Journal of Aquatic Ecology
ISSN Print: 2322-2751 ISSN Online: 2980-9355
Homepage: https://jae.hormozgan.ac.ir

Modeling Reproductive Resilience and Vulnerability of Cyprinids in the Southern Caspian Basin Based on Biological Traits and CMIP6 Scenarios

Adel Hosseinjani[1,2]✉, **Ali Bani**[1,3], and **Majid Vazifedoust**[4]

1. Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
2. Inland Water Aquaculture Center *, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Anzali, Iran.
3. Department of Marine Science, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.
4. Department of Irrigation, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 17 March 2026
Accepted: 17 May 2026
Published: 11 November 2026

Corresponding Author:
a.hosseinjani@areeo.ac.ir

Keywords:
Climate change,
Caspian Sea,
Cyprinidae,
Reproductive Resilience,
Life History traits,
CMIP6 Scenarios.

ABSTRACT

The Caspian Sea, the world's largest landlocked water body, is being severely affected by climate change. In this study, we set out to quantitatively evaluate the reproductive vulnerability and resilience of 13 key cyprinid species facing future climate shifts. We developed a flexible vulnerability assessment framework that combines 21 key life-history traits, grouped into five categories, with climate exposure data from CMIP6 scenarios for 2050 and 2100. A comparison of the two-time horizons showed that by 2100 all species become considerably more vulnerable than by 2050, with the sharpest increases under the pessimistic SSP5-8.5 scenario. The reproductive strategies of the species were classified using principal component and cluster analyses, and the vulnerability and resilience indices were calculated, followed by a sensitivity analysis. The results revealed three distinct reproductive strategies: generalist, river-dependent specialist, and late-maturing opportunistic. The results also showed a significant relationship between strategy and resilience level. Species with a river-dependent specialist strategy, such as *Rutilus frisii* and *Leuciscus aspius*, exhibited very high vulnerability and low resilience. In contrast, the non-native *Carassius gibelio* (abundant in the basin's wetlands) displayed higher resilience, while *Ctenopharyngodon idella* (stocked into basin rivers) showed only moderate resilience despite high fecundity—largely due to its narrow thermal tolerance. Under SSP5-8.5 by 2100, the highest vulnerability (RVI ≥ 0.95) consistently belonged to the native, river-migratory species *Rutilus frisii* and *Leuciscus aspius*. This basin-based ranking provides an operational tool for prioritizing habitat restoration and fisheries management in the southern Caspian Sea basin.

Publisher: University of Hormozgan

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Caspian Sea, the world's largest landlocked body of water, faces severe impacts from climate change, threatening the future of its valuable fish stocks, particularly those belonging to the Cyprinidae family. Understanding and quantifying the vulnerability and resilience of these species to projected climatic shifts is crucial for effective conservation and fisheries management. This study addresses this need by quantitatively assessing the reproductive vulnerability and resilience of 13 key cyprinid species inhabiting the Caspian Sea under future climate change scenarios.

Materials and Methods

A comprehensive vulnerability assessment modeling framework was developed. This framework integrated 21 key life history traits, categorized into five groups: fertility, timing, behavior, distribution, and ecological tolerance. These traits were combined with climate exposure data derived from multiple CMIP6 model scenarios (specifically SSP2-4.5, SSP1-2.6, and SSP5-8.5) for the time horizons of 2050 and 2100. Initially, the reproductive strategies of the 13 studied cyprinid species were classified using a combination of Principal Component Analysis (PCA) and cluster analysis. Subsequently, the Composite Resilience Index (CRI) and Vulnerability Index (VI) were calculated for each species. A sensitivity analysis was performed to identify the parameters exerting the most significant influence on these indices.

Results

The analysis revealed three distinct reproductive strategies among the studied cyprinid species: generalist, river-dependent specialist, and opportunistic with late maturity. Analysis of the Relative Vulnerability Index (RVI) from 2050 to 2100 showed that all species experience increased vulnerability under all three SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5). The greatest increase was observed under the worst-case scenario SSP5-8.5, where the mean RVI rose from 0.27 in 2050 to 0.47 in 2100, and *Leuciscus aspius* reached the highest vulnerability (0.95 by 2100). Furthermore, a significant relationship was identified between these reproductive strategies and the species' overall level of resilience. Species employing river-dependent specialist strategies, exemplified by *Rutilus frisii* and *L. aspius*, exhibited very high vulnerability and low resilience. This was attributed to their strong dependence on specific riverine habitats and the requirement for precise temperature conditions, which are susceptible to climate-induced alterations. Conversely, generalist species, such as *Carassius gibelio*, demonstrated higher resilience due to their greater behavioral and ecological flexibility. A particularly noteworthy finding pertained to species characterized by very high fecundity, like *Ctenopharyngodon idella*. Despite their high reproductive output, these species showed only moderate resilience, primarily due to their limited temperature tolerance range. This finding underscored the critical importance of considering the "combination of traits" rather than relying on a "single trait" when predicting species resilience. The sensitivity analysis corroborated the substantial influence of temperature parameters on both vulnerability and resilience indices. Additionally, the high projected climate velocity within the Caspian region raises concerns regarding the adaptive capacity of species with slower physiological or behavioral responses.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

Conclusion

This study provides a robust, trait-based assessment of reproductive vulnerability and resilience for key Caspian Sea cyprinid species facing climate change. The identified strategies and their associated resilience levels, particularly the nuanced performance of high-fecundity species and the sensitivity to temperature, offer critical insights. Our findings yield a practical, two-index tool: the Relative Vulnerability Index (RVI) and the Composite Resilience Index (CRI). For example, under the high-emission scenario SSP5-8.5 by 2100, *R. frisii* and *L. aspius* show RVI values above 0.68 and 0.94 respectively, placing them in the "very high vulnerability" category. We recommend that fisheries managers: (1) prioritize riverine spawning habitat restoration for these two species, (2) establish a precautionary catch quota for moderate-resilience species like *C. idella*, and (3) maintain or slightly increase harvest of resilient generalists (e.g., *C. gibelio*) while monitoring their population trends. This approach turns climate vulnerability assessments into actionable management thresholds.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

بوم‌شناسی آبزیان
شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۷۵۱ شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۰-۹۳۵۵
https://jae.hormozgan.ac.ir

مدل‌سازی تاب‌آوری و آسیب‌پذیری تولیدمثلی کپور ماهیان در حوضه جنوبی دریای کاسپین بر مبنای ویژگی‌های زیستی و سناریوهای CMIP6

عادل حسین جانی[۱و۲]✉، علی بانی[۱و۳]، مجید وظیفه دوست[۴]

۱. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان.
۲. پژوهشکده آبزی‌پروری آب‌های داخلی، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرانزلی، ایران.
۳. گروه علوم دریایی، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
۴. گروه آبیاری، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۰

✉نویسنده مسئول:
a.hosseinjani@areeo.ac.ir

کلیدواژه‌ها:
تغییرات اقلیمی، دریای کاسپین، کپور ماهیان، تاب‌آوری تولیدمثلی، ویژگی‌های تاریخچه زندگی، سناریوهای CMIP6.

چکیده

دریای کاسپین، بزرگ‌ترین پهنه آبی محصور در خشکی، بسیار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. این پژوهش باهدف ارزیابی کمی آسیب‌پذیری تولیدمثلی و تاب‌آوری ۱۳ گونه شاخص کپور ماهیان در برابر تغییرات اقلیمی آینده انجام شد. یک چارچوب مدل‌سازی ارزیابی آسیب‌پذیری طراحی شد که در آن ۲۱ صفت کلیدی تاریخچه زندگی در پنج گروه، با داده‌های مواجهه اقلیمی سناریوهای مدل CMIP6 برای افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۱۰۰ ترکیب شد. مقایسه دو افق زمانی نشان داد که آسیب‌پذیری همه گونه‌ها در سال ۲۱۰۰ به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ۲۰۵۰ است و این افزایش در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 چشمگیرتر بود. در ادامه استراتژی‌های تولیدمثلی گونه‌ها با تحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌ای طبقه‌بندی شدند و شاخص آسیب‌پذیری و تاب‌آوری محاسبه و تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج، سه استراتژی تولیدمثلی متمایز عمومی گرا، تخصصی وابسته به رودخانه و فرصت‌طلب با بلوغ دیررس را آشکار ساخت. نتایج رابطه معناداری بین استراتژی و سطح تاب‌آوری نشان داد. گونه‌های با استراتژی تخصصی وابسته به رودخانه مانند *Rutilus frisii* و *Leuciscus aspius* آسیب‌پذیری بسیار بالا و تاب‌آوری پایینی داشتند. در مقابل، گونهٔ غیربومی *Carassius gibelio* (فراوان در تالاب‌های حوضه) تاب‌آوری بالاتری داشت، درحالی‌که *Ctenopharyngodon idella* (رهاسازی شده در رودخانه‌های حوضه) باوجود باروری بالا، به دلیل تحمل دمایی محدود، تاب‌آوری متوسطی نشان داد. بیشترین آسیب‌پذیری (RVI ≥ ۰/۹۵) در سناریوی SP5-8.5 تا ۲۱۰۰ مربوط به گونه‌های بومی مهاجر رودخانه–دریا مانند *Rutilus frisii*, *Leuciscus aspius* بود. این رتبه‌بندی مبتنی بر حوضه آبریز جنوبی دریای کاسپین، ابزاری عملیاتی برای اولویت‌بندی بازسازی زیستگاه و مدیریت صید فراهم می‌کند.

