

مقایسه ریخت‌سنجی هندسی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه جنوبی خزر

سرور غلامی، دانشجوی دکتری تکثیر و پرورش آبزیان، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

s_gholami@na.iut.ac.ir

یزدان کیوانی*، دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

keivany@cc.iut.ac.ir

چکیده

این مطالعه با هدف مقایسه ویژگی‌های ریختی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه خزر با استفاده از روش ریخت‌سنجی هندسی انجام شد. روش ریخت‌سنجی هندسی در ماهیان، با استفاده از نقاط مرجع آناتومیکی روی بدن آنها، به بررسی تغییرات شکل ظاهری آنها در میان گروه‌های مختلف یا تحت شرایط محیطی متفاوت می‌پردازد. به این منظور ۴۸۷ قطعه ماهی از حوضه خزر (رودخانه‌های ارس، شلمانرود، مزوبون، نور، سرخرود، گوهررود، کپربرد رود ۱، کپربرد رود ۲، گرگان رود ۱، گرگان رود ۲، لمیر و حاجی‌بکنده) نمونه‌برداری شد. از سمت چپ سطح جانبی این نمونه‌ها عکس‌برداری و سپس ۱۳ لندمارک با استفاده از نرم‌افزار *tpsDig2* رقمی‌سازی شد. داده‌های حاصل از واکاوی پروکراست. با روش‌های آماری چند متغیره *PCA*، *CVA* و واکاوی خوشه‌ای تحلیل شدند. مقایسه ریخت‌سنجی هندسی نشان داد تفاوت معنی‌داری بین جمعیت رودخانه ارس با دیگر جمعیت‌ها دیده می‌شود. عمده تفاوت‌ها مربوط به شکل و ارتفاع بدن، اندازه و شکل سر، موقعیت دهان، موقعیت باله‌ها و طول ساقه دم است. دلیل احتمالی تفاوت در میان جمعیت‌های رودخانه ارس با دیگر رودخانه‌ها می‌تواند تفاوت در زیستگاه و جدایی جغرافیایی باشد. این احتمال نیز وجود دارد که گونه نیز متفاوت باشد. همچنین، سایر جمعیت‌ها با یکدیگر همپوشانی داشتند و تفاوتی بین آنها دیده نشده است. این موضوع می‌تواند به علت شرایط زیستگاهی مشابه باشد.

واژه‌های کلیدی: ریخت‌سنجی هندسی، واکاوی مؤلفه‌های اصلی، واکاوی متغیرهای کانونی، واکاوی


پروکراست

* مسئول مکاتبات

غلامی، سرور، کیوانی، یزدان. (۱۴۰۳). مقایسه ریخت‌سنجی هندسی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*Alburnus hohenackeri*) در حوضه خزر. تاکسونومی و بیوسیستماتیک، ۱۶ (۵۹)، ۴۱-۵۶.



2322-2190 © The Author(s). Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).

 <http://dx.doi.org/10.22108/tbj.2024.141024.1260>

مقدمه

مرواریدماهی قفقازی (*Alburnus hohenackeri*) از خانواده Leuciscidae است و در لابه‌لای گیاهان آبرزی قسمت‌های پایینی رودخانه‌ها و دریاچه‌های آب شیرین به فراوانی دیده می‌شود. آب لب شور را نیز تا حدی تحمل می‌کند و بیشترین فراوانی را در ناحیه مصب رودخانه‌ها دارد. مرواریدماهی قفقازی در تمام زیستگاه‌های دریای خزر به سر می‌برد؛ اما ناخواسته انسان آن را به برخی حوضه‌های آبی دیگر مانند زریوار، مروین، هامون و سیستان منتقل کرده است. تفاوت زیستگاه و رودخانه می‌تواند تأثیر بسزایی بر گونه‌های ماهی داشته باشد؛ بنابراین، بررسی ریخت‌شناسی مرواریدماهی قفقازی در رودخانه‌ها و حوضه‌های آبی مختلف حایز اهمیت است. برای تفکیک جمعیت‌های مختلف از یک گونه، روش‌های متفاوتی وجود دارد. بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی، یکی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در این زمینه است. بررسی خصوصیات ریختی ماهیان کمک می‌کند تا موضوعاتی همچون تکامل، رفتارشناسی، حفاظت و بهره‌برداری از منابع آبرزی بیشتر شایان توجه قرار گیرد (Nacua et al., 2010). این خصوصیات اطلاعات مفیدی در مورد پراکنش گونه‌ها، وضعیت بوم‌شناختی و همچنین، الگوی تغذیه‌ای آنها ارائه می‌دهد (Su et al., 2019). تمایز بین جمعیت‌های ماهیان با استفاده از صفات ریخت‌شناسی می‌تواند نشان‌دهنده ماهیت انتخاب طبیعی و تأثیر عوامل محیطی باشد (Gammanpila et al., 2017). ویژگی‌های ریخت‌شناسی ماهیان اغلب دچار تغییرات درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای می‌شود؛ زیرا این خصوصیات متأثر از عامل‌های محیطی است (Costa & Cataudella, 2007)؛ بنابراین، در برخی موارد، تفاوت‌های ریخت‌شناسی ناشی از ویژگی‌های محیطی هستند و ژنتیک نقش چندانی در این زمینه ندارد.

