



University of Tehran

Journal of Fisheries

Home Page: <https://jfisheries.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-7809

Comparing the morphological diversity of northern Caucasian bleak (*Alburnus hohenackeri*) in Sistan basin

Soroor Gholami^{1*} | Yazdan Keivany² | Asghar Jafari Patkan³

1. Corresponding author, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: s_gholami@na.iut.ac.ir
2. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: keivany@iut.ac.ir
3. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: asghar.jafari@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 04 December 2024
Revised: 23 January 2024
Accepted: 27 February 2025
Published online: 08 July 2025

Keywords:
Canonical Variate Analysis,
Geometric morphometric,
Northern Caucasian bleak,
Principal Component Analysis,
Procrustes Analysis.

ABSTRACT

This study aimed to compare the morphological characteristics of the northern Caucasian bleak (*Alburnus hohenackeri*) populations in the Sistan basin using geometric morphometric methods. A total of 170 samples were collected from the Maleki, Hamzeh-Abad, Chahnimeh 1, Chahnimeh 2, and Pashneh rivers. Images were taken from the left lateral side of the specimens, and 13 landmarks were digitized using tpsDig2 software. The data were analyzed using Procrustes analysis and multivariate statistical methods, such as PCA, CVA, and cluster analysis. PCA results indicated a high overlap among the populations, while CVA results showed that the Chahnimeh 1 population had no overlap with the Maleki and Pashneh populations. Additionally, cluster analysis revealed that the Pashneh population formed a separate group, exhibiting the greatest distinction from other populations. These findings suggest that while PCA may not capture finer distinctions observed in other methods, the results of CVA and cluster analysis demonstrate significant morphological differences among various populations, particularly in the Pashneh area. These differences are likely due to geographical isolation and distinct habitat conditions, which significantly impact population morphology.

Cite this article: Gholami, S., Keivany, Y., Jafari Patkan, A. (2025). Comparing the morphological diversity of northern Caucasian bleak (*Alburnus hohenackeri*) in Sistan basin. *Journal of Fisheries*, 78 (2), 79-90. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.386463.1446>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2025.386463.1446>



دانشگاه تهران

شیلات، مجله منابع طبیعی ایران

سایت نشریه: <https://jfisheries.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۷۸۰۹-۲۴۲۳

مقایسه تنوع ریختی جمعیت‌های مرواریدماهی (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه آبریز سیستان

سرور غلامی^{۱*} | یزدان کیوانی^۲ | اصغر جعفری پتکان^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: s_gholami@na.iut.ac.ir

۲. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: keivany@iut.ac.ir

۳. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: asghar.jafari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ کلیدواژه: تحلیل متغیرهای کانونی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ریخت‌سنجی هندسی، فاصله پروکراست، مرواریدماهی قفقاز.	این پژوهش با هدف مقایسه ویژگی‌های ریخت‌شناسی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (<i>Alburnus hohenackeri</i>) در حوضه آبریز سیستان با استفاده از روش ریخت‌سنجی هندسی انجام شد. ۱۷۰ نمونه از رودخانه‌های ملکی، حمزه‌آباد، چاه‌نیمه ۱، چاه‌نیمه ۲ و پاشنه جمع‌آوری شدند. تصاویر از سمت چپ سطح جانبی نمونه‌ها تهیه و ۱۳ لندمارک با نرم‌افزار tpsDig2 رقمی‌سازی شدند. داده‌ها با استفاده از آنالیز پروکراست و روش‌های آماری چندمتغیره از جمله PCA، CVA و آنالیز خوشه‌ای تحلیل گردیدند. نتایج PCA همپوشانی بالایی بین جمعیت‌ها نشان داد، اما نتایج CVA نشان داد که جمعیت چاه‌نیمه ۱ هیچ همپوشانی با جمعیت‌های ملکی و پاشنه ندارد. همچنین، آنالیز خوشه‌ای نشان داد که جمعیت پاشنه در یک گروه جداگانه قرار می‌گیرد و بیشترین تمایز را با سایر جمعیت‌ها نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر این است که تحلیل PCA ممکن است نتواند تمایزات دقیق‌تری که در روش‌های دیگر مشاهده شده‌اند را به تصویر بکشد، اما نتایج دو روش دیگر نشان‌دهنده تفاوت‌های ریختی مهم میان جمعیت‌های مختلف است که به‌ویژه در ناحیه پاشنه مشهود است که احتمالاً به‌دلیل انزوای جغرافیایی و تفاوت در شرایط زیستگاه‌های مختلف باشد که تأثیر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی جمعیت‌ها دارد.

ا ستاد: غلامی، سرور، کیوانی، یزدان، جعفری پتکان؛ اصغر (۱۴۰۴). مقایسه تنوع ریختی جمعیت‌های مرواریدماهی (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه آبریز سیستان.

نشریه شیلات، مجله منابع طبیعی ایران، ۷۸ (۲)، ۷۹-۹۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2022.335686.1301>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfisheries.2022.335686.1301>



