



سنجش از دور , GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال ششم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.6, No. 2, Summer 2014

۶۴-۴۹

پیش‌بینی احتمال مکانی وقوع برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و زنجیره مارکوف مرتبه یک

بهرام ثقفیان^۱، سمیه سیمای*

۱. دانشیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات
۲. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۷/۲۹

چکیده

ارزیابی و برآورد ذخایر برفی در مطالعات بیلان آب و بهره‌برداری بهینه از منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشکی چون ایران که دارای ریزش‌های فصلی برف هستند، اهمیت فراوانی دارد. در حوضه‌های آبریز حوالی دامنه‌های برف‌گیر نظیر زاگرس که سیلاب‌های بهاره سهم عمده جریان‌های سطحی را تشکیل می‌دهند، پیش‌بینی احتمالاتی ذخیره برفی پایان سال ضروری است. در پژوهش حاضر، پیش‌بینی احتمالی وقوع برف در حوضه آبریز رودخانه‌های کرخه، دز، کارون و بخشی از حوضه مارون با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک بررسی شد. برای این منظور از داده‌های سطح برف استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده NOAA-AVHRR در طول سال‌های آبی ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۳ استفاده شد. حالت‌های ممکن در نقشه‌های برف به صورت وجود (عدد یک) و نبود برف (عدد صفر) تعریف شد. سپس با اعمال فرایند زنجیره مارکوف، پیش‌بینی احتمال مکانی وقوع برف برای اسفندماه سال‌های ۸۳-۱۳۷۹ صورت گرفت. نتایج نشان دادند که پیش‌بینی احتمالاتی سطح برف در اسفندماه تطبیق مناسبی با نقشه‌های حداکثر پوشش سطحی برف به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای دارد. وضعیت پوشش سطح در بیش از ۶۰ درصد سطح حوضه با احتمال ۱۰۰ درصد و در ۸۰ درصد سطح حوضه، با احتمال ۵۰ تا ۹۰ درصد به درستی پیش‌بینی شده است. افزون بر این، به منظور ارزیابی کمی عملکرد مدل پیش‌بینی از روش جداول وابستگی استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل بر مبنای سه معیار احتمال ردیابی (POD)، نسبت هشدار غلط (FAR) و موفقیت بحرانی (CSI)، نیز توانمندی مدل زنجیره مارکوف را در پیش‌بینی سطوح برفی نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: احتمال وقوع برف، زنجیره مارکوف مرتبه یک، ماتریس احتمالات انتقال.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، ساختمان فلسفه علم، شماره ۱۲۱، دفتر مطالعات آب و محیط‌زیست. تلفن: ۰۹۱۲۲۸۷۹۷۶۵

۱- مقدمه

تصاویر سنجنده NOAA-AVHRR در بازه اکتبر ۱۹۹۶ تا سپتامبر ۱۹۹۷ (Najafi Idgir et al., 2007)، پایش سطح برف در حوضه سد شاهچراغی سمنان از ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۷ با استفاده از تصاویر سنجنده NOAA-AVHRR (Banihabib et al., 2013)، مطالعه سطح برف زیرحوضه هراز با استفاده از سنجنده MODIS طی سال آبی ۲۰۰۱-۲۰۰۲ (Miryaghoobzadeh & Ghanbarpoor, 2009)، و پایش سطح پوشش برف در حوضه‌های آبریز استان گلستان با استفاده از سنجنده MODIS طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۰ (Fatahi & Vazifehdooost, 2011)، در حوضه‌های آبریز کارون، کرخه و مارون نیز سطح برف با استفاده از تصاویر سنجنده NOAA-AVHRR در دوره زمانی ۱۵ ساله استخراج شد و سپس نقشه‌های حداکثر پوشش برف ماهانه برای ماه‌های بهمن و اسفند به دست آمد (Jamab, 2004). از مزایای نقشه‌های حداکثر ماهانه برف این است که می‌توان نواحی دارای پتانسیل ریزش برف ماهانه را مشاهده کرد. همچنین تأثیر تغییرات شدید احتمالی بازه‌ها در زمانی کوتاه‌تر از یک ماه در نقشه حداکثر به کمترین میزان خود می‌رسد (Saghafian and Davtaleb, 2007).

علاوه بر پایش مستقیم سطوح برفی، استفاده از داده‌های سنجش از دور برف در مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند در بهبود کیفیت مدل‌ها و بهبود برنامه‌ریزی‌های منابع آب در مقیاس حوضه‌ای بسیار مؤثر باشند. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی با هدف پیش‌بینی وضعیت آبی پارامترهای اقلیمی ارائه شده‌اند. از روش‌های سنتی می‌توان به روش‌های مختلف اتورگرسیو Box-Jenkins شامل AR، ARMA، ARMAX، ARIMA و از روش‌های نوین مبتنی بر الگوریتم‌های فراکاوشی به شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچگان اشاره کرد (Jain and Kumar, 2007). مدل زنجیره مارکوف از کارآمدترین مدل‌های احتمالاتی در پیش‌بینی فرایندهای هیدرولوژیکی است.

به دلیل تأثیرگذاری شدید برف بر تبدلات انرژی سطح زمین، در مدل‌های عمومی جو (GCM) و مدل‌های پیش‌بینی هوا، سطح پوشش برف به عنوان متغیر پایه در نظر گرفته می‌شود (Marshall et al., 1994; Roesch et al., 2001). بنابراین خطا در پایش سطوح برفی منجر به بروز خطا در مدل‌های پیش‌بینی هوا می‌شود (Niu and Yang, 2007). از این رو، پایش صحیح تغییرات زمانی - مکانی سطح برف به منظور پیش‌بینی صحیح اندازه، و زمان‌بندی و تداوم رواناب ناشی از ذوب برف ضروری است (Clark et al., 2006).

سنجش از دور مناسب‌ترین ابزار برای پایش سطح برف در مناطق کوهستانی برف‌گیر و با دسترسی دشوار است که امکان جمع‌آوری داده‌های همگون را در سطوح وسیع فراهم می‌کند (Derksen and LeDrew, 2000). به علت بازتابش بالای سطوح برفی در مقایسه با سطوح خشک، شناسایی و پایش سطوح برفی در محدوده باندهای مرئی تصاویر سنجنده‌های ماهواره‌ای به سهولت امکان‌پذیر است (Mei et al., 2001). استفاده از داده‌های سنجش از دور در پایش سطح برف نواحی کوهستانی در مطالعات متعددی بررسی شده است. از جمله پایش سطح برف در شش حوضه آبریز در ایالت کلرادوی آمریکا با استفاده از تصاویر لندست طی سال‌های ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۸ با موفقیت انجام شد (Shafer and Leaf, 1979). در مطالعه دیگری، پایش سطح پوشش برف با استفاده از تصاویر سنجنده NOAA-AVHRR در محدوده سرشاخه‌های رود زرد در چین صورت گرفت (Lan et al., 2002). تغییرات فصلی و سالانه پوشش برف در رشته‌کوه هیمالیا در چین نیز با استفاده از محصولات برف‌سنجنده MODIS در یک دوره ۹ ساله مطالعه شدند (Immerzeel et al., 2009).