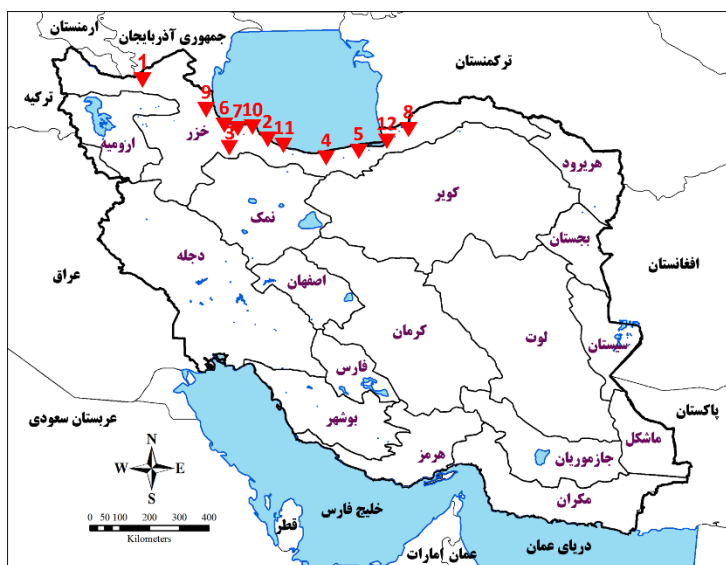
روش ریخت‌سنجی هندسی بر پایه لندمارک دارای قابلیت وسیعی در مطالعات زیستی است (Abbasi et al., 2023a). این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی در مطالعات ریخت‌شناسی استفاده می‌شود (Klingenberg, 2017). ریخت‌سنجی هندسی در مطالعات بوم‌شناسی، جغرافیای زیستی، رده‌بندی، انعطاف‌پذیری ریختی و تکامل منجر به گونه‌زایی، به‌طور گسترده برای درک تغییرات فرم در فضا و زمان در طول تکامل، ارتباط ژنتیکی و تأثیر عامل‌های زیست‌محیطی استفاده شده است (Cardini, 2016). این ابزار، مقایسه بین فرم‌های زیستی را براساس مختصات نقاط لندمارک‌ها امکان‌پذیر می‌سازد. به‌طور معمول، در مطالعات ریخت‌سنجی سنتی واکاوی‌های آماری چندمتغیره برای بررسی مجموعه‌ای از داده‌های فاصله‌ای از قبیل طول، عرض و ارتفاع به کار برده می‌شود؛ ولی در روش ریخت‌سنجی هندسی، داده‌های حاصل، مختصات لندمارک‌هاست که برای استخراج داده‌های شکلی استفاده می‌شوند (Khoshnamvand et al., 2019). این داده‌های شکلی می‌توانند در یک شبکه تغییر شکل، مصورسازی شوند (Adams et al., 2004). بررسی ماهیان در زیست‌بوم‌های آبی از جهت‌های مختلف مانند بوم‌شناسی، رفتارشناسی، تکامل، مدیریت و ارزیابی ذخایر بسیار حائز اهمیت است (Razavipoor et al., 2014). محققان گونه‌های مختلف ماهیان را به واسطه ویژگی‌های ریخت‌شناسی ارزیابی و شناسایی می‌شوند. ویژگی‌های ریخت‌شناسی اطلاعات مفید و سودمندی از نظر ویژگی‌های محیطی و بوم‌شناختی در اختیار محققین قرار می‌دهد. ویژگی ریختی ماهیان تحت تأثیر شرایط محیطی مانند نوع بستر، جریان آب، پوشش گیاهی، رقابت و میزان دسترسی به منابع غذایی قرار دارد (Bajic et al., 2018). یکی از مباحث مهم در علوم زیستی، بررسی جمعیت‌ها و چگونگی تفکیک آنها از یکدیگر است (Keyvani et al., 2016). با

توجه به اهمیت موضوع ریخت‌شناسی در زیست‌بوم‌های مختلف، هدف اصلی در این مقاله بررسی تفاوت‌های ریخت‌شناسی هندسی مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) در درون حوضه خزر است. دریای خزر با وسعت بیش از ۳ میلیون کیلومتر مربع بزرگ‌ترین دریاچه جهان محسوب می‌شود. این دریاچه دارای ماهیان با ارزش اقتصادی و اکولوژیکی بی‌ظیری است. حدود ۱۱۵ گونه و زیر گونه از ماهیان مختلف در این حوزه آبی زندگی می‌کنند. از مهم‌ترین ماهیان استخوانی در این حوزه آبی می‌توان به ماهی سفید، کفال، کپور، مروارید ماهی، و قزل آلا اشاره کرد (Ghojoghi et al., 2018)

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از تعداد ۴۸۷ قطعه ماهی مرواریدماهی قفقازی (در مجموع ۱۲ جمعیت از ۱۲ رودخانه) استفاده شده است که از حوضه خزر در طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۹ صید شده‌اند. این ماهی با استفاده از چک‌لیست سال ۲۰۲۰ (Jouladeh-Roudbar et al., 2020) شناسایی شده است. ماهی‌های مورد مطالعه در این پژوهش بالغ نبوده‌اند و امکان تعیین جنسیت برای آنها وجود نداشت؛ به همین علت به صورت مخلوط آنالیز شده‌اند؛ اما باید توجه داشت نمونه‌ها به اندازه‌ای رشد کرده بودند که قابل شناسایی باشند. در میان نمونه‌های موجود برخی از نمونه‌ها به دلیل اینکه به قدر کافی رشد نکرده بودند و قابل شناسایی نبودند، از مطالعه خارج شدند و فقط نمونه‌های قابل شناسایی مطالعه شده‌اند. ماهی‌ها در اندازه ۱۲ سانتی‌متر بالغ می‌شوند. ماهی‌های مورد مطالعه در اندازه‌های بین ۸ تا ۱۱ سانتی‌متر هستند. بعد از تعیین رودخانه‌های مدنظر برای صید نمونه با استفاده از تورپره و دستگاه الکترو شوکر، تعدادی نمونه مرواریدماهی قفقازی صید شدند. سپس این نمونه‌ها در فرمالین ۱۰٪ خنثی بافری تثبیت و برای ادامه آزمایش‌ها به آزمایشگاه ماهی‌شناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، منتقل و در الکل ۷۰٪ نگهداری شدند. نقشه نقاط جغرافیایی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، مختصات نقاط نمونه‌برداری در

جدول ۱ آورده شده است. برای استخراج داده‌های ریخت‌سنجی از روش ریخت‌سنجی هندسی استفاده شد. برای این کار با استفاده از دوربین دیجیتال ۱۴ مگاپیکسل کنن (ساخت کشور ژاپن) از نمونه‌ها عکس گرفته و سپس لندمارک‌های تعیین شده با نرم‌افزار TpsDig2 (version 2.10) روی این عکس‌ها قرار داده شد. داده‌های ریخت‌سنجی گونه‌های مورد مطالعه برای مقایسه ویژگی‌های ریختی با استفاده از نرم‌افزارهای Tps series (version 2) استخراج شد. نمونه‌ها با استفاده از آنالیز پروکراس برای حذف تغییرات غیر شکل صورت پذیرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار PAST (version 2.17) تحلیل شد. میانگین تغییرات شکل بدن جمعیت‌ها از شکل میانگین کل صورت پذیرفت. داده‌های ریخت‌سنجی هندسی با آزمون‌های آماری آنالیز مؤلفه اصلی و تحلیل متغیرهای کانونی تحلیل شدند. در شکل ۲ یک نمونه ماهی برای تعیین لندمارک نشان داده شده است.