۱. مقدمه

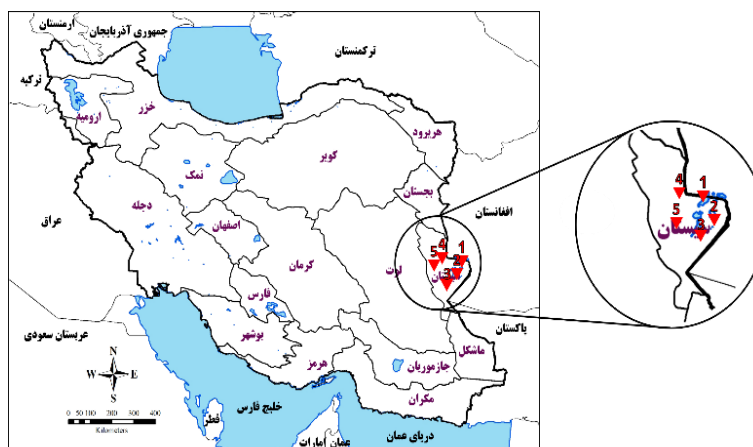
ایران در منطقه زیست‌جغرافیایی جنوبی دیرین‌شمالگان (پالئارکتیک) قرار دارد و با مناطق شرقی (اورینتال) هم‌مرز است و به‌عنوان یک منطقه مبادله برای ماهیان آب شیرین در نظر گرفته می‌شود. در آب‌های داخلی ایران ۳۰۰ گونه ماهی از ۱۱۰ جنس و ۳۸ خانواده گزارش شده است (Sayyadzadeh and Esmaeili, 2024). یکی از گونه‌های مهم در این مجموعه، مرواریدماهی قفقاز یا ایرانی (*Alburnus hohenackeri*) است که متعلق به خانواده Leuciscidae بوده و به‌فراوانی در لابه‌لای گیاهان آبی در قسمت‌های پایینی رودخانه‌ها و دریاچه‌های آب شیرین مشاهده می‌شود. این ماهی قادر به تحمل آب لب‌شور است و بیش‌ترین فراوانی آن در ناحیه مصب رودخانه‌ها مشاهده می‌شود (Naderi and Abdoli, 2004). علاوه بر زیستگاه طبیعی آن در دریای خزر، این گونه به‌طور ناخواسته به سایر حوضه‌های آبی از جمله دریاچه زریبار، مراوین، هامون و سیستان نیز منتقل شده است (Naderi and Abdoli, 2004). همچنین حضور این گونه در رودخانه سیروان (حوضه دجله) گزارش شده است (Mouludi-Saleh et al., 2022a). مطالعه شکل بدن یکی از روش‌های رایج در بررسی جنبه‌های مختلف زیست‌شناسی ماهیان از جمله مدیریت منابع، تکامل، آرایه‌شناسی، رفتار و بوم‌شناسی و درک تنوع موجودات است (Slice, 1996; Mouludi-Saleh et al., 2022b). این خصوصیات اطلاعاتی را درباره پراکنش گونه‌ها، وضعیت اکولوژیک و الگوهای تغذیه‌ای آنها فراهم می‌کنند (Su et al., 2019). تفاوت‌های ریخت‌شناسی بین جمعیت‌های ماهی می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر انتخاب طبیعی و عوامل محیطی باشد (Gammanpila et al., 2017). ویژگی‌های ریخت‌شناسی ماهیان به‌طور گسترده‌ای تحت تأثیر تغییرات محیطی قرار دارند و اغلب تفاوت‌های مشاهده‌شده در ریخت‌شناسی جمعیت‌ها ناشی از آن هستند، به‌طوری که در برخی موارد تأثیر ژنتیکی چندانی در این تغییرات مشاهده نمی‌شود (Acar and Kaymak, 2023). در همین موضوع، مطالعاتی روی ماهی‌های جنس *Alburnus* در حوضه‌های آبریز مختلف انجام شده است. به‌عنوان مثال در مطالعه‌ای، Jalili و همکاران (۲۰۱۵)، شکل بدنی دو جمعیت ماهی *Alburnus filippii* از رودخانه‌های ارس و اهرچای با روش ریخت‌سنجی هندسی مورد بررسی قرار دادند. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، Keyvani و Gholami (۲۰۲۴) به مقایسه ویژگی‌های ریختی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه آبریز خزر با روش ریخت‌سنجی هندسی پرداختند.

در این میان، روش مورفومتریک هندسی به‌عنوان رویکردی کمی برای تجزیه و تحلیل شکل، به‌طور گسترده برای مقایسه و تعیین تغییرات شکل ساختارهای زیستی استفاده می‌شود (Geiger et al., 2016). این روش داده‌های لندمارک را به‌عنوان پایه‌ای برای استخراج و تحلیل داده‌های شکلی به‌کار می‌گیرد و اطلاعات حاصل از شکل بدن را به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد (Luo, 2024). برخلاف روش‌های سنتی که عمدتاً به‌طول و عرض اندام‌ها محدود بودند، مورفومتریک هندسی با استفاده از لندمارک‌ها امکان مقایسه دقیق و تجسم شکل‌های زیستی را فراهم می‌آورد (Martin et al., 2023).

زیستگاه‌ها و رودخانه‌های مختلف تأثیر مهمی بر گونه‌های ماهی دارند، بنابراین بررسی‌های ریخت‌شناسی مرواریدماهی قفقاز در زیستگاه‌های گوناگون جهت برآورد تفکیک جمعیت می‌تواند اهمیت بالایی داشته باشد. هدف این مطالعه بررسی و مقایسه ریخت‌شناسی مرواریدماهی قفقاز (*Alburnus hohenackeri*) در زیستگاه‌های مختلف حوضه آبریز سیستان بود. این پژوهش به‌طور خاص بر شناسایی تفاوت‌های ریخت‌شناختی میان جمعیت‌های مختلف این گونه تمرکز کرد تا تأثیر عوامل محیطی و انسانی بر تنوع زیستی این منطقه بررسی شود. نتایج این مطالعه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای درک بهتر از پراکنش، وضعیت حفاظتی و مدیریت منابع این گونه ارائه دهد و در راستای حفاظت از تنوع زیستی حوضه سیستان کاربرد داشته باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، ۱۷۰ نمونه مرواریدماهی قفقاز از پنج جمعیت مختلف در پنج رودخانه استان سیستان و بلوچستان (شکل ۱، جدول ۱) که طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۹ با استفاده از تور پره و دستگاه الکتروشوک از حوضه سیستان صید شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. پس از صید، نمونه‌ها در فرمالین ۱۰ درصد بافری تثبیت و برای مطالعه بیشتر به آزمایشگاه ماهی‌شناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل و در الکل ۷۰ درصد نگهداری شدند.

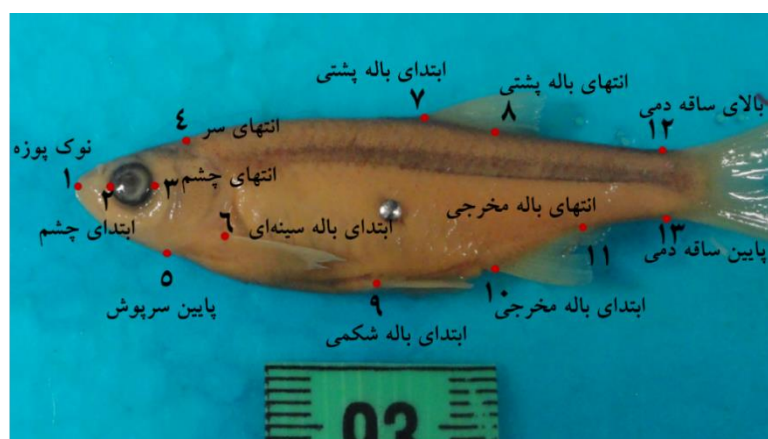


شکل ۱- نقشه جغرافیایی ایران و موقعیت مناطق نمونه برداری مروارید ماهی قفقاز مورد مطالعه (Keivany et al., 2016)

