



Distributed Snowmelt Simulation in Ungauged
Mountainous Catchments,
Case Study: Imamzadeh Davoud Catchment

M. Delavar¹, S. Morid^{2*}
and N. Nikbakht³

Abstract

Study of the snowpack in the mountainous catchments is important from different aspects including the assessment of river yield or the avalanche control. Lack of data and low accuracy models for distributed simulation, especially on issues related to snow depth and cover, are however serious obstacles in such analysis. This research aimed to develop an appropriate algorithm for snowmelt and snow pack distributed simulation, in ungauged snow capped catchments. In this regard the snowpack of the region was spatially simulated, using snow balance equation and SRM (Snow Runoff Model) snowmelt algorithm. Additionally, the SWIFT algorithm was embedded in the model incorporating slope and aspect for calculation of radiation. Finally, the model is linked to the SWAT model to use its data generation capabilities and also calculate runoff. Comparison of the model with observation data in Imamzadeh Davoud catchment, Iran, showed acceptable performance of developed algorithm in mountainous basins relying only on readily available data.

Keywords: Distributed model, Snow melt, Snow depth, SRM algorithm, SWIFT algorithm, Imamzadeh Davoud.

Received: July 1, 2009
Accepted: November 5, 2011

شبیه‌سازی توزیعی ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی
فاقد داده
(مطالعه موردی حوضه امامزاده داوود)

مجید دلوار^۱، سعید مرید^{۲*}
و نجمه نیکبخت^۳

چکیده

مطالعه مناطق کوهستانی برفگیر و تعیین ارتفاع و بودجه برفی آنها از جنبه‌های مختلف، مانند بررسی آورد رودخانه و کنترل بهمن حائز اهمیت است. اما کمبود داده و دقت کم مدل‌های مرسوم در شبیه‌سازی توزیعی این حوضه‌ها، همواره از موانع جدی در چنین تحلیل‌هایی است. مطالعه حاضر به توسعه و ارزیابی الگوریتم مناسب به منظور شبیه‌سازی بودجه برفی، در شرایط مواجهه با کمبود داده می‌پردازد و برای محاسبه مقادیر ارتفاع و ذوب برف و رواناب ناشی از آن مدل توزیعی ارائه می‌دهد. در این راستا با توجه به معادله بیلان برفی و الگوریتم ذوب برف SRM، بودجه برفی منطقه به صورت توزیعی محاسبه می‌شود. به منظور افزایش دقت نتایج نیز در محاسبه ذوب برف از تابش تصحیح شده بر مبنای شیب و جهت، توسط الگوریتم SWIFT استفاده گردید. این مدل سپس به مدل SWAT وصل شده تا ضمن بهره‌گیری از الگوریتم تولید داده آن، رواناب حوضه نیز محاسبه گردد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده‌های مشاهداتی در حوضه امامزاده داوود حاکی از دقت قابل قبول و کارایی مناسب آن در حوضه‌های کوهستانی می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل توزیعی، ذوب برف، ارتفاع برف، الگوریتم SRM، الگوریتم SWIFT، امامزاده داوود

تاریخ دریافت مقاله: ۱۰ تیر ۱۳۸۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴ آبان ۱۳۹۰

1- Ph.D. Candidate, Hydro Structure Dept., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Assoc. Prof. of Hydro Structure Dept., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, E-mail: morid_sa@modares.ac.ir
3- Expert, Tehran Water and Soil Consulting Engineering, Karaj, Iran.
*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- کارشناس شرکت مهندسی مشاور آب و خاک تهران، کرج، ایران
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

SNOW17 و شبکه عصبی مصنوعی را برای بررسی فرایند ذوب برف در حوضه امامه مورد استفاده قراردادند، تلاش این تحقیق مقایسه روش شناسی‌های مختلف در شبیه‌سازی ذوب برف بود.

اما موردی که کمتر در مدل‌سازی‌های فوق مورد توجه می‌باشد، رویکرد مدل‌سازی توزیعی در آنها است، زیرا که هدف اصلی برآورد رواناب بوده است تا شبیه‌سازی بودجه برفی. این مساله به ویژه در مطالعات مرتبط با بهمن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای حل این مشکل رویکردهای متفاوتی مورد توجه بوده است مانند استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Daly et al. (2000) و (Shamir and Georgakakos (2006)، استفاده از روشهای زمین آماری (Rajiv et al. (2001) و یا رگرسیون چند متغیره (Dun and Colohan (1999) که هر کدام محدودیت‌های خاص خود را داشته اند. مانند کمبود داده برای روش‌های آماری و یا وجود مشکلات در تهیه تصاویر مایکروویو و پردازش آنها که برای عمق سنجی مورد نیاز است.

با توجه به موارد فوق، در تحقیق حاضر تلاش شده است ضمن توسعه یک مدل توزیعی شبیه‌سازی بودجه برفی، الگوریتمی جهت شبیه‌سازی ذوب و انباشت برف در شرایط کمبود داده، ارائه گردد. بدین منظور حوضه امامزاده داوود در شمال شرقی حوضه کن که به دلیل وضعیت‌های خاص ژئومورفولوژیکی و آب و هوایی از جمله مناطق مستعد برای وقوع بهمن می‌باشد، به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوضه امامزاده داوود در محدوده جغرافیایی ۱۰° و ۲۰° و ۵۱° تا ۲۲° و ۲۲° طول شرقی و ۱۸° و ۵۲° و ۳۵° تا ۵۲° و ۵۳° و ۳۵° عرض شمالی در شمال تهران قرار گرفته است. اراضی منطقه مورد مطالعه جزو مناطق کوهستانی محسوب می‌شود که ارتفاع آن از ۲۵۰۰ تا ۳۷۰۰ متر متغیر می‌باشد. در این حوضه مهمترین آبراهه رود کن می‌باشد که از ارتفاعات مشرف به امامزاده داوود سرچشمه می‌گیرد و تا خروجی حوضه (مناطق مسکونی کن) ادامه دارد (شکل ۱).

