

## ارتفاع خط تعادل (TPW-ELA و TP-ELA) در ارتفاعات زاگرس

بابک ابراهیمی<sup>۱</sup>، عبدالله سیف<sup>۲\*</sup>

۱-دکتری جغرافیای طبیعی، مدیر دفتر برنامه‌ریزی آب، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان اهواز

۲-استادیار دانشکده علوم جغرافیائی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۵/۶/۱۷

### چکیده

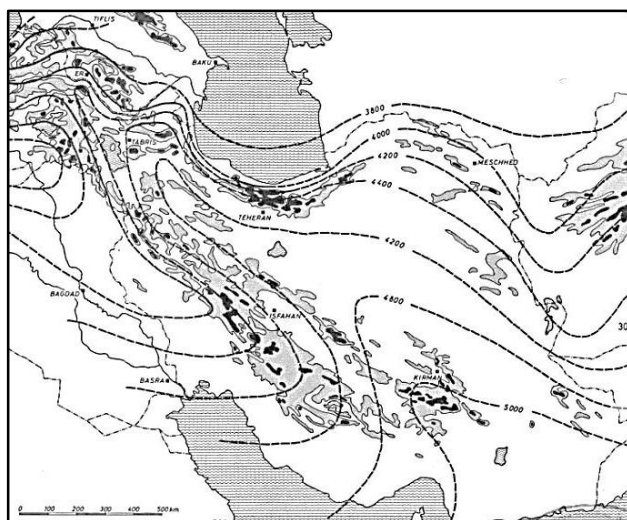
ارتفاع خط تعادل یخچالی عموماً وابسته به میزان تراکم برف است که خود تحت تأثیر توزیع بارش برف در فصل زمستان و همین‌طور فعالیت‌های بادرفتی برف است. با توجه به اثر باد بر موقعیت ارتفاع خط تعادل، دو مفهوم ارتفاع خط تعادل دما-بارش و ارتفاع خط تعادل دما-بارش-باد به ترتیب جهت تفکیک خط تعادل متأثر از دمای فصل ذوب و بارش برف فصل سرد و همین‌طور خط تعادل متأثر از اثر دما، بارش و اثر تراکمی باد ارائه شده است. در این تحقیق خط تعادل دما-بارش در مناطق مطالعاتی زردکوه، اشترانکوه، دنا، شاهو و گرین واقع در زاگرس مرتفع محاسبه شد. به این منظور دما و بارش متوسط فصل ذوب و فصل بارش برف بر اساس داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی تحلیل و ارتفاع خط تعادل دما-بارش حاضر با لحاظ آهنگ افت آدیاباتیک، گرادیان بارش-ارتفاع و وضعیت توپوگرافی محاسبه گردیده است. همچنین بر اساس ارتفاع یخچال‌های کوچک در این مناطق، وضعیت حاضر ارتفاع خط تعادل یخچالی دما-بارش-باد در این مناطق تخمین زده شده است. بر این اساس ارتفاع خط تعادل یخچالی دما-بارش در مناطق مطالعاتی بین ۴۴۰۰ الی ۴۵۰۰ متر از سطح دریا (بالتر از ارتفاع بلندترین قله ارتفاعات زاگرس) و همچنین ارتفاع خط تعادل یخچالی دما-بارش-باد در محدوده ارتفاعات زردکوه و اشترانکوه حدود ۳۸۵۰ متر از سطح دریا اندازه‌گیری شده که حدود ۶۵۰ متر پائین‌تر از ارتفاع خط تعادل یخچالی دما-بارش است. بنابراین با توجه به ارتفاع خط تعادل یخچالی دما-بارش، در حال حاضر شرایط تشکیل توده‌های یخچالی در مناطق مطالعاتی فراهم نبوده و یخچال‌های کوچک مشاهده شده در ارتفاعات دنا، زردکوه و اشترانکوه نتیجه فعالیت‌های بادرفتی در دامنه‌های شمالی و تراکم برف در سیرک‌های یخچالی این مناطق است.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع خط تعادل، یخچال، اقلیم، زاگرس.

### مقدمه

حاضر مناطق مختلف ایران ارائه شده است که هیچ‌کدام از دقت کافی برخوردار نبوده است (شوایتزر، ۱۹۷۲؛ بوبک، ۱۹۳۷؛ گرونرت و همکاران، ۱۹۷۸؛ پرو، ۱۹۸۴؛ یمانی، ۱۳۸۶؛ کوله، ۱۹۷۶، ۱۹۷۴ و ۲۰۰۸؛ کسکی، ۲۰۰۵؛ مسرلی، ۱۹۶۷). همچنین بوبک (۱۹۳۷) ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر را در منطقه سیلوداغ و ست داغ در مرز شمال غربی ایران و ترکیه بر اساس بررسی ۲۰ یخچال کوچک بین ۳۱۰۰ الی ۳۴۰۰ متر از سطح دریا تخمین زده است. در سال ۱۹۷۸ گرونرت و همکارانشان پنج ناحیه کوچک یخچالی در زردکوه را بررسی کرده و حدود ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر را ۳۹۰۰ متر عنوان کرده‌اند. شوایتزر در سال ۱۹۷۲ بر اساس کارهای دیگران و آنالیز عکس‌های هوایی حدود مرز برف دائمی زمان حاضر را در ایران تخمین زده است. او نتایج کار خود را در قالب یک نقشه ارائه نموده است (شکل ۱).

امروزه، تغییرات اقلیمی کوتاه‌تر تا عهد حاضر، موضوعی است که مورد توجه محققین علوم مختلفی چون اقلیم‌شناسی، زمین‌شناسی و جغرافیا قرار گرفته است. ارتفاع خط تعادل یخچالی (ELA) یخچال‌های عهد حاضر و مقایسه آن با ارتفاع خط تعادل یخچال‌های دیرینه از جمله پارامترهایی است که از آن به‌عنوان یک شاخص تغییر اقلیم استفاده می‌شود (لیختنکر، ۱۹۳۸؛ ویسر، ۱۹۳۸؛ کلین و همکاران، ۱۹۹۹؛ پورتر، ۲۰۰۱؛ مارک و همکاران، ۲۰۰۵). یکی از مفاهیم مهم در این رابطه به خصوص در حیطه مباحث یخچال‌شناسی دیرینه، مفهوم افت خط تعادل یخچالی ( $\Delta ELA$ ) است. این پارامتر به واقع از اختلاف ELA دیرینه و ELA حاضر به دست می‌آید. از آنجا که دقت میزان افت خط تعادل یخچالی محاسبه‌شده، به دقت مقدار ELA دیرینه و ELA عهد حاضر دارد، لذا ضروری است که ELA عهد حاضر به روش دقیقی محاسبه گردد. در منابع موجود، تخمین‌های برای مقدار ارتفاع خط تعادل یخچالی



شکل ۱: ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر بر اساس نظر شوایتزر (۱۹۷۲)

در سال ۱۹۷۲ مقبولیت بیشتری داشته که آن هم به دلیل محدودیت آماری داده‌های استفاده شده، محاسبات دقیقی محسوب نمی‌گردد. یکی از بهترین روش‌های موجود جهت محاسبه ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر، روشی است که دال و همکارانش در سال ۱۹۷۷ ارائه کرده‌اند (دال و همکاران، ۱۹۹۷). بر اساس کار دال و همکارانش، آقایان لی و همکارانشان در سال ۲۰۰۳ روش بهبود یافته‌ای را ارائه نموده‌اند که در این تحقیق جهت محاسبه ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر در محدوده زاگرس (با تمرکز بر محدوده زاگرس مرتفع) به کار گرفته شده است. به این منظور پنج منطقه مهم در محدوده زاگرس جهت بررسی‌های دقیق انتخاب گردیده و آمار ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی در این مناطق، برای محاسبه خط تعادل یخچالی حاضر، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج با سایر مطالعات مقایسه شده است.

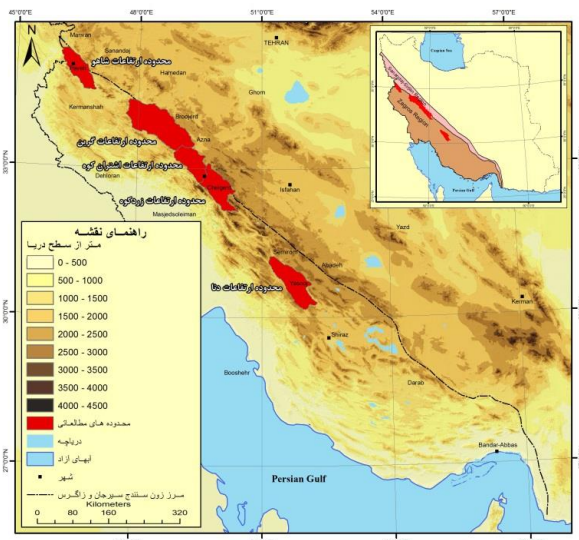
#### محدوده مورد مطالعه

محدوده‌های مطالعاتی این تحقیق شامل ارتفاعات زردکوه، دنا، اشتران کوه، گرین و شاهو و منطبق بر محدوده ارتفاعات زاگرس است. از نظر زمین‌شناسی کوه‌های زاگرس به دو بخش عمده زون زاگرس مرتفع و زون زاگرس چین‌خورده تقسیم‌بندی می‌گردند که محدوده مطالعاتی تحقیق پیش رو، متمرکز بر زاگرس مرتفع می‌باشد. زاگرس مرتفع بخش شمال‌شرقی رشته کوه‌های زاگرس و در واقع اولین ردیف از دیواره‌ای بلند اما با پهنای نسبتاً کم (بین ۱۰ الی ۶۵ کیلومتر) از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی کشیده شده‌اند. در محدوده مطالعاتی، اثرات اوروگرافیک بر جریان‌های غربی بسیار مشهود است، صعود هوای مرطوب مدیترانه‌ای و اطلس شمالی و جریان‌هایی که