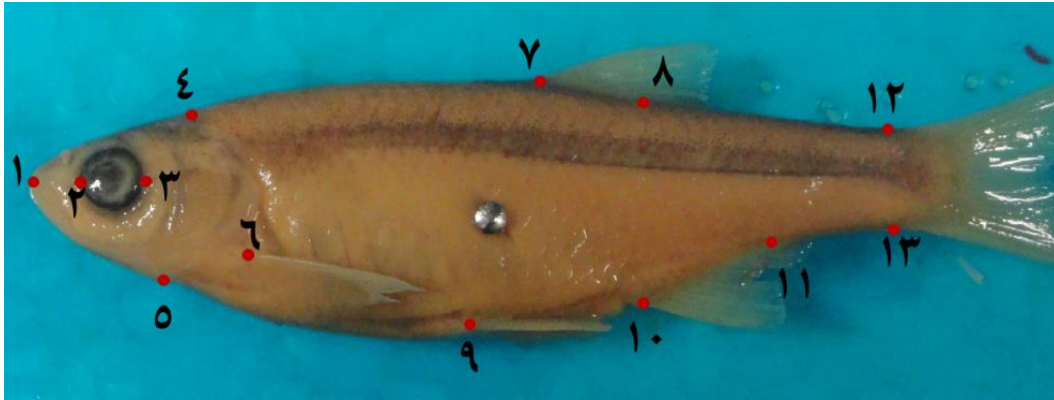
شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی مناطق نمونه برداری شده گونه های ماهی مروارید ماهی قفقازی مورد مطالعه (Keivany et al. 1995)

Figure 1. Geographic location map of the sampled areas in the northern Caspian basin

جدول ۱- مشخصات مناطق نمونه برداری شده

Table 1. Characteristics of the sampled areas

مختصات جغرافیایی	تعداد نمونه	رودخانه	حوضه و تعداد کل نمونه ها	
45°08'52"E, 39°11'58"N	۱۳	ارس	خزر (۴۸۷)	۱
50°12'40.38"E, 37°09'19.5"N	۱۴	شلمانرود		۲
50°3'16.14"E, 36°16'40.3"N	۱۶	مزوبون		۳
52°01'14.22"E, 36°34'41.32"N	۲۰	نور		۴
52°26'35.3"E, 36°30'37.36"N	۲۶	سرخرود		۵
49°26'42.8"E, 37°30'36.4"N	۲۸	گوهررود		۶
49°42'53.88"E, 37°26'18.9"N	۴۲	کپربرد رود ۲		۷
55°15'10.56"E, 37°18'26.2"N	۵۲	گرگانرود ۲		۸
49°06'58.44"E, 37°37'23.76"N	۵۸	لمیر		۹
49°46'54.12"E, 37°26'49.98"N	۶۴	حاجی بکنده		۱۰
49°42'53.88"E, 37°26'18.9"N	۷۶	کپربرد رود ۱		۱۱
55°18'45.66"E, 37°17'50.7"N	۷۸	گرگانرود ۱		۱۲



شکل ۲- یک نمونه مرواریدماهی قفقازی برای تعیین لندماک. لندماک‌ها شامل: (۱) نوک پوزه، (۲) ابتدای چشم، (۳) انتهای چشم، (۴) انتهای سر، (۵) پایین سرپوش، (۶) ابتدای باله سینه‌ای، (۷) ابتدای باله پشتی، (۸) انتهای باله پشتی، (۹) ابتدای باله شکمی، (۱۰) ابتدای باله مخرجی، (۱۱) انتهای باله مخرجی، (۱۲) باله ساقه دم و (۱۳) پایین ساقه دم هستند

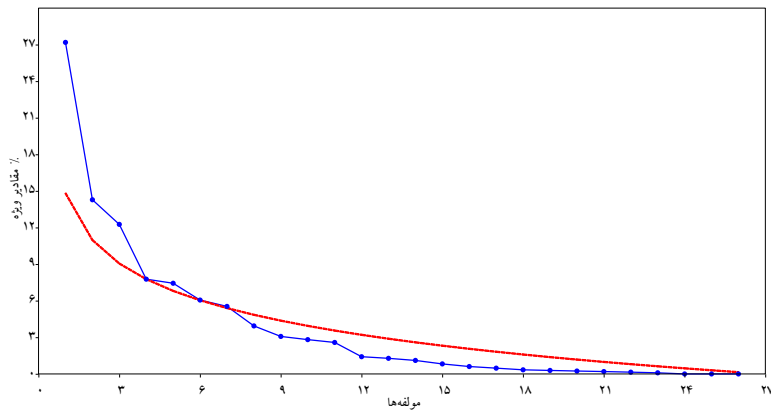
Figure 2. A sample of northern Caucasian bleek fish to determine the landmark. Landmarks include (1) snout tip, (2) beginning of the eye, (3) eye end, (4) head end, (5) under the operculum, (6) beginning of the pectoral fin, (7) beginning of the dorsal fin, (8) end of the dorsal fin, (9) beginning of the pelvic fin, (10) beginning of the anal fin, (11) end of the anal fin, (12) caudal peduncle fin, (13) below the caudal peduncle

نتایج

مطابق نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سه مؤلفه اول بالاتر از خط برش جولیف، به عنوان عوامل اصلی تفکیک‌کننده

جمعیت‌ها انتخاب شدند (شکل ۳) و این سه مؤلفه در مجموع حدود ۵۳٪ واریانس را به خود اختصاص دادند)

جدول). نحوه توزیع جمعیت‌های مورد مطالعه و تغییرات شکل بدنی جمعیت‌ها در راستای دو محور PC1 و PC2 در نمودار تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر اساس دو مؤلفه اول و دوم به ترتیب در شکل ۴ نشان داده شده است.