نزدیکترین ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی به منطقه مورد مطالعه که متعلق به سازمان هواشناسی هستند عبارتند از: تهران - مهرآباد، شمال تهران (تجریش)، کرج، ژئوفیزیک تهران، دوشان تپه،

برف بخش قابل توجهی از ریزش‌های جوی را در حوضه‌های آبریز کشور تشکیل می‌دهد که از تغییرات زمانی و مکانی برخوردار می‌باشد. از این رو شبیه‌سازی توزیعی فرایند تولید برف پشته و ذوب آن می‌تواند از جنبه‌های مختلف مانند مدل‌سازی بارش - رواناب، پیش‌بینی رواناب در فصول آبی و احتمال سقوط بهمن مفید باشد. این در حالی است که کمبود داده‌ها همواره از موانع جدی در این نوع مسایل بوده است. (Morid et al. (2001) ضمن بررسی روشهای مختلف شبیه‌سازی بودجه برفی، مهمترین چالش‌های موجود در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف - رواناب را کمبود داده و اطلاعات معرفی کردند. از اینرو توسعه روشها و مدل‌هایی که بتوانند به نحو مطلوبی با حداقل داده‌های مورد نیاز، تغییرات زمانی و مکانی برف پشته را شبیه‌سازی کند امری ضروری می‌دانند. برای شبیه‌سازی فرایند ذوب برف روشهای شاخص دما، روش بیلان انرژی و روش دما-تابش ارائه شده‌اند که از این بین، مدل‌سازی درجه-روز که بر اساس روش اول می‌باشد، بیشتر مورد توجه بوده است. دو مدل که تا به حال به خوبی بر اساس روش درجه-روز عمل کرده‌اند، مدل‌های SRM^۱ و UBC Watershed Model^۲ هستند که اساس آنها تقریباً مشابه می‌باشد. یعنی هر دو با روش درجه-روز و به صورت نیمه توزیعی (تقسیم حوضه به باندهای ارتفاعی کوچک‌تر) کار می‌کنند. البته مدل SRM تاکنون در تحقیقات بیشتری به کار رفته مانند تحقیق (Holzer et al. (1995) که از مدل SRM برای شبیه‌سازی رواناب ذوب برف در سوئد استفاده کردند. (Gomes-Landesa et al. (2000) مدل مذکور را با استفاده از سنجش از دور در پیش بینی رواناب ۴۲ حوضه در اسپانیا به کار برده و نتایج حاصل را جهت مدیریت نیروگاه‌های برقی ارایه نمودند. (Seidel and Martinec (2002) با استفاده از مدل SRM جریان ناشی از ذوب برف حوضه‌هایی در سوئیس را شبیه‌سازی و اثر سناریوهای تغییرات اقلیمی را نیز در آن بررسی کردند. در ایران نیز شبیه‌سازی برف همواره مورد نظر بوده است. مانند قائمی و مرید (۱۳۷۳) که با توسعه مدلی برای حوضه رودخانه دماوند که بر اساس اطلاعات هواشناسی، بارندگی و درجه حرارت و بدون آمار مستقیم برف‌سنجی بود، مقدار ریزش برف سالانه، ذوب برف و نهایتاً خط پیشروی و پسروی برف در ماههای مختلف این حوضه را برآورد کردند. پرهمت و همکاران (۱۳۸۱) سیلابهای شاخص و هیدروگراف کل جریان روزانه را در زیر حوضه خرسان کارون با کمک مدل SRM مورد بررسی قرار دادند، در این تحقیق تاکید بر پردازش مناسب تصاویر ماهواره‌ای برای این مدل بود. (Morid et al. (2002) مدل‌های SWAT^۳، درجه - روز، SRM،

شبهه‌سازی فرایند بارش و ذوب برف می‌باشد. این مدل دمای مرزی T_{s-r} را برای تفکیک بارش برف یا باران به کار می‌برد. اگر میانگین دما کمتر از دمای مرزی باشد، بارش به صورت برف بوده و مقدار ذخیره برفی بر سطح حوضه بر اساس مقادیر بارش برف یا ذوب برف به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان رابطه زیر را برای محاسبه تغییرات ذخیره برفی به کار برد:

$$SNO_{t+1} = SNO_t + R_t - E_{subt} - SNO_{mlt_t} \quad (1)$$

که در آن SNO مقدار آب معادل برف، R مقدار بارش (تنها در صورتی که دمای متوسط، کمتر از دمای آستانه ذوب باشد به معادل بیلان اضافه می‌گردد)، E_{sub} مقدار تصعید از سطح برف، SNO_{mlt} مقدار ذوب برف و t زمان می‌باشد (Martinec *et al.*, 2005).

در این مطالعه به منظور دخالت تشعشع در تعیین مقدار ذوب، تغییراتی در زیر برنامه SWAT بوجود آمد و الگوریتم مدل SRM مطابق معادله زیر جایگزین آن شد و از تصعید نیز صرف نظر گردید.

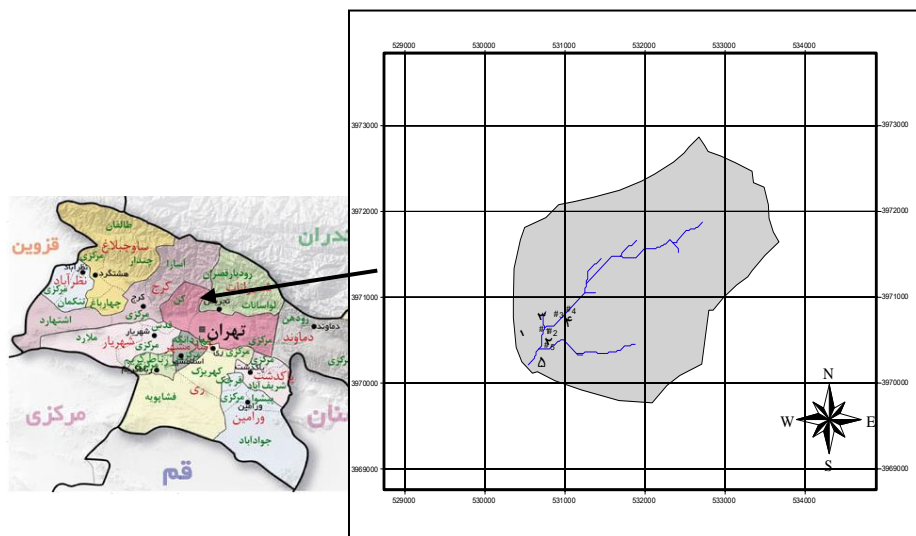
آبعلی و امین آباد، که در مطالعه حاضر ایستگاه سینوپتیک آبعلی به دلیل طولانی بودن دوره آماری آن (۲۳ سال) به عنوان ایستگاه معرف انتخاب گردید.

