

بازسازی محیط و آب و هوای دیرینه در ارتفاعات چهل چشمه دیواندره کردستان در طول آخرین دوره

حداکثر گسترش یخچالی

امید رحیمی - دانشجوی دکتری جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی
فریبا اسفندیاری درآباد* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی
مهران مقصودی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

چکیده

ارتفاعات چهل چشمه (چل چه مه) در دیواندره استان کردستان تعداد زیادی از شواهد یخچالی شامل سیرک‌های یخچالی و یخرفت‌های دوره‌ی پلیستوسن را در خود جای داده است. میزان ارتفاع خط تعادل در ارتفاعات چهل چشمه به منظور بازسازی محیط و آب و هوای دیرینه در طول آخرین دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی با استفاده از بررسی‌های میدانی، تهیه‌ی نقشه‌های ژئومورفولوژی بر مبنای نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، استفاده از مدل رقمی ارتفاعی ۱۲/۵ متری و به کارگیری روش‌های نسبت مساحت انباشستگی به مساحت کل، متوسط ارتفاع یخچال‌ها (کروسکی) و روش نسبت تعادل مساحت - ارتفاع محاسبه گردید. میزان ارتفاع خط تعادل در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در ارتفاعات چهل چشمه حدود ۲۹۰۵ متر از سطح دریا برآورده شد. میزان ارتفاع خط تعادل کنونی با استفاده از روش لای و همکاران و استفاده از داده‌های هواشناسی ۴۶۸۳ متر از سطح دریا برآورد گردید. با در نظر گرفتن میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل به میزان ۱۷۷۸ متر میزان متوسط کاهش دمای سالیانه در طول دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی $11/5^{\circ}$ بوده است. با مقایسه‌ی میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل و میزان کاهش دمای محاسبه شده با دیگر مطالعات انجام شده در ایران و جهان حداکثر گسترش یخچال‌ها در ارتفاعات چهل چشمه منطبق با آخرین دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی در حدود ۲۶/۵ الی ۱۹ هزار سال قبل و تحت تاثیر شرایط آب و هوای سرد و خشک بوده است، همچنین در مقایسه با مطالعات رایج و همکاران در یخچال‌های ارتفاعات کردستان میزان کاهش دما حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد و میزان پایین آمدگی ارتفاع خط بین ۱۲۰۰ - ۱۸۰۰ متر بوده است.

واژگان کلیدی: آخرین دوره حداکثر گسترش یخچال، ارتفاع خط تعادل، نسبت تعادل مساحت - ارتفاع، چهل چشمه.

مقدمه

در طی دوره‌ی کواترنر پسین، زمین تحت تاثیر تغییرات محیطی و نوسانات آب و هوای بسیار شدیدی قرار گرفته است (کاسر و اوسماستن^۱، ۲۰۰۲)، روندهای طولانی مدت در طول این دوره، شرایط یخچالی و سرد در طول پلیستوسن تا شرایط بین یخچالی و گرم هولوسن را شامل می‌شود، این روندهای طولانی مدت به وسیله‌ی چندین واقعه‌ی آب و هوایی و تغییرات محیطی کوچک‌تر از هم گسیخته شده‌اند (رابینسن^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). تغییرات محیطی آب و هوایی آخرین دوره‌ی سرد یعنی حداکثر گسترش یخچال‌ها در طی آخرین دوره‌ی یخچالی^۳ از ۲۶/۵ تا ۱۹ هزار سال قبل (کلارک^۴ و همکاران، ۲۰۰۹)، لندفرم‌ها و محیط‌های قدیمی را تحت تاثیر و تغییر شکل قرار داده‌اند. سرد شدگی حداکثر گسترش یخچالی در طی آخرین دوره‌ی یخچالی، سرد شدگی دوره‌ی یانگدریاس و عصر یخبندان کوچک نه تنها ارتفاعات متوسط و بلند بلکه نواحی گرمسیری را نیز تحت تاثیر قرار داده است. تحقیقات بسیار زیادی بر روی لندفرم‌های یخچالی در طی دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی در طی آخرین دوره‌ی یخچالی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر انجام شده است اما بررسی‌های کمتری در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر انجام شده است (بن و همکاران^۵، ۲۰۰۵). تعیین ارتفاع خط تعادل بهترین ابزار برای بازسازی آب و هوای دیرینه و محیط‌های دیرینه در طول دوره‌های یخچالی گذشته می‌باشد (بن و بالانتین^۶، ۲۰۰۵، لوکاس و برادول^۷، ۲۰۱۰، هوقس^۸ و همکاران، ۲۰۱۰).

مناطق غربی کردستان یکی از مناطق بسیار اساسی و بنیادی برای بازسازی و بررسی محیط‌های دیرینه و تغییرات آب و هوای دیرینه در طی کواترنر پسین به ویژه در طول پلیستوسن و هولوسن است. هدف اصلی این مطالعه بازسازی شرایط آب و هوایی و محیط‌های دیرینه در طول حداکثر گسترش یخچالی در طی آخرین دوره‌ی یخچالی با استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی از جمله لندفرم‌های یخچالی شامل سیرک‌های یخچالی، یخرفت‌های یخچالی با به کارگیری روش‌ها نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل^۹، ارتفاع متوسط یخچال‌ها یا کروسکی^{۱۰}، نسبت تعادل مساحت^{۱۱} در ارتفاع^{۱۱} در ارتفاعات چهل چشمه (چل‌چمه) شهرستان دیواندره در استان کردستان می‌باشد.

پیشینه تحقیق

مطالعات زیادی با استفاده از شاخص‌ها و پروکسی‌های مختلف به عنوان مدارکی برای بررسی تغییرات آب و هوایی و محیطی در طی کواترنر پسین (اواخر پلیستوسن) در ایران استفاده شده است که در این تحقیق با در نظر گرفتن چندین فاکتور مهم از جمله نوع مکان مورد مطالعه (شامل، خشکی، دریایی، دریاچه‌ای)، موقعیت مکان، نوع آرشیو (لندفرم‌های یخچالی، شواهد ژئومورفولوژیکی، رسوبات دریاچه‌ای، رسوبات دریایی، لس، مطالعات مروری، پلایا، مخروط افکنه‌ها و ...) نوع پروکسی (ایزوتوپ-های پایدار کربن^{۱۳} و اکسیژن^{۱۸}، ژئوشیمی، دانه‌بندی، گرده‌گیاهی، ماکروفسیل، ژئوکرونولوژی و ...) بازه زمانی، روش‌های تعیین سن (کربن^{۱۴}، سربهای اورانیوم، روش‌های کاسموژنیک، روش‌های لومینسانس، شمارش لایه‌ها و ...)، تعداد نمونه‌های تعیین سن

^۱- Kaser & Osmaston

^۲- Robinson

^۳- Last Glacial Maximum (LGM)

^۴- Clark

^۵- Benn

^۶- Benn and Ballantyne

^۷- Lukas and Bradwell

^۸- Hughes

^۹- Accumulation Area Ratio (AAR)

^{۱۰}- Median Glacier Elevation (MGE or Kurowski)

^{۱۱}- Area-Altitude Balance Ratio (AABR)

شده و منابع مورد استفاده، شرایط محیطی و آب و هوایی در طول آخرین دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی بررسی شده که نتایج نهایی این مطالعات به صورت جدول به شرح ذیل ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱: مطالعات انجام شده دیرینه محیط و دیرینه اقلیم در ایران براساس آرشیوها و پروکسی‌های مختلف در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی، تعداد مطالعات ۴۱ مورد، خشکی^۱ T، دریاچه‌ای^۲ L، دریایی^۳ M، آخرین دوره حداکثر یخچالی^۴ LGM، کربن ۱۴=14C، لومینسانس نوری^۵ OSL، لومینسانس مادون قرمز^۶ IRSL، ترمولومینسانس^۷ TL، ایزوتوپ کربن ۱۳=13C، ایزوتوپ اکسیژن ۱۸=18O، ایزوتوپ هیدروژن δD.