در ایران نیز پایش پوشش برف در حوضه‌های آبریز در مطالعات مختلف صورت گرفته است، که از جمله می‌توان به این مطالعات اشاره کرد: استخراج سطح برف در زیرحوضه شهرچای حوضه آبریز ارومیه با استفاده از

نمی‌توان نتیجه‌گیری کلی به‌دست داد. به‌عنوان نمونه، جیمو و وبستر^۴ (۱۹۹۶) در نیجریه مرتبه بهینه مدل مارکوفی را در پیش‌بینی بارش روزانه بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک مناسب‌ترین مدل است. در بررسی‌ای در اسپانیا سری زمانی بارش روزانه با استفاده از مدل مارکوف مرتبه یک و دو شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند که مدل مارکوف مرتبه دو در تمام ایستگاه‌های مطالعه‌شده، نتایج رضایت‌بخشی ارائه می‌کند (Lana and Burgueno, 1998). در مطالعه‌ای، کارایی مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک برای شبیه‌سازی هم‌زمان بارش، دما و تابش خورشیدی در مناطق با توپوگرافی پیچیده بررسی شد و تأیید گردید (Wilks, 1999). شبیه‌سازی سری زمانی روزانه بارش و دما نیز در چند سایت در منطقه مدیترانه با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه یک انجام شد و با ترسیم سناریوهای مختلف بارش و دما از مدل پیش‌بینی وقایع حدی استفاده شد (Palutikof et al., 2002). الاشور^۵ و دیگران (۲۰۰۴) سری زمانی بارش را با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه دو شبیه‌سازی کردند که نتایج پیش‌بینی آن با دقت بالایی با مشاهدات تطبیق می‌کرد. بنیک^۶ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تحلیل مارکوفی مرتبه یک روی داده‌های بارش هفتگی در اتیوپی، با ارائه شاخصی تمایل خشک‌شدن منطقه را ارزیابی کردند، که نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل مارکوفی مرتبه یک بود.

برخلاف بارش، استفاده از مدل زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی برف در مطالعات محدودی بررسی شده است. به‌عنوان نمونه، مدل زنجیره مارکوف در پیش‌بینی برف سالانه در ایالت اونتاریو کانادا نیز با

از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل مارکوف، توانایی مدل‌سازی مناسب سری‌های زمانی هیدرولوژیکی نظیر بارش است (School and Pryor, 2008). در مطالعه‌ای، شبیه‌سازی احتمالاتی بارش روزانه با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک در ایالت کنتاکی آمریکا انجام شد و تطبیق مناسب آن با داده‌های تاریخی اندازه‌گیری‌شده بارش نشان داده شد (Hann et al., 1976). کری و هان^۱ (۱۹۷۸) با انجام اصلاحاتی در مدل زنجیره مارکوف آن را در تولید داده‌های مصنوعی بارش روزانه به‌کار گرفتند. نتایج نشان دادند که مقادیر بارش روزانه به‌خوبی برآورد شده است. استرن^۲ (۱۹۸۰) سری زمانی بارش روزانه را با استفاده از مدل مارکوف در نیجریه و هند شبیه‌سازی کرد و روابط کمکی‌ای برای محاسبه توزیع احتمال تعداد روزهای بارانی، کل بارش و طول دوره خشکسالی ارائه کرد. در مطالعه‌ای دیگر، مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک برای پیش‌بینی بارش روزانه در تایلند به‌کار رفت. نتایج نشان دادند که مدل به‌خوبی بارش ماهانه، میانگین، انحراف معیار و ضریب چولگی حداکثر بارش روزانه را بازسازی می‌کند (Phien and Warakittimalee, 1981). همچنین در مطالعه‌ای کاربرد انواع مدل‌های مارکوفی در شبیه‌سازی بارش روزانه در نیجریه، اردن و سریلانکا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (Coe and Stern, 1982). میلر و لسلی^۳ با استفاده از مدل زنجیره مارکوف پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش را در استرالیا انجام دادند. نتایج حاکی از برتری چشمگیر مدل مارکوفی درمقایسه با مدل‌های هواشناسی موجود و حتی مدل‌های پیش‌بینی زمان واقعی بود. در مطالعه دیگری در منطقه جوبا در جنوب سودان نشان داده شد که پیش‌بینی احتمالاتی روزهای تر و خشک با استفاده از مدل زنجیره مارکوف به‌خوبی با مشاهدات تطبیق می‌کند (Gasm El-Seed, 1987).

درخصوص مرتبه بهینه مدل مارکوف نیز مطالعات گوناگونی صورت گرفته است. نتایج مطالعات مذکور حاکی از آن است که مرتبه بهینه مدل تابع منطقه و پارامتر مورد پیش‌بینی است و از این‌رو در این مورد

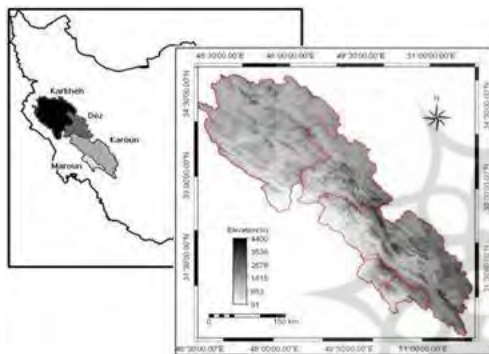
1. Carey and Haan
2. Stern
3. Miller and Leslie
4. Jimoh and Webster
5. Alasseur
6. Banik

زنجیره مارکوف مرتبه یک در پیش‌بینی مکانی سطح برف برمبنای استفاده از سری زمانی داده‌های سطح برف‌سنجنده NOAA-AHRR.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعه شده

منطقه مورد تحقیق قسمتی از رشته‌کوه‌های زاگرس واقع در جنوب‌غربی ایران است (شکل ۱). این منطقه بین طول‌های جغرافیایی ۵۷' و ۴۶° تا ۱۸' و ۵۲° شرقی و عرض‌های ۱۴' و ۳۰° تا ۳۵° شمالی واقع شده است.



شکل ۱. نقشه‌های موقعیت (سمت چپ بالا) و مدل ارتفاعی رقمی یک کیلومتری منطقه مورد بررسی

حوضه‌های آبریز کرخه تا محل سد کرخه، دز تا محل سد دز و کارون تا محل سد کارون ۱ و بخش‌هایی از حوضه مارون در محدوده منطقه قرار دارند. حداکثر ارتفاع در این منطقه حدود ۴۵۷۰ متر است. مساحت هر یک از حوضه‌ها در جدول ۱ آمده است. منطقه مورد نظر به‌طور کلی از توده‌های رطوبتی و جبهه‌های باران‌زایی که از جنوب، جنوب‌غربی و غرب وارد کشور می‌شوند، تأثیر می‌پذیرند. متوسط بارندگی سالانه در منطقه از ۱۷۳ میلی‌متر تا ۱۱۹۶ میلی‌متر

۱. دهقان، ا. «بررسی تطبیقی توان تفکیک مکانی سطوح برف‌دار روی تصاویر NOAA و MODIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کارون)». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
2. Black Forest

موفقیت به‌کار رفته است (Morassutti, 1987). در مطالعه دیگری با استفاده از داده‌های عمق برف و مدل زنجیره مارکوف پیش‌بینی روزهای برفی در هشت ایستگاه هواشناسی در امریکا صورت گرفت (Rotondi, 2010). به‌رغم کارایی مناسب مدل زنجیره مارکوف در پیش‌بینی بارش و برف، در بیشتر مطالعات انجام‌شده پیش‌بینی‌ها فقط به‌صورت ایستگاهی بودند و پیش‌بینی مکانی وقایع بارشی صورت نگرفته است. تنها چند مطالعه محدود در زمینه پیش‌بینی احتمالاتی برف به‌صورت مکانی انجام شده است. از جمله دهقان^۱ (۱۳۸۴)، تأثیر عوامل بارش و دما را روی سطوح برف‌گیر حوضه کارون با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بررسی کرد و با استفاده از داده‌های توپوگرافی، نقشه‌های احتمال وقوع برف را در حوضه کارون براساس تحلیل رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آورد. در مطالعه دیگری برای پیش‌بینی تغییرات مدت‌زمان تداوم پوشش برف و توزیع مکانی آن در رشته‌کوه‌های بلک فارست^۲ در جنوب غربی آلمان، یک مدل آماری پیش‌بینی برف برمبنای شبکه عصبی مصنوعی به نام NARX تهیه شد. این مدل براساس سری زمانی داده‌های عمق برف در ایستگاه زمینی آموزش‌دیده و پس از پیش‌بینی برف در ایستگاه‌های منتخب با استفاده از الگوی پوشش برف استخراج‌شده از محصولات برف‌سنجنده MODIS، نقشه‌های پوشش برف را درون‌یابی می‌کرد. با اجرای این مدل، نقشه‌های برف منطقه برای یک دوره ۲۰ ساله پیش‌بینی شدند. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل در پیش‌بینی عمق برف ایستگاه‌ها و پایش تغییرات مکانی پوشش برف بود. همچنین نتایج نشان دادند که بیشترین خطای مدل در پیش‌بینی برف مربوط به دوره‌های پربارش با عمق برف زیاد است (Sauter et al., 2010).