ناشر: دانشگاه هرمزگان.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

مقدمه

تغییرات اقلیمی جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و جدی‌ترین تهدیدات برای تنوع زیستی آبزیان شناخته‌شده است (IPCC, 2022). اکوسیستم‌های دریایی ازجمله دریای کاسپین به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی محصور در خشکی جهان، به‌طور ویژه‌ای در معرض پیامدهای ناشی از افزایش دما، تغییرات شوری، اسیدی شدن و نوسانات هیدرولوژیکی قرار دارند (Kosarev and Kostianoy, 2020). این تغییرات می‌توانند مستقیماً بر فیزیولوژی، پراکنش و همچنین تولیدمثل ماهیان که نقشی محوری و اصلی در پویایی جمعیت، ساختار جامعه و درنهایت ثبات اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کند، تأثیر بگذارند (Pankhurst and Munday, 2011). واکنش گونه‌ها نسبت به تغییرات اقلیمی متفاوت است و تلفیق آن با تغییرات شرایط فیزیکی و شیمیایی آب می‌تواند منجر به تغییر زیستگاه در آن‌ها گردد (Markovic *et al*., 2014; Tabasinezhad *et al*., 2024). در این میان، خانواده کپور ماهیان (Cyprinidae) به‌عنوان گروهی بااهمیت اکولوژیک و اقتصادی بالا در دریای کاسپین، سهم غالب در توده زیستی و صید تجاری را به خود اختصاص می‌دهند (Fazli *et al*., 2025). بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری این گونه‌ها در برابر تغییرات احتمالی آینده، پایه‌ای ضروری برای تدوین راهبردهای مدیریتی تطبیقی و حفاظتی محسوب می‌شود.

آسیب‌پذیری یک‌گونه در برابر تغییرات محیطی، تابعی از میزان مواجهه (Exposure) آن با محرک‌ها و عوامل اقلیمی و حساسیت ذاتی (Sensitivity) آن بر اساس ویژگی‌های تاریخچه زندگی (Life-history traits) است (Foden *et al*., 2019). در دهه‌های اخیر، مطالعات گوناگونی با استفاده از ویژگی‌های تاریخچه زندگی مانند سن بلوغ، باروری و رفتار تولیدمثلی، گونه‌های آسیب‌پذیر را شناسایی کرده‌اند. چارچوب نظری Winemiller و Rose (۱۹۹۲) با طبقه‌بندی گونه‌ها در سه استراتژی اصلی تولیدمثلی (تعادلی، دوره‌ای، بهره‌بردار)، ابزار قدرتمندی برای تحلیل الگوهای تاب‌آوری فراهم کرده است. این رویکرد در مطالعات مختلفی برای ارزیابی پاسخ ماهیان به فشارهای صید (Vila-Gispert *et al*., 2002) و تغییرات محیطی (Mims & Olden, 2012) به‌کاررفته است. بااین‌حال، اکثر این مطالعات یا بر پراکنش جغرافیایی آینده گونه‌ها متمرکز بوده‌اند و یا آسیب‌پذیری را تنها بر اساس چند ویژگی محدود ارزیابی کرده‌اند. باوجود پیشرفت‌های چشمگیر، سه شکاف عمده دانشی در حوزه ارزیابی آسیب‌پذیری ماهیان دریای کاسپین قابل‌شناسایی است: ۱) عدم تلفیق جامع صفات زندگی: مطالعات پیشین غالباً بر روی یک یا چند ویژگی کلیدی (مانند دامنه تحمل دمایی ترجیحی) تمرکز داشته‌اند و تحلیل جامعی که طیف وسیعی از صفات تولیدمثلی، رفتاری و اکولوژیک را به‌طور هم‌زمان در یک چارچوب کمی یکپارچه کند، ارائه نشده است. ۲) عدم ارتباط مستقیم با سناریوهای اقلیمی به‌روز پروژه‌های مدل‌سازی گذشته مانند CMIP5 و سناریوهای قدیمی (RCP) دیگر به‌عنوان مرجع پیش‌بینی‌های اقلیمی به‌روز محسوب نمی‌شوند. نیاز مبرمی به استفاده از آخرین خروجی‌های مدل‌های CMIP6 و سناریوهای SSP برای محاسبه شاخص مواجهه وجود دارد (Eyring *et al*., 2016; O'Neill *et al*., 2016). ۳) در بیشتر مطالعات پیشین به شناسایی گونه‌های آسیب‌پذیر بسنده شده و شاخصی ترکیبی برای سنجش تاب‌آوری (Resilience) گونه‌ها به‌عنوان معیاری مکمل ارائه نگردیده است.

برای رفع این شکاف‌ها، تحقیق حاضر بر پایهٔ سه اصل برنامه‌ریزی شد: اول، گردآوری جامع‌ترین مجموعه ممکن از ویژگی‌های تاریخچه زندگی (۲۱ صفت در پنج گروه) از تمام منابع در دسترس شامل پایگاه FishBase، مقالات علمی معتبر و گزارش‌های شیلاتی منطقه‌ای، حتی اگر این داده‌ها برای همه گونه‌ها به یک اندازه کامل نبوده باشند. دوم، استفاده از آخرین خروجی‌های مدل‌های CMIP6 (تحت سه سناریوی SSP خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه) برای افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۱۰۰ و محاسبه شاخص مواجهه با تکیه بر متغیرهای دمایی که در تحلیل حساسیت به‌عنوان بحرانی‌ترین پارامترها شناسایی شدند. سوم، توسعهٔ شاخص ترکیبی تاب‌آوری (CRI) به‌عنوان مکمل شاخص آسیب‌پذیری (VI) که امکان رتبه‌بندی گونه‌ها را بر اساس ترکیب ویژگی‌ها و نه یک ویژگی واحد فراهم می‌کند. به این ترتیب، علیرغم محدودیت‌های داده‌ای، یک چارچوب کمی و استاندارد ارائه‌شده است که قابلیت مقایسه و اولویت‌بندی گونه‌ها را برای مدیریت حفاظتی دارد.

این مطالعه باهدف پر کردن شکاف‌های پژوهشی شناسایی‌شده، مجموعه‌ای از اهداف را دنبال می‌کند. هدف نخست، طبقه‌بندی استراتژی‌های تولیدمثلی ۱۳ گونه شاخص کپور ماهیان دریای کاسپین با استفاده از تحلیل چندمتغیره بر پایه ویژگی‌های زندگی

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

است. در گام بعدی، یک شاخص ترکیبی آسیب‌پذیری با تلفیق شاخص حساسیت برگرفته از ویژگی‌های تولیدمثلی و شاخص مواجهه ناشی از داده‌های اقلیمی آینده تدوین و محاسبه می‌شود. بر مبنای این شاخص، پتانسیل مقاومت گونه‌ها از طریق محاسبه شاخص تاب‌آوری ترکیبی مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار می‌گیرد. دستیابی به این اهداف، ارزیابی کمی جامعی ارائه می‌دهد که می‌تواند به پرسش‌های کلیدی این پژوهش ازجمله اینکه کدام گونه‌ها بر اساس شاخص‌های کمی، بیشترین آسیب‌پذیری و کمترین تاب‌آوری را نشان می‌دهند و کدام صفات زندگی بیشترین سهم را در تعیین حساسیت گونه‌ها دارند؟ پاسخ دهد. مبنای علمی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و مدیریت تطبیقی ذخایر ارزشمند این ماهیان فراهم کند. این پژوهش در منطقه کاسپین، ارزیابی آسیب‌پذیری را با تلفیق مستقیم یک ماتریس گسترده ویژگی‌های زندگی و داده‌های مواجهه اقلیمی از جدیدترین نسل مدل‌ها (CMIP6) در یک چارچوب استانداردشده (چارچوبIPCC) انجام می‌دهد. همچنین توسعه شاخص‌های ترکیبی با معرفی آسیب‌پذیری تلفیقی (VI)، شاخص آسیب‌پذیری نسبی (RVI) و شاخص تاب‌آوری ترکیبی (CRI) به مدیران شیلات و محیط‌زیست، ابزاری عملیاتی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی (مانند احیای مولدین، حفاظت از زیستگاه‌های تخم‌ریزی) و مدیریت صید ارائه می‌دهد. تحلیل عدم قطعیت و اجرای تحلیل حساسیت نیز قابلیت اطمینان نتایج را افزایش داده و به تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت کمک می‌کند .یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی سازگاری در بخش شیلات و حفاظت از گونه‌های کلیدی و ارزشمند در دریای کاسپین مورداستفاده قرار گیرد.

مواد و روش کار

این مطالعه بر روی خانواده کپور ماهیان (Cyprinidae) دریای کاسپین انجام شد. بر اساس بررسی‌های سیستماتیک و در دسترس بودن داده‌های بوم‌شناسی و ویژگی‌های تولیدمثلی، ۱۳ گونه (شامل ترکیبی از گونه‌های بومی و غیربومی معرفی‌شده) که سهم غالب در توده زیستی و صید این دریا در حوضه جنوبی دریای کاسپین را دارند، انتخاب شدند (جدول ۱). معیارهای انتخاب شامل تنوع استراتژی تولیدمثلی، پراکنش گسترده در حوضه، اهمیت اکولوژیک–اقتصادی و همچنین در دسترس بودن داده‌های کافی بود.

جدول ۱- نام علمی گونه‌های خانواده کپور ماهیان (Cyprinidae) دریای کاسپین

ردیف	نام علمی گونه	نام اختصاری گونه	نام عمومی
۱	*Abramis brama*	A.b	سیم
۲	*Alburnus alburnus*	A.a	مروارید ماهی
۳	*Alburnus chalcoides*	A.c	شاه کولی
۴	*Carassius gibelio*	C.g	کاراس
۵	*Ctenopharyngodon idella*	C.i	آمور
۶	*Cyprinus carpio*	C.c	کپور
۷	*Hypophthalmichthys molitrix*	H.m	فیتوفاگ
۸	*Leuciscus aspius*	L.a	ماش
۹	*Luciobarbus capito*	L.c	سس
۱۰	*Rutilus caspicus*	R.c	کلمه
۱۱	*Rutilus frisii*	R.f	ماهی سفید
۱۲	*Tinca tinca*	T.t	لای ماهی
۱۳	*Vimba vimba*	V.v	سیاه کولی

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

برای هر گونه، ۲۱ ویژگی کمی و کیفی مرتبط با استراتژی تولیدمثلی و تاب‌آوری گردآوری شد. این ویژگی‌ها در پنج گروه دسته‌بندی شدند (Winemiller and Rose, 1992): ۱) ویژگی‌های باروری، ۲) ویژگی‌های زمان‌بندی، ۳) ویژگی‌های رفتار و سرمایه‌گذاری، ۴) ویژگی‌های پراکنش و بقا و ۵) ویژگی‌های تحمل اکولوژیک (جدول ۲).