به طوری که در این نقشه به وضوح مشاهده می‌گردد، ارتفاع خط تعادل یخچالی حال حاضر از دامنه‌های خارجی رشته کوه‌های حاشیه‌ای کشور به سمت ارتفاعات داخلی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. پرو در سال ۱۹۸۰ اشاره به دو یخچال کوچک واقع در دو سیرک یخچالی در دامنه‌های شمال‌شرقی زردکوه که توسط مورنهای یخچالی محصور شده‌اند، کرده است. بر اساس تحقیقات وی، بلندترین قله منطقه با ارتفاع ۴۲۰۰ متر از سطح دریا، پائین‌تر از ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر منطقه مطالعاتی است. یمانی در سال ۲۰۰۷ برخی سیرک‌های یخچالی را در رقوم ۳۴۰۰ الی ۴۰۰۰ متری زردکوه گزارش کرده است. او همچنین معتقد است رقوم خط تعادل یخچالی معاصر زردکوه بالای ۴۸۰۰ متر از سطح دریاست. کوله طی سال‌های ۱۹۷۴، ۱۹۷۶ و ۲۰۰۸ به بررسی آثار یخچالی کوه‌های جویبار (۴۱۳۵) و کوه لاله‌زار (۴۳۷۴) و کوه هزار (۴۴۶۹) پرداخته است و مرز برف دائمی عهد حاضر این منطقه را بیش از ۴۵۵۰ متر برآورد کرده است. مطالعاتی در این زمینه در ارتفاعات شمال غرب ایران (مرز ایران و ترکیه) نیز به عمل آمده که نتایج آن‌ها در بررسی ارتفاع خط تعادل یخچالی زاگرس بسیار با اهمیت است. در کوه سوفان، واقع در شمال دریاچه وان با ارتفاع ۴۲۰۰ متر از سطح دریا، ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر بالای ۴۰۰۰ متر برآورد شده است (کسیکی، ۲۰۰۵). ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر در کوه‌های بوزل (ارتفاعات مرزی ایران، ترکیه و عراق) نیز بر اساس موقعیت یخچال‌های کوچک محلی ۳۶۰۰ (مسرلی، ۱۹۶۷) متر از سطح دریا برآورد شده است. در بین مقادیر ارائه شده برای مقدار ارتفاع خط تعادل یخچالی حاضر، محاسبات انجام‌شده توسط شوایتزر

یخچالی چال کبود و چال بران می‌باشد. در دامنه شمال شرقی این منطقه نیز چندین یخچال سیرکی مشاهده شده است (فریگنو، ۱۹۹۱؛ موسوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ سیف و ابراهیمی، ۱۳۹۴). ارتفاعات دنا در امتداد سلسله جبال زاگرس میانی و در محدوده جغرافیائی  $36^{\circ} 30'$  الی  $31^{\circ} 12'$  درجه شمالی و  $51^{\circ} 11'$  الی  $51^{\circ} 54'$  درجه شرقی در استان کهگیلویه و بویراحمد، سومین پیکره مورد بررسی این تحقیق است. کوه دنا مشتمل بر زنجیره‌ای از قله (بیش از ۴۷ قله) با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر است که بلندترین آنها ۴۴۰۹ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. چهارمین منطقه مورد بررسی، ارتفاعات گرین و شاه‌نشین در محدوده جغرافیائی  $48^{\circ} 33'$  الی  $44^{\circ} 04'$  درجه شمالی و  $48^{\circ} 16'$  الی  $48^{\circ} 38'$  درجه شرقی در استان لرستان است. این ارتفاعات نسبت به سه سایت دیگری از متوسط ارتفاع کمتری برخوردار بوده و ارتفاع بلندترین قله آن مشرف به دره ونائی حدود ۳۶۵۰ متر از سطح دریاست. آخرین محدوده مطالعاتی این تحقیق ارتفاعات شاهو در بخش شمال-غربی سلسله جبال زاگرس و در محدوده جغرافیائی  $48^{\circ} 48'$  الی  $34^{\circ} 10'$  درجه شمالی و  $46^{\circ} 18'$  الی  $40^{\circ} 40'$  درجه شرقی واقع در استان‌های کردستان و کرمانشاه است. ارتفاع بلندترین قله شاهو در جنوب شرق شهر پاوه حدود ۳۳۵۰ متر از سطح دریاست (شکل ۲).

از قسمت جنوب‌غربی بر دامنه‌های غربی زاگرس می‌رسند باعث بارش‌های سنگینی در این منطقه می‌شوند. میانگین بارندگی سالیانه در برخی از ارتفاعات محدوده مطالعاتی به بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال بالغ می‌گردد. اثر دیوار اقلیمی زاگرس عمدتاً باعث تحلیل توان رطوبتی سامانه‌های باران‌زای مدیترانه‌ای و جنوب غربی می‌شود و این توده‌های هوای در حال حرکت به سمت مرکز ایران، خاصیت باران‌زایی خود را به نحو چشمگیری از دست می‌دهند به نحوی که بارندگی سالیانه در نواحی شرقی زاگرس به کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد. کوه زردکوه در امتداد سلسله جبال زاگرس میانی و در محدوده جغرافیائی  $32^{\circ} 14'$  الی  $32^{\circ} 38'$  درجه شمالی و  $49^{\circ} 50'$  الی  $49^{\circ} 15'$  درجه شرقی و در استان چهارمحال و بختیاری واقع است. بلندترین قله در منطقه زردکوه، ارتفاعی در حدود ۴۲۲۰ متر از سطح دریا را دارد. منطقه زردکوه در حال حاضر دربرگیرنده چند یخچال کوچک (عموماً یخچال‌های واقع در سیرک‌های یخچالی) در دامنه شمال شرقی است (فریگنو، ۱۹۹۱؛ موسوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ سیف و ابراهیمی، ۱۳۹۴). ارتفاعات اشتران‌کوه واقع در محدوده جغرافیائی  $33^{\circ} 25'$  الی  $33^{\circ} 10'$  درجه شمالی و  $49^{\circ} 30'$  الی  $49^{\circ} 10'$  درجه شرقی و در استان لرستان دیگر محدوده مطالعاتی این تحقیق است. بلندترین قله این منطقه، قله سنبران با ارتفاع ۴۰۸۱ متر از سطح دریاست که مشرف بر سیرک‌های

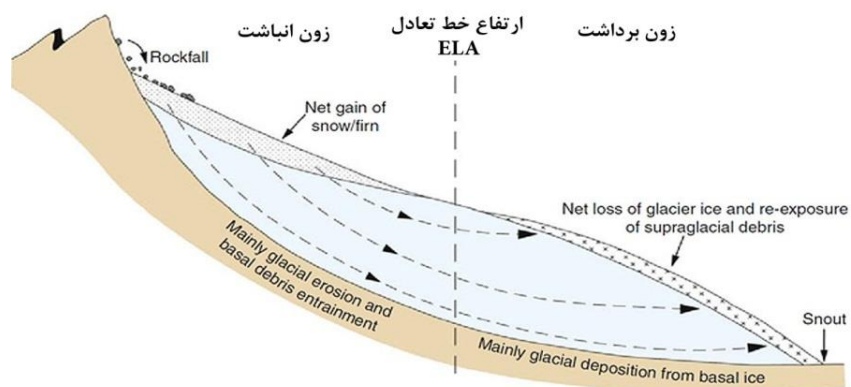


شکل ۲: موقعیت محدوده‌های مطالعاتی در ارتفاعات زاگرس بر روی مدل رقومی ارتفاعی (ابراهیمی، ۲۰۱۵).

### مواد و روش‌ها

نقاطی از یخچال است که میزان برداشت و انباشت در آن طی یک سال برابر باشد (یا به عبارتی دیگر موازنه جرمی یخ در آن برابر با صفر است) (شکل ۳).

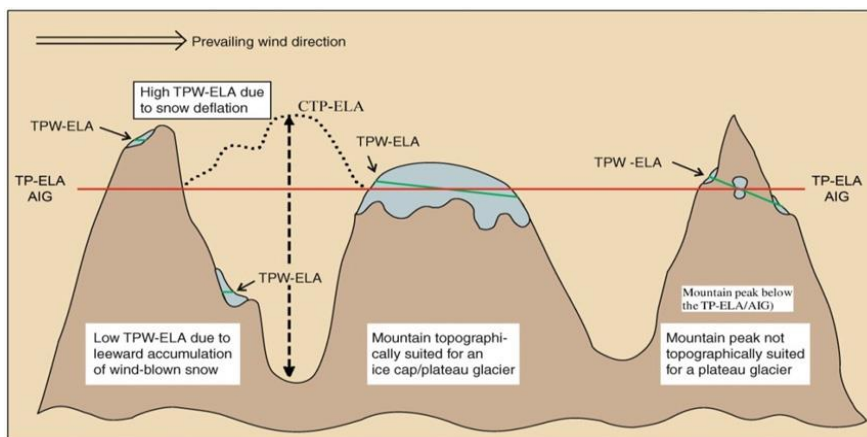
ارتفاع خط تعادل یخچالی مفهومی در ارتباط با سامانه‌های یخچالی است. ارتفاع خط تعادل یخچالی (ELA) در یک یخچال، خط تئوریکی است که بیانگر



شکل ۳: نیمرخ طولی از یک دره یخچالی بیانگر ارتباط میان موازنه جرمی، مسیر حرکت ذرات یخ و فرایندهای حمل واریزه‌های یخچالی، محدوده زون انباشت، برداشت و موقعیت ارتفاع خط تعادل یخچالی.

