برآورد توزیع مکانی آب معادل برفِ سراب رودخانه کارون در محیط GIS

صفر معروفی[1]*، حسین طبری[2]، حمید زارع ابیانه[3] و محمدرضا شریفی[4]

تاریخ دریافت: 88/6/8 تاریخ پذیرش: 89/4/26

1،2و3- به ترتیب دانشیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

4- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه جندی‌شاپور

مسئول مکاتبه E-mail: smarofi@yahoo.com

چکیده

در حوضه‌های کوهستانی، برآورد آب معادل برف گامی مهم در امر مدیریت منابع آب است. هدف از این تحقیق، بررسی کارایی روش وزنی در برآورد توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) بود. بدین منظور ابتدا با استفاده از مقادیر مشاهده‌ای ضخامت و چگالی برف، آب معادل آن محاسبه گردید. سپس با تعیین پارامترهای اقلیمی و فیزیوگرافی مؤثر، روش وزنی جهت برآورد توزیع مکانی آب معادل برف بکار برده شد. به منظور ارزیابی روش وزنی، توزیع مکانی آب معادل برف برآورد شده با روش مذکور، با نتایج حاصله از تکنیک‌های درون‌یابی مقایسه گردید. نقشه وزنی آب معادل برف نشان داد که مناطق دارای عمق آب معادل برف زیاد و خیلی زیاد غالباً در ارتفاعات بالا، شیب‌های ملایم و نواحی دارای شاخص بادپناهی زیاد یافت می‌شوند. بطور کلی، نتایج این تحقیق حاکی از آن است که روش وزنی قادر به برآورد قابل اطمینانی از توزیع مکانی آب معادل برف می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب معادل برف، تکنیک‌های درون‌یابی، حوضه کارون، روش وزنی ، سامانه اطلاعات جغرافیایی

Archive of SID

www.SID.ir

Estimating the Spatial Distribution of Snow Water Equivalent in the Upstream of Karoon River Using GIS

S. Marofi[1*], H. Tabari[2], H. Zare Abyaneh[3] and M. R. Sharifi[4]

[1,2,3] Asoc. Prof., Former MSc. Student, and Assist. Prof., respectivey. Univ. of Bu-Ali Sinae Hamedan, Iran

[4] Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Univ. of Jondi-Shapour, Iran

* Coresponding author : E-mail: smarofi@yahoo.com

Abstract

In mountainous basins, snow water equivalent (SWE) estimation is an important step of water resources management. The main purpose of this research was the investigation of the weighting method efficiency using GIS in estimating spatial distribution of SWE. To this regard, using the observed snow depth and density, the SWE was initially calculated. Then, the weighting method was used to estimate spatial distribution of SWE. The results of the weighting method were evaluated by the interpolation technique map. Weighted SWE map indicated that very high and high SWE zones were dominant in areas with high elevations, moderate slope and high upwind slopes. In general, the results showed that weighting method is enable to estimate spatial distribution of SWE satisfactorily.

Keywords: Geographic information systems, Interpolation techniques, Karoon basin, Snow water equivalent, Weighting method

Archive of SID

مقدمه

در مناطق کوهستانی کشور، بخش قابل توجهی از بارش به صورت برف می‌باشد که منبع مهم جریان رودخانه‌ای محسوب می‌گردد. ذخایر برفی حوضه‌های کوهستانی از منابع مهم و قابل اطمینان کشور است که شناخت دقیق کمیت این منابع به لحاظ ارزش روزافزون آب شیرین و هم به واسطه بهره‌برداری بهینه از منابع آب ضروری است (حجام و شرعی‌پور ۱۳۸۲).

پی بردن به مقادیر خصوصیات برفی مانند ارتفاع آب معادل در سطح وسیعی از حوضه با استفاده از مشاهدات نقطه‌ای، یکی از چالش‌های اصلی در هیدرولوژی برف می‌باشد. زیرا این خصوصیات کاملاً تحت تأثیر دو فرایند مهم و پیچیده برف‌انباشت[1] و ربایش یا فرساب[2] می‌باشند (مکی و گری T۱۹۸۱ الدر و همکاران ۱۹۹۱). به طوریکه

[1] Snow accumulation
[2] Ablation

www.SID.ir

فرایندهای مزبور ایجاد ناهمگنی زیادی در برف‌انباشت نموده و باعث تغییرات مکانی زیاد در آن می‌گردد (اریکسون و همکاران ۲۰۰۵). در نتیجه، تعمیم اطلاعات نقطه‌ای به سطح با خطای زیادی همراه است (الدر و دوزیر ۱۹۹۰؛ الدر و همکاران ۱۹۹۱). علاوه بر این، اطلاعات نقطه‌ای برف محدود هستند (پرهمت ۱۳۸۱). آب معادل برف[1] به عنوان مهمترین خصوصیت برفی نیز از این قاعده مستثنی نیست. زیرا اولاً تغییرات شدید مکانی آن به خصوص در مناطق کوهستانی و ثانیاً نقطه‌ای بودن اطلاعات مشاهده‌ای و ثالثاً محدود بودن اطلاعات نقطه‌ای مزبور به علت هزینه بالا، مشکلات پشتیبانی و ملاحضات ایمنی در اندازه‌گیری آن، امکان برآورد دقیق آن را در سطح با مشکل مواجه نموده‌اند (شریفی ۱۳۸۶). بنابراین با توجه به مشکلات موجود، استفاده از تکنیک‌هایی مانند سامانه اطلاعات جغرافیایی[2] (GIS) برای ارائه توزیع مکانی آب معادل برف توصیه می‌گردد.