از آنجا که در منطقه مورد مطالعه ایستگاه برف سنجی موجود نمی‌باشد، طی زمستان ۱۳۸۵ اندازه‌گیری‌هایی از عمق برف توسط مهندسين مشاور آب و خاک تهران انجام شد، که برای صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). موقعیت نقاط اندازه‌گیری نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- روش شناسی مدل توسعه داده شده برای شبیه‌سازی برف پشته

۲-۲-۱- محاسبه میزان ذخیره و ذوب برف

در این تحقیق تلاش شده است با اعمال تغییراتی در زیر برنامه شبیه‌سازی برف مدل SWAT، دقت و توان محاسباتی آن را افزایش یابد. مدل SWAT درجه-روز از جمله مدل‌های موفق در زمینه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه امامزاده داوود به همراه موقعیت ایستگاه‌های برف سنجی

جدول ۱- داده‌های اندازه‌گیری شده ارتفاع برف در منطقه مطالعاتی (متر)

تاریخ	شماره ایستگاه				
	۱	۲	۳	۴	۵
۸۵/۱۰/۱۷	-/۰۵	-/۰۴۵	-/۰۵۲	-/۰۴۵	-/۰۵
۸۵/۱۰/۲۵	-/۰۵۲	-/۰۴۵	-/۰۵۲	-/۰۵۸	-/۰۵
۸۵/۱۱/۳	-/۰۵۱	-/۰۳۵	-/۰۶۵	-/۰۵۷	-/۰۴
۸۵/۱۱/۱۶	-/۰۶۶	-/۰۴۲	-/۰۶۸	-/۰۵۵	-/۰۶۵
۸۵/۱۲/۳	-/۰۶۷	-/۰۴۵	-/۰۶۸	-/۰۶	-/۰۵۶
۸۵/۱۲/۲۱	-/۰۶۶۲	-/۰۵	-/۰۷۱	-/۰۷	-/۰۶۸
۸۵/۱۲/۲۵	-/۰۵۲	-/۰۴۵	-/۰۵۲	-/۰۵۸	-/۰۵
۸۶/۱/۸	-/۰۷۲	-/۰۳۷	-/۰۷۱	-/۰۷	-/۰۶۶

۲-۲-۲- محاسبه تابش خالص دریافتی

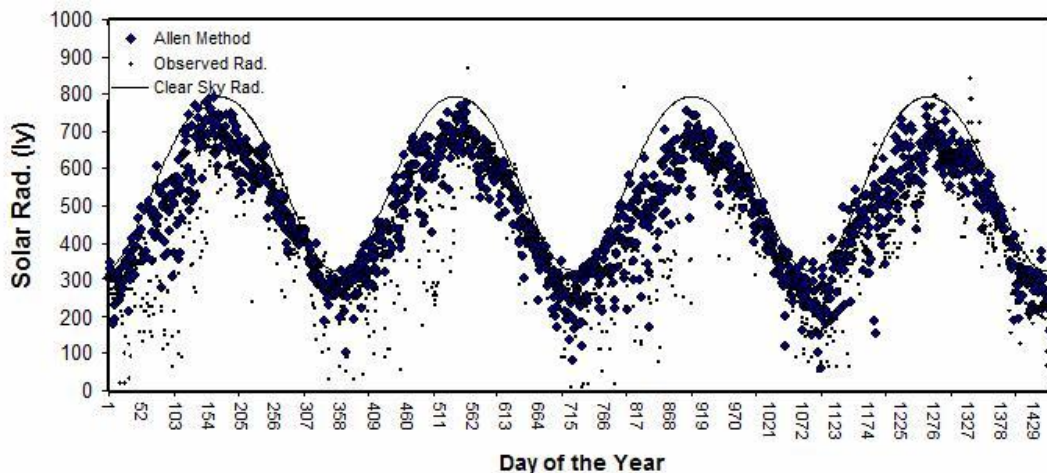
به منظور محاسبه تابش دریافتی در شرایط کمبود آمار روشهای مختلفی ارایه شده است که در این تحقیق از روش Hargreaves and Sammani (1982) مطابق رابطه زیر استفاده گردید:

$$R_d = k_r (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (4)$$

که در آن k_r ضریب تجربی تصحیح اقلیم منطقه، T_{\max} دمای ماکزیمم روزانه، T_{\min} دمای مینیمم روزانه و R_a میزان تابش فرازمینی می باشد که مستقیماً از مدل SWAT برآورد گردید. لازم به توضیح است در این مطالعه به منظور استخراج ضریب تصحیح اقلیم منطقه از روش واسنجی خودکار که توسط Allen (1997) ارائه شده است، استفاده گردید در این روش داده های مشاهداتی و محاسباتی توسط معادله (۴) با توجه به مقادیر مختلف k_r مقایسه می گردد و نهایتاً ضریبی انتخاب می گردد که بیشترین همپوشانی با داده های واقعی را داشته باشد. بدین منظور براساس مطالعات انجام گرفته بر روی ایستگاه های سینوپتیک منطقه طی سالهای ۱۳۵۱ لغایت ۱۳۵۵ ضریب k_r برابر با ۰/۲، نتایج بهتری را ارائه داد (Morid et al., 2002) (شکل ۲).

۲-۲-۳- محاسبه توزیعی تابش در مناطق کوهستانی

روش هارگریوز- سامانی، میزان تابش را برای سطوح افقی و بدون در نظر گرفتن جهت و شیب منطقه محاسبه می کند، لذا به منظور تصحیح تابش خالص دریافتی در شرایط کوهستانی از الگوریتمی موسوم به SWIFT (1976) استفاده گردید. این روش با توجه به شیب، جهت و موقعیت جغرافیایی هر نقطه، میزان تابش دریافتی روزهای مختلف سال را برآورد می کند.



