

Mathematical individual-based model for habitat suitability simulations

Mahboobeh Hajiesmaeili^{1*}, Seyed Ali Ayyoubzadeh², Asghar Abdoli³

¹Postdoctoral researcher, Department of Environmental and Life Sciences, River Ecology and Management Research Group (RivEM), Karlstad University, Karlstad, Sweden

²Professor of Sediment and River Engineering, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Professor, Department of Biodiversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: hajiesmaeili@modares.ac.ir

Received: 18 Nov. 2021
Accepted: 18 Jan. 2022



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Individualistic mathematical models based on bioenergy theory are the latest research in modeling river habitats. This study explains the principles and method of individualistic population modeling based on bioenergy theory. Moreover, it presents the application of the model in the evaluation of red-trout habitats of the Red River in the National Park. Investigating the capabilities of the individualistic inSTREAM model as well as the results of bioenergy modeling presented in the present study showed that modeling presented in this study can make changes in different types of growth and habitat quality, as well as areas for biomonths with respect to both Biological and non-biological factors were used to distribute energy in the management and engineering of river ecosystems and to estimate ecological flows. This model is also applicable in the field of fisheries and aquaculture in order to provide more fish production and sustainable use of these resources assessment.

Keywords: Individual-based modeling (IBM), River habitats, Bioenergetics theory, inSTREAM, Brown trout, Elarm River.

Introduction: Mechanistic, individual-based simulation models (IBMs) have been developed to overcome well-known limitations of “habitat suitability” models such as PHABSIM (Bovee et al., 1998). InSTREAM is an individual-based stream salmonid population model designed to support river management decisions; it predicts how stream trout populations respond to habitat alteration, including altered flow, temperature, turbidity regimes, and changes in channel morphology. The model represents individual trout, with population responses emerging from how individuals are affected by their habitat and each other (especially via competition for food). Since its initial release in 2001 (Railsback and Harvey, 2001), its capabilities have been steadily developing. InSTREAM has been shown to reproduce a variety of observed patterns in salmonid behavior (e.g., Harvey and Railsback, 2014; Penaluna et al. 2015, Bjørnås et al. 2020, Hajiesmaeili, 2019). This study represents pioneering work that applies inSTREAM as an IBM in Iran for river habitat assessment of trout populations.

Methodology: The process overview and the schedule executed in inSTREAM are represented by introducing the four main action groups, including habitat, fish, redd (the nests laid by spawning trout), and observer. We use an example application of the model for brown trout populations in Elarm River, Lar National Park of Iran to illustrate how inSTREAM can provide a more comprehensive understanding of river habitat assessment and management actions. To investigate the temporal variations of fish growth and how different parameters such as flow, velocity, and water temperature affect the growth variations, the monthly time series of the average specific growth rate is evaluated in terms of both length and weight. In addition, the quality of the Elarm River habitats is also assessed by examining the temporal variations in the net rate of energy intake (NREI) against mean monthly discharge per unit width that indicates the combined effects of both depth and velocity for both juvenile and adult life stages of the target species. We also develop the flow-bioenergetics (Q-NREI) curve for Elarm River to assess the range of optimal energy flow and energy variation in the actual existing condition of the river.

Results and Discussion: Our results indicated that in spring, especially during the two months of May and June, the growth rate of the fish decreased due to an increase in the flow rate and consequently the flow velocity and the increase in temperature during this time period also in the summer. Increasing discharge, flow velocity, and temperature will increase energy consumption of fish metabolism, which will lead to a decrease in growth. The growth of the juvenile life stage was more than adult. It is likely because the fish are growing at younger ages, and they need more energy to meet their physical energy demands, so they feed more. The decline in fish growth at older ages is presumably because they need less food which reduces their energy requirement to the extent that it is only required for vital functions and reproduction. During the two months of May and June NREI also decreased, and this value is negative for the adult life stage. In other words, energy consumed for metabolism used for fish respiration and swimming was more than the energy intake from food. Because this parameter depends on the length and weight of the fish and with increasing fish weight at older ages, the energy consumed will increase, thus making NREI negative. Moreover, our results showed that the flow range of 0.22-0.31 m³/s can be considered the optimal energy flow for Elarm River to maintain the sustainability of the river ecosystem.

Conclusion: Considering the key habitat variables affecting individuals and the mechanisms through which those variables affect individual fitness (growth, survival and reproduction), an IBM like inSTREAM can predict population responses by aggregating the fates of simulated individuals over time. A key feature of IBMs is representing adaptive behavior: how individuals trade off the conflicting demands of growth, survival, and reproduction through behaviors such as selecting where to feed and when to hide instead of feeding. IBMs using this approach can predict population responses to realistically varying habitat conditions, making results directly applicable to management decisions and testable against field observations.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدل ریاضی فردگرا در شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه‌های رودخانه‌ای

محبوبه حاجی اسماعیلی^{۱*}، سید علی ایوب زاده^۲، اصغر عبدلی^۳

۱- دانش‌آموخته دکترای گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس و پژوهشگر پسادکترای گروه اکولوژی و مدیریت رودخانه، دانشگاه کارلستاد، سوئد

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: hajiesmaeli@modares.ac.ir

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

چکیده: مدل‌های ریاضی فردگرای مبتنی بر تئوری بیوانرژی به عنوان آخرین تلاش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای در علم اکوهیدرولیک مطرح می‌باشند. فرض اصلی این نوع مدل‌ها بر این است که خصوصیات جمعیت ماهی از رشد، بقا و تولید مثل افراد ناشی می‌شود و فرآیندهای مبتنی بر خصوصیات فردی نیز تحت تأثیر شرایط اکوهیدرولیکی زیستگاه و میزان انرژی دریافتی و مصرفی ماهی می‌باشد. در تحقیق حاضر که از اولین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد مدل‌های فردگرا به منظور شبیه‌سازی و ارزیابی مطلوبیت زیستگاه‌های رودخانه‌ای در ایران می‌باشد، با معرفی و کاربرد مدل ریاضی inSTREAM به تشریح مبانی و روش مدل‌سازی فردگرای جمعیت ماهی بر مبنای تئوری بیوانرژی پرداخته شده است. همچنین به منظور آشنایی با نتایج حاصل از مدل‌سازی، بخش‌هایی از نتایج کاربرد مدل در ارزیابی زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز رودخانه‌ی ارم در پارک ملی لار ارائه شده است. بررسی قابلیت‌های مدل فردگرای inSTREAM و نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های بیوانرژی ارائه‌شده در تحقیق حاضر نشان داد که با استفاده از رویکرد مدل‌سازی معرفی‌شده در این تحقیق می‌توان تغییرات زمانی رشد گونه و کیفیت زیستگاهی، و نیز مناطق بهینه برای زیست ماهی را با توجه به تأثیر توأمان عوامل زیستی و غیر زیستی بر توزیع انرژی در رودخانه تعیین نمود و از آن در مدیریت و مهندسی اکوسیستم رودخانه و نیز تخمین جریان‌ات اکولوژیک بهره گرفت. این مدل همچنین در زمینه شیلات و آبی‌پروری به منظور فراهم نمودن تولید بیشتر ماهی و بهره‌برداری پایدار از این منابع پروتئینی تجدیدپذیر، کاربردی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی فردگرا، زیستگاه‌های رودخانه‌ای، تئوری بیوانرژی، مدل inSTREAM، قزل‌آلای خال‌قرمز،

رودخانه‌ی ارم

مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای و ارزیابی اکوسیستم رودخانه ارائه شده است. از اولین و رایج‌ترین مدل‌های مرسوم مطلوبیت زیستگاهی می‌توان به مدل PHABSIM¹

۱- مقدمه

تا به امروز مدل‌های مختلفی در سطح بین‌المللی به منظور

مدیریت زیستگاه‌های رودخانه‌ای، مدل inSTREAM² می‌باشد که توسط Railsback و همکاران به منظور پیش‌بینی پاسخ اکولوژیکی جمعیت ماهی به تغییرات متعدد زیست‌محیطی و بیولوژیکی شامل تغییرات رژیم جریان، دما و کدورت، و نیز شکار، رقابت بین گونه‌ای و فراهمی تغذیه توسعه داده شده است و از زمان ایجاد نسخه^۱ اولیه آن در سال ۲۰۰۱ (Railsback and Harvey, 2001) قابلیت‌های آن به‌طور پیوسته در حال توسعه می‌باشد. مدل inSTREAM یک مدل جمعیتی ماهی قزل‌آلا و مبتنی بر خصوصیات فردی در زمینه مدل‌سازی دینامیک جمعیت گونه هدف می‌باشد و فرض اصلی مدل بر این است که این خصوصیات از رشد، بقا و تولیدمثل افراد ناشی می‌شود، درحالی‌که فرآیندهای مبتنی بر خصوصیات فردی نیز تحت تأثیر شرایط اکوهیدرولیکی زیستگاه و میزان انرژی دریافتی و مصرفی ماهی می‌باشد (Railsback et al., 2009, 2012). در توسعه مدل inSTREAM با در نظر گرفتن توأمان عوامل زیستی و غیر زیستی و نیز کاربرد تئوری بیوانرژی در مدل‌سازی رشد سعی شده است تا محدودیت‌های مدل‌های مرسوم شبیه‌سازی زیستگاه رفع گردد.

