

رابطه مراحل زیستی (ناپلیوس، کوپه‌پودیت و بلوغ) *Acartia tonsa* با شاخصه‌های فیزیکوشیمیایی و پلانکتون‌های غالب سواحل مازندران طی فصل تابستان (یک رویکرد مدل‌سازی)

- زهرا بابائی: گروه بیولوژی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، کدپستی: ۴۶۴۱۷۷۶۴۸۹
 - نعمت‌الله محمودی*: گروه تکثیر و پرورش آبزیان، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، کد پستی: ۴۶۴۱۷۷۶۴۸۹
 - جعفر سیف‌آبادی: گروه بیولوژی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران، کدپستی: ۴۶۴۱۷۷۶۴۸۹
- تاریخ دریافت: خرداد ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۶

چکیده

پراکنش مکانی مراحل زیستی *Acartia tonsa* (ناپلیوس، کوپه‌پودیت و بلوغ) و رابطه آن با شاخصه‌های فیزیکوشیمیایی، فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌های غالب در سواحل مازندران طی فصل تابستان با استفاده از مدل Random Forest بررسی گردید. نمونه‌برداری ماهانه در سال ۱۳۹۱ در امتداد چهار خط عمود بر ساحل (امیرآباد، بابلسر، نوشهر و رامسر) در لایه‌های مختلف ستون آب در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ متر انجام شد. نتایج نشان داد که متوسط تراکم کل این گونه ۱۵۸۶ عدد در مترمکعب بود. پراکنش مکانی مراحل زیستی این گونه بیانگر روند کاهش تراکم به ترتیب در رامسر، امیرآباد، بابلسر و نوشهر بود. هم‌چنین، با دور شدن از ساحل و با افزایش عمق، تراکم هر کدام از مراحل زیستی *A. tonsa* کاهش یافت. تحلیل داده‌ها در محیط R و با استفاده از مدل RF نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این مدل برای شناسایی مهم‌ترین عوامل اثرگذار برای پراکنش مراحل ناپلیوس، کوپه‌پودیت و بلوغ *A. tonsa* (با دقت ۹۷ درصد) بود. بر این اساس مشخص شده است که مرحله لاروی *A. tonsa* رابطه مشهودی با مرحله کوپه‌پودیت و بلوغ خود، دما، فسفات، کدورت و مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy* داشت. به‌علاوه یک رابطه نزدیکی بین مرحله کوپه‌پودیت با مراحل ناپلیوس و بلوغ خود، دما، مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy*، نیتريت و کدورت پیدا شد، درحالی‌که مرحله بلوغ این گونه نیز رابطه نزدیکی با مرحله کوپه‌پودیت خود، مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy*، نیتريت، دما، شوری و اکسیژن داشت.

کلمات کلیدی: پراکنش مراحل زیستی *Acartia tonsa*، ساحل مازندران، دریای خزر، Random forest، مدل ساختار پایه درختی



مقدمه

بزرگ و بالاترین ظرفیت همگنی و خلوص ویژگی‌ها (کاهش واریانس متغیر هدف) ادامه می‌یابد (De'ath و Fabricius، ۲۰۰۰). به‌طور کلی سادگی تفسیر ساختار مدل‌های Tree-base، انعطاف‌پذیری در به‌کارگیری تعداد زیاد متغیرهای پیشگو و حجم نمونه محدود، نداشتن پیش‌فرض در مورد نوع رابطه بین متغیرهای پیشگو و پاسخ و هم‌چنین توانایی‌شان در مدنظر قرار دادن داده‌های پرت و اثر روابط متقابل بین متغیرهای مستقل و ناهمگنی در داده‌ها منجر به افزایش کاربرد آن‌ها در علوم مختلف شده است (Breiman و همکاران، ۱۹۸۴؛ Knudby و همکاران، ۲۰۱۰). مدل Random forest (RF) یکی از مدل‌های پیشرفته پایه درختی است که برای بهبود مدل CART (یک ساختار درختی) طراحی شده است که در آن از چند ساختار درختی که نمونه‌ها (فضای داده) با احتمال مساوی انتخاب می‌شوند و دسته‌بندی‌های (درخت) تولید شده مستقل از یکدیگر هستند. برآورد نهایی در مدل RF از تخمین متوسط مجموعه‌ای از درخت‌ها (Tree) (معمولاً ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ عدد) به‌دست می‌آید. در این مطالعه، روابط بین مراحل زیستی *A. tonsa* (ناپلیوس، کوپه پودیت و بلوغ) با شاخصه‌های کیفی آب و گونه‌های غالب فیتوپلانکتونی و زئوپلانکتونی براساس تغییرات ترانسکت (منطقه)، ایستگاه (دوری و نزدیکی از ساحل) و لایه (تغییرات عمقی) در فصل تابستان با استفاده از مدل RF مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