داده‌ها از دو دسته منابع استخراج شدند: الف) مطالعات منطقه‌ای حوضه کاسپین برای اطمینان از انطباق ویژگی‌ها با شرایط بومی (مانند Patimar و همکاران (۲۰۱۰) برای گونه *Alburnus chalcoides*؛ Fazli و همکاران (۲۰۲۵) برای گونه‌های مهاجر ؛ Taridashti و همکاران (۲۰۱۷) برای Vimba vimba؛ و گزارش‌های شیلاتی ایران)؛ و ب) پایگاه‌های داده جهانی شامل FshBase (Froese and Pauly, 2023). برای تکمیل ویژگی‌هایی که داده منطقه‌ای برای آن‌ها در دسترس نبود. برای تحلیل کمی، ویژگی‌های کیفی بر اساس مقیاس‌های استاندارد Winemiller و Rose (1992) کدگذاری عددی شدند. به‌منظور ارزیابی تأثیر احتمالی تفاوت‌های منطقه‌ای، تحلیل حساسیت بر روی ویژگی‌های برگرفته از منابع جهانی انجام شد که پایداری رتبه‌بندی نهایی گونه‌ها را تأیید کرد.

داده‌های دمای سطح آب (SST) از محصولات سنجنده MODIS (Aqua/Terra) و داده‌های بارندگی از مجموعه CHIRPS، همگی با قدرت تفکیک مکانی بالا (۱ تا ۵ کیلومتر) و از طریق پلتفرم Google Earth Engine (GEE) برای حوضه جنوبی کاسپین استخراج شدند (Gorelick *et al*., 2017; Funk *et al*., 2015). اعتبارسنجی محصولات SST سنجنده MODIS برای دریای کاسپین در مطالعات پیشین (Bocharov *et al*., 2025) با ضریب همبستگی ۰/۹۴ تا ۰/۹۶ تأییدشده است. با توجه به قدرت تفکیک بالای داده‌های ماهواره‌ای اصلی، هیچ‌گونه ریزمقیاس نمایی (downscaling) اضافی اعمال نشد و صرفاً درون‌یابی خطی برای یکسان‌سازی سلول‌های شبکه انجام گردید. خلأ داده‌ها برای برخی متغیرها مانند شوری و pH و سال‌ها از منابع معتبر علمی و مطالعات میدانی برطرف شد.

جدول ۲- جدول ویژگی‌های تولیدمثلی کپور ماهیان

ردیف	ویژگی	گروه ویژگی
۱	میانگین هماوری مطلق	ویژگی‌های باروری
۲	قطر تخم	ویژگی‌های باروری
۳	استراتژی تولیدمثل	ویژگی‌های باروری
۴	سن در نخستین بلوغ	ویژگی‌های زمان‌بندی
۵	طول در بلوغ	ویژگی‌های زمان‌بندی
۶	دمای موردنیاز برای تفریخ	ویژگی‌های زمان‌بندی
۷	چرخه تولیدمثلی	ویژگی‌های زمان‌بندی
۸	پیچیدگی رفتار جنسی	رفتار و سرمایه‌گذاری
۹	نوع مراقبت والدینی	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۰	رفتار والدین پس از تولیدمثل	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۱	حداکثر مقدار شاخص گنادوسوماتیک	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۲	تفریخ کامل	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۳	وابستگی به والدین پس از تفریخ/تولد	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۴	مهاجرت‌ها یا حرکات تولیدمثلی	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۵	ساختار و الگوی تخم‌ریزی	رفتار و سرمایه‌گذاری
۱۶	اندازه بدن در مرحله بلوغ	ویژگی‌های پراکنش و بقا
۱۷	حداکثر طول عمر	ویژگی‌های پراکنش و بقا
۱۸	پتانسیل پراکنش در مراحل تخم و لارو	ویژگی‌های پراکنش و بقا
۱۹	منطقه شناوری تخم	ویژگی‌های پراکنش و بقا
۲۰	دامنه تحمل دمایی ترجیحی	ویژگی‌های تحمل اکولوژیک
۲۱	مراحل زیستی رودخانه‌ای–دریایی	ویژگی‌های تحمل اکولوژیک

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

داده‌های تغییرات متغیرهای کلیدی محیطی شامل درجه حرارت سطح آب (SST)، شوری، pH و بارندگی برای محدوده جغرافیایی حوضه جنوبی دریای کاسپین (طول‌های جغرافیایی ۴۹ تا ۵۴ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی)، بر پایه داده‌های تاریخی سال ۲۰۰۰–۲۰۲۴ و برای افق‌های زمانی ۲۰۵۰ و ۲۱۰۰ تحت سه سناریوی مختلف (SSP1-2.6،SSP2-4.5 و SSP5-8.5) از مدل‌های چرخه عمومی (GCMs) پروژه به‌صورت ماهانه CMIP6 استخراج شد. برای تبیین چارچوب طراحی آزمایشی CMIP6 و سناریوهای SSP مورداستفاده قرار گرفت (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016). برای اطمینان از تطابق مکانی با شبکه درشت مدل‌ها، مقادیر سلول‌های شبکه همپوشان با محدوده حوضه جنوبی کاسپین با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی به شبکه یکپارچه تبدیل و میانگین سه سلول دارای بیشترین همپوشانی محاسبه شد. خلأ داده‌های نقطه‌ای برای برخی متغیرها و سال‌ها از منابع معتبر علمی با روش میانیابی کریجینگ تکمیل و در پایان، میانگین تغییرات مطلق و درصدی برای هر متغیر محاسبه شد.

در طبقه‌بندی استراتژی‌های تولیدمثلی از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی ماتریس استانداردشده صفات (۱۳ گونه × ۲۱ ویژگی) برای کاهش ابعاد و شناسایی الگوهای غالب استفاده شد (Vila-Gispert *et al*., 2002; Legendre & Legendre, 2012). سپس تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی بافاصله اقلیدسی و روش ادغام Ward.D2 بر روی امتیازات مؤلفه‌های اصلی باارزش ویژه بالاتر از ۱ انجام گرفت. تعداد بهینه خوشه‌ها با نمودار دندروگرام و روش Elbow تعیین شد (Borcard *et al*., 2018). ارزیابی کمی آسیب‌پذیری با استفاده از چارچوب استاندارد IPCC (۲۰۲۲) با تلفیق شاخص حساسیت (S) و شاخص مواجهه (E) صورت گرفت. شاخص حساسیت از ترکیب خطی وزن‌دار امتیازات استانداردشده ویژگی‌های کلیدی و شاخص مواجهه از ترکیب وزن‌دار تغییرات پیش‌بینی‌شده متغیرهای محیطی در محدوده منطقه موردمطالعه محاسبه شد (Foden *et al*., 2019). شاخص آسیب‌پذیری تلفیقی (IVI) برای هر گونه به‌عنوان میانگین نرمال‌شده امتیازات حساسیت (S_i) و مواجهه (E_i) بر اساس فرمول (۱) محاسبه شد:

$$IVIi = \frac{(Si + Ei)/2 - min(S + E)}{max(S + E) - min(S + E)}$$ رابطه ۱

شاخص آسیب‌پذیری نسبی (RVI) برای مقایسه مستقیم، با نرمال‌سازی مقادیر IVI نسبت به حداکثر مقدار آن بر اساس فرمول (۲) به دست آمد:

$$RVIi = \frac{IVIi}{mmax(IVI)}$$ رابطه ۲

همچنین برای تحلیل حساسیت و عدم قطعیت با استفاده از روش حساسیت مبتنی بر واریانس، تأثیر تغییر در امتیاز هر صفت بر شاخص حساسیت نهایی بررسی و ویژگی‌های کلیدی شناسایی شدند. برای بررسی پایداری رده‌بندی، مدل در ۱۰۰۰ تکرار با وزن‌های تصادفی اجرا شد (Saltelli et al., 2008).

به‌منظور محاسبه و تحلیل آماری تاب‌آوری گونه‌ها شاخص تاب‌آوری ترکیبی (CRI) از ترکیب معکوسIVI ، مقادیر استانداردشده باروری و تحمل محیطی از فرمول (۳) استفاده شد:

$$CRIi = ۱ - IVIi$$ رابطه ۳

که در آن CRI_i و IVI_i به ترتیب شاخص‌های تاب‌آوری و آسیب‌پذیری نرمال‌شده گونه i هستند. گونه‌های با CRI بالاتر از ۰/۶۷ به‌عنوان تاب‌آور، بین ۰/۳۳ تا ۰/۶۷ با تاب‌آوری متوسط و کمتر از ۰/۳۳ به‌عنوان گونه‌های کم تاب آور طبقه‌بندی شدند.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

تفاوت شاخص آسیب‌پذیری بین خوشه‌ها با آنالیز ANOVA یک‌طرفه و پس‌آزمون توکی (Tukey Test) بررسی شد. ارتباط ویژگی‌ها به‌صورت جداگانه با آسیب‌پذیری با ضریب همبستگی پیرسون و برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری بر اساس ترکیب ویژگی‌ها از رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد. تمامی تحلیل‌ها با نرم‌افزار R(نسخه ۴.۵.۱) و بسته‌های vegan، cluster، ggplot2 و sensitivity انجام شد (Borcard *et al*., 2018).