در سال‌های اخیر سامانه اطلاعات جغرافیایی در برآورد توزیع مکانی رواناب و فرسایش خاک (شادمانی و همکاران ۱۳۸۷، انباژگان و همکاران ۲۰۰۵، جاسروتیا و سینگ ۲۰۰۶)، تعیین مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی (قیومیان و همکاران ۲۰۰۷) و تعیین نیاز آبی گیاهان (کاسا و همکاران ۲۰۰۸) مکرراً مورد استفاده قرار گرفته است. توانایی GIS در ذخیره اطلاعاتی که وابستگی مکانی دارند، تجزیه و تحلیل آنها، انجام محاسبات مورد نیاز و نمایش آنها به صورت نقشه-های دقیق، جداول و نمودارها در مدت زمان کوتاه، این تکنیک را در جایگاه ویژه‌ای قرار داده است (مهدوی و همکاران ۱۳۸۳). توزیع مکانی آب معادل برف توسط برخی از محققان (طبری ۱۳۸۸، دوراند و همکاران ۲۰۰۷ و اسکاگان ۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفته است. پکوساوا و همکاران (۲۰۰۲) برای حوضه‌ای در اسلوونی، برای ارائه توزیع مکانی آب معادل برف، روش‌های مختلف درون-یابی[3] را با استفاده از GIS بکار بردند. آنها با ارزیابی تکنیک‌های مختلف درون‌یابی دریافتند که روش رگرسیون چند جمله‌ای[4] بهترین روش درون‌یابی آب معادل برف می‌باشد. میزوکامی و همکاران (۲۰۰۳) از GIS جهت برآورد آب معادل برف در حوضه پریش کریک[5] ایالت یوتای آمریکا استفاده نمودند. آنها پارامترهای ارتفاع، تابش خورشیدی، جهت باد، پوشش گیاهی و زاویه شیب را به‌عنوان عوامل مؤثر بر آب معادل برف درنظر گرفته و برای هر یک از این عوامل نقشه‌ای تهیه نمودند. نهایتاً به-منظور تخمین آب معادل برف این نقشه‌ها را با هم ترکیب کردند. تابسوبا و همکاران (۲۰۰۵) از تکنیک کریجینگ معمولی[6] با روند خارجی[7] به‌منظور برآورد توزیع مکانی آب معادل برف استفاده و نتایج آن را با توزیع مکانی بدست آمده از کریجینگ معمولی مقایسه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که تکنیک کریجینگ معمولی با روند خارجی نسبت به کریجینگ معمولی به‌تنهایی روش مناسب‌تری جهت برآورد آب معادل برف می‌باشد. جین و همکاران (۲۰۰۹) اثر ارتفاع و زاویه شیب را بر توزیع مکانی برف-انباشت در حوضه‌ای واقع در هیمالیا مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تأثر زاویه شیب بر میزان برف-انباشت در ارتفاعات بالا بیشتر است.

تحقیقات معدودی در زمینه آب معادل برف در ایران انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. اسلامی و فیروزبخت (۱۳۷۳) با تقسیم حوضه کارون و دز به دو منطقه پیش‌کوه و پشت‌کوه، بر اساس جهت قرار گرفتن مناطق مزبور نسبت به حرکت سیستم‌های بارش منطقه، از روی رابطه خطی تغییرات آب

[1] Snow water equivalent (SWE)
[2] Geographic information system (GIS)

[3] Interpolation
[4] Polynomial regression
[5] Parrish Creek
[6] Ordinary Kriging
[7] Kriging technique with external drift

Archive of SID

www.SID.ir

معادل برف با ارتفاع، در هر یک از مناطق مذکور نسبت به برآورد آب معادل برف در نقاط فاقد آمار اقدام نمودند. تخمین‌های انجام شده در این مطالعه همراه با خطای زیادی بوده است. زیرا در تحقیق آنها مناطق همگن صرفاً بر اساس حرکت سیستم‌های بارش منطقه تعیین گردید. همچنین تأثیر دیگر عوامل توپوگرافی و پارامترهایی نظیر باد در هر یک از مناطق در نظر گرفته نشده است. طبری و همکاران (۱۳۸۸) با مقایسه روش های هوش مصنوعی و رگرسیون غیرخطی چندمتغیره در برآورد آب معادل برف در زیر حوضه صمصامی نتیجه گرفتند که روش‌های هوش مصنوعی بسیار بهتر از روش رگرسیونی قادر به تخمین آب معادل برف می‌باشند. معروفی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)[1] اقدام به برآورد آب معادل برف در زیرحوضه صمصامی نمودند. بدین صورت که ابتدا همبستگی ارتفاع و آب معادل برف را به کمک روابط رگرسیون خطی، غیر خطی لگاریتمی و چند جمله‌ای محاسبه نموده و سپس با بکارگیری بهترین رابطه رگرسیونی، آب معادل برف را در زیر حوضه مزبور پهنه‌بندی نمودند.

لازمه مدیریت صحیح منابع آبی، داشتن داده‌ها و آمار دقیق و کامل از وضعیت منابع آب موجود در کشور است و در این میان برف یکی از منابع بسیار مهم تأمین کننده منابع آبی است که از گذشته تا کنون روش‌های مختلفی برای آماربرداری و ثبت داده‌های آن بکار گرفته شده است. اندازه‌گیری برف به دلیل جابه‌جایی، وزش باد و انبوه شدن آن بسیار مشکل می‌باشد و داده‌های برف ناکافی است. لذا بررسی توزیع مکانی برف مشکل به‌نظر می‌رسد. اطلاعات مشاهده‌ای برف بسیار اندک و معمولاً به نواحی با ارتفاع کم محدود می‌شود. این موضوع کاربرد روش‌های غیرمستقیم نظیر بکارگیری GIS در تأمین بخشی از اطلاعات برف را از دهه‌های پیش اجتناب ناپذیر نموده است. این تحقیق جهت ارزیابی کارایی روش وزنی (با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی) در برآورد توزیع مکانی آب معادل برف در حوضه صمصامی انجام شده است و توزیع مکانی بدست آمده با این روش با نقشه پهنه‌بندی حاصل از درون‌یابی مقادیر مشاهده‌ای مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

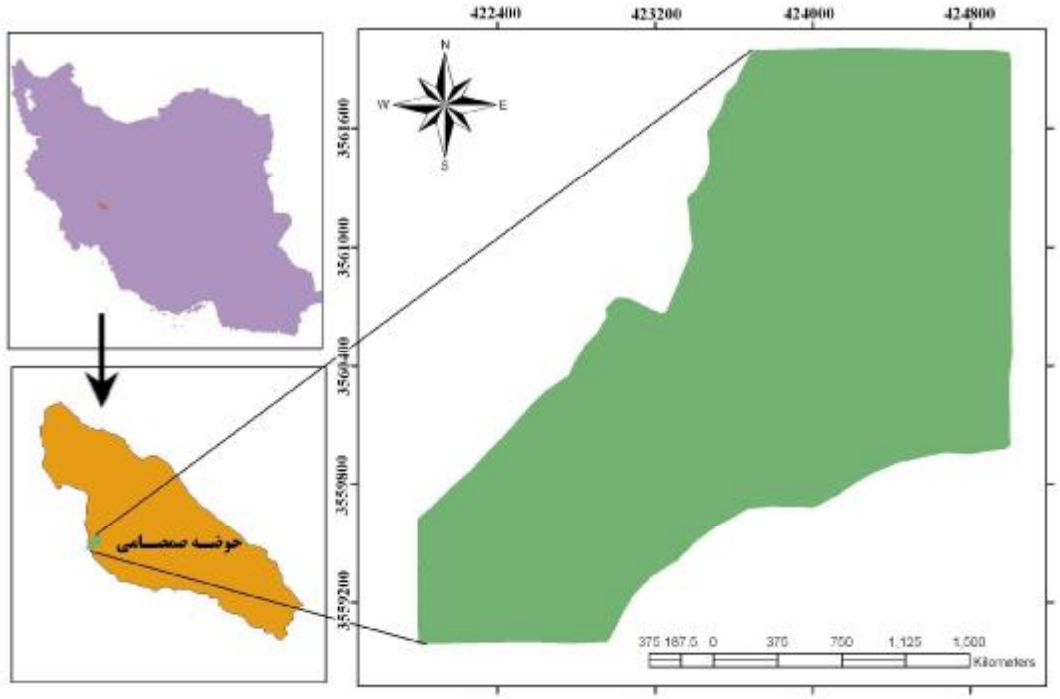
حوضه صمصامی یکی از زیرحوضه‌های کارون علیا به شمار می‌آید. مساحت این حوضه که در قسمت غربی استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است، بیش از ۲۴۶ کیلومترمربع می‌باشد. این حوضه در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه، ۱۰ دقیقه و ۲ ثانیه تا ۵۰ درجه، ۲۶ دقیقه و ۱۸ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه، ۵ دقیقه و ۱۷ ثانیه تا ۳۲ درجه، ۱۵ دقیقه و ۱ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. برای این تحقیق محدوده‌ای به مساحت ۵/۲ کیلومترمربع از حوضه فوق‌الذکر انتخاب گردید. این محدوده دارای میانگین ارتفاع ۲۵۷۰ متر می‌باشد (شکل۱).