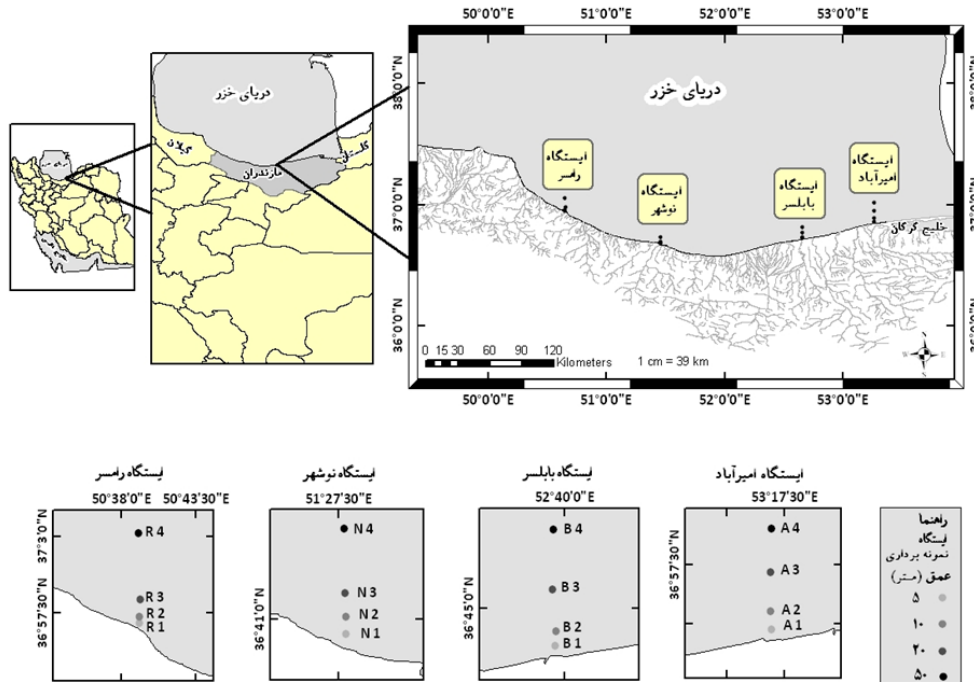
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل باند میانی و شرقی سواحل خزر جنوبی در استان مازندران (بین عرض شمالی ۶۸° ۳۶' تا ۳۷° ۰۱' و ۶۵° ۵۰' تا ۲۷° ۵۳' طول شرقی) می‌باشد. این مطالعه در ۴ خط نمونه‌برداری عمود بر ساحل (ترانسکت) شامل بندرامیرآباد (بهشهر)، بابلسر، نوشهر و رامسر (تغییرات ناشی از اختلاف منطقه‌ای) هر کدام در ۴ ایستگاه (تغییرات ناشی از دور شدن از ساحل) به‌صورت ماهیانه (تغییرات ناشی از زمان) از لایه‌های متفاوت (تغییرات ناشی از عمق) طی فصل تابستان ۱۳۹۱ انجام گردید (شکل ۱). در این مطالعه گونه‌های غالب فیتوپلانکتونی (۹۰٪ تراکم) شامل *Thalassionema* (Thalassio) *nitzschioides* از باسیلاریوفیت (cell/m3)، *Oscillatoria* sp.، *Lyngbya limnetica* (Lyngbya. lim) از سیانوفیت (cell/m3) و *Spirulina laxissima* از سیانوفیت (cell/m3) و *Binuclearia lauterbornii* از کلروفیت (cell/m3)، هم‌چنین گونه‌های زئوپلانکتونی (۹۰ درصد تراکم) شامل ۳ مرحله ناپلیوس، کوپه پودیت و بلوغ *A. tonsa* (ind/m3)، ۳ مرحله لاروی، گذر و بلوغ شاندار *M. leidy* (ind/m3) مشخص گردید. به‌علاوه شاخصه‌های فیزیکی شیمیایی نیز همانند نیتروژن آلی (N.org, ppb)، آمونیوم (NH4+،