پایدار در نظر گرفته می‌شود. میزان ارتفاع خط تعادل یخچالی سالیانه بر اساس میزان آن در انتهای فصل انباشت در نظر گرفته شده و عموماً هم‌معنی با خط برف در نظر گرفته می‌شود. در بیشتر مطالعات یخچالی دیرینه نیز مقدار ELA مترادف با مرز برف در نظر گرفته می‌شود (می‌یر و پست، ۱۹۶۲؛ پورتر، ۲۰۰۱). مقدار ELA عموماً به میزان تراکم برف در طول زمستان و میزان برداشت در طول فصل تابستان بستگی دارد. از آنجا که باد می‌تواند بر میزان ELA تأثیر بگذارد، دال و نسج (۱۹۹۲) واژه ارتفاع خط تعادل بارش-دما (TP-ELA) و ارتفاع خط تعادل بارش-دما-باد (TPW-ELA) را معرفی کرده‌اند. بنابراین واژه ارتفاع خط تعادل بارش-دما بیانگر وضعیت عمومی ELA تحت تأثیر دما و بارش است و واژه ارتفاع خط تعادل بارش-دما-باد بیانگر اثر بادرفتی برف در ناحیه تراکم یخچالی (بخصوص یخچال‌های سیرکی) است (شکل ۴).

ارتفاع خط تعادل یخچالی یا ELA بندرت به صورت یک خط با ارتفاع ثابت در کل گستره عرضی یک یخچال دیده می‌شود. علت این پدیده تأثیرات محلی توپوگرافی و اقلیمی است. بنابراین ELA بیانگر متوسط ارتفاع خط تعادل یخچالی در یک منطقه است. میزان ارتفاع خط تعادل یخچالی دقیق بر اساس مشاهدات صحرائی یا تصاویر منطقه‌ای (عکس‌های هوایی و یا ماهواره‌ای) به دست می‌آید. واژه دیگری که در بررسی‌های یخچال‌شناسی به کار می‌رود واژه مرزبرف است. مرزبرف عبارت است از پایین‌ترین حد برف دائمی در یک چشم‌انداز که معادل است با حد فیرن در یخچال‌های آلپی و عموماً پایین‌ترین حد برف در انتهای فصل ذوب را برای آن لحاظ می‌کنند. برای بیلان یک‌ساله یک یخچال، ارتفاع خط تعادل یخچالی یا ELA هم‌معنی با مرزبرف در انتهای تابستان در نظر گرفته می‌شود. متوسط ارتفاع سالیانه مرزبرف در انتهای تابستان در طول دوره ۳۰ ساله به‌عنوان ELA



شکل ۴: مثال شماتیک نشان‌دهنده اختلاف میان خط تعادل دما-بارش (TP-ELA) و خط تعادل دما-بارش-باد (TPW-ELA) (دال و نسج، ۱۹۹۲).

است (دال و نسج، ۱۹۹۲). دال و همکارانش در سال ۱۹۹۷ یک روش تئوری بر اساس بارش زمستانه و

واژه TP-ELA هم‌معنی با پایین‌ترین ارتفاع یخبندان توسط دال و نسج برای یخچال‌های فلاتی ارائه شده

رابطه (۱)

$$P = 0.915 e^{0.339T} \quad (r^2 = 0.989, P < 0.0001)$$

در این رابطه P بیانگر بارش زمستان (آب معادل به متر) و T بیانگر دمای فصل ذوب (برحسب درجه سانتی‌گراد) است. لی و همکارانش (۲۰۰۳) نشان دادند که AIG یا TP-ELA را می‌توان از رابطه ذیل محاسبه نمود:

رابطه (۲)

$$AIG \text{ (or TP-ELA)} = H_0 + (100 * h)$$

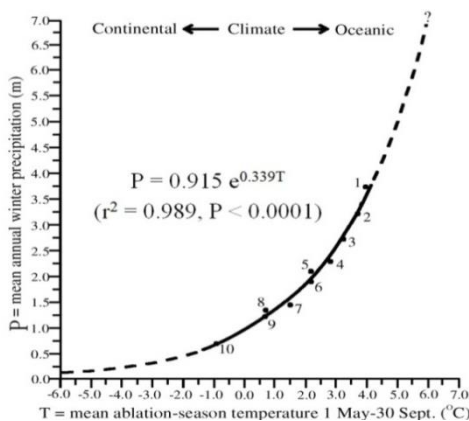
و

رابطه (۳)

$$h = [\ln(0.915) + 0.339T_0 - \ln(P_0)] / [\ln(1 + \Delta P) + 0.339\Delta T]$$

مقادیر  $P_0$  و  $T_0$  به‌عنوان بارش زمستان و دمای فصل ذوب در ارتفاع معین  $H_0$  (ارتفاع ایستگاه هواشناسی) و  $h$  بیانگر ارتفاع AIG بالای  $H_0$  برحسب صد متر است.  $\Delta t$  نرخ آدیاباتیک دما و  $\Delta p$  گرادیان ارتفاع-بارش است.

دمای فصل ذوب برای محاسبه ELA عهد حاضر ارائه کرده‌اند. بر اساس کار دال و همکارانش، آقایان لی و همکارانشان (۲۰۰۳) روش کامل‌تری را برای محاسبه ارتفاع یخبندان (AIG) و میزان TP-ELA ارائه کرده‌اند. این روش بر اساس میزان دما در فصل ذوب و بارش فصل زمستان ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی ارائه‌شده است. آنها واژه‌ای به نام ارتفاع یخبندان را به کار گرفته‌اند که از لحاظ اقلیمی هم ارزش با میزان TP-ELA در نظر گرفته می‌شود. تحقیقات زیادی برای محاسبه رابطه میان دمای فصل ذوب و بارش فصل زمستان در خط ELA به‌عمل آمده است که همگی بیانگر رابطه غیرخطی میان این دو پارامتر است. لی و همکارانش (۲۰۰۳) رابطه غیرخطی (شکل ۵ و رابطه ۱) را برای متوسط دما در فصل ذوب (اول ماه می الی ۳۰ سپتامبر) و بارش زمستان (اول اکتبر الی ۳۰ آوریل) برای نقطه ELA ارائه کرده‌اند:



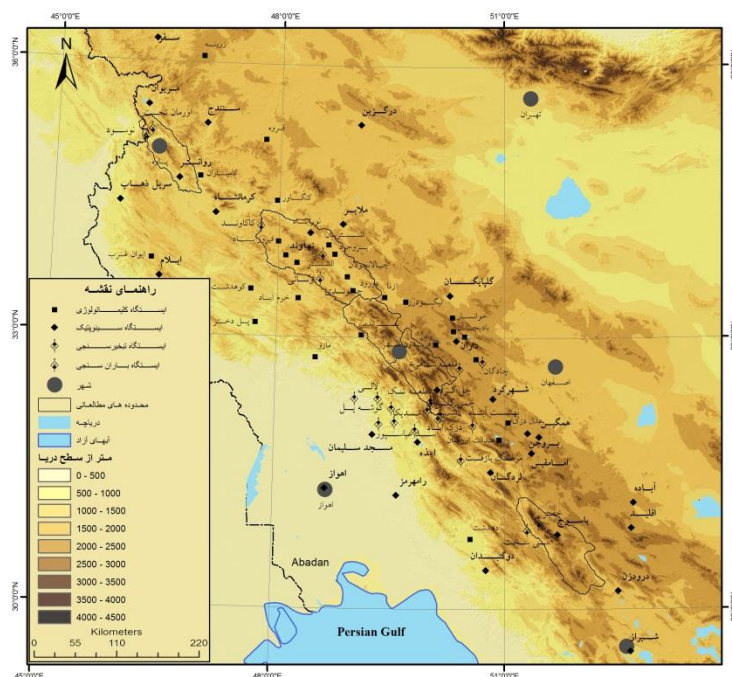
شکل ۵: رابطه غیرخطی دمای فصل ذوب و بارش زمستان در محل ELA (لی و همکارانش، ۲۰۰۳).

استخراج و یا محاسبه شده‌اند. تعداد و طول آمار مشترک ثبت شده در ایستگاه‌های مورد استفاده به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی به شرح جدول ۲ می‌باشد. کمبود داده‌ها در سری زمانی ایستگاه‌های

در این تحقیق، ایستگاه‌های مناطق مطالعاتی (اعم از ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی، باران‌سنجی و تبخیر سنجی) به شرح جدول ۱ و شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های ضروری مختلف

محاسبه شده است. همچنین متوسط بارش سالیانه برای همه ایستگاه‌ها مطالعاتی محاسبه شده است. به منظور محاسبه گرادیان دما و بارش، رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و دیگر پارامترهای دما و بارش به تفکیک مناطق مطالعاتی نیز محاسبه شده است.

