مدل رواناب ذوب برف (SRM)

٦- شبیه‌سازی رواناب سالانه برای آب‌و هوای تغییر یافته

مدل SRM از پایش ماهواره‌ای پوشش برف واقعی در شرایط آب‌وهوایی موجود، برای ایجاد پوشش برف و رواناب در شرایط آب‌وهوایی تغییر یافته استفاده می‌کند. این کار به روش پیچیده‌تری (پیشرفته‌تری) نیاز دارد، اما به دلیل مبهم بودن پوشش برف ساختگی، از شبیه‌سازی به کمک بارش و دماهای حدی (آستانه) قراردادی اجتناب می‌شود. در هر رویدادی، مدل SRM این کار را به اتمام می‌رساند که شامل نتایج خروجی از هیدروگرافها و اشکال، جداول، در عرض چند دقیقه می‌باشد. مزیت دیگر عدم نیاز به کالیبره کردن این است که می‌تواند پارامترهای مدل را به صورت معنی داری بر حسب زمان تغییر دهد (انتقال دهد) یا اگر پارامترها به وسیله طرح‌های (سناریو های) آب‌وهوایی نشان داده شوند، آنها را تنظیم کند.

اگر مدل SRM تنها برای پیش‌بینی مناطق پوشش برف و تجمع برف منطقه‌ای در آب‌وهوای تغییر یافته به کار گرفته شود (برای مثال در مناطق کوهستانی که حوضه‌های هیدرولوژیکی نمی‌باشند) برنامه کامپیوتری به داده‌های زیر نیاز دارد:

- تعداد مناطق مرتفع یا ارتفاعات، مساحت آنها و متوسط ارتفاعات هیپسومتریک
- مناطق پوشش برف موجود، مقادیر روزانه (S)
- متوسط روزانه دما یا دماهای حداقل و حداکثر (T)
- بارش روزانه (P)
- عامل درجه-روز (a)
- میزان افت دما یا افتاهنگ دما (y)
- دمای بحرانی (T_{CRIT})

برای محاسبه رواناب، دیگر پارامترهای مورد نیاز مدل SRM عبارتند از: C_S، C_R، RCA، k، L و Q اولیه.

تاکنون مدل SRM معمولاً در شبیه‌سازی یا پیش‌بینی رواناب در طول فصل ذوب برف به کار برده می‌شده است. این برنامه فقط برای آزمایش‌های بین‌المللی از عملکرد مدل در طول یک سال اجرا می‌شد (WMO، ۱۹۸۶). با این وجود،

تغییر در آب‌وهوا به عنوان زمینه جدید کاربردی، نیازمند اجرای مدل SRM در طول کل سال هیدرولوژیکی داشت. بنابراین مشکل اجرای زمستانی در بخش بعدی مطرح می‌شود.

٦-١- محاسبه رواناب ذوب برف در نیم سال زمستانی

در نیم سال زمستانی (معمولاً اکتبر- مارس در نیمکره شمالی) سنجش پوشش برف بسیار مشکل‌تر از فصل ذوب برف می‌باشد. داده‌های ماهواره‌ای (در صورت قابلیت دسترس بودن به اندازه کافی) برای تشخیص پوشش برف ثابت، از بارش-های برف مکرر بی‌ثبات (زودگذر) که بعداً ذوب می‌شوند تکرار نمی‌شود. فرض پوشش برف پایدار بین دو سنجش ماهواره‌ای موجود ممکن است منجر به بیش‌برآوردی پوشش برف شود.

گزینه ۱: S را مساوی صفر قرار دهید (S=۰) به طوریکه بارش شناسایی شده به وسیله T_{CRIT} به صورت برف به طور خودکار ذخیره شده و در نتیجه در کل منطقه ذوب شود (۱-S=۱). این روش فقط در صورتی کاربرد دارد که داده‌های بارش ورودی بطور مناسب تنظیم شده باشند. این امر در اغلب موارد به خاطر کمبود چشمگیر باران‌سنج‌ها و عدم سنجش در ارتفاعات بالای مناطق کوهستانی، امکان‌پذیر نمی‌باشد. دلیل آن این است که مدل SRM هر زمان که برای محاسبه رواناب ورودی مناسب باشد، از سطح پوشیده از برف استفاده می‌کند.

گزینه ۲: پوشش برف پایدار را برای مثال در ژانویه و فوریه در نظر بگیرید (S=۱ یا کمی کمتر در زمین ناهموار) و در اکتبر و دسامبر مساوی صفر می‌باشد (S=۰). اگر از روی داده‌های ماهواره‌ای در اول آوریل S=۱ باشد، در مارس نیز S را مساوی یک فرض کنید. اگر در اول آوریل S کمتر از یک باشد، پوشش برف در مارس صفر قرار داده می‌شود که احتمالاً دقیق‌تر است و درون‌یابی از ۱ در اول مارس تا مقدار S در اول آوریل می‌باشد. طبیعتاً برای قسمت طولانی‌تر در زمستان در مناطق مرتفع‌تر S=۱ می‌تواند در نظر گرفته شود در حالی که در مناطق پست تر احتمالاً گزینه ۱ ترجیح داده می‌شود. برنامه، پوشش برف برآورد شده را برای شرایط آب و هوایی موجود بدون تغییر اجرا کرده و ادامه می‌دهد. بنابراین توصیه می‌شود پوشش برف کامل فقط در ماه‌هایی که در اواخر آب و هوای گرمتر است، فرض شود.

زمانی که$S=1$ ارائه شود، مدل SRM ذخیره بارش برف موقتی قبلی را حذف می‌کند چون چنین برفی بخشی از پوشش برف فصلی می‌باشد. ذخیره برف نیز به صورت خودکار در ۱ آوریل حذف می‌شود چون تمام برف‌های موجود به وسیله منحنی‌های فرسایشی پوشش برف محاسبه می‌شوند. بنابراین با محاسبه متغیرها، مدل SRM به شکل معمول عمل می‌کند. چون پوشش برف برآورد شده دقت کمتری از CDC در تابستان دارد، آب معادل برف جدید فوراً با همزمان شدن (S–۱) برای جلوگیری از به وجود آمدن S غیریکنواخت موثر بر محاسبه ذوب روز بعد، کاهش داده می‌شود. این انحرافات در روش تابستانی در بخش ۱۱–۳–۳ جدول ۱۱–۲ توضیح داده شد.

پارامترهای مدل باید با شرایط زمستانی تطبیق داده شوند. به خصوص ثابت‌های x و y فرمول پسروی (رابطه ۱۱–۱۷) که معمولاً برای شرایط تابستانی بدست آمده، دبی را بطور زیادی کاهش می‌دهد طوری که فرمول پسروی کندتری نمایان شود. با استفاده از معادله ۱۱–۱۴ x و y می‌توانند برای جلوگیری از تخلیه (دبی) از گودال زیر یک سطح انتخاب شده، بعد از یک دوره پس‌روی طولانی تنظیم شود. نظر به بارش‌های برف مکرر، مقادیر فاکتور درجه–روز پایین‌تر از مقادیر به کار رفته در تابستان پیشنهاد می‌شود. مقادیر C_S و C_R بالاتری در تابستان می‌توانند پیش‌بینی شوند. هدف اصلی شبیه‌سازی رواناب زمستانی، ارزیابی توزیع مجدد رواناب در نیم سال‌های تابستان و زمستان می‌باشد. پس محاسبه حجم رواناب زمستانی دقیق برای تلاش در بهبود دقت روزانه (R^2) بسیار مهم می‌باشد.

