دانشگاه گنبد کاووس
مجله "پژوهش‌های ماهی‌شناسی کاربردی"
شماره اول- سال دوم-بهار ۹۲
http://jair.gonbad.ac.ir

کاربرد روش ریخت سنجی هندسی در مطالعات انعطاف‌پذیری ریختی در ماهیان؛ مطالعه موردی مقایسه شکل بدن جمعیت‌های ماهی گورخری *Aphanius sophiae* (Heckel, 1847) چشمه علی دامغان و رودخانه شور اشتهارد

سهیل ایگدری[1] و شفق کمال[2]
[1]استادیار گروه شیلات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه تهران،
[2]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه شیلات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
تاریخ ارسال: ۹۱/۱۰/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱/۲۲

چکیده

شکل بدن نه تنها انعکاس دهنده ویژگی‌های ژنتیکی بلکه منعکس کننده وضعیت محیط زندگی و زیستگاه ماهی نیز است. از این‌رو، این پژوهش با هدف کاربرد روش ریخت سنجی هندسی لندمارک پایه در بررسی انعطاف پذیری ریختی در دو جمعیت ماهی گورخری (*A. sophiae*) ساکن آب شیرین (چشمه علی دامغان) و آب شور (رودخانه شور اشتهارد) به اجرا درآمد. تعداد ۸۶ نمونه ماهی گورخری از چشمه علی (۵۲ عدد) و رودخانه شور (۳۴ عدد) نمونه برداری گردید. از سمت چپ سطح جانبی نمونه‌ها با استفاده از دوربین دیجیتال عکسبرداری شد. بر روی تصاویر دو بعدی حاصل تعداد ۱۵ نقطه لندمارک با استفاده از نرم‌افزار TpsDig2 قرار داده شد. داده‌های حاصل پس از آنالیز پروکراست، با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره DFA و T-test هتلینگ به‌صورت جداگانه برای هر دو جنس مورد تحلیل قرار گرفتند. شکل اجماع جنس‌های نر و ماده هر دو جمعیت به تفکیک در شبکه تغییر شکل توسط نرم‌افزار MorphoJ مصورسازی شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین شکل بدن جنس‌های نر و ماده هر دو جمعیت وجود دارد (P<۰/۰۰۱). الگوهای تفاوت ریختی مشاهده شده در هر دو جنس شامل پهنای بدن و ساقه دمی و موقعیت باله سینه‌ای بود. نتایج این پژوهش، جدایی ریختی وابسته به زیستگاه، تغییرپذیری ریختی و تکامل در حال پیشرفت شکل بدن دو جمعیت ماهی گورخری را تحت تاثیر شرایط محیطی محل زیست نشان داد.

***واژه‌های کلیدی*: ماهی گورخری، انعطاف‌پذیری ریختی، ریخت‌سنجی هندسی، رودخانه شور، چشمه علی**

*مسئول مکاتبه: soheil.eagderi@ut.ac.ir

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]

مقدمه

مطالعه انعطاف‌پذیری ویژگی‌های ریختی جمعیت‌های یک گونه که در محیط‌های متفاوت از نظر خصوصیات زیستگاهی زندگی می‌کنند، امکان درک بهتر روند تغییرات ریختی تحت تاثیر تغییرات محیطی را در جمعیت‌ها فراهم می کند (Kuliev, 1984). انعطاف‌پذیری ریختی جمعیت‌های یک گونه در محیط‌های متنوع، پدیده‌ای است که در نتیجه اثر فاکتورهای محیطی بر روی اجداد جمعیت‌های یک گونه در پدیده گونه‌زایی حاصل می‌شود (Adams and Collyer, 2009). به عبارت دقیق‌تر، تنوع ریخت شناختی ممکن است نتیجه انعطاف‌پذیری ریختی، سازگاری‌های منطقه‌ای، تغییرات خصوصیات اکولوژیکی، عوامل زیستی یا رابطه متقابل هر یک از این فرآیندها باشد. بنابراین، تکامل جمعیت‌ها باعث ایجاد سازگاری آن‌ها به شرایط زیستی در مناطق مختلف شده که این امر، خود می‌تواند دلیل به‌وجود آمدن اختلافات ریخت شناختی و ژنتیکی بین جمعیت‌ها و همچنین بین گونه‌های ماهیان باشد (Swain and Foote, 1999; Nicieza, 1995). ویژگی‌های ریختی ماهیان نسبت به تغییرات ناشی از محیط حساسیت بالایی دارند از جمله عوامل تاثیرگذار بر ریخت می‌توان به نوع بستر، جریان آب، پوشش گیاهی، رقابت، شکار و میزان دسترسی به منابع غذایی اشاره کرد (Nicieza, 1995). روش ریخت سنجی هندسی ابزاری جدید و قدرتمند برای بررسی فرم‌های زیستی و مطالعات انعطاف‌پذیری ریختی است. در این روش تعدادی نقاط هومولوگ به نام لندمارک روی شکل نمونه تعیین و سپس تغییرات مختصات فضایی این نقاط به عنوان بازتابی از تغییرات شکلی در بین موجودات بررسی و مقایسه می شود.