مورد استفاده بر اساس همبستگی با ایستگاه‌های مجاور ترمیم شده است. متوسط دمای ایستگاه‌های بررسی شده به همراه دیگر پارامترهای آماری مورد نیاز تحقیق مانند متوسط دمای سالیانه، متوسط دما در فصل بهار، متوسط دما در فصل پائیز و زمستان، متوسط دمای سردترین و گرم‌ترین فصل سال و متوسط دمای فصول ذوب و فصول بارش زمستان



شکل ۶: ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق به تفکیک نوع ایستگاه

## نتایج

حداکثر و حداقل بارش سالیانه ثبت شده در ایستگاه چلگرد برابر با ۲۵۵۵ و ۹۲۵ میلی‌متر است (با انحراف معیار ۳۵۵ و ضریب تغییرات ۲۴). در جدول ۳، ضرایب معادلات رگرسیونی خطی بین ارتفاع و پارامترهای مختلف دما ( $T=aH+b$ ) ارائه شده است. متوسط دمای ماهیانه، متوسط دمای تابستان، متوسط دما در سردترین و گرم‌ترین ماه سال، متوسط دما در فصل ذوب (اول ماه می تا ۳۰ سپتامبر میلادی) و

در منطقه مطالعاتی زردکوه، متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بررسی شده بین  $9/6^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه کوه‌رنگ) و  $25/5^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه گدارلندر) متغیر است. عمده بارش این منطقه در فصل زمستان و به صورت برف بوده و بر اساس داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه چلگرد در ارتفاع ۲۴۰۰ متری از سطح دریا، شمال شرق پیکره زردکوه سالیانه در حدود ۱۴۶۸ میلی‌متر بارش در بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند.



اساس داده‌های بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های موردبررسی، شمال شرق پیکره اشتران کوه سالیانه در حدود ۶۴۰ میلی‌متر بارش در بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند (در ایستگاه دورود ۶۴۴ و در ازنا ۴۳۰ میلی‌متر). حداکثر و حداقل بارش سالیانه ثبت‌شده در ایستگاه دورود برابر با ۹۶۱ و ۳۶۷ میلی‌متر و حداکثر بارش ثبت‌شده در ازنا و الیگودرز به ترتیب برابر با ۶۱۲ و ۵۸۵ میلی‌متر است. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی انجام‌شده (جدول ۵)، متوسط دمای سالیانه در ارتفاع ۳۷۲۰ متری به صفر درجه رسیده و در قله اشتران کوه (با ارتفاع ۴۰۸۱ متر از سطح دریا) به  $5/54^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی، متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۵۲۴۰، ۵۲۶۰ و ۵۵۰۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه می‌رسد (شکل ۸). رابطه رگرسیونی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه در محدوده مطالعاتی اشتران کوه ( $P=0.6019H$ ) ۲۶۵.۶۵ دارای ضریب همبستگی ۰/۷ است. در سایت مطالعاتی اشتران کوه با لحاظ گرادیان بارش و دما همین‌طور داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های دورود، الیگودرز و ازنا، ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی عهد حاضر بالای ۴۵۰۰ متر از سطح دریا محاسبه‌شده است (جدول ۶). متوسط دما، دمای فصل ذوب، دمای دوره بارش زمستان، دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال در تراز خط تعادل یخچالی این منطقه به ترتیب  $5/5$ ،  $12/1$ ،  $7/2$  و  $20/7$  - درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

متوسط دما در فصل بارش زمستان (اول اکتبر تا ۳۰ آوریل) مهم‌ترین پارامترهای دمایی هستند که ارتباط آن‌ها با ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۷). بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی انجام‌شده، متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات بالای ۳۷۰۰ متر به زیر صفر درجه رسیده و در بلندترین قله زردکوه (با ارتفاع ۴۲۲۰ متر از سطح دریا) حدود  $3/6^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. تحلیل‌های رگرسیونی نشان می‌دهد که متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۵۰۱۵، ۵۱۰۰ و ۵۴۳۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه برسد (شکل ۸). رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه ( $P=aH+b$ ) نیز در شکل ۷ ارائه شده است. ضریب همبستگی معادله برازش شده در صورت حذف ایستگاه دزک‌آباد برابر با ۰/۹۳۷ و با لحاظ آن ۰/۸۳۹ می‌باشد. در این منطقه بر طبق روش لی و همکاران (۲۰۰۳) ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی حاضر (TP-ELA یا AIG) بر اساس داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های کوه‌رنگ، دزک‌آباد و چلگرد به ترتیب ۴۵۱۲، ۴۶۲۶ و ۴۵۱۴ متر از سطح دریا محاسبه شده است (جدول ۴). بر اساس معادلات رگرسیونی ارائه شده، متوسط دما، دمای فصل ذوب، دمای دوره بارش زمستان، دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال در تراز خط تعادل یخچالی اقلیمی حاضر (حدود ۴۵۰۰ متر از سطح دریا) به ترتیب  $5/6$ ،  $3/5$ ،  $11/9$ ،  $6/6$  و  $20/6$  - درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در منطقه مطالعاتی اشترانکوه، متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بررسی‌شده بین  $9/5^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه کوه‌رنگ) و  $24/0^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه مازو) متغیر است. بر

جدول ۱: ایستگاه‌های مورد استفاده جهت محاسبه گرادیان بارش و دما به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی

ایستگاه	مورد استفاده در محاسبه گرادیان بارش محدوده: ©					مورد استفاده در محاسبه گرادیان دما محدوده: ©					ایستگاه
	۵	۴	۳	۲	۱	۵	۴	۳	۲	۱	
ازنا									•		سی سخت
اشترینان											شهرکرد
اقلید											شیراز
الشتر											عدالت اورگان
الیگودرز											عدل دزک
امام قیس											فریدون شهر
اندیکا											فیروز آباد
اورمان تخت											قروه
اهواز											قلعه تک
ایذه											قلعه شاهرخ
ایلام											کاکاوند
ایوان غرب											کامیاران
آباده											کرمانشاه
بادبجان											کنگاور
بروجرد											کوهدشت
بروجن											کوهرنگ
بهشت آباد											گدار لندر
پل دختر											گلپایگان
چادگان											گوشه پل
چالانچولان											لالی
چغلوئندی											لردگان
چل گرد											مازو
چمن گلی											مرغک بازفت
خرم آباد											مریوان
خفر											مسجد سلیمان
خوانسار											ملایر
داران											نصرالدین
دامنه فریدن											نورآباد
درگزین											نوسود
درودزن											نهایوند
دزک آباد											ونائی
دو آب											همگین
مصمصامی											
دورود											یاسوج



جدول ۴: ارتفاع خط تعادل یخچالی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) در سایت مطالعاتی زردکوه

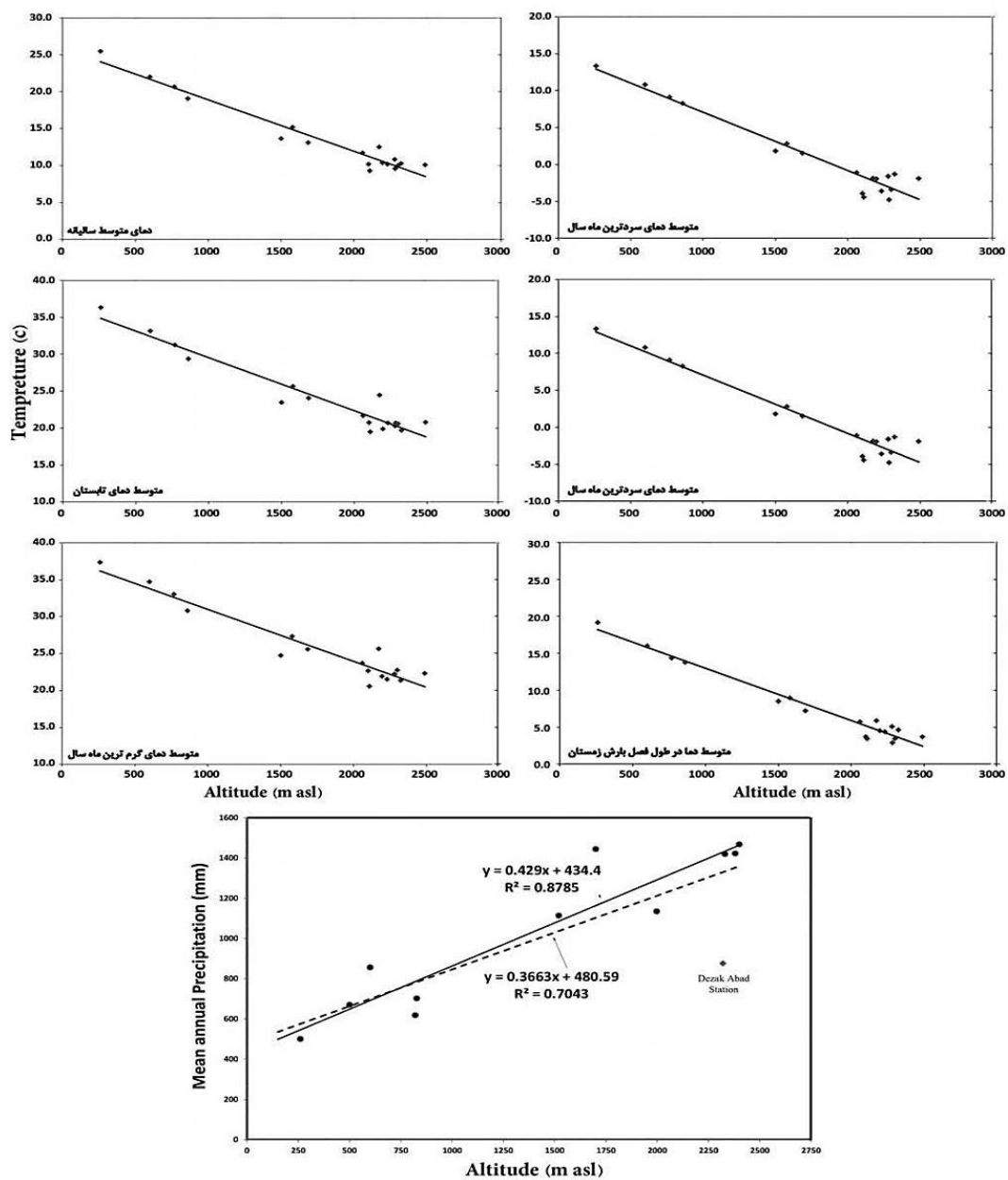
پارامتر اقلیمی	ایستگاه کوه‌رنگ	ایستگاه دزک‌آباد	ایستگاه چلگرد
T <sub>0</sub> : (°C)	۱۹	۱۸/۲	۱۸/۲
P <sub>0</sub> : (mm)	۱۴۲۰	۸۷۶	۱۴۶۸
H <sub>0</sub> : (m a.s.l.)	۲۲۸۵	۲۳۲۰	۲۴۰۰
ΔP: (%)	۳/۶۶_ ۴/۲۹	۳/۶۶_ ۴/۲۹	۳/۶۶_ ۴/۲۹
ΔT: (°C / 100 m)	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸
TP-ELA (AIG): (m a.s.l.)	۴۵۱۲ (۴۵۳۷_ ۴۴۸۷)	۴۶۲۶ (۴۶۵۱_ ۴۶۰۰)	۴۵۱۴ (۴۴۹۱_ ۴۵۲۸)