| شماره | مکان | موقعیت | آرشیو | پروکسی | بازه زمانی | شرایط محیطی و آب و هوایی | منبع |
|-------|------|--------------------------------|----------------------------|--|---------------------|--|-----------------------|
| ۱ | T | اردکان یزد | رسوبات بادی، رمپ ماسه‌ای | پارامترهای آماری دانه‌بندی ذرات. | ~۱۸۳۰۰-۲۴۸۰۰ | آب و هوای سرد و خشک و شرایط بادی در طول LGM. | توماس و همکاران، ۱۹۹۷ |
| ۲ | T | شمال ایران (نکا، نوده، آق بند) | توالی خاک-های قدیمی و لسی | کرونولوژی خاک‌های لسی، دانه‌بندی ذرات، خصوصیات لیتولوژیک | ~۲۰۵۰۰-۱۰۳۰۰ | آب و هوای سرد و خشک و شرایط بادی در طول LGM. | فرچن و همکاران، ۲۰۰۹ |
| ۳ | T | دره هراز | لندفرم‌های یخچالی | بازسازی ارتفاع خط تعادل | آخرین دوره‌ی یخچالی | ارتفاع برف‌مرز و سیرک‌های یخچالی ۲۷۷۹ متر در طول حداکثر دوره گسترش یخچالی | یمانی و همکاران، ۱۳۹۶ |
| ۴ | T | توده کوهستا نی قروه | لندفرم‌های یخچالی | بررسی آثار برف‌مرز دائمی | دوره کوتاه‌تری | ارتفاع برف‌مرز دائمی ۲۲۰۰ متر، کاهش دما به میزان ۸/۸ درجه میزان بارش دو برابر میزان کنونی در طول کوتاه‌تری | جعفری و همکاران، ۱۳۹۶ |
| ۵ | T | شمال شرق ایران | توالی خاک-های لسی و رسوبات | لایه‌نگاری و تعیین سن نهشته‌های لسی | ~۱۹۶۰۰-۱۲۵۰۰ | آب و هوای سرد و خشک و شرایط بادی در طول LGM. | کریمی و همکاران، ۲۰۱۱ |
| ۶ | T | حوضه پرسپولیس | خاک‌های قدیمی و لسی | تجزیه و تحلیل فیزیکی شیمیایی، دانه‌بندی و آزمایشات ژئوشیمی | ~۳۰۰۰-۱۲۸۰۰ | آب و هوای سرد و خشک و شرایط بادی در طول LGM. | کهل و همکاران، ۲۰۰۵ |
| ۷ | T | کوه-های الیز و زاگرس | لندفرم‌های یخچالی | مورن‌های یخچالی، تعیین برف‌مرز | پلیستوسن | کاهش برف‌مرز ۶۰۰-۸۰۰ متر، کاهش دما ۴ تا ۵ درجه. | بوبک، ۱۹۶۳ |

۱ - Terrestrial

۲ - lacustrine

- Marine^۳

- Last Glacial Maximum^۴

- Optically Stimulated Luminescence^۵

- Infrared Stimulated Luminescence^۶

- Thermoluminescence^۷

| | | | | | | | | | |
|----|---|-----------------------------------|-----------------------|--|----------------|---------------|-----------|--|---|
| ۸ | T | یخچال های کردست آن | لندفرم‌های یخچالی | مورن‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | آب و هوای سرد و خشک کاهش برفمرز ۷۰۰ متر، کاهش دما ۴ درجه. | بوبک، ۱۹۳۷ |
| ۹ | T | یخچال های کردست آن | لندفرم های یخچالی | مورن‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | کاهش برفمرز ۱۲۰۰ - ۱۸۰۰ متر، کاهش دما ۱۲ درجه. | رایت و همکاران، ۱۹۶۲، ۲۰۰۴ |
| ۱۰ | T | پلایاک، ویرها ایران مرکزی | پلایا و کویرها | پلایا | پلیستوسن | ..... . | .... | کاهش برفمرز بیش از ۱۸۰۰ متر، کاهش دما ۵-۸ درجه. | کریسنلی، ۱۹۷۰ |
| ۱۱ | | اطلس نیمکره شمالی دیرینه | محیطها و آب‌هواهای | آلبدوی سطحی، یخچال و پرمافروست، لس، پوشش گیاهی، فرایندهای ژئومورفولوژی | اواخر پلیستوسن | ..... | .... | کاهش دما ۸ - ۱۰ درجه برای میانگین سالیانه و ۱۰-۱۲ درجه برای فوریه. | فرنزل و همکاران، ۱۹۹۲ |
| ۱۲ | L | دریاچه زریبار | رسوبات دریاچه‌ای | گرده‌های گیاهی | | ~۰-۴۰۰۰۰۰ | C۱۴ ۱۲ | آب و هوای سرد و خشک و غلبه ی استپ آرتمیزیا در طول LGM. | وان زایست، ۱۹۶۷، وان زایست و بوتیه‌ما، ۱۹۷۷، وان زایست و رایت، ۱۹۶۳ |
| ۱۳ | L | دریاچه زریبار | رسوبات دریاچه‌ای | اکولوژی و گرده‌های گیاهی | | ~۰-۲۲۰۰۰ | C۱۴ ۵ | آب و هوای سرد و خشک و غلبه ی استپ آرتمیزیا و چنوپودیا در طول LGM. | ال موسلیمانی، ۱۹۸۷ |
| ۱۴ | L | دریاچه زریبار | رسوبات دریاچه‌ای | ماکروفسیل‌های گیاهی | | ~۰-۴۲۶۰۰ | C۱۴ ۲۱ | افزایش عمق آب و افزایش سطح آب دریاچه در طول LGM. | واسیلیکوا، ۲۰۰۵، واسیلیکوا، ۱۹۶۷، والانسوس، ۲۰۰۴، واسیلیکوا و همکاران، ۲۰۰۶ |
| ۱۵ | M | خلیج فارس | رسوبات دریایی | لایه‌نگاری زیر دریایی، رسوب‌شناسی و ژئوکرونولوژی | | ~۰-۳۴۳۰۰-۳۹۲۰ | C۱۴ ۱۳ | خشک بودن و بدون آب بودن خلیج فارس در طول LGM. | یوچویی و همکاران، ۱۹۹۹ |
| ۱۶ | T | سازند بالبران مازندران رودخانه‌ای | توف آهکی و توالی تراس | رسوب‌شناسی و لایه‌نگاری | | ~۲۸۴۸۶-۱۲۱۱۹ | C۱۴ ۲ | شکل‌گیری این تشکیلات در ارتباط با LGM. | آنتوان و همکاران، ۲۰۰۶ |
| ۱۷ | T | کوه سلان | لندفرم های یخچالی | سیرک‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | تعیین خط برفمرز کنونی ۴۵۰۰ متر و ۳۶۰۰-۳۷۰۰ متر در پلیستوسن. | شواپتزر، ۱۹۷۰ |
| ۱۸ | T | کوه زردکوه | لندفرم های یخچالی | سیرک‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | تعیین خط برفمرز کنونی ۳۹۰۰ متر و ۳۳۵۰-۳۴۰۰ متر در پلیستوسن. | دزیو، ۱۹۳۴، گرونرت و همکاران، ۱۹۷۸ |
| ۱۹ | T | کوه تخت سلیمان | لندفرم های یخچالی | سیرک‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | تعیین خط برفمرز کنونی ۴۰۰۰-۴۱۰۰ متر و ۳۰۰۰ متر در پلیستوسن. | بوبک، ۱۹۳۷ |
| ۲۰ | T | کوه دماوند | لندفرم های یخچالی | سیرک‌های یخچالی، تعیین برفمرز | پلیستوسن | ..... . | .... | تعیین خط برفمرز کنونی ۴۵۰۰ متر و ۳۸۰۰-۳۷۰۰ متر در پلیستوسن. | بوبک، ۱۹۳۷ |