نتایج

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی ۲۱ ویژگی استانداردشده متعلق به پنج گروه اصلی (باروری، زمان‌بندی، رفتار و سرمایه‌گذاری، پراکنش و بقا، تحمل اکولوژیک) انجام شد. دو مؤلفه اول در مجموع ۵۶/۹۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را نشان داد مؤلفه اول (PC1) عمدتاً با صفات گروه تحمل اکولوژیک (مراحل زیستی رودخانه‌ای–دریایی) و زمان‌بندی (دمای موردنیاز برای تفریخ) همبستگی مثبت و قوی نشان داد و به‌روشنی یک طیف از گونه‌های عمومی گرا (وابستگی کم به رودخانه و مهاجرت) تا تخصصی (گونه‌های مهاجر و وابستگی شدید به سیستم رودخانه–دریا) را مشخص کرد. مؤلفه دوم (PC2) عمدتاً با ویژگی‌های گروه زمان‌بندی (سن در نخستین بلوغ) و پراکنش و بقا (اندازه بدن در مرحله بلوغ) همبستگی داشت و محور تغییرات در تاریخچه زندگی (از بلوغ زودرس و اندازه کوچک تا بلوغ دیررس و اندازه بزرگ) را نشان داد (شکل ۱).

تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی ۱۳ گونه موردمطالعه را به سه خوشه متمایز با استراتژی‌های تولیدمثلی متفاوت تقسیم کرد (شکل ۲):

خوشه ۱: استراتژی عمومی گرا (Generalist Strategy)

گونه‌های شاخص در این خوشه عبارت بودند از: *Abramis brama*, *Alburnus alburnus*, *Alburnus chalcoides*, *Carassius gibelio*, *Cyprinus carpio*, *Tinca tinca*

این گونه‌ها پایین‌ترین میانگین را در ویژگی‌های رفتار و سرمایه‌گذاری (پیچیدگی رفتار جنسی) و تحمل اکولوژیک (مراحل زیستی رودخانه‌ای–دریایی) نشان دادند. در مقابل، در ویژگی‌ها زمان‌بندی (سن در نخستین بلوغ) و باروری (اندازه تخم) از انعطاف‌پذیری (دامنه گسترده مقادیر) برخوردار بودند.

خوشه ۲: استراتژی تخصصی وابسته به رودخانه (Fluvial-Specialist Strategy)

گونه‌های شاخص در این خوشه عبارت بودند از: *Leuciscus aspius*, *Luciobarbus capito*, *Rutilus caspicus*, *Rutilus frisii*, *Vimba vimba*

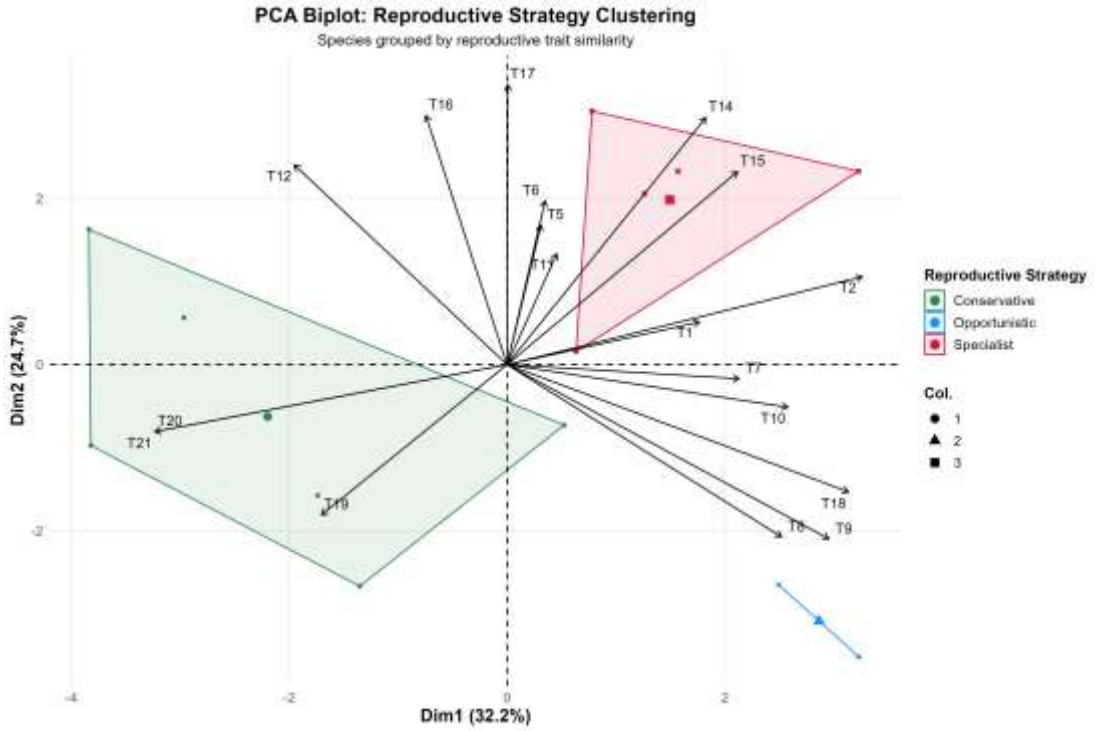
این گونه‌ها بالاترین میانگین را در ویژگی‌های رفتار و سرمایه‌گذاری (پیچیدگی رفتار جنسی) و تحمل اکولوژیک (مراحل زیستی رودخانه‌ای–دریایی) دارا بودند. همچنین تمامی گونه‌های این گروه در ویژگی‌های رفتاری (مهاجرت تولیدمثلی) فعال بودند و به دمای نسبتاً خاصی (دمای موردنیاز برای تفریخ) نیاز داشتند.

خوشه ۳: استراتژی فرصت‌طلب با بلوغ دیررس (Opportunistic Delayed-Maturity Strategy)

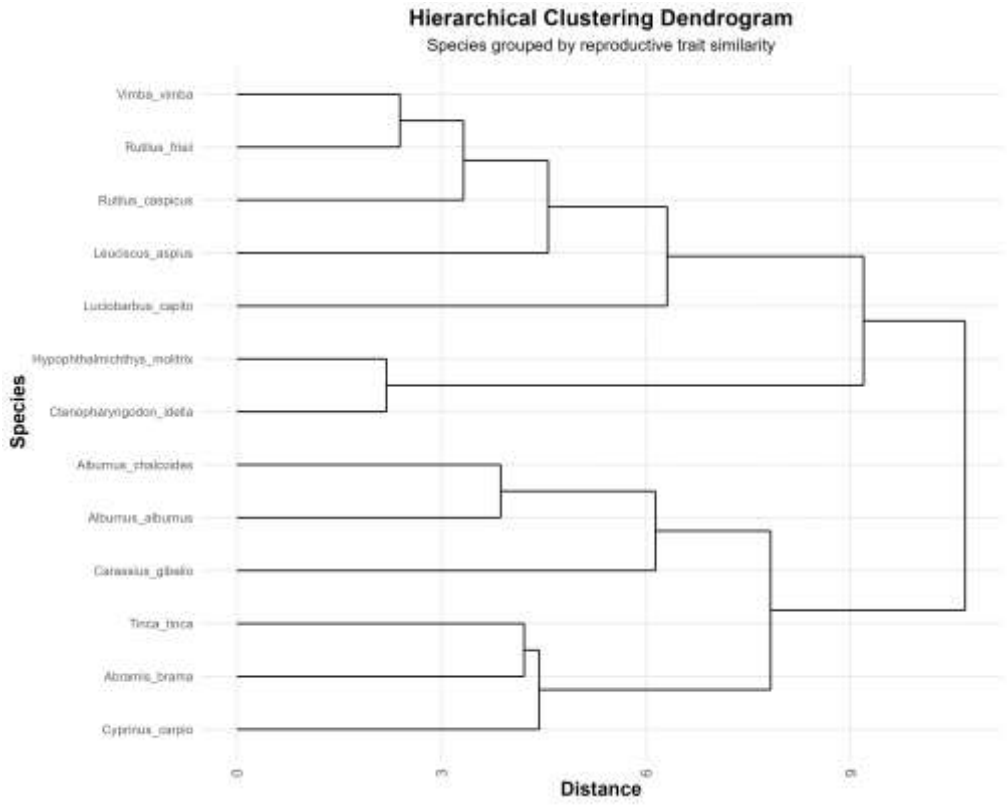
گونه‌های شاخص در این خوشه عبارت بودند از: *Ctenopharyngodon idella*, *Hypophthalmichthys molitrix*

این گونه‌ها دارای حداکثر مقادیر در صفات زمان‌بندی (سن در نخستین بلوغ) و (میانگین هماوری مطلق) بودند. بااین‌حال، در ویژگی تحمل اکولوژیک (دامنه تحمل دمایی ترجیحی) دارای محدوده تحمل باریکی بودند که الگویی مختلط از ویژگی‌های تاریخ زندگی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]



شکل ۱- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) ۲۱ ویژگی مرتبط با استراتژی تولیدمثلی و تاب‌آوری متعلق به پنج گروه اصلی



شکل ۲- خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی گونه‌های موردمطالعه متمایز در استراتژی‌های تولیدمثلی

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

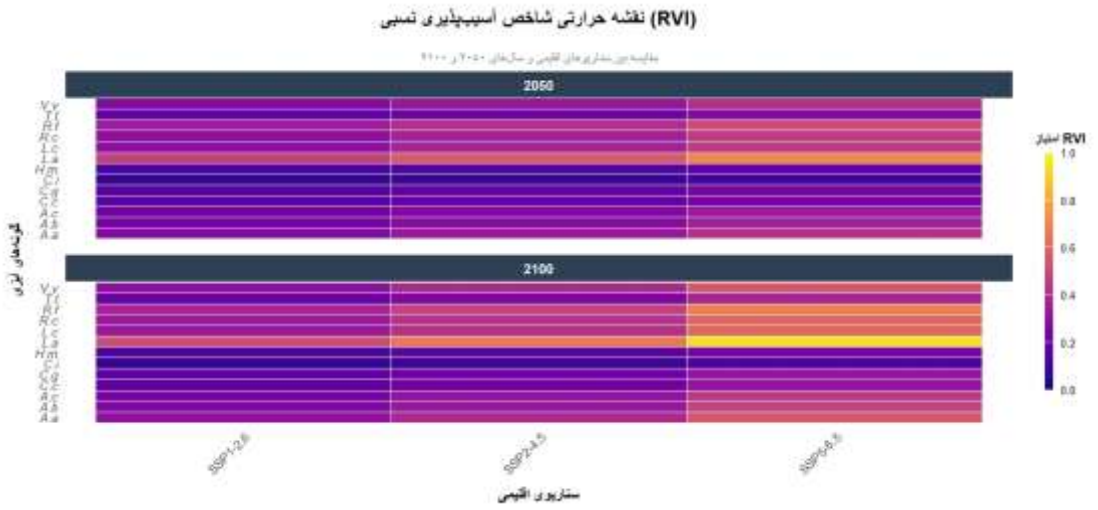
محاسبه شاخص آسیب‌پذیری نسبی (RVI) رابطه معناداری بین الگوی استراتژی تولیدمثلی و تاب‌آوری اقلیمی را آشکار کرد. گونه‌های با آسیب‌پذیری بالا (تاب‌آوری پایین) عمدتاً در خوشه ۲ (تخصصی رودخانه‌ای) متمرکز بودند. برای مثال، *Rutilus frisii* تحت سناریوی SSP5-8.5 در سال ۲۱۰۰ بالاترین مقدار RVI (۰/۶۸) را داشت. این آسیب‌پذیری بالا مستقیماً با ویژگی این خوشه، شامل وابستگی شدید به چرخه رودخانه–دریا (مراحل زیستی رودخانه‌ای–دریایی) و نیاز به شرایط دمایی خاص (دمای موردنیاز برای تفریخ)، مرتبط بود.

