

## نقش برف در رواناب رودخانه کارون بر اساس مدل مفهومی مخزنی

حمیدرضا اسلامی - مدیر بخش تحقیق و توسعه مهندسی مشاور جاماب - eslami@wrmss.com

### ۱- چکیده

در این تحقیق بر اساس مفروضات یک مدل مفهومی بارش - رواناب از نوع چهار مخزنی سعی شده تا اثر ذخیره و ذوب برف در رواناب مشاهده ای در محل احداث سد کارون ۴ که پس از نقطه تلاقی دو رودخانه ارمند و بازفت قرار دارد، مورد بررسی قرار گیرد. ابتدا مشخصات فیزیکی محدوده مطالعاتی به مساحت ۱۲۸۷۵ کیلومترمربع ارائه می‌گردد. در ادامه ساختار مدل مفهومی با چهار مخزن و روش استفاده شده در واسنجی خودکار پارامترهای مدل بطور اختصار اشاره می‌گردد. در میانه به شرح جزئیات مخزن برف و پارامترهای مربوطه پرداخته می‌شود و در پایان نتایج حاصله واسنجی و اعتبارسنجی مدل و نقش برف در رواناب روزانه شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای کنترل نتایج ذخیره برخی در لایه‌های ارتفاعی مختلف از تصویر پوشش برف تهیه شده بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای NOAA به روش آستانه‌ای نیز استفاده شده است.

### ۲- مقدمه

مطالبی که در این مقاله ارائه شده همانطور که در عنوان مقاله نیز پیداست بر اساس مفاهیم مدل مخزنی NAM (Henrik M, ۲۰۰۰) می‌باشد. نقطه قوت مطالب ارائه شده نتایج خوبی است که در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی پارامترهای مدل به دست آمده و آن نیز نتیجه روش می‌باشد که تحقیق برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل استفاده کرده‌اند با نام SCE (اسلامی و همکاران ۱۳۸۲). در سال‌های اخیر شاهد سیلاب‌های بزرگی در سرشاخه‌های رودخانه کارون بوده‌ایم که کمتر نظیر آن را با توجه به پیک و تعدد تکرار آن را در سال‌های گذشته شاهد بودیم. عمدتاً این سیلاب‌ها به دلیل شرایط فصلی در زمانی بوده که برف ذخیره در حوزه آبریز قابل توجه بوده و عنوان سیلابی‌های تلفیقی بارش و ذوب برف را به خود گرفته‌اند. در این مقاله سعی شده بر اساس مدل مفهومی مخزنی اثر برف در رواناب روزانه مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوزه آبریز بالادست محل احداث سد کارون ۴ در استان چهارمحال بختیاری می‌باشد. محدوده مورد مطالعه و نقشه مدل نقطه ای ارتفاعی که در شکل (۱) نشان داده شده (اسلامی ۱۳۸۴). در شمال غرب حوزه مناطق کوهستانی بازفت و کوه‌رنگ می‌باشد که

عمده برف حوزه در این مناطق ذخیره می‌گردد. مدل نقطه ای ارتفاعی از خطوط توپوگرافی ۱۰۰ متری نقشه های با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ تهیه شده است. براساس مدل نقطه ای ارتفاعی تهیه شده محدوده ۱۲۸۷۵ کیلومتر مربعی دارای متوسط ارتفاعی ۲۸۰۰ متر از سطح دریا میباشد. برای مدل سازی ذخیره و ذوب برف منطقه مورد مطالعه به بیست رده ارتفاعی مساوی تقسیم شده که جزئیات آنرا در جدول (۱) مشاهده میکنید.