شکل ۲- تعیین ضریب تصحیح اقلیم منطقه توسط روش واسنجی خودکار آلن (Morid et al., 2002)

$$M = m_Q R_d + a_r T_d \quad (2)$$

که در آن $MELT$: مقدار ذوب برف (cm/day)، m_Q : ضریب ثابت تبدیل انرژی به عمق آب ($0.026 cmW^{-1}m^2 day^{-1}$)، R_d : شاخص تابش خالص دریافتی (W/m^2)، a_r : ضریب درجه روز و ویژه ($cm/dayC^\circ$) و T_d : دمای متوسط روزانه (C°) می باشد (Martinec et al., 2005).

برای برآورد a_r از معادله زیر استفاده می گردد:

$$a_r \approx m_Q \rho_a C_p k^2 (\ln z / z_0)^{-2} u \left[\frac{C_{pa} + RH_a \frac{L}{2} \frac{0.622}{Pa} \left(\frac{de}{dT} \right)_0}{T} - \frac{(1 - RH_a) \frac{L}{2} \frac{0.622}{Pa} e_0}{T} \right]$$

که در آن u سرعت باد، RH_a رطوبت نسبی، C_h ضریب انتقال توربولانت، C_{pa} ظرفیت گرمایی هوا، k ثابت ون کارمن (~ 0.41)، P_a فشار هوا، T دمای روزانه، L گرمای نهان تبخیر آب ($2.5 \times 10^6 J/kg$)، e_0 فشار بخار مینا ($6.1 mbar$)، $\frac{de}{dT}$ تغییرات فشار بخار نسبت به دما ($0.4438 mbar/k$)، z/z_0 نسبت ارتفاع به زبری برف ($2/0.0005$) می باشد (Morid et al., 2002).

با توجه به معادلات ارایه شده از جمله مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در برآورد میزان ذوب برف تابش می باشد. بنابراین محاسبه شاخص تابش خالص دریافتی نقش مهمی در نتایج مدل خواهد داشت، که در ادامه به آن پرداخته می شود.

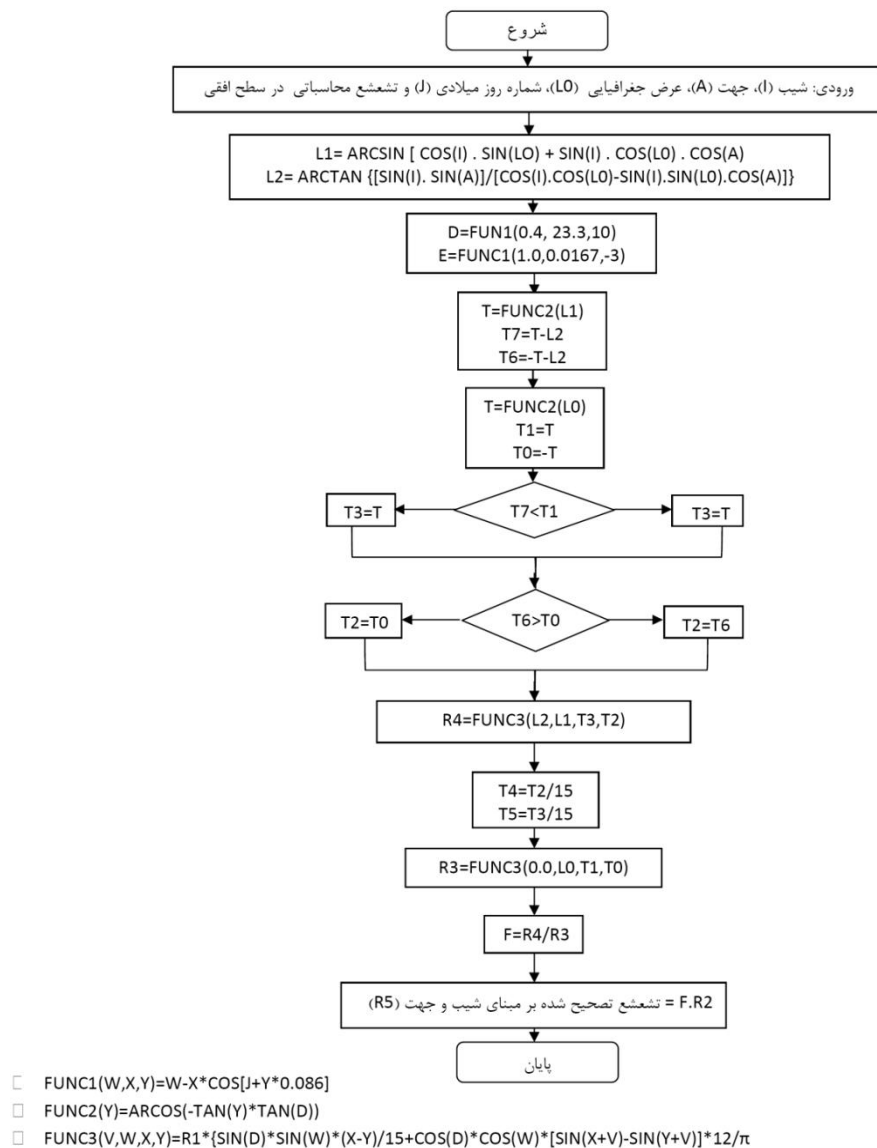
در شکل ۴ الگوریتم کلی محاسبه تشعشع مکانی با استفاده از نقشه‌های رقومی نشان داده شده است.