نتایج آزمون ANOVA نشان داد که میانگین آسیب‌پذیری یکپارچه بین سطوح مختلف دسته‌بندی یکپارچه تفاوت معنی‌داری داشت ($P <$ ۰/۰۱ ، F =۴۵/۹۴). پس‌آزمون Tukey نیز این تفاوت‌ها را بین تمامی جفت گروه‌های آسیب‌پذیری Low، Medium، Very High تأیید کرد و نشان داد که هر سه سطح ازنظر آسیب‌پذیری به‌طور معنی‌داری متفاوت‌اند.

گونه‌های با تاب‌آوری بالا عمدتاً متعلق به خوشه ۱ (عمومی گرا) بودند. گونه‌هایی مانند *Carassius gibelio* و *Tinca tinca*حتی تحت سناریوی شدید SSP5-8.5 تاب‌آوری متوسط تا بالا را حفظ کردند. نتایج نشان داد انعطاف‌پذیری ذاتی ناشی از ترکیب ویژگی‌های این خوشه (تاریخ زندگی قابل‌تغییر و وابستگی کمتر به فاکتورهای محیطی خاص) عامل کلیدی این موفقیت بود.

گونه‌های با الگوی مختلط در خوشه ۳ دسته‌بندی شدند. دو گونه *Ctenopharyngodon idella*، *Hypophthalmichthys molitrix* باوجود باروری بسیار بالا، به دلیل محدودیت در تحمل اکولوژیک (دامنه تحمل دمایی ترجیحی)، آسیب‌پذیری متوسط تا بالایی نشان دادند. تحلیل همبستگی نیز نشان داد صفات تحمل اکولوژیک (دامنه تحمل دمایی ترجیحی) و پراکنش و بقا (پتانسیل پراکنش در مراحل تخم و لارو) به ترتیب دارای بیشترین همبستگی منفی و مثبت با شاخص آسیب‌پذیری هستند.

بررسی شاخص آسیب‌پذیری نسبی (RVI) در افق زمانی ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ نشان داد که تمامی گونه‌ها تحت هر سه سناریو SSPافزایش آسیب‌پذیری را تجربه می‌کنند (شکل ۳). بیشترین افزایش در سناریو SSP5-8.5 مشاهده شد، به‌طوری‌که میانگین RVIاز ۰/۲۷ در ۲۰۵۰ به ۰/۴۷ در ۲۱۰۰ رسید. گونه *Leuciscus aspius* با کسب امتیاز ۰/۹۵ در سناریوSSP5-8.5 در سال ۲۱۰۰ بالاترین آسیب‌پذیری را نشان داد، درحالی‌که *Ctenopharyngodon_idella* با امتیاز ۰/۱۳ کمترین آسیب‌پذیری را داشت. دو گونه*Ctenopharyngodon_idella* و *Rutilus caspicus* امتیازات کاملاً یکسانی در تمام سناریوها کسب کردند که نشان‌دهنده پروفایل آسیب‌پذیری مشابه این دو گونه است.

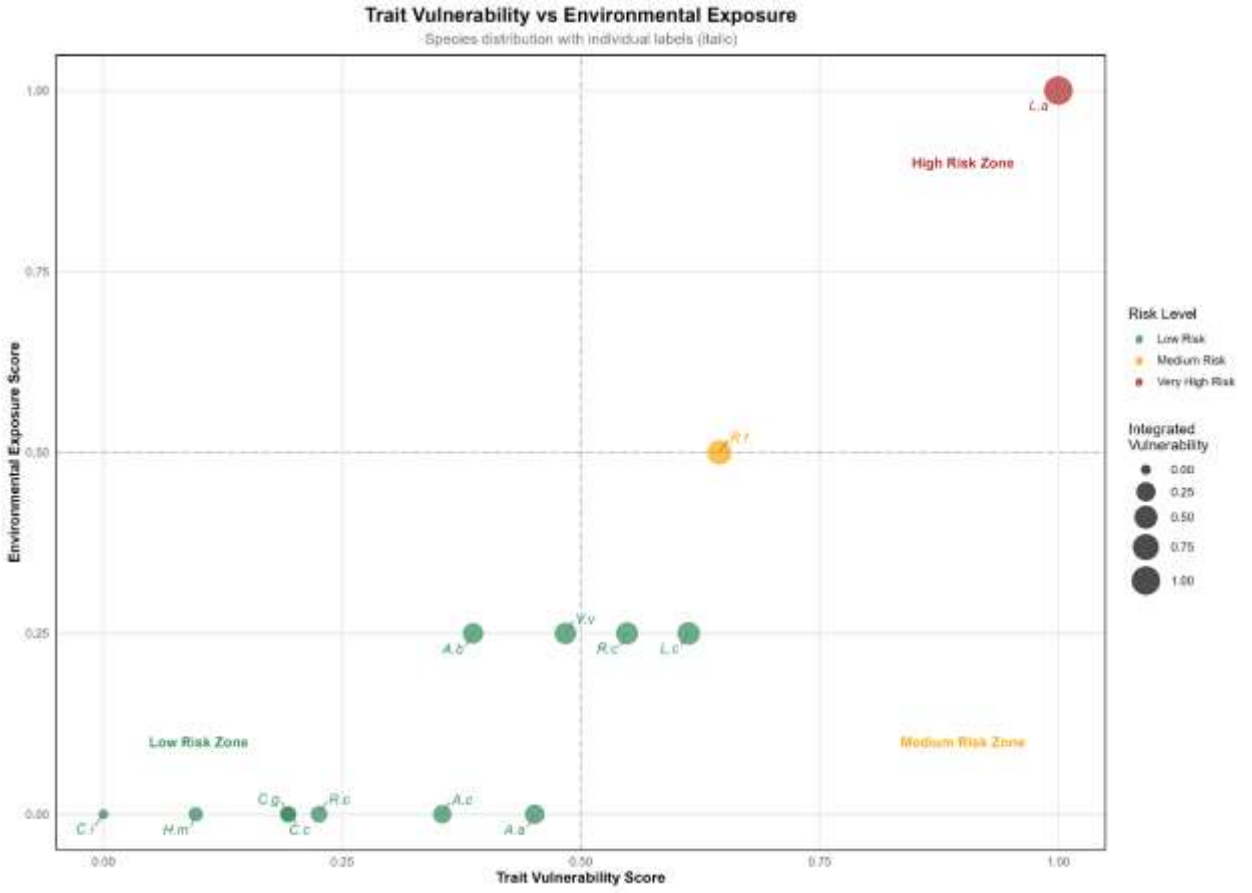


شکل ۳- نقشه حرارتی شاخص آسیب‌پذیری نسبی (RVI) در سناریوهای مختلف اقلیمی افق زمانی ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

تحلیل حساسیت نشان داد که ویژگی " دمای موردنیاز برای تفریخ" با ضریب حساسیت ۰/۳۲ (Sensitivity Coefficient) بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری کلی دارد. پس‌ازآن " دامنه تحمل دمایی ترجیحی" با ضریب حساسیت ۰/۲۴ قرار گرفت. در مقابل، ویژگی "سرمایه‌گذاری والدینی" تأثیر ناچیزی (تقریباً صفر) بر آسیب‌پذیری نشان داد. همچنین نتایج نشان داد تفاوت بین سناریوها در سال ۲۱۰۰ چشمگیر بود. در سناریوی SSP1-2.6 میانگین RVI برابر ۰/۲۷، در SSP2-4.5 برابر ۰/۳۴ و در SSP5-8.5برابر ۰/۴۹ بود.

همبستگی مثبت معنی‌داری ($r = ۰/۸۲$ ، $P < ۰/۰۱$) بین امتیازات آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی و مواجهه محیطی در میان ۱۳ گونه وجود داشت (شکل ۴). گونه *Leuciscus aspius* با حداکثر مقادیر در هر دو بعد قرار دارد (آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی ۱/۰، مواجهه محیطی ۱/۰) که آن را در طبقه آسیب‌پذیری بحرانی قرار می‌دهد. یک الگوی خوشه‌ای مشخص مشاهده می‌شود که در آن ۱۱ گونه در ربع پایین–چپ متمرکزشده‌اند (۰/۵ >آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی، ۰/۳ >مواجهه محیطی) که حساسیت نسبتاً پایین به عوامل استرس‌زای اقلیمی را نشان می‌دهد. الگوی توزیع بیانگر آن است که هیچ گونه‌ای مواجهه محیطی بالا، بدون آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی متناظر نشان نمی‌دهد، این موضوع نشان می‌دهد که ویژگی‌های زیستی ذاتی ممکن است اثرات مواجهه را تحت تأثیر قرار دهد. گونه *Ctenopharyngodon idella* به‌عنوان مرجع پایه با آسیب‌پذیری صفر در تمام معیارها عمل می‌کند.