تغییر تجمع برف در آب‌وهوای جدید

در نخستین مرحله، تأثیر تغییر آب‌وهوا بر مناطق پوشش برف و رواناب فقط در نیم سال تابستانی، با فرض پوشش برف اولیه بدون تغییر در ۱ آوریل، (مارتینس و همکاران، ۱۹۹۴، ۱۹۹۸) ارزیابی شده است. به خاطر اینکه دمای سراسر سال افزایش می‌یابد، پوشش فصلی برف در ۱ آوریل بوسیله ذوب برف اضافی از آب معادل برف مشخص کم می شود و مقداری از بارش‌ها از اکتبر تا مارس از برف به باران تبدیل می‌شوند. این کاهش آب معادل برف از طریق نوشتن مجدد بخشی از ورودی فرمول مدل SRM به ترتیب رابطه (۱۱–۲۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

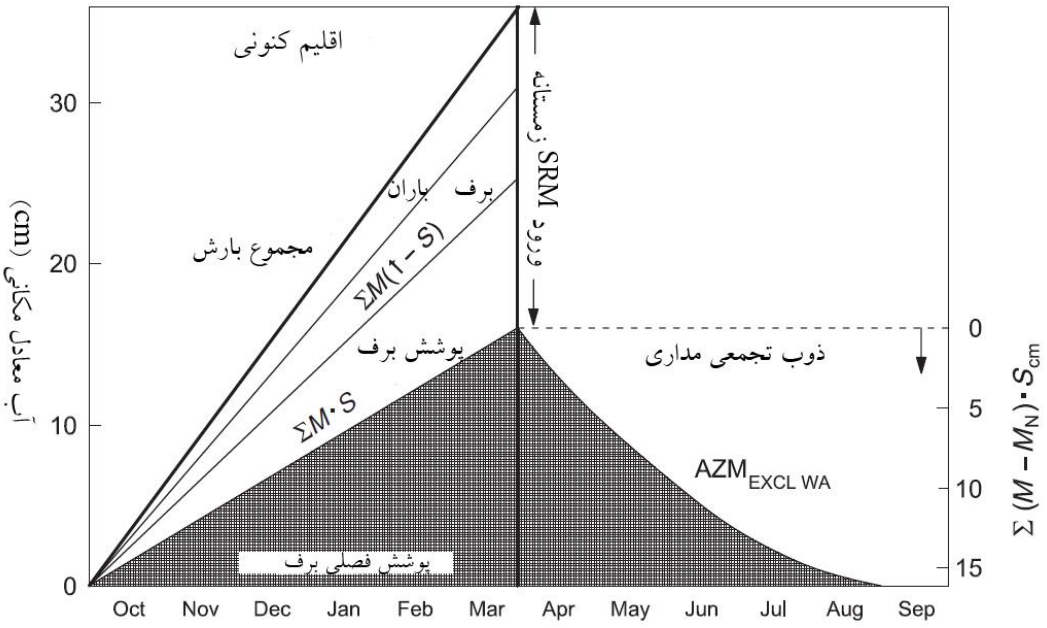
$$\Delta H_W = \sum_{n=1}^{182}\left[a_n.T_n + a_n.T_n\left(1-S_n\right)+P_{Rn}\right]-\sum_{n=1}^{182}a_n.\overline{T}_n.\overline{S}_n + a_n.\overline{T}_n\left(1-\overline{S}_n\right)+\overline{P}_{Rn} \qquad (۱۱–۲۳)$$

که ΔH_w تفاوت بین آب معادل واقعی حال و آینده پوشش برف در ۱ آوریل (سانتیمتر)؛ a فاکتور درجه–روز؛ T دمای آب و هوای موجود در ارتفاع متوسط هیپسومتریک مانند درجه– روزها (درجه روز)؛ 'T دما در شرایط آب و هوای گرمتر مانند درجه روزها؛ S نسبت منطقه پوشش برف برای کل منطقه، شرایط آب و هوایی موجود؛ 'S نسبت منطقه پوشش برف برای کل منطقه، شرایط آب و هوایی گرمتر؛ P_R بارش باران بر اساس دمای بحرانی هوای موجود؛ P'_R بارش باران مطابق دمای بحرانی هوای گرم؛ ۱۸۲ تعداد روزها از اکتبر تا مارس می‌باشند.

معادله (۱۱–۲۳) ورودی مدل SRM به رواناب را که شامل ذوب برف ناشی از پوشش برف پایدار (S)، بارش و ذوب برفی که به طور موقت منطقه بدون برف (۱–S) را پوشش می‌دهد، خلاصه می کند. تفاوت بین پوشش برف موقتی و ثابت (پایدار) در طول تجمع برف در زمستان به خاطر کافی نبودن پایش ماهواره‌ای، معمولاً قراردادی می باشد ولی کل ورودی-های ذوب برف همیشه برابر صد در صد ذوب برف رخ داده M می‌باشد:

$$M.S + M(1-S) = M(S+1-S) = M \qquad (۱۱–۲۴)$$

با این وجود اگر در مارس S در صفر قرار گیرد و پوشش برف پایدار نیز وجود داشته باشد و بارش برف کمی رخ داده باشد، ورودی ذوب برف می‌تواند کم برآورد باشد. شکل ۱۱–۲۰ آب معادل پوشش برف را در ۱ آوریل بصورت تفاوت بین بارش زمستانی و ورودی زمستانی برای رواناب نشان می‌دهد. این آب معادل می‌تواند از طریق جمع‌آوری عمق‌های ذوب منطقه-ای روزانه نیز محاسبه شود. در این مثال فرضی، آب معادل تعیین شده، در هر صورت وجود دارد. در شرایط طبیعی، اختلاف در محاسبه عمدتاً به دلیل مشکلاتی پیش‌بینی شده در سنجش مقدار بارش واقعی برای نواحی کوهستانی مورد انتظار می-باشد. در چنین مواردی، توصیه می‌شود که مقداری از ذوب منطقه‌ای تجمعی به میزان قابل اطمینان تری در نظر گرفته شود. مقدار ذوب منطقه‌ای تجمعی ممکن است حتی برای اصلاح داده‌های بارش زمستانی و برآورد گرادیان ارتفاع بارش به کاربرده شود.