برای استخراج داده‌های ریخت سنجی، از روش ریخت سنجی هندسی بهره گرفته شد. ابتدا از نمونه‌ها با استفاده از دوربین دیجیتال کانن SX700 HS عکس برداری شده و سپس لندمارک‌های تعیین شده با استفاده از نرم افزار TpsDig2 (نسخه ۲٫۱۰) روی تصاویر قرار داده شدند. داده‌های ریخت سنجی نمونه‌های مورد مطالعه از طریق نرم افزارهای Tps series (نسخه ۲) استخراج شدند. به منظور حذف تغییرات غیرشکلی، آنالیز پروکراسست روی نمونه‌ها انجام شد و سپس داده‌ها با استفاده از تحلیل‌های چندمتغیره و آنالیز واریانس چندمتغیره در نرم افزار PAST (نسخه ۲٫۱۷) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تغییرات میانگین شکل بدن جمعیت‌ها نسبت به میانگین کلی بررسی شد. داده‌های ریخت سنجی هندسی با آزمون‌های آماری تجزیه مؤلفه اصلی و تحلیل متغیرهای کانونی تحلیل شدند. در شکل ۲ یک نمونه ماهی با تعیین موقعیت لندمارک‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات رودخانه‌های نمونه برداری شده جهت صید مروارید ماهی قفقاز.

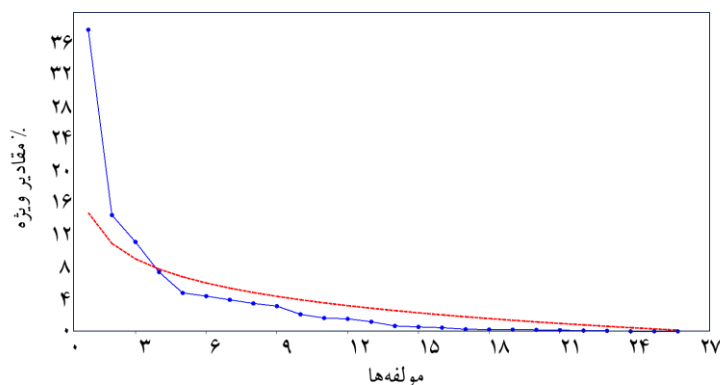
حوضه و تعداد کل نمونه‌ها	رودخانه	تعداد نمونه	مختصات جغرافیایی
۱	ملکی	۱۲	$61^{\circ}42'25/62''E, 31^{\circ}51'18/77''N$
۲	چاه نیمه ۱	۲۴	$61^{\circ}40'27/42''E, 30^{\circ}50'19/5''N$
۳	پاشنه	۲۴	$61^{\circ}34'23/4''E, 31^{\circ}33'37/8''N$
۴	چاه نیمه ۲	۳۲	$61^{\circ}40'27/12''E, 30^{\circ}50'19/5''N$
۵	حمزه آباد	۹۰	$61^{\circ}27'1/5''E, 30^{\circ}51'19/56''N$



شکل ۲- موقعیت لندمارک‌ها یا نقاط شاخص روی سمت چپ یک نمونه مروارید ماهی قفقاز مورد مطالعه

۳. یافته‌های پژوهش

براساس نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سه مؤلفه اول که بالاتر از خط برش جولیف قرار گرفتند، به عنوان عوامل اصلی تفکیک‌کننده جمعیت‌ها انتخاب شدند (شکل ۳). این سه مؤلفه در مجموع ۶۳/۳۷ درصد از واریانس را توضیح می‌دهند (جدول ۲). نحوه توزیع جمعیت‌های مورد بررسی و همچنین تغییرات شکل بدنی آنها در راستای دو محور PC1 و PC2 در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمودار سنگریزه‌ای تحلیل مؤلفه‌های اصلی و نمایش خط برش جولیف (خط قرمز) که نشان‌دهنده مرز مؤلفه‌های اصلی معنادار، در جمعیت‌های حوضه سیستان برای آزمون ریخت‌سنجی هندسی است.

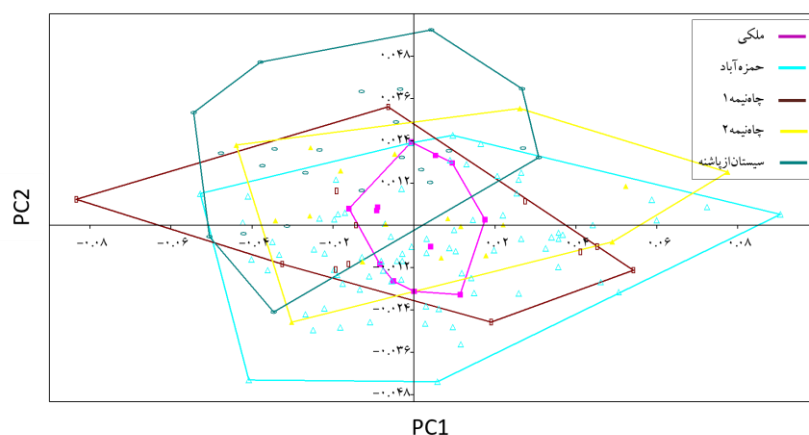
جدول ۲- مقادیر واریانس و مقادیر ویژه سه مؤلفه اصلی اول تحلیل شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) در حوضه سیستان

مؤلفه‌ها	مقادیر ویژه	واریانس
۱	۰/۰۰۰۸۳۲	۳۷/۶۸
۲	۰/۰۰۰۳۲۱	۱۴/۵۲
۳	۰/۰۰۰۲۴۶	۱۱/۱۷
جمع		۶۳/۳۷