۲-۲-۴- تهیه مدل توزیعی برف

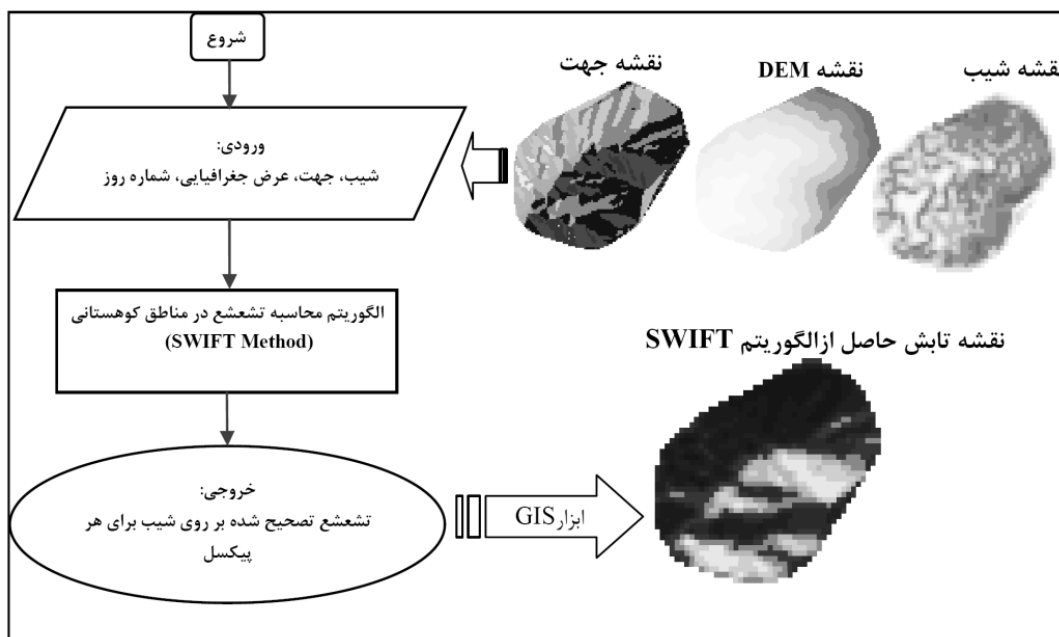
به منظور مدل‌سازی فوق، همانگونه که قبلاً اشاره گردید از مدل نیمه توزیعی SWAT استفاده شد که برای اهداف تحقیق تغییراتی در آن اعمال شد که بتواند فرایند انباشت و ذوب برف را به صورت توزیعی شبیه‌سازی کند، بدین منظور مدل توسعه یافته برای الگوریتم SWIFT در قالب زیر برنامه‌ای به مدل SWAT اضافه گردید و در زیر برنامه برف مدل (Snom.for) نیز تغییراتی اعمال شد که چارچوب کلی آن همراه با ورودی‌ها و خروجیهای آن در شکل ۵ آمده است.

در این الگوریتم با محاسبه پتانسیل تشعشع دریافتی در سطح افقی (R_3) و سطح شیب (R_4)، ضریبی تحت عنوان فاکتور شیب به صورت $F = \frac{R_4}{R_3}$ استخراج می‌گردد (Lloyd and Swift, 1976). با

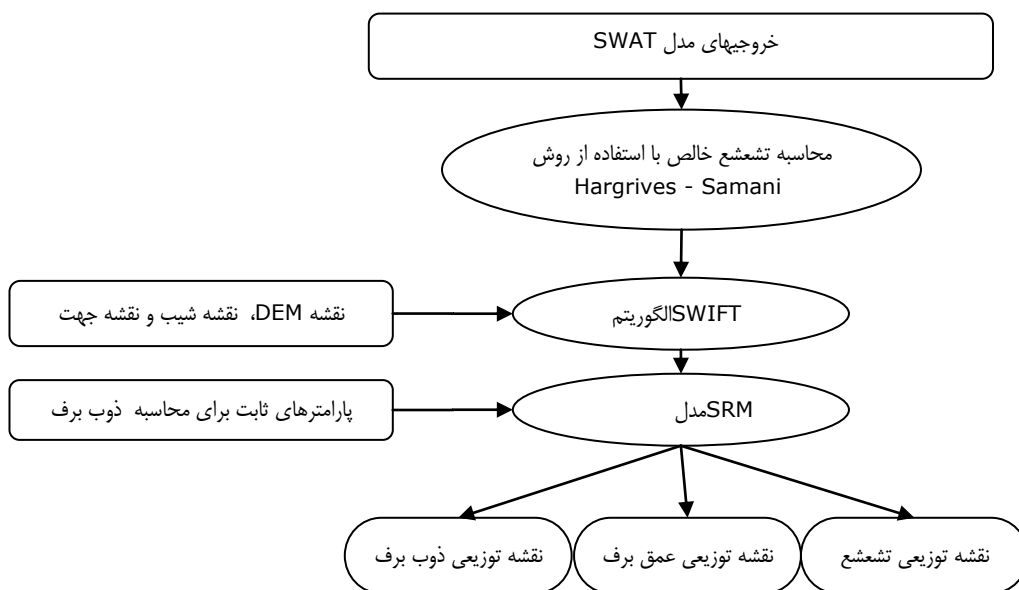
ضرب فاکتور شیب در مقدار تشعشع خالص دریافتی (محاسبه شده توسط روش هارگریوز-سامانی) مقدار تشعشع تصحیح شده بر روی سطح شیب محاسبه می‌شود. بدین ترتیب مقادیر تشعشع تصحیح شده (خروجی الگوریتم SWIFT) مبنای محاسبات بعدی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ نحوه انجام محاسبات مذکور نشان داده شده است. به منظور محاسبه توزیعی تشعشع بر اساس الگوریتم SWIFT، نقشه‌های رقومی (DEM)، شیب و جهت منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بدین صورت امکان محاسبه تشعشع تصحیح شده بر مبنای شیب و جهت برای هر پیکسل از نقشه میسر می‌گردد.