اهداف پژوهش حاضر عبارت‌اند از: ۱. پیش‌بینی مکانی احتمال وقوع برف در حوضه آبریز رودخانه‌های کرخه، دز، کارون و بخشی از حوضه مارون طی ماه اسفند سال‌های ۸۳-۱۳۷۹، و ۲. ارزیابی کارایی مدل

پیش‌بینی احتمال مکانی وقوع برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و زنجیره مارکوف مرتبه یک

پایاده‌سازی الگوریتم‌های سیمپستون، و ثقیان و داوطلب، سطوح برفی در محدوده منطقه مطالعاتی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج گردید (Simpson et al., 2007; Saghafian and Davtalab, 1998).

با توجه به اینکه فواصل زمانی در سری زمانی نقشه‌های برف منظم نیستند و از طرف دیگر هدف در واقع تعیین احتمال پوشش برف ماهانه است، از نقشه‌های حداکثر پوشش برف^۱ (MSO) ماهانه منطقه که در مطالعات قبلی به دست آمده بود، استفاده شد. اصول استخراج نقشه‌های حداکثر برف ماهانه، مشابه استخراج نقشه‌های حداکثرهای ۱۰ روزه و ماهانه شاخص پوشش گیاهی NDVI است؛ بدین ترتیب که اگر هر پیکسل حداقل در یک تصویر در طول ماه مورد نظر برفی باشد، در نقشه حداکثر به صورت برف و با ارزش یک نشان داده می‌شود (Saghafian and Davtalab, 2007). در پژوهش حاضر از ۱۷ نقشه حداکثر ماهانه برف طی سال‌های ۸۳-۱۳۶۷ استفاده شده است. یک نمونه از نقشه حداکثر ماهانه برف برای بهمن ماه ۱۳۸۰ در شکل ۲ نشان داده شده است.

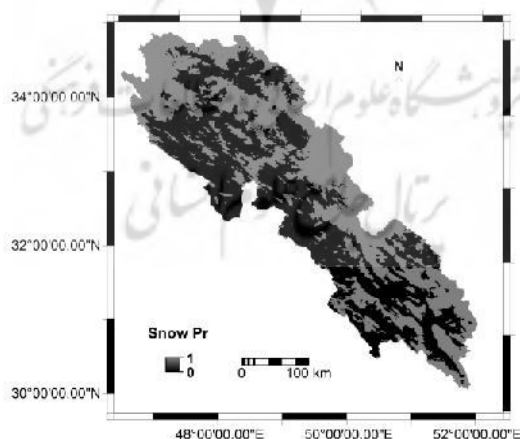
تغییر می‌کند. محدوده این سه حوضه آبریز از نظر تأمین منابع آب دارای اهمیت بسیاری است و سهم عمده‌ای از کل جریان‌های سطحی کشور را تشکیل می‌دهد.

جدول ۱. مساحت حوضه‌های منطقه تحقیق

ردیف	زیرحوضه	مساحت (کیلومترمربع)
۱	کرخه	۴۲۷۲۰
۲	دز	۱۷۳۵۱
۳	کارون	۳۲۷۵۷
۴	مارون	۶۸۰۳
مجموع		۹۹۳۶۱

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

نقشه‌های پوشش برف از اطلاعات و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنجنده NOAA-AVHRR در ماه‌های بهمن و اسفند در محدوده در دسترس سال‌های آبی ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۳ که به وسیله شرکت جاماب پردازش شده است، تهیه شد (Jamab, 2004). در آن مطالعه، با در نظر گرفتن شرط عدم پوشش ابر، تصاویر مناسب انتخاب شدند و تصحیحات هندسی و رادیومتریک با زمین مرجع کردن و Resampling انجام شد. پس از



شکل ۲. نمونه‌ای از نقشه احتمال حداکثر ماهانه برف در بهمن ماه ۱۳۸۰ که در آن سطوح برفی با احتمال ۱ و سطوح خشک با احتمال صفر نشان داده شده‌اند (Jamab, 2004)

1. Maximum Snow Observation

است؛ S_i و S_{i-1} : به ترتیب ماتریس‌های حالت در ماه جاری و ماه بعد که درایه اول آن بیانگر احتمال عدم وجود برف و درایه دوم احتمال وجود برف است. با نوشتن ماتریس احتمال شرطی کلیه حالات به شکل ماتریسی، ماتریس احتمالات انتقال به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

رابطه (۳)

$$T = \begin{bmatrix} P[(S_i = 0) | (S_{i-1} = 0)] & P[(S_i = 1) | (S_{i-1} = 0)] \\ P[(S_i = 0) | (S_{i-1} = 1)] & P[(S_i = 1) | (S_{i-1} = 1)] \end{bmatrix}$$

پارامترهای این رابطه همانند رابطه (۲) هستند. در صورتی که احتمالات شرطی مستقل از زمان فرض شوند، زنجیره مارکوف همگن خواهد شد و ماتریس T را می‌توان به صورت رابطه (۴) نوشت که شکل ساده‌شده آن به صورت رابطه (۵) است:

رابطه (۴)

$$T = P[(S_i = k_i) | (S_{i-1} = m)] = P[(S_i = k) | (S_i = m)] \quad \text{for all } i$$

$$T = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵) پارامترها عبارت‌اند از:

P_{00} : احتمال عدم مشاهده برف در حالتی که ماه قابل نیز غیربرفی باشد،

P_{01} : احتمال مشاهده برف در حالتی که ماه قبل غیربرفی باشد،

P_{10} : احتمال عدم مشاهده برف در حالتی که ماه قبل برفی باشد،

P_{11} : احتمال مشاهده برف در حالتی که ماه قبل برف مشاهده شده باشد.

پیش‌بینی احتمال مشاهده برف در گام زمانی بعد، از حاصل ضرب ماتریس حالت فعلی در ماتریس احتمال انتقال به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید:

رابطه (۶)

$$P[\text{Pr}(S_i = 0) \quad \text{Pr}(S_i = 1)] = S_{i-1} \times T$$

از این تعداد نقشه، داده‌های سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۸ برای تشکیل حافظه مدل پیش‌بینی مارکوفی و نقشه‌های حداکثر برف سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۳ به عنوان نقشه‌های مشاهداتی برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی احتمالاتی سطح برف به کار گرفته شدند.

۲-۳- مدل مارکوف

۲-۳-۱- زنجیره مارکوف همگن مرتبه یک

ایده اصلی در پیش‌بینی مارکوفی این است که وضعیت آینده به کل وضعیت گذشته بستگی ندارد و صرفاً به وضعیت فعلی فرایند وابسته است (Clarke, 1998). احتمال وجود برف در ماه برفی i ام از سال i ام روی سطح مورد نظر به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود که در آن $S=1$ بیانگر وجود و $S=0$ بیانگر نبود برف روی سطح مورد نظر است. بنابراین ماتریس حالت در زمان مورد نظر به صورت رابطه (۱) خواهد شد:

رابطه (۱)

$$S = [0 \quad 1]$$

زمانی که احتمال وجود سطح برفی در ماه‌های برف‌گیر در منطقه به صورت فرایند مارکوفی در نظر گرفته شود، سری زمانی پوشش برف از هم مستقل نخواهد بود و تابع وضعیت گام‌های زمانی قبل است. چنانچه با اعمال ساده‌سازی، این فرایند تابع مدل زنجیره مارکوف مرتبه یک باشد، احتمال وجود سطوح برفی در ماه i ام فقط تابع ماه $i-1$ ام خواهد بود. به بیان دیگر، در فرایند مارکوفی مرتبه یک، فرض اساسی این است که وضعیت سیستم در گام زمانی $i-1$ ام خلاصه‌ای از تاریخچه فرایند تا گام زمانی i ام است. متغیر تصادفی S بین حالت‌های مختلف منتقل می‌شود و انتقال بین حالت‌ها به صورت ماتریس احتمال شرطی رابطه (۲) است که در آن k می‌تواند مقادیر صفر یا یک باشد.