شکل (۱): نقشه مرز حوزه ، رودخانه و مدل نقطه ای ارتفاعی محدوده مطالعاتی

جدول (۱): ارتفاع متوسط ، فراوانی و مساحت تجمعی رده های ارتفاعی بی‌ستگانه

ردیف	ارتفاع متوسط (متر)	فراوانی جزئی (درصد)	فراوانی تجمعی (درصد)	مساحت تجمعی (کیلومتر مربع)	ردیف	ارتفاع متوسط (متر)	فراوانی جزئی (درصد)	فراوانی تجمعی (درصد)	مساحت تجمعی (کیلومتر مربع)
۱	۱۰۳۴	۰.۶۰	۰.۶	۷۷	۱۱	۲۶۳۳	۱۱.۱۸	۸۲.۰	۱۰۵۵۲
۲	۱۱۸۵	۰.۵۰	۱.۱	۱۴۱	۱۲	۲۷۹۱	۶.۵۷	۸۸.۵	۱۱۳۹۸
۳	۱۳۵۹	۱.۳۶	۲.۵	۳۱۶	۱۳	۲۹۴۷	۴.۳۶	۹۲.۹	۱۱۹۶۰
۴	۱۵۱۲	۲.۴۴	۴.۹	۶۳۱	۱۴	۳۱۱۲	۲.۷۳	۹۵.۶	۱۲۳۱۱
۵	۱۶۷۱	۳.۶۱	۸.۵	۱۰۹۶	۱۵	۳۲۷۰	۱.۶۴	۹۷.۳	۱۲۵۲۲
۶	۱۸۳۴	۵.۳۵	۱۳.۹	۱۷۸۵	۱۶	۳۴۳۵	۱.۱۷	۹۸.۴	۱۲۶۷۳
۷	۱۹۸۹	۴.۴۸	۱۸.۳	۲۳۶۲	۱۷	۳۵۹۸	۰.۶۷	۹۹.۱	۱۲۷۵۹
۸	۲۱۴۸	۱۸.۲۹	۳۶.۶	۴۷۱۷	۱۸	۳۷۴۲	۰.۵۰	۹۹.۶	۱۲۸۲۴
۹	۲۳۱۲	۱۸.۹۵	۵۵.۶	۷۱۵۷	۱۹	۳۹۰۷	۰.۲۸	۹۹.۹	۱۲۸۶۰
۱۰	۲۴۶۳	۱۵.۱۹	۷۰.۸	۹۱۱۳	۲۰	۴۰۲۹	۰.۱۲	۱۰۰.۰	۱۲۸۷۵

## ۴ - ساختار حاکم بر مدل بارش - رواناب

مبانی و دیدگاه عمومی حاکم بر این مدل براساس روش مدل ذخیره‌ای NAM می‌باشد. براساس این مدل یک حوزه آبریز از لحاظ چرخه هیدرولوژیکی به صورت کمی شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن میزان ذخیره آب در سه لایه مختلف حوزه که با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، در بازه‌های اصلی مشخص شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. این مدل به صورت صفریعدی (Lumped) عمل نموده و پارامترهای آن معرف مقادیر میانگین برای کل حوزه می‌باشند. ساختار کلی مدل از ارتباط بین ۴ مخزن ذخیره‌ای و سه جریان مختلف تشکیل شده. این ۴ مخزن ذخیره‌ای عبارتند از: ۱- مخزن برف؛ ۲- مخزن لایه سطحی خاک؛ ۳- مخزن لایه زیرین خاک و ۴- مخزن آب زیرزمینی و سه جریان خروجی از این مدل عبارتند از ۱- جریان سطحی (QOF)، ۲- جریان زیر سطحی (QIF) و ۳- جریان آب زیرزمینی (QBF). به طور کلی داده‌های مورد نیاز مدل شامل بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل و دما؛ خروجی برنامه شامل جریان خروجی از حوزه به صورت سری زمانی است.

## ۵- مشروح مخزن ذخیره برف

در این بخش به مشروح خصوصیات پارامترهای مرتبط با مخزن برف پرداخته می‌شود. همانطور که در ابتدا اشاره شده با استفاده از مدل نقطه‌ای ارتفاعی، حوزه آبریز از نقطه نظر ارتفاع، به بیست رده ارتفاعی با فواصل مساوی و مساحت‌های متفاوت تقسیم گردید. این تقسیم‌بندی به دلیل دمای متفاوت مناطق مختلف می‌باشد که در این مدل تابعی از ارتفاع فرض شده و با ضریب گرادیان ارتفاعی TLPS تعریف می‌شود. این ضریب در تابع محاسبه درجه حرارت از ارتفاع استفاده شده به شرح زیر:

$$T_z = T_{ref} - TLPS (E_z - E_{ref}) \quad (1)$$

$E_z$ : ارتفاع متوسط رده ارتفاعی،  $E_{ref}$ : ارتفاع ایستگاه اندازه‌گیری مبنای درجه حرارت

$TLPS$ : ضریب گرادیان ارتفاعی،  $T_{ref}$ : درجه حرارت مشاهده شده در ایستگاه مبنای

$T_z$ : درجه حرارت محاسبه شده در رده ارتفاعی

درجه حرارت محاسبه شده رده ارتفاعی از معادله (۱) در مواقع ذخیره برف و ذوب برف مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامتر دوم در جداسازی بارش به پدیده برف و باران کمک می‌کند. دمای آستانه جداسازی باران و برف می‌باشد که از این پس TSSR نامیده می‌شود. پارامتر دیگری که در هنگام ذوب برف از روش درجه روز مورد استفاده قرار می‌گیرد ضریب درجه روز می‌باشد که DDF

نامیده می‌شود. معادله محاسبه ذوب برف در روز از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. دمای آستانه ذوب برف در مدل حاضر صفر درجه سانتیگراد فرض شده است.

