

پیشگفتار

یخچال‌های طبیعی توده‌های عظیمی از یخ می‌باشند که به مرور زمان و در مناطقی که متوسط سالانه بارش برف از میزان ذوب آن بیشتر باشد، تشکیل می‌شوند. این منابع علاوه بر اینکه می‌توانند نقش تنظیم‌کننده‌های طبیعی جریان رودخانه‌های پایین‌دست خود را عهده‌دار باشند، از کارکردهای مهم دیگری از منظر زیست-محیطی، ژئومورفولوژیکی و اقلیم‌شناسی نیز برخوردار هستند. پایش و مطالعه یخچال‌ها از قدمت نسبتاً زیادی برخوردار است. به علاوه طی سالیان اخیر که مطالعه اثرات پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن دمای کره زمین به صورت جدی‌تری مورد توجه جامعه جهانی واقع شده، پایش یخچال‌ها به عنوان یکی از مناسب‌ترین ابزارها در بررسی این پدیده در دستور کار قرار گرفته و فناوری‌های متنوعی به خدمت آن درآمده است. اما یخچال‌های طبیعی ایران کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند؛ به نحوی که تا پیش از پیروزی انقلاب اسلامی، معدود گزارشات موجود عمدتاً توسط محققان و گردشگران خارجی تهیه شده بود که سابقه آن‌ها به اواخر قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد. از اوائل دهه ۱۳۶۰ شمسی، مطالعه یخچال‌های طبیعی کشور در قالب چندین پروژه تحقیقاتی مورد توجه جامعه دانشگاهی کشور قرار گرفت. سرآمد این تحقیقات، کارهای ارزشمند جناب آقای مهندس فریبرز وزیر (عضو هیات علمی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی) بود که بررسی‌های گسترده‌ای را در خصوص شرایط و موقعیت یخچال‌های کشور بین سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۷۹ انجام دادند و دستاوردهای خود را در کتابی با عنوان "شناسایی یخچال‌های ایران" منتشر نمودند. پس از این تحقیقات، نگاه بخش اجرایی کشور بیش از پیش به مبحث یخچال‌های طبیعی معطوف گردید که حاصل آن تعریف طرحی با عنوان «محافظة یخچال‌های طبیعی کشور» در وزارت نیرو بوده است. یکی از اهداف اصلی این طرح که هم‌اکنون توسط موسسه تحقیقات آب در حال پیگیری و انجام می‌باشد، ظرفیت‌سازی علمی و تربیت نیروی متخصص جهت انجام مطالعات نظری و عملی در خصوص این منابع می‌باشد. بدین منظور پروژه‌ای تحت عنوان «تدوین برنامه فعالیت‌های پژوهشی و میدانی یخچال‌های طبیعی کشور» با هدف جمع‌آوری و نشر دانش یخچال‌شناسی به انجام رسید که کتاب حاضر بخشی از نتایج آن می‌باشد.

این کتاب در سه بخش اصلی شامل: مباحث عمومی درباره یخچال‌های طبیعی، موارد مربوط به اهمیت و کارکرد یخچال‌ها و شرح کلی یخچال‌های طبیعی ایران تدوین شده است. در بخش اول کتاب، مفاهیم پایه علم یخچال‌شناسی، شامل نحوه تشکیل یخچال‌ها، شاخصه‌های اصلی یخچال‌ها، معادلات حاکم بر مکانیک یخچال‌ها، رفتارهای فرسایشی و هیدرولوژیکی و همچنین روش‌های سنجش از دوری در مطالعه آن‌ها ارائه گردیده است. بخش دوم کتاب اختصاص به شرح کارکردهای طبیعی یخچال‌ها و

اهمیت مطالعه آن‌ها از جنبه‌هایی نظیر تغییر اقلیم، دیرینه‌شناسی، مسائل زیست محیطی و همچنین نگاه حاکم در توسعه تحقیقات پیرامون آن‌ها در سطح بین‌المللی دارد. نهایتاً در بخش سوم کتاب به شرح خصوصیات کلی یخچال‌های طبیعی ایران، اهمیت‌ها و بررسی رویکردهای مناسب برای مطالعه عملیاتی پیرامون آن‌ها پرداخته شده است.