رابطه (۲)

$$P[S_i = k_i | S_{i-1} = k_{i-1}]$$

پارامترهای رابطه (۲) عبارت‌اند از: P : ماتریس 1×2 احتمال مشاهده برف در ماه بعد که درایه اول آن بیانگر احتمال عدم و درایه دوم بیانگر احتمال وقوع برف

برف در آن پیکسل به ترتیب، مقادیر یک یا صفر خواهد بود. با استفاده از این ماتریس برای هر پیکسل تعداد چهار حالت انتقالی از صفر به صفر، از صفر به یک، از یک به صفر و از یک به یک در هر سال به دست می‌آید. سپس احتمال حالت‌های انتقالی فوق که درایه‌های ماتریس انتقال هستند، محاسبه می‌شود. به همین ترتیب ماتریس‌های انتقال برای تمامی پیکسل‌های واقع در محدوده تحقیق به دست می‌آید. با توجه به اینکه منطقه مورد نظر به صورت ماتریسی با ابعاد 592×533 پیکسل در شکل رستری است، ماتریس توزیع مکانی احتمالات انتقال به صورت رابطه (۸) است که هر درایه آن یک ماتریس 2×2 است.

رابطه (۸)

$$T = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & & T_{1,533} \\ T_{2,1} & & \dots & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ T_{592,1} & & \dots & T_{592,533} \end{bmatrix}$$

در پژوهش حاضر از داده‌های حداکثر پوشش برف سال‌های ۱۳۶۷-۷۸ برای محاسبه ماتریس انتقال استفاده شد، سپس پیش‌بینی احتمالاتی نقشه سطح برف برای ماه اسفند سال‌های ۸۳-۱۳۷۹ انجام گرفت.

۲-۳-۳- پیش‌بینی احتمال وقوع برف با استفاده

از وضعیت ماه قبل

با استفاده از وضعیت سطح پوشش برف منطقه در ماه قبل می‌توان وضعیت پوشش برف منطقه در ماه بعد را پیش‌بینی کرد. از نقشه سطح پوشش برف منطقه در ماه جاری می‌توان برای هر پیکسل ماتریس احتمال حالت (ماتریس 1×2) را به دست آورد که درایه اول آن احتمال وجود نداشتن برف و درایه دوم احتمال وجود برف در پیکسل مورد نظر است. بدیهی است که درایه‌های این ماتریس مقادیر صفر و یک خواهند بود. سپس از حاصل ضرب این ماتریس در ماتریس انتقال پیکسل، ماتریس وضعیت ماه بعد به دست خواهد آمد.

تمامی پارامترهای رابطه (۶)، در روابط (۲) تا (۴) تعریف شده‌اند.

برای اعمال پیش‌بینی مارکوفی گفته شده در شکل رستری، با توجه به ابعاد منطقه که به صورت ماتریس 592×533 پیکسلی است، ابتدا یک ماتریس حالت کل براساس نقشه‌های حداکثر پوشش برف در ماه‌های بهمن و اسفند سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۳ به شکل کلی رابطه (۷) تشکیل شد، که ماتریسی 5920×1066 پیکسلی است.

رابطه (۷)

$$State = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \\ \vdots & \vdots \\ M_{10} & M_{11} \end{bmatrix}$$

هر سطر ماتریس حالت کل بیانگر وضعیت پوشش برف کل منطقه در ماه‌های بهمن و اسفند سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۸ است. M_i به صورت ماتریس 592×533 پیکسلی است و بیانگر شکل ماتریس نقشه مشاهده حداکثر پوشش برف در ماه‌های بهمن و اسفند است که به ترتیب با اندیس‌های زوج و فرد در رابطه (۷) بیان شده‌اند. ماتریس احتمال انتقال حالت هر پیکسل با توجه به وضعیت آن پیکسل در سال‌های گذشته به شرحی که در ادامه بیان می‌شود، محاسبه شد.

۲-۳-۲- محاسبه توزیع مکانی ماتریس احتمالات

انتقال

ماتریس انتقال برای هر پیکسل از مجموعه پیکسل‌ها جداگانه محاسبه گردید. ماتریس انتقال هر پیکسل یک ماتریس 2×2 خواهد بود که مجموع درایه‌های هر سطر آن برابر واحد است. با در نظر گرفتن یک ماتریس 10×2 برای هر پیکسل، برای نشان دادن شرایط سطح طی ۱۰ سال و ۲ ماه برفی آخر سال، ماتریس وضعیت هر پیکسل در طول دوره مطالعه به دست خواهد آمد. مقادیر درایه‌های این ماتریس با توجه به وجود یا نبود

پیش‌بینی‌شده، تطبیق مناسبی با نقشه حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای دارد.

ارزیابی کمی مدل از دو دیدگاه مدنظر قرار گرفت: ارزیابی مساحت سطح برف و خشکی پیش‌بینی‌شده و ارزیابی موقعیت سطوح برف و خشکی پیش‌بینی‌شده. به‌منظور ارزیابی مساحت پیش‌بینی‌شده، مقادیر مساحت کل سطوح برفی مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده با احتمال ۱۰۰ درصد هریک از حوضه‌ها به تفکیک مقایسه شدند (جدول ۲). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حوضه‌های آبریز کارون و مارون به ترتیب بیشترین سطح برف‌گیر را دارند. مساحت پوشیده از برف در سال‌های مذکور نیز در سطوح احتمال مختلف محاسبه شد. بر اساس نتایج جدول ۳، مساحت پوشش برف در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۳ به ترتیب با مساحت‌های پیش‌بینی‌شده با احتمال بیشتر از ۴۰ درصد، بیشتر از ۵۰ درصد، بیشتر از ۸۰ درصد، بیشتر از ۷۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد، بهترین تطبیق را دارد. بنابراین در سال‌های پربارش، سطوح برف‌گیر را با آستانه احتمال کمتری در مقایسه با دیگر سال‌ها می‌توان پیش‌بینی کرد. این نتیجه با نتایج گزارش‌شده در مطالعه پیش‌بینی مکانی برف در آلمان (Sauter et al., 2010) مبنی بر بیشتربودن خطای مدل مکانی پیش‌بینی برف طی دوره‌های پربارش سازگار است.

به‌منظور ارزیابی پیش‌بینی صحیح موقعیت مکانی سطوح برفی و خشک، همبستگی بین نقشه‌های مشاهداتی و پیش‌بینی بررسی گردید و برای این منظور از معیار ضریب همبستگی استفاده شد (جدول ۴). مقادیر ضرایب همبستگی بین نقشه‌های پیش‌بینی و مشاهداتی نشان می‌دهند که در همه سال‌ها همبستگی مناسبی ($R > 0.65$) در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین دو نقشه برقرار است و این امر نشان از پیش‌بینی مناسب موقعیت نواحی پوشیده از برف و نواحی خشک دارد.