در تحقیق حاضر که از اولین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کاربرد مدل‌های فردگرا به منظور شبیه‌سازی و ارزیابی مطلوبیت زیستگاه‌های رودخانه‌ای در ایران می‌باشد، با کاربرد مدل ریاضی inSTREAM به تشریح مبانی و روش مدل‌سازی فردگرای جمعیت ماهی بر مبنای تئوری بیوانرژی پرداخته می‌شود. همچنین به‌منظور آشنایی با نتایج حاصل از مدل‌سازی، بخش‌هایی از نتایج کاربرد مدل در ارزیابی زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز رودخانه‌الرم در پارک ملی لار ارائه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مبانی مدل‌سازی فردگرا و معرفی مدل ریاضی inSTREAM

مدل‌سازی فردگرا به‌عنوان رویکردی نوین در زمینه

(Bovee et al., 1998; Waddle 2001) اشاره کرد. فرض اصلی این نوع مدل‌ها که مورد انتقاد محققین مختلفی قرار گرفته است (Mathur et al., 1985; Orth, Shirvell, 1986)، برقراری رابطه مستقیم بین مساحت مطلوب زیستگاهی و پاسخ بیولوژیکی گونه یا به‌بیان‌دیگر بیومس ماهی می‌باشد و مطلوبیت بیشتر را فرضی برای وجود تراکم بیشتر قرار می‌دهند و رابطه خطی میان این دو پارامتر را می‌پذیرند (Anderson et al., 2006). زیرا این روش‌ها تنها تأثیر عوامل غیر زیستی (مانند فیزیک زیستگاه) را در ارزیابی وضعیت اکولوژیکی زیستگاه مورد بررسی قرار می‌دهند. درحالی‌که زیستگاه آبزبان رودخانه‌ای به لحاظ تأثیر پارامترهای مختلف بسیار پیچیده می‌باشد و پارامترهای مختلف زیستی و غیر زیستی به‌طور همزمان بر شرایط زیستی آبزبان و پراکنش آن‌ها در رودخانه تأثیرگذار می‌باشند و در واقع تأثیر همزمان پارامترهای مهم دیگر مانند تغذیه، شکار و رقابت بین گونه‌ای نیز غیر قابل انکار است (Railsback, 2016; Railsback et al., 2021). همچنین مطابق با فرضیه^۱ ارائه‌شده توسط Quist and Hubert (2005) حتی در زمانی که شرایط غیرزیستی مناسب باشد تعاملات زیستی مانند رقابت بین گونه‌ای، خطر شکار و تغذیه می‌تواند اثر منفی قابل ملاحظه‌ای بر انتخاب زیستگاه یک گونه داشته باشد. علاوه بر این، معیارهای مطلوبیت زیستگاه مورد استفاده در مدل‌های مرسوم مطلوبیت زیستگاهی برای استخراج خروجی نهایی بر اساس مشاهدات تجربی می‌باشند که در معرض عدم قطعیت‌های مختلفی قرار دارند، مانند مواردی که منجر به دشواری مشاهده^۱ زیستگاه مورد استفاده^۱ ماهی می‌شود. همچنین بسیاری از مکانیسم‌های مؤثر بر انتخاب زیستگاه ماهی (مانند شدت نور، دما، اندازه ماهی و رقابت) در استخراج منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه در نظر گرفته نمی‌شوند (Railsback, 2000).

بر این مبنا و برای حل این مشکل تئوری بیوانرژی و نیز مدل‌های فردگرای^۱ مبتنی بر این تئوری ارائه گردیده است. از جمله مدل‌های فردگرای ارائه‌شده در زمینه ارزیابی و

2 inSTREAM: individual-based Stream Trout Research and Environmental Assessment Model

1 IBMs: Individual-based Models

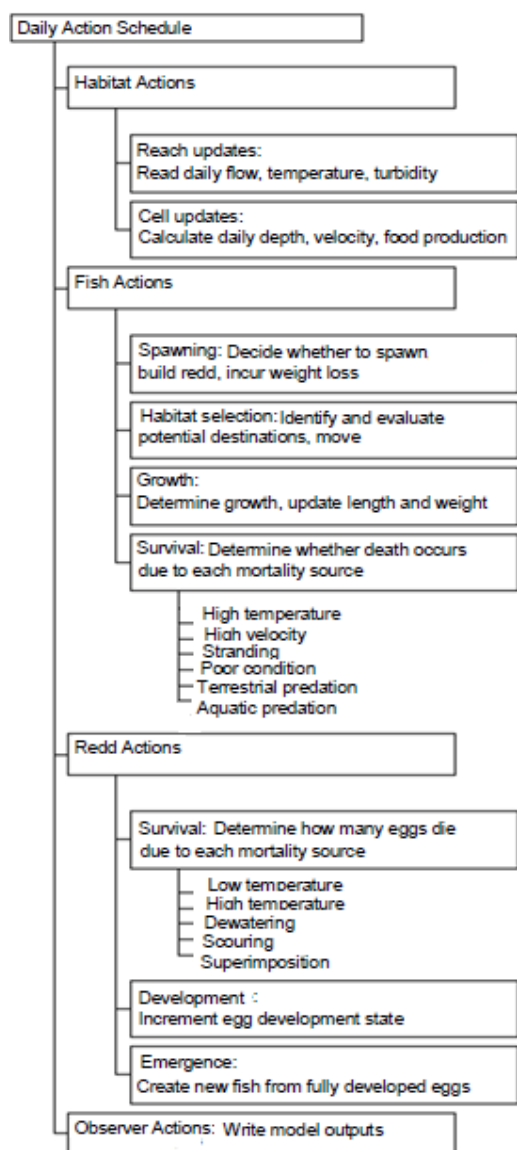


Fig. 1 Complete schedule of daily actions in inSTREAM (Railsback and Sheppard, 2012)
 شکل ۱ برنامه زمانی فعالیتهای روزانه در مدل inSTREAM (Railsback and Sheppard, 2012)

زیستگاه، ماهی، آشیانه‌های تخم‌ریزی و فعالیتهای زیرمجموعه هر کدام از این عوامل در مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش‌های مختلف مدل inSTREAM و ترتیب اجرای فرآیندها به شرح زیر می‌باشد:

۱. ابتدا داده‌های ورودی شامل سری زمانی دبی جریان، دما و کدورت برای بازه مورد مطالعه با توجه به برداشت‌های میدانی و اطلاعات موجود وارد مدل می‌شود و عمق و سرعت حاصل از شبیه‌سازی

مدل‌سازی سیستم‌های جمعیتی متشکل از عامل‌های مستقل و تعامل‌پذیر با یکدیگر مطرح می‌باشد. این مدل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی تعاملات بین افراد و بررسی رفتار سیستم تحت شرایط مختلف می‌توانند به‌عنوان ابزاری مفید برای مطالعه این تأثیرات عمل نمایند. در واقع این نوع مدل‌ها، به‌عنوان روشی پایین به بالا بیان می‌شوند، و برای حل یک مسئله ابتدا از اجزاء کوچک‌تر و ساده‌تر آن شروع می‌کنند و سپس یک سیستم پیچیده را تشکیل می‌دهند (DeAngelis and Grimm, 2014). پژوهشگرانی مانند Grimm et al. (2016) مدل‌های فردگرا را به‌عنوان ابزار اصلی بررسی رفتارها و مکانیسم‌هایی مانند رشد و تغذیه در ماهیان معرفی کرده‌اند.

در مدل ریاضی فردگرای inSTREAM نیز پویایی و دینامیک جمعیت ماهی قزل‌آلا تحت تأثیر سرنوشت و پاسخ افراد به تغییرات شرایط زیست‌محیطی می‌باشد. توانایی این مدل در بازسازی الگوهای مشاهداتی میدانی در زمینه زیستگاه انتخابی ماهی، و در پاسخ به تغییرات شرایط زیست‌محیطی شامل تغییر در رژیم جریان، فراهمی تغذیه، دما، مصرف غذا، سرعت جریان، شرایط شکار (عوامل مرگومیر)، و نیز تغییرات اقلیم و کاربری اراضی در تحقیقات متعددی از جمله Harvey and Railsback (2014), Railsback and Harvey (2011), Penaluna et al. (2015), Bjørnås et al. (2020), Hajiesmaeili (2019) مورد بررسی، تأیید و تصدیق قرار گرفته است. مطابق با نتایج این تحقیقات، این مدل توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی پاسخ اکولوژیکی جمعیت ماهی (رشد و فراوانی) و الگوهای انتخاب زیستگاه در نتیجه تغییرات شرایط زیست‌محیطی دارا می‌باشد.

ساختار کلی و بخش‌های مختلف مدل inSTREAM در شکل ۱ نشان داده شده است. این چارچوب شامل مجموعه‌ای از فعالیتهای می‌باشد که هر کدام از آن‌ها به ترتیب در هر روز شبیه‌سازی یک بار اجرا می‌شوند. به‌عنوان دیگر در این دیاگرام ترتیب اجرای بخش‌های مختلف مدل که در مدل‌های فردگرا به دلیل تأثیر بر خروجی‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد، نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سه عامل

میزان غذای موجود در هر سلول زیستگاهی که مورد مصرف ماهی بزرگ‌تر قرار نگرفته و توانایی ماهی برای به دست آوردن غذا می‌باشد. به دست آوردن غذا نیز خود به عواملی مانند اندازه ماهی و کدورت آب بستگی دارد، به طوری که با افزایش طول ماهی افزایش می‌یابد. زیرا ماهی بزرگ‌تر دید بهتری دارد و بهتر شنا می‌کند.

۴. رشد ماهی نیز به‌عنوان تابعی از اندازه ماهی، تغذیه و شرایط فیزیک زیستگاه در سلول زیستگاهی مانند عمق و سرعت جریان محاسبه می‌شود. در واقع رشد تفاوت بین میزان انرژی دریافتی از تغذیه و انرژی مصرفی برای تنفس و شنا می‌باشد. انرژی مصرفی با افزایش سرعت شنا و دما افزایش می‌یابد. در نتیجه نقطه اوج رشد در سرعت بهینه‌ای خواهد بود که تغذیه کافی در آن سرعت توزیع شود، درحالی که انرژی اضافی برای شنا نیاز نباشد و کم‌ترین هدررفت انرژی را ایجاد نماید.