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------------------------|--|------|-------|--|---|----------------------------|-----------------------------|---|----|
| ۲۰۱۵ | سیف، | کاهش برفمرز بیش از ۱۳۸۰ متر، کاهش دما ۹/۸ درجه در طول LGM. | .... | ..... | پلیستوسن | ارتفاع خط تعادل، تعیین برفمرز | لندفرم های یخچالی | کوه اشتران کوه | T | ۲۱ |
| ۲۰۰۸ | کوهله، | خط برفمرز ۳۰۵۰ متر، کاهش برفمرز ۱۵۰۰ متر، کاهش دما ۱۰/۵ درجه در طول LGM. | .... | ..... | پلیستوسن | تحلیل های ژئومورفولوژیکی، ارتفاع خط تعادل، تعیین برفمرز | لندفرم های یخچالی | کوه جوپار | T | ۲۲ |
| ۲۰۰۸ | دجمالی و همکاران، | کاهش درجه حرارت زمستان، فعالیت بالای رودخانه‌ای، افزایش سطح بالای دریاچه غلبه‌ی استپ علفزار و آرمیزیا. | ۲ | C۱۴ | ۱۲۲۱۲-۲۹۱۵۰~ | گرده‌های گیاهی | رسوبات دریاچه‌ای | دریاچه ارومیه | L | ۲۳ |
| ۱۹۷۰ | کرینسلی، | افزایش سطح دریاچه به میزان ۲-۳ متر، کاهش تبخیر به واسطه‌ی سردی هوا در طول LGM. | .... | ..... | پلیستوسن | لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی | اشکال ژئومورفولوژیکی پلایا | پلایای شیراز و نیریز | L | ۲۴ |
| ۱۹۸۶ | کلتس و شهرابی، | مشاهده‌ی تغییرات آب و هوایی LGM در تراس‌های دریاچه‌ای. | .... | ..... | پلیستوسن | تراس‌های دریاچه‌ای | اشکال ژئومورفولوژیکی | دریاچه ارومیه | L | ۲۵ |
| ۱۹۶۳، ۱۹۳۷ | بویک، | افزایش سطح دریاچه به میزان ۶۰-۷۰ متر نسبت به میزان کنونی، کاهش تبخیر به واسطه‌ی سردی هوا در طول LGM. | ... | ..... | پلیستوسن | تراس‌های دریاچه‌ای | اشکال ژئومورفولوژیکی | دریاچه ارومیه | L | ۲۶ |
| ۱۹۷۱ | اهلرز، | افزایش سطح دریاچه‌ها در نتیجه‌ی افزایش بارش و در ارتباط با دوره‌های فلویال در طول LGM. | ... | ..... | پلیستوسن | دریاچه‌ها و کویرها | اشکال ژئومورفولوژیکی | دریاچه‌ها و کویرها ایران | L | ۲۷ |
| ۲۰۰۷ | یمانی و همکاران، | کاهش درجه‌حرارت به میزان ۱۰-۱۲ درجه در طول LGM. | ... | ..... | پلیستوسن | سیرک‌ها و زبان‌های یخچالی، یخرفت‌ها | اشکال ژئومورفولوژیکی | کوه کرکس | T | ۲۸ |
| ۲۰۰۱ | استیونس و همکاران، | سرد و خشک، تبخیر کمتر، تمرکز بالای آب دریاچه در طول دوره‌های یخچالی. | ۵ | C۱۴ | ۲۲۱۰-۱۶۶۸۲~ | ۱۵۱۸۰ ایزوتوپ | رسوبات دریاچه‌ای | دریاچه زریبار | L | ۲۹ |
| ۲۰۰۶ | رگارد و همکاران، | رخ دادن LGM در ۲۰۱۰ سال قبل همراه با آب و هوای خشک در رسوبات آبرفتی. | ۲۳ | Be۱۰ | ۲۰۱۰۰، ۴۴۰۰۰~ ۵،۸۴۰۰، ۱۲۸۰۰، ۶۰۰ | ژئوکرونولوژی رسوبات آبرفتی مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌ها | رسوبات آبرفتی، مخروط-افکنه | جنوب شرق ایران (منطقه هرمز) | T | ۳۰ |
| ۲۰۰۱ | اسنایدر و همکاران، | سطح پایین دریاچه، آب و هوای خشک ملایم و رسانایی بالاتر در طول LGM. | ۱۱ | C۱۴ | ۰-۴۶۲۰۰ | دیاتومه‌ها | رسوبات دریاچه‌ای | دریاچه زریبار | L | ۳۱ |
| ۱۹۶۷ | مگارد، | آب و هوای خنک معتدل در طول پلیستوسن. | ۱۱ | C۱۴ | ۰-۲۲۶۰۰ | میکروفسیل، کلادوسرا | رسوبات دریاچه‌ای | دریاچه زریبار | L | ۳۲ |
| ۲۰۰۶، ۲۰۱۱ | فتاحی و همکاران، والکر و فتاحی، | شروع رسوب‌گذاری مخروط‌افکنه‌ها از ۳۰ هزار سال قبل، میزان بالای تولید رسوب از طریق عمل هوازدگی ناشی از ذوب یخ در محیط‌های یخچالی سرد و خشک. | ۶ | OSL | ۳۰۰۰-۳۲۰۰۰ | کرونولوژی رسوبات آبرفتی | مخروط-افکنه | سبزوار ایران | T | ۳۳ |
| ۲۰۱۰، ۲۰۱۲ | هولینگزورث و همکاران، والکر و فتاحی، | شروع رسوب‌گذاری مخروط‌افکنه‌ها از ۳۰ هزار سال قبل، میزان بالای تولید رسوب از طریق عمل هوازدگی ناشی از ذوب یخ در محیط‌های یخچالی سرد و خشک. | .... | OSL | حداقل سن ۲۴۱۰۰ | کرونولوژی رسوبات آبرفتی | مخروط-افکنه | نیشابور ایران | T | ۳۴ |

| | | | | | | | | | |
|----|---|----------------|-------------------|---|-------------------|-----|----|--|-------------------------------|
| ۳۵ | L | دریاچه ارومیه | رسوبات دریاچه‌ای | تحلیل‌های فیزیکوشیمیایی و گرده‌شناسی | ۲۶۹۵ | C۱۴ | ۴ | آب و هوای سرد و خشک در طی ۲۵۵۰-۱۵۰۰ سال قبل همراه با پوشش گیاهی استپی بدون درخت و سطح پایین آب دریاچه. | طالبی و همکاران، ۲۰۱۵ |
| ۳۶ | L | دریاچه نئور | رسوبات دریاچه‌ای | عناصر اصلی و فرعی، تحلیل امواج کوچک، چگالی حجمی، میزان انباشتگی کربن، ایزوتوپ TOC، 13C, D | ۳۹۳-۱۳۳۵۶~ | C۱۴ | ۱۹ | شرایط خشک و گرد و غباری در طول پایانی بعد یخچالی و یانگردریاس | شریفی و همکاران، ۲۰۱۵ |
| ۳۷ | M | دریای خزر | رسوبات دریایی | گرده‌شناسی | ۵۱۲-۲۵۴۳~ | C۱۴ | ۵ | آب و هوای خنک و مرطوب‌تر گسترش بالآمدگی و به اوج رسیدن آن در طول ۱۹۰۰-۲۱۰۰ سال قبل، | رضائی و همکاران، ۲۰۱۶ |
| ۳۸ | M | دریای خزر | رسوبات دریایی | کاروفیت، رد پای فسفیل، دیاتومه، تحلیل دانه‌بندی، ایزوتوپ‌های پایدار، گرده-شناسی | ۱۱۳۹-۲۰۳۷۰~ | C۱۴ | ۷ | عمق پایین رفتگی آب مرز بین اواخر پلیستوسن و اوایل هولوسن. | کاکرودی و همکاران، ۲۰۱۲، ۲۰۱۵ |
| ۳۹ | L | دریاچه هامون | رسوبات دریاچه‌ای | دانه‌بندی، سنگ‌نگاری، مجموع ماده آلی و کربنات کلسیم | ۱۳۲۶۴-۱۶۵۹۳~ | C۱۴ | ۲ | تولید بالای دریاچه با سطح آب نسبتاً ثابت در طی اواخر دوره یخچالی به اوایل هولوسن، | حمزه و همکاران، ۲۰۱۵ |
| ۴۰ | L | دریاچه زریبار | رسوبات دریاچه‌ای | δ18O ایزوتوپ | ۳۲۱۰-۱۶۶۸۳~ | C۱۴ | ۵ | سرد و خشک و تمرکز بالای دریاچه در طول دوره‌ی بعد از یخچالی، | استیونس و همکاران، ۲۰۰۱ |
| ۴۱ | T | ارتفاعات زاگرس | لندفرم‌های یخچالی | بازسازی ارتفاع خط تعادل | آخرین دوره یخچالی | .. | .. | ارتفاع خط تعادل بین ۴۴۰۰ الی ۴۵۰۰ متر از سطح دریا در طول کوتاه‌تری | ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۵ |

مبانی نظری

ارتفاع خط تعادل

ارتفاع متوسطی است که در طول فاصله‌ی زمانی یک سال میزان انباشت با میزان تخلیه برابر است بنابراین موازنه‌ی جرم در این خط صفر است (کوگلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

روش‌های تعیین ارتفاع خط تعادل

* نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل

* ارتفاع متوسط یخچال‌ها یا کروسکی

* نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع

روش نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل روشی بسیار کاربردی برای برآورد ارتفاع خط تعادل و برای بازسازی آب و هوای یخچالی در مناطق کوهستانی سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است (از جمله بن و بالانتین^۲، ۲۰۰۵، لوکاس^۳، ۲۰۰۷،

^۱- Cogley

^۲- Benn and Ballantyne

^۳- Lukas

استانسل^۱ و همکاران، ۲۰۰۷، پللیترو^۲، ۲۰۱۳). در این روش فرض می‌شود که نسبت بین مساحت انباشتگی و مساحت تخلیه ثابت است با این فرض که یخچال‌ها در حالت پایدار قرار بگیرند.

متوسط ارتفاع یخچال‌ها یا کروسکی

یک روش جایگزین و ساده‌تر برای روش نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل است که توسط کروسکی (۱۸۹۱) پیشنهاد و ارائه شده است. این روش بر این فرض استوار است که برای یک یخچال در حال تعادل یعنی در جائیکه موازنه‌ی جرم تابع خطی از ارتفاع است، ارتفاع خط تعادل در ارتفاع متوسط یخچال قرار گرفته است، برای یک یخچال با توزیع نامتقارن مساحت با ارتفاع، میانگین ارتفاع تقریباً با متوسط ارتفاع یخچال برابر است که معادل نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل برابر با ۰/۵ است (برایت وایت و راپر^۳، ۲۰۰۷).