درایه این ماتریس به ترتیب بیانگر احتمال وجود نداشتن و وجود داشتن برف در آن پیکسل است. با تکرار این فرایند می‌توان ماتریس وضعیت پیش‌بینی‌شده را برای کلیه پیکسل‌های منطقه به دست آورد. با درنظرگرفتن مقادیر درایه اول این ماتریس به‌عنوان مقدار توصیفی هر پیکسل، نقشه احتمال وقوع برف منطقه از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$[M_s]_i \times [M_T] = [M_s]_{(i+1)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

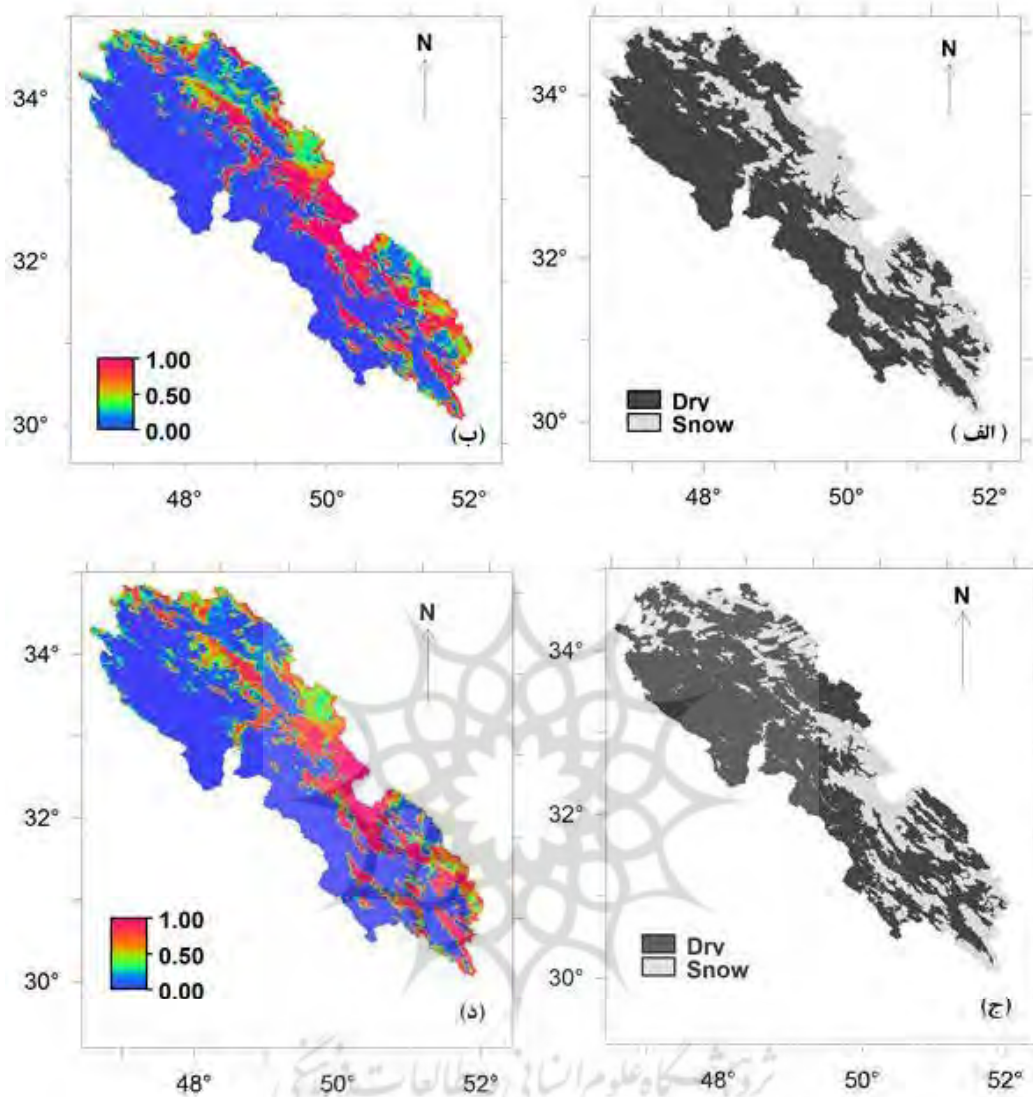
$[M_s]_i$ و $[M_s]_{i+1}$ به ترتیب ماتریس وضعیت هر پیکسل در ماه جاری و ماه بعد و $[M_T]$ ماتریس انتقال هر پیکسل هستند. درنهایت، با ورود شکل ماتریسی نقشه حداکثر پوشش برف بهمن‌ماه برای سال پیش‌بینی، ماتریس وضعیت فعلی هر پیکسل استخراج شد و با ضرب در ماتریس احتمال انتقال حالت هر پیکسل، احتمال مشاهده برف در ماه اسفند به دست آمد. به‌منظور سهولت کار، کلیه روابط زنجیره مارکوف تحت برنامه‌ای کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab کدنویسی شد. نقشه‌های رستری سطح برف از محیط نرم‌افزار ILWIS3.8 به صورت ماتریس export شده و پس از تکمیل محاسبات، فایل خروجی به فرمت ILWIS ASCII با قابلیت فراخوانی در محیط ILWIS، به صورت نقشه رستری نشان داده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

با استفاده از نقشه حداکثر پوشش برف ماه بهمن طی سال‌های ۸۳-۱۳۷۹ نقشه احتمال پوشش برف در ماه اسفند محاسبه شد که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

نقشه مشاهداتی حداکثر پوشش برف اسفندماه که از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده نیز در همان شکل‌ها نشان داده شده است. مقایسه این نقشه‌ها نشان می‌دهد که سطوح برف و خشکی

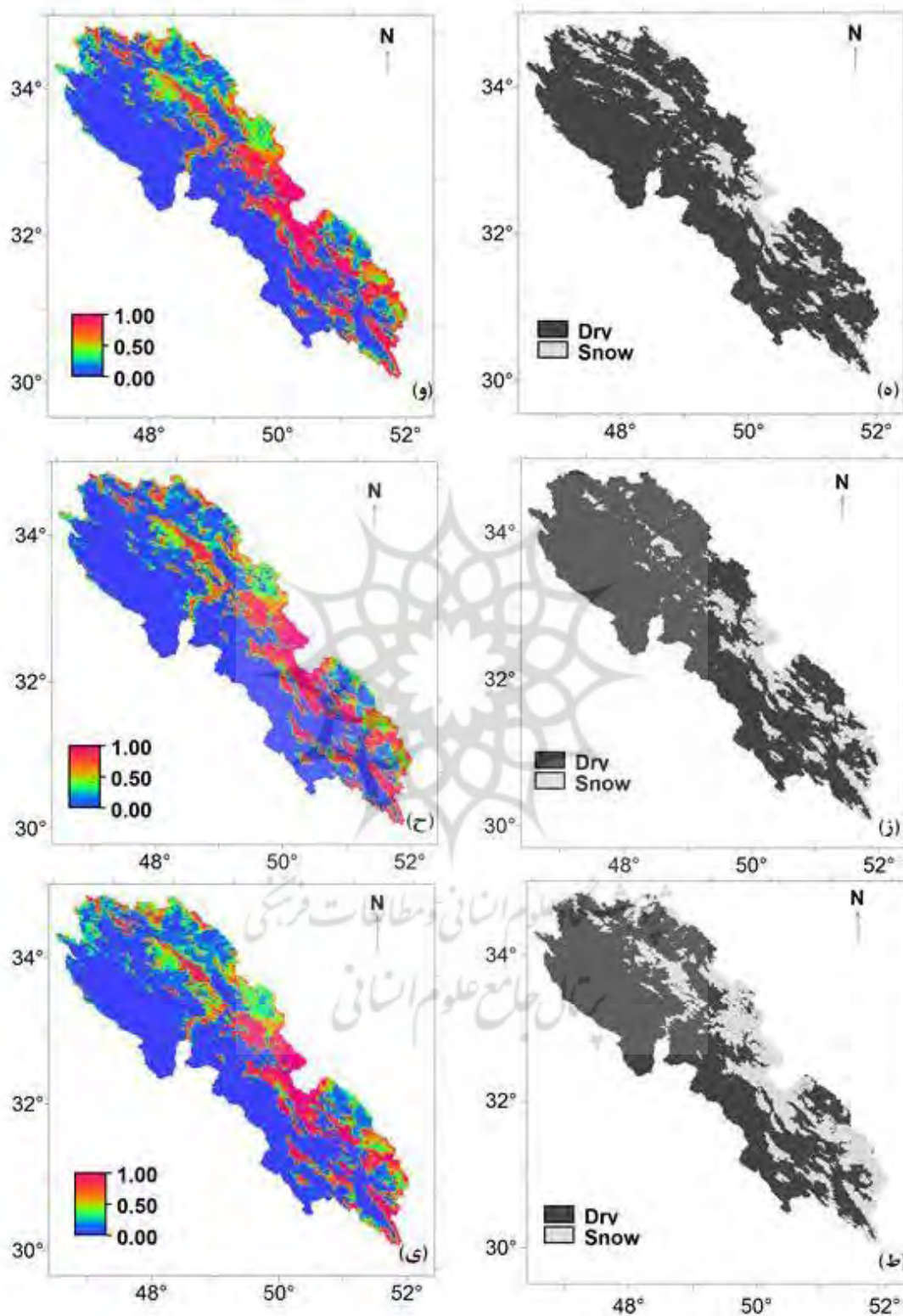
پیش‌بینی احتمال مکانی وقوع برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و زنجیره مارکوف مرتبه یک