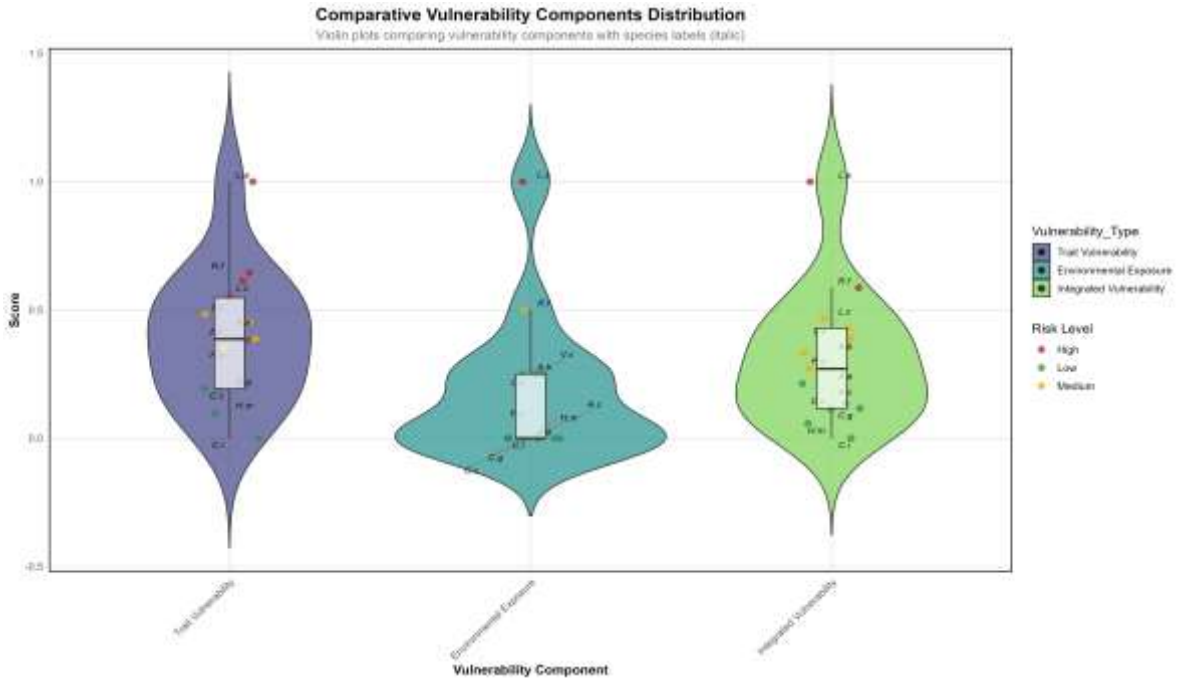


شکل ٤- نمودار همبستگی بین امتیازات آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی و مواجهه محیطی

مقایسه مؤلفه‌های آسیب‌پذیری الگوهای توزیع متمایزی را در معیارهای آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی، مواجهه محیطی و آسیب‌پذیری یکپارچه نشان می‌دهد. آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی وسیع‌ترین دامنه بین چارکی (IQR :۰/۶۱–۰/۲۹) و بالاترین واریانس ($\sigma^2 = ۰/۰۷$) را نشان می‌دهد که بیانگر تفاوت‌های بین‌گونه‌ای قابل‌توجه در حساسیت زیستی است. مواجهه محیطی توزیع

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

شیب تندی را نشان می‌دهد که در آن ۸۴/۶٪ از گونه‌ها (n=۱۱) در نزدیکی مقدار صفر متمرکزشده‌اند، درحالی‌که آسیب‌پذیری یکپارچه الگوی میانی با میانه ۰/۲۷ را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که *Leuciscus aspius* ازنظر آسیب‌پذیری از بقیه گونه‌ها بالاتر است و ازنظر آماری در هر سه مؤلفه یک داده پرت آماری محسوب می‌شود که در هر توزیع بیش از ۱/۵ برابر IQR از حصار بالا فراتر رفته است. شکل شماره ۵ نمودار ویلنی توزیع چندوجهی در آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده گروه‌بندی بالقوه گونه‌ها بر اساس ویژگی‌های حساسیت مشترک است، درحالی‌که مواجهه محیطی تقریباً توزیع پواسون را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار توزیع چندوجهی در آسیب‌پذیری مبتنی بر ویژگی

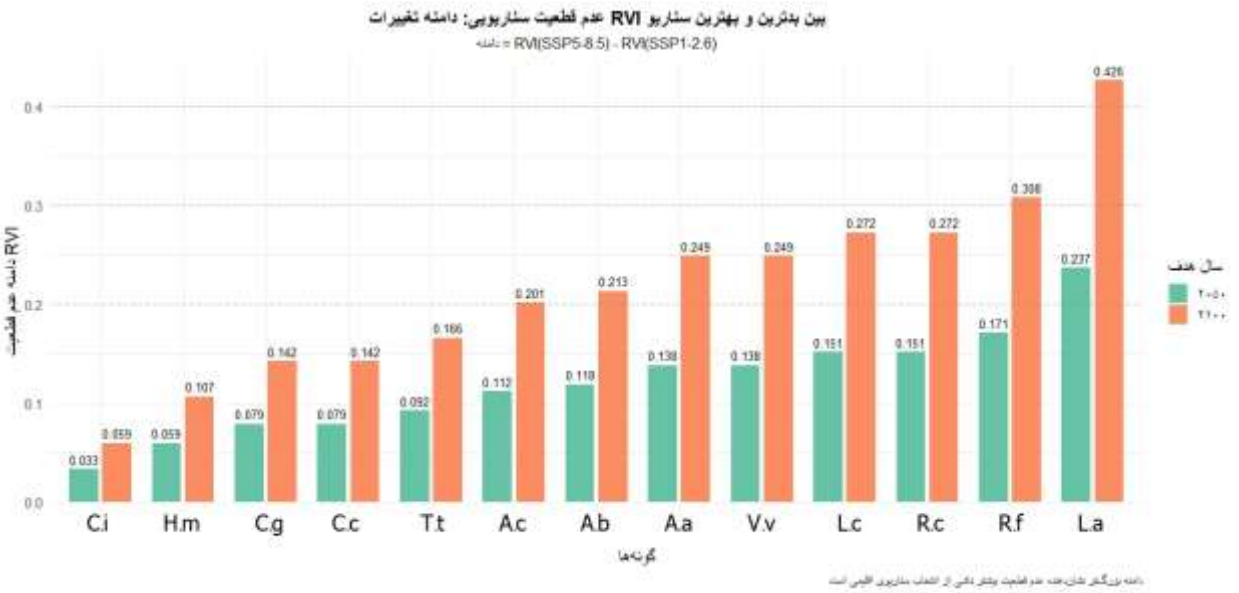
تغییرپذیری آسیب‌پذیری تولیدمثلی (Reproductive Vulnerability Index; R_eVI) تحت سه سناریوی مختلف تغییر اقلیم SSP1-2.6،SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای گونه‌ها بین صفر تا ۱ اندازه‌گیری شد، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر در برابر تغییرات اقلیمی است. شاخص آسیب‌پذیری تولیدمثلی گونه‌ها (R_eVI) در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۱۰۰ که به سه سطح تاب‌آوری بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی شدند، نشان می‌دهد که گونه‌های با تاب‌آوری بالا (مانند *Carassius gibelio*، *Ctenopharyngodon idella* و *Hypophthalmichthys molitrix*) در تمام سناریوها مقادیرR_eVI کمتر از ۰/۳۲ داشتند و حتی در سناریوی شدید SSP5_85 در سال ۲۱۰۰ نیز در طبقه بالا یا متوسط باقی ماندند. گونه‌های با تاب‌آوری متوسط تا پایین (مانند*Leuciscus aspius* و *Rutilus frisii*) با افزایش شدت سناریوها به‌ویژه سناریوی SSP5_85 افت تاب‌آوری قابل‌توجهی داشتند. مقادیرR_eVI گونه *Leuciscus aspius* در سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP5-8.5، به ۰/۹۴ رسید که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بسیار بالا است. همچنین تفاوت واکنش گونه‌ها تحت سناریوهای مختلف قابل‌توجه بود. در سناریوی SSP1_26، تاب‌آوری گونه‌ها در اکثر گونه‌ها حفظ شد؛ اما در سناریوی SSP5-8.5، تقریباً نیمی از گونه‌ها به تاب‌آوری متوسط تا پایین تنزل یافتند.

نتایج سطوح متفاوتی از عدم قطعیت را در پیش‌بینی‌ها آشکار ساخت. محاسبه عدم قطعیت مرکب که تلفیقی از عدم قطعیت ناشی از سناریوهای اقلیمی و حساسیت پارامترهای زیست‌شناختی است گونه‌ها را به سه گروه اصلی تقسیم نمود: گونه‌های با عدم قطعیت پایین (۰/۰۱۹–۰/۰۴۵)، متوسط (۰/۰۵۳–۰/۰۹۹) و بالا (بیش از ۰/۱۳۶). گونه‌های با تاب‌آوری بالا،

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

مانند *Ctenopharyngodon idella* و *Hypophthalmichthys molitrix* در گروه عدم قطعیت پایین قرار گرفتند که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر پیش‌بینی پاسخ این گونه‌ها به تغییرات اقلیمی است. در مقابل، گونه‌های با تاب‌آوری پایین، به‌ویژه *Leuciscus_aspius* با بیشترین مقدار عدم قطعیت مرکب (۰/۱۳۶) همراه بودند که بیانگر ریسک بالا و دشواری پیش‌بینی دقیق وضعیت آینده آن‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم است. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ویژگی‌های با بالاترین سطح عدم قطعیت شامل دمای موردنیاز تفریخ و دامنه تحمل دمایی بودند که بیشترین مقادیر اثر میانگین (به ترتیب ۰/۰۵۸ و ۰/۰۴۶) را نشان دادند. در مقابل، پتانسیل پراکنش لارو و چرخه تولیدمثلی دارای اثرات متوسط و مقادیر کشش حدود ۰/۰۷۳ بودند. درنهایت، سرمایه‌گذاری والدینی با کمترین اثر و کشش (در حد ناچیز) به‌عنوان ویژگی با کمترین حساسیت شناسایی شد.