$$Q_s = \begin{cases} DDF(T - T_0), & T > T_0 \\ 0 & T < T_0 \end{cases} \quad (2)$$

پارامتر دیگری که به ذخیره و ذوب برف در رده‌های ارتفاعی مختلف ارتباط دارد گرادیان ارتفاعی بارش می‌باشد که از این پس PLPS نامیده می‌شود. معادله (۳) ارتباط مقدار بارش در رده‌های ارتفاعی مختلف با بارش متوسط حوزه را نشان می‌دهد.

$$Pz = \text{Pave} + (\text{Ez} - \text{Eave}) * \text{PLPS} * \text{Pave} \quad (3)$$

برخلاف دما رابطه تغییرات بارش بطور معمول بصورت نسبی در مدل‌ها منظور می‌شود یعنی اینکه با افزایش ارتفاع معین درصد معینی از بارش مشاهده شده به مقدار بارش مشاهده شده اضافه می‌گردد. همانطور که در معادله (۳) مشاهده می‌گردد مقادیر Pave نیز در مقدار PLPS ضرب می‌شود.

## ۶- واسنجی خودکار پارامترهای مدل - الگوریتم SCE

مراحل انجام کار واسنجی خودکار متکی روش (Shuffled Complex Evolution) در شکل (۲) نشان داده شده (Sorooshian, ۱۹۹۲). در ادامه بطور اختصار شرح مراحل انجام کار آورده شده است.

۱- ایجاد یک نمونه تصادفی در فضای موجه که دارای S نقطه است و به دست آوردن مقدار تابع در هر کدام از نقاط.

۲- مرتب سازی نقاط به صورت صعودی.

۳- تقسیم بندی نقاط S به P جامعه طوری که هر جامعه دارای m عضو باشد. در واقع S را به جوامع  $A_1, A_2, \dots, A_P$  که هر کدام دارای m عضو هستند تبدیل کنید. یعنی

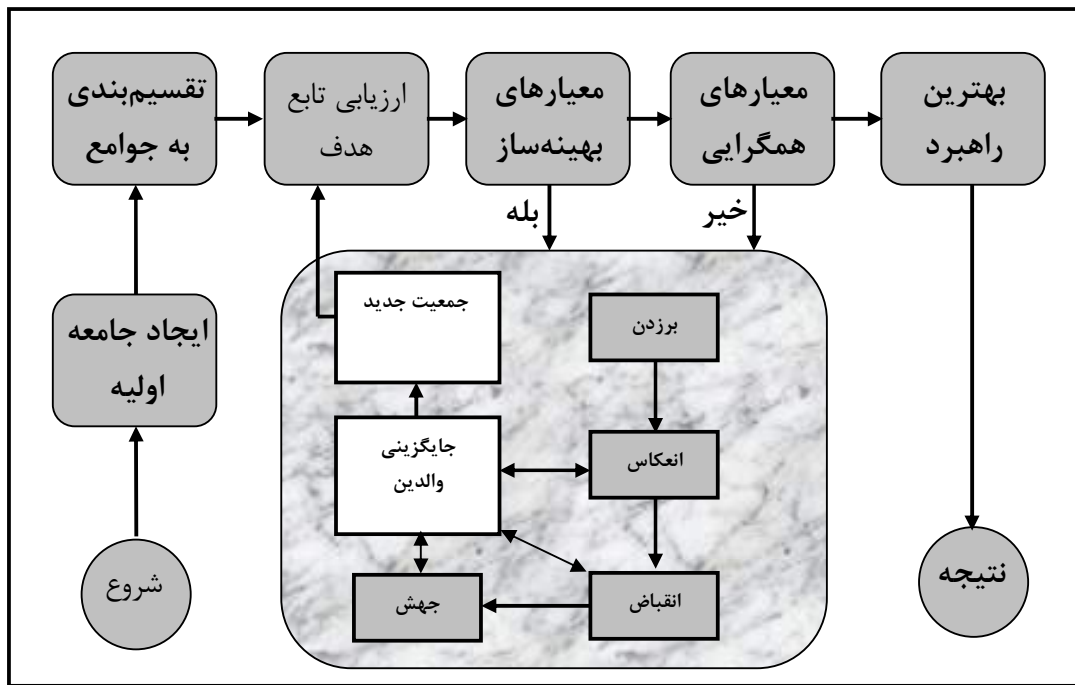
$$A^x = \{X_j^x, f_j^x | X_j^x = X_{x+P(j-1)}, f_j^x = f_{x+P(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$$

۴- توسعه هر جامعه  $A_k, k=1, 2, \dots, p$  را براساس الگوریتم تکامل رقابتی (CCE).