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

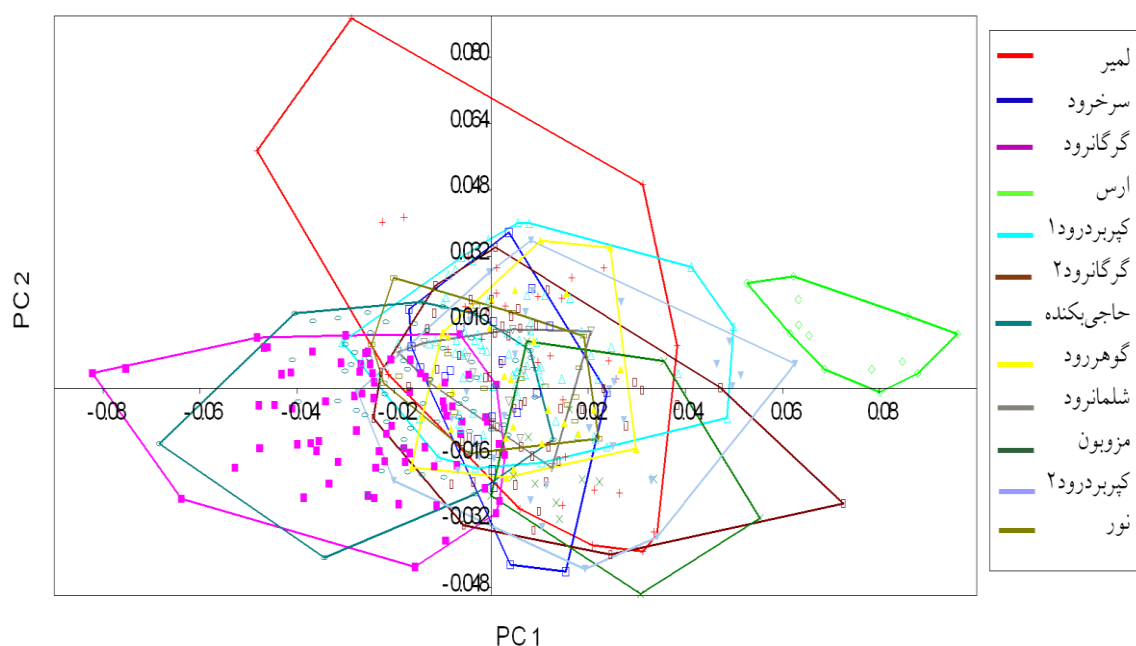
Figure 3. Scree plot of principal components analysis and display of cut-off (red line) which shows the boundary of significant principal components in Caspian basin populations for geometric morphometry test

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

Table 3. Variance values and eigenvalues of the first three main components of body shape analysis of pearlfish (*A. hohenackeri*) populations in the Caspian basin

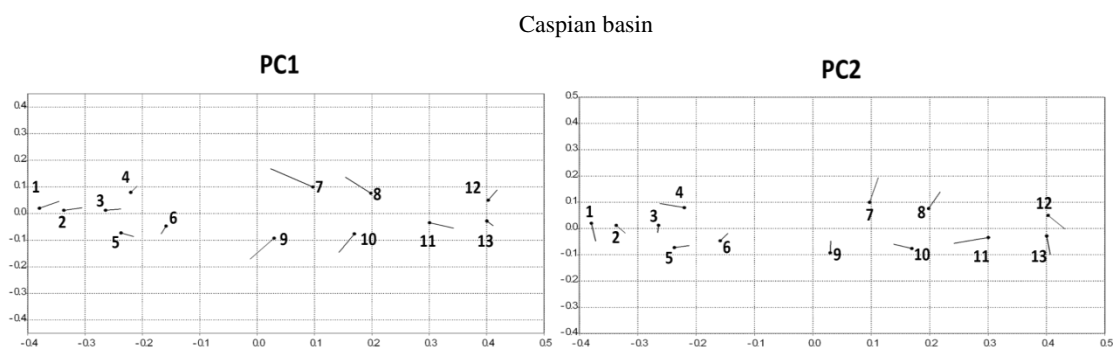
مؤلفه‌ها	مقادیر ویژه	واریانس
۱	۰/۰۰۰۵۹۸	۲۷/۱۹
۲	۰/۰۰۰۳۱۴	۱۴/۲۸
۳	۰/۰۰۰۲۷۰	۱۲/۲۶
جمع		۵۳/۷۳

مطابق شکل ۴، یازده جمعیت دارای هم‌پوشانی با یکدیگرند و تفاوت معنی‌داری بین آنها دیده نمی‌شود؛ اما جمعیت رودخانه ارس با دیگر جمعیت‌ها هم‌پوشانی ندارد و تفاوت معنی‌داری بین جمعیت رودخانه ارس با دیگر جمعیت‌ها دیده می‌شود. در بررسی تغییرات الگوهای شکل بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه، مطابق شکل ۵، با حرکت در جهت مثبت محور PC1 شکل بدنی جمعیت‌ها تمایل به تغییر موقعیت دهان و به عقب‌رفتن آن (لندمارک ۱)، تغییر در موقعیت ابتدا و انتهای چشم (لندمارک‌های ۲ و ۳)، تغییر مشخص در موقعیت باله‌های پشتی (لندمارک‌های ۷ و ۸)، تغییر در موقعیت باله شکمی (لندمارک ۹)، تغییر در موقعیت باله مخرجی (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، افزایش ارتفاع بدن (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و افزایش طول ساقه دمی (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳) دارند. همچنین، با حرکت در جهت مثبت محور PC2 شکل بدن جمعیت‌ها تمایل به تغییر موقعیت دهان و پایین‌رفتن آن (لندمارک ۱)، تغییر در موقعیت انتهای سر (لندمارک ۴)، تغییر در موقعیت باله‌های پشتی (لندمارک‌های ۷ و ۸)، تغییر در موقعیت باله مخرجی (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، افزایش ارتفاع بدن (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و افزایش طول ساقه دمی (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳) دارند.