جوامع زئوپلانکتونی اولین مصرف‌کننده زنجیره غذایی می‌باشند و همانند یک کانال، انرژی را از تولیدکننده (فیتوپلانکتون) به مصرف‌کننده‌های بالای زنجیره انتقال می‌دهند (Abrantes و همکاران، ۲۰۰۶). *Acartia tonsa* یکی از موثرترین گونه‌های زئوپلانکتونی در شبکه غذایی اکثر اکوسیستم‌های دریایی جهان (Leandro و همکاران، ۲۰۰۶) و هم‌چنین خزر می‌باشد (روشن‌طبری، ۱۳۸۶). توان تولیدمثلی بسیار بالا، تحمل بالا نسبت به نوسان شوری و دما از خصوصیات بارز این زئوپلانکتون است (اسماعیلی‌فردونی و همکاران، ۱۳۸۳؛ Hagemann و همکاران، ۲۰۱۶). *A. tonsa* دارای سه مرحله زیستی ناپلیوس، کوپه پودیت و بلوغ می‌باشد که هر کدام از این مراحل احتمالاً دارای نیازهای بوم‌شناختی متفاوتی می‌باشند و روابط متفاوتی را با سایر ارگانیزم‌ها در شبکه غذایی ایجاد می‌کنند (Marcus و Swadling، ۱۹۹۴؛ Meunier و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات قبلی روی *A. tonsa* اکثراً به آنالیز توصیفی از تغییرات سالیانه این گونه پرداخته است. از طرف دیگر پراکنش همه مراحل زیستی آن به‌عنوان یک جمعیت در نظر گرفته شده بود. از این‌رو بررسی جداگانه هر کدام از مراحل زیستی این گونه مخصوصاً برای هر فصل، بدون شک منجر به ارزیابی دقیق‌تری از وضعیت بوم‌شناختی این گونه خواهد شد. استفاده از یک روش تحلیلی مناسب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در اکولوژی مطرح بوده و یک مهارت مهم برای بوم‌شناسان تلقی می‌گردد (Zuur و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از عمده‌ترین ضعف‌های روش‌های آماری قدیمی، عدم تناسب فرضیات آن‌ها با پیچیدگی‌های روابط اکولوژیکی و درنظر نگرفتن مفاهیم مهمی هم‌چون روابط متقابل بین پارامترها و غیرخطی بودن روابط است. بنا به همین دلایل، مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر به استفاده از روش‌ها و مدل‌های پیشرفته سوق پیدا کرده است که می‌توانند تا حد زیادی پیچیدگی ساختارها و روابط اکولوژیکی را تحلیل کنند (Zuur و همکاران، ۲۰۱۰). از مهم‌ترین تکنیک‌های علم داده‌کاوی (Data mining)، دسته‌بندی داده‌ها با استفاده از مدل با ساختار پایه درختی (Tree-based) می‌باشد. این مدل برای اجرای تحلیل‌های کلاسه‌بندی و آنالیز رگرسیونی استفاده می‌شوند. ساختار درخت توسط شکافتن مکرر فضای روابط بین داده‌ها براساس یکسری معیارهای تعیین ناخالصی داده (از جمله شاخص Entropy و Gini) برای توصیف یک متغیر پاسخ ساخته می‌شود. در هر شکاف، داده‌ها به ۲ گروه منحصر به‌فرد تفکیک می‌شوند که هر کدام از آن‌ها به‌عنوان یک گروه همگن، دارای یک ویژگی خاص از ارتباط بین متغیرهای توصیفی و پاسخ می‌باشند. سپس این گروه‌ها مجدداً به قطعات کوچک‌تر و خالص‌تر تقسیم می‌شوند. فرآیند تقسیم فضای داده تا ایجاد یک درخت بسیار

($\mu\text{mos/cm}$)، فسفر کل (TP, ppb)، نیتروژن کل (TN, ppb)، کلروفیل α (ppb)، سیلیس (SiO₂, ppb) در نظر گرفته شد.