سی‌سخت و خفر، ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی عهد حاضر محاسبه گردیده است. بر اساس این محاسبات ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی بالاتر از ۴۵۰۰ متری سطح دریاست (جدول ۷). متوسط دما، دمای فصل ذوب، دمای دوره بارش زمستان، دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال در تراز خط تعادل یخچالی نیز (۴۵۶۰ متر از سطح دریا) به ترتیب ۳/۵-، ۳/۳، ۸/۵-، ۶/۹ و ۱۵/۰- درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. در منطقه مطالعاتی گرین، متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بروجرد، خرم‌آباد و نهاوند به ترتیب برابر با ۱۴/۷°C، ۱۶/۸°C و ۱۳/۸°C است. بر اساس داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، شمال‌شرق پیکره گرین سالیانه در حدود ۴۰۰ الی ۷۰۰ میلی‌متر بارش در بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند (ایستگاه الشتر ۴۳۰ و ونائی ۷۲۰ میلی‌متر). حداکثر و حداقل بارش سالیانه ثبت شده در ایستگاه بروجرد برابر با ۷۱۵ و ۲۹۲ میلی‌متر است. حداکثر و حداقل بارش ثبت شده در ایستگاه ونائی نیز به ترتیب برابر با ۱۰۵۷ و ۵۲۰ میلی‌متر است. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی، متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات بالای ۳۶۳۰ متر به زیر صفر درجه رسیده و در بلندترین قله گرین (با ارتفاع ۳۶۴۶ متر از سطح

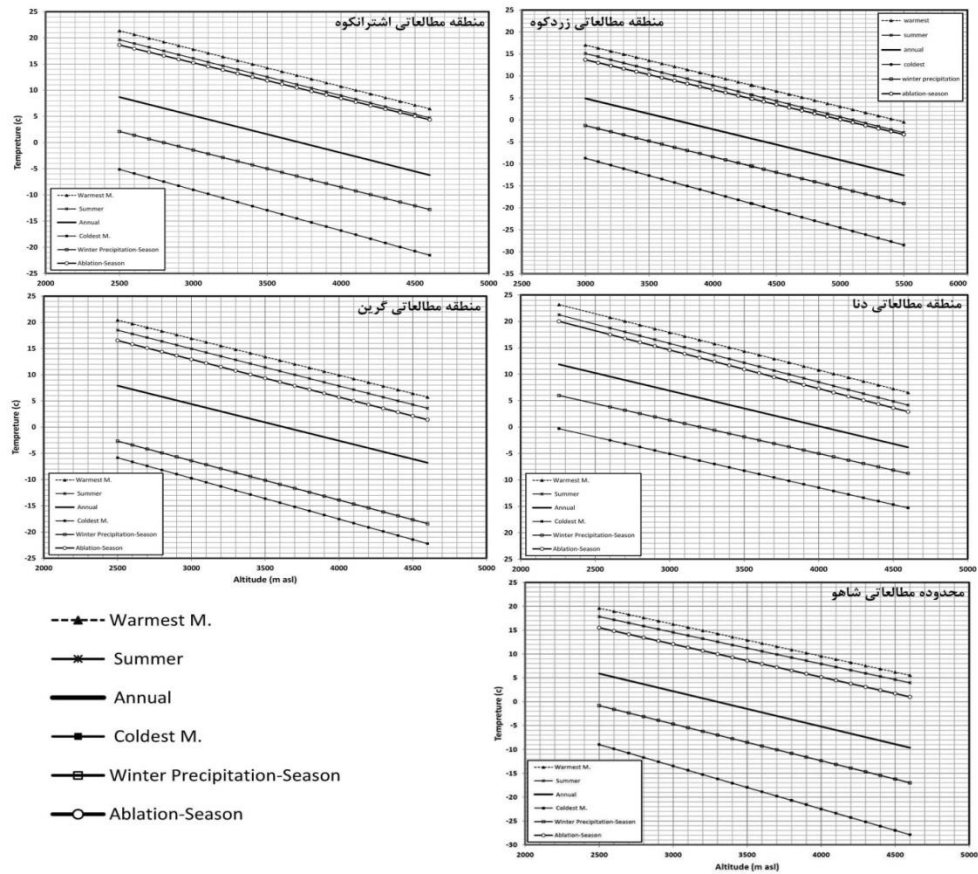
در محدوده مطالعاتی دنا متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بررسی شده بین ۱۰/۸°C (ایستگاه بروجرد) و ۲۶/۰°C (ایستگاه اهواز) متغیر است. بر اساس داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، شمال‌شرق پیکره دنا سالیانه در حدود ۷۸۰ میلی‌متر بارش در بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند (در ایستگاه سی‌سخت ۷۸۳ میلی‌متر و یاسوج ۸۶۵ میلی‌متر). حداکثر و حداقل بارش سالیانه ثبت‌شده در ایستگاه یاسوج برابر با ۱۲۹۳ و ۵۱۶ میلی‌متر است. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی انجام شده (جدول ۵)، متوسط دمای سالیانه در ارتفاع ۴۰۲۰ متر به صفر درجه رسیده و در بلندترین قله دنا (با ارتفاع ۴۴۰۹ متر از سطح دریا) به ۲/۵۷°C- می‌رسد. تحلیل‌های رگرسیونی نشان می‌دهد که متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۵۰۰۰، ۵۱۶۰ و ۵۵۰۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه می‌رسد (شکل ۸). همچنین رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه در محدوده مطالعاتی دنا (P=0.4468H-212.08) دارای ضریب همبستگی ۰/۹ است. در این محدوده با لحاظ گرادیان بارش و دما همین‌طور داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های یاسوج،

بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند (ایستگاه الشتر ۴۳۰ و ونائی ۷۲۰ میلی‌متر). حداکثر و حداقل بارش سالیانه ثبت‌شده در ایستگاه بروجرد برابر با ۷۱۵ و ۲۹۲ میلی‌متر است. حداکثر و حداقل بارش ثبت‌شده در ایستگاه ونائی نیز به ترتیب برابر با ۱۰۵۷ و ۵۲۰ میلی‌متر است. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی، متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات بالای ۳۶۳۰ متر به زیر صفر درجه رسیده و در بلندترین قله گرین (با ارتفاع ۳۶۴۶ متر از سطح دریا) به  $0/1^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. علاوه بر این، متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۴۷۹۰، ۵۱۰۰ و ۵۴۲۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه می‌رسد (شکل ۸).

دریا) به  $0/1^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. علاوه بر این، متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۴۷۹۰، ۵۱۰۰ و ۵۴۲۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه می‌رسد (شکل ۸). همچنین رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه در محدوده مطالعاتی گرین  $(P=0.5499H-418.54)$  دارای ضریب همبستگی ۰/۹ است. در منطقه مطالعاتی گرین، متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بروجرد، خرم‌آباد و نهاوند به ترتیب برابر با  $14/7^{\circ}\text{C}$ ،  $16/8^{\circ}\text{C}$  و  $13/8^{\circ}\text{C}$  است. بر اساس داده‌های بارش ثبت‌شده در ایستگاه‌های موردبررسی، شمال‌شرق پیکره گرین سالیانه در حدود ۴۰۰ الی ۷۰۰ میلی‌متر بارش در



شکل ۷: رابطه رگرسیونی پارامترهای مختلف دما (T) با ارتفاع (H) و رابطه رگرسیونی بارش متوسط سالیانه - ارتفاع در سایت مطالعاتی زردکوه.