روش انجام تحقیق

آب معادل برف را می‌توان از حاصلضرب چگالی برف در ضخامت برف‌انباشت (رابطه ۱) تعیین نمود (بیرودیان ۱۳۸۳). بنابراین برای محاسبه آب معادل برف با استفاده از رابطه ۱، باید مقادیر ضخامت و چگالی برف اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری ضخامت برف، به علت صعوبت برف‌پیمایی در امتداد شیب‌ها، تصمیم گرفته شد که جهت ایجاد تسهیل در امر نمونه‌برداری، نقاط نمونه-برداری روی خطوط تراز انتخاب گردد. بنابراین، نقاط

[1] Digital elevation model

Archive of SID
www.SID.ir



شکل 1- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه (در سیستم UTM)

توجه به تغییرات بسیار کم چگالی برف در مقایسه با ضخامت برف (گری و میل ۱۹۸۱ و الدر و همکاران ۱۹۹۵)، تعداد ۱۸ نقطه از ۲۵۸ نقطه ضخامت‌سنجی به عنوان نقاط چگالی‌سنجی انتخاب گردید (شکل ۲-ب). بدین‌منظور ابتدا ضخامت برف مشاهده‌ای در هریک از ۱۸ نقطه، به دو قسمت (لایه فوقانی و تحتانی) تقسیم شد. سپس چگالی هر قسمت به طور جداگانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. با محاسبه میانگین وزنی چگالی هر یک از لایه‌های فوقانی و تحتانی مطابق رابطه ۲، چگالی برف در هر نقطه بدست آمد

$$SWE = D \times \frac{r_S}{r_W} \qquad [۱]$$

در این رابطه، SWE آب معادل برف (سانتی‌متر)، D عمق برف (سانتی‌متر)، r_S چگالی برف (کیلوگرم بر مترمربع) و r_W چگالی آب (کیلوگرم بر مترمربع) می‌باشند.

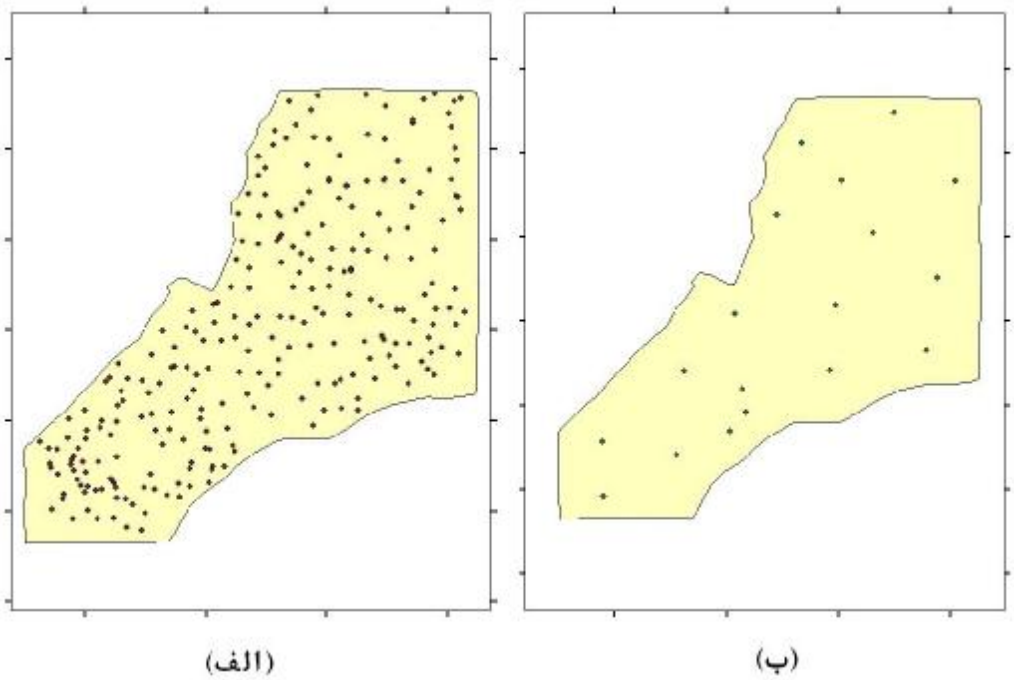
$$r_{point} = \frac{r_u D_u + r_d D_d}{D_u + D_d} \qquad [۲]$$

در این رابطه، r_{point} چگالی نقطه مورد نظر (کیلوگرم بر مترمربع)، D_u ضخامت لایه فوقانی برف (سانتی‌متر)، D_d ضخامت لایه تحتانی برف (سانتی‌متر) و r_u و r_d به‌ترتیب چگالی لایه فوقانی و تحتانی (کیلوگرم بر مترمربع) می‌باشند.