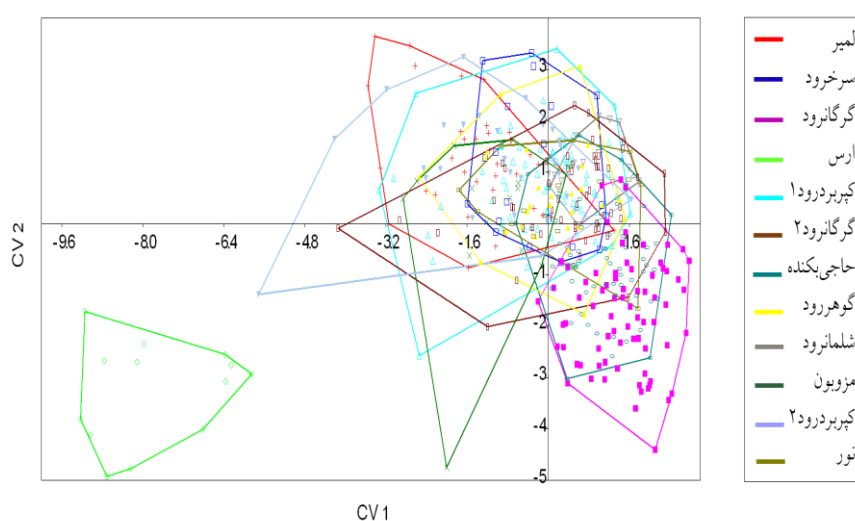
شکل ۴- نمودار تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) در حوضه خزر

Figure 4. Principal component decomposition diagram of the body shape of pearlfish (*A. hohenackeri*) populations in the

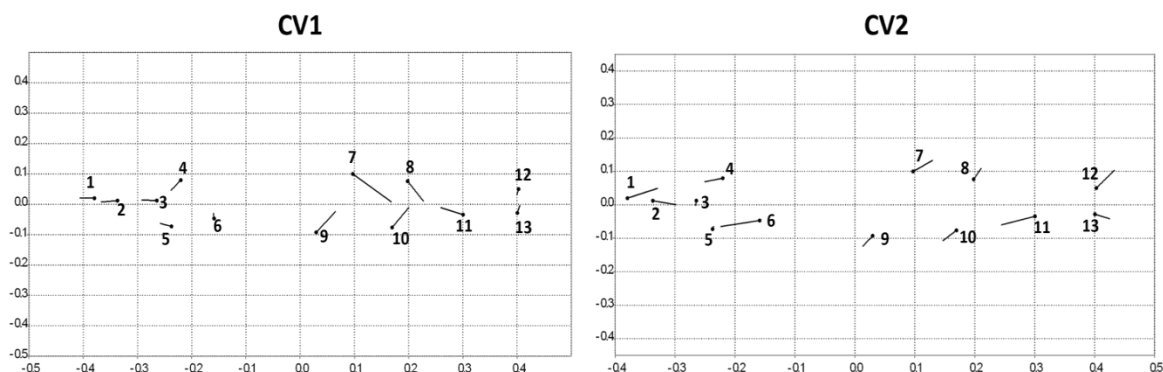


شکل ۵- تغییرات شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) در حوضه خزر در جهت هر یک از محورهای PC1 و PC2
Figure 5. Body shape changes of *A. hohenackeri* populations in the Caspian basin in the direction of each of the PC1 and PC2 axes

تحلیل همبستگی کانونی نشان داد تقریباً همه جمعیت‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی دارند و تفاوت معناداری بین آنها دیده نمی‌شود؛ اما جمعیت رودخانه ارس با هیچ کدام از جمعیت‌ها هم‌پوشانی ندارد؛ بنابراین، تفاوت معناداری بین جمعیت رودخانه ارس و دیگر جمعیت‌ها وجود دارد (شکل ۶). همچنین، در شکل ۷ تغییرات شکل بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به شکل ۶، با حرکت در جهت مثبت محور CV1 شکل بدنی جمعیت‌های مورد مطالعه تمایل به تغییر موقعیت باله پشتی (لندمارک‌های ۷ و ۸)، تغییر موقعیت باله شکمی (لندمارک ۹) و تغییر موقعیت باله مخرجی (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، کاهش ارتفاع بدن (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و کاهش طول ساقه دمی (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳) دارند و با حرکت در جهت مثبت محور CV2 شکل بدن جمعیت‌های مورد مطالعه تمایل به تغییر موقعیت دهان و به عقب رفتن آن (لندمارک ۱)، تغییر موقعیت ابتدای چشم (لندمارک ۲)، تغییر موقعیت باله سینه‌ای (لندمارک ۶)، تغییر موقعیت باله مخرجی (لندمارک‌های ۱۰ و ۱۱)، افزایش ارتفاع بدن (لندمارک‌های ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱) و افزایش ساقه دمی (لندمارک‌های ۱۲ و ۱۳) دارند.

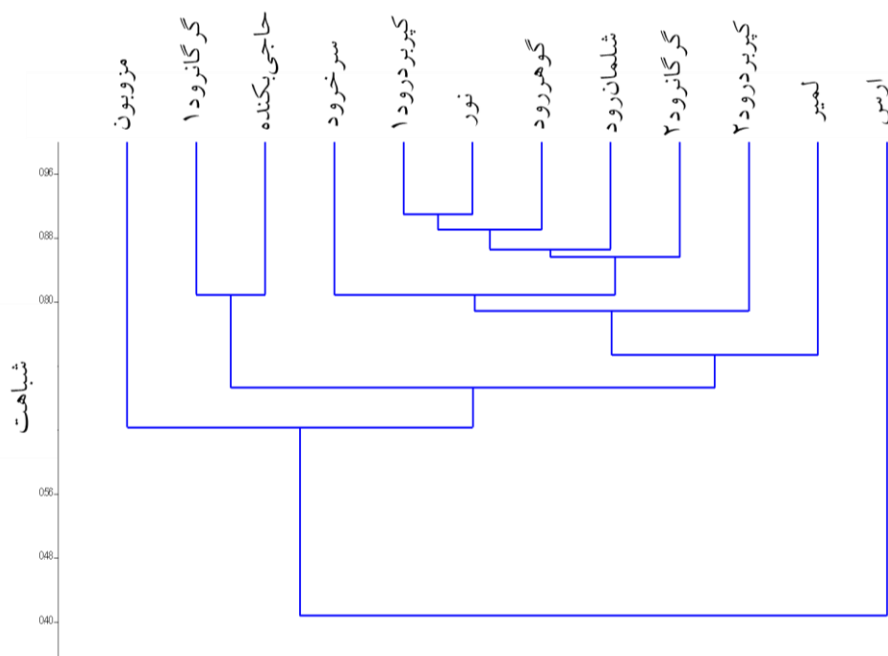


شکل ۶- نمودار تحلیل همبستگی کانونی شکل بدنی جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) حوضه خزر
Figure 6. Canonical Variate Analysis diagram of body shape of *A. hohenackeri* populations in the Caspian basin