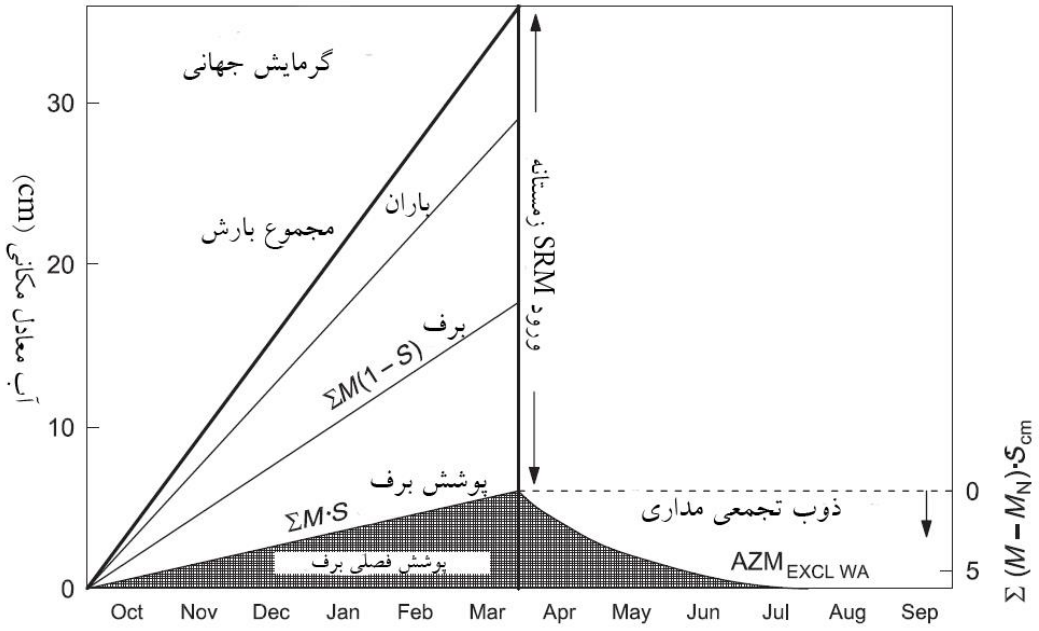


شکل ۱۱–۲۰– نمایی از تجمع برف در زمستان و ذوب برف در تابستان در اقلیم موجود (مثال فرضی)

امتیاز دیگر این روش این است که ته‌نشینی مجدد برف به وسیله باد را که در طول فصل متراکم شدن ایجاد می‌شود، در نظر می‌گیرد. از طرف دیگر هیچ تلفاتی به طور نرمال قابل ملاحظه نیست (تلفات مشخص شده بوسیله ضریب رواناب فرض می‌شود، بعد از این که آب ذوب شده پوشش برف را ترک کرده باشد). اگر تبخیر معنی‌داری از سطح برف روی دهد با نگاهی به گذشته این امر ممکن است منجر به کم برآوردی آب معادل برف گردد. با این وجود، اگر نسبت‌های درجه–روز که از اندازه‌گیری لایسیمتر تحت شرایط تبخیری مشابه به دست آورده می شود، به کار گرفته شود، این خطا از بین می‌رود. در شرایط اقلیمی گرمتر، سهم ورودی فصل زمستان به رواناب، افزایش می‌یابد مانند شکل (۱۱–۲۱)، بطوریکه برف در ۱ آوریل در صورتی که بارش زمستانی بدون تغییر باقی بماند، کمتر خواهد شد. تأثیر ترکیبی آب‌وهوای گرمتر و افزایش بارش زمستانی، در موارد نادری (دماهای پایین در کوه‌های مرتفع با تأثیر کم یا بدون تأثیر در افزایش دما) می‌تواند منجر به افزایش تجمع برف شود.

شبیه سازی رواناب در سناریو های اقلیمی آینده

برای ارزیابی تأثیر آب‌وهوای گرمتر بر رواناب در حوضه‌های کوهستانی، برنامه SRM از پوشش بـرف فصـلی واقعـی موجود، با استفاده از پایش ماهواره‌ها و مدل‌های پوشش برف فصلی تحت تأثیر آب‌وهوا، استفاده مـی‌کنـد. شـرایط بـرف در آینده بر حسب مناطق پوشیده از برف و آب معادل برف در مناطق ارتفاعی مختلـف اطلاعـات مفیـدی بـرای برنامـه ریـزی مدیریت آب و گردشگری در زمستان مهیا می‌کند. با استفاده از داده‌های مربوط به پوشش برف به عنوان ورودی‌هـای مـدل، روانابی که تحت تأثیر آب‌وهوا قرار گرفته در کل سال هیدرولوژیکی محاسبه می‌شود. این محاسبه به ما این امکـان را مـی-دهد که تغییرات پیک‌های رواناب روزانه و توزیع مجدد حجم رواناب در نیمه‌های زمستان و تابستان را تخمین بزنیم.



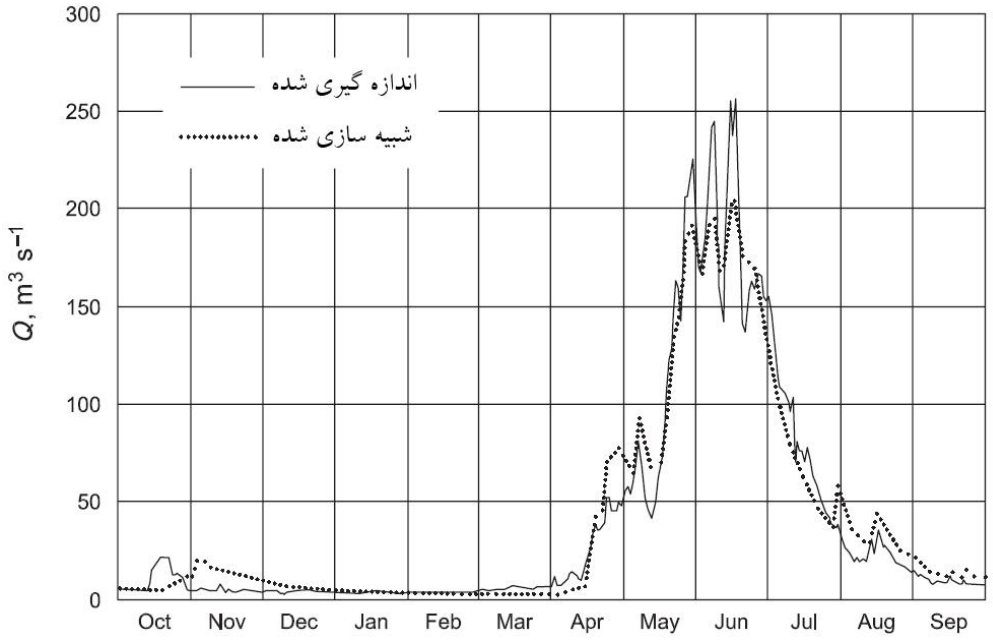
شکل ۱۱-۲۱- نمایی از تجمع برف در زمستان و ذوب برف در تابستان در یک اقلیم گرمتر (مثال فرضی).

این روش به وسیله ارزیابی اثر افزایش ۴ درجه سانتیگرادی دما روی رواناب در حوضه ریوگراند در دل نوته (با مساحت ۳۴۱۹ کیلومترمربع، دامنه ارتفاعی ۴۲-۱۵-۲۴۳۲ متری از سطح دریا و مناطق ارتفاعی A، B، C) در سال هیدرولوژیکی ۱۹۷۹ نشان داده شده است. از علائم زیر برای نمایش استفاده شده است:

CDC، منحنی فرسایشی (کاهشی) منطقه پوشش برف درون‌یابی شده از روی نقشه پوشش برف دوره‌ای،

MDC_{INCL}، منحنی فرسایشی (کاهشی) اصلاح شده منطقه پوشش برف با در نظر گرفتن برف جدید. این منحنی از CDC، از طریق ربط دادن پوشش برف به عمق برف ذوب شده تجمعی محاسبه شده، به دست آمده، که نشان می‌دهد چه مقدار از برف (شامل برف جدید باریده در طول دوره ذوب برف) باید ذوب شود (بر حسب عمق برف محاسبه شده) تا به نسبت مشخصی از کل ناحیه و در نهایت به صفر کاهش یابد. شکل این منحنی بستگی به آب معادل برف ابتدایی و مقدار برف جدید دارد.