شکل ۳. نقشه‌های پیش‌بینی احتمال و مشاهداتی سطح برف در اسفندماه. شکل‌های (الف) و (ج) ، به ترتیب نقشه‌های مشاهداتی پوشش برف و شکل‌های سمت چپ ((ب) و (د))، نقشه‌های پیش‌بینی احتمال برف در اسفند سال ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰

جدول ۲. مساحت مشاهداتی و پیش‌بینی شده برف با احتمال ۱۰۰ درصد در زیرحوضه‌های منطقه بررسی شده (کیلومترمربع)

سال	کرخه		دز		کارون		مارون	
	مشاهداتی	پیش‌بینی	مشاهداتی	پیش‌بینی	مشاهداتی	پیش‌بینی	مشاهداتی	پیش‌بینی
۱۳۷۹	۸۳۵۷	۲۱۹۹	۹۶۳۰	۳۹۴۲	۱۳۶۰۶	۴۵۶۹	۱۴۹۴	۳۷۹
۱۳۸۰	۹۲۲۷	۲۷۳	۵۶۰۴	۱۴۴۷	۱۳۱۱۳	۳۰۵۶	۲۴۱۴	۱۷۴
۱۳۸۱	۵۳۳۰	۱۸۳	۴۲۳۹	۱۴۶۷	۶۵۳۲	۲۹۳۸	۶۱۰	۱۷۳
۱۳۸۲	۱۷۸۶	۷۰۸۸	۴۴۳۳	۷۷۷۲	۹۴۱۱	۹۴۱۱	۸۰۳	۱۱۶۶
۱۳۸۳	۶۳۱۷	۳۸۵	۸۳۸۰	۱۵۶۱	۱۳۲۴۰	۱۳۲۴۰	۱۱۴۱	۲۱۹



شکل ۴. نقشه‌های پیش‌بینی احتمال و مشاهداتی سطح برف در اسفندماه. شکل‌های (و)، (د)، (ز) و (ط)، به ترتیب نقشه‌های مشاهداتی پوشش برف و شکل‌های سمت چپ ((و)، (ح) و (ی))، نقشه‌های پیش‌بینی احتمال برف در اسفند سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳.

پیش‌بینی احتمال مکانی وقوع برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور و زنجیره مارکوف مرتبه یک

جدول ۳. پیش‌بینی سطح پوشش برف با احتمالات مختلف

سال	سطح برف مشاهداتی (km ²)	سطح پوشش برف پیش‌بینی شده (km ²)						
		Pr=۱۰۰	Pr≥۹۰	Pr≥۸۰	Pr≥۷۰	Pr≥۶۰	Pr≥۵۰	Pr≥۴۰
۱۳۷۹	۳۳۰۸۹	۱۱۱۸۴	۱۴۵۵۴	۱۸۷۸۰	۱۸۷۸۰	۲۱۹۱۲	۲۹۴۳۴	۳۲۶۷۴
۱۳۸۰	۳۰۳۵۸	۴۹۹۱	۱۰۵۲۳	۱۷۶۳۲	۱۷۶۳۲	۲۱۲۴۳	۳۰۳۰۶	۳۳۶۹۲
۱۳۸۱	۱۶۷۱۰	۴۸۰۳	۱۱۷۹۳	۱۷۵۴۷	۱۷۵۴۷	۲۰۸۱۸	۲۹۸۳۶	۳۳۹۳۲
۱۳۸۲	۱۶۴۳۴	۴۷۶۱	۸۳۳۱	۱۴۱۲۲	۱۸۲۸۷	۲۲۲۸۲	۲۶۹۸۲	۳۱۶۵۲
۱۳۸۳	۲۹۰۷۹	۵۰۱۱	۱۱۶۲۶	۱۵۰۴۰	۱۵۰۴۰	۱۷۹۵۵	۲۶۵۱۶	۳۱۰۳۸

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین نقشه‌های پیش‌بینی و مشاهداتی

سال	ضریب همبستگی
۱۳۷۹	۰/۸۸
۱۳۸۰	۰/۶۳
۱۳۸۱	۰/۶۸
۱۳۸۲	۰/۷۴
۱۳۸۳	۰/۷۸

جدول ۵. مفهوم مقادیر پیکسل‌ها در نقشه حاصل از تفاضل نقشه مشاهداتی و پیش‌بینی

مفهوم	مقادیر پیکسل‌ها در نقشه تفاضلی
پیش‌بینی کاملاً دقیق	۰
پیش‌بینی با احتمال ۵۰ تا ۹۰ درصد	$0 < \text{Value} \leq 0/5$ و $-0/5 \leq \text{Value} < 0$
پیش‌بینی با احتمال ۱۰ تا ۴۰ درصد	$-0/5 < \text{Value} < -0/9$ و $0/5 < \text{Value} < 0/9$
پیش‌بینی کاملاً غلط	۱ و -۱

سطوحی هستند که کاملاً غلط پیش‌بینی شده‌اند. چنانچه مقادیر پیکسل‌ها به ترتیب بین صفر تا ۰/۵ باشد، بیانگر پیش‌بینی سطح برفی با احتمال بالاست و در صورتی که بین ۰/۵- تا صفر باشد بیانگر پیش‌بینی سطح خشک با احتمال بالاست. مقادیر پیکسل‌های بین ۰/۵ تا ۰/۹ و بین ۰/۹- تا ۰/۵- به ترتیب به معنای

برای مقایسه دقیق تر نقشه‌های پیش‌بینی احتمال وقوع برف با نقشه‌های مشاهداتی از تفاضل این دو نقشه استفاده شد. مفهوم مقادیر پیکسل‌ها در نقشه تفاضل در جدول ۵ بیان شده است. بر این مبنای مجموع مساحت پیکسل‌های با ارزش صفر بیانگر سطح پیش‌بینی دقیق و مجموع سطوح دارای مقادیر ۱ و -۱

شکل، توانایی این سیستم‌ها را در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع یک واقعه تعیین می‌کنند (Mason and Graham, 1999). در پژوهش حاضر از ماتریس ۲×۲ مطابق جدول ۷ استفاده شد که در آن فقط دو گزینه برف و خشکی برای پیش‌بینی وضعیت پوشش پیکسل‌ها وجود دارد. بر این اساس مقادیر جدول ۷ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- ss: تعداد پیکسل‌های برفی که سطح برف آنها به درستی پیش‌بینی شده است.
- sd: تعداد پیکسل‌های برفی که به اشتباه خشک پیش‌بینی شده‌اند.
- ds: تعداد پیکسل‌های خشک که به اشتباه برفی پیش‌بینی شده‌اند.
- dd: تعداد پیکسل‌های خشک که به درستی پیش‌بینی شده‌اند.

