدل روندیابی

پارامترهای مهمی که در مدل VIC بایستی واسنجی شوند عمدتاً مربوط به پوشه<sup>۱۲</sup> خاک بوده و عبارتند از: (۱) پارامتر  $D_m$ : این پارامتر مبین حداکثر دبی پایه‌ایست که می‌تواند توسط لایه تحتانی خاک تولید شود (میلی‌متر بر روز).

11. River Tracing in Large Scale

12. Soil File

13. Weser



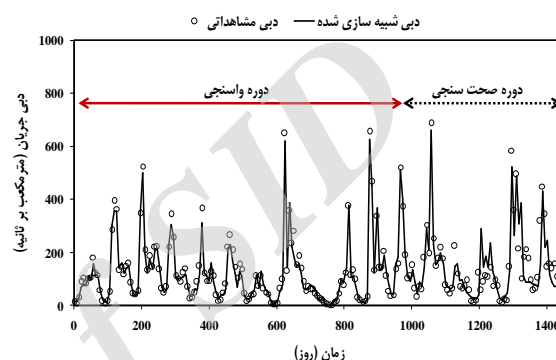
جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده مدل VIC-3L

نام پارامتر	$b_i$	$D_s$	$D_m$ (mm/hr)	$W_s$	$d_2$ (m)	$d_3$ (m)	$d1$ (m)	$C$ (m/sec)	$D$ (m <sup>2</sup> /sec)
دامنه	۰-۰/۴	۰-۱	۰-۳۰	۰-۱	۰/۱-۲/۵	۰/۱-۱/۵	۰/۰-۱/۲	۰/۵-۳	۲۰۰-۴۰۰
تغییرات									
مقدار بهینه	۰/۳۲	۰/۶	۲۲/۱	۰/۴۲	۲/۱۵	۱/۱۰	۰/۱۵	۱/۵	۸۰۰

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری در طول دوره‌های واسنجی و صحت سنجی

نام شاخص	دوره واسنجی	دوره صحت سنجی
شاخص نش- ساتکلیف	۰/۸۶	۰/۷۴
شاخص $R^2$	۰/۹۱	۰/۷۸

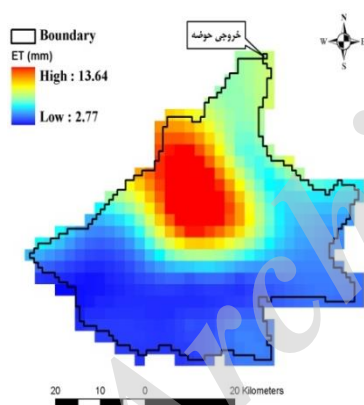
چالوس می‌باشد. حداکثر مقدار رواناب زیرسطحی شبیه‌سازی شده در ماه‌های مذکور به ترتیب معادل ۲۵/۸، ۱۱/۴ و ۵۹/۶ میلی‌متر می‌باشند. بررسی نتایج به دست آمده در مورد رطوبت خاک نیز حاکی از آن است که روند تغییرات رطوبت تقریباً متناسب با روند تغییرات رواناب زیرسطحی بوده و در غالب مناطق واقع در محدوده مرکزی حوضه دارای کمترین مقدار رطوبت می‌باشند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نیز نشان داده شده مناطق مرکزی دارای کم‌ترین و مناطق شمالی و جنوبی حوضه دارای بیش‌ترین مقادیر رطوبت می‌باشند.



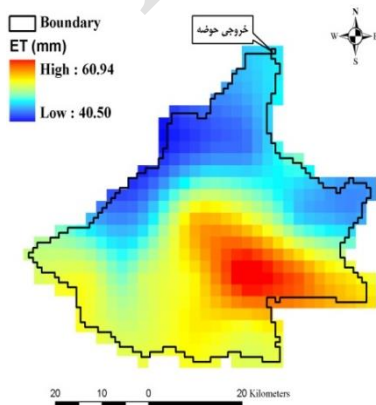
شکل ۷- هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