(ppb)، نیتريت (NO₂-, ppb)، نیترات (NO₃⁻, ppb)، فسفات (PO₄-3,)، کدورت (FTU)، درجه حرارت (°C)، اکسیژن محلول (DO,) (ppb)، شوری (ppt)، pH، فسفر آلی (P.org, ppb)، هدایت الکتریکی (ppm)

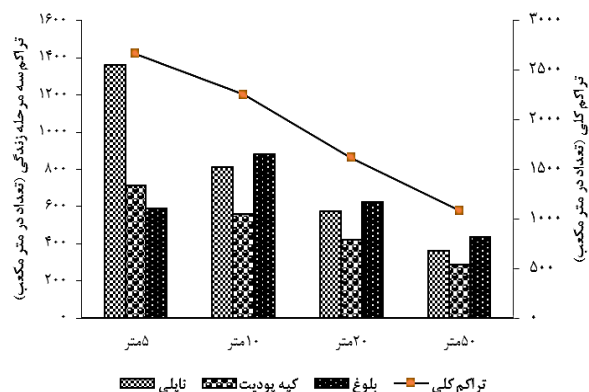


شکل ۱: موقعیت ترانسکت‌ها و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سواحل مازندران. A: امیرآباد، B: بابلسر، N: نوشهر، R: رامسر

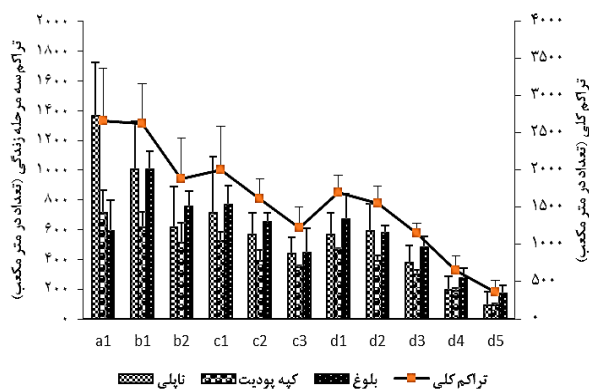
که نمونه اصلی به دو قسمت نمونه آموزشی و نمونه امتحانی تقسیم می‌شود. سپس از نمونه آموزشی نمونه‌گیری مجددی به حجم N گرفته می‌شود و ۱/۳ از نمونه آموزش (training data) جدید، به‌عنوان نمونه خارج از کیسه (out of bag, OOB) از مجموعه داده‌های آموزشی جدا می‌گردد. در واقع OOB، در هر درخت، به‌نوعی نقش نمونه امتحانی (test data) را برای آن درخت ایفا می‌کند (Breiman و همکاران، ۱۹۸۴). این مدل در محیط R و با استفاده از بسته آماری 'randomForest' اجرا شد. پارامترهای بسیار مهم در مدل RF شامل تعداد متغیر انتخاب شده در هر گره درخت (mtry)، تعداد درخت (ntree) و حداقل اندازه یا حداقل تعداد مشاهدات در گره‌های پایانی یا برگ‌ها (nodesize) می‌باشند. قبل از انجام آنالیزها، مقادیر مطلوب این پارامترها باید تعیین شود. مقادیر مطلوب براساس پیش‌فرض‌های موجود برای انجام مدل RF (در بررسی رگرسیونی) برای هر کدام از این پارامترها به‌ترتیب برای mtry مساوی با تعداد متغیر تقسیم بر ۳، ntree مساوی با ۱۰۰۰ و nodesize مساوی با ۵ تعیین گردید. هم‌چنین پراکنش تغییرات مکانی (تغییرات ناشی از ترانسکت‌ها، ایستگاه‌ها و لایه‌ها) مراحل