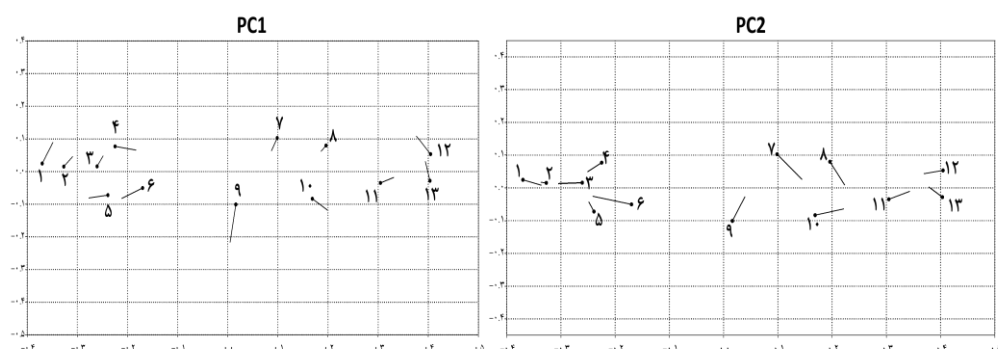
براساس تحلیل PCA، گروه‌بندی جمعیت‌ها به خوبی صورت گرفته است و تمام جمعیت‌ها همپوشانی زیادی با یکدیگر دارند. در بررسی تغییرات الگوی شکل بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه، مطابق شکل ۵، مشاهده می‌شود که با حرکت در جهت مثبت محور PC1، تغییرات زیر در شکل بدن جمعیت‌ها رخ می‌دهد: موقعیت دهان بالا می‌رود (لندمارک ۱)، انتهای سر تغییر می‌کند (لندمارک ۴)، موقعیت پایین سرپوش آبششی جابه‌جا می‌شود (لندمارک ۵)، موقعیت باله سینه‌ای تغییر می‌کند (لندمارک ۶)، باله پشتی جابه‌جا می‌شود (لندمارک‌های ۷ و ۸)، موقعیت باله شکمی تغییر می‌کند (لندمارک ۹)، باله مخرجی جابه‌جا می‌شود (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، ارتفاع بدن افزایش می‌یابد (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و ساقه دم به طور جزئی بلندتر می‌شود (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳). همچنین، با حرکت در جهت مثبت محور PC2، تغییرات زیر در شکل بدن جمعیت‌ها مشاهده می‌شود: موقعیت دهان به سمت خلفی بدن تمایل پیدا می‌کند (لندمارک ۱)، موقعیت انتهای چشم تغییر می‌کند (لندمارک ۳)، انتهای سر جابه‌جا می‌شود (لندمارک ۴)، موقعیت باله سینه‌ای تغییر می‌کند (لندمارک ۶)، موقعیت باله پشتی جابه‌جا می‌شود (لندمارک‌های ۷ و ۸)، موقعیت باله شکمی تغییر می‌کند (لندمارک ۹)، باله مخرجی جابه‌جا می‌شود (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، ارتفاع بدن کاهش می‌یابد (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و ساقه دم کوتاه می‌شود.

تحلیل همبستگی کانونی نشان داد که جمعیت‌های رودخانه‌های حمزه‌آباد، ملکی، چاه‌نیمه ۲ و پاشنه همپوشانی خوبی با یکدیگر دارند و تفاوت معنی‌داری بین آنها مشاهده نمی‌شود. اما جمعیت چاه‌نیمه ۱ هیچ همپوشانی با پاشنه و ملکی ندارد و تفاوت معنی‌داری بین این جمعیت‌ها وجود دارد (شکل ۶). همچنین، تغییرات شکل بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است.

براساس نتایج، با حرکت در جهت مثبت محور CV1، تغییرات زیر مشاهده می‌شود: موقعیت باله پشتی جابه‌جا می‌شود (لندمارک‌های ۷ و ۸)، موقعیت باله شکمی به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند (لندمارک ۹)، ارتفاع بدن کاهش می‌یابد (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و طول ساقه دمی کم می‌شود (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳). با حرکت در جهت مثبت محور CV2 نیز تغییراتی در انتهای سر (لندمارک ۴) و موقعیت باله شکمی (لندمارک ۹) مشاهده می‌شود.

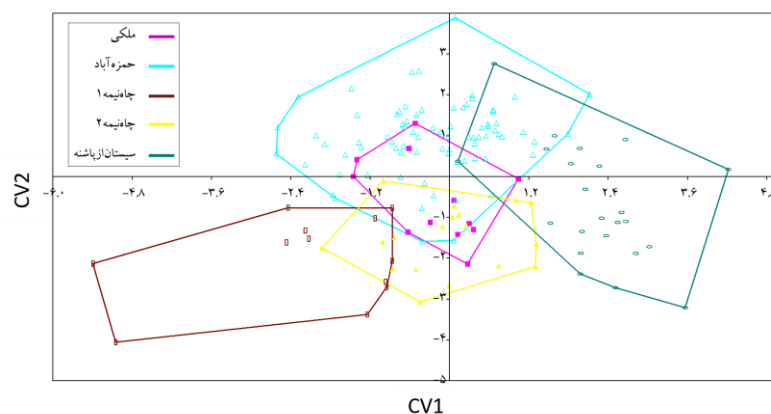


شکل ۴- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) شکل بدنی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) در حوضه سیستان

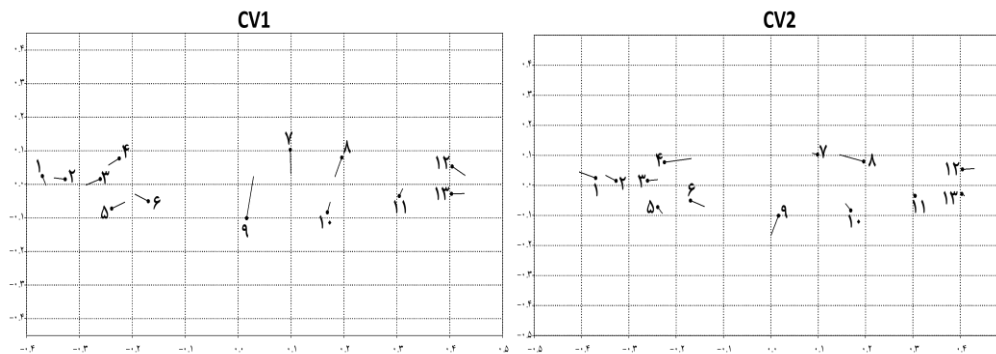


شکل ۵- تغییرات شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*)

در حوضه سیستان در جهت هر یک از محورهای PC1 و PC2



شکل ۶- نمودار تحلیل همبستگی کانونی (CVA) شکل بدنی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) حوضه سیستان



شکل ۷- تغییرات شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) در حوضه سیستان در جهت هر یک از محوره‌های CV1 و CV2.

فاصله‌های ماهالانویس و پروکراست به عنوان معیاری برای تمایز جمعیت‌های مورد مطالعه براساس ویژگی‌های شکل بدن در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. براساس مقادیر محاسبه شده، بیشترین فاصله ماهالانویس میان جمعیت‌های چاه نیمه ۱ و پاشنه و بیشترین فاصله پروکراست بین جمعیت‌های حمزه آباد و ملکی مشاهده می‌شود.