ریخت‌سنجی در زیست شناسی برای توصیف شکل موجودات استفاده شده، مقایسه آنها را امکان‌پذیر می‌کند (Bookstein, 1989; Tjarks, 2009). به‌علاوه، این روش یک ابزار تحلیلی بسیار مفید در پژوهش‌های بیوسیستماتیک، رشد و تکامل است (Pavlinov, 2001; Rohlf, 1990, 2000). انواع فرآیندهای زیست شناختی مانند بیماری، فرآیند فردزایی، سازگاری با فاکتورهای زیستگاهی و یا تنوع تکاملی درازمدت باعث ایجاد تفاوت در شکل بین افراد یا قسمت‌هایی از آنها می‌شود. از این‌رو آنالیز شکل، روشی برای درک الگوهای مختلف تغییر شکل‌های ریختی است (Zelditch *et al*., 2004). تکنیک‌های ریخت‌سنجی به دو روش: (۱) ریخت‌سنجی سنتی که روش‌های برپایه تحلیل‌های آماری فواصل اندازه‌گیری شده برروی ساختار زیستی از قبیل: طول، عرض، عمق و گاهی اوقات نسبت‌ها و زاویه‌ها و (۲) ریخت‌سنجی هندسی به مجموعه‌ای از روش‌ها که از داده‌هایی مانند لندمارک‌ها، منحنی‌های خط سیر پیرامونی و نیمه لندمارک‌ها برای گرفتن اطلاعات هندسی از ساختارهای زیستی استفاده می‌کند، تقسیم می‌شوند.

در ریخت‌سنجی سنتی اندازه‌گیری فاصله‌های خطی همبستگی بالایی با اندازه موجود دارد و این امر تحلیل شکل را مشکل می‌کند. همچنین اندازه‌های مورد سنجش دو شکل متفاوت می‌تواند نتایج مساوی

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]

به‌وجود آورند. زیرا داده‌های فاصله‌ای جایگاه نسبی آنها به یکدیگر را نمی‌تواند نشان دهد. در نهایت، نمایش گرافیکی نتایج نیز ناممکن است. پیدایش ابزار جدید ریخت‌سنجی هندسی به‌همراه کاربرد آمارهای چندمتغیره منجر به چیره شدن بر محدودیت‌های ریخت‌سنجی و تحول در آن شد (Bookstein, 1991; Rohlf and Marcus, 1993). در ریخت‌سنجی هندسی روش لندمارک-پایه، مقایسه بین فرم‌ها براساس اطلاعات نقاط لندمارک دوبعدی (x, y) و یا سه‌بعدی (x, y, z) به‌عنوان نقاط همولوگ است (Zelditch *et al*., 2004). بزرگ‌ترین مزیت این روش حفظ موقعیت هندسی لندمارک‌ها در آنالیز آن‌ها است و این امر، ارائه نتایج را به‌صورت گرافیکی و در قالب شبکه‌های تغییر شکل (Deformations Grids) و Wireframe ممکن می‌کند و تفسیر آن بسیار آسان‌تر از تفسیر جداول ضرایب عددی در روش ریخت‌سنجی سنتی است.