هم‌خطی (همبستگی شدید) بین متغیرهای مستقل توسط همبستگی پیرسون و شاخص VIF (Variance inflation factor) با بسته آماری "car" (Companion to Applied Regression) مورد ارزیابی قرار گرفت. Zuur و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که شاخصه‌های با مقدار VIF بالاتر از ۵ دارای هم‌خطی هستند. بر این اساس به‌منظور کاهش اثرات هم‌خطی در این مطالعه، ۴ شاخصه شامل هدایت الکتریکی (ارتباط زیاد با درجه حرارت)، فسفر کل (ارتباط زیاد با فسفر معدنی و آلی)، نیتروژن کل (ارتباط زیاد با نیترات، نیتريت، آمونیوم و نیتروژن آلی) و کلروفیل a (ارتباط زیاد با فیتوپلانکتون‌ها) از داده‌ها حذف و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفتند. سپس برای بررسی روابط متقابل مراحل زیستی *A. tonsa* با شاخصه‌های محیطی و جوامع غالب گونه‌های فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در سواحل مازندران براساس نمونه‌برداری ماهیانه و با استفاده از مدل RF ارزیابی گردیده است. اساس کار مدل RF ترکیبی از چندین درخت تصمیم است که در ساخت آن چندین نمونه بوت استرپ (Bootstrap) از داده‌ها شرکت دارد و در ساخت هر درخت به‌طور تصادفی تعدادی از متغیرهای ورودی شرکت می‌کنند. الگوریتم کلی مدل RF به این صورت است





شکل ۳: نمودار میانگین تراکم (میانگین \pm انحراف معیار) جمعیت *A. tonsa* (با توجه به مراحل مختلف زندگی و تراکم کلی) در فصل تابستان (۱۳۹۱) در ایستگاه‌های با اعماق مختلف سواحل مازندران



شکل ۴: نمودار میانگین تراکم (میانگین \pm انحراف معیار) جمعیت *A. tonsa* (با توجه به مراحل مختلف زندگی و تراکم کلی) در فصل تابستان (۱۳۹۱) در لایه‌های مختلف سواحل مازندران

ایستگاه ۵ متر: (لایه a1، ۵-۵ متر)، ایستگاه ۱۰ متر: (لایه b1، ۵-۵ متر، لایه b2، ۵-۱۰ متر)، ایستگاه ۲۰ متر: (لایه c1، ۵-۵ متر، لایه c2، ۵-۱۰ متر، لایه c3، ۲۰-۱۰ متر)، ایستگاه ۵۰ متر: (لایه d1، ۵-۵ متر، لایه d2، ۵-۱۰ متر، لایه d3، ۲۰-۱۰ متر، لایه d4، ۲۰-۲۵ متر، لایه d5، ۲۵-۵۰ متر).

با توجه به شکل ۳، تراکم *A. tonsa* از ایستگاه‌های با عمق ۵ متر (۲۶۶۶ عدد در متر مکعب) به سمت ایستگاه‌های با عمق ۵۰ متر (۱۰۸۵ عدد در متر مکعب) دارای کاهش تدریجی بوده است. با توجه به مراحل تکاملی در ایستگاه ۵ متر، بیش‌ترین و کم‌ترین تراکم به ترتیب متعلق به مرحله ناپلیوس و بلوغ بوده است. در صورتی که در سایر ایستگاه‌ها عکس این قضیه صادق شده است. در لایه‌بندی سواحل مازندران با افزایش عمق، تراکم *A. tonsa* کاهش یافته و در تمامی لایه‌ها مرحله بلوغ (به استثنای لایه A1) دارای بیش‌ترین میزان تراکم بوده است (شکل ۴). در لایه A1 تراکم مرحله ناپلیوس *A. tonsa* بیش از سایر لایه‌ها بوده است.

زیستی *A. tonsa* به صورت توصیفی در فصل تابستان گزارش گردید (Knudby و همکاران، ۲۰۱۰؛ محمودی، ۱۳۹۳).