بر اساس بررسی‌های آماری صورت گرفته در این تحقیق، چگالی برف با ضریب تغییرات ۱۲ درصد در مقایسه با مقدار متناظر آن در ضخامت برف به میزان ۴۱ درصد، از تغییرات مکانی بسیار کمتری برخوردار است. از طرفی، عدم وجود رابطه معنی‌دار چگالی با عوامل توپوگرافی و نرمال بودن توزیع آن سبب شد که اولاً توزیع مکانی آب معادل برف را با توزیع مکانی ضخامت آن یکسان فرض نموده و ثانیاً برای برآورد چگالی نقاط مختلف، از مقدار میانگین وزنی آن ۰/۴۶۸ استفاده گردد

Archive of SID

www.SID.ir



شکل2- موقعیت نقاط نمونه‌برداری: الف) نقاط عمق‌سنجی برف ب) نقاط چگالی‌سنجی برف

عوامل توپوگرافی موجود در تحقیق حاضر، ارتفاع و زاویه شیب می‌باشند. عوامل مذکور از روی مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قابلیت وضوح ۲۰ × ۲۰ متر تحت عنوان لایه‌های مختلف اطلاعاتی بدست آمدند. برای این منظور ابتدا نقشه رقومی خطوط میزان با فواصل ۲۰ متری از روی نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شد. سپس نقشه مدل رقومی ارتفاع محدوده با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه گشت. بر اساس مدل رقومی ارتفاع تهیه شده، نقشه رقومی زاویه شیب استخراج گردید.

اثر باد بر میزان برف انباشت نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. باد یکی از عوامل مؤثر بر چگونگی تغییرات مکانی خصوصیات برف‌انباشت و در نتیجه آب معادل برف می‌باشد. برف جابجا شده توسط باد[1] سبب تجمع چند برابر برف در مقایسه با برف ریزشی به تنهایی در برخی مناطق می‌شود (گری و میل ۱۹۸۱)، به طوری که باعث تشکیل مناطق بدون برف در مجاورت مناطقی با چندین برابر برف‌انباشت می‌گردد (وینسترال و همکاران ۲۰۰۲). برای بررسی تأثیر باد روی تغییرات مکانی برف‌انباشت و آب معادل برف از شاخص بادپناهی[2] استفاده شده است. شاخص بادپناهی، معیاری است که بر اساس برهم‌کنش باد و وضعیت پستی و بلندی محدوده که بادپناهی هر نقطه از سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، محاسبه می‌شود (شریفی ۱۳۸۶). لازم بذکر است که برای محاسبه شاخص بادپناهی یک نقطه، ابتدا می‌بایست محدوده تأثیر در بالادست نقطه مورد نظر، تعیین گردد. منطقه

[1] Drifted snow
[2] Maximum upwind slope

Archive of SID

www.SID.ir

مزبور عبارت از قطاعی از یک دایره به شعاع d_{max} و زاویه مرکزی q است که در بالادست نقطه و به طرف جهت باد غالب گسترده شده است. شعاع مرکزی قطاع مزبور منطبق بر امتداد باد غالب خواهد بود. درون محدوده مورد نظر، با مشخص نمودن امتدادهای معینی با فاصله زاویه‌ای یکسان ۵ درجه، به ازای هر یک از امتدادها، شاخص بادپناهی از طریق رابطه ۳ محاسبه گردید.

[۳]

$$Sx_{A,d} = (x_i, y_i) = \max\left[tg^{-1}\left(\frac{El(x_y, y_y) - El(x_i, y_i)}{\left[(x_y - x_i)^2 + (y_y - y_i)^2\right]^{0.5}} \right)\right]$$

در این رابطه، Sx شاخص بادپناهی (درجه)، A آزیموت امتداد در نظر گرفته شده برای محاسبه Sx، d_{max} حداکثر طول تأثیر (متر)، El ارتفاع نسبت به سطح دریا (متر)، y_i و x_i مختصات نقطه مورد نظر (UTM)، x_y و y_y مختصات نقاط قرار گرفته در امتداد A و تا حداکثر فاصله‌ی d_{max} از نقطه مورد نظر (UTM) می‌باشند (شریفی ۱۳۸۶). برای جزئیات بیشتر در مورد نحوه محاسبه شاخص بادپناهی به تحقیق طبری و همکاران (۲۰۱۰) مراجعه شود.

انتخاب پارامترهای مناسب برای روش وزنی در محیط GIS بسیار مهم می‌باشد و با انتخاب پارامترهای ورودی مناسب، سامانه اطلاعات جغرافیایی قادر خواهد بود که خروجی مطلوب‌تری ارائه دهد. هر یک از عوامل مؤثر بر توزیع مکانی آب معادل برف، نه تنها به قابل دسترس بودن آن بستگی دارد، بلکه معنی‌دار بودن اثر آن بر توزیع برف‌انباشت به موقعیت مکانی و زمانی بستگی دارد. عوامل مؤثر توپوگرافی و اقلیمی در مکان-ها و زمان‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. به عنوان مثال در ماه می، از میان عوامل مورد استفاده در تحقیق مولوچ و همکاران (۲۰۰۵)، دو عامل تابش خورشیدی و ارتفاع، به عنوان عوامل مؤثر بدست آمدند. درصورتی که برای ماه ژوئن عوامل تابش خورشیدی و شاخص بادپناهی به عنوان عوامل مؤثر شناخته شدند. الدر و همکاران (۱۹۹۱) برای حوضه‌های واقع در کالیفرنیا، عوامل ارتفاع، شیب و تابش را به عنوان عوامل مؤثر معرفی نمودند. در حالی که در حوضه‌های واقع در کلرادو، عوامل ارتفاع، شیب، تابش، شاخص بادپناهی به عنوان عوامل مؤثر شناخته شدند. با توجه به مطالعات پیشین و قابل دسترس بودن عوامل، در این تحقیق پارامترهای ارتفاع، زاویه شیب و شاخص بادپناهی جهت استفاده در روش وزنی انتخاب شده و برای اختصاص دادن وزن‌های مناسب به پارامترها، میزان تأثیر هر پارامتر بر ضخامت و آب معادل آن با استفاده از روش همبستگی خطی پیرسون[1] محاسبه گردید. بدین ترتیب علاوه بر ضخامت برف، پارامترهای ارتفاع، شاخص بادپناهی و زاویه شیب برای ۲۵۸ نقطه ضخامت‌سنجی برف اندازه‌گیری و محاسبه گردید.

تهیه نقشه توزیع مکانی آب معادل برف به روش وزنی

روش وزنی مبتنی بر اهمیت نسبی پارامترها می‌باشد. پارامترهای مؤثر بر آب معادل برف، بر اساس سلسله مراتب اهمیت، مرتب شدند و یک عدد وزنی به هر لایه نقشه داده شد. به طور مشابه به هر رده درون یک لایه، امتیازی اختصاص یافت. به رده‌های لایه‌های داده‌ای مختلف به صورت اطلاعات مشخصه در GIS، یک امتیاز اختصاص داده شده و یک نقشه مشخصه[2] برای هر لایه داده‌ای تهیه شد. سپس این نقشه‌های

[1] Pearson linear correlation
[2] Attribute map

Archive of SID

www.SID.ir

مشخصه در عدد وزنی متناظر ضرب گردید و پس از آن با استفاده از یک رابطه خطی، در سامانه اطلاعات جغرافیایی اضافه شد.