۵- اختلاط جوامع: جوامع  $A_1, A_2, \dots, A_P$  را دوباره اختلاط کرده طوری که  $D = \{A^x, x=1, 2, \dots, P\}$  و مرتب کردن صعودی D براساس مقادیر تابع هدف.

۶- در صورت ارضای هر کدام از معیارهای همگرایی، توقف برنامه.

۷- در صورت عدم ارضای همگرایی دوباره به مرحله ۳ برگشته و محاسبات را انجام دهید



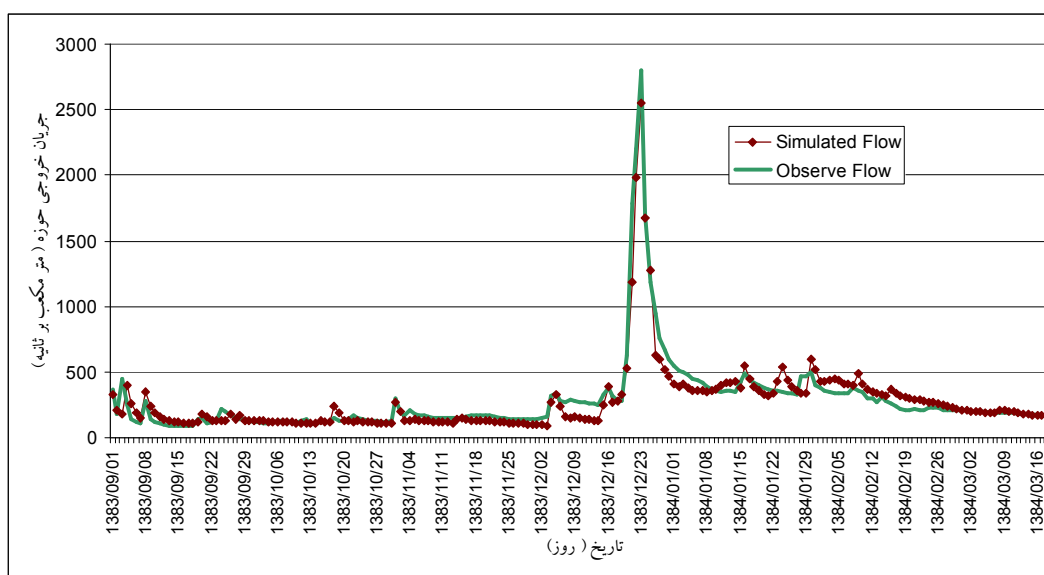
شکل (۲): ساختار مراحل انجام واسنجی خودکار روش SCE

## ۷- واسنجی و اعتبارسنجی پارامترهای مدل

با توجه به وسعت حوزه و عدم وجود اطلاعات کافی از اطلاعات هواشناسی عملیات بدست آوردن پارامترهای مناسب برای مدل با وجود داده مشاهدات جریان خروجی امری بسیار مشکل می‌نماید. همانطور که در بخش قبلی مقاله شرح داده شد، برای واسنجی پارامترهای مدل از یک تکنیک کارآمد در واسنجی پارامترهای مدل استفاده شده و در مجموع ۱۵ پارامتر به شرح: ۹ پارامتر مربوط به مدل NAM؛ ۲ پارامتر مربوط به وزن ایستگاه باران سنجی و تبخیرسنجی استفاده شده و ۴ پارامتر مربوط به مدل ذخیره و ذوب برف به همراه گرادیان ارتفاعی باران بطور همزمان برای یک دوره هفت ساله شامل سالهای ۷۴-۱۳۷۴ لغایت ۸۱-۱۳۸۰ واسنجی گردید. اجرای برنامه واسنجی خودکار از روش اشاره شده بر روی یک کامپیوتر P4-3GHz مدت سیزده ساعت بطول انجامید. برای اعتبارسنجی پارامترهای بدست آمده یک دوره سه ساله شامل سالهای ۸۲-۱۳۸۱ لغایت ۸۴-۱۳۸۳ انتخاب گردید. نتایج معیارهای ارزیابی (Liong, ۲۰۰۴) برای هر دو دوره واسنجی و اعتبار در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید برای هر دو دوره معیار راندمان مدل از مرز مورد قبول ۰/۷۵ بالاتر می‌باشد. نمودار جریان خروجی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را مربوط به سال ۱۳۸۴ برای دوره تر ابتدای آذر لغایت انتهای خرداد را در شکل (۳) مشاهده می‌کنید.