در خاتمه، مولفین کتاب لازم می‌دانند از موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو برای حمایت از تالیف و انتشار این کتاب کمال تشکر را به عمل آورند. همچنین از نظرات مؤثر آقایان دکتر مرتضی افتخاری، دکتر سیدمحمدهادی مشکاتی، مهندس اشکان فرخ‌نیا و دکتر نعمت‌الله کریمی و سرکار خانم مهندس سارا شش‌انگشت از موسسه تحقیقات آب قدردانی می‌گردد. به علاوه در تهیه این کتاب آقایان دکتر منصور طالبی‌زاده، دکتر مهدی مظاهری، دکتر صالح ارشد و خانم‌ها مهندس مریم قشقایی و مهندس ریحانه مرید مساعدت داشته‌اند که از همکاری کلیه این عزیزان سپاسگزاری می‌شود.

مؤلفین

فهرست مطالب

فصل ۱ مفاهیم اولیه و طبقه بندی یخچال‌ها ۱

۱	مقدمه	۱.۱
۲	واژه‌نامه تصویری	۲.۱
۲	انواع یخچال‌ها	۳.۱
۴	طبقه بندی مورفولوژیکی	۱.۳.۱
۶	طبقه‌بندی بر اساس خصوصیات فیزیکی (توزیع دمایی)	۲.۳.۱
۷	توزیع یخچال‌ها در جهان	۴.۱
۸	حرکت یخچالی	۵.۱
۱۰	فرسایش یخچالی	۶.۱

فصل ۲ دینامیک و فرآیندهای مؤثر در تشکیل یخچال‌ها ۱۳

۱۴	مقدمه	۱.۲
۱۴	منشأ یخ‌های یخچالی	۲.۲
۱۴	تشکیل یخچال‌ها	۳.۲
۱۵	عصر یخ	۱.۳.۲
۱۶	توزیع دمایی در یخچال‌ها و ورقه‌های یخی	۴.۲
۲۰	چگالی یخ یخچالی	۵.۲
۲۰	تغییرات چگالی با عمق	۱.۵.۲
۲۳	نرخ رشد بلور	۶.۲
۲۴	ساختار بلورهای یخ	۷.۲
۲۶	تغییر شکل یک بلور یخ منفرد	۸.۲

فصل ۳ بیلان جرمی یخچال‌ها ۲۷

۲۸	مقدمه	۱.۳
۲۹	چینه‌شناسی برف	۲.۳
۳۱	اصول و چگونگی محاسبه بیلان جرمی	۳.۳

۳۱	..... محاسبه بیلان جرمی یخچال	۱.۳.۳
۳۴	..... تغییرات نقطه‌ای ضخامت	۲.۳.۳
۳۵	..... پروفیل بیلان جرمی عمودی	۳.۳.۳
۳۶	..... ارتفاع خط تعادل	۴.۳.۳
۳۶	..... نسبت سطح یخ‌انباشت	۵.۳.۳
۳۶	..... بررسی بیلان خالص ویژه با ارتفاع	۶.۳.۳
۳۸	..... دلایل اقلیمی نوسانات بیلان جرمی	۴.۳
۴۱	..... اشکال دیگر افت یخ در یخچال‌های دره‌ای	۵.۳
۴۱	..... فرآیند یخزایی	۱.۵.۳
۴۲	..... ذوب بستر در یخچال‌ها	۲.۵.۳
۴۲	..... اندازه‌گیری مستقیم بیلان خالص	۶.۳
۴۵	..... روش‌های تعیین بیلان جرمی	۷.۳
۴۵	..... استفاده از عکس‌های هوایی	۱.۷.۳
۴۵	..... روش هیدرولوژیکی	۲.۷.۳
۴۶	..... روش‌های شناسایی اولیه	۳.۷.۳
۴۶	..... روش ژئودتیک	۴.۷.۳
۴۷	..... روش میدانی	۵.۷.۳
۴۷	..... روش غیرمستقیم برگرفته از روش میدانی	۶.۷.۳
۴۸	..... روش شار	۷.۷.۳
۴۹	..... بیلان جرمی ورقه‌های یخی قطبی	۸.۳
۵۰	..... تأثیرگردش اتمسفری روی بیلان جرمی	۹.۳
۵۲	..... رابطه متقابل تغییرات یخچال‌ها با اقیانوس‌ها، اتمسفر و اقلیم	۱۰.۳
۵۴	..... یخچال‌ها و اقلیم	۱.۱۰.۳

فصل ۴ فرآیندهای فرسایشی یخچال‌ها ۵۷

۵۸	..... مقدمه	۱.۴
۵۸	..... یخ‌سابی	۲.۴
۵۹	..... کوارینگ	۳.۴
۶۰	..... فرآیندهای انتقال رسوبات یخچالی	۴.۴
۶۱	..... خصوصیات تأثیرگذار بر انتقال رسوبات	۵.۴