نسبت تعادل مساحت ° ارتفاع

دومین روش محاسبه ارتفاع خط تعادل که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد روش نسبت تعادل مساحت ° ارتفاع است (اوسماستن، ۱۹۷۵). این روش بسیار قوی‌تر از روش‌های نسبت مساحت انباشتگی به مساحت کل و متوسط ارتفاع یخچال‌ها است زیرا محاسبه‌ی هر دوی هیپسومتری یخچال (اوسماستن، ۲۰۰۵) و گرادیان‌های موازنه‌ی جرم را به کار می‌گیرد (بن و لیم کوهل^۴، ۲۰۰۰). روش نسبت تعادل مساحت ° ارتفاع نیازمند محاسبه‌ی هیپسومتری یخچال و نسبت تعادل است (BR). برآورد ارتفاع خط تعادل کنونی

لای^۵ و همکاران (۲۰۰۳) یک روش نظری برای محاسبه‌ی ارتفاع خط تعادل براساس مشاهدات بارش زمستانی و میزان تخلیه درجه حرارت فصلی را ارائه نمودند. ارتفاع خط تعادل عموماً به میزان تخلیه درجه حرارت فصلی و انباشت برف در طول زمستان وابسته است. لای و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که AIG (ارتفاع یخچالی شدن لحظه‌ای) می‌تواند به صورت عبارت زیر محاسبه گردد:

$$AIG (or TP - ELA) = H_0 + (100 * h)$$

و

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

در اینجا P_0 و T_0 به ترتیب بارش زمستانی (۱ اکتبر الی ۳۰ آوریل) و درجه حرارت فصل تخلیه (۱ می تا ۳۰ سپتامبر) در ارتفاع مشخص (H_0) یا ارتفاع ایستگاه آب و هوا) و h ارتفاع AIG بالای H_0 به صد متر. T میزان افت آدیاباتیک و P گرادیان ارتفاع - بارش است.

روش تحقیق

در این تحقیق پس از بازدیدهای میدانی از ارتفاعات چهل چشمه سیرک‌های یخچالی منطقه شناسایی گردید سپس موقعیت تعداد دو سیرک نمونه شامل سیرک یخچالی شاه‌نشین، قولی زلیخا و تعداد سه سیرک واقع در ارتفاعات مسجد میرزا به همراه موقعیت یخرفت‌ها با استفاده از GPS تعیین گردید و نقشه‌ی ژئومورفولوژی یخچال‌ها با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و داده‌های GPS در محیط نرم‌افزارهای Freehand 9.0.2 و ArcGIS 10.4.1 ترسیم گردید سپس با استفاده از DEM

^۱- Stansell

^۲- Pellitro

^۳- Braithwaite and Raper

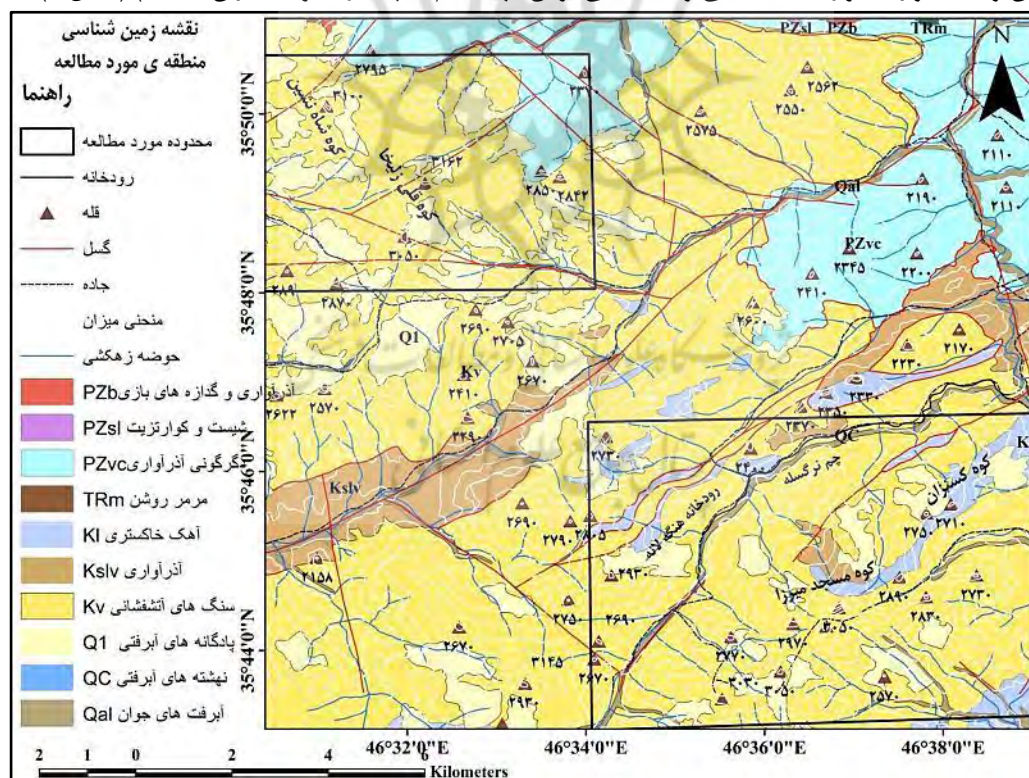
^۴- Benn and Lehmkuhl

^۵- Lie

۱۲/۵ متری و نقشه‌های ژئومورفولوژی تهیه شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1، ارتفاع خط تعادل قدیمی در یخچال-های ارتفاعات چهل چشمه با به کارگیری روش‌های نسبت مساحت انباشتگی، متوسط ارتفاع یخچال‌ها یا کروسکی و روش نسبت تعادل مساحت^۱ ارتفاع محاسبه گردید (پلیترو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). روش لای و همکاران (۲۰۰۳) به منظور برآورد ارتفاع خط تعادل کنونی در ارتفاعات چهل چشمه مورد استفاده قرار گرفت به منظور محاسبه‌ی ارتفاع خط تعادل کنونی اطلاعات دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف منطقه‌ی مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

محدوده و قلمرو پژوهش

ارتفاعات چهل چشمه با دارا بودن ۲۰ قله از جمله قله بالای ۳۰۰۰ متری شاه‌نشین، قلی زلیخا، دوبرا، کوه سلطان اغزتو و کوه مزگت و میرزا (مسجد و میرزا) در غرب دیواندره واقع شده و بخشی از مرز ایران و عراق را تشکیل می‌دهد (شکل ۲) این کوهستان از لحاظ توپوگرافی دارای دامنه‌هایی تند و خشن و برون‌زدگی سنگ‌ها در دامنه‌های آن می‌باشد. فرسایش در آن شدید و در مراحل اولیه قرار دارد. ارتفاعات بلند چهل چشمه بزرگترین کانون آبگیر استان کردستان و یکی از سرچشمه‌های ثابت سه رودخانه‌ی مهم ایران یعنی، رودخانه‌های سفیدرود (قزل اوزن)، سیروان، زرینه‌رود یا (خورخوره) می‌باشد. این منطقه از نظر زمین‌شناسی در زون سندج-سیرجان واقع است و در جنوب باختری پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و روند ساختاری موازی با روند عمومی کوهزایی زاگرس قرار گرفته است. در این پهنه واحدهای سنگی از پرکامبرین تا عهد حاضر رخمون دارد که ویژگی همگانی این واحدها آواری، آواری-آتشفشانی و آتشفشانی بودن آنهاست (شاه‌پسندزاده و همکاران، ۱۳۸۵) (شکل ۱).

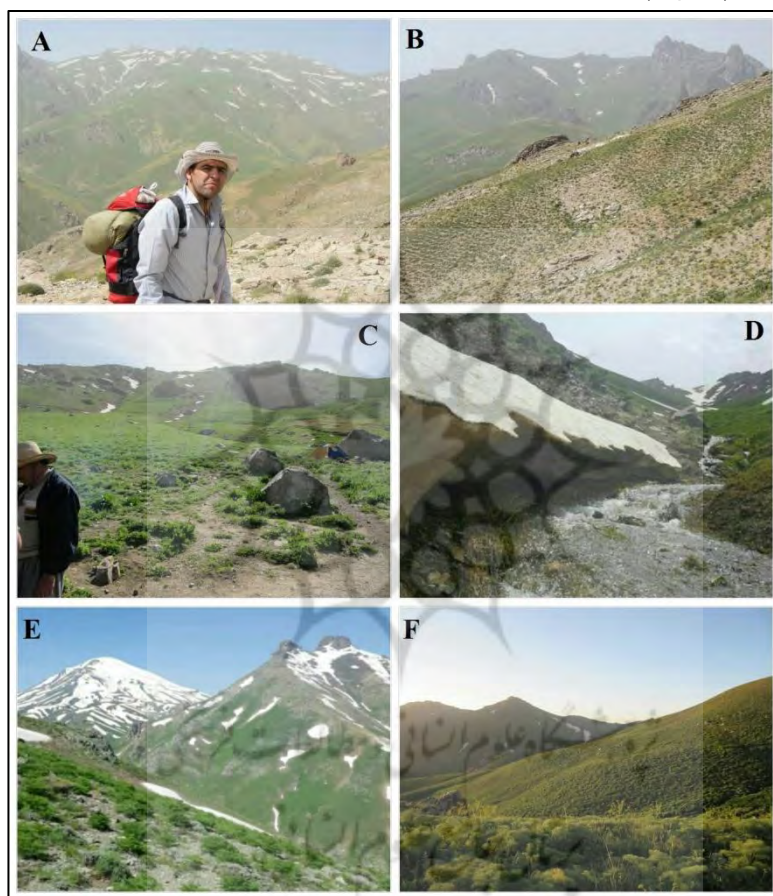


شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی و موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