شکل ۳- الگوریتم محاسباتی SWIFT



شکل ۴- الگوریتم کلی محاسبه تابش مکانی با استفاده از نقشه‌های رقومی

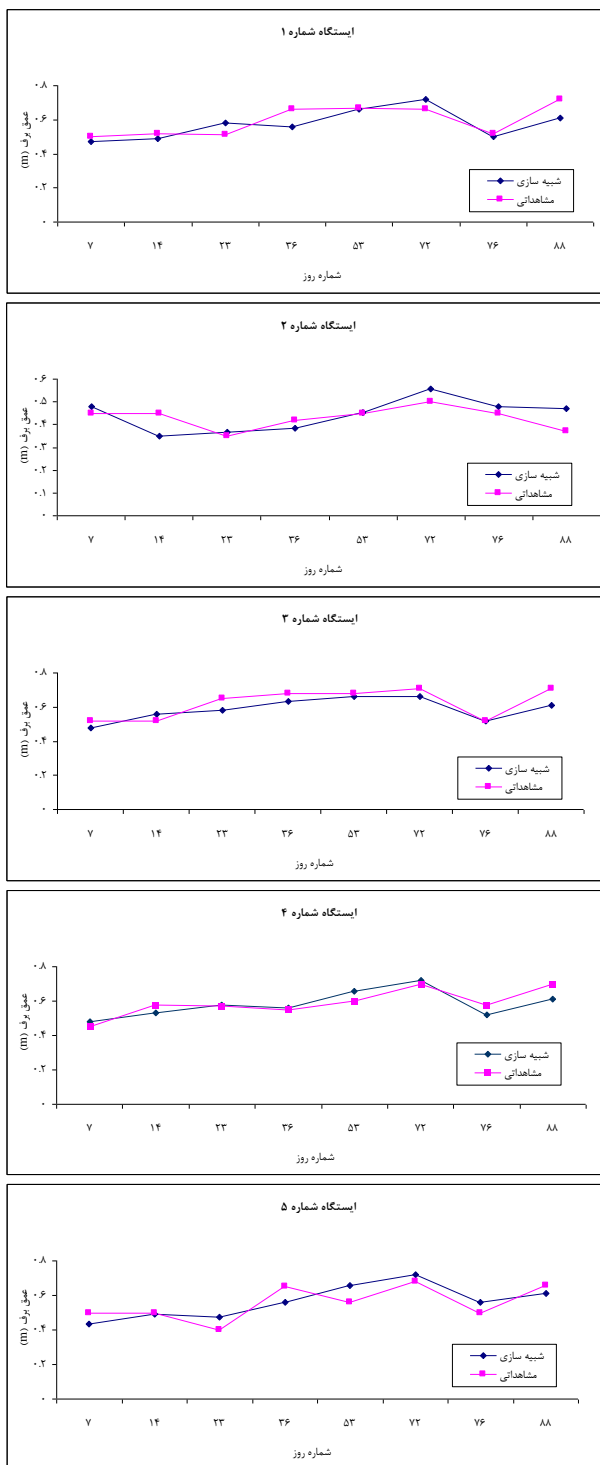


شکل ۵- الگوریتم مدل توزیعی برف

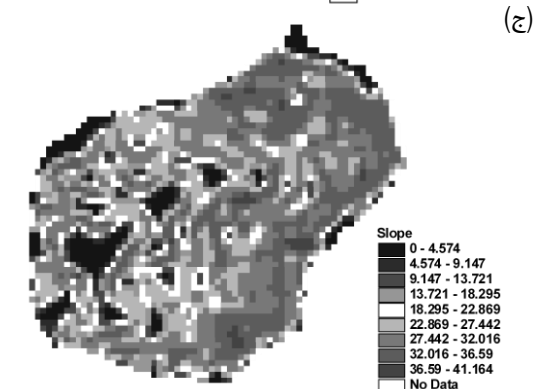
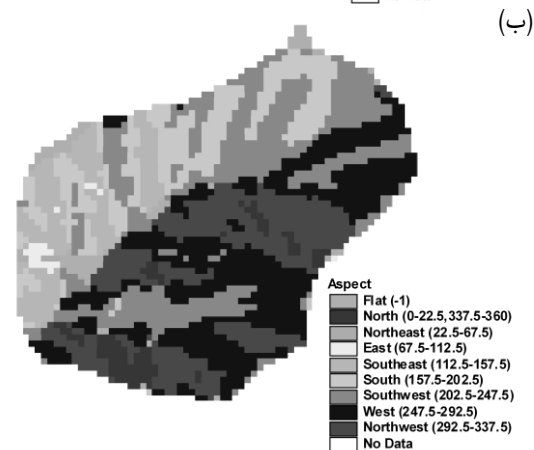
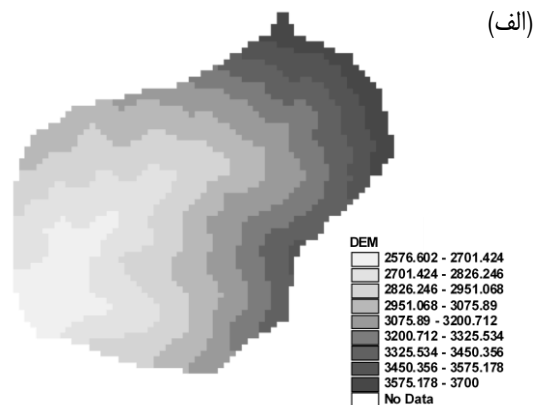
لازم به ذکر است این پارامترها عمدتاً از تحقیق Morid et al. (2002) که در حوضه امامه انجام شده بود، تهیه گردیده است که شباهت‌های زیادی با منطقه مطالعاتی این تحقیق دارد. دمای آستانه برف را نیز به استناد مطالعات برف حوضه دماوند که توسط قائمی و مرید (۱۳۷۳) انجام شده بود، ۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. در نهایت مدل توسعه یافته قادر خواهد بود اطلاعات مورد نیاز را در کل حوضه به صورت توزیعی و همچنین به صورت سری زمانی برای تمام پیکسل‌های نقشه استخراج کند.

با توجه به ساختار طراحی شده برای مدل، نقشه‌های مورد نیاز برای اجرای مدل عبارتند از نقشه رقومی منطقه، نقشه شیب و جهت دامنه‌ها (شکل ۶)، که به فرمت فایل (ASCII) توسط نرم افزار ArcView تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. سایر متغیرهای مورد نیاز برای اجرای مدل نیز از قبیل دمای آستانه ریزش برف (۲ درجه سانتی‌گراد)، دمای آستانه ذوب برف، ضریب تجربی تصحیح اقلیم منطقه، ضریب ثابت تبدیل انرژی به عمق آب و دگر موارد برای محاسبه ضریب درجه-روز ویژه نیز در متن برنامه به آن معرفی شد.

خطا (MAE) و همچنین ماکزیمم خطای محاسباتی برآورد گردید (شکل ۷ و جدول ۲).