۵. مرگ‌ومیر از طریق محاسبه احتمال بقا از عوامل مؤثر بر مرگ‌ومیر ماهی شامل دمای بالا، سرعت زیاد جریان، از بین رفتن ماهی در اثر کمبود بیش از حد جریان و ناکافی بودن عمق جریان نسبت به ابعاد ماهی، شرایط نامناسبی مانند گرسنگی ماهی به دلیل کمبود تغذیه و بیماری، وجود شکارچیان خشکزی و آبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. (۶) فعالیت‌های در نظر گرفته شده برای آشیانه‌های تخم‌ریزی نیز شامل: الف) بقا از عوامل مؤثر بر مرگ‌ومیر تخم‌ها مانند دمای کم و یا زیاد، کمبود جریان، فرسایش و شسته شدن تخم‌ها در اثر شدت جریان زیاد و یا قرار گرفتن آشیانه‌ها بر روی هم؛ ب) مرحله توسعه و تبدیل تخم‌ها به مرحله نوزاد دارای کیسه زرده که در میان شن‌ها باقی می‌ماند و پس از به اتمام رسیدن کیسه زرده؛ ج) بیرون آمدن و ظاهر

هیدرولیکی در سلول‌های محاسباتی برای بررسی شرایط زیست‌محیطی در دبی‌های مختلف نیز به عنوان ورودی در مدل فراخوانی می‌شوند و تولید تغذیه نیز با توجه به این اطلاعات محاسبه خواهد شد.

۲. فعالیت‌های در نظر گرفته شده برای ماهی شامل تخم‌ریزی، انتخاب زیستگاه، رشد و تغذیه، و بقا می‌باشد که هر یک از فعالیت‌ها به ترتیب نزولی طول ماهی که نشان‌دهنده رقابت ماهی‌ها می‌باشد انجام خواهد شد. هر یک از این فعالیت‌ها برای تمامی ماهی‌ها قبل از اجرای فعالیت بعدی در مدل انجام خواهد شد. اولین فعالیت در نظر گرفته شده برای ماهی تخم‌ریزی می‌باشد که در صورت فراهم بودن معیارهای تخم‌ریزی از لحاظ زیست‌محیطی شامل دما، محدوده دبی جریان و اندازه ذرات شن بستر و سن ماهی انجام خواهد شد. در صورت انجام تخم‌ریزی، این فعالیت از دو طریق بر انتخاب زیستگاه تأثیرگذار خواهد بود؛ ابتدا ماهی ماده به سمت سلولی که زیستگاه تخم‌ریزی آن می‌باشد حرکت کرده و آشیانه‌های تخم‌ریزی را ایجاد خواهد کرد. سپس بعد از انجام تخم‌ریزی وزن ماهی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت که بر انتخاب زیستگاه آن‌ها بسیار مؤثر خواهد بود و ترجیح بیشتری برای زیستگاه‌های فراهم‌کننده رشد بیشتر ایجاد خواهد کرد.

۳. هر یک از افراد گونه هدف سلولی را برای تغذیه و یا پنهان شدن از شکارچیان انتخاب می‌کنند که انتخاب این سلول به فراهمی غذا و میزان انرژی دریافتی حاصل از آن و همچنین عوامل مؤثر بر مرگ‌ومیر ماهی بستگی خواهد داشت. عواملی مانند طول بدن ماهی، عمق و سرعت سلول زیستگاهی نیز در انتخاب زیستگاه مؤثر می‌باشند. تغذیه دریافتی وابسته به

نهایت ماهی، رویکردی را که فراهم‌کننده بیشترین میزان انرژی دریافتی برای آن می‌باشد را انتخاب خواهد کرد. در شکل ۲ مدل مفهومی رشد ماهی با توجه به عوامل مؤثر بر آن که در مدل inSTREAM در نظر گرفته می‌شود ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی بخش‌های مختلف مدل inSTREAM ارائه شرح کامل مدل در این تحقیق نمی‌گنجد و در واقع در این تحقیق سعی بر آن بوده است که به معرفی کلی و اجمالی ساختار مدل و مبانی مورد استفاده در مدل‌سازی فردگرای رشد و تغذیه ماهی پرداخته شود. شرح کامل فرآیند محاسبات رشد روزانه ماهی (تغییر در وزن و طول ماهی) بر طبق تئوری بیوانرژی و روابط مورد استفاده در هر یک از دو رویکرد تغذیه‌ای در منابعی مانند Hajiesmaeili et al. (2018), Hajiesmaeili (2019) و نیز راهنماهای مدل (Railsback et al., 2009, 2021) ارائه شده است.

۲-۲- مدل‌سازی فردگرای زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز در رودخانه‌الرم

در تحقیق حاضر رودخانه‌الرم (۴۰' ۵۲' ۵۱" طول شرقی و ۴۱' ۵۵' ۳۵" عرض شمالی) در پارک ملی لار به‌عنوان محل انجام پژوهش انتخاب شده است (شکل ۳). انتخاب رودخانه‌الرم به‌عنوان منطقه مطالعاتی از بین رودخانه‌های پارک ملی لار دلایل متعددی داشته است؛

شدن بچه ماهی‌ها از میان‌ش‌ها می‌باشد. هر یک از این عوامل به خصوصیتی از گونه مانند وزن و طول آن و زمان تخم‌ریزی وابسته می‌باشد.

در این مدل نیز مانند سایر مدل‌های تغذیه‌ای از مفاهیم و تئوری بیوانرژی به‌منظور مدلسازی رشد استفاده می‌شود (e.g., Fausch, 1984; Hughes and Dill, 1990; Hill and Grossman, 1993; Van Winkle et al., 1998; Hayes et al., 2000)، و به‌بیان دیگر رشد ماهی متناسب است با میزان خالص انرژی دریافتی که معادل با اختلاف بین انرژی دریافتی از تغذیه و انرژی مصرفی متابولیسم ماهی می‌باشد (رابطه (۱)).

$$NREI = GREI - SC \quad (1)$$

در این رابطه NREI، نرخ خالص انرژی دریافتی (J/d)؛ GREI، نرخ ناخالص انرژی دریافتی حاصل از تغذیه (J/d) و SC، انرژی مصرفی سنا و تنفس ماهی (J/d) می‌باشد. با این تفاوت که در مدل inSTREAM هر دو نوع رویکرد تغذیه از بی‌مهرگان شناور و کفزیان در محاسبات رشد ماهی در نظر گرفته می‌شوند و این یکی از مزیت‌های این مدل نسبت به سایر مدل‌های بیوانرژی و تغذیه‌ای می‌باشد (Hayes, personal communication, July 2016). برای هر یک از دو نوع رویکرد تغذیه‌ای، محاسبات میزان خالص انرژی دریافتی (میزان انرژی ذخیره‌شده) انجام خواهد شد و در

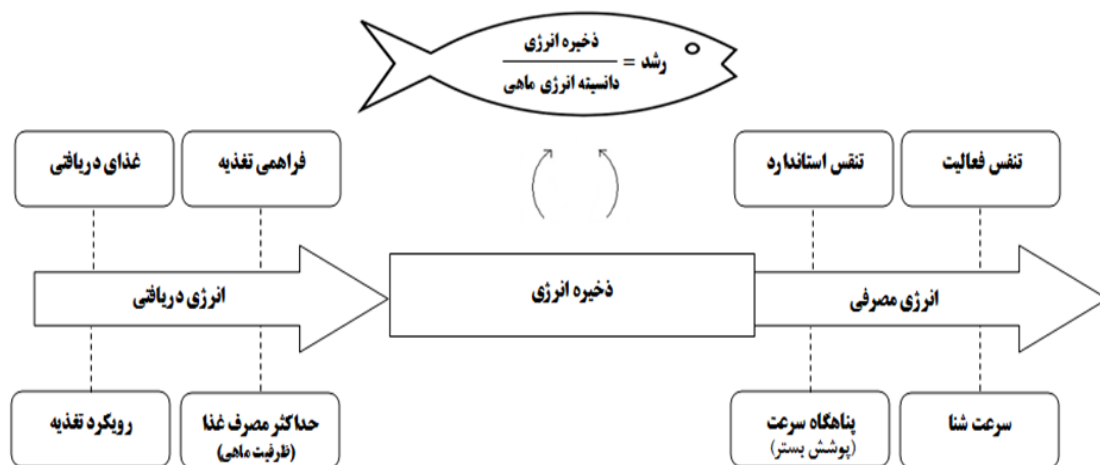


Fig. 2 Conceptual model of fish growth (Hajiesmaeili, 2019)
شکل ۲ مدل مفهومی رشد ماهی (حاجی‌اسماعیلی، ۲۰۱۹)

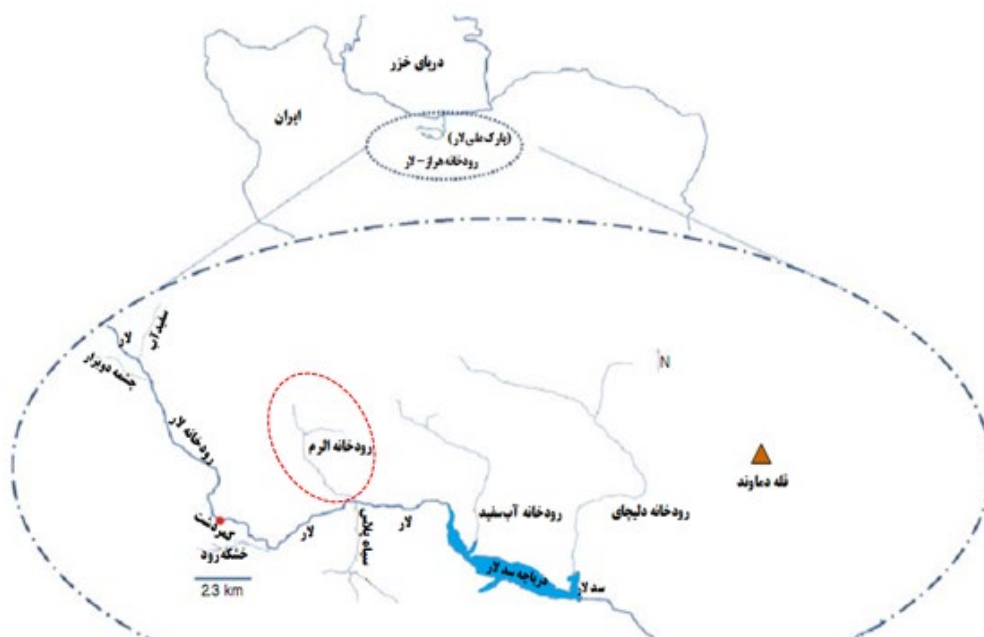


Fig. 3 Elarm River in Lar National Park (Hajiesmaeili, 2019)
 شکل ۳ رودخانه ارم در پارک ملی لار (حاجی‌اسماعیلی، ۲۰۱۹)

است .

همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، در رودخانه ارم به واسطه نزولات جوی و ذوب شدن برف و یخ در ارتفاعات بالادست حداکثر دبی متوسط ماهانه در بهار و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد با مقدار $1/14$ و $1/27$ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. بعد از آن به علت کاهش نزولات جوی و نیز افزایش دمای هوا دبی جریان کاهش می‌یابد که این امر به دلیل شرایط اقلیمی، موقعیت جغرافیایی منطقه و یخبندان ناشی از پروتد فراینده هوا در فصول سرد سال تا فرارسیدن فصل بهار و گرم شدن مجدد هوا ادامه می‌یابد.

۲-۳- سری زمانی نرخ رشد ماهی بر حسب طول و

وزن

به منظور بررسی تغییرات زمانی رشد ماهی حاصل از نتایج مدل‌سازی فردگرا برای قزل‌آلای خال‌قرمز رودخانه ارم و نیز چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دبی جریان، سرعت جریان و نیز دمای آب بر تغییرات رشد، سری زمانی ماهانه متوسط نرخ رشد ویژه^۱ برای دو گروه سنی نابالغ و بالغ محاسبه و نمودار تغییرات زمانی رشد ویژه ماهی بر

اولاً این رودخانه یکی از زیستگاه‌های اصلی قزل‌آلای خال‌قرمز در این منطقه می‌باشد که اهمیت قابل ملاحظه‌ای در تداوم حیات این گونه در پارک ملی لار دارا می‌باشد، ثانیاً تنوع واحدهای مورفولوژیکی، پوشش گیاهی، اندازه متنوع ذرات بستر و شرایط هیدرولیکی متنوع، این رودخانه را به یکی از بی‌نظیرترین محل‌های تحقیقاتی پارک ملی لار تبدیل کرده است. همچنین مطابق با مطالعات انجام شده تنوع و پراکنش منابع تغذیه‌ای قزل‌آلای خال‌قرمز در این رودخانه نسبت به سایر رودخانه‌های این منطقه بیشتر است (Rajabei Nezhad, 2007; Abdoli et al., 2016; Salavatian, 2012). این رودخانه به واسطه دارا بودن سواحلی که بخش زیرین آن‌ها توسط آب فرسایش یافته و گیاهان حاشیه‌ای با پوشاندن این مکان‌ها، پناهگاه خوبی برای ماهیان قزل‌آلا ایجاد نموده و از زیستگاه‌های آبی مهم منطقه تلقی می‌شود. در شکل ۴ سری زمانی متوسط روزانه دمای آب و دبی جریان رودخانه ارم در طی دوره زمانی مورد بررسی در تحقیق (سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تغییرات دمای آب رودخانه ارم در طی سال‌های مختلف کم و تقریباً بین ۹ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد نوسان داشته

¹ SGR: Specific Growth Rate

$t_2 - t_1$ نیز طول دوره رشد (بر حسب روز) می‌باشد.

حسب طول و وزن استخراج و ترسیم گردید. در این بررسی نرخ رشد ویژه از رابطه (۲) محاسبه گردید (Huang et al., 2005; Hevroy et al., 2008).

۲-۴- سری زمانی کیفیت زیستگاه بر اساس شاخص NREI

به منظور بررسی مطلوبیت و کیفیت زیستگاه‌های رودخانه جریان که نشان‌دهنده اثر ترکیبی هر دو پارامتر عمق و سرعت جریان می‌باشد، برای دو گروه سنی نابالغ و بالغ گونه هدف مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$SGR = \frac{LnG_2 - LnG_1}{t_2 - t_1} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه G_2 رشد نهایی ماهی و G_1 رشد اولیه ماهی است که می‌تواند بر حسب طول (L) و یا وزن (W) باشد،

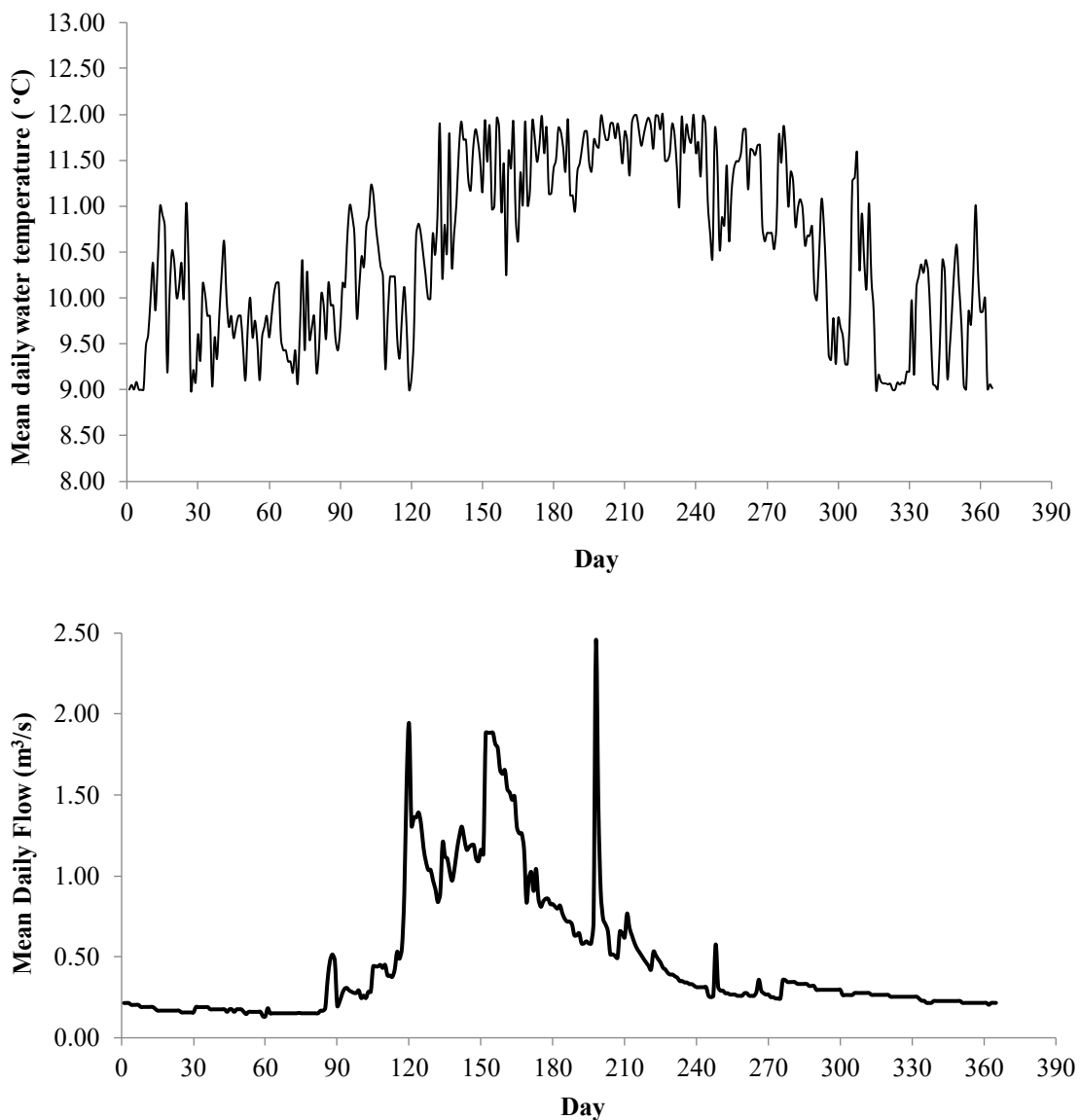


Fig. 4 Mean daily time series of flow and water temperature in Elarm River
شکل ۴ سری زمانی متوسط روزانه دمای آب و دبی جریان رودخانه الرم

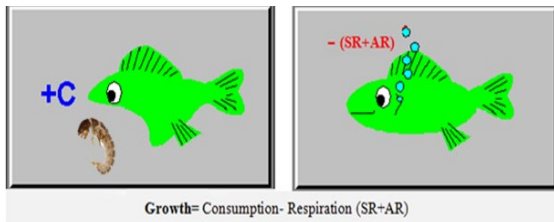


Fig. 5 Conceptual model of fish growth based on bioenergetics theory (Hanson et al. 1997)

شکل ۵ مدل مفهومی رشد ماهی بر اساس تئوری بیوانرژی (Hanson et al., 1997)

عمق متوسط جریان در محدوده ۶ تا ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ سری زمانی ماهانه نرخ رشد ویژه با تغییرات پارامترهایی از جمله دبی متوسط، سرعت متوسط و نیز متوسط دمای ماهانه که افزایش و یا کاهش رشد ماهی را سبب می‌شوند، به ترتیب بر حسب طول و وزن برای قزل‌آلای خال‌قرمز نابالغ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در فصل بهار و به‌ویژه دو ماه May و Jun به دلیل افزایش دبی جریان و در نتیجه سرعت جریان و همچنین افزایش دما در این دوره زمانی و نیز در تابستان نرخ رشد ماهی با کاهش روبرو خواهد شد. زیرا با افزایش دبی و سرعت جریان و همچنین با افزایش دما انرژی مصرفی متابولیسم ماهی افزایش یافته و در نتیجه رشد کاهش خواهد یافت.