شکل ۷- تغییرات شکل بدن جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) در حوضه خزر در جهت هر یک از محورهای CV1 و CV2
Figure 7. Body shape changes of *A. hohenackeri* populations in the Caspian basin in the direction of each of the CV1 and CV2 axes

در شکل ۸ تحلیل خوشه‌ای جمعیت‌های مورد مطالعه ارائه شده است. ضریب کوپرنیک تحلیل خوشه‌ای برابر با ۰/۹۵ محاسبه شد. مطابق با تحلیل خوشه‌ای جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی در حوضه خزر، جمعیت رودخانه ارس در شاخه جداگانه قرار گرفته است و بیشترین تمایز را با سایر جمعیت‌ها دارد. طبق این تحلیل، دو گروه اصلی مشاهده می‌شود. گروه اول شامل ارس و گروه دیگر شامل دیگر جمعیت‌ها. در ضمن گروه دیگر، جمعیت مرزبون از دیگر جمعیت‌ها جدا افتاده است. باید اشاره کرد جفت جمعیت‌های گرگانرود ۱ و حاجی‌بکنده، و جفت جمعیت‌های کپربردردود ۱ و نور جمعیت‌های خواهری هستند که کمترین فاصله را با یکدیگر دارند.



شکل ۸- تحلیل خوشه‌ای شکل بدن در جمعیت‌های مرواریدماهی قفقازی (*A. hohenackeri*) حوضه خزر
Figure 8. Cluster analysis of body shape in *A. hohenackeri* populations of the Caspian basin

بحث

جمعیت ماهیان ساکن در زیستگاه‌های مختلف به دلیل تأثیر شرایط و عوامل محیطی می‌توانند اشکال متمایزی از خود نشان دهند. در میان مهره‌داران، ماهی‌ها درجه بالاتری از تنوع ریختی درون گونه‌ای و بین گونه‌ای را نشان می‌دهند و همچنین، حساسیت بیشتری به تغییرات محیطی نشان می‌دهند (Mouludi-Saleh 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. 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 درخور توجهی را در شکل بدن خود نشان می‌دهند که اغلب در پاسخ به تغییرات محیطی، رفتاری و فیزیولوژیکی ظاهر می‌شود (Mouludi-Saleh & Keivany, 2019).

در مطالعه‌ای که در منطقه جنوبی حوضه دریای خزر انجام شد، محققان دریافتند 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 & Keivany, 2019). این تغییرات در صفات تحت تأثیر شرایط محیطی مشاهده شد. این مطالعه نشان داد این ویژگی‌های مورفولوژیکی خاص در پاسخ به عوامل محیطی خاص موجود در جمعیت‌های مربوطه دچار تغییراتی شدند. مطالعه‌ای با استفاده از روش‌های ریخت‌سنجی هندسی بر جمعیت‌های کفال پوزه باریک در بخش جنوبی حوضه دریای خزر انجام شد (Abassi et al., 2023b). یافته‌های این مطالعه، تغییرات مورفولوژیکی چشمگیری را در بین گونه‌های مورد مطالعه نشان داد که تحت تأثیر زیستگاه‌های خاص آنها هستند. بارزترین تفاوت‌ها در عمق بدن، موقعیت دهان، اندازه سر و طول ساقه دمی مشاهده شد. شایان ذکر است جمعیت ساری و لنگرود بیشترین اندازه‌گیری عمق بدن را به نمایش گذاشتند. این تغییرات مورفولوژیکی را می‌توان به سازگاری درون گونه‌ای در پاسخ به شرایط محیطی و زیستگاه نسبت داد. تغییرات مشاهده‌شده که به حفظ تعادل در برابر نیروهای هیدرودینامیکی کمک می‌کند، پدیده‌ای رایج است که در زیستگاه‌های آبی گزارش شده است (Ghanbarifardi et al., 2014).

مطالعه‌ای که روی مورفولوژی جمعیت‌های سگ‌ماهیان جویباری در جنوب شرقی حوضه خزر با استفاده از روش ریخت‌سنجی هندسی انجام شد (Sharifinia & Mousavi, 2016)، نتایجی را نشان داد که نشان‌دهنده تغییرات شکل بدن مشخص در میان جمعیت‌های این جنس ماهی ساکن در زیستگاه‌های مختلف است. این تفاوت‌ها در شکل بدن را می‌توان به‌عنوان یک جدایی ریختی در نظر گرفت که بیان‌کننده شرایط زیستگاهی خاص در جمعیت‌های سگ‌ماهیان حوضه دریای خزر است. این مطالعه همچنین نشان داد مهم‌ترین تغییرات در بین جمعیت‌های مورد مطالعه مربوط به اندازه سر، ارتفاع بدن و موقعیت باله شکمی بود. این یافته‌ها تا حدودی با نتایج مطالعه ما نیز همخوانی دارد.

در مطالعه خود، گروهی از محققین از روش ریخت‌سنجی هندسی برای بررسی شکل بدن سه گونه از جنس *Paracobitis* استفاده کردند. محققان تفاوت‌های شایان توجهی را بین گونه‌ها از نظر طول و عرض سر، عرض بدن، طول ساقه دمی، وضعیت چشم و موقعیت باله پشتی یافتند (Jafari et al., 2015). این یافته‌ها نشان می‌دهد شکل گونه‌های مورد مطالعه بسیار انعطاف‌پذیر بوده و تحت تأثیر عوامل محیطی است. اعتقاد بر این است که چنین انعطاف‌پذیری نتیجه سازگاری با شرایط محیطی خاص در زیستگاه آنها در طول فرآیند تکامل است.

تغییرات و تغییرات در شکل بدن موجودات، زمانی شایان توجه است که بتوان آنها را با جنبه‌های عملکردی و سازگاری مرتبط دانست. در اکوسیستم‌های آبی، این سازگاری‌ها اغلب با ضرورت جهت‌یابی مؤثر و مقابله با نیروهای هیدرودینامیکی به‌منظور حفظ انرژی در طی رفتارهای مختلف بیولوژیکی همراه است (Abassi et al., 2023b). تفاوت‌های ریختی مشاهده‌شده در میان جمعیت‌های مورد مطالعه عمدتاً حول ویژگی‌های سر، ارتفاع بدن، طول ساقه دم و همچنین، موقعیت باله‌های پشتی بود. این تفاوت‌ها به‌طور بالقوه منعکس‌کننده سازگاری با شرایط هیدرولیک و ترجیحات غذایی خاص برای هر جمعیت است. با انجام این تغییرات ریختی، موجودات زنده می‌توانند عملکرد و بقای خود را در محیط‌های مربوطه خود بهتر بهینه کنند.