۶۱	دما	۱.۵.۳
۶۱	چگالی	۲.۵.۳
۶۱	لزجت	۳.۵.۳
۶۲	منشأ واریزه‌ها	۶.۴
۶۲	کنده شدن و وارد شدن مواد از کف یخچال‌ها	۱.۶.۳
۶۲	قرارگرفتن مواد واریزه‌ای روی سطح یخچال‌ها	۲.۶.۳
۶۳	مدل انتقال رسوب یخچال‌ها	۳.۶.۳
۶۴	مسیر و نواحی انتقال رسوبات در بدنه یخچال‌ها	۷.۴
۶۴	ناحیه انتقال پایه‌ای	۱.۷.۳
۶۵	منطقه انتقال در سطوح بالای یخچال	۲.۷.۳
۶۶	انتقال از طریق مجاری زیریخچالی و درون‌یخچالی	۳.۷.۳
۶۶	اندازه‌گیری کمی واریزه‌های یخچالی	۸.۴

۶۹ روابط حاکم بر جریان یخچال‌ها و مدلسازی عددی آنها

فصل ۵

۷۰	مقدمه	۱.۵
۷۱	مکانیک جریان‌های یخچالی	۲.۵
۷۱	تعادل نیروها	۱.۲.۵
۷۲	تنش‌های مقاوم	۲.۲.۵
۷۶	محاسبه تنش‌ها در عمق	۳.۲.۵
۷۸	حل عددی تنش‌ها در عمق	۴.۲.۵
۸۲	مقدمه‌ای بر مدل‌سازی عددی یخچال‌ها	۳.۵
۸۳	روش‌های عددی متداول در مدل‌سازی یخچال‌ها	۱.۳.۵
۸۹	مدل‌های مبتنی بر تنش برشی	۲.۳.۵
۹۱	مواردی از کاربرد مدل‌سازی یخچال‌ها	۳.۳.۵

۹۷ هیدرولوژی یخچال‌ها

فصل ۶

۹۸	مقدمه	۱.۶
۹۹	ذوب‌آب	۲.۶
۱۰۰	سیستم‌های زهکشی ذوب‌آب	۳.۶
۱۰۱	سیستم‌های هیدرولیکی (ذوب‌آب) در سطح یخچال	۱.۳.۶

سیستم‌های هیدرولیکی (ذوب‌آب) در بخش میانی یخچال	۲۰۳.۶
سیستم‌های هیدرولیکی ذوب‌آب در ناحیه زیریخچالی	۲۰۳.۶
جریان آب در محیط یخچالی	۴.۶
دریاچه‌های یخچالی	۵.۶
برآورد رواناب در حوضه‌های یخچالی و مدل‌های مورد استفاده	۶.۶
برآورد جریان پایه رودخانه‌های یخچالی منطقه هیمالیا	۱۰۶.۶
تخمین رواناب و استخراج هیدروگراف سالانه جریان رودخانه در حوضه خلیج یخچال	۲۰۶.۶
تخمین رواناب و استخراج هیدروگراف سالانه در حوضه یخچال Haunt d'Arolla	۳۰۶.۶
برخی مدل‌های مورد استفاده برای تخمین رواناب یخچالی	۴۰۶.۶
یخچال‌ها به‌عنوان مخازن ذخیره آب	۷.۶
تغییرات در ذخیره بلند مدت یخچال‌ها	۱۰۷.۶
ذخیره میان مدت	۲۰۷.۶
برخی خطرهای یخچالی	۸.۶
بهمن‌های یخی / برفی	۱۰۸.۶
سیل‌های یخچالی	۲۰۸.۶

فصل ۷ اندازه‌گیری میدانی شاخص‌های مهم یخچال‌ها ۱۳۹

مقدمه	۱.۷
طراحی و برنامه‌ریزی مطالعات میدانی	۲.۷
نمونه‌برداری یخ یخچالی	۳.۷
اندازه‌گیری دبی ذوب‌آب از یخچال‌ها و استخراج رابطه دبی - اشل	۴.۷
اندازه‌گیری اشل	۱۰۴.۷
اندازه‌گیری دبی	۲۰۴.۷
اندازه‌گیری با ردیاب	۵.۷
اصول فیزیکی	۱۰۵.۷
تزریق رنگ	۲۰۵.۷
اندازه‌گیری رنگ	۳۰۵.۷
اندازه‌گیری بیلان انرژی سطحی یخچال‌ها	۶.۷
اصول اولیه	۱۰۶.۷
اندازه‌گیری مؤلفه‌های بیلان انرژی	۲۰۶.۷