MDC_{EXCL}، منحنی فرسایشی (کاهشی) اصلاح شده مناطق پوشیده با برف با در نظر گرفتن برف تازه. این منحنی از MDC_{INCL} از طریق کسر کردن عمق برف ذوب شده جدید از عمق برف ذوب شده تجمعی بدست آمده است. شکل این منحنی بستگی به آب معادل اولیه پوشش برف داشته و مستقل از بارش‌های برف بعدی است. مساحت زیر این منحنی آب معادل پوشش برف جدید را مشخص می‌کند.



شکل ۱۱-۲۲- رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در حوضه ریوگراند نزدیک دل‌نورته در سال آبی ۱۹۷۹.

AZM_{INCL}، ذوب تجمعی منطقه‌ای با احتساب برف جدید. این منحنی تجمع عمق برف ذوب شده روزانه محاسبه شده ضرب در پوشش برف مربوطه (به صورت اعشاری) و مجموع را بر روی مقیاس زمان نشان می‌دهد.

AZM_{EXCL}، ذوب برف ناحیه‌ای تجمعی بدون احتساب برف جدید. این منحنی از روی AZM_{INCL} از طریق ذوب منطقه ای برف جدید از روی ذوب منطقه ای انباشته شده (جمع شده) به دست آورده می شود. همچنین این مقدار، مجموع‌های متوالی را به زمان مربوط می‌کند. مقدار مجموع نهایی برابر آب معادل پوشش منطقه‌ای برای برف اولیه می-باشد.

MDC_{CLIM}، منحنی فرسایشی (کاهشی) اصلاح شده منطقه پوشش برف برای اقلیم تغییر یافته. این منحنی مقدار بارش برف تغییر یافته در اثر آب‌وهوای جدید را در نظر می‌گیرد. اگر هیچ تغییری وجود نداشته باشد با MDC_{INCL} برابر می-باشد.

CDC_{CLIM}، منحنی فرسایشی (کاهشی) مرسوم منطقه پوشیده از برف در اقلیم متغیر.

CDC_{CLIMMA}، منحنی فرسایشی (کاهشی) منطقه پوشش برف در اقلیم متغیر (به دست آمده از MDC_{INCL})، تنظیم شده برای ورود به مدل SRM برای محاسبه رواناب می‌باشد که در نشریه‌ها بدون توجه به تأثیر زمستانی اقلیم متغیر دیده می‌شود.

MDC_{EXCLWA}، منحنی تعدیل شده زمستانی. تأثیر زمستان گرمتر براساس کاهش منحنی مطابق با کسری زمستانی، در نظر گرفته می‌شود. با افزایش همزمان بارش زمستانه، تعادل مثبت ذخیره برف زمستانی ممکن است منجر به این شود که سطح منحنی بالاتر رود. سطح زیر این منحنی آب معادل پوشش منطقه‌ای برف اولیه در اقلیمی متغیر را مشخص می‌کند.

AZM_{EXCLWA}، منحنی تنظیم شده‌ی زمستانی. تأثیر زمستان گرمتر و در صورت ضرورت بارش متغیر نیز در نظر گرفته می شود. مجموع نهایی، توازن آب پوشش برف (آب معادل پوشش برف) اولیه در آب و هوای متغیر می‌باشد.

MDC_{CLIMWA}، منحنی تنظیم شده‌ی زمستانی. که از MDC_{EXCLWA} از طریق محاسبه ی بارش برف بازمانده (بررسی شده) در آب و هوای جدید به دست آورده می‌شود.

CDC_{CLIMWA}، منحنی فرسایشی (کاهشی) متداول منطقه‌ی پوشش برف در آب و هوای متغیر. منحنی از MDC_{CLIMWA} به دست آورده می‌شود.

$CDC_{CLIMWAMA}$، منحنی مطابق با ورودی‌های مدل. اگر مشتقاتی از MDC_{CLIMWA} منجر به ایجاد مقادیر بیش از یک مقدار از S تا آن روز شوند، بالاترین مقدار به کار برده می‌شود. اگر هیچ مقدار S جدیدی تا آن روز وجود نداشته باشد،

مقدار S روزانه تا زمانی تکرار می‌شود که مقدار S جدید به دست آید. با این تنظیمات، $CDC_{CLIMWAMA}$ می‌تواند به عنوان ورودی مدل SRM که مورد نیاز مقدار S در هر روز می‌باشد و به وسیله CDC اصلی به دست می‌آید، به کاربرده شود. این منحنی برای محاسبه‌ی رواناب تحت تأثیر آب و هوا در تمام سال نیز به کار گرفته می شود.

باتوجه به تغییر زمان به دلیل تغییر اقلیم، استخراج مقادیر S_{CLIMWA} از روی MDC_{CLIMWA} احتمالاً قبل از پایان دوره‌ی محاسبه، متوقف می‌شود.

اگر $S_{CLIMWA} < S$، برنامه، منحنی کاهشی CDC_{CLIMWA} را به مقدار نهایی S، CDC اصلی کاهش می‌دهد که اساساً صفر می‌باشد و برای روزهای از بین رفته تکرار می‌شود. اگر منطقه مرتفعی شامل یخ کوه‌ها (یخچالهای طبیعی) یا پوشش برف دائمی باشد، CDC_{CLIMWA} به پوشش باقیمانده یا پوشش یخ افت می‌کند و دوباره CDC اصلی به دست آورده می‌شود. در مواردی (بدون اثر افزایش دما در مناطق مرتفع بالا، افزایش بارش) $S_{CLIMWA} > S$ می‌باشد، پس برنامه $S_{CLIMWA} - S$، $\Delta S = S$ را تعیین می‌کند و CDC_{CLIMWA} را مانند $CDC + \Delta S$ در روزهای از دست رفته برون یابی می‌کند. برای ارزیابی تاثیر افزایش دما در حوضه ریو گراند، مراحل زیر سپری می‌شوند:

۱) رواناب در کل سال هیدرولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۱۱-۲۲) تا پارامترهای از قبل انتخاب شده و پوشش برف برآورد شده در زمستان بررسی شود.