در واقع، تغییرات در شکل سر می‌تواند به‌طور غیرمستقیم منعکس‌کننده سازگاری‌های مربوط به رفتار جستجوی غذا باشد. تغییرات در شکل سر می‌تواند بر کارایی جستجو و تهیه غذا تأثیر بگذارد؛ برای مثال، وجود دهانی با موقعیت پایین در جمعیت‌های ارس ممکن است نشان‌دهنده این باشد که این ماهی‌ها از قسمت‌های عمیق‌تر ستون آب تغذیه می‌کنند (Hawkins & Quinn, 1996). علاوه بر این، ارتفاع پایین‌تر بدن مشاهده‌شده در جمعیت ارس نشان‌دهنده سازگاری با حمل‌شدن توسط جریان‌های آب است که با ساختار بدن کشیده‌تر و روان‌تر تسهیل می‌شود. این تغییرات شکل ماهی‌ها را قادر می‌سازد تا به‌طور مؤثرتری در زیستگاه خاص خود حرکت کنند و بازده جستجوی خود را در پاسخ به شرایط محیطی و نیروهای هیدرودینامیکی که با آن مواجه می‌شوند، بهینه کنند (Chapman et al., 2008).

مشخص شده است که موقعیت باله پشتی در ماهی‌های سریع شنا معمولاً خلفی است. این ویژگی به کاهش اصطکاک و بهبود راندمان شنا کمک می‌کند. درباره جمعیت رودخانه ارس، وجود باله پشتی خلفی ممکن است به‌عنوان مکانیزمی برای جلوگیری از انتقال جریان قوی آب در رودخانه عمل کند. علاوه بر این، اندازه کوچک‌تر و شکل بدن دراز در ماهی‌هایی که در رودخانه‌هایی با جریان‌های بالاتر زندگی می‌کنند، سازگاری‌هایی است که توانایی آنها را برای حرکت در جریان آب افزایش می‌دهد (Douglas & Matthews, 1992). این سازگاری‌ها به کاهش کشش کمک می‌کند و به ماهی اجازه می‌دهد تا در شرایط چالش برانگیز هیدرودینامیک پایداری خود را حفظ کند. وجود باله سینه‌ای در جمعیت رودخانه ارس نیز ممکن است به افزایش قدرت مانور کمک کند و ماهی را قادر می‌سازد تا بهتر با جریان جهت‌دار آب کنار بیاید. این صفات ریختی مختلف در مجموع توانایی ماهی را برای رشد و بقا در محیط آبی خاص خود افزایش می‌دهد (Langerhans et al., 2003).

به‌طور کلی، به نظر می‌رسد ویژگی‌های زیستگاهی در کنار فاکتور جدایی جغرافیایی از عوامل تعیین‌کننده تغییرات تکاملی است که منجر به تغییر ویژگی‌های ریختی ماهیان ساکن در رودخانه ارس نسبت به سایر جمعیت‌ها شده است و در مطالعه‌ی مشابه که عظامولودی و یزدان کیوانی روی ریخت‌سنجی هندسی جمعیت‌های ماهی سفید رودخانه‌ای انجام دادند، این موضوع به اثبات رسیده است و همچنین، احتمالاً ایجاد سدهای متوالی در ارس که باعث جدایی ژنتیکی می‌شود، دلیلی برای تفاوت جمعیت ارس نسبت به سایر جمعیت‌ها است. حمید قاسمی و قارا مصطفی اف روی شناسایی ماهی‌ها و برخی از ویژگی‌های اکولوژیکی رودخانه ارس مطالعاتی انجام داده‌اند. از آنجایی که تعداد گونه A. *hohenackeri* در حوضه خزر کاملاً متفاوت بود، جمعیت‌ها با روش PCA صفات ریختی تقریباً با یکدیگر هم‌پوشانی داشته‌اند؛ اما جمعیت رودخانه ارس با دیگر جمعیت‌ها هیچ‌گونه هم‌پوشانی نداشته است و اختلاف معنی‌داری بین رودخانه ارس با سایر جمعیت‌ها دیده می‌شود. نکته شایان توجه این است که با روش CVA نیز همین نتایج به دست آمد و بیشترین تمایز را جمعیت ارس با سایر جمعیت‌ها داشت؛ اما در کل PCA و CVA نتوانستند جمعیت‌های مورد مطالعه را

که دارای هم پوشانی بالایی بودند، از یکدیگر تفکیک کنند؛ به دلیل اینکه ویژگی آنها به هم نزدیک بوده است. همچنین، در آنالیز خوشه‌ای صفات ریختی حوضه خزر جمعیت رودخانه ارس به تنهایی در یک گروه قرار گرفته و از سایر جمعیت‌ها جدا شده بود و جمعیت‌های رودخانه لمیر، سرخورد، گرگانرود ۱، گرگانرود ۲، کپربرد رود ۱، کپربرد رود ۲، حاجی‌بکنده، گوهررود، شلمانرود، مزوبون و نور، به دلیل شباهت‌های شکل بدنی در یک گروه قرار می‌گیرند که بیان‌کننده رابطه فاصله جغرافیایی و شکل بدن یا به عبارت دیگر، رابطه ژنتیکی نزدیک‌تر آنهاست (Mohadasi et al., 2013). با توجه به نتایج تفاوت‌های ریختی بین دوازده جمعیت مورد مطالعه از این حوضه جمعیت ارس به طور کامل از یازده جمعیت دیگر جدا شده است. جداسدن جمعیت رودخانه ارس از سایر رودخانه‌های حوضه خزر می‌تواند به ویژگی‌های رژیم غذایی مرتبط باشد؛ شکل بدن می‌تواند در موفقیت در 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.