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل: در این مطالعه، برای ارزیابی

عملکرد پیش‌بینی مدل‌های برازش شده، از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین تعدیل شده (Adjusted R²) استفاده شد. این شاخص‌ها از معیارهای رایجی هستند که برای مقایسه مدل‌ها استفاده می‌شوند (محمودی، ۱۳۹۳). بر این اساس، هر مدلی که دارای Adjusted R² (بین ۱-۰) بیش‌تر و RMSE کم‌تری باشد، عملکرد بهتری دارد. در این وضعیت، مدل موردنظر، بیانی بهتر از کل تغییرات زمانی و مکانی متغیر وابسته در ارتباط با متغیرهای محیطی داشته (Adjusted R²) و مقادیر محاسبه شده متغیر وابسته توسط مدل به مقادیر واقعی (RMSE) نزدیک‌ترند.

$$RMSE = \sqrt{\text{mean}((Y_{\text{observed}} - Y_{\text{model}})^2)}$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 1 - ((1 - R^2) * (n - 1) / (n - k - 1))$$

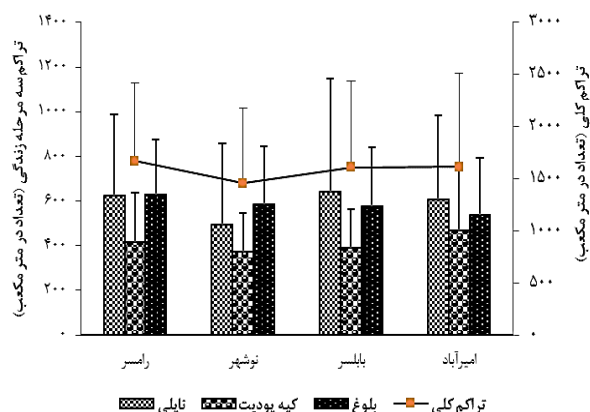
n = تعداد مشاهده، k = تعداد متغیر

نتایج

به منظور درک بهتر از پراکنش سه مرحله زیستی و رابطه آن با شاخصه‌های زیستی و غیرزیستی از دو روش تحلیل توصیفی و تحلیل استنباطی استفاده گردید.

تحلیل توصیفی: میانگین تراکم کلی (ادغام سه مرحله)

A. tonsa در سه ترانسکت امیرآباد، بابلسر و رامسر دارای پراکنش تقریباً یکنواخت بوده است. در این میان ترانسکت نوشهر با میانگین تراکم ۱۴۵۴ عدد در متر مکعب دارای کم‌ترین تراکم بوده است (شکل ۲).