جدول ۶. برآورد دقت پیش‌بینی مساحت پوشش برف

سال	مساحت پیش‌بینی شده (km ²)				مساحت پیش‌بینی شده (%)			
	دقیق	با احتمال بالا	با احتمال کم	کاملاً غلط	دقیق	با احتمال بالا	با احتمال کم	کاملاً غلط
۱۳۷۹	۶۸۵۰۱	۲۰۷۹۵	۸۹۳۷	۱۹۴	۶۹	۲۱	۹	۰/۲
۱۳۸۰	۶۰۸۹۷	۲۱۶۶۸	۱۰۲۱۸	۶۲۷۰	۶۱	۲۲	۱۰	۶
۱۳۸۱	۶۳۴۷۴	۲۲۸۱۵	۱۱۵۹۴	۱۲۵۲	۶۴	۲۳	۱۲	۱
۱۳۸۲	۶۷۵۱۹	۲۲۶۰۸	۸۵۱۷	۷۷۲	۶۸	۲۳	۹	۱
۱۳۸۳	۶۵۸۳۴	۲۰۹۹۷	۱۰۲۸۵	۱۹۵۹	۶۶	۲۱	۱۰	۲

جدول ۷. جدول وابستگی برای ارزیابی عملکرد روش زنجیره مارکوف در پیش‌بینی سطح برف

مشاهده	پیش‌بینی	
	برف	خشکی
برف	ss	Sd
خشکی	ds	Dd

1. Contingency Table

رابطه (۱۲)

$$CSI = \frac{ss}{ss + sd + ds} = \frac{1}{POD^{-1} + (1 - FAR)^{-1} - 1}$$

به‌ازای POD برابر صفر یا FAR واحد، مقدار CSI صفر خواهد شد. در حالت کلی CSI بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار یک مطلوب است.

مقادیر هر سه شاخص برای پیش‌بینی‌های انجام‌شده در سال‌های ۸۳-۱۳۷۹ در جدول ۸ محاسبه شده است. براساس مقادیر شاخص POD، می‌توان گفت که پیش‌بینی سطوح برفی به‌خوبی انجام شده است. از این نظر بدترین وضعیت پیش‌بینی در سال ۱۳۸۰ و بهترین پیش‌بینی سطح برف در سال ۳۸۲ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که پیش‌بینی سطوح برفی در سال‌های خشک ۸۲-۱۳۸۱ در قیاس با سال‌های پر بارش بهتر صورت گرفته است.

مقادیر شاخص FAR در حالت کلی بیانگر میزان کم‌پیش‌بینی غلط سطوح برفی است. از این لحاظ در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ به‌ترتیب بیشترین میزان پیش‌بینی غلط سطوح خشکی به‌عنوان سطوح برفی صورت گرفته و کمترین خطا در پیش‌بینی وضعیت سطوح خشک مربوط به سال ۱۳۷۹ است.

در نهایت ارزیابی مدل براساس معیار موفقیت بحرانی (CSI)، (با توجه به $CSI > 0.5$) نشانگر آن است که مدل زنجیره مارکوف توانایی مناسبی در برآورد سطوح برفی دارد. همچنین مدل در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۱ به‌ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را در پیش‌بینی سطوح برفی و خشک نشان می‌دهد. بنابراین چنانچه عملکرد مدل در پیش‌بینی سطوح خشک و برفی هم‌زمان ارزیابی شود، کارایی مدل در سال‌های با بارش کم پایین‌تر و پیش‌بینی سطوح برفی در سال‌های با بارش کمتر بهتر است.

به‌منظور طبقه‌بندی پیش‌بینی‌های انجام‌شده در قالب جدول وابستگی، پیش‌بینی‌های با احتمال کمتر از ۵۰ درصد به‌عنوان پیش‌بینی غلط و پیش‌بینی با احتمال بیشتر از ۵۰ درصد به‌عنوان پیش‌بینی صحیح منظور شدند. براین اساس معیارهای احتمال ردیابی^۱ (POD) و نسبت هشدار غلط^۲ (FAR)، برای ارزیابی عملکرد روش زنجیره مارکوف مرتبه اول به‌کار می‌روند (Norbiato et al., 2008). معیار احتمال ردیابی (POD) عبارت است از نسبت پیکسل‌های برفی که وضعیت‌شان به‌درستی پیش‌بینی شده است به کل پیکسل‌های برفی و به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$POD = \frac{SS}{SS + SD} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

مقادیر POD بین صفر و یک تغییر می‌کند و مقدار واحد، مقدار مطلوب است. مقدار POD برابر واحد به این مفهوم است که پیکسل‌های برفی کاملاً به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند. معیار FAR نیز عبارت است از نسبت پیکسل‌های خشکی که به‌غلط برفی پیش‌بینی شده‌اند به کل تعداد پیکسل‌هایی که دارای برف پیش‌بینی شده‌اند. مقادیر FAR بین صفر و یک تغییر می‌کند که در آن مقدار صفر مطلوب است. مقدار FAR برابر صفر به این مفهوم است که در این روش هیچ پیکسل خشکی به‌عنوان پیکسل برفی پیش‌بینی نمی‌شود؛ یا به بیان دیگر مدل در پیش‌بینی خشکی فاقد اشتباه است:

$$FAR = \frac{ds}{ds + ss} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

از آنجاکه هیچ‌یک از معیارهای POD و FAR تصویر کاملی از کیفیت پیش‌بینی‌ها ارائه نمی‌کنند، از معیار دیگری به نام معیار موفقیت بحرانی^۳ (CSI) استفاده می‌شود که عبارت است از نسبت پیکسل‌های برفی که درست پیش‌بینی شده‌اند به کل پیکسل‌هایی که برفی پیش‌بینی شده‌اند (ss+ds)، می‌بایست برفی پیش‌بینی می‌شدند (sd) و به‌صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود (Schaefer, 1990):

1. Probability of Detection
2. False Alarm Ratio
3. Critical Success Index

جدول ۸. مقادیر شاخص‌های عملکردی پیش‌بینی سطح برف در سال‌های مختلف

سال	POD	FAR	CSI
۱۳۷۹	۰/۸۴	۰/۰۵	۰/۸۰
۱۳۸۰	۰/۷۰	۰/۳۰	۰/۵۴
۱۳۸۱	۰/۹۱	۰/۴۹	۰/۴۹
۱۳۸۲	۰/۹۶	۰/۴۴	۰/۵۴
۱۳۸۳	۰/۷۷	۰/۱۶	۰/۶۷

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از زنجیره مارکوف همگن مرتبه یک، نقشه احتمال سطح برف ماه اسفند با استفاده از نقشه حداکثر پوشش سطح برف ماه قبل برای سال‌های ۸۳-۱۳۷۹ پیش‌بینی شد. مقایسه نتایج با نقشه حداکثر پوشش سطح برف حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که پیش‌بینی انجام‌شده به‌خوبی با واقعیت تطبیق دارد؛ به‌طوری‌که مدل می‌تواند وضعیت پوشش سطح را در بیش از ۶۰ درصد مساحت حوضه به‌دقت برآورد کند. افزون بر صحت پیش‌بینی مساحت سطوح برفی، موقعیت این سطوح نیز به‌درستی پیش‌بینی شده است و ضرایب همبستگی بالا بین نقشه‌های مشاهداتی و پیش‌بینی احتمال وقوع برف، مؤید این مطلب است. نتایج ارزیابی مدل براساس سه معیار احتمال ردیابی (POD)، نسبت هشدار غلط (FAR) و موفقیت بحرانی (CSI)، حاکی از توانمندی مدل زنجیره مارکوف در برآورد سطوح برفی است. کارایی کلی مدل پیش‌بینی سطوح خشک و برفی در سال‌های با بارش کم، کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از بررسی حاضر با تعمیم آن به سایر ماه‌ها می‌تواند در پیش‌بینی ذخیره برفی پایان سال به‌کار رود. به‌علاوه، استفاده از این نتایج در مدل‌های پیش‌بینی رواناب می‌تواند با بهبود دقت پیش‌بینی‌ها در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخازن سدها برای کنترل سیلاب و ذخیره تابستانی نقش مؤثری ایفا کند.