جدول ۳- فواصل ماهالانویس شکل بدن حاصل از آزمون CVA در جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) حوضه سیستان

چاه نیمه ۲	چاه نیمه ۱	حمزه آباد	ملکی	
			۹/۳۹۲	حمزه آباد
		۱۳/۹۱۴	خطا	چاه نیمه ۱
	۱۱/۵۰۴	۸/۱۲۰	۷/۸۱۴	چاه نیمه ۲
۹/۶۶۴	۲۱/۵۲۷	۹/۱۰۹	۱۵/۰۲۵	پاشنه

جدول ۴- فواصل پروکراست شکل بدن حاصل از آزمون CVA در جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) حوضه سیستان

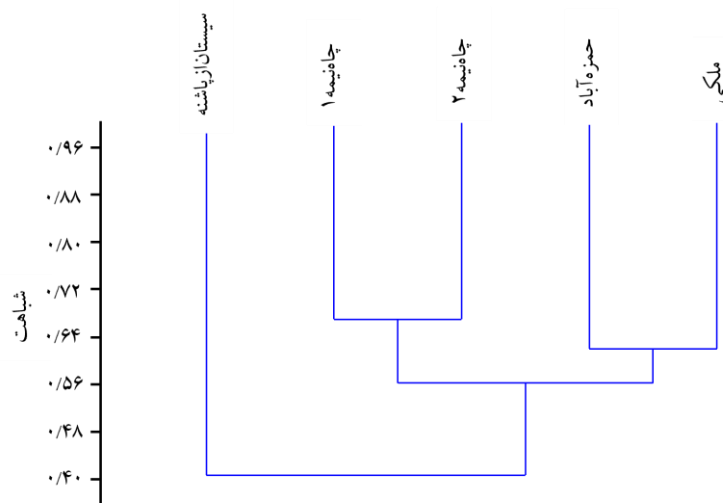
چاه نیمه ۲	چاه نیمه ۱	حمزه آباد	ملکی	
			۶/۴۷۶	حمزه آباد
		۱/۶۲۰	خطا	چاه نیمه ۱
	۰/۵۸۰	۱/۹۱۰	۰/۸۰۱	چاه نیمه ۲
۰/۰۶۳	۰/۰۳۴	۳/۲۰۳	۰/۱۱۴	پاشنه

تحلیل خوشه‌ای جمعیت‌های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. ضریب کوپرنیک برای این تحلیل برابر با ۰/۹۰۹۳ محاسبه گردید. براساس نتایج تحلیل خوشه‌ای (که براساس میانگین هر جمعیت می‌باشد)، جمعیت پاشنه در یک شاخه جداگانه قرار گرفته و بیشترین تمایز را نسبت به سایر جمعیت‌ها نشان می‌دهد. طبق نتایج، سه گروه اصلی مشاهده می‌شود: گروه اول شامل پاشنه و گروه دیگر شامل بقیه جمعیت‌ها. در ضمن باید اشاره کرد که جفت جمعیت‌های ملکی و حمزه آباد، و جفت جمعیت‌های چاه نیمه ۲ و چاه نیمه ۱ جمعیت‌های خواهری هستند که کمترین فاصله را با یکدیگر دارند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری نهایی

جمعیت ماهیان ساکن در زیستگاه‌های مختلف به دلیل تأثیر شرایط و عوامل محیطی می‌توانند اشکال متمایزی از خود نشان دهند. در میان مهره‌داران، ماهی‌ها متنوع‌ترین و فراوان‌ترین گروه‌های جانوری را به خود اختصاص داده‌اند (Mouludi-Saleh and Keivany, 2018) و درجه بالاتری از تنوع ریختی درون گونه‌ای و بین گونه‌ای را نشان می‌دهند و همچنین حساسیت بیشتری به تغییرات محیطی نشان می‌دهند (Shuai et al. 2018). در حالی که در گذشته اعتقاد بر این بود که تغییرات شکل عمدتاً ناشی از

عوامل ژنتیکی است، دانش امروز، نقش مهم تأثیرات محیطی در شکل‌دهی ریختی ماهیان را تصدیق می‌کند. به نظر می‌رسد تغییرات محیطی موجب بیان ژن‌های خاص شده و این ژن‌ها در نهایت منجر به تغییر ریختی در حد جزیی تا زیاد می‌گردند. مطالعات متعددی که رابطه بین شکل بدن و عوامل محیطی را بررسی می‌کنند، سازگاری با شرایط متفاوت را نشان داده‌اند که منجر به تغییرات در شکل بدن می‌شود. ماهی‌ها انعطاف‌پذیری قابل توجهی را در شکل بدن خود نشان می‌دهند که اغلب در پاسخ به تغییرات محیطی، رفتاری و فیزیولوژیکی ظاهر می‌شود (Mouludi-Saleh and Keivany, 2019).



شکل ۸- تحلیل خوشه‌ای شکل بدن در جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*A. hohenackeri*) حوضه سیستان.

به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد نتایج تحلیل‌های انجام شده روی جمعیت‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تنوع و تمایز قابل توجهی در ویژگی‌های شکلی بدن است. براساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، اگرچه گروه‌بندی جمعیت‌ها به‌خوبی انجام شده، اما همپوشانی قابل توجهی بین جمعیت‌های مختلف مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات محیطی مشترک یا ویژگی‌های ژنتیکی مشترک بین جمعیت‌ها باشد. خصوصاً در مدت زمان کوتاهی که این گونه از حوضه دریای خزر به حوضه سیستان وارد شده است (کمتر از ۳۰ سال). به‌ویژه، تغییرات قابل توجه در موقعیت‌های لندمارک‌های مختلف روی محور PC1 و PC2 به‌خوبی نشان‌دهنده الگوهای تغییر شکل بدنی است که به احتمال زیاد تحت تأثیر عوامل زیست‌محیطی و اکولوژیک قرار دارند.

در تحلیل همبستگی کانونی، جمعیت‌های رودخانه‌های حمزه‌آباد، ملکی، چاه‌نیمه ۲ و پاشنه همپوشانی مناسبی با یکدیگر داشتند و نشان‌دهنده شباهت‌های قابل توجهی در ویژگی‌های بدنی آنهاست. این در حالی است که جمعیت چاه‌نیمه ۱ به‌وضوح از سایر جمعیت‌ها متمایز شده و تفاوت معنی‌داری در ویژگی‌های ریختی آن وجود دارد. این یافته‌ها می‌تواند به درک ما از اثرات محیطی خاص بر روی تنوع شکل بدنی در این جمعیت‌ها کمک کند.