شکل ۸: رابطه رگرسیونی ارتفاع با پارامترهای مختلف دما (متوسط سالیانه، گرم‌ترین ماه، تابستان، سردترین ماه، دما در دوره بارش زمستان و دمای فصل ذوب) در سایت‌های مطالعاتی.

جدول ۵: رابطه رگرسیونی پارامترهای مختلف دما (T) با ارتفاع (H) در سایت‌های مطالعاتی

پارامتر	a	b	r <sup>2</sup>	a	b	r <sup>2</sup>
	سایت مطالعاتی دنا			سایت مطالعاتی اشتران‌کوه		
°C - دمای متوسط سالیانه	- ۰/۰۰۶۷	۲۶/۹۷۰۰	۰/۹۶۱۴	- ۰/۰۰۷۱	۲۶/۴۲۹۰	۰/۹۶۱۴
°C - متوسط دمای تابستان	- ۰/۰۰۷۳	۳۷/۷۱۵۰	۰/۹۴۱۶	- ۰/۰۰۷۱	۳۷/۳۷۸۰	۰/۹۴۱۶
متوسط دمای سردترین ماه °C - سال	- ۰/۰۰۶۴	۱۴/۱۲۴۰	۰/۹۰۴۲	- ۰/۰۰۷۸	۱۴/۳۵۹۰	۰/۹۶۰۷
متوسط دمای گرم‌ترین ماه °C - سال	- ۰/۰۰۷۱	۳۹/۱۹۰۰	۰/۹۵۰۸	- ۰/۰۰۷۱	۳۹/۱۱۰۰	۰/۹۵۵۲
°C - متوسط دمای فصل ذوب	- ۰/۰۰۷۳	۳۶/۴۷۵	۰/۹۳۳۹	- ۰/۰۰۶۸	۳۵/۶۳۳	۰/۹۴۵۲
متوسط دما در طول فصل بارش °C - زمستان	- ۰/۰۰۶۳	۲۰/۱۸۱۰	۰/۹۳۳۹	- ۰/۰۰۷۱	۱۹/۸۵۵۰	۰/۹۶۸۴
	سایت مطالعاتی شاهو			سایت مطالعاتی گرین		
°C - دمای متوسط سالیانه	- ۰/۰۰۷۴	۲۴/۳۹۳۰	۰/۸۱۴۴	- ۰/۰۰۷۰	۲۵/۴۱۱۰	۰/۸۳۱
°C - متوسط دمای تابستان	- ۰/۰۰۶۶	۳۴/۳۲۶۰	۰/۷۳۰۵	- ۰/۰۰۷۱	۳۶/۲۶۰۰	۰/۷۴۶
متوسط دمای سردترین ماه °C - سال	- ۰/۰۰۹۰	۱۳/۵۱۶۰	۰/۸۴۹۵	- ۰/۰۰۷۸	۱۳/۶۶۲۰	۰/۸۹۵
°C - متوسط دمای گرم‌ترین ماه سال	- ۰/۰۰۶۷	۳۶/۳۵۲۰	۰/۷۳۷۲	- ۰/۰۰۷۰	۳۷/۹۲۶۰	۰/۷۴۶
°C - متوسط دمای فصل ذوب	- ۰/۰۰۶۹	۳۲/۷۵۳	۰/۷۴۹	- ۰/۰۰۷۲	۳۴/۵۳۵	۰/۸۷۲
متوسط دما در طول فصل بارش °C - زمستان	- ۰/۰۰۷۷	۱۸/۴۲۲۰	۰/۸۴۹۳	- ۰/۰۰۷۵	۱۶/۰۹۰۰	۰/۸۹۸



جدول ۶: ارتفاع خط تعادل یخچالی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) در سایت مطالعاتی اشترانکوه

پارامتر اقلیمی	ایستگاه دورود	ایستگاه الیگودرز	ایستگاه ازنا
T <sub>0</sub> : (°C)	۲۵/۱	۲۱/۴	۲۱/۲
P <sub>0</sub> : (mm)	۶۴۴	۳۷۰	۴۳۰
H <sub>0</sub> : (m a.s.l.)	۱۵۲۲	۲۰۲۲	۱۸۷۲
ΔP: (%)	۶/۰۲	۶/۰۲	۶/۰۲
ΔT: (°C / 100 m)	۰/۷	۰/۷	۰/۷
TP-ELA (AIG): (m a.s.l.)	۴۵۱۷	۴۷۸۱	۴۵۵۷

جدول ۷: ارتفاع خط تعادل یخچالی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) در سایت مطالعاتی دنا

پارامتر اقلیمی	ایستگاه یاسوج	ایستگاه سی سخت	ایستگاه خفر
T <sub>0</sub> : (°C)	۲۳/۳	۱۹/۹	۲۰/۷
P <sub>0</sub> : (mm)	۸۴۶	۷۶۶	۱۳۳۱
H <sub>0</sub> : (m a.s.l.)	۱۸۳۱	۲۲۵۷	۲۲۰۰
ΔP: (%)	۴/۴۶	۴/۴۶	۴/۴۶
ΔT: (°C / 100 m)	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۳
TP-ELA (AIG): (m a.s.l.)	۴۵۷۰	۴۴۸۰	۴۶۳۵

ایستگاه نهاوند ۴۵۰۰ متر از سطح دریا، بر طبق داده‌های اقلیمی ایستگاه بروجرد ۴۵۴۱ متر از سطح دریا، بر اساس داده‌های ایستگاه اشتر ۴۵۷۶ متر از سطح دریا و بر اساس داده‌های ایستگاه نورآباد ۴۵۴۴ متر از سطح دریاست (جدول ۸). بر اساس روابط رگرسیونی، متوسط دما، دمای فصل ذوب، دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال در تراز خط تعادل یخچالی محاسبه شده به ترتیب ۶/۴-، ۱/۹، ۶/۱ و ۲۱/۸- درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

همچنین رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه در محدوده مطالعاتی گرین (P=0.5499H-418.54) دارای ضریب همبستگی ۰/۹ است. در این محدوده با لحاظ گرادیان بارش و دما همین‌طور داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های نهاوند، بروجرد، اشتر و نورآباد، ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) محاسبه گردیده است. بر اساس این محاسبات ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی بر طبق داده‌های اقلیمی

جدول ۸: ارتفاع خط تعادل یخچالی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) در سایت مطالعاتی گرین

پارامتر اقلیمی	ایستگاه نهادوند	ایستگاه بروجرد	ایستگاه الشر	ایستگاه نورآباد
$T_0$ : (°C)	۲۵/۱	۲۱/۲	۲۳/۹	۲۲/۵
$P_0$ : (mm)	۶۴۴	۴۳۰/۱	۴۶۳	۳۷۴
$H_0$ : (m a.s.l.)	۱۵۲۲	۱۸۷۲	۱۶۲۵	۱۶۸۱
$\Delta P$ : (%)	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵
$\Delta T$ : (°C / 100 m)	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲
TP-ELA (AIG): (m a.s.l.)	۴۵۰۰	۴۵۴۱	۴۵۷۶	۴۵۴۴

گرم‌ترین ماه سال به ترتیب در ارتفاعات بالای ۴۷۵۰، ۵۲۰۰ و ۵۴۴۰ متر از سطح دریا به زیر صفر درجه خواهد رسید (شکل ۸). همچنین رابطه رگرسیونی خطی بین ارتفاع و متوسط بارش سالیانه در محدوده مطالعاتی شاهو ( $P=0.6391H+82.848$ ) دارای ضریب همبستگی ۰/۹ است. در سایت مطالعاتی شاهو با لحاظ گرادیان بارش و دما همین‌طور داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های روانسر و سنندج، ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) محاسبه گردیده است. بر اساس این محاسبات ارتفاع خط تعادل یخچالی اقلیمی بر طبق داده‌های اقلیمی ایستگاه سنندج ۴۳۲۶ متر از سطح دریا و بر طبق داده‌های اقلیمی ایستگاه روانسر ۴۵۱۲ متر از سطح دریا است (جدول ۹). بر اساس روابط رگرسیونی، متوسط دما، دمای فصل ذوب، دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال در تراز خط تعادل یخچالی محاسبه شده به ترتیب ۹/۶-، ۲/۲، ۶/۷ و ۲۷/۹- درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