همچنین، با مقایسه دو شکل ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات وزن ماهی به‌مراتب بیشتر از طول آن هست و انرژی دریافتی بیشتر به تغییر وزن ماهی اختصاص داده شده است. باید توجه داشت که به‌طور کلی نرخ خالص انرژی دریافتی ماهی به افزایش طول، ذخیره چربی و افزایش وزن، و یا تکامل گناد اختصاص داده خواهد شد (Railsback et al., 2012).

۳-۲- سری زمانی نرخ رشد ماهی بر حسب طول و وزن (قزل‌آلای خال‌قرمز بالغ)

در شکل‌های ۸ و ۹ نیز سری زمانی ماهانه نرخ رشد ویژه با تغییرات دبی متوسط، سرعت متوسط و نیز متوسط دمای به ترتیب بر حسب طول و وزن برای گروه سنی بالغ گونه هدف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای گروه سنی بالغ نیز با تغییر دبی جریان، سرعت جریان

الرم بر اساس شاخص NREI که نشانگر پتانسیل رشد نیز می‌باشد، تغییرات زمانی نرخ خالص انرژی دریافتی قزل‌آلای خال‌قرمز از طریق استخراج سری زمانی NREI متوسط ماهانه همراه با تغییرات ماهانه متوسط دبی واحد عرض استخراج نمودار دبی-انرژی (Q-NREI) برای رودخانه‌الرم تعیین محدوده جریان انرژی بهینه برای رودخانه‌الرم و ارزیابی تغییرات انرژی در وضع موجود رودخانه، از طریق استخراج نمودار دبی-انرژی (Q-NREI) حاصل از مدل‌سازی بیوانرژی انجام گرفت. به منظور محاسبه نرخ خالص انرژی دریافتی (انرژی ذخیره شده) در هر دبی در بازه رودخانه مطالعاتی از رابطه (۳) استفاده گردید:

$$NREI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i NREI_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

در این رابطه A_i سطح هر سلول زیستگاهی، $NREI_i$ نرخ خالص انرژی در هر سلول، i شماره سلول زیستگاهی و n تعداد سلول‌های زیستگاهی می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی فردگرای زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز در رودخانه مطالعاتی بر مبنای تئوری بیوانرژی و تحلیل اکولوژیک آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۱- سری زمانی نرخ رشد ماهی بر حسب طول و وزن (قزل‌آلای خال‌قرمز نابالغ)

همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد و براساس شکل ۲، رشد ماهی متناسب است با میزان خالص انرژی دریافتی که معادل با اختلاف بین انرژی دریافتی از تغذیه و انرژی مصرفی متابولیسم ماهی می‌باشد. در شکل ۵ نیز نمای دیگر از مدل مفهومی رشد ماهی بر اساس تئوری بیوانرژی نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در محدوده دبی و سرعت جریان موردبررسی در رودخانه مطالعاتی،

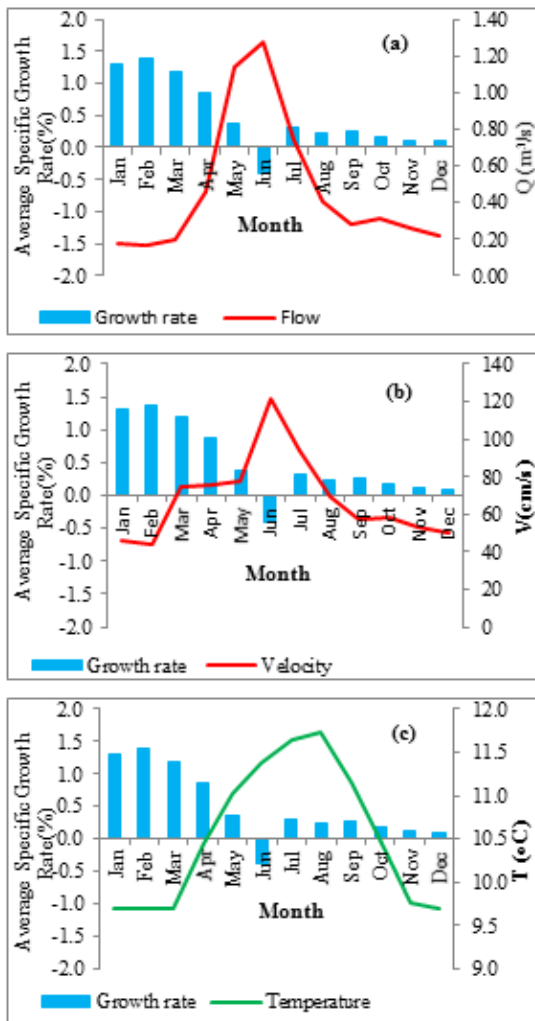


Fig. 7 Variation in average monthly specific growth rate in terms of weight with a) flow discharge, b) velocity and c) temperature

شکل ۷ سری زمانی ماهانه متوسط نرخ رشد ویژه بر حسب وزن با تغییرات (a) دبی جریان، (b) سرعت جریان و (c) دما

بدن جهت تأمین انرژی بدن. همچنین با مقایسه تغییرات نرخ رشد ویژه گروه سنی نابالغ و بالغ (شکل‌های ۶ و ۷ با شکل‌های ۸ و ۹) مشاهده می‌شود رشد قزل‌آلای نابالغ از بالغ بیشتر بوده است. زیرا ماهیان در سنین پایین‌تر در حال رشد و نمو بوده و احتیاج به انرژی بیشتری برای تأمین نیازهای بدنی خود دارند و به همین دلیل فعالیت بیشتری برای جستجوی غذا از خود نشان می‌دهند. کاهش رشد ماهی در سنین بالاتر به علت نیاز کم‌تر به تغذیه می‌باشد که انرژی موردنیاز آن‌ها را در حد تأمین آن برای نیازهای حیاتی و تشکیل مواد تناسلی کاهش می‌دهد.

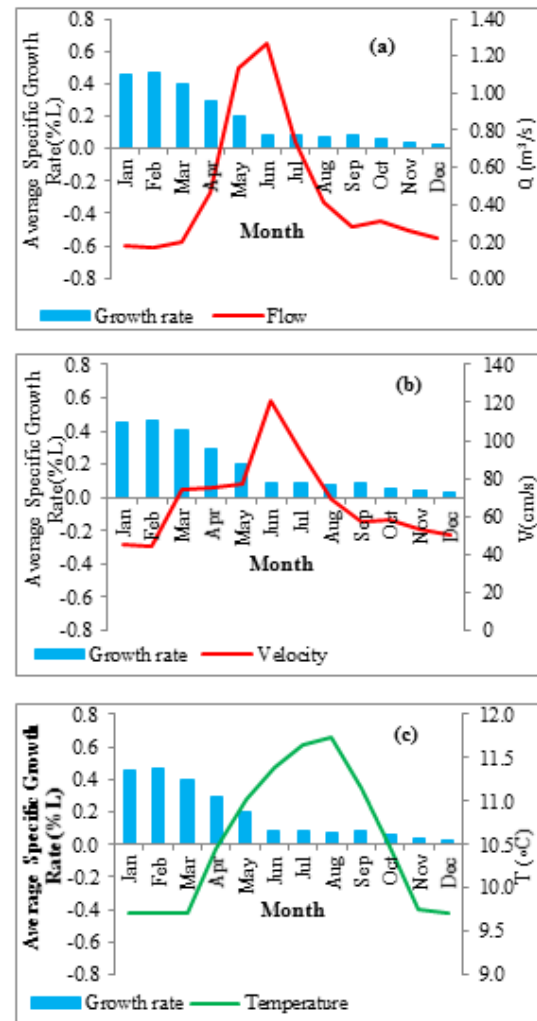


Fig. 6 Variation in average monthly specific growth rate in terms of length with a) flow discharge, b) velocity and c) temperature

شکل ۶ سری زمانی ماهانه متوسط نرخ رشد ویژه بر حسب طول با تغییرات (a) دبی جریان، (b) سرعت جریان و (c) دما

و دما نرخ رشد ویژه ماهی تغییر کرده است. به‌طور کلی با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود در فصل پاییز که فصل تخم‌ریزی قزل‌آلای خال‌قرمز بالغ می‌باشد نرخ رشد ماهی کاهش یافته و با آن که نرخ رشد بر حسب طول تغییر زیادی نداشته اما نرخ رشد ویژه بر حسب وزن کاهش محسوسی را نشان می‌دهد که به دلیل عدم تغذیه ماهیان در فصل تخم‌ریزی می‌باشد (Railsback et al., 2012, 2009). این موضوع از دو طریق باعث کاهش وزن ماهیان گردیده است: ۱) خالی بودن دستگاه گوارش ماهی از مواد غذایی و در نتیجه کاهش وزن ماهی، ۲) استفاده از چربی

۳-۳- سری زمانی NREI متوسط ماهانه

در شکل ۱۰ سری زمانی NREI متوسط ماهانه همراه با تغییرات ماهانه دبی واحد عرض برای دو گروه سنی نابالغ و بالغ قزل‌آلای خال‌قرمز نشان داده شده است.

همان‌طور که در بخش قبل نیز توضیح داده شد در دو ماه May و Jun که دبی جریان و در نتیجه سرعت جریان حداکثر می‌باشد نرخ خالص انرژی دریافتی کاهش یافته

است و برای گروه سنی بالغ این مقدار منفی می‌باشد. به‌بیان‌دیگر انرژی مصرفی متابولیسم که صرف تنفس و شنای ماهی می‌شود از انرژی دریافتی حاصل از تغذیه بیشتر بوده است. زیرا بر طبق رابطه انرژی مصرفی تنفس و متابولیسم ماهی، این پارامتر تابعی از طول و وزن ماهی می‌باشد و با افزایش وزن در سنین بالاتر انرژی مصرفی افزایش بیشتری داشته و در نتیجه باعث منفی شدن NREI خواهد شد.