### ۳-۲- شبیه‌سازی اجزای بیلان آبی حوضه

در شکل‌های (۸) تا (۱۳) به ترتیب توزیع مکانی تبخیر و تعرق و رواناب زیرسطحی در ماه‌های فروردین، تیر و آبان (در طول بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۰۱) نشان داده شده است. همچنین به علت حجم بالای خروجی‌های مربوط به رطوبت خاک در لایه ۱ و برای ماه‌های مرداد، آبان و اسفند تهیه و در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) ارائه گردید. همان‌طور که در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده، حداکثر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده در ماه مرداد معادل ۶۰/۹ میلی‌متر بوده و در قسمت شمال غربی حوضه رخ داده است. این در حالی است که حداقل میزان تبخیر و تعرق در ماه مذکور معادل ۴۰/۵ میلی‌متر بوده و غالباً در مناطق جنوبی، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی حوضه (که عمدتاً شامل مناطق کوهستانی می‌باشند) رخ داده است. در کل نتایج به دست آمده حاکی از وجود تناسب قابل قبول بین توزیع مکانی تبخیر و تعرق و توزیع مکانی بارش و پوشش گیاهی در سطح حوضه می‌باشد. همچنین با توجه به شکل‌های (۱۱) تا (۱۳)، حداقل رواناب زیرسطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور و در محدوده مرکزی حوضه رخ داده است. کاهش شکل‌گیری رواناب زیرسطحی عمدتاً به واسطه کاهش بارش و مهم‌تر از همه افزایش میزان تبخیر و تعرق در مناطق مرکزی حوضه آبریز

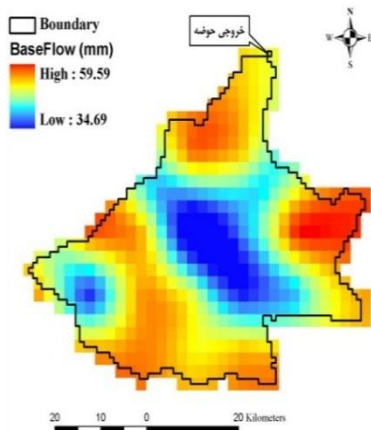


شکل ۸- توزیع مکانی تبخیر و تعرق در ماه فروردین

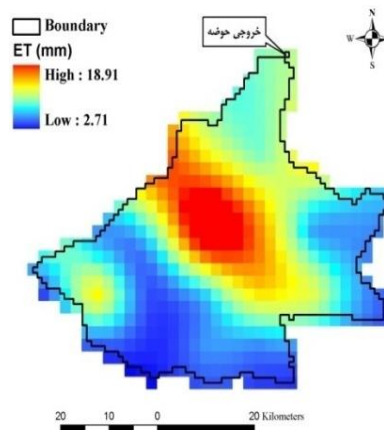


شکل ۹- توزیع مکانی تبخیر و تعرق در ماه تیر

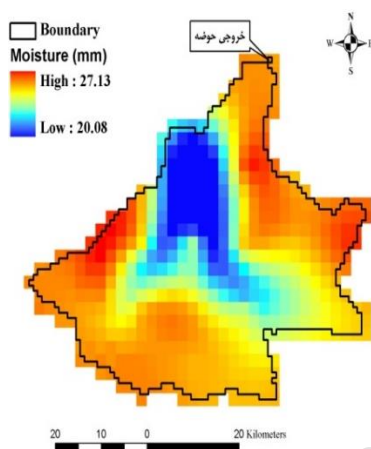




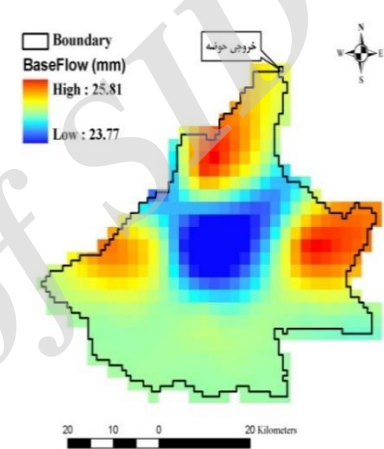
شکل ۱۳- توزیع رواناب زیر سطحی در ماه شهریور



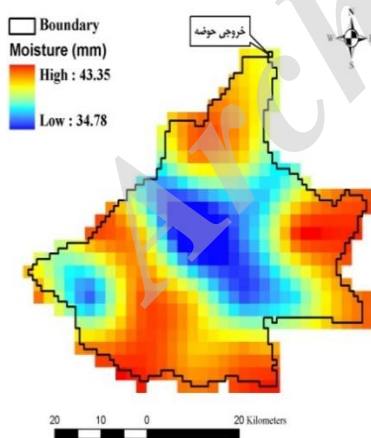
شکل ۱۰- توزیع مکانی تبخیر و تعرق در ماه آبان