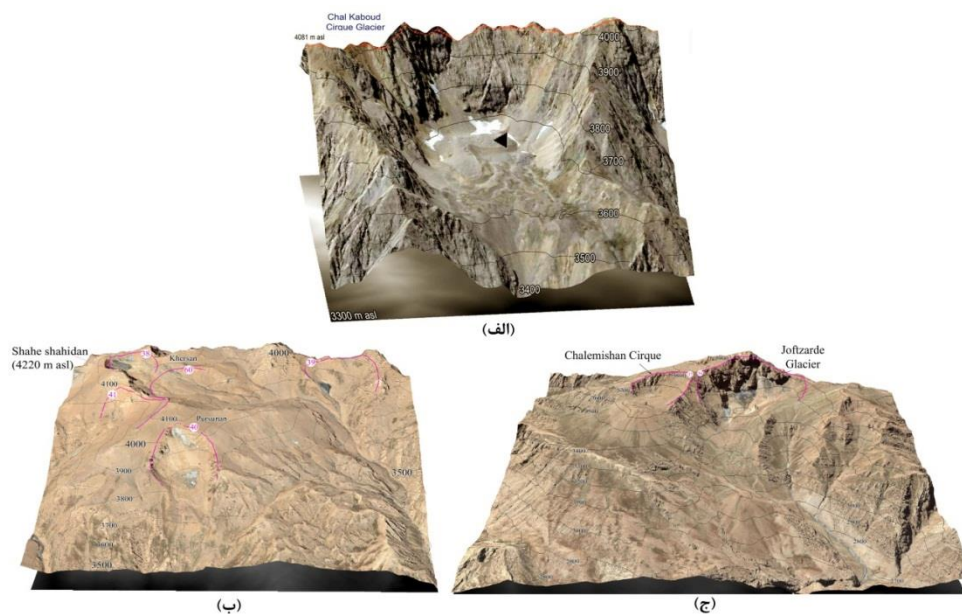
متوسط دمای سالیانه در ایستگاه‌های بررسی شده در منطقه مطالعاتی شاهو بین  $۸/۰^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه زرینه) و  $۲۶/۰^{\circ}\text{C}$  (ایستگاه سر پل ذهاب) متغیر است. بر اساس داده‌های بارش ثبت شده در ایستگاه‌های مورد بررسی، شمال شرق پیکره شاهو سالیانه در حدود ۳۳۶ میلی‌متر بارش در بخش کوهپایه‌ای دریافت می‌کند. حداکثر متوسط بارش سالیانه در دامنه‌های جنوب-غربی شاهو مربوط به ایستگاه اورمان تخت به میزان ۱۰۴۰ میلی‌متر است. حداکثر بارش سالیانه ثبت شده در روانسر، اورمان تخت و نوسود نیز به ترتیب برابر با ۱۱۶۶، ۱۵۶۴ و ۷۸۸ میلی‌متر است. حداقل بارش سالیانه ثبت شده در ایستگاه‌های روانسر، اورمان تخت و نوسود نیز به ترتیب برابر با ۲۶۳، ۶۵۱ و ۵۷۱ میلی‌متر است. بر اساس تحلیل‌های رگرسیونی انجام شده، متوسط دمای سالیانه در ارتفاعات بالای ۳۳۰۰ متر به زیر صفر درجه رسیده و در بلندترین قله شاهو (با ارتفاع ۳۳۵۰ متر از سطح دریا) به  $۴/۰^{\circ}\text{C}$  - می‌رسد. تحلیل‌های رگرسیونی نشان می‌دهد که متوسط دمای فصل ذوب، متوسط دمای تابستان و متوسط

جدول ۹: ارتفاع خط تعادل یخچالی عهد حاضر (یا TP-ELA یا AIG) در سایت مطالعاتی شاهو

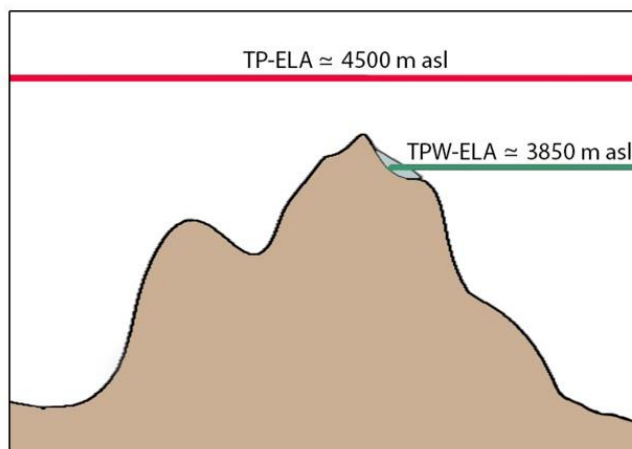
پارامتر اقلیمی	ایستگاه روانسر	ایستگاه سنندج
T <sub>0</sub> : (°C)	۲۴/۴	۲۳/۳
P <sub>0</sub> : (mm)	۳۳۶/۱	۳۹۴/۲
H <sub>0</sub> : (m a.s.l.)	۱۳۷۹	۱۳۷۳
ΔP: (%)	۶/۴	۶/۴
ΔT: (°C / 100 m)	۰/۶۹	۰/۶۹
TP-ELA (AIG): (m a.s.l.)	۴۵۱۲	۴۳۲۶

شمالی لکه‌های پراکنده یخچالی مشاهده می‌گردد. مطالعات موجود نشان می‌دهد که در این منطقه پهنه‌های پراکنده یخچالی در رقومی بالاتر از ۳۸۰۰ از سطح دریا و تنها در دامنه‌های شمالی می‌توان رؤیت کرد که بیانگر حدود رقوم خط تعادل بارش - دما - باد در این منطقه است (ابراهیمی، ۱۳۹۴). در سایر محدوده‌های مطالعاتی، یخچال دائمی حتی در دامنه‌های شمالی مشاهده نشده است که نشان می‌دهد ارتفاع بلندترین قله این مناطق از ارتفاع خط تعادل محلی (بارش - دما - باد) نیز پائین‌تر است. به عبارت دیگر در دامنه‌های شمالی مناطق زردکوه، دنا و اشترانکوه، پائین‌تر بودن نسبی ارتفاع خط تعادل بارش - دما - باد نسبت به قله اصلی، باعث حفظ پهنه‌های پراکنده یخچالی شده در حالی که در شاهو و گرین امکان حفظ لکه‌های یخچال حتی در دامنه‌های شمالی و با لحاظ اثر بادرفتی برف مهیا نیست. لذا بر اساس آنچه گفته شد، اختلاف خط ارتفاع تعادل یخچالی بارش - دما و بارش - دما - باد در این بخش از زاگرس بیش از ۶۵۰ متر محاسبه می‌گردد (شکل ۱۰).

در شرایط فعلی، پائین‌تر بودن نسبی ارتفاع خط تعادل بارش-دما-باد در سیرک‌های یخچالی بخش شمالی دامنه‌های زردکوه (به دلیل اثر بادرفتی در دامنه شمالی و همین‌طور دریافت کمتر تشعشع خورشیدی) شرایط را برای حفظ برخی لکه‌های یخچالی واقع در سیرک‌های یخچالی (مربوط به دوره یخچالی لیا) فراهم ساخته (شکل ۹) و انتظار نمی‌رود که در آینده نزدیک این ارتفاعات بتوانند میزبان این لکه‌های یخچالی باشند. در محدوده مطالعاتی اشترانکوه نیز مشابه زردکوه برخی آثار و لکه‌های یخچال را در سیرک‌های یخچالی مانند سیرک یخچالی چال‌کبود و چال‌میشان (شکل ۹) می‌توان مشاهده کرد. سیف و ابراهیمی (۲۰۱۴) و سیف (۲۰۱۵) موقعیت ارتفاع خط تعادل محلی (بارش - دما - باد) محدوده‌های مطالعاتی اشترانکوه و زردکوه را بر اساس موقعیت سیرک‌های یخچالی و بقایای یخچال‌های موجود، در حدود ۳۸۵۰ متر از سطح دریا برآورد کرده‌اند (شکل ۹). در منطقه دنا نیز ارتفاع خط تعادل بارش-دما بالاتر از ارتفاع قله منطقه بوده و لذا امکان حفظ و یا توسعه یخچال در این منطقه فراهم نبوده و تنها در سیرک‌های یخچالی دامنه‌های



شکل ۹: مدل سه‌بعدی از الف) سیرک چال کبود و بقایای یخچال محصور در آن در منطقه اشتران کوه، ب) موقعیت بقایای یخچال‌های پورسونان و خرسان در زردکوه و ج) یخچال‌های جفت زرده و چال میشان محبوس در سیرک‌های یخچالی در منطقه مطالعاتی زردکوه (ابراهیمی ۱۳۹۴).



شکل ۱۰: شکل شماتیک از محدوده زردکوه و اشتران کوه نشان‌دهنده موقعیت ارتفاع خط تعادل یخچالی بارش - دما (TP-ELA) و مقایسه آن با (TPW-ELA).