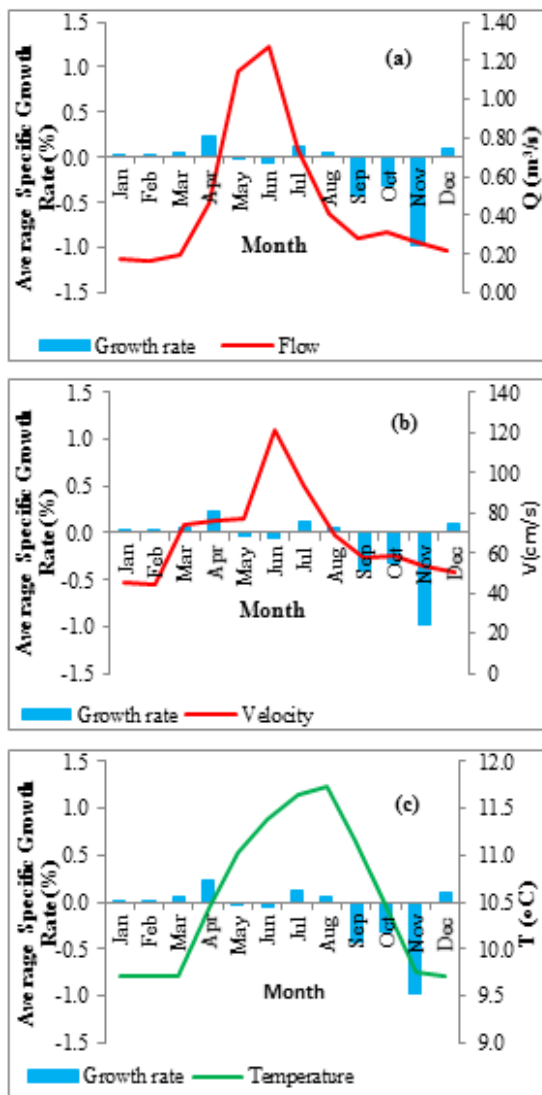


Fig. 9 Variation in average monthly specific growth rate in terms of weight with a) flow discharge, b) velocity and c) temperature

شکل ۹ سری زمانی ماهانه متوسط نرخ رشد ویژه بر حسب وزن با تغییرات (a) دبی جریان، (b) سرعت جریان و (c) دما

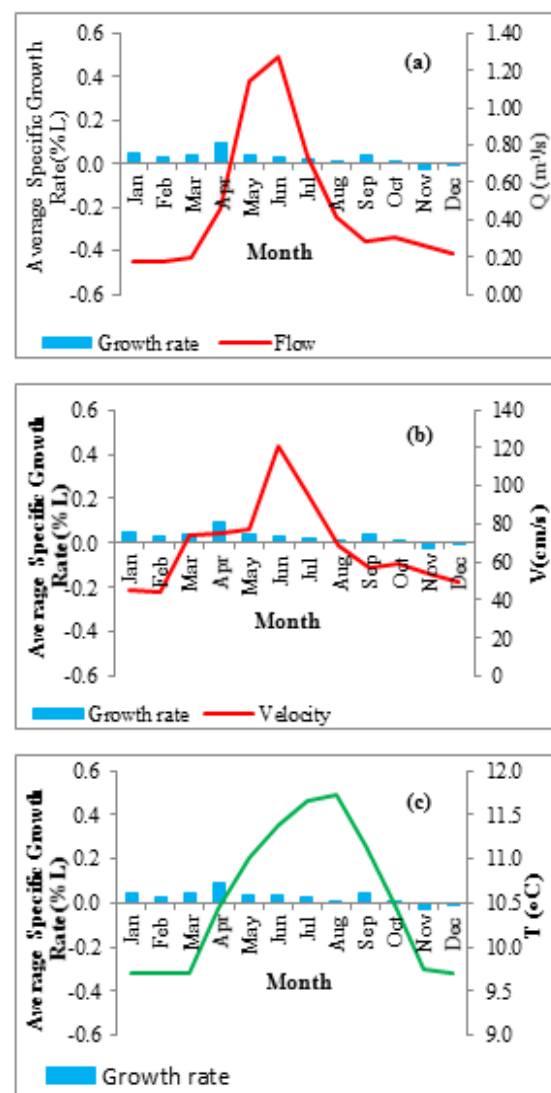


Fig. 8 Variation in average monthly specific growth rate in terms of length with a) flow discharge, b) velocity and c) temperature

شکل ۸ سری زمانی ماهانه متوسط نرخ رشد ویژه بر حسب طول با تغییرات (a) دبی جریان، (b) سرعت جریان و (c) دما

می‌توان گزینه و یا گزینه‌های بهینه رژیم جریان فراهم‌کننده انرژی بهینه در تمام فصول سال را تعیین نمود. در واقع با توجه به اهمیت توأمان هر دو عامل تغذیه و سطح مطلوب زیستگاهی (فیزیک زیستگاه) در تعیین رژیم جریان اکولوژیکی رودخانه، هرگونه تغییر در شرایط جریان باید متناسب با نمودارهایی مانند شکل ۱۱ و با توجه به تغییرات نرخ خالص انرژی دریافتی طوری صورت گیرد که شرایط زیستگاهی در دوره‌های مختلف زیستی گونه هدف دچار تنش‌های شدید نشود.

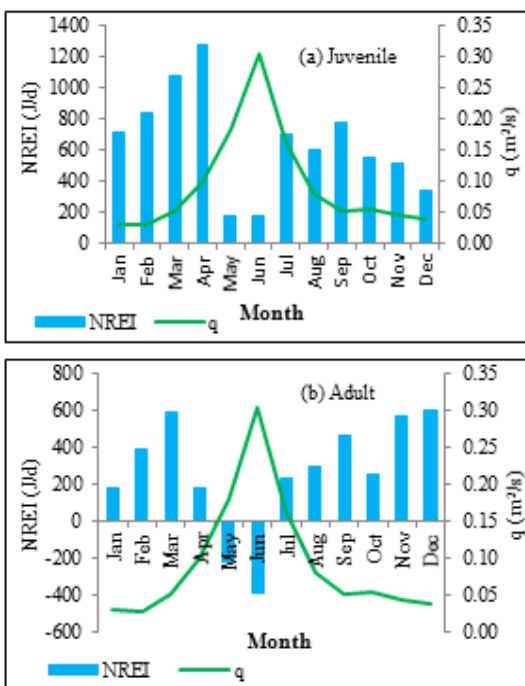


Fig. 10 Time series of mean monthly NREI for (a) juvenile and (b) adult brown trout

شکل ۱۰ سری زمانی NREI متوسط ماهانه برای قزل‌آلای خال‌قرمز (a) نابالغ و (b) بالغ

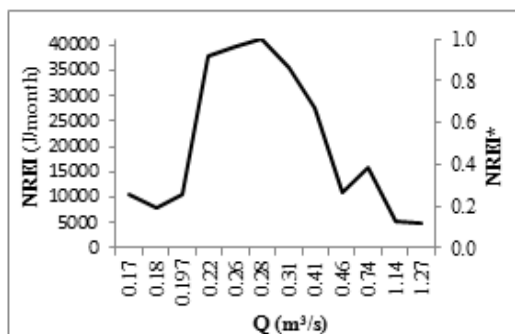


Fig. 11 Flow-NREI relationship for Elarm River
شکل ۱۱ نمودار رابطه دبی-انرژی رودخانه‌الرم

۳-۴- نمودار دبی- انرژی (Q-NREI) برای رودخانه‌الرم

در شکل ۱۱ نمودار دبی-انرژی حاصل از مدل‌سازی بیوانرژی رودخانه‌الرم نشان داده شده است.

به‌طور کلی بر مبنای تئوری بیوانرژی میزان جریانی برای ماهی مناسب‌تر است که با ایجاد بهترین شرایط در تغذیه کم‌ترین هدر رفت انرژی را ایجاد کرده و بتواند رشد مناسب مطابق با تشخیص‌های بیولوژیکی را ایجاد نماید. باید توجه داشت طبق مفاهیم ارائه‌شده در تئوری بیوانرژی مفهومی تحت عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی وجود ندارد و می‌توان آن را جریان انرژی بهینه در رودخانه دانست (Rosenfeld and Ptolemy, 2012). همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود محدوده دبی ۰/۲۲ تا ۰/۳۱ مترمکعب بر ثانیه که نزدیک به دبی متوسط ماهانه رودخانه در فصل پاییز می‌باشد، برای حفظ پایداری اکوسیستم رودخانه‌الرم و نیز حفظ بقای قزل‌آلای خال‌قرمز مناسب بوده و به‌عنوان محدوده جریان انرژی بهینه در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که دوره تخم‌ریزی قزل‌آلای خال‌قرمز که از دوره‌های حساس و بحرانی زیستی گونه است در فصل پاییز بوده و علاوه بر فصل زمستان، این فصل نیز یکی از فصول کم‌آبی رودخانه می‌باشد و مطابق با نتایج تحقیق حاضر در این فصل شرایط رودخانه به لحاظ زیستگاهی در مطلوب‌ترین وضعیت ممکن می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه در پارک ملی لار بارزترین زیستگاه تخم‌ریزی ماهی قزل‌آلای خال‌قرمز آبراهه الرم است (Esteve et al., 2018)، این مطلب تأییدکننده صحت نتیجه حاصل از مدل‌سازی بیوانرژی رودخانه‌الرم می‌باشد. بر طبق نتایج تحقیق حاضر و نیز پژوهش انجام‌شده توسط (Hughes and Dill (1990)، افزایش دبی جریان لزوماً منجر به افزایش فراهمی تغذیه و نیز انرژی دریافتی نخواهد شد

افزایش جریان بیش از یک محدوده بهینه به دلیل افزایش سرعت جریان منجر به کاهش توانایی ماهی در گرفتن طعمه غذایی و در نتیجه کاهش انرژی خالص دریافتی خواهد شد. مدل‌سازی‌های فردگرا بر مبنای تئوری بیوانرژی با استفاده از مدل ریاضی توسعه داده‌شده در تحقیق حاضر

۴- نتیجه‌گیری

شده است. در این تحقیق به تشریح مبانی و روش مدل‌سازی فردگرای جمعیت ماهی بر مبنای تئوری بیوانرژی پرداخته شد. همچنین با کاربرد مدل ریاضی inSTREAM در مدل‌سازی جمعیت قزل‌آلای خال‌قرمز رودخانه‌الرم در پارک ملی لار به معرفی و ارزیابی نمونه‌ای از نتایج حاصل از این نوع مدل‌سازی و کاربرد آن در ارزیابی زیستگاه‌های رودخانه‌ای پرداخته شد.