بحث و یافته‌ها

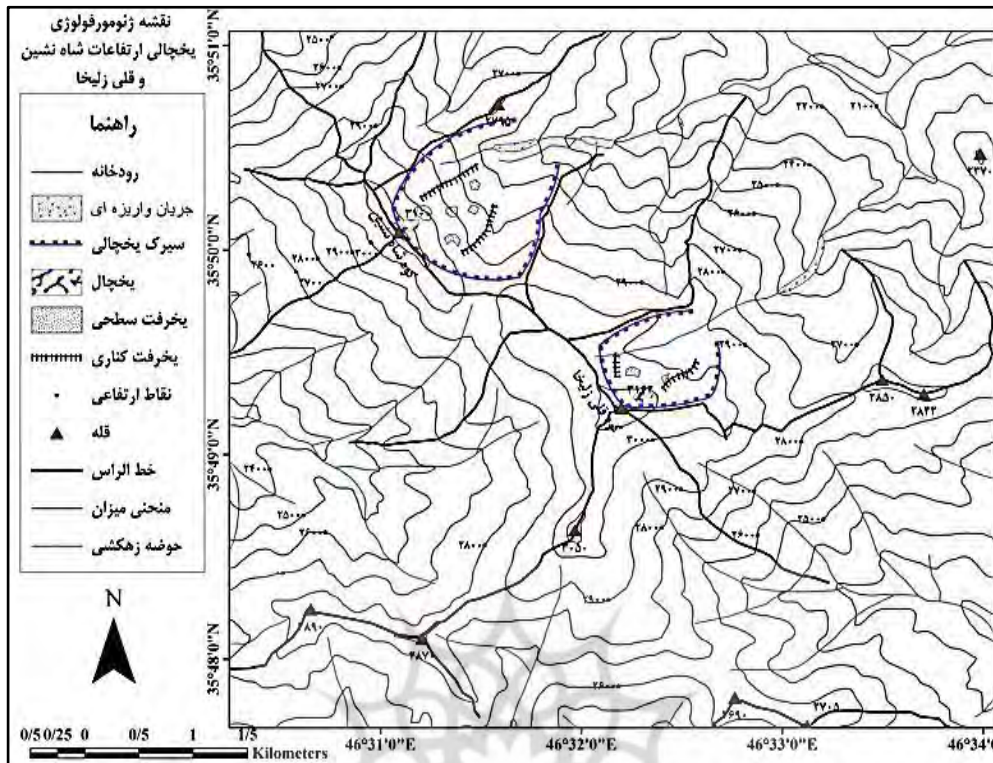
^۱- Pellitro

عوارض یخچالی پلیستوسن و آثار یخچالی وورم در ارتفاعات چهل چشمه با استفاده از مشاهدات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار گرفت در محدوده‌ی ارتفاعات چهل چشمه حدود ۲۰ قله‌ی بلند قرار دارد که ارتفاع بلندترین آنها شامل شاه‌نشین (۳۱۷۳ متر)، گاو‌لان (۳۱۸۱ متر)، قلی زلیخا (۳۱۹۴ متر)، مسجد میرزا (۳۰۹۰ متر)، سلطان اخزتو (۳۱۸۶ متر) و دوبرا (۳۰۰۰ متر) می‌باشد. در قله‌های شاه‌نشین و قلی زلیخا دو سیرک یخچالی در ارتفاع بالای ۲۶۰۰ و ۲۸۰۰ متری شناسایی گردید ارتفاع کف این سیرک‌های یخچالی به ترتیب ۲۹۰۰ و ۳۰۳۰ متر است. در کف سیرک شاه‌نشین یخرفت‌های بسیار بزرگ و پراکنده وجود دارد همچنین یخرفت‌های کناری در هر دو سیرک شناسایی شدند در کف سیرک شاه‌نشین چشمه‌ی پلیستوسن مشهور به کانی چاو رهش قرار دارد (شکل ۲).

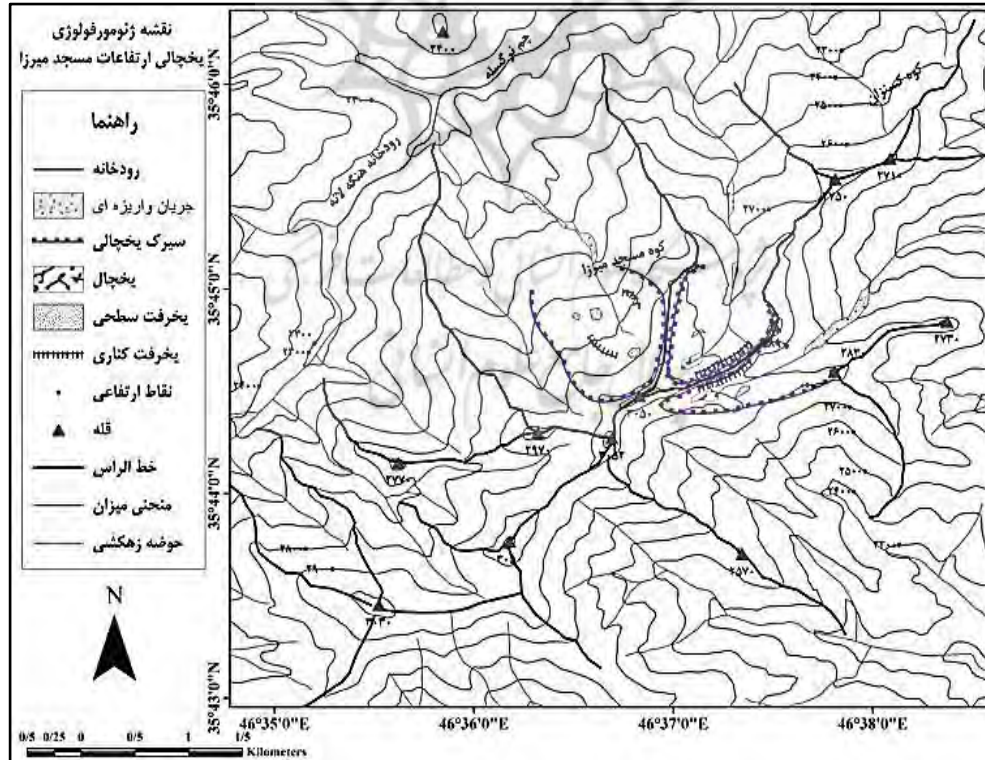


شکل ۲: A ارتفاعات چهل چشمه (چل چه مه)، B قله‌ی شاه‌نشین و قلی زلیخا، C یخرفت‌های کف سیرک شاه‌نشین، D سیرک یخچالی مسجد میرزا، E قله دوبرا و سلطان اخزتو، F قله مسجد میرزا

در قله‌ی مسجد میرزا سه سیرک یخچالی در ارتفاع بالای ۲۶۰۰ و ۲۷۰۰ متری شناسایی گردید ارتفاع کف این سیرک‌های یخچالی به ترتیب ۲۷۹۹، ۲۸۴۷ و ۲۸۵۷ متر است. یخرفت‌های کناری در هر سه سیرک شناسایی شدند در هر کدام از این سیرک‌ها چشمه‌های پلیستوسن جاری می‌باشند. نتایج حاصل از یافته‌های خصوصیات این پنج سیرک در دو منطقه‌ی مورد مطالعه همراه با جزئیات بر روی نقشه‌های ژئومورفولوژی نشان داده شده است (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳: نقشه‌ی ژئومورفولوژی یخچالی ارتفاعات شاه‌نشین و قلی‌زلیخا



شکل ۴: نقشه‌ی ژئومورفولوژی یخچالی ارتفاعات مسجد میرزا

روش‌های نسبت مساحت انباشتگی، متوسط ارتفاع یخچال‌ها یا کروسکی و روش نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع جهت محاسبه‌ی ارتفاع خط تعادل یخچال‌های گذشته به کار گرفته شد نتایج حاصل از هر کدام از این روش‌ها در جدول‌های نشان داده شده است.