References

- Abbasi, K., Eagderi, S., Bageri, S., Rahimi, J., Hasani Azhdari, S. M., & Pourgholami-Moghaddam, A. (2023a). 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. <https://doi.org/10.22059/jfisheries.2023.91487> [In Persian].
- Abbasi, K., Mouludi-Saleh, A., Eagderi, S., Bagheri, S., Sarpanah, A., & Pourgholami-Moghaddam, A. (2023b). Investigation of morphological changes in golden mullet, *Chelon auratus* (Risso, 1810) from the southern Caspian Sea basin using the geometric morphometric technique. *Taxonomy and Biosystematics*, 15(55), 1-18. <https://doi.org/10.22108/tbj.2022.134542.1209> [In Persian].
- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. (2004). Geometric morphometrics: Ten years of progress following the revolution. *Italian Journal of Zoology*, 71, 5-16. <https://doi.org/10.1080/11250000409356545>
- Bajic, A., Jojic, V., Snoj, A., Miljanović, B., Askeyev, O., Askeyev, I., & Marić, S. (2018). Comparative body shape variation of the European grayling *Thymallus thymallus* from wild populations and hatcheries. *Zoologischer Anzeiger*, 9, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2017.12.005>
- Cardini, A. (2017). Lost in the other half: Improving accuracy in geometric morphometric analyses of one side of bilaterally symmetric structures. *Systematic Biology*, 65(6), 1096-1106. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syw043>
- 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). <https://doi.org/10.2174/1874404400802010075>
- Costa, C., & Cataudella, S. (2007). Relationship between shape and trophic ecology of selected species of sparids of the Caprolace coastal lagoon (Central Tyrrhenian Sea). *Environmental Biology of Fishes*, 73, 115-123. <https://doi.org/10.1007/s10641-006-9081-9>
- Douglas, M. E., & Matthews, W. J. (1992). Does morphology predict ecology? Hypothesis testing within a freshwater stream fish assemblage. *Oikos*, 65, 213-224. <https://doi.org/10.2307/3545012>
- Ghanbarifardi, M., Aliabadian, M., Esmaili, H. R., & Polgar, G. (2014). Morphological divergence in the Walton's mudskipper, *Periophthalmus waltoni* Koumans, 1941, from the Persian Gulf and Gulf of Oman (Gobioidei: Gobiidae). *Zoology in the Middle East*, 60(2), 133-143. <https://doi.org/10.1080/09397140.2014.914717>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10641-017-0642-x>
- Ghojoghi, F., Eagderi, S., & Nasri, M. (2018). Body shape comparison of kutum fish *Rutilus kutum* (Kamensky, 1901) from southern Caspian Sea using geometric morphometric methods. *Journal of Aquaculture Development*, 12(1), 63-73. <http://aquadev.liiau.ac.ir/article-1-147-en.html>
- 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, 1487-1496. <https://doi.org/10.1139/f96-085>
- Jafari, O., Eagderi, S., Nasrolah-Pourmoghadam, M., Noferesti, H., & Mosavi-Sabet, H. (2015). Comparison of morphological variations among three species of the genus *Paracobitis* in Iran using geometric morphometrics method with a taxonomical review on the genus in Iran. *Taxonomy and Biosystematics*, 7(22), 1-12. <https://www.magiran.com/p1449441> [In Persian].
- Jouladeh-Roudbar, A., Ghanavi, H. R., & Doadrio, I. (2020). Ichthyofauna from Iranian freshwater: Annotated checklist, diagnosis, taxonomy, distribution and conservation assessment. *Zoological Studies*, 59. <https://doi.org/10.6620/zs.2020.59-21>
- Keivany, Y., Nasri, M., Abbasi, K., & Abdol, A. (2016). *Atlas of inland water fishes of Iran*. Iran Department of Environment Press. Jahad Daneshgahi, Kharazmi Branch. https://www.researchgate.net/publication/256843321_Atlas_of_Inland_Water_Fishes_of_Iran [In Persian].
- Khoshnamvand, H., Malekian, M., & Keivany, Y. (2019). Feasibility of using geometric morphometrics on larvae of Loristan newt for population identifications. *Journal of Animal Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(1), 11-21. https://animal.ijbio.ir/article_1401.html [In Persian].
- Klingenberg, C. (2017). Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: Concepts, methods, and applications. *Symmetry*, 7(2), 843-934. <https://doi.org/10.3390/sym7020843>
- Langerhans, R. B., Layman, C. A., Langerhans, A. K., & DeWitt, T. J. (2003). Habitat-associated morphological divergence in two Neotropical fish species. *Biological Journal of the Linnean Society*, 80, 689-698. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2003.00266.x>
- Mohadasi, M., Shabanipour, N., & Eagderi, S. (2013). Habitat-associated morphological divergence in four Shemaya, *Alburnus chalcoides* (Actinopterygii: Cyprinidae) populations in the southern Caspian Sea using geometric morphometrics analysis. *International Journal of Aquatic Biology*, 1(2), 82-92. <https://doi.org/10.22034/ijab.v1i2.30>
- Mouludi-Saleh, A., & Keivany, Y. (2019). Comparison of Transcaucasian chub (*Squalius turcicus* De Filippi, 1865) populations in the south-western Caspian Sea basin using geometric morphometric method. *Journal of Animal Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(3), 233-243. https://animal.ijbio.ir/article_1420.html [In Persian].
- Mouludi-Saleh, A., Keivany, Y., & Jalali, S. A. H. (2018). Comparison of meristic traits in Transcaucasian chub (*Squalius turcicus* De Filippi, 1865) from Caspian Sea basin. *International Journal of Aquatic Biology*, 6(1), 8-14. <https://doi.org/10.22034/ijab.v6i1.317> [In Persian].
- Nacua, S., Torres, M., & Demayo, C. (2010). Landmark-based geometric morphometrics in visualizing body shape dimorphism in the endemic cyprinid, *Puntius tumba* (Herre, 1924), from Lake Lanao, Philippines. In *International Conference on Environmental Engineering and Applications* (pp. 86-90), Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1109/ICEEA.2010.5596096>
- Sharifinia, M., & Mousavi, H. (2016). Comparison of morphological variations among populations of the crested loach, genus *Paracobitis*, in the Southeast Caspian Sea Basin using geometric morphometric method. *Journal of Oceanography*, 7(27), 49-57. <https://www.magiran.com/p1645454>
- Razavipoor, P., Eagderi, S., Poorbagher, H., Javanshir, A., & Keivany, Y. (2014). Comparative study of morphological characteristics of tuini fish (*Capoeta damascina*) in inland waters of Iran using geometric morphometric method. *Journal of Fisheries*, 68(1), 79-90. <https://doi.org/10.22059/jfisheries.2015.53873> [In Persian].
- Su, G., Villeger, 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. <https://doi.org/10.1111/geb.12843>