تئوری اصلی این نوع مدل‌ها بر این اساس است که ماهی چه مقدار انرژی در مکان‌های مختلف رودخانه و در دبی‌های مختلف استفاده می‌کند. این نوع مدل‌ها در واقع به محاسبه میزان انرژی دریافتی و انرژی مصرفی توسط ماهی می‌پردازند (Hayes et al., 2016). در محاسبات این نوع مدل‌ها میزان مصرف غذا برای محاسبه میزان انرژی دریافتی استفاده می‌شود، میزان انرژی مصرفی نیز براساس سرعت جریان، میزان آشفتگی جریان و نیز دمای آب تعیین می‌شود. در مدل ریاضی فردگرای inSTREAM مدل‌سازی پاسخ اکولوژیکی جمعیت ماهی به شرایط مختلف زیست‌محیطی تنها محدود به فیزیک زیستگاه نبوده و علاوه بر آن عوامل زیستی مانند تغذیه، شکار و رقابت بین گونه‌ای نیز به‌عنوان عوامل مؤثر بر کیفیت و مطلوبیت زیستگاه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین مدل‌سازی انتخاب زیستگاه، فراهمی تغذیه و رشد ماهی در مدل inSTREAM مبتنی بر فرآیند سلسله مراتبی وابسته به اندازه ماهی (به ترتیب نزولی طول ماهی) که نشان‌دهنده رقابت بین‌گونه‌ای می‌باشد، انجام می‌شود.

مطابق با نتایج تحقیق حاضر، با مقایسه تغییرات نرخ رشد ویژه گروه سنی نابالغ و بالغ مشاهده شد که رشد قزل‌آلای نابالغ از بالغ بیشتر بوده است؛ زیرا ماهیان در سنین پایین‌تر در حال رشد و نمو بوده و احتیاج به انرژی بیشتری برای تأمین نیازهای بدنی خود دارند و به همین دلیل فعالیت بیشتری برای جستجوی غذا از خود نشان می‌دهند. کاهش رشد ماهی در سنین بالاتر به علت نیاز کم‌تر به تغذیه می‌باشد که انرژی موردنیاز آن‌ها را در حد تأمین آن برای نیازهای حیاتی و تشکیل مواد تناسلی کاهش می‌دهد. شاخص NREI که به لحاظ اکولوژیکی نشانگر پتانسیل رشد می‌باشد، شاخصی مناسب برای پیش‌بینی توزیع رشد و

تئوری بیوانرژی و نیز مدل‌های فردگرای مبتنی بر این تئوری همانند مدل inSTREAM، به‌عنوان آخرین تلاش‌های انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی زیستگاه ماهیان در علم اکوهیدرولیک مطرح می‌باشند که حتی در سطح جهان نیز هنوز در مرحله تحقیقات و توسعه بیشتر قرار دارند. این نوع مدل‌ها با هدف رفع محدودیت‌های مدل‌های مرسوم مطلوبیت زیستگاهی در ارزیابی و مدیریت زیستگاه‌های رودخانه‌ای توسعه داده شده‌اند. توانایی این نوع مدل‌ها در بازسازی الگوهای مشاهداتی میدانی و انجام پیش‌بینی‌های معقول‌تر در موارد متعددی از جمله پیش‌بینی زیستگاه انتخابی ماهی، رفتار و رشد ماهی، در مقایسه با پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل‌های مرسوم شبیه‌سازی فیزیک زیستگاه در مطالعات متعدد به اثبات رسیده است (Laliberte et al., 2016). از این‌رو مدل‌های فردگرای مبتنی بر تئوری بیوانرژی به‌عنوان جایگزین‌های واقع‌بینانه‌تر از شرایط بیولوژیکی رودخانه در زمینه مدیریت جریان درون آبراه‌های و نیز ارزیابی سلامت اکوسیستم رودخانه در سال‌های اخیر در حال توسعه می‌باشند. اگرچه این نوع مدل‌ها در سطح جهان نیز هنوز در مراحل آغازین توسعه می‌باشند، اما از زمان مطرح شدن تئوری بیوانرژی در سال‌های گذشته و مدل‌های اولیه‌ای که مبتنی بر این تئوری ایجاد شدند، همواره تلاش بر توسعه قابلیت‌های این نوع مدل‌ها می‌باشد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و جدید بودن تئوری بیوانرژی و مدل‌های فردگرا در علم اکوهیدرولیک در سطح جهان و نیاز به تکمیل و توسعه بیشتر این نوع مدل‌ها، لازم است تا تحقیقات اکوهیدرولیکی به سمت نگرش بیوانرژی پیش رفته و تلاش در زمینه تکمیل و توسعه بیشتر این نوع مدل‌ها انجام شود. لذا تحقیق حاضر با هدف تکمیل و توسعه پیشرفت‌های حاصل در زمینه ارزیابی وضعیت زیستگاه‌های رودخانه‌ای و نیز به منظور استمرار گام‌های پایه‌ای که با تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر در زمینه توسعه این علم در کشور برداشته شده انجام گرفته است، و اولین تحقیق انجام‌شده در ایران در زمینه ارزیابی وضعیت زیستگاه‌های رودخانه‌ای می‌باشد که با تمرکز بر مدل‌سازی فردگرا و تئوری بیوانرژی انجام

G_1	رشد اولیه ماهی (m) و یا (g)
t_2-t_1	طول دوره رشد (d)
SGR	نرخ رشد ویژه (%)
A_i	سطح سلول‌های زیستگاهی (m^2)
n	تعداد سلول‌های زیستگاهی (-)

۶- سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله نگارندگان این مقاله از جناب آقای دکتر استیو ریلزبک استاد گروه ریاضیات دانشگاه هامبولت کالیفرنیا که همواره در تمام مراحل تحقیق از راهنمایی‌های ارزشمند ایشان بهره گرفته شد تشکر و قدردانی می‌نماییم.

References

منبع‌ها

- Abdoli, A., Azizi, Z., Kiabi, B., Mashhadi Ahmadi, A. A. and Golzarianpour, K. (2016). Study of Summer Food Habits of the Brown Trout, *Salmo trutta fario*, in Lar Dam Lake and Streams in Lar National Park. *J. Fish. Sci. and Tech.*, 5(3): 1-17. (In Persian), URL: <http://jfst.modares.ac.ir/article-6-6114-en.html>
- Anderson, K., Paul, A. J., McCauley, E., Jackson, L., Post, J.R., Nisbet, R. (2006). Instream Flow Needs in Streams and Rivers: the Importance of Understanding Ecological Dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(6): 309-318, DOI: 10.1890/1540-9295(2006)4[309:IFNISA]2.0.CO;2
- Bjørnås, K. L., Railsback, S. F., Calles, O., & Piccolo, J. J. (2021). Modeling Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) population responses and interactions under increased minimum flow in a regulated river. *Ecological Engineering*, 162, 106182, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106182
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J. (1998). *Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology*. USGS/BRD-1998-0004. U.S. Geological Survey: Biological Resource Division, URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/itr19980004>
- DeAngelis, D. L., Grimm, V. (2014). Individual-based models in ecology after four decades. *F1000 Prime Reports*, 6(39): 1-6, DOI: [10.12703/P6-39](https://doi.org/10.12703/P6-39)
- Esteve, M., Abdoli, A., Hashemzadeh Segherloo, I., Golzarianpour, K. and Ahmadi, A. A. (2018).

انتخاب زیستگاه ماهی بوده و بر اساس مطالعات انجام‌شده در زمینه مدل‌های بیوانرژژی، این شاخص به‌عنوان شاخص مطلوبیت زیستگاه مطرح می‌باشد که برای ارزیابی کیفیت زیستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد و در واقع بیانگر مطلوبیت زیستگاه بر حسب انرژی موجود برای رشد و تولیدمثل ماهی می‌باشد. همچنین بر مبنای تئوری بیوانرژژی میزان جریان برای ماهی مناسب‌تر است که با ایجاد بهترین شرایط در تغذیه کم‌ترین هدر رفت انرژی را ایجاد کرده و بتواند رشد مناسب مطابق با تشخیص‌های بیولوژیکی را ایجاد نماید. در رودخانه‌الرم محدوده دبی ۰/۲۲ تا ۰/۳۱ مترمکعب بر ثانیه می‌تواند به‌عنوان محدوده جریان انرژی بهینه در نظر گرفته شود.

به‌طور کلی بررسی قابلیت‌های مدل فردگرایی inSTREAM و نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های بیوانرژژی ارائه‌شده در تحقیق حاضر نشان داد که با استفاده از رویکرد مدل‌سازی معرفی‌شده در این تحقیق می‌توان تغییرات زمانی رشد گونه و کیفیت زیستگاهی، و نیز مناطق بهینه برای زیست ماهی را با توجه به تأثیر توأمان عوامل زیستی و غیر زیستی بر توزیع انرژی در رودخانه بر مبنای شاخص NREI تعیین نمود و از آن در مدیریت و مهندسی اکوسیستم رودخانه و نیز تخمین جریانات اکولوژیک بهره گرفت. همچنین یکی دیگر از موارد کاربرد این مدل در زمینه شیلات و آبی‌پروری می‌باشد، به‌گونه‌ای که می‌توان با استفاده از آن تعیین نمود چه مقدار انرژی از سطوح پایین‌تر هرم غذایی (پریفیتون‌ها و کفزیان) به سطوح بالاتر (ماهیان) انتقال می‌یابد و چگونه می‌توان این انتقال انرژی را افزایش داد تا امکان فراهم نمودن تولید بیشتر ماهی و نیز بهره‌برداری پایدار از این منابع پروتئینی تجدیدپذیر را میسر نمود.