فاصله‌های محاسبه‌شده با استفاده از معیارهای مایه‌الانوبیس و پروکراست، تفاوت‌های بیشتری را بین جمعیت‌ها نشان می‌دهند. به‌ویژه، فاصله زیاد بین جمعیت‌های چاه‌نیمه ۱ و پاشنه، به‌همراه فاصله پروکراست بالا بین جمعیت‌های حمزه‌آباد و ملکی، می‌تواند به تمایز ژنتیکی یا اکولوژیک این جمعیت‌ها اشاره کند. این تحلیل‌ها به ما این امکان را می‌دهند که بیشتر به‌سمت شناسایی عوامل مؤثر بر تنوع شکل بدنی در این جمعیت‌ها پیش برویم.

نتایج تحلیل خوشه‌ای نیز نشان‌دهنده تمایز واضح جمعیت پاشنه نسبت به دیگر جمعیت‌هاست. ضریب کوپرنیک به‌دست آمده (۰/۹۰۹۳) نشان‌دهنده کیفیت بالای گروه‌بندی جمعیت‌ها است. این تمایز می‌تواند به ویژگی‌های رژیم غذایی مرتبط باشد، شکل بدن می‌تواند در موفقیت تغذیه و اجتناب از شکارچی مؤثر باشد (Langerhans et al. 2003) از این رو تفاوت در شکل بدن احتمالاً

مربوط به رفتار و نوع تغذیه است.

جمعیت‌های رودخانه ملکی، حمزه‌آباد، چاه‌نیمه ۱، چاه‌نیمه ۲ که به دلیل شباهت‌های شکل بدنی در یک گروه قرار گرفتند که می‌تواند بیانگر رابطه فاصله جغرافیایی و شکل بدن یا به عبارت دیگر، رابطه ژنتیکی نزدیک‌تر آنها باشد.

با این حال، تفاوت‌های مشاهده‌شده بین نتایج PCA و CVA ممکن است به دلیل رویکردهای متفاوت این دو تحلیل باشد. PCA عمدتاً به عنوان یک ابزار کاهش ابعاد عمل می‌کند و به دنبال شناسایی الگوهای عمومی در داده‌ها است، در حالی که CVA به طور خاص به تفکیک بین گروه‌ها تمرکز دارد و تلاش می‌کند بهترین تفکیک ممکن را بین جمعیت‌های مختلف ایجاد کند. این تفاوت در هدف و رویکرد می‌تواند منجر به نتایج متفاوتی شود که در آن PCA بیشتر به شناسایی تنوع عمومی و CVA به تمایز مشخص بین جمعیت‌ها کمک می‌کند. در نتیجه، هر دو تحلیل می‌توانند به عنوان ابزارهای مکمل برای درک بهتر تنوع و تمایز در جمعیت‌های مورد مطالعه استفاده شوند.

قبلاً مطالعات ریخت‌شناسی کمی روی ماهیان حوضه سیستان انجام شده است برای مثال Ganjali (۲۰۲۳) بررسی تنوع ریختی در جمعیت‌های نر و ماده ماهی *Schizocypris altidorsalis* در حوضه سیستان با استفاده از روش‌های ریخت‌سنجی هندسی و سستی انجام داد. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچند در برخی ویژگی‌ها نظیر طول باله سینه‌ای و عمق بدن، تفاوت‌های معنی‌داری بین دو جنس وجود دارد، در اکثر ویژگی‌های دیگر همپوشانی قابل توجهی مشاهده می‌شود. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که روش‌های ریخت‌سنجی هندسی می‌توانند تفاوت‌های ریختی را به صورت دقیق‌تری شناسایی کنند و در شناسایی جزئیات خاصی از نواحی بدن، مانند سر و دم، کارایی بیشتری دارند. این یافته‌ها می‌تواند به تبیین تنوع ریختی در جمعیت‌های مختلف گونه‌های مشابه و بهبود روش‌های تحلیل ریختی در تحقیقات آینده کمک کند.

به صورت خاص، مطالعات دیگر روی ریخت‌شناسی مروارید ماهی در حوضه‌های دیگر ایران انجام شده است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای Gholami و Keivany (۲۰۲۴) به مقایسه ویژگی‌های ریختی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقاز (*Alburnus hoheneri*) در حوضه خزر با روش ریخت‌سنجی هندسی پرداختند. در این مطالعه از ۴۸۷ ماهی در ۱۲ رودخانه نمونه‌برداری شد و با استفاده از ۱۳ نقطه مرجع یا شاخص (لندمارک)، تغییرات شکلی بررسی شد. تحلیل‌های آماری نشان داد که جمعیت رودخانه ارس تفاوت‌های معنی‌داری در شکل بدن، سر، موقعیت دهان و باله‌ها با دیگر جمعیت‌ها دارد. در این مطالعه، علت اصلی تغییرات در شکل بدن در جمعیت‌های رودخانه‌های حوضه خزر را سازگاری با محیط جدید دانسته و بین نمودند که ویژگی‌های خاص ریختی می‌تواند پاسخی به عوامل محیطی باشد.

مطالعات ریخت‌سنجی هندسی جهت تفاوت‌های مورفولوژیک در جمعیت‌های مختلف ماهی قزل‌آلا (Shabaninejad et al., 2023; Salehi et al., 2021) انجام شد و نتایج مطالعات صورت گرفته، تفاوت‌های معنی‌دار در ویژگی‌های بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه را نشان داد و بیان شد که این تفاوت‌ها می‌تواند تحت تأثیر عوامل محیطی یا ژنتیکی قرار گیرد. مطالعات مشابه روی گونه‌های مختلف ماهی مانند *Planiliza abu* و *Salmo trutta* نشان داده‌اند که تنوع مورفولوژیک بین جمعیت‌ها اغلب به تفاوت‌های زیست‌محیطی، شرایط جغرافیایی، یا حتی عوامل ژنتیکی وابسته است (Salavatian et al., 2018). این یافته‌ها به خوبی با نتایج تحلیل CVA مطالعه حاضر همخوانی دارد و تفاوت‌های قابل توجهی بین جمعیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در هر سه تحقیق، تفاوت‌های مشاهده‌شده در ویژگی‌های خاص بدنی، مانند طول سر، ارتفاع بدن، و موقعیت پوزه، منعکس‌کننده تنوع شکلی است که در ارتباط با عوامل محلی مانند شرایط آب و هوایی، کیفیت زیستگاه، یا فشارهای انتخاب طبیعی ایجاد شده‌اند. این یافته‌ها همچنین تأکید می‌کنند که تنوع ریخت‌شناختی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت حفاظتی و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی ایفا کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل‌های مورفومتری در جمعیت‌های مختلف ماهیان ابزار مؤثری برای شناسایی تفاوت‌های بین جمعیت‌ها بوده و می‌تواند به درک بهتر اثرات زیست‌محیطی و ژنتیکی بر ویژگی‌های مورفولوژیک کمک کنند، همان‌طور که در مطالعه ما نیز این تفاوت‌ها به خوبی نشان داده شده است.