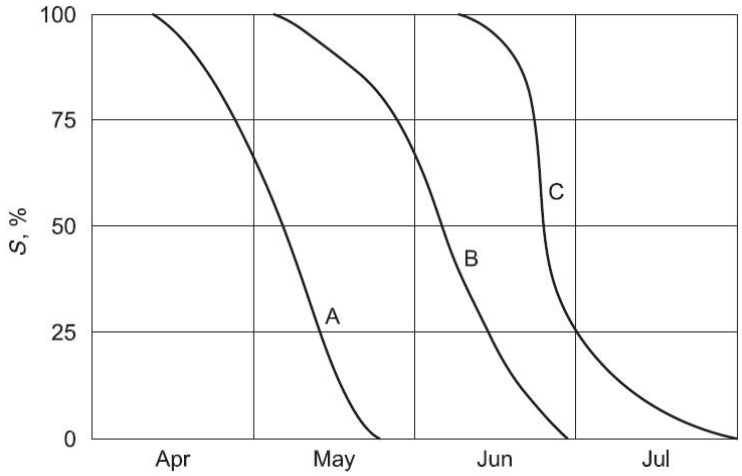
۲) منحنی‌های فرسایشی (کاهشی) متداول پوششی برف (CDC) به عنوان متغیر ورودی در تابستان بکار می‌روند که در شکل (۱۱-۲۳) نشان داده می‌شوند.

۳) رواناب زمستانی به صورت جداگانه برای T و $T+4\ ^{\circ}C$ برای به دست آوردن حجم رواناب مربوطه شبیه‌سازی می‌شود (هیدروگراف چاپ شود).

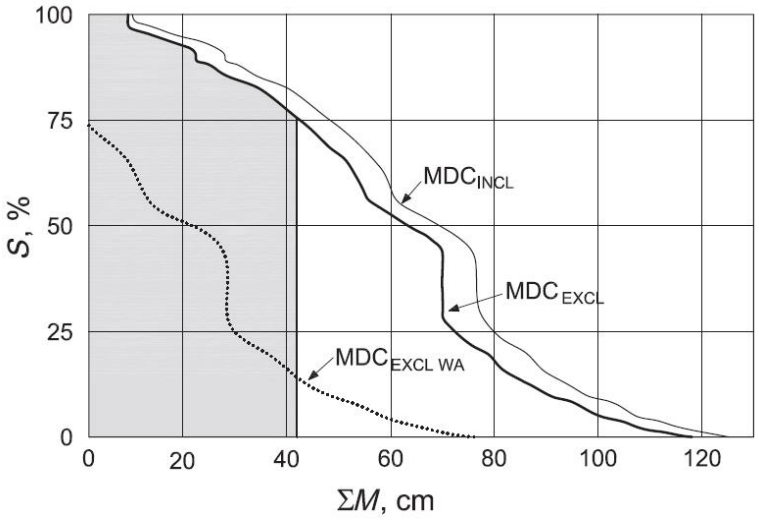
۴) کاهش آب معادل برف در ۱ آوریل به خاطر ذوب برف اضافی در زمستان (کسری زمستان یا تنظیمات منفی زمستان) مثل موارد ابتدایی اشاره شده در بخش ۱۱-۶-۱ به دلیل تغییر انباشتگی برف در آب و هوای جدید، محاسبه می‌شود.

۵) رواناب تابستانی به طور جداگانه برای T برای به دست آوردن حجم رواناب، شبیه‌سازی می‌شود (هیدروگراف‌ها چاپ شده‌اند).

در این نقطه، منحنی‌های کاهشی تحت تاثیر اقلیم، CDC_{CLIM}، که به عنوان متغیرهـای ورودی بـرای محاسـبه‌ی فصـل تابستان (از زمانی که در دوره انباشتگی در زمستان وجود ندارند) رواناب تحت تاثیر آب و هوا مورد نیاز می‌باشـد، بـه ترتیـب زیر به دست آورده می‌شود.



شکل ۱۱-۲۳- منحنی‌های فروکش متعارف پوشش برف بدست آمده از داده‌های سنجنده لندست در ارتفاعات A، B و C حوضه ریوگرانده دل نورته در سال ۱۹۷۹.



شکل ۱۱-۲۴- منحنی‌های فروکش اصلاح شده برای زون A: MDC_{INCL} بدست آمده از CDC می‌باشد بنابراین شامل برف تازه، MDC_{EXCL} با ذو برف تازه مانع شده، $MDC_{EXCL\ WA}$ با " کمبود بهاره" مقطع گیری زمانی.

۶) منحنی فرسایشی اصلاح شده MDC_{INCL} از CDC به دست آورده می‌شود. این منحنی پوشش بـرف بـا عمـق ذوب برف تجمعی شامل برف جدید در تابستان ارتباط دارد. (شکل ۱۱-۲۴).

۷) MDC_{EXCL} از طریق حذف عمق ذوب برف اشاره شده به عنوان برف جدید از روی عمق ذوب برف تجمعی، به دسـت آورده می‌شود. (شکل ۱۱-۲۴) منطقه زیر این منحنی توازن آب (آب معادل) واقعی اولیه پوشش بـرف را ماننـد مـورد نشـان داده شده در بخش ۱۱-۵ نشان می‌دهد.

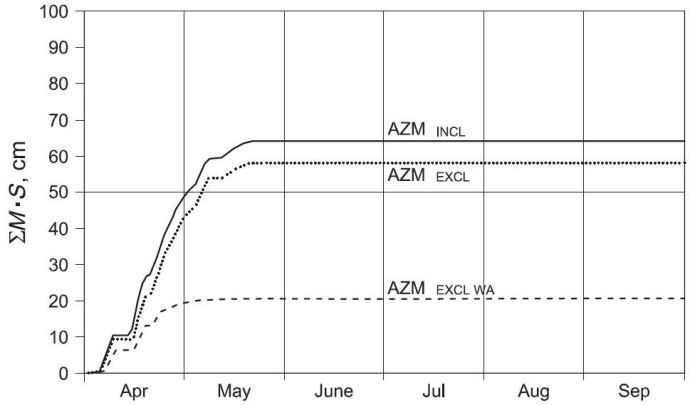
۸) تاثیر آب و هوا از طریق کم کردن MDC_{EXCL} از کسـری زمسـتان محاسـبه شـده در بخـش ۴ محاسـبه مـی‌شـود و MDC_{EXCLWA} (تنظیمات زمستانی) بدست آورده مـی‌شـود. برنامـه هـر دو مـورد MDC_{EXCL} و MDC_{EXCLWA} را چاپ می‌کند. در منطقه A، ΔH_W = -۳۶/۹۴ سانتیمتر محاسبه می‌شود تا MDC_{EXCL} در روزی که با ایـن مقـدار برابـر یا بیشتر شد، جدا شود. این مورد در ۲۷ آوریل وقتی که $\sum M$ برای MDC_{EXCL} برابر۴۲/۰۴ سانتیمتر بود (بـا S کـاهش نمی‌یابد، بنابراین بالاتر) اتفاق افتاد. بنابراین MDC_{EXCLWA} به دست آمده برای شروع در ۱ آوریل تغییرداده شد.

۹) ذوب برف تجمعی در رابطه با زمان براساس ذوب برف منطقه‌ای چاپ می‌شود کـه مقـدار آن هـر روز بـه خـاطر درصـد پوشش برف کاهش می‌یابد. منحنی ذوب متراکم منطقه‌ای AZM_{EXCL} به صورت شـکل (۱۱-۲۵) نشـان مـی‌دهـد کـه کسری زمستانی در این مثال که ΔH_W برابر ۳۶/۹۴- سانتیمتر بود در ۲۷ آوریل به حداکثر رسید، این اتفـاق زمـانی رخ داد که ذوب متراکم منطقه‌ای در حدود ۳۷/۶۹ سانتیمتر بود. مجموع روز قبل ۳۵/۹ سانتیمتر نیز چاپ مـی‌شـود بنـابراین کـاربر می‌تواند MDC_{EXCL} را از مقدار روز قبل جدا کند البته اگر مقدار روز بعد بسیار بالاتر از ΔH_W محاسبه شده باشد.