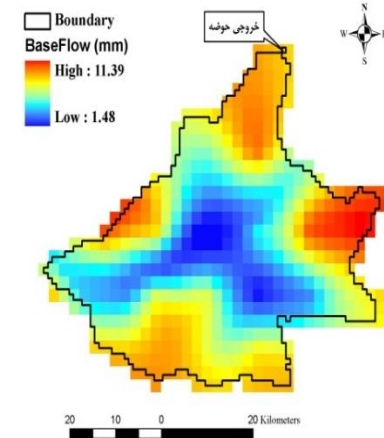
شکل ۱۴- توزیع رطوبت لایه یک- مرداد



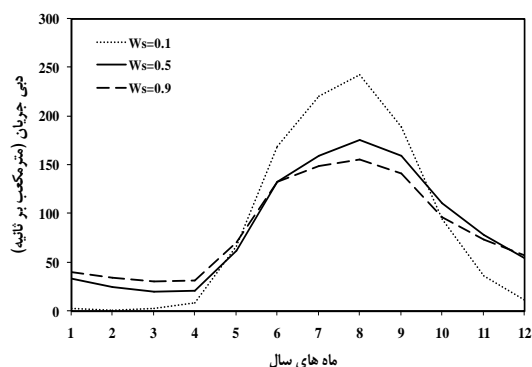
شکل ۱۱- توزیع رواناب زیر سطحی در ماه تیر



شکل ۱۵- توزیع رطوبت لایه یک- آبان



شکل ۱۲- توزیع رواناب زیر سطحی در ماه مرداد

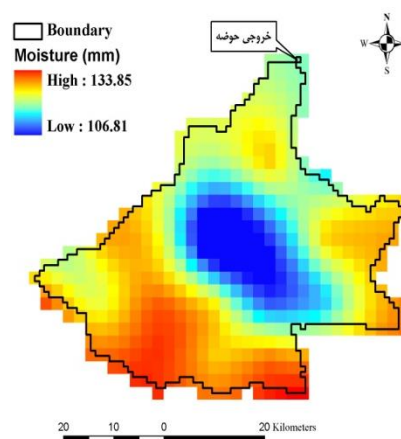


شکل ۱۷- اثر تغییر پارامتر Ws بر هیدروگراف جریان سالانه

در شکل (۱۷) نیز روند تغییرات هیدروگراف جریان سالانه خروجی از حوضه آبریز چالوس در اثر تغییر پارامتر Ws نشان داده شده است. همان طور که در شکل مزبور ملاحظه می‌شود، مقادیر بالای پارامتر Ws موجب کاهش دبی پیک و افزایش مقادیر دبی‌های حداقلی می‌گردد و این در حالی است که کاهش پارامتر مزبور موجب افزایش دبی پیک و کاهش دبی‌های حداقلی شده است.

### ۳-۳-۲- پارامترهای d2 و d3

در این تحقیق جهت بررسی اثر لایه‌های تحتانی خاک بر عملکرد مدل VIC از اعماق ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ متر برای لایه دوم (d2) و از اعماق ۰/۱، ۱ و ۲ متر برای لایه سوم (d3) استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش عمق لایه دوم خاک، متوسط دبی روزانه، ماهانه و سالانه کاهش چشمگیری داشته و این در حالی است که تغییر عمق لایه سوم خاک تأثیر چندانی معنی‌داری بر متوسط دبی در مقیاس‌های زمانی مختلف ندارد. همچنین افزایش عمق لایه دوم خاک موجب کاهش قابل توجه دبی حداکثر جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف شده است. به عنوان مثال در  $d2=2.5$  m حداکثر دبی روزانه معادل  $714/8$  متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که با مقدار به دست آمده در عمق ۰/۵ متری ( $1561/6$  متر مکعب بر ثانیه) اختلافی در حدود  $54/4$  درصد دارد، در حالی که اختلاف مزبور در لایه سوم و برای اعماق ۰/۱ و ۲ متری در حدود  $24/8$  درصد می‌باشد. افزایش عمق خاک موجب افزایش توان نگهداشت رطوبتی خاک شده و بخش عمده‌ای از بارش در خاک ذخیره و به مرور زمان در اثر نفوذ ثقلی و یا تبخیر و تعرق از خاک خارج خواهد گردید. ذکر این نکته نیز ضروری است که اثر تغییر عمق لایه دوم خاک بر حداقل مقادیر جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز بسیار بیشتر از تأثیر عمق لایه سوم خاک می‌باشد. در شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) به ترتیب اثر تغییر پارامترهای d2 و d3 بر هیدروگراف‌های جریان ماهانه و سالانه نشان داده شده است.