نقشه توزیع مکانی آب معادل برف به روش درون‌یابی

دستیابی به توزیع مکانی آب معادل برف و پهنه‌بندی آن مستلزم تعمیم مشاهدات نقطه‌ای محدود به سایر نقاط فاقد اندازه‌گیری است. زیرا امکان اندازه‌گیری خصوصیات برفی، نظیر آب معادل برف در هر نقطه وجود ندارد. لذا می‌بایست با اتکا به مقادیر اندازه‌گیری شده در برخی نقاط و بکاربردن روش یا روش‌های مناسب و سازگار، مقدار متغیر موردنظر را در نقاط فاقد اندازه‌گیری برآورد نمود (شریفی ۱۳۸۶). یکی از روش‌هایی که بدین منظور بکار می‌رود، درون‌یابی می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای درون‌یابی یک متغیر وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های کلاسیک نظیر تیسن و میانگین حسابی اشاره کرد. ولی این روش‌ها به دلیل در نظر نگرفتن موقعیت و آرایش داده‌ها و همبستگی بین آنها، از دقت کافی برخوردار نمی باشند (محمودی ۱۳۸۶). بنابراین استفاده از تخمین‌گرهای زمین‌آماری می‌تواند دقت محاسبات را افزایش دهد. ضمن آنکه این روش‌ها به راحتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی در دسترس هستند. به همین دلیل، در این تحقیق برای درون‌یابی آب معادل برف، روش کریگینگ، فاصله معکوس[1]، میانگین متحرک وزنی[2] و نزدیک‌ترین نقطه[3] مورد بررسی قرار گرفتند.

لازم به‌ذکر است که برای اعتبارسنجی روش‌ها از تکنیک ارزیابی[4] نقاط استفاده شده و معیار مقایسه و ارزیابی نیز میانگین خطای مطلق[5] بوده است (رابطه ۴).

$$MAE = \frac{\sum |X_i - X_j|}{n} \qquad [۴]$$

در این رابطه، X_i مقدار مشاهده‌ای، X_j مقدار برآورد شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

مناسب‌ترین روش، دارای کمترین مقدار خطا می‌باشد. به عبارت دیگر هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر آن روش است (هاتچینسون ۱۹۹۲). برای انتخاب روش مناسب، مقایسه چهار روش درون‌یابی فوق الذکر با تکنیک ارزیابی اجرا گردید و سپس برای هر روش میانگین خطای واقعی محاسبه شد. نهایتاً نقشه توزیعی آب معادل برف با استفاده از بهترین روش و به کمک نرم افزار ArcGIS تهیه شد.

میانگین متحرک وزنی

در روش میانگین متحرک وزنی، مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که نمونه‌برداری انجام نشده باشد، از روی نقاط مجاورش با استفاده از رابطه (۵) تخمین زده می‌شود. در این روش وزن‌ها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به موقعیت و نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه تخمین، تعیین می‌شوند. بدین ترتیب که به نقاط نزدیک‌تر، وزن بیشتری اختصاص داده می‌شود و نقاط دارای فاصله یکسان، وزن یکسانی دریافت می‌کنند. در واقع نقاط با فاصله کمتر، اثر بیشتری بر تخمین می‌گذارند. مقدار وزن در این روش از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

[1] Inverse distance
[2] Weighing moving average
[3] Nearest point
[4] Cross validation
[5] Mean absolute error

Archive of SID
www.SID.ir

$$l_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^{n} D_i^{-a}} \qquad [۵]$$

در این رابطه، D_i فاصله نقطه مشاهده شده i ام تا نقطه تخمین زده‌شده، a توان وزن‌دهی فاصله و n تعداد نقاط همسایگی می‌باشد (دلبری و همکاران 1383).

کریجینگ

یکی از روش‌های پیشرفته زمین‌آماری است که بر اساس تحلیل نیم‌تغییرنما[1] استوار می‌باشد. نیم‌تغییرنما یکی از روش‌های محاسبه تغییرات مکانی است که هدف اصلی از برقرار کردن تابع آن شناسایی ساختار تغییرپذیری متغیر نسبت به فاصله مکانی می‌باشد، در صورتی که آمار کلاسیک دارای چنین قابلیتی نمی‌باشد. از نظر تعریف، اگر واریانس بین نقاطی با فاصله h کوچک باشد، نشانه وابستگی بیشتر متغیر بین آن نقاط است. این واریانس وابسته به فاصله، نیم‌تغییرنما نامیده می‌شود که آن را با $g(h)$ نشان می‌دهند. تابع نیم-تغییرنما، تغییرات یک پارامتر را با در نظر گرفتن فاصله به صورت معادله زیر نشان می‌دهد:

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad [٦]$$

که در آن، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ مقادیر متغیر به ترتیب در نقاط x_i و x_i+h و $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های بکار رفته به ازای هر فاصله h می‌باشد.

به عبارت دیگر، کریجینگ تخمینگری ناریب است که تنها یک متغیر را پیش‌بینی می‌نماید. شرط ناریب بودن در سایر روش‌های تخمین، نظیر روش چندجمله‌ای و فاصله معکوس نیز اعمال می‌شود ولی ویژگی کریجینگ در آن است که در عین ناریب بودن، واریانس تخمین نیز حداقل می‌باشد. به عبارت دیگر در این روش از اطلاعات موجود به بهترین نحو استفاده شده است. بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز ارائه می‌دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به‌فرد کریجینگ، می توان قسمت‌هایی که در آنجا خطا زیاد است و برای کاهش آن به داده‌های بیشتری نیاز است را مشخص نمود. همچنین می‌توان میزان کاهش واریانس تخمین را به ازای یک نمونه اضافی قبل از نمونه‌گیری تعیین کرد. لذا با استفاده از واریانس تخمین می‌توان بهترین نقاط نمونه‌برداری را پیشنهاد نمود (گلمحمدی و همکاران ۱۳۸۷).

نزدیکترین نقطه

این تکنیک برای تعداد نقاط مجهول نسبتاً کم کاربرد داشته و مقدار عددی نزدیک‌ترین نقطه از نظر فاصله اقلیدسی به نقطه مورد تخمین را برای آن لحاظ می‌کند. این روش قابلیت برون‌یابی خارج از دامنه تغییرات را ندارد (حسینعلی‌زاده و همکاران ۱۳۸۵).

فاصله معکوس

تابع فاصله معکوس در مقادیر اندازه‌گیری‌شده با صحت بالا و دامنه تغییرات کم درون هر پیکسل نقشه کاربرد دارد و مقادیر محاسبه شده‌ای برابر مقادیر ورودی را محاسبه می‌نماید. این تابع، خطای کلی را طی تصحیح کردن اندازه‌گیری‌های اشتباه، با نقاط نزدیک کاهش داده و در نتیجه مقادیر محاسبه شده، لزوماً با مقادیر اندازه‌گیری شده انطباق نخواهند داشت (حسینعلی زاده و همکاران ۱۳۸۵).