بررسی عدم قطعیت ناشی از سناریوهای اقلیمی (با محاسبه دامنه تغییر شاخص RVI بین سناریوی خوش‌بینانهSSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5) نشان داد که عدم قطعیت در افق ۲۱۰۰ به‌طور معناداری بیشتر از ۲۰۵۰ است. در سال ۲۱۰۰، دامنه عدم قطعیت سناریو از مقادیر ناچیز (کمتر از ۰/۰۶ برای گونه *Ctenopharyngodon_idella*) تا بسیار بالا (بیش از ۰/۴۲ برای گونه *Leuciscus_aspius*) متغیر بود (شکل ۷). به‌طورکلی، گونه‌هایی که در طبقه تاب‌آوری پایین قرار گرفتند، عمدتاً دارای سطوح متوسط تا بسیار بالای عدم قطعیت سناریو بودند. دو ویژگی "دمای موردنیاز برای تفریخ" و "دامنه تحمل دمایی ترجیحی" باهم بیش از ۵۶٪ از حساسیت کل مدل را به خود اختصاص دادند و در رده "عدم قطعیت بسیار بالا" طبقه‌بندی شدند.



شکل ۷– نمودار عدم قطعیت شاخص RVI بین سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 تا سال ۲۱۰۰

بحث

یافته‌های این مطالعه مبنی بر تفکیک ۱۳ گونه کپور ماهیان کاسپین به سه خوشه استراتژی تولیدمثلی جداگانه (عمومی گرا، تخصصی رودخانه‌ای و فرصت‌طلب با بلوغ دیررس)، همسو با چارچوب نظری بنیادین Winemiller و Rose (۱۹۹۲) است که بر طیف پیوسته (Continuum) استراتژی‌های تاریخچه زندگی تأکید دارد. آنچه نتایج حاضر را برجسته می‌سازد، ارتباط کمّی و معناداری است که بین این استراتژی‌ها و شاخص آسیب‌پذیری تولیدمثلی در برابر تغییرات اقلیمی (R_eVI) مشخص شد. تمرکز گونه‌های با بالاترین آسیب‌پذیری مانند *Rutilus frisii* در خوشه تخصصی رودخانه‌ای، به‌وضوح نشان می‌دهد که ویژگی‌های این خوشه شامل وابستگی شدید به زیستگاه‌های رودخانه‌ای برای تکمیل چرخه زندگی، نیاز به محرک‌های دمایی خاص برای تخم‌ریزی

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

و انجام مهاجرت‌های تولیدمثلی، آن‌ها را در مقابل تغییرات هیدرولوژیکی و گرمایشی آینده به‌شدت آسیب‌پذیر می‌کند (Mims & Olden, 2012). در مقابل، تاب‌آوری بالاتر گونه‌های عمومی گرا (مانند *Carassius gibelio*) را می‌توان به مجموعه‌ای از ویژگی‌های انعطاف‌پذیر گونه ازجمله دامنه وسیع‌تر تحمل اکولوژیک، وابستگی کمتر به محرک‌ها و عوامل محیطی ثابت و تاریخچه زندگی سازگار و قابل‌تغییر نسبت داد. این یافته با مطالعات Foden و همکاران (۲۰۱۹) که انعطاف‌پذیری رفتاری و فیزیولوژیکی را به‌عنوان سپری در برابر تغییرات اقلیمی شناسایی کرده‌اند، همخوانی کامل دارد.

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد که آسیب‌پذیری نهایی یک گونه را نمی‌توان صرفاً بر اساس یک یا دو ویژگی برجسته (مانند هماوری بالا) پیش‌بینی کرد. گونه‌های خوشه فرصت‌طلب مانند *Ctenopharyngodon idella* و *Hypophthalmichthys molitrix* علیرغم هماوری مطلق بسیار بالا، آسیب‌پذیری متوسط تا بالایی نشان دادند .لازم به ذکر است که این دو گونه اگرچه در حوضه آبریز دریای کاسپین حضور دارند، اما عمدتاً از طریق رهاسازی انسانی در استخرهای پرورشی و رودخانه‌ها معرفی‌شده‌اند و در شرایط فعلی حوضه جنوبی کاسپین، شواهد مستندی مبنی بر تکثیر طبیعی موفق آن‌ها وجود ندارد .بااین‌وجود، محدودیت در دامنه تحمل دمایی باعث می‌شود که در صورت مواجهه با تغییرات اقلیمی شدید، آسیب‌پذیری متوسط تا بالایی از خود نشان دهند. این یافته، فرض رایج «هماوری بالا معادل است با تاب‌آوری بالا» را به چالش می‌کشد؛ چراکه همان‌طور که مطالعات جدید نشان داده‌اند، هماوری اگر با حساسیت فیزیولوژیک (مثلاً به دما) همراه باشد، به‌تنهایی ضامن موفقیت نیست (Venturelli *et al*., 2010).

این نتیجه، تأکیدی است بر اصل "سندروم ویژگی‌ها "در بوم‌شناسی تاریخچه زندگی که بر تعاملات و همبستگی‌های پیچیده بین ویژگی‌های مختلف در تعیین موفقیت یک استراتژی در محیط‌های مختلف و اهمیت ترکیب ویژگی‌ها به‌جای تأثیر تک ویژگی در تعیین آسیب‌پذیری تأکید می‌کند (Winemiller & Rose, 1992). تحلیل حساسیت نیز با شناسایی دو ویژگی "دمای موردنیاز برای تفریخ "و "دامنه تحمل دمایی ترجیحی "به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در خروجی مدل، این موضوع را تأیید می‌کند که حساسیت فیزیولوژیکی به دما، عاملی کلیدی و غالب در سرنوشت آینده این ماهیان است. این یافته حاکی از آن است که آسیب‌پذیری گونه‌های موردمطالعه عمدتاً توسط ویژگی‌های مرتبط با دمای محیط تعیین می‌شود. این نتیجه کاملاً با نتایج Pankhurst و Munday (۲۰۱۹) همسو است که اذعان دارد دما پارامتر اصلی کنترل‌کننده فرآیندهای فیزیولوژیک و زمان‌بندی تولیدمثل در ماهیان آب‌های معتدله است.

شناسایی گونه *Ctenopharyngodon idella* به‌عنوان مرجع پایه با آسیب‌پذیری صفر در تمام معیارها نیز احتمالاً نشان‌دهنده تاب‌آوری تطابقی یا حساسیت پایین به تغییرات محیطی پیش‌بینی‌شده در این گونه است که با ویژگی‌های زیستی گزارش‌شده در پایگاه داده FishBase (۲۰۲۶) و پژوهش‌های انجام‌شده توسط Kilambi (۱۹۸۰) همخوانی دارد. این پژوهشگران، دامنه تحمل اکولوژیکی گسترده و تاب‌آوری فیزیولوژیکی بالای این گونه ازجمله دامنه تحمل دمایی ۰ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد (FishBase, 2026)، دامنه تحمل شوری بسیار گسترده تا ۱۰ ppt (Kilambi, 1980) و رشد سریع را به‌عنوان عوامل اصلی موفقیت این گونه در شرایط محیطی متغیر معرفی کرده‌اند. به اعتقاد آن‌ها، توانایی ذاتی این گونه در تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی در برابر تنش‌های محیطی، توجیه‌کننده حساسیت پایین آن در سناریوهای تغییر اقلیم است.

محاسبه عدم قطعیت تلفیقی در این مطالعه، ابعاد مهمی را در نتایج روشن ساخت. این‌که گونه‌های با آسیب‌پذیری بالا (مانند *Leuciscus aspius*) عموماً با سطوح بالای عدم قطعیت همراه بودند، این نکته حاوی یک پیام هشداردهنده برای مدیران و برنامه ریزان شیلاتی برای پیش‌بینی دقیق آینده است که یادآور شود همین گونه‌هایی که بیشترین نیاز به اقدامات حفاظتی فوری دارند با بیشترین چالش‌ها و عدم قطعیت مواجه‌اند (IPCC, 2022). تحلیل منابع عدم قطعیت در مدل حاکی از آن بود که ویژگی‌های فیزیولوژیکی مرتبط با دما نقش چیره‌ای در ایجاد عدم قطعیت دارند. این بدان معناست که دقت پیش‌بینی‌های مدل تا حد زیادی به‌درستی محاسبه و برآورد این پارامترهای حساس وابسته است. در مقابل، پارامترهایی مانند "سرمایه‌گذاری والدینی" تأثیر ناچیزی داشتند؛ بنابراین، عدم قطعیت کلی در ارزیابی تاب‌آوری، تلفیقی از عدم قطعیت در سناریوهای آینده اقلیمی، داده‌ها و یا دانش ناقص موجود درباره واکنش‌های فیزیولوژیک کلیدی گونه‌ها به دما است؛ بنابراین نتایج عدم قطعیت به‌صورت دوگانه قابل

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

تفسیر است: نخست، عدم قطعیت ذاتی در سناریوهای اجتماعی–اقتصادی آینده (SSP ها) که با افزایش افق زمانی (۲۰۵۰ به ۲۱۰۰) تشدید می‌شود؛ و دوم، کمبود داده‌های دقیق و منطقه محور درباره ویژگی‌های فیزیولوژیک کلیدی گونه‌ها، به‌ویژه در مراحل حساس لاروی و جوانی. این یافته بر لزوم انجام پژوهش‌های پایه‌ای فیزیولوژیک و بوم‌شناختی بر روی گونه‌های بومی دریای کاسپین برای دسته‌بندی دقیق ویژگی‌های گونه‌ها برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها تأکید می‌کند (Saltelli *et al*., 2008).