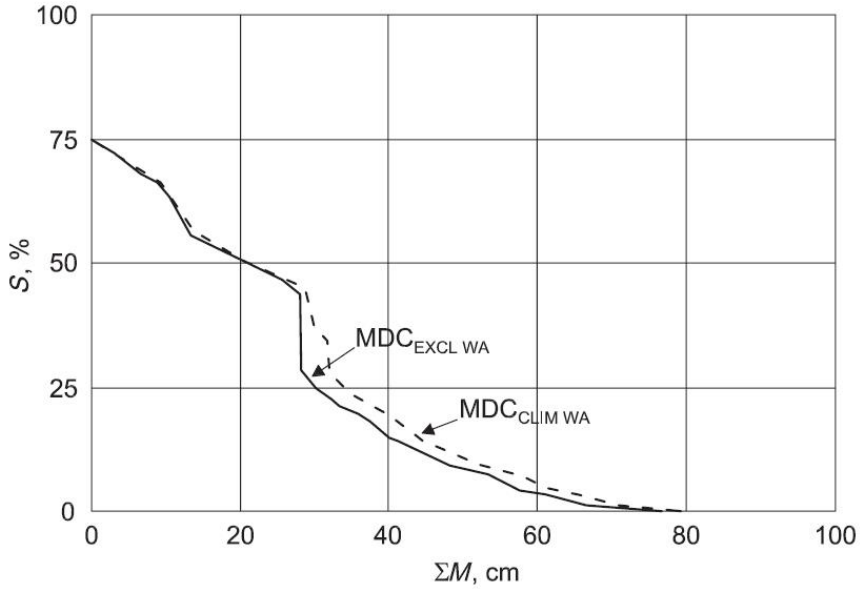
۱۰) بعد از اینکه عمق برف ذوب شده جدید در آب و هوای موجود و کسری زمستانی از روی MDC_{INCL} برای بـه دسـت آوردن MDC_{EXCLWA} محاسـبه شـد، بـرف ذوب شـده جدیـد بازمانـده در آب و هـوای گرمتـر بـرای بـه دسـت آوردن MDC_{CLIMWA} به عقب برده می‌شود (همانطور که برای منطقه A نشان داده شده در شکل ۱۱-۲۶).

۱۱) منحنی‌های فرسایشی تحت تاثیر هوا که برای کسری زمستانی CDC_{CLIMWA}، تنظیم می‌شوند به شرح زیر استنباط می‌شوند: برای مثال MDC_{CLIM} نشان می‌دهد که عمق برف ذوب شده۲۲ سانتیمتر، نیاز به کاهش پوشش برف تا ۵۰ درصد دارد (شکل ۱۱-۲۶). این اتفاق در آب و هوای موجود مطابق با CDC در شکل ۱۱-۲۳ در ۵ می رخ می‌دهد. در آب و هوای گرمتر ($T+4\ ^{\circ}C$) عمق برف ذوب شده‌ی تجمعی ۲۲ سانتیمتری و کاهش مشابه پوشش برف تا ۵۰ درصد در

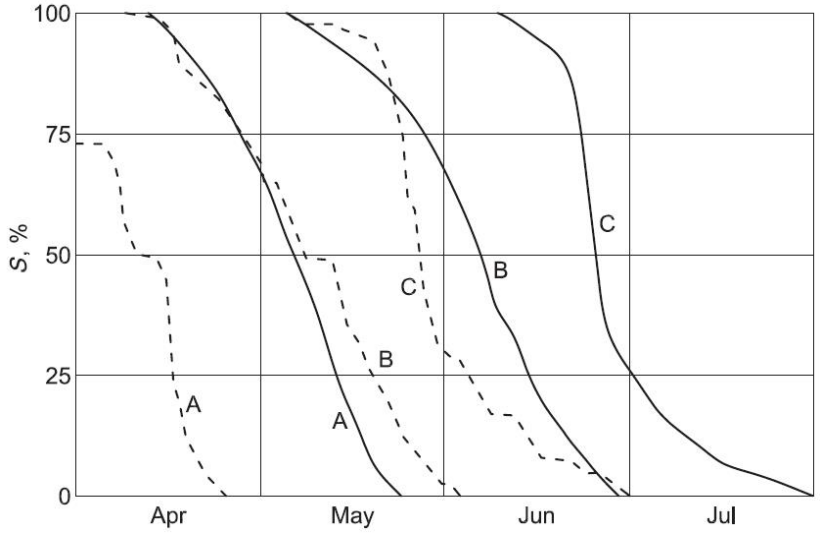
۹ آوریل به دست آورده می‌شود، بنابراین نقطه ۵۰ درصد به آن تاریخ انتقال داده می‌شود. این برنامه عمق برف ذوب شده تجمعی محاسبه شده را توسط دماهای موجود در هر روز (۱۱–۲۷) انتخاب می‌کند و برای تاریخی که این عمق برف ذوب شده برابر یا بیشتر از زمانی که دماهای بالا برای محاسبات استفاده می شود، جستجو می‌کند. اگر آب و هوای جدید دلیل تغییر فاکتور درجه–روز می‌باشد (بحث" پارامترهای مدل در تغییر آب و هوا" را بعداً در این بخش را ببینید) عمق تجمعی برف ذوب شده باید نه تنها از طریق دماهای بالاتر بلکه از طریق تغییر مقادیر a (معمولاً بالاتر) محاسبه شود. برنامه کامپیوتری در مورد این مبحث احتیاط می‌کند. عمق برف ذوب شده‌ی قابل مقایسه، در حدود یک ماه اول به دست آورده می‌شود تا CDC_{CLIMWA} برحسب زمان برخلاف CDC اصلی انتقال داده شود (مانند مورد نشان داده شده در شکل ۱۱–۲۷ برای تمام مناطق مرتفع). روش انتقال CDC در تابستان نیز به وسیله یک مثال عددی توضیح داده می‌شود (مارتینس و رانگو، ۱۹۷۶). با درنظر گرفتن خاصیت گام به گام عمق برف ذوب شده تجمعی، توازن آب برف (آب معادل برف) کمی بیشتر از کسری زمستانی برای به دست آوردن MDC_{EXLWA} جدا می‌شود، (مرحله ۹ در بالا را ببینید) که در نهایت کاهش CDC_{CLIMWA} را تسریع می‌کند. به عبارت دیگر بررسی در مورد عمق برف ذوب شده تجمعی برابر یا بیشتر دراستخراج CDC_{CLIMWA} ممکن است به تعلل بسیار کمی از کاهش منجر شود.



شکل ۱۱–۲۵– منحنی‌های ذوب منطقه‌ای تجمعی برای زون A: AZM_{INCL}: عمق ذوب روزانه محاسبه شده بر S بدست آمده از CDC ضرب می‌شود. AZM_{EXCL} با برف ذوب شده منطقه‌ای مستثنی شده و AZM_{EXCL} مشتق شده از AZM_{EXCL} با برش آن از ۲۷ آوریل و انتقال به ۱ آوریل بدست می‌آید.