[1] Semi-variogram

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج و بحث

برای تعیین مؤثرترین عوامل بر آب معادل برف برای استفاده در روش وزنی در محدوده مورد مطالعه، از همبستگی پیرسون نرم‌افزار MINITAB استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، آب معادل برف دارای رابطه معنی‌داری با عوامل ارتفاع زمین و شاخص بادپناهی در سطح ۹۹ درصد و با زاویه شیب در سطح ۹۵ درصد می‌باشد. به طور کلی با توجه به ضریب همبستگی پیرسون و سطح معنی‌داری ارائه شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که پارامترهای ارتفاع از سطح دریا، شاخص بادپناهی و زاویه شیب، به ترتیب مؤثرترین عوامل بر آب معادل برف در حوضه مورد مطالعه می‌باشند. به این پارامترها بر اساس میزان تأثیرشان یک عدد وزنی اختصاص یافت. جدول ۲ وزن‌ها و امتیازات اختصاص داده شده به هر لایه داده‌ای و رده‌های آنها را نشان می‌دهد. جین و همکاران (۲۰۰۹) نیز ارتفاع را به عنوان یک پارامتر مؤثر بر برف انباشت در حوضه‌ای در هیمالیا معرفی نمودند.

جدول 1- آماره‌های مربوط به عوامل مؤثر بر آب معادل برف

عوامل	ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری
ارتفاع از سطح دریا	0/512	0/00
شاخص بادپناهی	0/445	0/00
زاویه شیب	0/125	0/045

در شکل‌های ۳ و ۴، مدل رقومی ارتفاع و نقشه شیب محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، این محدوده دارای توپوگرافی مواج بوده و میزان شیب آن از کمتر از ۲۰ درجه تا بیش از ۱۵۰ درجه تغییر می‌نماید. به‌منظور تحلیل بهتر شیب، مقادیر آن به شش رده تقسیم شده است که در شکل مذکور نشان داده شده است. نقشه شاخص بادپناهی در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیش از ۹۰ درصد محدوده مورد مطالعه بادپناه می‌باشد و تنها قسمت‌های کوچکی در شمال شرقی و جنوب غربی محدوده مزبور بادروب است. شاخص بادپناهی به شش رده تقسیم شده که مقدار آن از کمتر از ۱۶- تا بیش از ۳۰ تغییر می‌کند. شایان ذکر است که به مقادیر منفی شاخص بادپناهی، شاخص بادروبی اطلاق می‌گردد.

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز (مطابق با جدول ۲)، نقشه توزیع مکانی آب معادل برف به روش وزنی تهیه گردید. این نقشه به چهار رده کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد بیش از نیمی از مساحت محدوده مورد مطالعه در رده آب معادل برف کم و متوسط قرار گرفته است. نتایج حاصل از تلفیق لایه‌های آب معادل برف وزنی، مدل رقومی ارتفاع، شاخص بادپناهی و شیب نشان می‌دهد که مناطق دارای عمق آب معادل برف زیاد و خیلی زیاد غالباً در ارتفاعات بالا، شیب‌های ملایم و نواحی دارای شاخص بادپناهی زیاد می‌باشند.

مقادیر MAE روش‌های مختلف درون‌یابی در جدول ۳ ارائه شده است. روش کریجینگ معمولی با مدل کروی[1] با MAE برابر با ۱۶/۲۳ سانتی‌متر، بهترین روش درون‌یابی بوده که برای تبدیل نقشه نقطه‌ای[2] به نقشه رستری[3] آب معادل برف از همین روش درون‌یابی

[1] Spherical
[2] Point map
[3] Raster map

Archive of SID

www.SID.ir

استفاده شده است. سپس به کمک نرم افزار ArcGIS نقشه توزیع مکانی آب معادل برف تهیه گردید.

جدول 2- سیستم وزن‌دهی و امتیازدهی مورد استفاده در این تحقیق

داده‌ها	رده‌ها	وزن‌دهی	امتیازدهی
ارتفاع	بسیار زیاد	8	10
	زیاد		9
	متوسط		8
	متوسط تا کم		7
	کم		6
	بسیار کم		5
شاخص بادپناهی	بادپناه زیاد	7	10
	بادپناه متوسط		9
	بادپناه کم		8
	بادروب کم		7
	بادروب متوسط		6
	بادروب زیاد		5
شیب	بسیار ملایم	6	10
	ملایم		9
	متوسط تا ملایم		8
	متوسط		7
	تند		6
	بسیار تند		5

در شکل ۷، نقشه توزیع مکانی آب معادل برف به روش درون‌یابی (کریجینگ معمولی) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد مقدار آب معادل برف از شرق به غرب محدوده مورد مطالعه افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر قسمت‌های شرقی محدوده مورد مطالعه دارای بیشترین مقدار آب معادل برف می‌باشند. این موضوع به واسطه افزایش ارتفاع (به عنوان مهمترین عامل مؤثر بر برف‌انباشت و آب معادل برف) از شرق به غرب محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

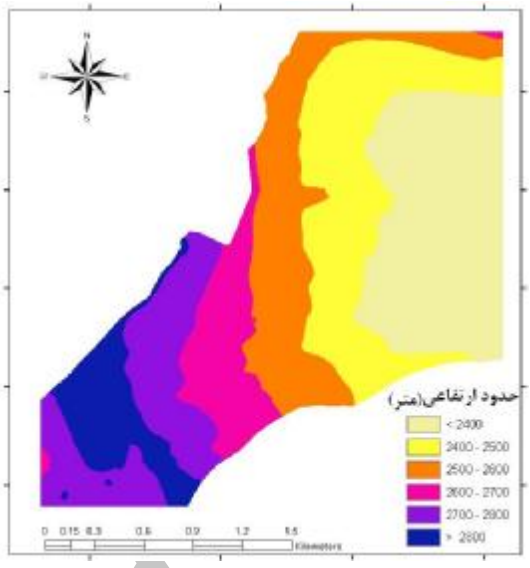
جدول 3- مقادیر آماره میانگین خطای مطلق برای روش‌های مختلف درون‌یابی

روش درون‌یابی	میانگین خطای مطلق (سانتی‌متر)
میانگین متحرک	25/87
نزدیکترین نقطه	23/17
فاصله معکوس	28/15
کریجینگ معمولی	16/23