۵- فهرست نشانه‌ها

NREI	نرخ خالص انرژی دریافتی (J/d)
GREI	نرخ ناخالص انرژی دریافتی از تغذیه (J/d)
SC	انرژی مصرفی تنفس و شنای ماهی (J/d)
G_2	رشد نهایی ماهی (m) و یا (g)

- Ruud, M., Hemre, G. (2005). Nutrient Utilization in Atlantic Salmon (*Salmo salar L.*) Fed Increased Levels of Fish Protein Hydrolysate during a Period of Fast Growth. *Aquaculture Nutrition*, 11: 301-313, DOI: [10.1111/j.1365-2095.2005.00357.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2005.00357.x)
- Hill, J., Grossman, G.D. (1993). An energetic model of microhabitat use for rainbow trout and rosyside dace. *Ecology*, 74: 685–698, DOI: [10.2307/1940796](https://doi.org/10.2307/1940796)
- Huang, S. S. Y., Fu, C. H. L., Higgs, D. A., Balfry, S. K., Schulte, P. M., Brauner, C. J. (2008). Effects of Dietary Canola Oil Level on Growth Performance, Fatty Acid Composition and Ionoregulatory Development of Spring Chinook Salmon Parr, *Oncorhynchus tshawytscha*. *Aquaculture*, 274 (2008): 109-117, DOI: [10.1016/j.aquaculture.2007.11.011](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.011)
- Hughes, N.F., Dill, L.M. (1990). Position choice by drift-feeding salmonids: model and test for Arctic grayling (*Thymallus arcticus*) in subarctic streams, interior Alaska. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47: 2039–2048, DOI: [10.1139/f90-228](https://doi.org/10.1139/f90-228)
- Laliberte, J. J., Post, J. R., Rosenfeld, J. S., Mee, J. A. (2016). Modelling Temperature, Body Size, Prey Density, and Stream Gradient Impacts on Longitudinal Patterns of Potential Production of Drift-Feeding Trout. *River Research and Applications*, 32: 2045–2055, DOI: [10.1002/rra.3048](https://doi.org/10.1002/rra.3048)
- Mathur, D., Bason, W. H., Purdy, E. J., Silver, C. A. (1985). A critique of the instream flow incremental methodology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42:825–831, DOI: [10.1139/f85-105](https://doi.org/10.1139/f85-105)
- Orth, D. J. (1987). Ecological considerations in the development and application of instream flow-habitat models. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1:171–181, DOI: [10.1002/rrr.3450010207](https://doi.org/10.1002/rrr.3450010207)
- Penaluna, B. E., Railsback, S. F., Dunham, J. B., Johnson, S., Bilby, R. E., and Skaugset, A. E. (2015). The Role of the Geophysical Template and Environmental Regimes in Controlling Stream-Living Trout Populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72: 893–901, DOI: [10.1139/cjfas-2014-0377](https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0377)
- Quist, M.C., Hubert, W.A. (2005). Relative effects of biotic and abiotic processes: Atest of the Biotic–Abiotic Constraining Hypothesis as applied to cutthroat trout. *Transactions of the American Fisheries Society*, 134: 676–686, DOI: [10.1577/T04-112.1](https://doi.org/10.1577/T04-112.1)
- Railsback, S. F. (2000). *Instream flow assessment methods: guidance for evaluating instream flow needs in hydropower licensing*. Technical Report *Observation of Male Choice in Brown Trout (Salmo trutta) from Lar National Park, Iran*. In: *Brown Trout: Biology, Ecology and Management*, Lobón-Cerviá, J., Sanz, N (eds). John Wiley & Sons Ltd. pp.165-178, DOI: 10.1002/9781119268352.ch7
- Fausch, K. D. (1984). Profitable stream positions for salmonids: relating specific growth rate to net energy gain. *Canadian Journal of Zoology*, 62: 441-451, DOI: 10.1139/z84-067
- Grimm, V., Ayllon, D., Railsback, S. F. (2016). Next Generation Individual-Based Models Integrate Biodiversity and Ecosystems: Yes We Can, and Yes We Must. *Ecosystems*, 20th Anniversary Paper, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-016-0071-2>
- Hajiesmaeili, M. (2019). *Modification of the inSTREAM model using bioenergetics approach in order to simulate habitat suitability in rivers (Case study: Brown trout in Elarm River, Lar National Park)*. PhD thesis, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran, Iran, 278p. (In Persian). URL: <https://parseh.modares.ac.ir/thesis>
- Hajiesmaeili, M., Ayyoubzadeh, S. A., Railsback, S. F. (2018). Methods, capabilities and applications of the individual-based stream trout research and environmental assessment model, *11th International River Engineering Conference*, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, URL: <https://civilica.com/doc/589870/>
- Hanson, P., Johnson, T., Kitchell, J., Schindler, D. E. (1997). *Fish Bioenergetics 3.0*. Madison, WI: University of Wisconsin Sea Grant Institute, URL: <http://fishbioenergetics.org/>
- Harvey, B. C., Railsback, S. F. (2014). Feeding modes in stream salmonid population models: is drift feeding the whole story? *Environmental Biology of Fishes*, 97: 615-625, DOI: [10.1007/s10641-013-0186-7](https://doi.org/10.1007/s10641-013-0186-7)
- Hayes, J. W., Goodwin, E., Shearer, K. A., Hay, J., Kelly, L. (2016). Can Weighted Useable Area Predict Flow Requirements of Drift-Feeding Salmonids? Comparison with a Net Rate of Energy Intake Model Incorporating Drift–Flow Processes. *Transactions of the American Fisheries Society*, 145(3): 589-609, DOI: [10.1080/00028487.2015.1121923](https://doi.org/10.1080/00028487.2015.1121923)
- Hayes, J.W., Stark, J.D., Shearer, K.A. (2000). Development and test of a whole- lifetime foraging and bioenergetics model for drift feeding brown trout. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2): 315–332, DOI: 10.1577/1548-8659(2000)129<0315:DATOAW>2.0.CO;2
- Hevrøy, E. M., Espe, M., Waagbø, R., Sandnes, K.,

- Version 5.0. Software Guide*. Lang, Railsback & Associates, URL: <https://ecomodel.humboldt.edu/instream-and-insalmo-overview>
- Rajabei Nezhad, R. (2007). *Study of Density, Distribution and Yield on Benthic Fauna and Brown Trout (Salmo trutta fario) Feeding in Lar Reservoirs*. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Research and Science Campus. (In Persian).
- Rosenfeld, J. S., Ptolemy, R. (2012). Modeling available habitat versus available energy flux: do PHABSIM applications that neglect prey abundance underestimate optimal flows for juvenile salmonids? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69:1920–1934, DOI: 10.1139/f2012-115
- Salavatian, S. M. (2012). Identification of Benthic Macroinvertebrates in Rivers Entering to Lar Dam Lake. *Lahijan J. Env. Sci.*, 1(4): 67-78. (In Persian), URL: <https://www.sid.ir/FileServer/JF/32913900406>
- Shirvell, C. S. (1986). *Pitfalls of physical habitat simulation in the instream flow incremental methodology*. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 1460, URL: https://publications.gc.ca/collections/collection_2013/mpo-dfo/Fs97-6-1460-eng.pdf
- Van Winkle, W., Jager, H. I., Railsback, S. F., Holcomb, B. D., Studley, T. K., Baldrige, J. E. (1998). Individual-Based Model of Sympatric Populations of Brown and Rainbow Trout for Instream Flow Assessment: Model Description and Calibration. *Ecological Modelling*, 110: 175-207, DOI: [10.1016/S0304-3800\(98\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00065-9)
- Waddle, T. J. (2001). *PHABSIM for Windows, User's Manual and Exercises*.01-340, U.S. Geological Survey, Open-File, DOI: 10.3133/ofr2001340
- TR-1000554, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, URL: <https://www.epri.com/research/products/000000000001000554>
- Railsback, S. F. (2016). Why it is time to put PHABSIM out to pasture. *Fisheries*. 41(12): 720-725, DOI: [10.1080/03632415.2016.1245991](https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1245991)
- Railsback, S. F., Harvey, B. C. (2001). *Individual-based model formulation for cutthroat trout, Little Jones Creek, California*. General Technical Report PSW-GTR-182, Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Albany, CA, DOI: [10.2737/PSW-GTR-182](https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-182)
- Railsback, S. F., Harvey, B. C. (2011). Importance of fish behavior in modeling conservative problems: food limitation as an example. *Journal of Fish Biology*. 79: 1648-1662, DOI: [10.1111/j.1095-8649.2011.03050.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2011.03050.x)
- Railsback S. F., Harvey B. C., & Ayllón, D. (2021). *InSTREAM 7 user manual: Model description, software guide, and application guide*. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA. URL: <https://ecomodel.humboldt.edu/instream-7-and-insalmo-7>
- Railsback, S. F., Harvey, B. C., Jackson, S. K., Lamberson, R. H. (2009). *InSTREAM: The Individual-Based Stream Trout Research and Environmental Assessment Model*. U.S. Forest Service General Technical Report PSW- GTR-218, DOI: [10.2737/PSW-GTR-218](https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-218)
- Railsback, S. F., Harvey, B. C., Sheppard, C. (2012). *inSTREAM: The Individual-based Stream Trout Research and Environmental Assessment Model, Version 5.0*, URL: <https://ecomodel.humboldt.edu/instream-and-insalmo-overview>
- Railsback, S. F., Sheppard, C. (2012). *inSTREAM*