جدول (۲): مقادیر خطای محاسبه شده در واسنجی، اعتبارسنجی پارامترهای مدل

ردیف	شرح خطا	مخفف	واسنجی	اعتبارسنجی
۱	میانگین خطای نرمال شده	NME	۰.۰۷	۰.۱۲
۲	راندمان مدل	MEFF	۰.۷۴	۰.۷۶
۳	میانگین ریشه مجموع مربعات خطای نرمال شده	NRMSE	۰.۵۶	۰.۵۶



شکل (۳): مقایسه جریان شبیه سازی شده و مشاهده ای در دوره اعتبارسنجی مدل

با توجه به اینکه سال مورد نظر در دوره اعتبارسنجی قرار گرفته نتایج نشان می‌دهد که مدل در حد قابل قبولی توانسته سیلاب اسفند ۱۳۸۴ را شبیه‌سازی نماید. با استفاده از برنامه واسنجی خودکار در چندین تکرار می‌توان ارزش وزنی اطلاعات مشاهده‌ای هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه را مورد تحلیل قرار داد. پس از انجام این عمل از بین اطلاعات مشاهده‌ای ایستگاه‌های شهرکرد، کوهرنگ، بروجن و لردگان ایستگاه سینوپتیک کوهرنگ با بالاترین وزن انتخاب گردید. در این مدل از اطلاعات بارش، دما و تبخیر ایستگاه سینوپتیک کوهرنگ با ارتفاع ۲۲۸۵ متر استفاد شده، نتیجه مقادیر پارامترهای واسنجی شده مرتبط با ذخیره و ذوب برف به شرح زیر می‌باشد:

۱- درجه حرارت آستانه جداسازی بارش و برف TSSR برابر ۱/۱ درجه سانتیگراد

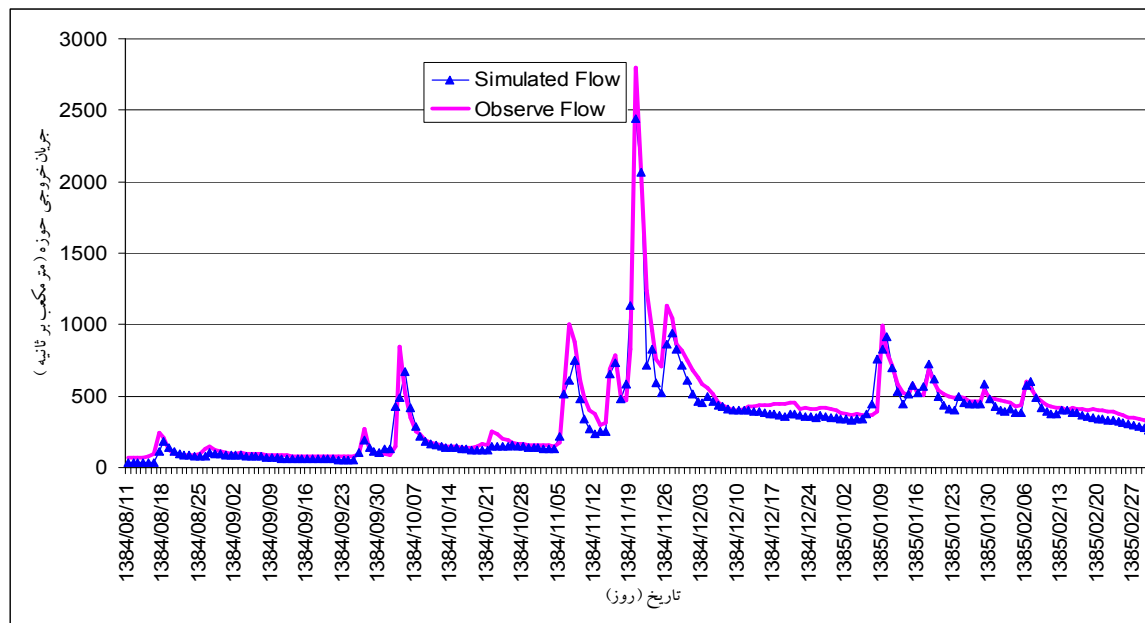
۲- گرایان ارتفاعی دما TLPS برابر ۰/۴۵ درجه سانتیگراد در هر ۱۰۰ متر.

۳- ضریب ذوب برف در معادله درجه روز DDF برابر  $2/24$  میلیمتر به ازای هر درجه سانتیگراد بالای صفر.

۴- گرادیان ارتفاعی بارش PLPS برابر  $3/5$  درصد افزایش ازای هر  $100$  متر می‌باشد.