تفاوت میانگین RVI بین سناریوهای اقلیمی در سال ۲۱۰۰ نشان داد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند آسیب‌پذیری اکوسیستم را تا ۴۵٪ کاهش دهد که با نتایج مطالعه Cheung و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. پژوهش مذکور نیز نشان می‌دهد که پیروی از سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه و محدود کردن گرمایش زمین، می‌تواند تأثیرات مخرب بر ذخایر ماهیان و پویایی جمعیت‌های آبزیان را به میزان قابل‌توجهی تعدیل کند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با تلفیق یک ماتریس جامع از ویژگی‌های تاریخچه زندگی و داده‌های پیش‌بینی‌شده اقلیمی از نسل ششم مدل‌های CMIP6، موفق به ارائه یک ارزیابی کمّی و مبتنی بر شواهد از آسیب‌پذیری تولیدمثلی کپور ماهیان بااهمیت دریای کاسپین در برابر تغییرات اقلیمی شد. نتایج به‌روشنی نشان داد که آسیب‌پذیری به‌طور نامتوازن بین گونه‌ها توزیع‌شده و به‌شدت با استراتژی تولیدمثلی آن‌ها مرتبط است. گونه‌های تخصصی گرا و وابسته به سیستم رودخانه–دریا، با ریسک بالاتر و عدم قطعیت پیش‌بینی بیشتری مواجه هستند. در نقطه مقابل، گونه‌های عمومی گرا با ویژگی‌های انعطاف‌پذیر، پتانسیل بالاتری برای تاب‌آوری و سازگاری نشان می‌دهند. بااین‌حال، این تاب‌آوری ذاتی نباید منجر به غفلت از مدیریت خردمندانه ذخایر آن‌ها شود؛ بنابراین اولویت‌بندی حفاظتی برای گونه‌های خوشه تخصصی رودخانه‌ای (مانند *Leuciscus aspius*, *Rutilus frisii* و *Vimba vimba*) باید در صدر فهرست اقدامات حفاظتی فوری قرار گیرند. حفاظت و احیای مسیرهای مهاجرت و زیستگاه‌های تخم‌ریزی آن‌ها از هر اقدامی حیاتی‌تر است. همچنین تمرکز بر مدیریت صید گونه‌های عمومی‌گرای تاب آور (مانند Carassius *gibelio*) ممکن است در کوتاه‌مدت با افزایش فشار صید مواجه شوند. ضروری است سهمیه‌های صید ورزشی و مبتنی بر پایش مداوم وضعیت ذخایر این گونه‌ها تنظیم شود تا از فرسایش این ذخیره تاب آور جلوگیری شود. کاهش ریسک آینده از طریق گذار از مدیریت تک‌گونه‌ای سنتی به سمت مدیریت اکوسیستم‌محور انطباقی است که بر حفظ پیوند حیاتی رودخانه–دریا، کاهش فشارهای غیر اقلیمی (مانند آلودگی و تخریب زیستگاه) و تقویت پایش هدفمند و بلندمدت مبتنی بر شاخص‌های کلیدی در تحلیل حساسیت (مانند دمای تفریخ) باید به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در برنامه‌های پایش زیستی و مدیریت دریای کاسپین گنجانده شوند. همچنین با توجه به پیش‌بینی تغییرات گسترده در شرایط محیطی دریای کاسپین و حوضه آبریز آن، تعیین مناطق حفاظت‌شده ثابت ممکن است کارایی خود را از دست بدهند. لازم است چارچوبی انعطاف‌پذیر با بهره‌گیری از الگوهای موفق در دنیا و مناطق حفاظت‌شده پویا (Dynamic MPAs) برای مدیریت فضایی طراحی شود که بتواند با تغییرات احتمالی مناطق با کیفیت زیستگاهی مناسب همراهی کند. تنها از این طریق می‌توان ظرفیت سازگاری این اکوسیستم ارزشمند و ذخایر ماهیانی که معیشت حاشیه‌نشینان به آن وابسته است را در قرن پیش‌رو حفظ کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت‌های دانشگاه گیلان به‌ویژه گروه زیست‌شناسی دریا انجام‌شده است. قدردان همه عزیزانی هستیم که در مراحل اجرای پژوهش یاری‌مان کردند.

References

Bocharov, A.V., Kostianoy, A.G., Lebedev, S.V., Grebenikov, D.A. and Kravchenko, P.N. 2025. 'Assessment of the accuracy of retrieval of the Caspian Sea surface temperature from the MODIS data based on SVPB drifter measurements', *Ecologica Montenegrina*, 85, pp. 107–118. https://doi.org/10.37828/em.2025.85.6

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

Borcard, D., Gillet, F. and Legendre, P. 2011. 'Association measures and matrices', *in Numerical Ecology with R*. New York, NY: Springer, pp. 31–51. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7976-6

Cheung, W.W., Reygondeau, G. and Frölicher, T.L. 2016. 'Large benefits to marine fisheries of meeting the 1.5 °C global warming target', *Science*, 354(6319), pp. 1591–1594. https://doi.org/10.1126/science.aag2331

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E. 2016. 'Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization', *Geoscientific Model Development*, 9(5), pp. 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

FAO, 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: *Towards Blue Transformation*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc0461en

Fazli, H., Kumar, S., Rezamand, A., Daryanabard, G. and Kaur, S. 2025. 'Caspian Sea fisheries under threat from marine heatwaves', *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 313, article 109122. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.109122

FishBase, 2026. *Ctenopharyngodon idella* (Valenciennes, 1844), grass carp. Available at: https://www.fishbase.se/summary/Ctenopharyngodon-idella.html (Accessed: 30 April 2026).

Foden, W.B., Young, B.E., Akçakaya, H.R., Garcia, R.A., Hoffmann, A.A., Stein, B.A., Thomas, C.D., Wheatley, C.J., Bickford, D., Carr, J.A., Hole, D.G., Martin, T.G., Pacifici, M., Pearce-Higgins, J.W., Platts, P.J., Visconti, P., Watson, J.E.M. and Huntley, B. 2019. 'Climate change vulnerability assessment of species', *WIREs Climate Change*, 10(1), article e551. https://doi.org/10.1002/wcc.551

Froese, R. and Pauly, D. (eds.), 2023. *FishBase*. World Wide Web electronic publication. Available at: https://www.fishbase.org/ (Accessed: 30 April 2026).

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. and Michaelsen, J. 2015. 'The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes', *Scientific Data*, 2, article 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. 2017. 'Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone', *Remote Sensing of Environment*, 202, pp. 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

IPCC, 2022. Climate Change 2022: *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Kilambi, R.V. 1980. 'Food consumption, growth and survival of grass carp Ctenopharyngodon idella Val. at four salinities', *Journal of Fish Biology*, 17(6), pp. 613–618. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1980.tb02794.x

Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G., Zonn, I.S. and Zhiltsov, S.S. 2013. 'The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay', in Zonn, I.S. and Kostianoy, A.G. (eds.) *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan*. Berlin and Heidelberg: Springer, pp. 69–94. https://doi.org/10.1007/698_2013_228

Legendre, P. and Legendre, L. 2012. Numerical Ecology. 3rd English edn. Amsterdam and Boston: Elsevier. (*Developments in Environmental Modelling*, 24). ISBN: 978-0-444-53868-0

Markovic, D., Carrizo, S., Freyhof, J., Cid, N., Lengyel, S., Scholz, M., Kasperidus, H. and Darwall, W. (2014) 'Europe's freshwater biodiversity under climate change: Distribution shifts and conservation needs', *Diversity and Distributions*, 20(9), pp. 1097–1107. https://doi.org/10.1111/ddi.12232

Mims, M.C. and Olden, J.D. 2012. 'Life history theory predicts fish assemblage response to hydrologic regimes', *Ecology*, 93(1), pp. 35–45. https://doi.org/10.1890/11-0370.1

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K. and Sanderson, B.M. 2016. 'The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6', *Geoscientific Model Development*, 9(9), pp. 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]

Pankhurst, N.W. and Munday, P.L. 2011. 'Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages', *Marine and Freshwater Research*, 62(9), pp. 1015–1026. https://doi.org/10.1071/MF10269

Patimar, R., Ezzati, M. and Sarli, J. 2010. 'Life-history aspects of Caspian Shemaya Alburnus chalcoides in two south Caspian rivers (Siahroud and Gorganroud)', *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 10(2), pp. 277–285. https://doi.org/10.4194/trjfas.2010.0217

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S. 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer.* Chichester: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-05997-

Tabasinezhad, N., Mosavi-Sabet, H. and Mostafavi, H. 2024. 'Modeling the effects of climate change on the distribution of bighead goby Ponticola gorlap (Iljin, 1949) in the southern basin of the Caspian Sea', *Journal of Aquatic Ecology*, 14(1), pp. 47–56. Available at: https://jae.hormozgan.ac.ir/article-1-1176-en.html (Accessed: 30 April 2026).

Taridashti, F., Imanpour, J., Abdolmalaki, S. and Hadavi, M. 2017. 'Life history traits and fishing mortality estimations of Caspian vimba, Vimba vimba (L.), in southwestern coastal regions of the Caspian Sea', *Archives of Polish Fisheries*, 25(3), pp. 145–155. https://doi.org/10.1515/aopf-2017-0014

Venturelli, P.A., Murphy, C.A., Shuter, B.J., Johnston, T.A., Van Coeverden de Groot, P., Boag, P.T., Casselman, J.M., Montgomerie, R., Wiegand, M.D. and Leggett, W.C. 2010. 'Maternal influences on population dynamics: Evidence from an exploited freshwater fish', *Ecology*, 91(7), pp. 2003–2012. https://doi.org/10.1890/09-1079.1

Vila-Gispert, A., Moreno-Amich, R. and Garcia-Berthou, E. 2002. 'Gradients of life-history variation: An intercontinental comparison of fishes', *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12(4), pp. 417–427. https://doi.org/10.1023/A:1025352026974

Winemiller, K.O. and Rose, K.A. 1992. 'Patterns of life-history diversification in North American fishes: Implications for population regulation', *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(10), pp. 2196–2218.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-24]