براساس روش متوسط ارتفاع یخچال یا کروسکی ارتفاع خط تعادل در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در شاه‌نشین برابر با ۲۸۱۲/۵ متر از سطح دریا، در قوی زلیخا برابر با ۳۰۲۷/۵ متر از سطح دریا و در مسجد میرزا به طور میانگین برابر با ۲۸۶۸ متر از سطح دریا می‌باشد. براساس روش نسبت مساحت انباشتگی ارتفاع خط تعادل در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در شاه‌نشین برابر با ۲۸۶۷/۵ (نسبت ۰/۴)، ۲۸۱۲/۵ (نسبت ۰/۵)، ۲۷۸۷/۵ (نسبت ۰/۶)، ۲۷۵۲/۵ (نسبت ۰/۷)، ۲۷۱۲/۵ (نسبت ۰/۸) متر از سطح دریا، در قلی زلیخا برابر با ۳۰۴۲/۵ (نسبت ۰/۴)، ۳۰۲۷/۵ (نسبت ۰/۵)، ۳۰۱۲/۵ (نسبت ۰/۶)، ۲۹۹۲/۵ (نسبت ۰/۷)، ۲۹۷۷/۵ (نسبت ۰/۸) متر از سطح دریا و در مسجد میرزا به طور میانگین برابر با ۲۸۹۱/۵ (نسبت ۰/۴)، ۲۸۶۸ (نسبت ۰/۵)، ۲۸۴۵ (نسبت ۰/۶)، ۲۸۲۵ (نسبت ۰/۷)، ۲۸۰۶/۵ (نسبت ۰/۸) متر از سطح دریا می‌باشد. براساس روش نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع، ارتفاع خط تعادل در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در شاه‌نشین برابر با ۲۸۲۷ متر از سطح دریا در قوی زلیخا برابر با ۳۰۱۸ متر از سطح دریا و در مسجد میرزا به طور میانگین برابر با ۲۸۶۹ متر از سطح دریا می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲: میزان ارتفاع خط تعادل (ELA) در روش‌های مختلف برای سیرک‌های مورد مطالعه

| نام سیرک یخچالی | ELA 1 MGE (m) | ELA 2 AAR 0/4 (m) | ELA3 AAR 0/45 (m) | ELA4 AAR 0/5 (m) | ELA 5 AAR 0/55 (m) | ELA 6 AAR 0/6 (m) | ELA 7 AAR 0/65 (m) | ELA 8 AAR 0/7 (m) | ELA 9 AAR 0/75 (m) | ELA 10 AAR 0/8 (m) | ELA11 AABR (AA) (m) |
|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| شاه نشین | ۲۸۱۲/۵ | ۲۸۶۷/۵ | ۲۸۳۷/۵ | ۲۸۱۲/۵ | ۲۷۹۷/۵ | ۲۷۸۷/۵ | ۲۷۷۲/۵ | ۲۷۵۲/۵ | ۲۷۳/۵ ۲ | ۲۷۱۲/۵ | ۲۸۲۷ |
| قوی زلیخا | ۳۰۲۷/۵ | ۳۰۴۲/۵ | ۳۰۳۲/۵ | ۳۰۲۷/۵ | ۳۰۱۷/۵ | ۳۰۱۲/۵ | ۳۰۰۲/۵ | ۲۹۹۲/۵ | ۲۹۸/۵ ۲ | ۲۹۷۷/۵ | ۳۰۱۸ |
| مسجد میرزا ۱ | ۲۸۷۱/۵ | ۲۸۸۶/۵ | ۲۸۸۱/۵ | ۲۸۷۱/۵ | ۲۸۶۱/۵ | ۲۸۵۱/۵ | ۲۸۴۱/۵ | ۲۸۳۶/۵ | ۲۸۳/۵ ۱ | ۲۸۲۱/۵ | ۲۸۷۴ |
| مسجد میرزا ۲ | ۲۹۰۱/۵ | ۲۹۱۶/۵ | ۲۹۰۶/۵ | ۲۹۰۱/۵ | ۲۸۹۱/۵ | ۲۸۸۶/۵ | ۲۸۸۱/۵ | ۲۸۷۱/۵ | ۲۸۶/۵ ۶ | ۲۸۶۱/۵ | ۲۹۰۳ |
| مسجد میرزا ۳ | ۲۸۳۱/۵ | ۲۸۷۱/۵ | ۲۸۵۱/۵ | ۲۸۳۱/۵ | ۲۸۱۱/۵ | ۲۷۹۶/۵ | ۲۷۸۱/۵ | ۲۷۶۶/۵ | ۲۷۵/۵ ۱ | ۲۷۳۶/۵ | ۲۸۲۹ |
| میانگین | ۲۸۸۹ | ۲۹۱۷ | ۲۹۰۲ | ۲۸۸۹ | ۲۸۷۶ | ۲۸۶۷ | ۲۸۵۶ | ۲۸۴۴ | ۲۸۳۳ | ۲۸۲۲ | ۲۸۹۰ |

برای برآورد میزان بارش و درجه حرارت در محدوده‌ی ارتفاعات چهل چشمه آمار هواشناسی ۵ ایستگاه واقع در استان کردستان مورد استفاده قرار گرفت کمترین و بیشترین میزان میانگین دمای سالیانه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی زرینه (ذ/۵) و سنندج (ذ/۳/۱۴)، ضریب همبستگی خطی بین دما و ارتفاع برابر با ۰/۷ بوده که نشان می‌دهد بین دما و ارتفاع همبستگی ملایمی وجود دارد. کمترین و بیشترین میزان میانگین بارش سالیانه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی زرینه (۳۸۶/۶ mm) و مریوان (۹۰۹ mm) است ضریب همبستگی بین بارش و ارتفاع برابر با ۰/۶ می‌باشد که نشان از همبستگی نسبتاً ملایم دارد. با به کارگیری روش لای و همکاران (۲۰۰۳) و استفاده از داده‌های هواشناسی میزان ارتفاع خط تعادل کنونی برای ایستگاه زرینه ۴۷۳۵ متر، ایستگاه بانه ۴۶۸۰ متر ایستگاه سنندج ۴۶۳۳ متر محاسبه گردید، به طور میانگین برای سه ایستگاه واقع در محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه ۴۶۸۳ متر از سطح دریا محاسبه گردید (جدول ۳). در مقایسه با دیگر مطالعات صورت گرفته شده میزان ارتفاع خط تعادل کنونی توسط شوایتزر (۱۹۷۰) در سبلان ۴۵۰۰ متر و در پلیستوسن ۳۶۰۰-۳۷۰۰ متر، دزیو (۱۹۳۴)، گرونرت و همکاران (۱۹۷۸) در زردکوه ۳۹۰۰ متر و در پلیستوسن ۳۳۵۰-۳۴۰۰ متر، بوبک (۱۹۳۷)، بوت و همکاران، (۱۹۶۱) در کوه

تخت سلیمان ۴۰۰۰-۴۱۰۰ متر و در پلیستوسن ۳۰۰۰ متر و در کوه دماوند ۴۵۰۰ متر و در پلیستوسن ۳۸۰۰-۳۷۰۰ متر، یمانی و همکاران (۱۳۹۶) در دره هراز ۲۷۷۹ متر برای حداکثر دوره گسترش یخچالی، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) در ارتفاعات زاگرس بین ۴۴۰۰ الی ۴۵۰۰ متر و جعفری و همکاران (۱۳۹۶) در توده کوهستانی قروه ارتفاع برف‌مرز دائمی را ۲۲۰۰ متر برای آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی برآورد نموده‌اند.

جدول ۳: میزان ارتفاع خط تعادل کنونی (AIG (or TP-ELA) (m.a.s.l) برای ایستگاه‌های واقع در محدوده مورد مطالعه

| پارامتر اقلیمی | ایستگاه زرینه | ایستگاه بانه | ایستگاه سنج |
|---------------------------|---------------|--------------|-------------|
| P_0 (mm) | ۳۳۱ | ۶۱۷ | ۴۰۱ |
| T_0 (°C) | ۱۸/۳ | ۲۴/۱۴ | ۲۴/۳۵ |
| H_0 (m.a.s.l) | ۲۱۴۲/۶ | ۱۶۰۰ | ۱۳۷۳/۴ |
| P(%) | ۵/۹۹ | ۵/۹۹ | ۵/۹۹ |
| T(ذC/100 m) | /۶۵ | /۶۵ | /۶۵ |
| AIG (or TP-ELA) (m.a.s.l) | ۴۷۳۵ | ۴۶۸۰ | ۴۶۳۳ |

در این مطالعه میزان پایین آمدن ارتفاع خط تعادل (ELA) در طول آخرین دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی براساس روش‌های نسبت مساحت انباشتگی (حدود ۱۸۰۱ متر)، متوسط ارتفاع یخچال‌ها یا کروسکی (حدود ۱۷۸۰ متر) و روش نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع (۱۷۷۸ متر) محاسبه گردیده است (جدول). بر اساس جدول میانگین پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل با توجه به سه روش به کار رفته از ۱۷۷۸ متر تا ۱۸۰۱ متر تغییر می‌کند (جدول ۴). در ارتفاعات چهل چشمه با در نظر گرفتن پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل (ELA) با استفاده از روش نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع به میزان ۱۷۷۸ متر و بر طبق گرایان دما ۱۰۰/۱۶۵ ذ/م. میزان کاهش دمای سالیانه در طول دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی حدود ۱۱/۵ بوده است.