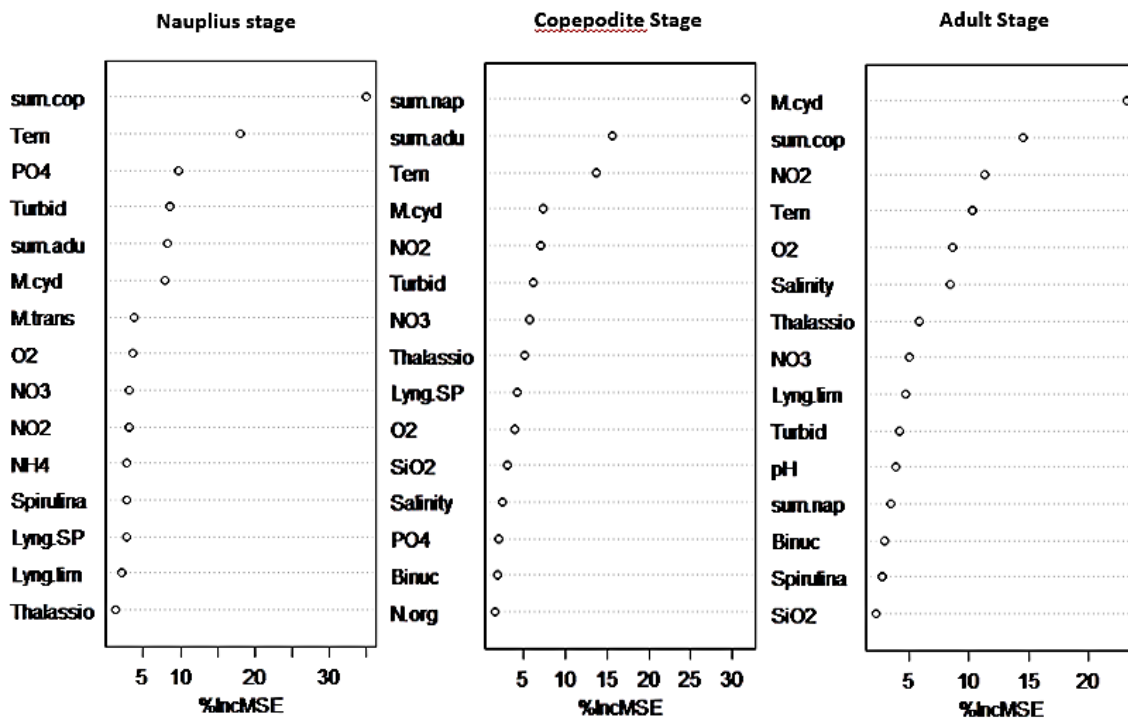


شکل ۲: نمودار میانگین تراکم (میانگین \pm انحراف معیار) جمعیت *A. tonsa* (با توجه به مراحل مختلف زندگی و تراکم کلی) در فصل تابستان (۱۳۹۱) در مناطق مختلف سواحل مازندران

جدول ۱: عملکرد مدل اجرا شده براساس معیارهای ارزیابی برای بررسی روابط مراحل زندگی *A. tonsa* (متغیرهای وابسته) با شاخصه‌های فیزیکیوشیمیایی و زیستی طی فصل تابستان در سواحل مازندران

مراحل زیستی	Adjusted R2	RMSE
ناپلیوس	۰/۹۷	۱۶۶
کوپه‌پودیت	۰/۹۷	۱۰۰
بلوغ	۰/۹۷	۱۰۷

تحلیل استنباطی: نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد مدل جنگل تصادفی توانست ۹۷ درصد تغییرات مکانی *A. tonsa* (با در نظر گرفتن تغییرات ناشی از ترانسکت‌ها و ایستگاه‌ها در فصل تابستان) را در ارتباط با شاخصه‌های زیستی و غیرزیستی مطالعه حاضر بیان نماید (جدول ۱).



شکل ۵: نمودار شاخصه‌های فیزیکیوشیمیایی و زیستی موثر بر تغییرات مکانی مرحله ناپلیوس، کوپه‌پودیت و بلوغ *A. tonsa* در سواحل مازندران طی فصل تابستان انتخاب شده توسط مدل RF

(Sum.nap = مرحله ناپلیوس *A. tonsa*، Sum.cop = مرحله کوپه‌پودیت *A. tonsa*، Sum.adu = مرحله بلوغ *A. tonsa*، M.cyd = مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy*، M.trans = مرحله گذر شانه‌دار *M. leidy*، Thalassio = *Thalassionema nitzschioides*، Binuc = *Binuclearia lauterbornii*، Lyng.lim = *Lyngbya limnetica*)

شانه‌دار *M. leidy*، مرحله کوپه‌پودیت *A. tonsa*، نیتريت، دما، شوری و اکسیژن می‌باشد.

بحث

به‌طور کلی نتایج این تحقیق در مورد مقادیر شاخصه‌های فیزیکیوشیمیایی و تراکم فیتوپلانکتون‌ها و زئوپلانکتون‌های غالب تقریباً با نتایج مطالعات سال‌های اخیر در سواحل خزر جنوبی مطابقت دارد. معیارهای ارزیابی (R^2 Adjusted و RMSE) بیانگر عملکرد مطلوب