از این‌رو، این پژوهش به‌منظور بررسی کاربرد روش ریخت‌سنجی هندسی در بررسی انعطاف‌پذیری ریختی شکل بدن ماهی گورخری (*A. sophiae*) در دو محیط کاملاً متفاوت آب شیرین و شور به مرحله اجرا درآمد. شناخت این الگوی تفاوت می تواند به درک بهتر علت بروز چنین تفاوت‌های ریختی ناشی از جدایی جغرافیایی و تاثیر فاکتورهای محیطی کمک کند.

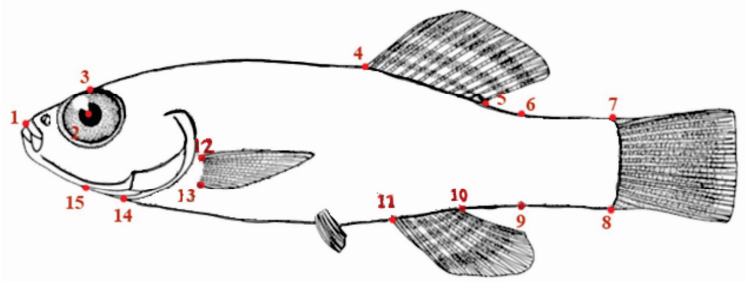
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، در مجموع ۸۶ عدد ماهی گورخری از چشمه علی دامغان (۵۲ قطعه) و رودخانه شور اشتهارد (۳۴ قطعه) با استفاده از تور دستی با چشمه یک میلی‌متر صید شدند. چشمه علی دامغان در موقعیت جغرافیایی '۱۶°۳۶ عرض شمالی و '۰۵ °۵۴ طول شرقی قرار گرفته است. آب این چشمه شفاف و گوارا بوده، بستر آن از تخته سنگ، سنگ، ماسه و پوده پوشیده شده است و پوشش گیاهی آن، گیاهان شناور، غوطه ور و بن در آب را در بر می‌گیرد. رودخانه شور نیز با مشخصات جغرافیایی '۳۶°۳۵ عرض شمالی و '۴۸ °۵۰ طول شرقی قرار گرفته است. بستر این رودخانه از گل بسیار نرم پوشیده شده است که باعث باتلاقی شدن آن می شود. در فصل‌های گرم سال در برخی مناطق پوشش لجنی مشاهده می‌شود و پوشش گیاهی در مناطق کم‌عمق گیاهان بن در آب است. ماهیان پس از صید توسط محلول گل میخک بیهوش و در محلول فرمالین ده درصد بافری تثبیت شدند. تنها ماهیان بالغ هر دو جمعیت برای حداقل کردن تغییرات شکل ناشی از رشد آلومتریک انتخاب شدند.

روش ریخت‌سنجی هندسی روشی بر پایه مختصات لندمارک‌ها می باشد که برای آنالیز تغییرات شکل نمونه‌های مورد مطالعه استفاده می‌شود (Adams *et al*., 2002). از سمت چپ سطح جانبی نمونه‌ها با استفاده از دوربین دیجیتالی کداک با قدرت تفکیک ۶ مگاپیکسل عکس‌برداری شدند. برای استخراج داده‌های شکل در روش ریخت‌سنجی هندسی تعداد ۱۵ لندمارک تعیین شد (شکل ۱). لندمارک‌ها با

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]

استفاده از نرم‌افزار TpsDig2 برروی تصاویر دوبعدی قرار داده شدند (Rohlf, 2006). روی‌هم‌گذاری جایگاه لندمارک‌های نمونه‌ها با استفاده از آنالیز پروکراست به‌منظور حذف تغییرات غیرشکل صورت پذیرفت (Zelditch, 2004). به‌واسطه دوشکلی جنسیتی در گونه مورد مطالعه، جنس‌های نر و ماده به‌طور مجزا با استفاده آنالیزهای چندمتغیره تابع تشخیص (DFA) و T-test هتلینگ با استفاده از نرم‌افزار PAST تحلیل شدند. مصورسازی تغییرات شکل بدن میانگین جمعیت‌ها از شکل میانگین کل (Consensus configuration) با استفاده از نرم‌افزار MorphoJ با استفاده از Wireframe صورت پذیرفت.