## ۸- نتایج شبیه سازی

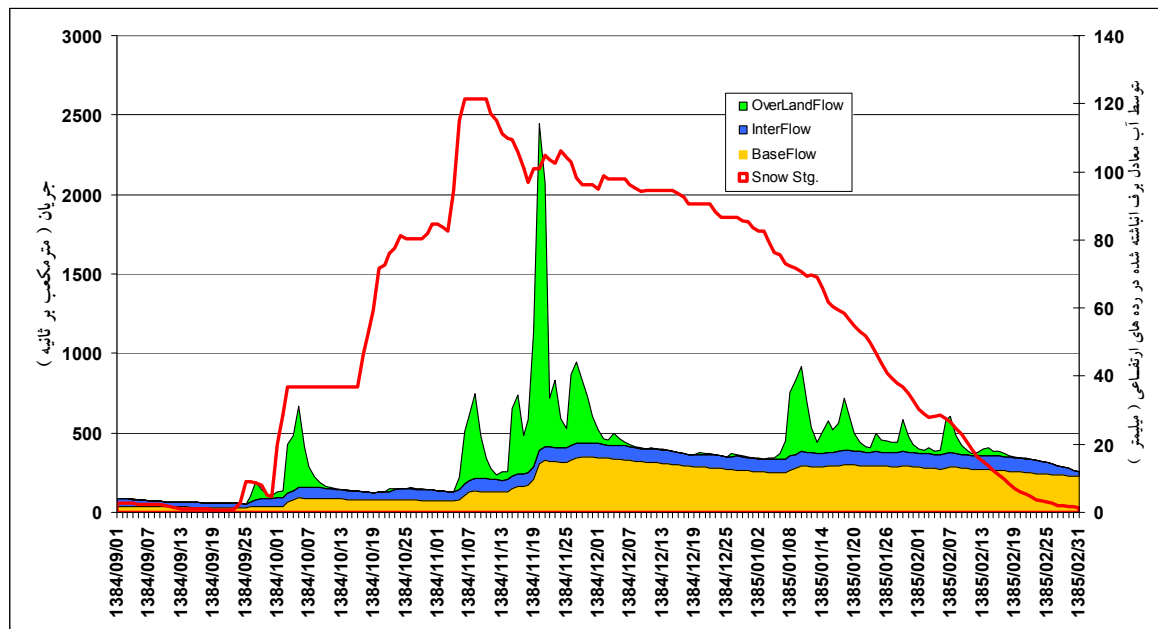
نتایج ارائه شده در این بخش عمدتاً مربوط به دوره تر سال آبی  $1384-85$  می‌باشد که شامل ابتدای آذرماه لغایت پایان اردیبهشت ماه می‌گردد. در ابتدا در شکل (۴) مقایسه جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل را برای دوره زمانی فوق مشاهده می‌کنید. لازم به ذکر است که مقادیر مشاهده‌ای خود نیز به دلیل نهایبی نشدن منحنی‌های دبی - اشل ممکن است اندکی خطا داشته باشد.



شکل (۴): مقایسه جریان شبیه سازی شده مدل و مشاهده ای در سال آبی  $1384-85$

همان طور که در ابتدای مقاله در ساختار مدل بارش - رواناب اشاره شد. جریان خروجی حوزه را جمع سه جریان سطحی QOF، جریان زیرسطحی QIF و جریان آب زیرزمینی QBF تشکیل می‌دهند. نمودار تغییرات تجمعی این جریان‌ها و میزان آب معادل برف ذخیره به میلیمتر بارش منظور شده در مدل را در شکل (۵) مشاهده می‌کنید. میزان سهم هر جریان در جریان خروجی حوزه در دوره موردنظر برای QOF و QIF و QBF به ترتیب  $28$  و  $19$  و  $52$  درصد می‌باشد. نکته مهم در نتایج حاصل شده با توجه به مفاهیم مدل مخزنی این می‌باشد که در فصل مورد بررسی با توجه به پایین بودن مقدار تبخیر و تغذیه دائمی مخزن جریان سطحی و جریان زیرسطحی از مخزن