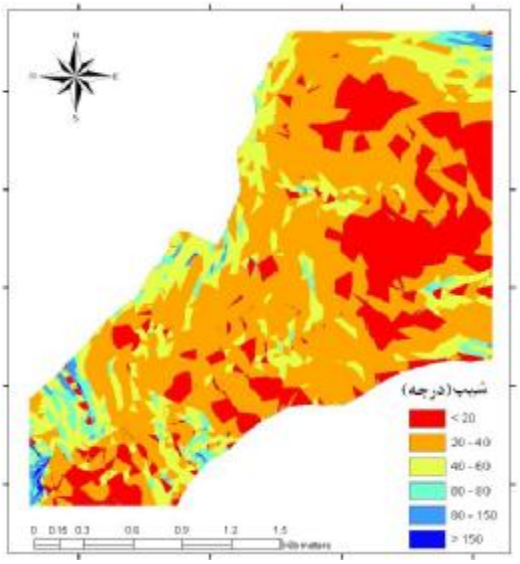
Archive of SID

www.SID.ir

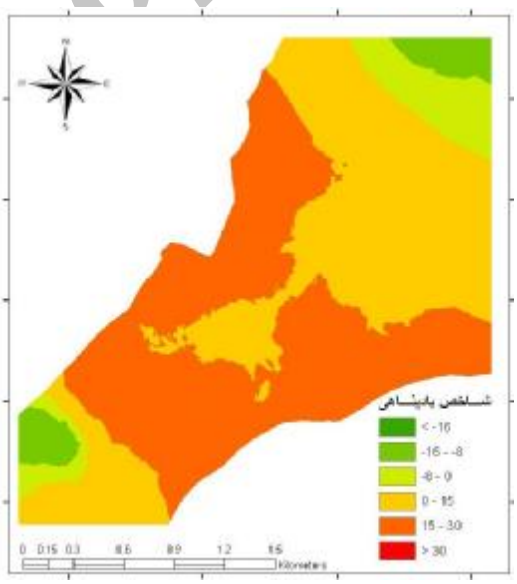
شکل



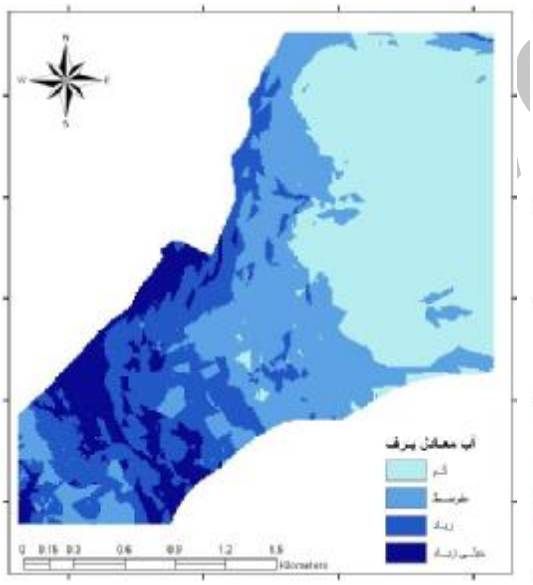
شکل 3- مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه



شکل 4- نقشه شیب منطقه مورد مطالعه

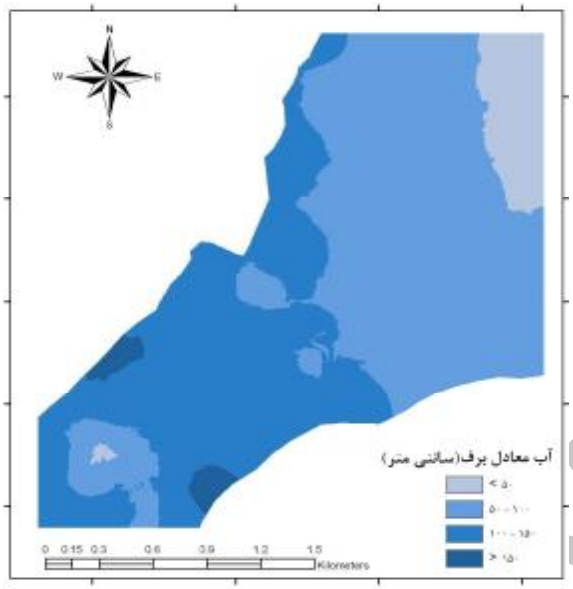


شکل 5- نقشه شاخص بادپناهی منطقه مورد مطالعه



شکل 6- نقشه توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از روش وزنی

www.SID.ir



شکل 7- نقشه توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از روش درون‌یابی

با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که توزیع مکانی آب معادل برف حاصل از روش وزنی مطابقت خوبی با نقشه توزیعی بدست آمده از روش درون‌یابی دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش وزنی قادر به برآورد قابل قبول توزیع مکانی آب معادل برف می‌باشد و از این روش می‌توان جهت بررسی توزیع مکانی آب معادل برف به منظور مدیریت بهینه منابع آب بکار برد. روش وزنی در برآورد رواناب و فرسایش خاک (شادمانی و همکاران ۱۳۸۷، جاسروتیا و سینگ ۲۰۰۶) نیز موفق عمل کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق دارای عمق آب معادل برف زیاد و خیلی زیاد غالباً در ارتفاعات بالا، شیب‌های ملایم و نواحی دارای شاخص بادپناهی زیاد می‌باشند. پارامترهای ارتفاع، شاخص بادپناهی و شیب به‌ترتیب مؤثرترین عوامل بر ضخامت برف و آب معادل آن می‌باشند و از این پارامترهای می‌توان جهت برآورد آب معادل برف در حوضه‌های برف‌گیر کشور استفاده نمود. مقدار آب معادل برف در محدوده مورد مطالعه از شرق به غرب افزایش می‌یابد و با افزایش ارتفاع، سطوح با عمق آب معادل برف بیشتر به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج این تحقیق کارایی بالای روش وزنی در محیط GIS را در تخمین توزیع مکانی آب معادل برف مورد تأیید قرار داد. بنابراین این روش را می‌توان در بررسی توزیع مکانی آب معادل برف به عنوان یک پارامتر مؤثر در مدیریت منابع آب در دیگر حوضه‌های آبریز کشور نیز بکار برد. شناخت دقیق پراکنش مکانی ذخایر آبی در حوضه‌های کوهستانی به صورت برف در اعمال مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به پیچیدگی و مشکلات اندازه‌گیری خصوصیات برف در مناطق کوهستانی دستیابی به اطلاعات مکانی برف از جمله ضخامت و آب معادل آن می‌تواند در امر توسعه و اصلاح شبکه برف-سنجی موجود، برنامه‌ریزی عملیات صحرایی سنجش برف سالانه، مدیریت خشکسالی و پیش‌بینی رواناب فصلی سودمند باشد. لذا با توجه به تحقیقات بسیار معدود صورت گرفته در این زمینه، انجام مطالعات بیشتر می‌تواند کمک شایانی به حل مشکلات کم آبی دشت‌های خشک جنوب البرز و شرق زاگرس نماید.