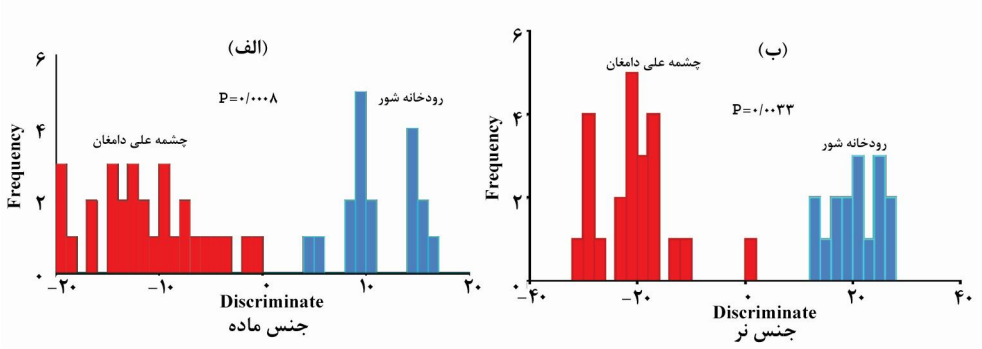
شکل ۱- لندمارک‌های تعیین شده بروی نمونه ماهیان

۱- ابتدایی‌ترین بخش پوزه در قسمت فک بالا؛ ۲- نقطه وسط چشم؛ ۳- امتداد خطی موازی از لندمارک شماره؛ ۲ به سمت بالای بدن؛ ۴- ابتدای قاعده باله پشتی؛ ۵- انتهای قاعده‌ی باله پشتی؛ ۶- قسمت بالایی حداکثر تورفتگی ساقه دمی؛ ۷- انتهایی‌ترین نقطه ساقه دمی؛ ۸- انتهایی‌ترین نقطه ساقه دمی؛ ۹- قسمت پایینی حداکثر تورفتگی ساقه دمی؛ ۱۰- انتهای قاعده‌ی باله‌ی مخرجی؛ ۱۱- ابتدای قاعده باله مخرجی؛ ۱۲- بالاترین‌ترین نقطه قاعده باله سینه‌ای؛ ۱۳- پایین‌ترین نقطه قاعده باله سینه‌ای؛ ۱۴- بخش زیرین سرپوش آبششی و ۱۵- خطی موازی از لندمارک شماره ۲ به سمت پایین بدن.

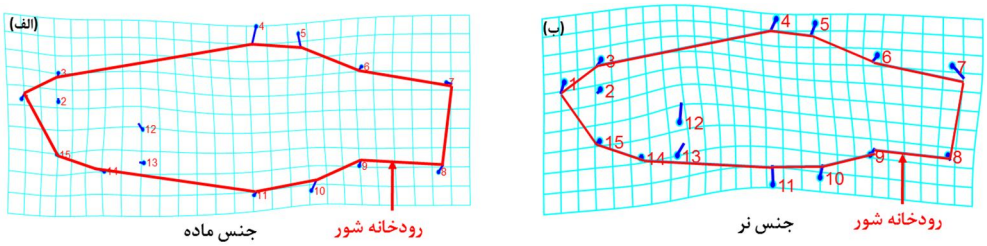
نتایج و بحث

نتایج آنالیز DFA و T-test هتلینگ تفاوت معنی‌داری را بین شکل بدن جنس‌های نر و ماده هر دو جمعیت رودخانه شور اشتهارد و چشمه علی دامغان نشان داد ($P<۰/۰۰۱$) (شکل‌های ۲الف و ب). نتایج آنالیز DFA داده‌های شکل بدن جنس‌های نر و ماده جمعیت‌های بررسی شده در جدول ۱ آورده شده است. براساس الگوهای جابه‌جایی لندمارک‌ها جنس ماده چشمه علی دامغان دارای بدن پهن، ساقه دمی پهن، باله سینه‌ای قدامی و نوک پوزه فوقانی‌تر نسبت به ماهیان رودخانه شور است (شکل ۳الف). مقایسه شکل بدن جنس نر دو جمعیت نیز نشان داد که نمونه‌های چشمه علی دامغان دارای بدن و ساقه دمی پهن‌تر و باله سینه‌ای فوقانی‌تر نسبت به ماهیان رودخانه شور اشتهارد هستند (شکل ۳ب).