جدول ۴: میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل (ΔELA) در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در محدوده مورد مطالعه

| نام سیرک یخچالی | روش MGE | روش AAR (۱/۶) | روش AABR |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | ارتفاع از سطح دریا (m) | ارتفاع از سطح دریا (m) | ارتفاع از سطح دریا (m) |
| شاه‌نشین | ۲۸۱۲/۵ | ۲۷۸۷/۵ | ۲۸۲۷ |
| ELA (m) | -۱۸۷۰/۵ | -۱۸۹۵/۵ | -۱۸۵۶ |
| قلی زلیخا | ۳۰۲۷/۵ | ۳۰۱۲/۵ | ۳۰۱۸ |
| ELA (m) | -۱۶۵۵/۵ | -۱۶۷۰/۵ | -۱۶۶۵ |
| مسجد میرزا | ۲۸۶۸ | ۲۸۴۵ | ۲۸۶۹ |
| ELA (m) | -۱۸۱۵ | -۱۸۳۸ | -۱۸۱۴ |
| میانگین ELA | ۲۹۰۳ | ۲۸۸۲ | ۲۹۰۵ |
| میانگین ELA (m) | ۱۷۸۰ | ۱۸۰۱ | ۱۷۷۸ |

نتیجه‌گیری

ارتفاعات چهل چشمه (چل‌چمه) در دیواندره استان کردستان تعداد زیادی از سیرک‌های یخچالی و یخرفت‌های دوره‌ی پلیستوسن را در خود جای داده است. مقادیر ارتفاع خط تعادل در ارتفاعات چهل چشمه به منظور بازسازی محیط‌ها و آب و هوای دیرینه با استفاده از روش‌های نسبت مساحت انباشتگی، متوسط ارتفاع یخچال‌ها یا کروسکی و روش نسبت تعادل مساحت^۰ ارتفاع در

ترکیب با بررسی و مشاهدات میدانی، تهیه‌ی نقشه‌های ژئومورفولوژی، استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متری محاسبه گردید. میزان ارتفاع خط تعادل در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی در ارتفاعات چهل چشمه حدود ۲۹۰۵ متر از سطح دریا برآورده شد که این میزان در مطالعات گذشته برآورد شده است. میزان ارتفاع خط تعادل کنونی با استفاده از روش لای و همکاران و استفاده از داده‌های هواشناسی ۴۶۸۳ متر از سطح دریا برآورد گردید و با در نظر گرفتن میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل به میزان ۱۷۷۸ متر میزان متوسط کاهش دمای سالیانه در طول دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی ۱۱/۵ بوده است. در مقایسه با دیگر مطالعات صورت گرفته شده توسط رایت و همکاران (۱۹۶۲، ۲۰۰۴) میزان کاهش دما را در یخچال‌های ارتفاعات کردستان ۱۲ درجه سانتی‌گراد، بوبک (۱۹۳۷) در ارتفاعات کردستان ۴ درجه سانتی‌گراد، بوبک (۱۹۶۳) در ارتفاعات البرز و زاگرس ۴ تا ۵ درجه، کرینسلی (۱۹۷۰) در پلایا و کویرهای ایران مرکزی ۵-۸ درجه، فرنزل و همکاران (۱۹۹۲) در نیمکره شمالی ۱۰-۱۲ درجه، سیف (۲۰۱۵) در اشرانکوه ۹/۸ درجه، کوهله (۲۰۰۸) در کوه جوپار ۱۰/۵ درجه، یمانی و همکاران (۲۰۰۷) در کوه کرکس ۱۰-۱۲ درجه و جعفری و همکاران (۱۳۹۶) در توده کوهستانی قروه ۸/۸ درجه را برآورد نموده‌اند. همچنین براساس مطالعات گذشته توسط رایت و همکاران (۱۹۶۲، ۲۰۰۴) میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل را در یخچال‌های ارتفاعات کردستان بین ۱۲۰۰ - ۱۸۰۰ متر، بوبک (۱۹۳۷) در ارتفاعات کردستان ۷۰۰ متر، بوبک (۱۹۶۳) در ارتفاعات البرز و زاگرس ۸۰۰-۶۰۰ متر، کرینسلی (۱۹۷۰) در پلایا و کویرهای ایران مرکزی بیش از ۱۸۰۰ متر، سیف (۲۰۱۵) در اشرانکوه بیش از ۱۳۸۰ متر، کوهله (۲۰۰۸) در کوه جوپار ۱۵۰۰ متر، برآورد نموده‌اند. با مقایسه‌ی میزان پایین آمدگی ارتفاع خط تعادل و میزان کاهش دمای محاسبه شده با دیگر مطالعات انجام شده در ایران و جهان حداکثر گسترش یخچال‌ها در ارتفاعات چهل چشمه منطبق با آخرین دوره‌ی حداکثر گسترش یخچالی ۲۶/۵ الی ۱۹ هزار سال قبل و منطبق با شرایط آب و هوایی سرد و خشک بوده است. بنابراین استفاده از شواهد ژئومورفولوژیکی یخچالی و ارتفاع خط تعادل روش بسیار مناسبی جهت بازسازی محیط و آب و هوای دیرینه در طول آخرین دوره حداکثر گسترش یخچالی می‌باشد.

منابع

- ابراهیمی، بابک، سیف، عبدالله (۱۳۹۵). ارتفاع خط تعادل (*TP-ELA* و *TPW-ELA*) در ارتفاعات زاگرس، پژوهش‌های دانش زمین، سال هفتم، شماره ۲۸، ص ۹۶-۱۱۸.
- جعفری، غلام‌حسن، آوجی، مینا (۱۳۹۵). بررسی آثار برف‌مرز دائمی یخچال‌های کواترنری توده کوهستانی قروه، فصلنامه کواترنری ایران، دوره ۲، شماره ۴، ص ۳۷۹-۳۹۱.
- شاه‌پسندزاده، م، (۱۳۸۵). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ باینچوب، سازمان زمین‌شناسی ایران.
- یمانی، مجتبی، جداری عیوضی، جمشید، گورابی، ابوالقاسم (۱۳۸۶). شواهد ژئومورفولوژیکی مرزهای یخچالی در دامنه‌های کرکس، مدرس علوم انسانی، دوره ۱۱، شماره ۱، ص ۲۰۷-۲۲۸.
- یمانی، مجتبی، حمزه، زمانی (۱۳۹۵). تعیین ارتفاع خط تعادل (*ELA*) در دره هراز در آخرین دوره یخچالی، دوره ۲، شماره ۴، ص ۳۰۵-۳۱۴.
- Antoine, P., Bahain, J. J., Berillon, G., & Asgari Khaneghah, A. (2006). *Tuf calcaire et séquence alluviale en contexte tectonique actif: la formation de Baliran (province du Mazandaran, Iran). Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire, 17 (4), 321-331.*
- Benn, D. I., & Ballantyne, C. K. (2005). *Palaeoclimatic reconstruction from Loch Lomond Readvance glaciers in the West Drumochter Hills, Scotland. Journal of Quaternary Science, 20(6), 577-592.* Benn, D. I., & Ballantyne, C. K. (2005). *Palaeoclimatic reconstruction from Loch Lomond Readvance glaciers in the West Drumochter Hills, Scotland. Journal of Quaternary Science, 20(6), 577-592.*
- Benn, D. I., & Lehmkuhl, F. (2000). *Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. Quaternary International, 65, 15-29.*
- Bobek, H. (1937). *Die Rolle der Eiszeit in Nordwestiran. Borntraeger. 25, S. 130-183.*

- Bobek, H. (1963). *Nature and implications of Quaternary climatic changes in Iran, in Changes of climate, Proceedings of Symposium on Changes of Climate with Special Reference to Arid Zones: Rome, 1961, UNESCO, p. 403-413.*
- Braithwaite, R. J., & Raper, S. C. B. (2009). *Estimating equilibrium-line altitude (ELA) from glacier inventory data. Annals of Glaciology, 50(53), 127-132.*
- Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., ... & McCabe, A. M. (2009). *The last glacial maximum. Science, 325(5941), 710-714.*
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., ... & Zemp, M. (2011). *Glossary of glacier mass balance and related terms, IHP-VII technical documents in hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2.*
- Desio, A. (1934). *Appunti geografici e geologici sulla catena dello Zardeh Kuh in Persia. Memorie Geologiche e Geografiche di G. Dainelli, 4(13), 141-167.*
- Djamali, M., de Beaulieu, J. L., Shah-hosseini, M., Andrieu-Ponel, V., Ponel, P., Amini, A., ... & Brewer, S. (2008). *A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, NW Iran. Quaternary Research, 69(3), 413-420.*
- El-Moslimany, A. P. (1987). *The late Pleistocene climates of the Lake Zeribar region (Kurdistan, western Iran) deduced from the ecology and pollen production of nonarboreal vegetation. Plant Ecology, 72(3), 131-139.*
- Fattahi, M., Walker, R., Hollingsworth, J., Bahroudi, A., Nazari, H., Talebian, M., & Stokes, S. (2006). *Holocene slip-rate on the Sabzevar thrust fault, NE Iran, determined using optically stimulated luminescence (OSL). Earth and Planetary Science Letters, 245(3), 673-684.*
- Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., & Skowronek, A. (2009). *Loess chronology of the Caspian lowland in northern Iran. Quaternary International, 198(1), 220-233.*
- Frenzel, B. (1992). *Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Geographical Research Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena New York.*
- Grunert, J., Carls, H. G., & Preu, C. (1978). *Rezente Vergletscherungsspuren in zentraliranischen Hochgebirgen [The present-day glaciers of the central Iranian high mountains]: Eiszeitalter und Gegenwart, v. 28.148-166.*
- Hamzeh, M. A., Gharai, M. H. M., Lahijani, H. A. K., Djamali, M., Harami, R. M., & Beni, A. N. (2016). *Holocene hydrological changes in SE Iran, a key region between Indian summer monsoon and Mediterranean winter precipitation zones, as revealed from a lacustrine sequence from Lake Hamoun. Quaternary International, 408, 25-39.*
- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M. J., & Copley, A. (2010). *Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene. Geophysical Journal International, 181(3), 1214-1246.*
- Hughes, P. D., Woodward, J. C., Van Calsteren, P. C., Thomas, L. E., & Adamson, K. R. (2010). *Pleistocene ice caps on the coastal mountains of the Adriatic Sea. Quaternary science reviews, 29(27), 3690-3708m*
- Kakroodi, A. A., Kroonenberg, S. B., Hoogendoorn, R. M., Khani, H. M., Yamani, M., Ghassemi, M. R., & Lahijani, H. A. K. (2012). *Rapid Holocene sea-level changes along the Iranian Caspian coast. Quaternary International, 263, 93-103. doi:10.1016/j.quaint.2011.12.021.*
- Kakroodi, A. A., Leroy, S. A. G., Kroonenberg, S. B., Lahijani, H. A. K., Alimohammadian, H., Boomer, I., & Goorabi, A. (2015). *Late Pleistocene and Holocene sea-level change and coastal paleoenvironment evolution along the Iranian Caspian shore. Marine Geology, 361, 111-125.*