Archive of SID

www.SID.ir

منابع مورد استفاده

اسلامی، م و فیروزبخت ع، ۱۳۷۳. بررسی توزیع مکانی بارش برف در حوضه‌های دز و کارون. صفحه‌های۳۹-۲۵. اولین سمینار هیدرولوژی برف و یخ. فروردین سال 1387، دانشگاه ارومیه، ارومیه.

بیرودیان ن، ۱۳۸۳. برف و بهمن: مدیریت مناطق برفگیر، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

پرهمت ج، ۱۳۸۱. مدل توزیعی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم GIS. رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

حجام س و شرعی‌پور ز، ۱۳۸۲. ذوب برف در حوضه آبریز طالقان. مجله پژوهش‌های جغرافیایی، جلد ۳۵، شماره ۴۶، صفحه‌های ۶۲-۴۹.

حسینعلی‌زاده م، ایوبی ش ا و شتایی ش، ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در برآورد برخی خصوصیات خاک سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مهر سبزوار). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، صفحه‌های ۱۶۲-۱۵۲.

دلبری م، خیاط خلقی م و مهدیان م ح، ۱۳۸۳. ارزیابی روشهای زمین‌آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵، صفحه‌های ۱۲-۱.

شادمانی م، طبری ح و معروفی ص، ۱۳۸۷. برآورد پتانسیل رواناب با استفاده از GIS در حوضه آبریز خسروآباد. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۲۳ تا ۲۵ مهر 1387، دانشگاه تبریز، تبریز.

شریفی م، ۱۳۸۶. بررسی توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از روش‌های ترکیبی. رساله دکتری، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

طبری ح، معروفی ص، زارع ابیانه ح، امیری چایجان ر و شریفی، م ر، ۱۳۸۸. مقایسه روش رگرسیون غیرخطی با روش-های هوش محاسباتی در برآورد توزیع مکانی آب معادل برف در سراب کارون. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، صفحه‌های ۴۱-۲۹.

طبری ح، ۱۳۸۸. بررسی توزیع مکانی آب معادل برف با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در زیر حوضه کارون علیا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

گلمحمدی گ, معروفی ص و محمدی ک، ۱۳۸۷. منطقه‌ای نمودن ضریب رواناب در استان همدان با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و GIS. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۴۶، صفحه‌های ۱۵-۱.

محمودی م، ۱۳۸۶. بررسی و مکان‌یابی عرصه‌های مستعد پخش سیلاب در حوضه آبخیز پشتکوه با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان.

Archive of SID

www.SID.ir

معروفی ص، طبری ح، زارع ابیانه ح، شریفی م ر و آخوندعلی ع م، ۱۳۸۸. پهنه‌بندی آب معادل برف در یکی از زیرحوضه‌های کوهستانی کارون با استفاده از GIS (مطالعه موردی: زیرحوضه صمصامی). علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۶، صفحه‌های ۴۱-۲۹.

مهدوی ر، عابدی کوپایی ج، رضایی م و عبدالحسینی م، ۱۳۸۳. مکان‌یابی محل‌های مناسب تغذیه مصنوعی منابع آب زیرزمینی از طریق RS و GIS. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، سال ۱۳۸۳، دانشکده کشاورزی شیراز.

Anbazhagan S, Ramasamy SM and Das Gupta S, 2005. Remote sensing and GIS for artificial recharge study, runoff estimation and planning in Ayyar basin, Tamil Nadu, India. Environmental Geololgy 48: 158–170.

Casa R, Rossi M, Sappa G and Trotta A, 2008. Assessing cropwater demand by remote sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy. Water Resources Management

Durand M, Molotch NP and Margulis SA, 2007. Merging complementary remote sensing datasets in the context of snow water equivalent reconstruction. Remote Sensing of Environment 122: 1212–1225.

Elder K and Dozier J, 1990. Improving method for measurement and estimation of snow storage in Alpine watershed. Hydrology in Mountainous Regions, 1-Hydrological Measurement; the Water Cycle, IAHS Publ., No. 193: 147–156.

Elder K, Dozier J and Michaelsen J, 1991. Snow accumulation and distribution in an Alpine Watershed. Water Resources Research 27: 1541–1552.

Elder K, Michaelsen J and Dozier J, 1995. Small basin modeling of snow water equivalent using binary regression tree methods. IAHS Publ., No. 228.

Erikson TA, Williams MW and Winstral A, 2005. Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain, Colorado, United States. Water Resources Research 41: 1–17.

Ghayoumian J, Mohseni Saravi M, Feiznia S, Nouri B and Malekian A, 2007. Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. Journal of Asian Earth Sciences 30: 364–374.

Gray DM and Male DH, 1981. Handbook of snow, Pergamon Press. Canada Ltd.

Hutchinson MF, 1992. Spline A and LAPPNT, Center for Resource and Environmental Studies. Australian National University, Conberra, Australia.

Jain SK, Goswami A, Saraf AK 2009. Role of elevation and aspect in snow distribution in western Himalaya. Water Resour Manag 23:71–83

Jasrotia AS and Singh R, 2006. Modeling runoff and soil erosion in a catchment area, using the GIS, in the Himalayan region, India. Environmental Geololgy 51: 29–37.

Archive of SID

www.SID.ir

Mckeay GA and Gray DM, 1981. The distribution of snow cover, Pp. 153-190. *In*: Gray D M and Male DH(eds), Handbook of snow, Pergamon, New York.

Mizukami N, Decker R and Julander R, 2003. Modelling of snow water equivalent distribution in a meso-scale mountainous watershed with GIS. Western Snow Conference, Aprill 22-25, Scottsdale, Arizona. USA.

Molotch NP, Colee MT, Bales RC and Dozier J, 2005. Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in an alpine basin using binary regression tree models: the impact of digital elevation data independent variable selection. Hydrological Processes 19(7): 1459–1479.

Pecušová Z, Parajka J and Hrušková K, 2002. Spatial estimation of snow water equivalent in the mountain basin Bystra. ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference, Demänovská dolina, Slovakia.

Skaugen T, 2007. Modelling the spatial variability of snow water equivalent at the catchment scale, Hydrol Earth System Sciences 11: 1543–1550.

Tabari H, Marofi S, Zare Abyaneh H, Sharifi MR, 2010. Comparison of artificial neural network and combined models in estimating spatial distribution of snow depth and snow water equivalent in Samsami basin of Iran. Neural Computing and Applications 19:625–635.

Tapsoba D, Fortin V, Anctil F and Hache M, 2005. Use of the kriging technique with external drift for a map of the water equivalent of snow: application to the Gatineau River Basin. Canadian Journal of Civil Engineering 32: 289–297.

Winstral A, Elder K and Davis RE 2002. Spatial snow modeling of wind-redistributed snow using terrain based parameters. Journal of Hydrometeorology 3: 524–5238.

.

Archive of SID

www.SID.ir