در مطالعه‌ای (Jalili et al., 2015)، شکل بدنی دو جمعیت ماهی *Alburnus filippii* از رودخانه‌های ارس و اهرچای با روش ریخت‌سنجی هندسی مقایسه شد که تفاوت معنی‌داری در عمق بدن و نوک پوزه این گونه گزارش شد. جمعیت رودخانه ارس تنوع

مورفولوژیک بیشتری نسبت به اهرچای داشت که به زیستگاه‌های متنوع‌تر مرتبط است. این نتایج مشابه این مطالعه است که نشان می‌دهد تفاوت‌های زیستگاهی و ژنتیکی می‌تواند بر تنوع مورفولوژیک جمعیت‌ها تأثیر بگذارد.

در مطالعه‌ای که در منطقه جنوبی حوضه دریای خزر انجام شد، محققان دریافتند که ویژگی‌های خاصی مانند اندازه سر، عمق بدن، وضعیت باله پشتی و طول باله دمی نقش مهمی در تمایز بین جمعیت‌های مختلف ماهی دارند (Mouludi-Saleh and Keivany 2019). این تغییرات در صفات تحت تأثیر شرایط محیطی مشاهده شد. این مطالعه نشان داد که این ویژگی‌های مورفولوژیکی خاص در پاسخ به عوامل محیطی خاص موجود در جمعیت‌های مربوطه دچار تغییراتی شدند.

مطالعه‌ای با استفاده از روش‌های ریخت‌سنجی هندسی روی جمعیت‌های کفال پوزه‌باریک در بخش جنوبی حوضه دریای خزر انجام شد (Abassi et al. 2023). یافته‌های این مطالعه، تغییرات مورفولوژیکی قابل توجهی را در بین جمعیت‌های مورد مطالعه نشان داد که تحت تأثیر زیستگاه‌های خاص‌اند و بارزترین تفاوت‌ها در عمق بدن، موقعیت دهان، اندازه سر و طول ساقه دمی گزارش شد. قابل ذکر است که جمعیت ساری و لنگرود بیشترین اندازه عمق بدن را به نمایش گذاشتند. این تغییرات مورفولوژیکی را می‌توان به سازگاری درون‌گونه‌ای در پاسخ به شرایط محیطی و زیستگاه نسبت داد. تغییرات مشاهده شده که به حفظ تعادل در برابر نیروهای هیدرودینامیکی کمک می‌کند، پدیده‌ای رایج است که در زیستگاه‌های آبی گزارش شده است (Ghanbarifardi et al. 2014).

در حقیقت، تغییرات در فرم سر می‌تواند به‌طور غیرمستقیم نشان‌دهنده سازگاری‌های مرتبط با رفتار جستجوی غذا باشد. تغییرات در شکل سر می‌تواند بر کارایی جستجو و تأمین غذا تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، وجود دهانی با موقعیت پایین در جمعیت‌های پاشنه، ممکن است به این معنا باشد که این ماهی‌ها از قسمت‌های عمیق‌تر ستون آب تغذیه می‌کنند (Hawkins and Quinn 1996). همچنین، ارتفاع کمتر بدن مشاهده شده در جمعیت پاشنه ممکن است نشان‌دهنده سازگاری با جریان‌های آب باشد که با ساختار بدنی کشیده‌تر و روان‌تر، تسهیل می‌شود. این تغییرات به ماهی‌ها اجازه می‌دهد تا به‌طور مؤثرتری در زیستگاه‌های خاص خود حرکت کرده و بازده جستجوی خود را در پاسخ به شرایط محیطی و نیروهای هیدرودینامیکی بهینه‌سازی کنند (Chapman et al. 2008).

تحقیقات نشان داده‌اند که در ماهی‌های با سرعت شنا بالا، موقعیت باله پشتی معمولاً به سمت خلفی قرار دارد. این ویژگی به کاهش اصطکاک و بهبود کارایی شنا کمک می‌کند. در مورد جمعیت پاشنه، وجود باله پشتی خلفی می‌تواند به‌عنوان یک مکانیزم برای جلوگیری از تأثیرات منفی جریان‌های قوی آب در رودخانه عمل کند. همچنین، اندازه کوچک‌تر و فرم بدن کشیده‌تر که در ماهی‌هایی که در رودخانه‌های با جریان‌های بالا زندگی می‌کنند مشاهده می‌شود، سازگاری‌هایی است که توانایی آنها را برای حرکت در برابر جریان آب افزایش می‌دهد (Douglas and Matthews, 1992). این سازگاری‌ها به کاهش کشش کمک کرده و به ماهی اجازه می‌دهد تا در شرایط هیدرودینامیکی چالش‌برانگیز، پایداری خود را حفظ کند. وجود باله بلندتر سینه‌ای در جمعیت پاشنه نیز ممکن است به بهبود قدرت مانور کمک کند و به ماهی این امکان را بدهد که بهتر با جریان‌های جهت‌دار آب سازگار شود. در مجموع، این صفات ریختی مختلف توانایی ماهی را برای رشد و بقای بهتر در محیط آبی خاص خود افزایش می‌دهد (Langerhans et al. 2003).

نتیجه‌گیری نهایی

در نهایت، نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان‌دهنده پیچیدگی تنوع شکل بدنی در جمعیت‌های مورد مطالعه و تأثیرات متقابل بین عوامل زیست‌محیطی و ژنتیکی روی این ویژگی‌ها هستند. لازم است در تحقیقات آینده، به بررسی عوامل مؤثر بر این تنوع توجه بیشتری شود تا بتوان درک بهتری از سازوکارهای شکل‌گیری تنوع در این جمعیت‌ها به‌دست آورد.