شکل ۱۶- توزیع رطوبت لایه یک - اسفند

### ۳-۳-۳- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل VIC-3L

یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های تحلیل حساسیت روش تغییر پارامترها به طور مستقل و بررسی تأثیر آن‌ها در نتایج خروجی مدل می‌باشد. در این روش پارامترهای مدل در دامنه تغییرات مربوط به خود تغییر داده شد و مدل مجدداً اجرا گردید. تحلیل حساسیت مربوط به هر کدام از پارامترهای مدل VIC-3L به شرح زیر می‌باشد.

#### ۳-۳-۱- پارامتر Ws

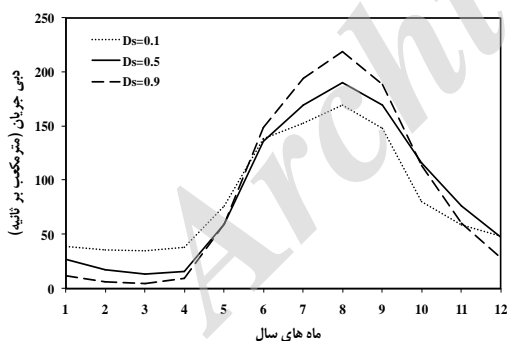
در این تحقیق جهت بررسی هرچه بهتر اثر تغییر این پارامتر بر عملکرد مدل VIC از هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در مقیاس روزانه افزایش پارامتر Ws (در محدوده بین ۰/۱ تا ۰/۹) موجب افزایش حداقل دبی و کاهش حداکثر دبی هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده، می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اثر تغییر این پارامتر تأثیر چندانی معنی‌داری بر متوسط دبی روزانه نداشته و به عبارت دیگر متوسط دبی روزانه مستقل از تغییرات پارامتر Ws می‌باشد. روند مذکور در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه نیز صادق می‌باشد تنها با این تفاوت که در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه درصد کاهش حداکثر دبی جریان در برابر افزایش مقدار پارامتر Ws زیاد می‌باشد. به عنوان مثال در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه اختلاف بین دبی حداکثر به دست آمده در  $Ws=0.1$  با مقدار بدست آمده در  $Ws=0.9$  به ترتیب معادل  $32/3$  و  $35/8$  درصد می‌باشد و این در حالی است که اختلاف مذکور در مقیاس زمانی روزانه در حدود  $15/6$  درصد می‌باشد. همچنین یک از نکات قابل توجه این است که متوسط دبی ماهانه و سالانه نیز همانند دبی متوسط روزانه مستقل از تغییرات پارامتر Ws می‌باشد.

VIC نسبت به تغییر عمق لایه دوم خاک از حساسیت بیشتری نسبت به تغییر عمق لایه سوم خاک برخوردار می‌باشد.

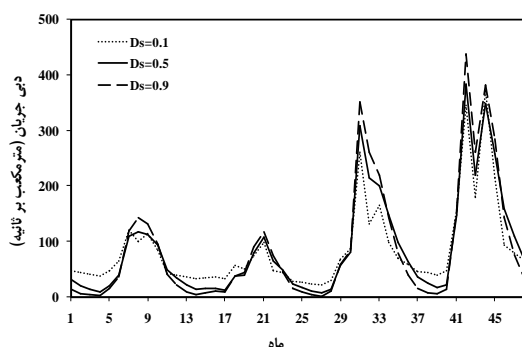
### ۳-۳-۳- پارامترهای Dm و Ds

در این تحقیق جهت بررسی اثر پارامترهای فوق بر عملکرد مدل از مقادیر ۰/۱، ۰/۵، ۰/۹ و برای پارامتر Ds و از مقادیر ۱، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر بر ساعت برای پارامتر Dm استفاده شده است (این اعداد از دامنه تغییرات هر پارامتر انتخاب شده و مبین حداقل، متوسط و حداکثر مقدار هر پارامتر می‌باشد). نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل VIC در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که افزایش پارامتر Ds نسبت به افزایش پارامتر Dm موجب کاهش بیشتر دبی پایه خواهد شد.