۱۵۶	.....	بیان جرمی	۷.۷
۱۵۶	.....	روش‌های یخچال‌شناسی برای اندازه‌گیری بیان جرمی	۱۰.۷.۷

فصل ۸ کاربرد سنجش از دور در مطالعه یخچال‌ها ۱۶۱

۱۶۲	.....	مقدمه	۱.۸
۱۶۲	.....	کاربرد طیف الکترومغناطیس در مطالعه برف و یخ	۲.۸
۱۶۴	.....	انواع طیف‌های الکترومغناطیسی مورد استفاده	۱.۲.۸
۱۶۵	.....	ماهواره GRACE و کاربرد آن در مطالعات یخچال‌ها	۲.۲.۸
۱۶۶	.....	مواردی از کاربرد سنجش از دور در تحقیقات یخچال‌ها	۳.۸
۱۸۰	.....	تحقیقات یخچال‌ها در ایران	۱.۳.۸
۱۸۳	.....	پروژه GLIMS	۴.۸
۱۸۶	.....	کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در بررسی یخچال‌های طبیعی	۵.۸

فصل ۹ اثرات تغییر اقلیم بر حوضه‌های یخچالی ۱۸۷

۱۸۸	.....	مقدمه	۱.۹
۱۸۸	.....	خسارات ناشی از پسروری یخچال‌ها در منطقه هیمالیا	۲.۹
۱۸۸	.....	مناطق مورد مطالعه	۳.۹
۱۸۸	.....	نیپال	۱.۳.۹
۱۹۲	.....	هند	۲.۳.۹
۱۹۴	.....	چین	۳.۳.۹

فصل ۱۰ بازسازی شرایط دیرینه با استفاده از یخچال‌ها ۱۹۷

۱۹۸	.....	مقدمه	۱.۱۰
۱۹۸	.....	تغییرات ایزوتوپ پایدار نمونه‌های یخی	۲.۱۰
۲۰۳	.....	تهیه اطلاعات اقلیمی با استفاده از نمونه‌های حفاری شده یخی	۳.۱۰
۲۰۵	.....	ترکیبات گازی در نمونه‌های یخی	۴.۱۰
۲۰۶	.....	ریزذرات و ردگیرهای رادیواکتیوی در نمونه‌های یخی	۵.۱۰
۲۰۷	.....	اندازه‌گیری و ثبت تغییرات زبانه یخچال‌ها	۶.۱۰
۲۰۸	.....	روش‌های سن‌یابی در زبانه یخچال‌ها	۷.۱۰

۲۰۸	مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها	۱.۷.۱۰
۲۰۸	اسناد تاریخی	۲.۷.۱۰
۲۰۹	سن‌یابی بیولوژیکی	۳.۷.۱۰
۲۱۰	روش‌های فیزیکی - شیمیایی	۴.۷.۱۰

فصل ۱۱ گونه‌های گیاهی و جانوری در محیط‌های یخچالی ۲۱۱

۲۱۲	مقدمه	۱.۱۱
۲۱۲	تأثیر گرمایش جهانی بر تنوع جانوری و گیاهی	۲.۱۱
۲۱۳	پارک‌های ملی یخچالی	۳.۱۱

فصل ۱۲ راهبرد مؤسسات بین‌المللی در مطالعه و پایش یخچال‌ها ۲۱۷

۲۱۸	مقدمه	۱.۱۲
۲۱۹	سرویس پایش جهانی یخچال‌ها (WGMS)	۲.۱۲
۲۱۹	راهبردهای WGMS در پایش یخچال‌ها	۱.۲.۱۲
۲۲۱	سرویس زمین‌شناسی آمریکا (USGS)	۳.۱۲
۲۲۲	اقدامات قبلی سازمان USGS برای اندازه‌گیری یخچال‌ها	۱.۳.۱۲
۲۲۴	اهداف راهبرد پایش یخچال‌ها	۲.۳.۱۲
۲۲۴	راهبرد پایش یخچال‌ها	۳.۳.۱۲
۲۲۷	شبکه یخچال‌های پایه	۴.۳.۱۲
۲۲۹	شبکه یخچال‌های ثانویه	۵.۳.۱۲
۲۳۰	اطلاعات سنجش از دور	۶.۳.۱۲