References

- Abbasi, K., Eagderi, S., Bageri, S., Rahimi, J., Hasani Azhdari, S.M., Pourgholami-Moghaddam, A., 2023. Morphological variation in Leaping mullet populations, *Chelon saliens* (Risso, 1810) in the southern part of the Caspian Sea basin using geometric morphometric method. *Journal of Fisheries* 76(1), 1-10. DOI: 10.22059/jfisheries.2023.91487 (In Persian)

- Acar, E., Kaymak, N., 2023. Morphological and functional trait divergence in endemic fish populations along the small-scale karstic stream. *BMC Zoology* 8(1), 29. DOI: 10.1186/s40850-023-00191-8
- Chapman, L., Albert, J., Galis, F., 2008. Developmental plasticity, genetic differentiation, and hypoxia-induced trade-offs in an African cichlid fish. *The Open Evolution Journal* 2(1). DOI: 10.2174/1874404400802010075
- Douglas, M. E., Matthews, W. J., 1992. Does morphology predict ecology? Hypothesis testing within a freshwater stream fish assemblage. *Oikos* (65)2, 213-224.
- Gammanpila, M., Amarasinghe, U., Wijeyaratne, M., 2017. Morphological correlates with diet of fish assemblages in brush park fisheries of tropical estuaries. *Environmental Biology of Fishes* 100(10), 1285-1299. DOI: 10.1007/s10641-017-0642-x
- Ganjali, Z., 2023. Comparative Survey of Geometric Morphometrics and Traditional Methods in Male and Female of Anjak, *Schizocypris altidorsalis* (Bianco and Banareescu, 1982) from Sistan Basin, Iran. *Current Applied Sciences* 21-28. DOI: 10.22034/cas.2023.410928.1032
- Geiger, M. F., Schreiner, C., Delmastro, G. B., & Herder, F. 2016. Combining geometric morphometrics with molecular genetics to investigate a putative hybrid complex: a case study with barbels *Barbus* spp. (Teleostei: Cyprinidae). *Journal of Fish Biology*, 88(3), 1038-1055. DOI: 10.1111/jfb.12871
- Ghanbarifardi, M., Aliabadian, M., Esmaeili, H. R., Polgar, G., 2014. Morphological divergence in the Walton's mudskipper, *Periophthalmus waltoni* Koumans, 1941, from the Persian Gulf and Gulf of Oman (Gobioidae: Gobiidae). *Zoology in the Middle East* 60(2), 133-143. DOI: 10.1080/09397140.2014.914717
- Gholami, S., Keyvani, Y., 2024. Geometric morphometric comparison of northern Caucasian bleak populations (*Alburnus hohenackeri*) in the Caspian Basin. *Taxonomy and Biosystematics*, 16(59), 41-56. DOI: 10.22108/tbj.2024.141024.1260
- Hawkins, D. K., Quinn, T.P., 1996. Critical swimming velocity and associated morphology of juvenile coastal cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki clarki*), steelhead trout (*O. mykiss*) and their hybrids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(9), 1487-1496. DOI: 10.1139/f96-085
- Jalili, P., Eagderi, S., Keivany, Y., 2015. Body shape comparison of Kura bleak (*Alburnus filippii*) in Aras and Ahar-Chai rivers using geometric morphometric approach. *Research in Zoology* 5(1), 20-24. DOI: 10.5923/j.zoology.20150501.03
- Keivany, Y., Nasri, M., Abbasi, K., Abdoli, A. 2016. Atlas of Inland Water Fishes of Iran. Iran Department of Environment Press. 218 p. (In Persian)
- Luo, D., 2024. Quantitative Analysis of Fish Morphology through Landmark and Outline-based Geometric Morphometrics with Free Software. *Bio-protocol* 14(20). DOI: 10.21769/BioProtoc.5087
- Martin, B.E., O'Malley, B., Eshenroder, R.L., Kao, Y.C., Olds, C.M., O'Brien, T.P., Davis, C.L., 2023. Comparison of traditional and geometric morphometrics using Lake Huron ciscoes of the *Coregonus artedii* complex. *Transactions of the American Fisheries Society*, 152(3), 296-309. DOI: 10.1002/tafs.10403
- Mouludi Saleh, A., Keivany, Y., 2019. Comparison of Transcaucasian Chub (*Squalius turcicus* De Filippi, 1865) populations in south-western Caspian Sea basin using geometric morphometric method. *Journal of Animal Research (Iranian Journal of Biology)* 32(3), 233-243. (In Persian)
- Mouludi-Saleh, A., Eagderi, S., Poorbagher, H., 2022a. Ichthyofauna of the Iranian part of the Sirvan River drainage with the first record of *Cobitis avicenna* and *Oxynoemacheilus euphraticus*. *International Journal of Aquatic Biology* 10(3), 242-253. DOI: 10.22034/ijab.v10i3.1639
- Mouludi-Saleh, A., Eagderi, S., Abbasi, K., Nasri, M., 2022b. Validation of two sympatric fish species of Urmia chub, *Petroleuciscus ulanus* and Urmia bleak, *Alburnus atropatensis*, based on morphologic characters in Mahabad-Chai River. *Nova Biologica Reperta* 8(4), 289-296. (In Persian)
- Mouludi-Saleh, A., Keivany, Y., 2018. Morphological diversity in three species of Chubs (*Squalius* spp.) populations in Iranian Basins. *Nova Biologica Reperta* 5(2), 192-204. (In Persian)
- Naderi, B., Abdoli, A., 2004. Institute of Fisheries Research of Iran. 80 p.
- Salehi, M., Mousavi-Sabet, H., Eagderi, S., 2022. Geometric morphometric analysis of body shape variation in *Salmo trutta* populations from the Caspian Sea, Namak and Urmia basins, Iran. *Iranian Journal of Ichthyology* 9(1), 23-31. DOI: 10.22034/iji.v9i1.831

- Salavatian, S. M., Abbasi, K., Rajabinejad, R., Aleali, G., Khadmati Bazkiyahi, K., Moradi Chafi, M., 2018. Investigation of morphological characteristics of *Salmo trutta* in Lar Dam Lake and watershed basin. *Advanced Aquaculture Sciences Journal* 2(1), 69-82.
- Sayyadzadeh, G. and Esmaeili, H. R. 2024. Freshwater lamprey and fishes of Iran: Reappraisal and updated checklist with a note on *Eagderi et al.* (2022). *Zootaxa* 5402(1), 001-099. DOI: 10.11646/zootaxa.5402.1.1
- Shabaninejad, F., Keivany, Y., Bagheri, D., 2021. Geometric morphometric comparison of abu mullet, *Planiliza abu* (Heckel, 1843) populations in Bushehr Basin, Iran. *Tanzania Journal of Science* 47(1), 1-9.
- Shuai, F., Yu, S., Lek, S., Li, X., 2018. Habitat effects on intra-species variation in functional morphology: Evidence from freshwater fish. *Ecology and Evolution* 8(22), 10902-10913.
- Slice, D. E., 2005. Modern morphometrics. In: *Modern morphometrics in physical anthropology*. Springer US, Boston, MA, pp. 1-45.
- Su, G., Villegger, S., Brosse, S., 2019. Morphological diversity of freshwater fishes differs between realms, but morphologically extreme species are widespread. *Global Ecology and Biogeography* 28(2), 211-221. DOI: 10.1111/geb.12843