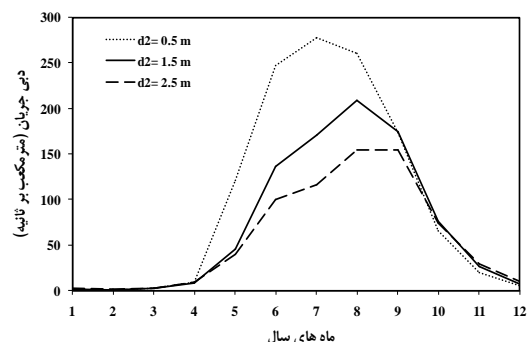
به عبارت دیگر در مقادیر پائین پارامتر Ds، دبی پایه غالب بوده و به تدریج با افزایش آن از مقادیر دبی پایه کاسته شده و بر مقادیر دبی‌های پیک جریان افزوده می‌شود. همچنین تأثیر افزایش این پارامتر بر دبی پیک هیدروگراف جریان سالانه بیشتر از مقیاس‌های زمانی دیگر می‌باشد. به عنوان مثال اختلاف بین حداکثر دبی جریان (در محدوده  $0.1 < Ds < 0.9$ ) در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه به ترتیب در حدود ۱۱/۷، ۱۷/۲ و ۲۹/۰ درصد می‌باشد. در شکل‌های شماره (۲۲) و (۲۳) که مربوط به اثر تغییر پارامتر Ds بر هیدروگراف جریان در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه می‌باشد، این مطلب به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.



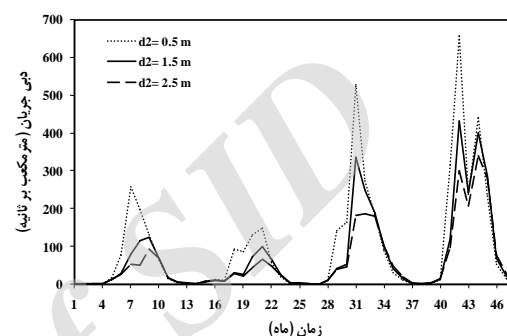
شکل ۲۲- اثر تغییر پارامتر Ds بر هیدروگراف جریان سالانه



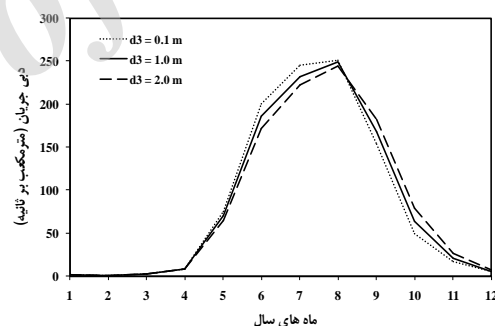
شکل ۲۳- اثر تغییر پارامتر Ds بر هیدروگراف جریان ماهانه



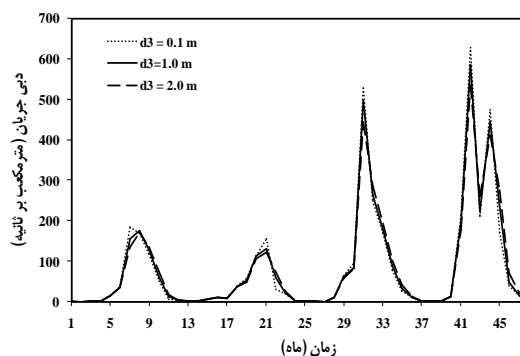
شکل ۱۸- اثر تغییر پارامتر d2 بر هیدروگراف جریان سالانه



شکل ۱۹- اثر تغییر پارامتر d2 بر هیدروگراف جریان ماهانه

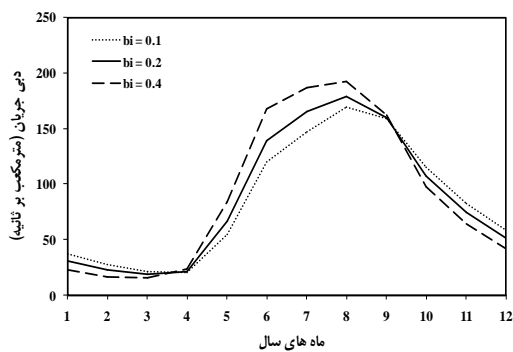
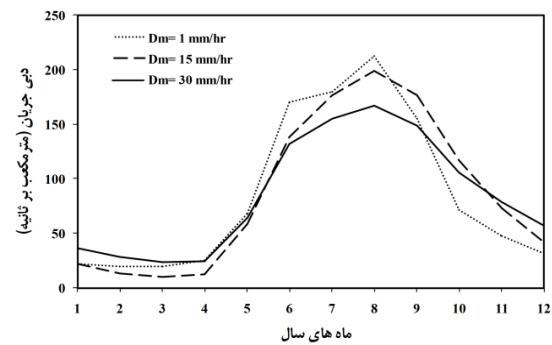
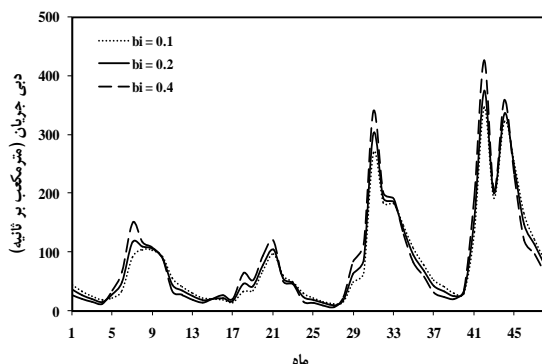
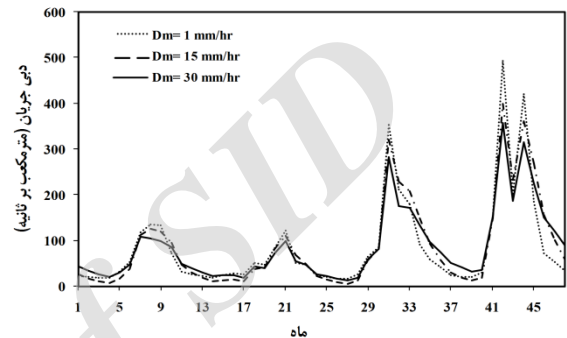