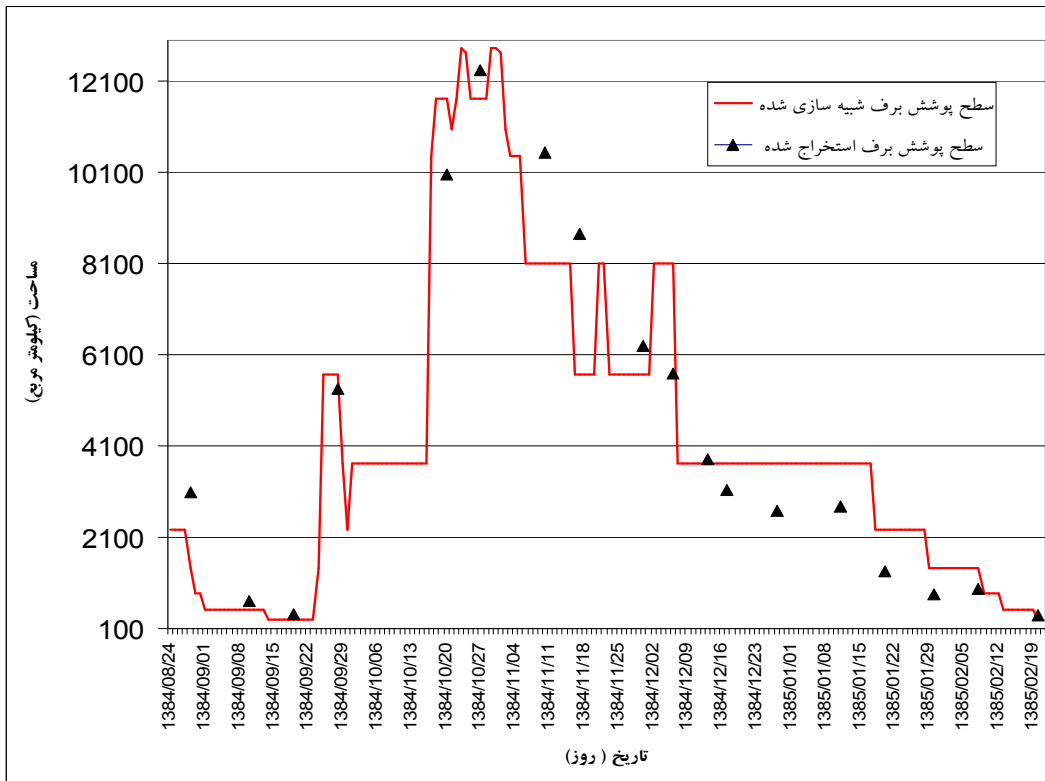
برف میزان حجم ذخیره در این مخازن عمدتاً حداکثر ظرفیت و نزدیک به حداکثر ظرفیت بوده و با آغاز بارش به صورت باران طبق فرمول‌بندی مدل تماماً به رواناب تبدیل شده و فقط قاعده روندیابی مخزن خطی بر روند صعود و نزول جریان رواناب حاکم است.



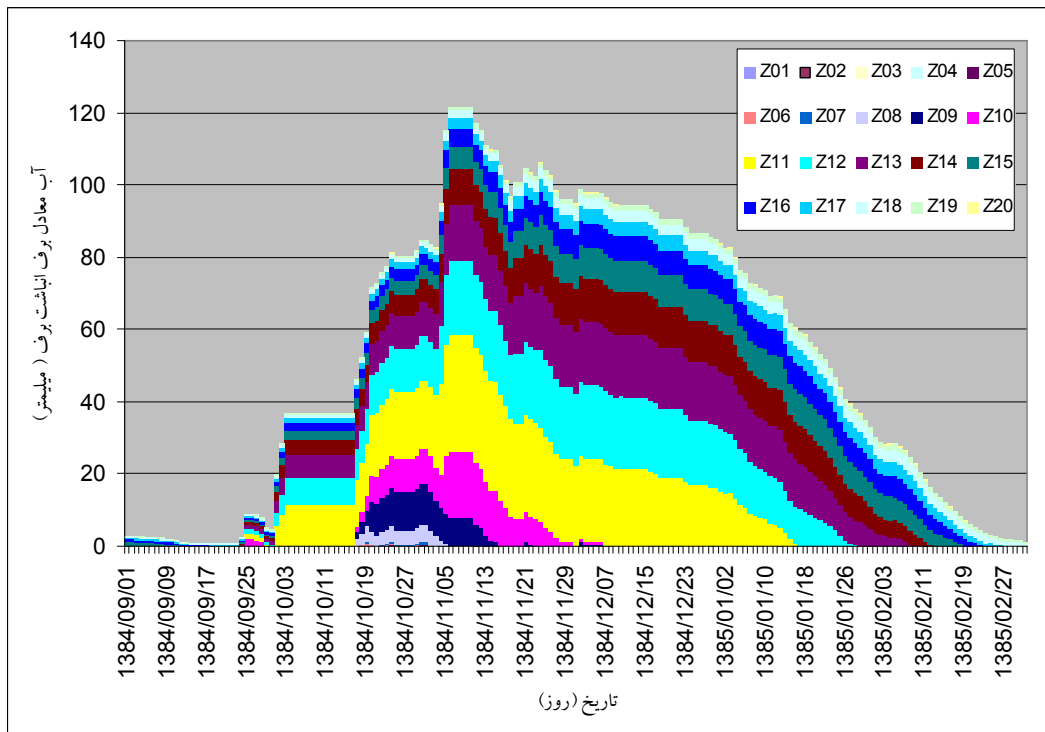
شکل (۵): جریانهای سه گانه مدل و مقدار آب معادل برف انباشته شبیه سازی شده مدل