۶- منابع

- Alasseur, C., Husson, L., Perez-Fontan, F., 2004, **Simulation of Rain Events Time Series with Markov Model**, PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium, 4(5-8), PP. 2801 - 2805.
- Banihabib, M.A., Jamali, F.S., Saghafian, B., 2013, **Monitoring Snow Area of the Shahcheraghi Dam Basin Using NOAA-AVHRR**, Physical Geography Research Quartely, 45(3), PP. 13-29.
- Banik, P., Mandal, A., M. Rahman, S., 2002, **Markov Chain Analysis of Weekly Rainfall Data in Determining Drought-proneness**, Discrete Dynamics in Nature and Society, 7(4), PP. 231-239.
- Carey, D.I, Haan, C.T., 1978, **Markov process for simulating daily point rainfall**, ASCE Journal of Irrigation and Drainage, 104(1), PP. 111-125.
- Clark, M.P., Slater, A.G., Barrett, A.P. et al., 2006, **Assimilation of Snow Covered Area Information Into Hydrologic and Land-Surface Models**, Advances in Water Resources, 29(8), PP. 1209-21.
- Clarke, R.T., 1998, **Stochastic Process for Water Scientists: Developments and Applications**, Wiley.
- Coe, R., Stern, R.D., 1982, **Fitting models to daily rainfall data (Jordan, Niger, Botswana, Sri Lanka)**, Journal of Applied Meteorology, 21(7), PP.1024-1031.

- Derksen, C., LeDrew, E., 2000, **Variability and Change in Terrestrial Snow Cover: Data acquisition and links to the atmosphere.** Progress in Physical Geography, 24, PP. 469-498.
- Fattahi, A., Vazifehdust, M., 2010, **Estimation of the Snow Temperature and Snow Covered Area Using MODIS Images: The case of Golestan Basins,** Geographical Research, 26(3), PP. 17403-17423.
- Gasm El-Seed, A.M., 1987, **An Application of Markov Chain Model for Wet and dry spell probabilities at Juba in Southern Sudan,** GeoJournal, 15(4), PP. 420-424.
- Haan, C.T., Allen, D.M., Street, J.O., 1976, **A Markov Chain Model for Daily Rainfall,** Water Resources Research, 12 (3), PP. 443-449.
- Immerzeel, W.W., Droogers, P., de Jong, S.M., Bierkens, M.F.P., 2009, **Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing,** Remote Sensing of Environment, 113, PP. 40-49.
- Jain, A., Kumar, A.M., 2007, **Hybrid Neural Network Models for Hydrologic Time Series Forecasting,** Applied Soft Computing, 7, PP. 585-592.
- Jamab, 2004, **Design of the Snow Database and Site Selection for Snow Monitoring Stations in Karun, Dez, Karkheh and Marun Basins Using Remotesensing: algorithm for mapping snow covered area from NOAA- satellite images.**
- Jimoh, O.D., Webster P., 1996, **The Optimum Order of a Markov Chain Model for Daily Rainfall in Nigeria,** Journal of Hydrology, 185 (1-4), PP. 45-69.
- Lana, X., Burgueno, A., 1998, **Daily Dry-wet Behaviour in Catalonia (NE Spain) from the Viewpoint of Markov Chains,** International Journal of Climatology, 18 (7), PP. 793-815.
- Marshall, S., Roads, J. O., Glatzmaier, G., 1994, **Snow Hydrology in a General Circulation Model,** Journal of Climate, 7, PP. 1251-1269.
- Mason, S.J., Graham, N.E., 1999, **Conditional Probabilities, Relative operating Characteristics and Relative Operating Levels,** Weather and Forecasting, 14, PP. 713-725.
- Mei, A., Peng, W., Qing, Q. et al., 2001, **Remote Sensing Introduction,** Higher education Press, Beijing, PP. 46-51.
- Miller, A.J., Leslie, L.M., 1984, **Short-term Single-station Forecasting of Precipitation,** Monthly Weather Review, 112 (6), PP. 1198-1205.
- Miryaeghubzadeh, M.H., Ghanbarpur, M., 2009, **Assessing the Spatial Resolution of Cloud, Snow and Land Products of MODIS Images,** Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 3(9), PP. 51-54.
- Morassutti, M.P., 1987, **A One-Dimensional Markov Chain Model for Predicting Changes in Annual Snowfall at Peterborough,** Ontario, Canadian Water Resources Journal, 12(2), PP. 53-61.
- Najafi Idgar, A., Ghodduzi, J., Saghafian, B., Porhemmat, J., 2007, **Snowmelt Runoff Estimation by Using RS & GIS (A case study in Shahar-chi watershed-Orumiyeh),** Pajouhesh & Sazandegi, 76, PP. 177-185.

- Niu, G.Y., Yang, Z.L., 2007, **An Observation-based Formulation of Snow Cover Fraction and its Evaluation Over Large North American River Basins**, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 112.
- Norbiato, D., Borga, M., Esposti, S. D., Gaume, E., Anquetin, S., 2008, **Flash Flood Warning Based on Rainfall Depth-Duration Thresholds and Soil Moisture Conditions: An Assessment for Gauged and Ungauged Basins**, Journal of Hydrology, 362(3-4), PP. 274-290.
- Palutikof, J.P., Goodess, C.M., Watkins, S.J., Holt, T., 2002, **Generating Rainfall and Temperature Scenarios at Multiple Sites**, Examples from the Mediterranean, Climate, 15(24), PP. 3529-3548.
- Phien, H.N., Warakittimalee, S., 1981, **Simulation of Daily Rainfall Sequences using Markov Chain**, Water SA, 7(4), PP. 193-202.
- Roesch, A., Wild, M., Gilgen, H., Ohmura, A., 2001, **A New Snow Cover Fraction Parametrization for the ECHAM4 GCM**, Climate Dynamics, 17, PP. 933-946.
- Rotondi, M.A., 2010, **To Ski or Not to Ski: Estimating Transition Matrices to Predict Tomorrow's Snowfall Using Real Data**, Journal of Statistics Education, 18(3), PP. 1-14.
- Saghafian, B., Davtala, R., 2007, **Mapping Snow Characteristics Based on snow Observation Probability**, International Journal of Climatology, 27, PP. 1277-1286.
- Sauter, T., Weitzenkamp, B., Schneider, C., 2010, **Spatio-temporal Prediction of Snow Cover in the Black Forest Mountain Range Using Remote Sensing and A Recurrent Neural Network**, International journal of climatology, 30, PP. 2330-2341.
- Schaefer, J.T., 1990, **The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill**, Weather and Forecasting, 5, PP. 570-575.
- Schoof, J.T., Pryor, S.C., 2008, **On the Proper Order of Markov Chain Model for Daily Precipitation Occurrence in the Contiguous United States**, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, PP. 2477-2486.
- Shafer, B.A., Leaf, C.F., 1979, **Landsat Derived Snowcover as an Input Variable for Snowmelt Runoff Forecasting in Central Colorado**, Proc. Final Workshop on Operational Applications of Satellite Snow Cover Observations, NASA CP-2116, PP. 151-69.
- Simpson, J.I., Stitt, J.R., Sienko, M., 1998, **Improved Estimates of the Areal Extent of Snow Cover from AVHRR Data**, Journal of Hydrology, 204, PP. 1-23.
- Stern R.D., 1980, **The Calculation of Probability Distributions for Models of Daily Precipitation (Nigeria, India)**, Archiv fur Meteorologie, Geophysik and Bioklimatologie, Serie B, 28 (1-2), PP. 137-147.
- Wilks, D.S., 1999, **Simultaneous Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation at Multiple Sites in Complex Terrain**, Agricultural and Forest Meteorology, 96 (1-3), PP. 85-101.