شکل ۲۰- اثر تغییر پارامتر d3 بر هیدروگراف جریان سالانه



شکل ۲۱- اثر تغییر پارامتر d3 بر هیدروگراف جریان ماهانه

همان‌طور که در این اشکال نیز نشان داده شده است، اثر تغییر عمق لایه دوم خاک بر هیدروگراف جریان بسیار بیشتر از اثر تغییر لایه سوم خاک می‌باشد. به عبارت دیگر عملکرد مدل

شکل ۲۶- اثر تغییر پارامتر  $b_i$  بر هیدروگراف جریان سالانهشکل ۲۴- اثر تغییر پارامتر  $D_m$  بر هیدروگراف جریان سالانهشکل ۲۷- اثر تغییر پارامتر  $b_i$  بر هیدروگراف جریان ماهانهشکل ۲۵- اثر تغییر پارامتر  $D_m$  بر هیدروگراف جریان ماهانه

به عنوان مثال اختلاف بین دبی‌های حداکثر در مقیاس روزانه و در محدوده  $0.4 < b_i < 0.1$ ، معادل  $8/8$  درصد و اختلاف بین دبی‌های حداقل (دبی پایه) در بازه مذکور برابر است با ۴۰ درصد. همچنین اثر تغییر این پارامتر بر متوسط دبی در مقیاس‌های زمانی مختلف تقریباً پائین بوده و می‌توان آن را مستقل از تغییرات پارامتر  $b_i$  به حساب آورد. شکل‌های (۲۶) و (۲۷) نیز به ترتیب تأثیر پارامتر  $b_i$  بر هیدروگراف جریان سالانه و ماهانه را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این اشکال نیز نشان داده شده است، مقادیر پائین پارامتر  $b_i$  تمایل به تولید دبی پایه بیشتری نسبت به مقادیر بالای این پارامتر دارند. همچنین مقادیر بالای این پارامتر موجب افزایش دبی اوج جریان‌های ماهانه و سالانه می‌گردد. همچنین لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به مدل روندیابی همانند برخی از پارامترهای فوق از تأثیر کمی بر عملکرد مدل VIC-3L در حوضه آبریز چالوس برخوردار می‌باشند و لذا از ارائه نتایج مربوط به این پارامترها صرف‌نظر گردید.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس VIC-3L در حوضه آبریز رودخانه چالوس پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از واسنجی و

دبی متوسط جریان روزانه، ماهانه و سالانه در این حالت نیز مستقل از تغییرات پارامتر  $D_s$  بوده و تقریباً تغییرات چندانی معنی‌داری در برابر تغییر این پارامتر از خود نشان نمی‌دهد. بررسی نتایج بدست آمده در مورد تأثیر پارامتر  $D_m$  بر عملکرد مدل نیز حاکی از آن است که مقادیر پائین این پارامتر موجب کاهش دبی‌های حداقلی و افزایش مقدار دبی پیک هیدروگراف جریان خواهد گردید. تغییرات دبی متوسط در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان از این مطلب دارد که دبی متوسط تقریباً مستقل از تغییرات پارامتر  $D_m$  می‌باشد و لذا چنانچه هدف مدل‌سازی برآورد متوسط دبی روزانه، ماهانه و یا سالیانه باشد، می‌توان از واسنجی این پارامتر و پارامترهای مشابه دیگر خودداری نمود. در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) تأثیر تغییر پارامتر  $D_m$  بر هیدروگراف جریان ماهانه و سالانه نشان داده شده است.