### بحث و نتیجه‌گیری

داده‌ها، مراحل اجرای پژوهش دنبال شده و مقادیر ارتفاع خط تعادل یخچالی حال حاضر (ارتفاع خط تعادل بارش-دما) در مناطق انتخابی زاگرس مرتفع محاسبه گردید. سایت‌های انتخابی جهت محاسبه

در این تحقیق پس از انجام مطالعات اولیه، گردآوری اطلاعات و تبیین مبانی نظری، با توجه به متغیرهای موردنظر، ابزارهای تحقیق و روش‌های تجزیه و تحلیل

است. در محدوده ارتفاعات شاهو نیز متوسط ارتفاع مرز برف دائمی در شرایط فعلی در حدود ۴۴۱۹ متر از سطح دریا، تقریباً ۱۱۰۰ متر بالاتر از بلندترین نقطه شاهو، محاسبه شده است. بنابراین در شرایط فعلی امکان تشکیل و حفظ یخچال‌های دائمی در این دو محدوده ممکن نبوده و در گذشته تنها افت ارتفاع خط تعادل به میزان بیش از ۱۰۰۰ متر می‌توانسته شرایط را برای تشکیل یخچال در این منطقه فراهم سازد (معادل ۷/۲ درجه افت در دمای متوسط سالیانه محدوده دنا و ۷/۶ درجه سانتی‌گراد افت در دمای متوسط سالیانه محدوده مطالعاتی شاهو). لذا با مقایسه با نتایج تحقیقات گذشته، مقادیر ارتفاع خط تعادل یخچالی برابر با ۳۹۰۰ تا ۴۲۰۰ متر از سطح دریا که عموماً با توجه به ارتفاع آثار یخچال‌های فعلی باقی‌مانده در سیرک‌های یخچالی دامنه‌های شمال-شرقی ارتفاعات مهم زاگرس ارائه شده (شوایتزر، ۱۹۷۲؛ گرونرت، ۱۹۷۸؛ پرو، ۱۹۸۰) بیانگر ارتفاع خط تعادل بارش-دما فعلی محدوده مرتفع زاگرس نبوده و ارتفاع خط تعادل بارش-دما در مناطق مطالعاتی زردکوه حداقل ۳۰۰ متر بالاتر از بالاترین مقادیر گزارش شده در منابع موجود می‌باشد.

#### سپاس‌گزاری

این تحقیق مورد حمایت مادی و معنوی دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و همین‌طور حمایت و پشتیبانی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان صورت پذیرفته و لذا مؤلفین بر خود وظیفه می‌دانند تا از مدیریت این دو نهاد تشکر و قدردانی نمایند.

ارتفاع خط تعادل بارش-دما در مرتفع‌ترین نقاط زاگرس و در مناطقی که آثار یخچال‌های کواترنر در آن‌ها گزارش شده، انتخاب شده‌اند. این نواحی در شرایط فعلی مناسب توسعه یخچال نبوده و تنها آثار اندکی از یخچال‌های عهد حاضر در برخی نقاط آن‌ها مشاهده می‌گردد. این پژوهش نشان داده است که در منطقه مطالعاتی زردکوه، ارتفاع خط تعادل بارش-دما عهد حاضر با مبنا قرار دادن دو ایستگاه چلگرد و کوه‌رنگ، بیش از ۴۵۰۰ متر از سطح دریاست که تقریباً ۳۰۰ متر بالاتر از بلندترین نقطه زردکوه می‌باشد. این شرایط در مناطق مطالعاتی اشتران‌کوه و دنا نیز برقرار بوده و لذا توده‌های یخچالی معنی‌داری در این ارتفاعات مشاهده نشده و دامنه‌های جنوبی نیز به‌طور کلی عاری از هرگونه لکه‌های یخچالی است. به عبارت دیگر در شرایط فعلی ارتفاع خط تعادل بارش-دما بیش از ۴۵۰۰ متر از سطح دریا یعنی ۴۳۶ متر بالاتر از بلندترین قله اشتران‌کوه و ۳۰۰ متر بالاتر از بلندترین قله زردکوه است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که برخی پهنه‌های کوچک یخچالی در دامنه‌های شمالی ارتفاعات یادشده ناشی از پائین‌تر بودن ارتفاع خط تعادل بارش-دما-باد نسبت به قله این مناطق بوده و لذا سیرک‌های یخچالی بخش شمالی این ارتفاعات به دلیل اثر بادرفتی برف و همین‌طور دریافت تشعشع خورشیدی کمتر میزبان پهنه‌های کوچک یخچالی هستند. نتایج مشابهی در خصوص سایت‌های گرین و شاهو به دست آمده است. در محدوده ارتفاعات گرین نیز متوسط ارتفاع مرز برف دائمی فعلی در حدود ۴۵۴۰ متر از سطح دریا، تقریباً ۸۹۰ متر بالاتر از بلندترین نقطه گرین، محاسبه شده

## منابع

- ایمانی، م.، ۱۳۸۶. ژئومورفولوژی یخچال‌های زردکوه، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۹، ص ۱۳۹-۱۲۵.
- ابراهیمی، ب.، ۱۳۹۴. ردیابی و بررسی لندفرم‌های یخچالی کواترنر پایانی در ارتفاعات زاگرس ایران، رساله دکتری، دانشگاه اصفهان.
- Bobek, H., 1937. Die Rolle der Eiszeit in Nordwestiran. In: Z. Gletscherk. v. 25, p. 130-183.
- Dahl, S.O. and Nesje, A., 1992. Paleoclimatic implications based on equilibrium-line altitude depressions of reconstructed Younger Dryas and Holocene cirque glaciers in inner Nordfjord, western Norway, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 94, p. 87-97.
- Dahl, S.O., Nesje, A. and Ovstedal, J., 1997. Cirque glaciers as morphological evidence for a thin Younger Dryas ice sheet in east-central southern Norway, Boreas, v. 26, p. 161-80.
- Ferrigno, J.G., 1991. Glaciers of the Middle East and Africa, Glaciers of Iran, In Williams, R.S., Jr and J.G. Ferrigno, eds, Satellite image atlas of glaciers of the world, Denver, CO, United States Geological Survey, G31-G47. (USGS Professional Paper 1386G-2.)
- Grunert, J., Carls, H.G. and Preu, C., 1978. Rezente Vergletscherungsspuren in zentraliranischen Hochgebirgen, Eiszeitalter Ggw, v. 28, p. 148-166.
- Kesici, O., 2005. Glacio-morphological investigations of Siiphan and Cilo Mountains in regard to current global warming trends, TUBITAK (The Scientific and Technical Research Council of Turkey) Report No: 101Y131 (in Turkish).
- Klein, A.G., Seltzer, G.O. and Isacks, B.L., 1999. Modern and last local glacial maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and Northern Chile, Quaternary Research Reviews, v. 18, p. 63-84.
- Kuhle, M., 1974. Vorläufige Ausführungen morphologischer Feldarbeitsergebnisse aus den SE-Iranischen Hochgebirgen am Beispiel des Kuh-i-Jupar, Z. Geomorphol, N.F., v. 18, p. 472-483.
- Kuhle, M., 1976. Beiträge zur Quartarmorphologie SE-Iranischer Hochgebirge Die quartare Vergletscherung des Kuh-i-Jupar, Gottinger Geographische Abhandlungen, v. 2(67), p. 103 and p. 209.
- Kuhle, M., 2008. The Pleistocene Glaciation of SE Iranian Mountains Exemplified by the Kuh-i-Jupar, Kuh-i-Lalezar and Kuh-i-Hezar Massifs in the Zagros, Polarforschung, v. 77 (2-3), p. 71-88.
- Lichtenecker, N., 1938. Die gegenwartige und die eiszeitliche Schneegrenze in den Ostalpen, Verhandl. d. III. Intern. Quart-ir-Konferenz, Wien 1936, p. 141-147.
- Lie, O., Dahl, S.O. and Nesje, A., 2003. A theoretical approach to glacier equilibrium-line altitudes using meteorological data and glacier mass balance records from southern Norway, The Holocene, v. 13(3), p. 365-372.
- Mark, B., Harrison, S.P., Spessa, A., New, M., Evans, D.J.A. and Helmens, K.F., 2005. Tropical snowline changes at the last glacial maximum, a global

- assessment, Quaternary International, p. 168-201.
- Messerli, B., 1967. Die eiszeitliche und die gegenwärtige Vergletscherung in Mittelmerraum, Geographica Helvetica, v. 22, p. 105-228.
- Meier, M.F. and Post, A.S., 1962. Recent variations in mass net budgets of glaciers in western North America, International Association of Scientists Hydrology, v. 58, p. 63-77.
- Moussavi, M.S., Valadan Zoej, M.J., Vaziri, F., Sahebi, M.R. and Rezaei, Y., 2009. A new glacier inventory of Iran, Annals of Glaciology, v. 50 (53), p. 93-103.
- Porter, SC., 2001. Snowline depression in the tropics during the last glaciation, Quaternary Science Reviews, v. 20, p. 1067-1091.
- Preu, C., 1984. Die quartäre Vergletscherung der inneren Zardeh-Kuh-Gruppe (Zardeh-Kuh-Massiv), Zagros/Iran, Augsburg Geogr, H. 4. Augsburg.
- Schweizer, G., 1972. Klimatisch bedingte Geomorphologische und Glazialogische Züge der Hochregion vorderasiatischer Gebirge (Iran und Ostanatolien) [Climatically based geomorphological and glaciological characteristics of the high-altitude regions of Near Eastern mountains (Iran and Eastern Anatolia)]: Erdwissenschaftliche Forschung, v. 4, p. 221-236.
- Seif, A., 2015. Equilibrium-line altitudes of Late Quaternary glaciers in the Oshtorankuh Mountain, Iran. Quaternary International, v. 374, p. 126-143.
- Seif, A. and Ebrahimi, B., 2014. Combined Use of GIS and Experimental Functions for the Morphometric Study of Glacial Cirques in Zardkuh Mountain, IRAN, Quaternary International, v. 353, p. 236-249.
- Visser, P.C., 1938. Wissenschaftliche Ergebnisse der Niederländischen Expeditionen in den Karakorum und die angrenzenden Gebiete in den Jahren 1922-1935., Glaziologie, v. 2, p. 1-216.