- Karimi, A., Frechen, M., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2011). Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran. *Quaternary International*, 234(1), 124-132.
- Kaser, G., Osmaston, H.A., (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kehl, M., Frechen, M., & Skowronek, A. (2005). Paleosols derived from loess and loess-like sediments in the Basin of Persepolis, Southern Iran. *Quaternary International*, 140, 135-149.
- Kelts, K., & Shahrabi, M. (1986). Holocene sedimentology of hypersaline Lake Urmia, northwestern Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 54 (1-4), 105-130.
- Krinsley, D. B. (1970). *A Geomorphological and Paleoclimatological Study of the Playas of Iran. Part II. GEOLOGICAL SURVEY RESTON VA.*
- Krinsley, D. B. (1970). *A Geomorphological and Paleoclimatological Study of the Playas of Iran. Part II. GEOLOGICAL SURVEY RESTON VA.*
- Kuhle, M. (2008). The Pleistocene Glaciation (LGP and pre-LGP, pre-LGM) of SE Iranian Mountains Exemplified by the Kuh-i-Jupar, Kuh-i-Lalezar and Kuh-i-Hezar Massifs in the Zagros. *Polarforschung*, 77(2/3), 71-88.
- Lie, Ø., Dahl, S. O., & Nesje, A. (2003). A theoretical approach to glacier equilibrium-line altitudes using meteorological data and glacier mass-balance records from southern Norway. *The Holocene*, 13(3), 365-372
- Lukas, S., & Bradwell, T. (2010). Reconstruction of a Lateglacial (Younger Dryas) mountain ice field in Sutherland, northwestern Scotland, and its palaeoclimatic implications. *Journal of Quaternary Science*, 25(4), 567-580
- Megard, R. O. (1967). Late-Quaternary Cladocera of Lake Zeribar Western Iran. *Ecology*, 48(2), 179-189.
- Osmaston, H. (2005). Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area× Altitude, the Area× Altitude Balance Ratio and the Area× Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 138, 22-31.
- Osmaston, H. A. (1975). Models for the estimation of firnlines of present and Pleistocene glaciers. *Processes in Physical and Human Geography: Bristol Essays*. Heinemann Educational, London, 218-245.
- Pellitero, R. (2013). Lateglacial evolution of Fuentes Carrionas massif (Cantabrian Range), palaeoenvironmental and chronological estimations. *Cuatern. Geomorfol*, 27(1-2), 71-90.
- Pellitero, R., Rea, B. R., Spagnolo, M., Bakke, J., Hughes, P., Ivy-Ochs, S., ... & Ribolini, A. (2015). A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes. *Computers & Geosciences*, 82, 55-62.
- Ramezani, E., Mrotzek, A., Mohadjer, M. R. M., Kakroodi, A. A., Kroonenberg, S. B., & Joosten, H. (2016). Between the mountains and the sea: Late Holocene Caspian Sea level fluctuations and vegetation history of the lowland forests of northern Iran. *Quaternary International*, 408, 52-64.
- Regard, V., Bellier, O., Braucher, R., Gasse, F., Bourlès, D., Mercier, J., & Soleymani, S. (2006). 10 Be dating of alluvial deposits from southeastern Iran (the Hormoz Strait area). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 242(1), 36-53.
- Robinson, S. A., Black, S., Sellwood, B. W., & Valdes, P. J. (2006). A review of palaeoclimates and palaeoenvironments in the Levant and Eastern Mediterranean from 25,000 to 5000 years BP: setting the environmental background for the evolution of human civilisation. *Quaternary Science Reviews*, 25(13), 1517-1541.

- Schweizer, G. (1970). *Der kuh-e-sabalan (Nordwestiran). Beitrage zur Gletscher Kunde and Glazialgeomorphologie vorderasiatischer Hochgebirge: Tubinger geographische studien*, 34, 163-178.
- Seif, A. (2015). *Equilibrium-line altitudes of Late Quaternary glaciers in the Oshtorankuh Mountain, Iran. Quaternary International*, 374, 126-143.
- Sharifi, A., Pourmand, A., Canuel, E. A., Ferer-Tyler, E., Peterson, L. C., Aichner, B., & Lahijani, H. A. (2015). *Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution, multi-proxy peat record from NW Iran: The hand that rocked the Cradle of Civilization? Quaternary Science Reviews*, 123, 215-230.
- Snyder, J. A., Wasyluk, K., Fritz, S. C., & Wright Jr, H. E. (2001). *Diatom-based conductivity reconstruction and palaeoclimatic interpretation of a 40-ka record from Lake Zeribar, Iran. The Holocene*, 11(6), 737-745.
- Stansell, N. D., Polissar, P. J., & Abbott, M. B. (2007). *Last glacial maximum equilibrium-line altitude and paleo-temperature reconstructions for the Cordillera de Mérida, Venezuelan Andes. Quaternary Research*, 67(1), 115-127.
- Stevens, L. R., Wright Jr, H. E., & Ito, E. (2001). *Proposed changes in seasonality of climate during the Lateglacial and Holocene at Lake Zeribar, Iran. The Holocene*, 11(6), 747-755.
- Talebi, T., Ramezani, E., Djamali, M., Lahijani, H. A. K., Naqinezhad, A., Alizadeh, K., & Andrieu-Ponel, V. (2016). *The Late-Holocene climate change, vegetation dynamics, lake-level changes and anthropogenic impacts in the Lake Urmia region, NW Iran. Quaternary International*, 408, 40-51.
- Thomas, D. S., Bateman, M. D., Mehrshahi, D., & O'hara, S. L. (1997). *Development and environmental significance of an eolian sand ramp of last-glacial age, Central Iran. Quaternary Research*, 48(2), 155-161.
- Uchupi, E., Swift, S. A., & Ross, D. A. (1999). *Late Quaternary stratigraphy, paleoclimate and neotectonism of the Persian (Arabian) Gulf region. Marine Geology*, 160(1), 1-23.
- Van Zeist, W. (1967). *Late Quaternary vegetation history of western Iran. Review of Palaeobotany and Palynology*, 2(1-4), 301-311.
- Van Zeist, W., & Bottema, S. (1977). *Palynological investigations in western Iran. Palaeohistoria Bussum*, 19, 19-85.
- Van Zeist, W., & Wright, H. E. (1963). *Preliminary pollen studies at Lake Zeribar, Zagros Mountains, southwestern Iran. Science*, 140(3562), 65-67.
- Walker, R. T., & Fattahi, M. (2011). *A framework of Holocene and Late Pleistocene environmental change in eastern Iran inferred from the dating of periods of alluvial fan abandonment, river terracing, and lake deposition. Quaternary Science Reviews*, 30 (9), 1256-1271.
- Wasylukowa, K. (1967). *Late quaternary plant macrofossils from Lake Zeribar, western Iran. Review of Palaeobotany and Palynology*, 2(1-4), 313-318.
- Wasylukowa, K. (2005). *Palaeoecology of Lake Zeribar, Iran, in the Pleniglacial, Lateglacial and Holocene, reconstructed from plant macrofossils. The Holocene*, 15(5), 720-735.
- Wasylukowa, K. (2005). *Palaeoecology of Lake Zeribar, Iran, in the Pleniglacial, Lateglacial and Holocene, reconstructed from plant macrofossils. The Holocene*, 15(5), 720-735.
- Wasylukowa, K. R. Y. S. T. Y. N. A., & Walanus, A. D. A. M. (2004). *Timing of aquatic and marshplant successions in different parts of Lake Zeribar, Iran, during the Late Glacial and Holocene. Acta Palaeobotanica*, 44 (2), 129-140.
- Wasylukowa, K., Witkowski, A., Walanus, A., Hutorowicz, A., Alexandrowicz, S. W., & Langer, J. J. (2006). *Palaeolimnology of Lake Zeribar, Iran, and its climatic implications. Quaternary Research*, 66(3), 477-493.
- Wright, H. E. (2004). *Pleistocene Glaciation of Iraq, Developments in Quaternary Sciences Volume 2, Part C, Pages 215–216.*
- Wright, H. E., Minneapolis Jr. (1962). *Pleistocene glaciation in Kurdistan, Eiszeitaller und Gegenwart* 12, 131-164.