#### ۳-۳-۴- پارامتر $b_i$

در این تحقیق جهت بررسی عملکرد مدل نسبت به مقادیر مختلف این پارامتر از مقادیر  $0.1$ ،  $0.2$  و  $0.4$  استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش این پارامتر در محدوده مذکور، مقادیر دبی حداکثر هیدروگراف‌های جریان روزانه، ماهانه و سالانه افزایش نسبی پیدا می‌کنند ولی برعکس آن مقادیر دبی‌های حداقل با کاهش قابل توجهی (خصوصاً در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه) روبرو می‌شوند.

- in the Hamburg climate model", *Advances in Theoretical Hydrology*, 1992, 9, 129-157.
- Nijssen B, Lettenmaier DP, Suzanne XL, Wetzel W, Wood EF, "Stream flow simulation for continental-scale river basins", *Water Resources Research*, 1997, 33(4), 711-724.
- Wood EF, Lettenmaier DP, Liang X, Nijssen B, Wetzel SW, "Hydrological modeling of continental-scale basins", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25, 279-300.
- Wood EF, Lettenmaier DP, Zartarian VG, "A land-surface hydrology parameterization with sub grid variability for general-circulation models", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D3), 2717-2728.
- Stamm JF, Wood EF, Lettenmaier DP, "Sensitivity of a GCM simulation of global climate to the representation of land surface hydrology", *Journal of Climate*, 1994, 7(8), 1218-1239.
- Cherkauer K, Bowling LC, Lettenmaier DP, "Variable infiltration capacity cold land process model updates", *Journal of Global and Planetary Change*, 2003, 38(1-2), 151-159.
- Bowling LC, Pomeroy JW, Lettenmaier DP, "Parameterization of blowing-snow sublimation in a macroscale hydrology model", *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5, 745-762.
- Bowling LC, Lettenmaier DP, "Modeling the effects of lakes and wetlands on the water balance of Arctic environments", *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 11(2), 276-295.
- Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, Burges S, "A simple hydrologically based of land-surface water and energy fluxes for general circulation models", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7), 14415-14428.
- Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP, "Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification", *Journal of Global and Planetary Change*, 1996, 13(1-4), 195-206.
- Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, Lettenmaier DP, "Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model", *Hydrological Science Journal*, 1998, 43(1), 131-141.
- Lohmann DR, Raschke E, "A large scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes", *Tellus A*, 1996, 48, 708-721.
- Abdulla FA, Lettenmaier DP, Wood E, Smith J, "Application of a macro scale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas Red river basin", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D3), 7449-7459.
- Bowling LC, Storck P, Lettenmaier DP, "Hydrologic effects of logging in western Washington, United States", *Water Resource Research*, 2000, 36(11), 3223-3240.
- Shi XG, Wood AW, Lettenmaier DP, "How essential is hydrologic model calibration to seasonal stream flow forecasting", *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(6), 1350-1363.
- Su FG, Adam JC, Bowling LC, Lettenmaier DP, "Stream flow simulations of the terrestrial Arctic domain", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D12), 4107-4116.
- صحت‌سنجی مدل در حوضه مطالعاتی و در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۰۱ حاکی از آن است که این مدل از توانایی بسیار مناسبی جهت شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوضه و دیگر اجزای بیلان آبی برخوردار می‌باشد.
- در مرحله واسنجی، شاخص‌های آماری نش- ساتکلیف و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) به ترتیب معادل ۰/۸۶ و ۰/۹۱ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب معادل ۰/۷۴ و ۰/۷۸ به دست آمدند. پس از مدل‌سازی جریان رودخانه‌ای و دیگر اجزای بیلان آبی حوضه، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه) نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل VIC نسبت به تغییر هر کدام از پارامترها حساسیت متفاوتی از خود نشان می‌دهد. چنانچه خروجی‌های مورد استفاده جهت تحلیل حساسیت مدل را به سه دسته حداقل دبی جریان (دبی پایه)، متوسط دبی جریان و حداکثر دبی جریان تقسیم کنیم، ترتیب تأثیرگذاری پارامترهای مدل VIC را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:
- الف) حداقل دبی جریان: چنانچه هدف مدل‌سازی جریان-های حداقل (دبی پایه) باشد، ترتیب تأثیرگذاری پارامترها عبارت است از:  $Ws$ ،  $d2$ ،  $DS$ ،  $Dm$ ،  $bi$  و  $d3$ . به عبارت بهتر پارامتر  $Ws$  و پارامتر  $d3$  به ترتیب بیش‌ترین و کمترین تأثیر را بر عملکرد مدل دارند.
- ب) متوسط دبی جریان: چنانچه هدف مدل‌سازی متوسط دبی جریان باشد (در مقیاس‌های زمانی مختلف)، ترتیب تأثیرگذاری پارامترها عبارت است از:  $d2$ ،  $bi$ ،  $Ws$ ،  $Ds$ ،  $Dm$  و  $d3$ .
- ج) حداکثر دبی جریان: چنانچه هدف مدل‌سازی به دست آوردن دبی‌های حداکثری هیدروگراف جریان باشد، ترتیب تأثیرگذاری پارامترها عبارت است از:  $d2$ ،  $Ws$ ،  $Ds$ ،  $Dm$ ،  $d3$  و  $bi$ .
- در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین بیان نمود که پارامترهای  $d2$ ،  $Ws$  و  $Ds$  دارای بیش‌ترین تأثیرگذاری بر عملکرد مدل VIC-3L بوده و پارامترهای دیگر از تأثیرگذاری کم-تری برخوردار می‌باشند و می‌توان از آن‌ها در زمان واسنجی مدل صرف‌نظر نمود. لذا توصیه می‌گردد به هنگام استفاده از این مدل در مدل‌سازی بارش- رواناب حوضه‌های آبریز، نسبت به برآورد مناسب این پارامترها دقت لازم به عمل آید.