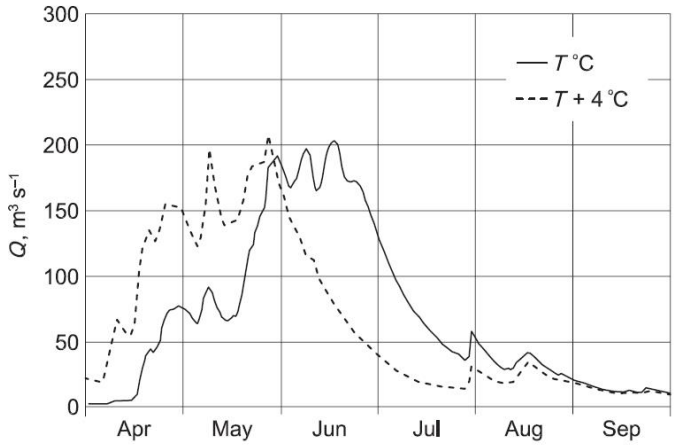
شکل ۱۱-۲۶- منحنی فروکش اصلاح شده تعدیل شده برای "کمبود بهاری" و دربرگیرنده برف تازه اقلیم تغییر یافته بدست آمده از $MDC_{EXCL\ WA}$ برای زون A.



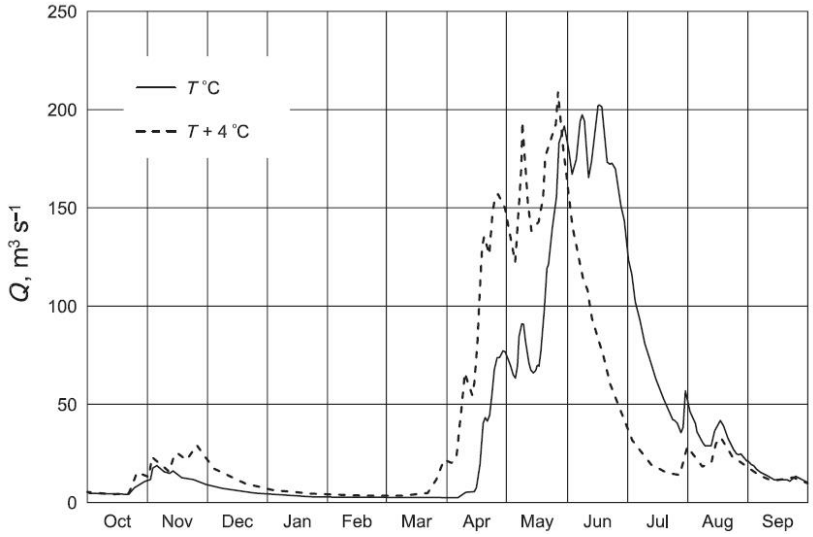
شکل ۱۱-۲۷- اثر اقلیم تغییر یافته بر روی مساحت پوشش برف سال ۱۹۷۹ در ارتفاعات A، B و C حوضه ریوگرانده دل نورته. $CDC_{CLIM\ WA}$ به دلیل کاهش پوشش برف در ۱ آوریل و افزایش دما در فصل ذوب شیف پیدا نموده است.

۱۲) CDC_{CLIMWA} برای محاسبه رواناب تحت تاثیر آب و هوا در نیمه تابستانی سال به کار برده می‌شود: لازم به ذکر است که در مقابل، برای اجرای مدل در حالت شبیه سازی R^2 در عملکرد تغییر آب و هوا مدل دقیقی را نشان نمی‌دهد اما نتایج به دست آمده از تفاوت بین هیدروگراف برای آب و هوای موجود و تغییر یافته خبر می‌دهد.

شکل (۱۱–۲۸) رواناب تحت تاثیر آب و هوای محاسبه شده به وسیله بارش اصلی، دمای ($T+۴^{\circ}C$) و مناطق پوشش برف بر اساس CDC_{CLIMWA} را در مقایسه با شبیه سازی رواناب اصلی در شکل (۱۱–۲۲)، نشان می‌دهد. اجرای برنامه با محاسبه دبی در ۳۱ مارس با $T+۴^{\circ}C$ (مرحله ۳ را ببینید) شروع می‌شود. بنابراین هیدروگراف با آب و هوای متاثر در تمام سال (سالانه) شامل شبیه‌سازی زمستان با $T+۴^{\circ}C$ و S برآورده شده و محاسبه تابستانی بوسیله برنامه آب و هوا با $T+۴^{\circ}C$ و S به دست آمده از CDC_{CLIMWA} می‌باشد. شکل ۱۱–۲۹ هیدروگراف‌های سالانه محاسبه شده با دماهای ۱۹۷۹ و افزایش دماها تا ۴+ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۱۱–۵ فهرست‌بندی شده است، رواناب زمستانی آتی در مصرف رواناب تابستان افزایش خواهد یافت. اثر واقعی زیادتر می‌باشد چون رواناب تحت تاثیر آب و هوای افزایش یافته در اواخر مارس، در آوریل مانند جریان پسروی توضیح داده شده در تمام قسمت‌ها انجام می‌شود (به اجرا درمی‌آید) (مارتینس و رنگو، ۱۹۹۷). توزیع مجدد رواناب بسیار اندک می‌باشد چون زمستان سرد ۱۹۷۹ حتی با افزایش دما اجازه ذوب برف بیشتر را نمی‌دهد (بخش ۱۱–۵–۱ نرمال کردن داده‌ها برای نشان دادن آب و هوای حال حاضر را ببینید).



شکل ۱۱–۲۸– رواناب متاثر از اقلیم ($T+۴^{\circ}C$) در حوضه ریوگرانده دل نورته در مقایسه با رواناب شبیه سازی شده بوسیله داده‌های سال ۱۹۷۹ برای آوریل تا سپتامبر (نشان داده شده در شکل ۱۱–۲۲).



شکل ۱۱–۲۹– رواناب شبیه سازی شده در حوضه ریوگرانده دل نورته در سال آب ۱۹۷۹ و رواناب متاثر از اقلیم محاسبه شده بوسیله افزایش دما و تغییر شرایط برف متناظر.

در مثال داده شده، در آب و هوای جدید بارش تغییر داده نشد، اما برنامه آب و هوا توانست اثر ترکیبی دماهای متغیر و بارش متغیر را بررسی کند. معمولاً تاثیر دما غالب می‌باشد ولی همانگونه که در بخش ۱۱–۶–۱ اشاره شد، "تحت عنوان تغییر تجمع برف در آب و هوای جدید"، بارش زیاد و عدم وجود شرایط ذوب در ارتفاعات بلند در زمستان، احتمالاً کسری زمستانی را به ذخیره زمستانی یا تطابق مثبت زمستانی تبدیل می‌کند. در این مورد برنامه کامپیوتری MDC_{EXCLM} را از طریق بسط MDC_{EXCL}، به تناسب این افزایش رابطه ۱۱–۲۵ را به دست می‌آورد:

$$g = \frac{p' - I'}{p - I} \qquad (۱۱–۲۵)$$

که p و 'p بارش در هوای موجود و متغیر و I، 'I ورودی زمستان (معادله ۱۱–۲۳ را ببینید) در آب و هوای موجود و متغیر می‌باشند.