نتایجی که از تغییرات ذخیره مخازن بیست گانه برف حاصل شده بسیار بااهمیت می‌نماید زیرا اطلاعات زمینی از رده‌های ارتفاعی که بالاتر از ایستگاه کوه‌رنگ (۲۲۸۵ متری) قرار گرفته و ۶۳ درصد مساحت حوزه را تشکیل می‌دهند بسیار اندک می‌باشد. در شکل (۶) مقایسه مساحت سطح پوشش برف مشاهده‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA در فواصل ده روزه و مساحت سطح پوشش برف شبیه‌سازی شده را مشاهده می‌کنید. با توجه به محدودیت‌های روزهای ابری در تهیه سطح پوشش برف از تصاویر ماهواره‌ای مشاهده می‌شود که مقادیر مساحت سطح پوشش برف شبیه سازی شده و استخراج شده، به هم نزدیک می‌باشد؛ که خود نشان از صحت کارکرد مدل می‌باشد. شکستگی در منحنی سطح پوشش برف شبیه سازی شده به دلیل رده بندی بیستگانه ارتفاعی می‌باشد. در شکل (۷) میزان ذخیره برف شبیه‌سازی شده در رده‌های ارتفاعی مختلف را مشاهده می‌کنید که این نمودار برای بررسی اهمیت هر یک از رده‌های ارتفاعی با توجه به مساحت خود مفید می‌باشد. کدهای استفاده شده برای رده‌های ارتفاعی، در بخش مشخصات منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.





شکل (۶): مقایسه سطح پوشش برف شبیه سازی شده و استخراج شده از تصاویر ماهواره ای



شکل (۷): درصد مشارکت هریک از رده های ارتفاعی شبیه سازی شده در انباشت برف

## ۹- نتیجه گیری و پیشنهادات

در مراحل انجام تحقیق مواردی مشاهده شد که در این بخش به عنوان پیشنهاد ارائه میگردد؛ تا در انجام تحقیق‌های بعدی در نظر گرفته شود. اولین مورد مسئله‌ای است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از هیدرولوژیست‌ها را به خود جلب کرده، توجه به مقیاس‌ها و اندازه‌ها انتخاب یک حوزه با وسعت حدود ۱۳۰۰۰ کیلومترمربع برای مدل‌های یک بعدی مناسب نمی‌باشد و در صورت وجود اطلاعات هواشناسی مناسب منطقه مورد مطالعه باید به حوزه‌های مناسب کوچکتری تقسیم‌بندی گردد. با توجه به وابستگی زیاد ذخیره و ذوب برف به درجه حرارت محیط و تخمین آن از روش گرادیان ارتفاعی توصیه می‌گردد برای شرایط خشک و تر به طور جداگانه روابط تعریف شود و در مدل منظور شود. در صورت وجود ایستگاه مناسب در رده‌های ارتفاعی مختلف از حداقل دو تا سه ایستگاه به عنوان دمای مبنا استفاده شود. در حوزه‌های با مساحت کم از تصاویر ماهواره‌ای MODIS که دقت جزء تصاویر آن بیشتر است، استفاده شود.

## ۱۰- تشکر و قدردانی

در اینجا جا دارد از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، طرح سد و نیروگاه کارون ۴ به ویژه آقایان مهندس رنجبران و مهندس جعفرزاده که اجرای این طرح را مورد پشتیبانی قرار داده‌اند کمال تشکر را بنمایم. همچنین از کارشناسان اداره هواشناسی استان چهارمحال بختیاری به ویژه آقای مهندس قطره سامانی کمال تشکر را دارم.

## ۱۱- مراجع

- Henrik M., "Automatic Calibration of the Mike ۱۱/NAM Rainfall-Runoff Model," Nordic Hydrological Conference, Sweden, June ۲۶-۳۰, NHP – Report, No. ۴۶, Vol. ۱, p. ۲۷۶-۲۸۳, ۲۰۰۰.
- Liong. S. Y. and N. Muttill, "Shuffled Complex Evolution Coupled with Experimental Design Technique," National University of Singapore, Singapore ۱۱۹۲۶۰, ۲۰۰۴.
- Sorooshian, S., Q. Duan, and V.K. Gupta, "The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) Method for Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models," AGU Fall Meeting, San Francisco, California, Eos Transactions, p. ۲۴۱, ۱۹۹۲.

- اسلامی، ح ر؛ محمد ولی سامانی، ج؛ قادری، ک؛ "واسنجی خودکار مدل بارش -

رواناب با استفاده از SCE"؛ اولین کنفرانس مدیریت منابع آب، تهران ۱۳۸۲

- اسلامی ، ح ر ؛ گزارش طرح پژوهشی مدل پیش بینی متوسط آورد ده روزه در محل  
احداث سد کارون ۴ با استفاده از سابقه مشاهدات هیدرولوژیک " ؛ شرکت توسعه منابع آب  
و نیروی ایران ؛ آبان ۱۳۸۴