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]



شکل ۲–نمودار آنالیز DFA، (الف) شکل بدن جنس‌های نر و (ب) جنس‌های ماده جمعیت‌های *Aphanius sophiae* رودخانه شور اشتهارد و چشمه علی دامغان.



شکل ۳ - مقایسه میانگین شکل بدن جنس‌های (الف) ماده و (ب) نر دو جمعیت رودخانه شور اشتهارد و چشمه علی دامغان با استفاده از شبکه تغییر شکل.

جدول ۱ - نتایج آنالیز DFA داده‌های شکل بدن جنس‌های نر و ماده جمعیت‌های *Aphanius sophiae* رودخانه شور اشتهارد و چشمه علی دامغان.

	بین جنس‌های ماده	بین جنس‌های نر
فاصله پروکراست	۰/۰۳۲	۰/۰۴۶۲
فاصله مهالانوبیس	۴/۷۲۲۴	۶/۳۹۱۸
P-value	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳۳
T-square	۲۴۷/۶۸	۳۸۵/۵۰۱۲

ماهیان با بدن پهن مثل ساکنان چشمه علی دامغان می‌تواند به آرامی در محیط‌های با جریان ضعیف شنا کنند و ماهیانی با ریختی کشیده‌تر توانایی بیشتری برای غلبه بر جریان‌های سریع‌تر از آب مانند رودخانه شور دارند (Black, 1983). باله سینه‌ای فوقانی‌تر در جمعیت رودخانه شور نیز احتمالاً یک مزیت شناگری برای زیستگاه رودخانه‌ای است. شکل بدن در هر دو جنس نر و ماده جمعیت‌های مورد مطالعه

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]

تغییر یافته که این امر جدایی ریختی وابسته به زیستگاه را در جمعیت‌های آن‌ها آشکار می‌سازد. نتایج، همچنین انعطاف‌پذیری ریختی شکل بدن جمعیت‌های مورد مطالعه تحت تاثیر شرایط محیطی زیستگاه‌های آن‌ها را نشان می دهد.

منابع

Adams D.C. Collyer M.L. 2009. A general framework for the analysis of phenotypic trajectories in evolutionary studies. *Evolution*, 63: 1143-1154.

Blake R.W. 1983. Fish locomotion. Cambridge University Press, Cambridge.

Bookstein F.L. 1991. Morphometric tools for landmark data:geometri and biology. Cambridge: Cambrige University Press.

Kuliev Z.M. 1988. Morphometric and ecological characteristics of Caspian Vimba " *Vimba vimba persa*". Journal of Ichthyology, 28: 29-37.

Nicieza A.G. 1995. Morphological variation between geographically disjunct populations of Atlantic salmon: the effects of ontogeny and habitat shift. Functional Ecology, 9: 448-456.

Pavlinov I. Ya. 2001. Geometric morphometrics, a new analytical approach to comparison of digitized images. In: "Information technologies in biodiversity research", St. Petersburg, 2001. P. 40-64.

Rohlf F.J. Marcus L.F. 1993. "A revolution in morphometrics". Trend in Ecology and Evolution, 8: 129-132.

Rohlf F.J. 2006. TpsDig, Version 2.10. Stony Brook: Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook.

Swain D.P. and Foote C.J. 1999. Stocks and chameleons: The use of phenotypic variation in stock identification. Fisheries Research, 43: 113-128.

Tjarks H. 2009. Geometric Morphometric Analysis of Head Shape in *Thamnophis elegans*. A Thesis Presented to the Faculty of California State University, Chico.1-30.

Zelditch M. 2004. Geometric morphometrics for biologists: a primer. Elsevier Academic Press, New York.

[Downloaded from jair.gonbad.ac.ir on 2026-11-16]