فصل ۱۳ موقعیت و شرایط کلی یخچال‌های ایران ۲۳۱

۲۳۲	مقدمه	۱.۱۳
۲۳۲	یخچال‌های خاورمیانه	۲.۱۳
۲۳۳	مناطق مستعد یخچالی ایران	۳.۱۳
۲۳۴	رشته‌کوه‌های البرز	۱.۳.۱۳
۲۴۲	کوه سبلان	۲.۳.۱۳
۲۴۶	منطقه زردکوه	۳.۳.۱۳

۲۵۰	منطقه اشتران کوه	۴.۳.۱۳
۲۵۲	نوسانات یخچالی در ایران	۴.۱۳
۲۵۴	نقشه‌های موجود برای مطالعات یخچال‌ها	۵.۱۳
۲۵۴	مقایسه نقشه‌های موجود از یخچال‌های ایران	۱۰.۵.۱۳

فصل ۱۴ بررسی اهمیت یخچال‌های ایران ۲۶۱

۲۶۲	مقدمه	۱.۱۴
۲۶۲	تأثیر یخچال‌ها بر رودخانه‌های کشور	۲.۱۴
۲۶۲	رودخانه‌های مرتبط با یخچال‌های علم کوه	۱.۲.۱۴
۲۶۳	رودخانه‌های مرتبط با یخچال‌های سبلان	۲.۲.۱۴
۲۶۳	رودخانه‌های مرتبط با یخچال‌های قله دماوند	۳.۲.۱۴
۲۶۳	رودخانه‌های مرتبط با یخچال‌های اشتران کوه	۴.۲.۱۴
۲۶۳	رودخانه‌های مرتبط با یخچال‌های زردکوه	۵.۲.۱۴
۲۶۴	تحلیل آمار و اطلاعات هیدرومتری بعضی ایستگاه‌های حوضه‌های یخچالی کشور	۳.۱۴
۲۶۴	ایستگاه‌های سرشاخه‌های مناطق یخچالی	۱.۳.۱۴
۲۶۴	تغییرات در رژیم آبی رودخانه‌ها	۲.۳.۱۴
۲۶۵	بررسی همگنی دبی رودخانه‌ها	۳.۳.۱۴
۲۷۲	بررسی روند در داده‌ها	۴.۳.۱۴
۲۷۴	حجم تقریبی یخچال‌های ایران با استفاده از روابط تجربی	۴.۱۴
۲۷۶	نمونه‌هایی از محاسبه حجم یخچال با استفاده از روابط تجربی	۱.۴.۱۴
۲۷۸	محاسبه حجم یخچال‌های کشور با استفاده از روابط تجربی	۲.۴.۱۴

فصل ۱۵ رویکردهای پیشنهادی برای مطالعه و پایش یخچال‌های ایران ۲۸۳

۲۸۴	مقدمه	۱.۱۵
۲۸۲	مرکز ملی داده‌های برف و یخ آمریکا (NSIDC)	۲.۱۵
۲۸۵	مرکز مطالعات برف و بهمن ارتش هند	۳.۱۵
۲۸۶	آزمایشگاه تحقیقات مناطق سرد و مهندسی ارتش آمریکا	۴.۱۵
۲۸۶	سرویس جهانی پایش یخچال‌ها (WGMS)	۵.۱۵
۲۸۶	ساختار پیشنهادی	۶.۱۵
۲۸۷	تهیه، تولید و توزیع داده	۱.۶.۱۵

۲۸۸	پایش	۲.۶.۱۵
۲۸۸	آموزش	۳.۶.۱۵
۲۸۹	تحقیقات	۴.۶.۱۵
۲۸۹	ارتباطات بین‌المللی	۵.۶.۱۵
۲۸۹	نیروی انسانی لازم	۶.۶.۱۵
۲۹۰	بررسی امکان استفاده از روش‌های حفاظت از یخچال‌ها در ایران	۷.۱۵
۲۹۰	طرح‌های ممکن برای مطالعه یخچال‌های ایران	۸.۱۵
۲۹۲	بررسی مشخصات فیزیکی یخچال‌ها با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای	۱۰.۸.۱۵
۲۹۴	شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در حوضه‌های برفی - یخچالی	۲۰.۸.۱۵

۲۹۵	منابع
۳۱۷	پیوست ۱ ارائه خدمات و استفاده از داده‌های NSIDC
۳۲۳	پیوست ۲ واژه نامه تصویری
۳۴۵	پیوست ۳ فهرست کلمات مخفف و عبارت کامل آن