اگر هیچ ورودی زمستانی در هر موردی به خاطر دمای پایین، یا افزایش بارش ۲۰٪ وجود نداشته باشد، حاصل در g =۱/۲ به دست می‌آید.

مختصات x MDC_{EXCL} (عمق تجمعی برف ذوب شده) برای به دست آوردن MDC_{EXCLWA} در g ضرب می‌شود که با آب معادل اضافی پوشش برف در اول آوریل مطابقت می‌کند.

در نیم سال تابستانی، موقعیت (وضعیت) CDC_{CLIMWA} برخلاف CDC از تعادل اثرات متضاد پوشش برف ابتدایی اضافی و ذوب اضافی حاصل می‌شود.

پارامترهای مدل در آب و هوای متغیر

پارامترهای مدل SRM که از قبل تعیین می‌شوند بیشتر موردنیاز تنظیمات هیدرولوژیکی می‌باشند تا کالیبره شدن مکانیکی یا بهینه‌سازی. با این وجود همانگونه که اشاره شد (کلمس، ۱۹۸۵؛ بکر و سربان، ۱۹۹۰؛ ناش و گلایک، ۱۹۹۱) مدل‌های کالیبره شده برای مطالعات تاثیر آب و هوا مناسب نمی‌باشند چون پارامترها نمی‌توانند به طور با مفهومی مطابق با شرایط آب و هوای متغیر باشند.

در مثال آورده شده از حوضه ریوگراند نزدیک دل نورته، تغییر فصلی فاکتور a درجه- روز و ضریب رواناب برای برف C_s، محاسبه شد. عامل درجه- روز به تدریج به صورت خطی با تراکم (چگالی) برف افزایش یافت در حالیکه C_s کاهش پوشش برف و مرحله رشد گیاهی را منعکس می‌کند. از آنجا که CDC های اصلی تا حدود یک ماه اول تغییر داده می‌شود (شکل ۱۱-۲۷ را ببینید)، مقادیر هر دو پارامتر براساس ۳۱ روز برحسب عملکرد آب و هوا، انتقال داده می‌شوند. برای مثال، $c^{-1}d^{-1}$ a=۰/۴۵ cm برای می در آب و هوای موجود انتخاب شد و در آوریل در آب و هوای گرمتر به کار گرفته شد. برنامه آب و هوا برای تغییر خودکار با هر تعداد از روزها، ارائه می‌شود. وقتی مقادیر سپتامبر به آگوست انتقال داده می‌شوند، مقدار ۳۰ سپتامبر در سپتامبر تکرار می‌شود. تغییر در ژانویه برای جلوگیری از انتقال شرایط زمستانی به پاییز متوقف می‌شود. تاکنون هیچ آماری در این مورد وجود ندارد که آیا آب و هوای گرمتر تلفات را در مواردی که C_S و C_R به تدریج کاهش خواهند یافت، افزایش می‌دهد، چون تبخیر- تعرق کم به وجود آمده به خاطر افزایش CO_2 تاثیر دما را خنثی می‌کند (گیفورد، ۱۹۸۸؛ بونس و کارلسون، ۱۹۹۱). پارامترهای انتخاب شده می‌توانند مطابق با شرایط موردنظر آب و هوایی آتی تغییر داده شوند.

نسخه‌های بعدی قادر خواهند بود x و y ثابت برای فرمول پسروی را تنظیم کنند. برای مثال در صورتی که یک پس‌روی تندتری به خاطر شرایط خاک خشک‌تر نشان داده شود.

نرمال‌سازی داده‌ها برای نشان دادن آب و هوای موجود

اثر آب وهوا از طریق مقایسه شرایط رواناب و برف موجود با شرایط مدلسازی شده برای سناریوی آب و هوا، ارزیابی می‌شود. آب و هوای موجود می‌تواند از طریق بارش، دما، منطقه پوشش برف و رواناب شبیه‌سازی شده یک سال به خصوص، در صورتی که این سال نرمال باشد، نشان داده شود. به نظر می‌رسد میانگین داده‌ها از روی تعداد سال‌ها می‌تواند نماینده‌ی خوبی باشد. با این حال استفاده از درجه حرارات متوسط روزانه بلند مدت، با تسهیل نوسانات روز به روز، ممکن است عمق ذوب برف و رواناب را مطابق جدول ۱۱-۴، بطور قابل ملاحظه‌ای کم در نظر بگیرد. مجموع داده‌های نرمال، می‌توانند از طریق تنظیم دماهای روزانه یک سال منتخب بوسیله انحرافات ماهانه از روی میانگین‌های بلند مدت و ضرب مقدار بارش روزانه بر نسبت‌های بلند مدت و مجموعه‌های ماهانه واقعی تهیه شوند. منحنی‌های فرسایشی (کاهشی) نرمال پوشش برف می‌توانند از روی منحنی‌های سال منتخب، از طریق بررسی دماهای نرمال و بارش به عنوان " آب و هوای جدید" برای آن سال و اجرای برنامه آب و هوای مدل SRM به دست آورده شوند. سپس دمای نرمال، بارش و مناطق پوشش برف به عنوان سال استاندارد در نظر گرفته می‌شوند و برنامه آب و هوا دوباره با مشخصات آب و هوای متغیر (تغییر اقلیم) اجرا می‌شوند. نسخه ۴/۰ برنامه آب و هوای موجود، تنها اجازه تغییرات یکنواخت دما و بارش را برای نیم سال زمستان و تابستان می‌دهد. نسخه بعدی برای نرمال کردن داده‌ها همراه با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی دقیق‌تر، تنظیم خواهد شد.

چشم انداز

نسخه ۴/۰ برنامه SRM، پوشش برف و توازن واقعی آب را ارزیابی می‌کند و رواناب را برای هر افزایش دما و هر تغییر در بارش در نیم سال تابستان و زمستان محاسبه می‌کند. گزینه‌های مختلفی در ارتباط با پارامترهای مدل تغییر داده

شده برحسب زمان یا تنظیم شده در مقدار (در پاسخ به آب و هوای متغیر) وجود دارند. در حال حاضر داده‌ها ی بدست آمده از سال‌های واقعی برای نشان دادن آب و هوای امروز به کار برده می‌شوند. نسخه بعدی برنامه قادر خواهد بود دما و بارش را به صورت ماهانه تغییر دهد. با این اصلاح، به دست آوردن دمای روزانه، بارش و منطقه پوشش برف برای سال نرمالی که آب و هوای موجود را بهتر از یک سال واقعی منتخب نشان می‌دهد، ممکن خواهد ساخت. محاسبه اصلاح شده ذوب برف و ذوب یخ کوهه (یخچال طبیعی) با مولفه تابش برای به کار رفتن در طرح‌های آب و هوایی با شرایط ابری متغیر و پیش‌بینی رفتار یخ کوهه‌ها (یخچال‌های طبیعی) در قرن بعدی، تحت تهیه می‌باشد. اطلاعات بیشتر در اینترنت و در کارگاه‌های SRM قابل دسترسی خواهند بود.