شکل ۷- مقایسه عمق برف شبیه سازی و مشاهداتی ایستگاهها از تاریخ ۲۰۰۷/۱/۷ لغایت ۲۰۰۷/۳/۲۸



شکل ۶- الف) نقشه DEM منطقه مطالعاتی، ب) نقشه جهت منطقه مطالعاتی، ج) نقشه شیب منطقه مطالعاتی

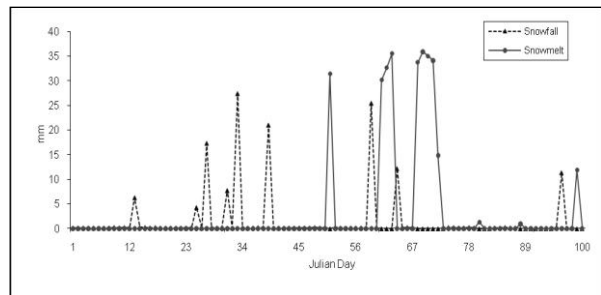
۳- صحت سنجی و بررسی عملکرد مدل

به منظور بررسی عملکرد و صحت‌سنجی مدل توزیعی تهیه شده، مدل برای حوضه امامزاده داوود و با استفاده از داده‌های روزانه دما و بارش ایستگاه آبدلی طی سالهای ۱۳۸۵-۱۳۸۶، اجرا و نتایج آن با داده‌های اندازه‌گیری شده عمق برف مقایسه گردید. بدین منظور عمق برف محاسباتی توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در ۵ ایستگاه برف‌سنجی در طی ۸ روز مقایسه و مقادیر ضریب همبستگی (R) و ریشه میانگین مجذور خطا ($RMSE$) و متوسط قدر مطلق

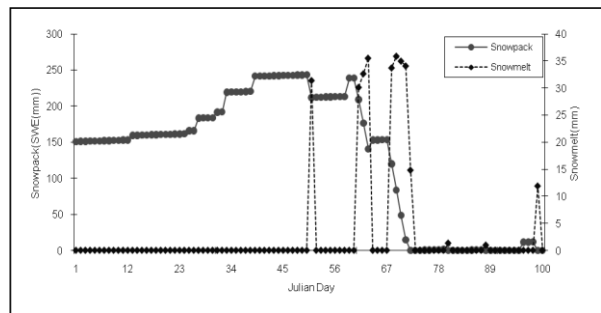
جدول ۲- عملکرد مدل توزیعی برف در محاسبه عمق برف در ایستگاههای برف سنجی

شماره ایستگاه	RMSE(m)	MAE(m)	MAX Error(m)	R
۱	۰/۰۶۴	۰/۰۵۳	۰/۱۱۰	٪۸۵/۹
۲	۰/۰۵۷	۰/۰۴۶	۰/۱۰۱	٪۸۸/۱
۳	۰/۰۵۳	۰/۰۴۵	۰/۱۰۰	٪۸۸/۴
۴	۰/۰۴۹	۰/۰۴۱	۰/۰۹۰	٪۹۲/۲
۵	۰/۰۶۷	۰/۰۶۱	۰/۱۰۰	٪۸۳/۱

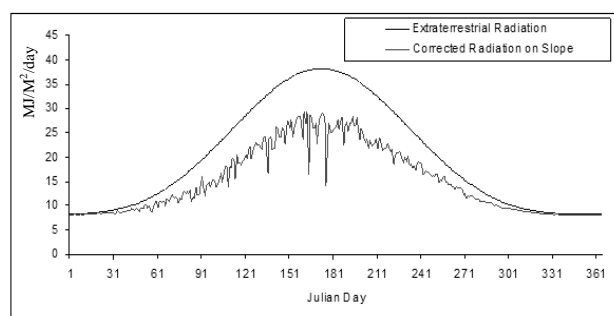
الف



ب



ج



شکل ۸) تغییرات الف) بارش و ذوب برف، ب) عمق آب معادل برف و ج) تشعشع خالص دریافتی در ایستگاه (۱)

خطای محاسباتی با توجه به دامنه تغییرات (۷۲-۰) سانتی متر معادل با ۱۰ سانتی متر خواهد بود که رقمی قابل قبول در محاسبات برف سنجی می باشد. با توجه به نتایج قابل قبول مدل توسعه داده شده به عنوان نمونه در ادامه به تعدادی از خروجی های آن در سال ۲۰۰۷ میلادی اشاره می گردد:

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

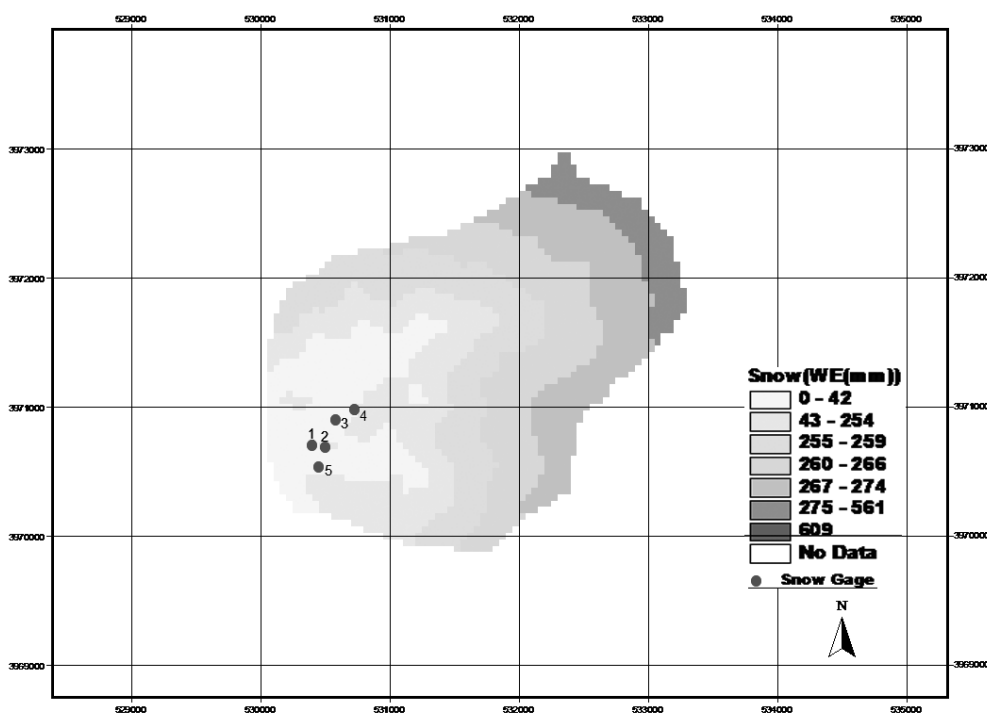
مطالعه حاضر تلاشی جهت توسعه و ارایه الگوریتمی مناسب برای محاسبه عمق و ذوب برف به صورت یک مدل توزیعی است. بدین منظور با توجه به معادله ذوب برف SRM و تصحیح تشعشع مورد نیاز آن براساس الگوریتم SWIFT، مقادیر ذوب برف و همچنین تغییرات ذخیره برفی برای هر پیکسل از نقشه حوضه مورد نظر محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که:

مدل توزیعی توسعه داده شده ضمن برخورداری از پایه علمی مناسب، از سادگی و اتکا به حداقل داده های در دسترس برخوردار بوده و می تواند تغییرات مکانی و زمانی مقادیر تشعشع، عمق برف و ذوب برف را در منطقه مطالعاتی شبیه سازی نماید. مهمترین ویژگی های مدل مذکور قابلیت محاسبه توزیعی متغیرهای هواشناسی و بخصوص تشعشع بود که عاملی تعیین کننده ای در تغییرات بودجه برفی حوضه های کوهستانی در شیب و جهت مختلف می باشد. مقایسه نتایج مدل در ۵ نقطه از حوضه که با تلاش زیاد برای یک دوره ۵ ماهه، عمق سنجی و چگالی سنجی شد نشان داد که مدل با دقت حدود ۹۰ درصد، بخوبی طی این دوره شبیه سازی عمق را انجام داده است. مدل توسعه یافته امکان استفاده از نقشه های رقومی (DEM) برای تصحیح و تعدیل متغیرهای هواشناسی و بخصوص تشعشع را دارد. از طرفی قابلیت اتصال به مدل SWAT از جمله نقاط قوت مدل است که علاوه بر اطلاعات مربوط به عمق و بودجه برفی برای بحث هشدار بهمن، شبیه سازی رواناب را هم به انجام می رساند. از جمله مهمترین محدودیت های مطالعه حاضر کمبود داده های مشاهداتی و داده های عمق سنجی بود. برای تدقیق و استفاده بیشتر از اینگونه مدل ها که با پیچیدگی های بالایی همراه هستند، لازم است تا اندازه گیری های برف توسعه و بخصوص استفاده از تصاویر ماهواره ای برای ادامه این کار توصیه می گردد.

پی نوشت ها

- 1- Snowmelt Runoff Model
- 2- Soil and Water Assessment Tool
- 3- SWIFT Algorithm
- 4- University of British Columbia

همانطور که ملاحظه می گردد مدل توزیعی بسط داده شده به نحو مطلوبی و با کمترین داده ها قادر است عمق برف پشته را در ایستگاههای مشاهداتی شبیه سازی کند و در این زمینه ماکزیمم



شکل ۹- نقشه توزیعی عمق آب معادل برف (میلی‌متر) در ۲۳ اسفند ۱۳۸۵

objective analysis", *Journal of Hydrology*, Vol. 223, No. 22, pp.1-16.

Gomez-Landesa, E., Rango, A. and Hall, D. K. (2000). "Improved snow cover remote sensing for snowmelt runoff forecasting", *International association of hydrological sciences (IAHS)*, Vol. 267, pp. 61-65.

Hargreaves G.H., and Sammani, Z. A. (1982), "Estimating potential evapotranspiration", *Journal of Irrigation and drainage Eng., ASCE*, Vol. 108, No. 3, pp. 25-230.

Holzer, T. and Apfl, G. and Baumgartner, M. F. (1995). "Monitoring Swiss alpine snow cover variations using NOAA-AVHRR data", *International geosciences and remote sensing symposium (IGARSS)*, Vol. 3, pp.1765-1767.

Lloyd W. and Swift JR. (1976), "Algorithm for Solar Radiatjon on Mountain Slopes", *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 108-112.

Martinec, J., Rango, A. and Roberts, R. (2005). "Snowmelt runoff model user's manual", *WinSRM version 1.1 Updated edition*.

Morid, S., Gosain, A. K. and Keshari, A. K. (2001). "Challenge in snow melt-runoff simulation", *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 27, No. 2, pp.11-17.

۵- مراجع

پرهمت، ج و ثقفیان، ب و صدقی، ح. (۱۳۸۱)، شبیه‌سازی سیلاب حاصل از ذوب برف و باران با استفاده از مدل SRM و داده‌های سنجش از دور در زیر حوضه‌های کارون، ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه.

قائمی، ه و مرید، س. (۱۳۷۳)، تحلیل برف در حوضه آبخیز رودخانه دماوند، اولین سمینار هیدرولوژی برف و یخ، ارومیه.

مهندسی مشاور آب و خاک تهران (۱۳۸۶)، مطالعه مناطق بهمن خیز حوضه امامزاده داوود.

Allen R.G. (1997). " Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature", *ASCE J. Hydrol. Eng*, Vol. 2, pp. 56 – 57.

Daly S.F., Davis R., Pangburn T., Ochs E., Rosenthal W., Affleck R., Baldwin T., Bryant E., Hardy J., Taylor S., Dotson H., Evans T., Dunn C. And Burham M. (2000). " Spatially Distributed Snow Modeling for a Comprehensive Study of the Sacramento and San Joaquin Basins, California", *57th Eastern Snow Conference Syracuse*, New York, USA.

Dun S. M. and Colohan R. J. E. (1999). " Developing the snow component of a distributed hydrological model: a step-wise approach based on multi-

Seidel, K. and Martinec, J. (2002). "Hydrological application of satellite snow cover mapping in the Swiss alps", Proceedings of EARSEL-LISSING workshop, Bern, pp. 79-87.

Shamir E., Georgakakos K.P. (2006). "Distributed snow accumulation and ablation modeling in the American River basin", Advances in water resources, Vol. 29, No. 4, pp. 558-570.

Morid, S., Gosain, A. K. and Keshari, A. K. (2002). "Comparison of the SWAT model and ANN for daily simulation of runoff in snowbound ungauged catchments", *Proceedings of the fifth international conference on Hydro informatics*, Cardiff, UK.

Rajiv Prasad, David, G. Tarboton, Glen E. Liston, Charles H. Luce, and Mark S. Seyfried (2001). "Testing a blowing snow model against distributed snow measurements at Upper Sheep Creek, Idaho, United States of America", *Water Resources Research*, Vol.37, No. 5, pp.1341-1350.