##### ۵- مراجع

- Russell GL, Miller JR, "Global river runoff calculated from a global atmosphere general circulation model", *Journal of Hydrology*, 1990, 155, 337-352.
- Dumenil L, Todini E, "A rainfall-runoff scheme for use

- 447-468.
- Ray RL, Beighley RE, "Linking HRR model with VIC-3L hydrologic model for flow routing in the Susquehanna River basin", *American Geophysical Union*, 2009, 11, 1-14.
- Franchini M, Pacciani M, "Comparative analysis of several conceptual rainfall runoff models", *Journal of Hydrology*, 1991, 122(1-4), 161-219.
- Andreadis K, Storck P, Lettenmaier DP, "Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments", *Water Resources Research*, 2009, 45(5), W05429.
- Cherkauer KA, Lettenmaier DP, "Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi river basin", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D16), 19599-19610.
- Zhao RJ, Zhuang YL, Fang LR, Liu XR, Zhang QS, "The Xinanjiang model, hydrological forecasting", *Proceedings oxford symposium IASH*, 1980, 129, 351-356.
- Mahrt L, Pan H, "A 2-Layer model of soil hydrology", *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 29(1), 1-20.
- Reed SM, "Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4km) gridded hydrologic modeling", *Water Resources Research*, 2003, 39(9), 1-11.
- Gao H, Shi Q, Zhu CH, Bohn T, Su F, Sheffield J, Lettenmaier DP, Wood EF, "Water budget record from variable infiltration capacity (VIC) model algorithm theoretical basis document", *University of Washington*, 2009, Department of Civil and Environmental Engineering, First Report.
- Rawls WJ, Gimenez D, Grossman R, "Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1998, 41(4), 983-988.
- Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110, D08112.
- Su FG, Adam JC, Trenberth KE, Lettenmaier DP, "Evaluation of surface water fluxes of the pan-Arctic land region with a land surface model and ERA-40 reanalysis", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D5), 1-46.
- Zhu CM, Lettenmaier DP, "Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico 1925-2004", *Journal of Climate*, 2007, 20(9), 1936-1946.
- Bohn T, Vivoni E, "Process-based characterization of evapotranspiration sources over the North American monsoon region", *Water Resource Research*, 2016, 52(1), 358-384.
- Nijssen B, O'Donnell GM, Lettenmaier DP, Lohmann D, Wood EF, "Predicting the discharge of global river", *Journal of Climate*, 2001, 14, 3307-3323.
- Liang X, Xie Z, "important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater", *Journal of Global and Planetary Change*, 2003, 38, 101-114.
- Tong K, Su F, Yang D, Hao Z, "Evaluation of satellite precipitation retrievals and their potential utilities in hydrologic modeling over the Tibetan Plateau", *Journal of Hydrology*, 2014, 519, 432-437.
- Zhou S, Liang X, Chen J, Gong P, "An assessment of the VIC-3L hydrological model for the Yangtze River basin based on remote sensing: a case study of the baohe river basin", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(5), 840-853.
- Xie ZH, Yuan F, Duan Q, Liang M, Chen F, "Regional parameter estimation of the VIC land surface model: methodology and application to river basins", *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(3),