در این مطالعه، چند شاخصه اول که از اهمیت بیشتری در تغییرات مراحل زیستی *A. tonsa* برخوردارند مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت. در این راستا نتایج نشان داده است که مرحله لاروی *A. tonsa* رابطه مشهودی به ترتیب با مرحله کوپه‌پودیت و بلوغ خود، دما، فسفات، کدورت و مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy* داشته است. مرحله کوپه‌پودیت *A. tonsa* با مرحله ناپلیوس و بلوغ این گونه، دما، مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy*، نیتريت و کدورت دارای رابطه نزدیکی بوده است. مرحله بلوغ این گونه نیز مرتبط با مرحله لاروی



(شکل ۴). افزایش تراکم بالغین در زیر ترموکلاین می‌تواند به دلیل امکان تحرک بیش‌تر آن‌ها (به دلیل ظاهر شدن پاهای شنا و دیگر اندام‌ها) به منظور جستجوی غذا و فرار از شرایط نامناسب و مخصوصاً شکارچی (مثل شانه‌دار) باشد.

در مطالعه حاضر، مرحله لاروی شانه‌دار *M. leidy* از جمله شاخصه‌های موثر انتخاب شده در مراحل زندگی *A. tonsa* (شکل ۲) بود. از آنجایی که *A. tonsa* در شرایط حاضر خزر جنوبی به عنوان غذای اصلی شانه‌دار *M. leidy* معرفی شده است (Roohi و همکاران، ۲۰۱۳)، احتمالاً اختلافات تراکم *A. tonsa* در ابعاد مکانی این تحقیق مخصوصاً تغییرات ناشی از ترانسکت‌ها به دلیل کاهش یا افزایش تراکم مرحله لاروی شانه‌دار می‌باشد.

در این مطالعه، براساس مدل RF رابطه بین ۳ مرحله زندگی *A. tonsa* شناسایی شد (شکل ۲). مطالعات متعددی نشان داده است که تغییرات پراکنش زئوپلانکتون‌ها به تراکم، اندازه، ساختار و نوع فیتوپلانکتون‌ها (اسماعیلی فریدونی و همکاران، ۱۳۸۳؛ Saize و Kiørboe، ۱۹۹۵؛ Swadling و Marcus، ۱۹۹۴؛ Teixeira و همکاران، ۲۰۱۰) هم‌چنین تراکم و اندازه میکروژئوپلانکتون‌ها (White و Roman، ۱۹۹۲) بستگی دارد. اما حضور درصد بالایی از سیانوفیت‌ها در خزر جنوبی در فصل تابستان (از جمله *Oscillatoria* sp و *Spirulina* و *Lyngbya*) که به واسطه داشتن ساختار رشته‌ای و تولید سم کم‌تر مورد تغذیه قرار می‌گیرند (Reynolds، ۲۰۰۶) و هم‌چنین تشکیل لایه ترموکلاین (کاهش میزان مواد مغذی در دسترس فیتوپلانکتون‌ها) احتمالاً باعث کاهش میزان غذای مطلوب برای *A. tonsa* خواهد شد. در این شرایط، به نظر می‌رسد منبع غذایی *A. tonsa* شامل گونه‌های دیاتومه و دینوفلاژله و احتمالاً میکروژئوپلانکتون‌ها باشد. در این راستا، مطالعات مختلف (Davis و همکاران، ۲۰۱۲؛ Burian و همکاران، ۲۰۱۳)، نشان داده است که میزان چرای میکروژئوپلانکتون‌ها در هنگام شکوفایی سیانوفیت‌ها (برخلاف موزوژئوپلانکتون‌ها) به شدت افزایش می‌یابد که در نتیجه منجر به افزایش میکروژئوپلانکتون‌ها و احتمالاً سبب افزایش منبع غذایی *A. tonsa* می‌گردد. هم‌چنین مطالعات White و Roman (۱۹۹۲) نشان داده است که درجه حرارت و میکروژئوپلانکتون‌ها نقش مهم‌تری نسبت به بیومس فیتوپلانکتون‌ها در تولید تخم و پتانسیل تولیدمثلی *A. tonsa* دارند. با توجه به چنین شرایطی در خزر جنوبی (کمبود غذای احتمالی) قاعدتاً می‌توان انتظار داشت که رقابت غذایی بین مراحل مختلف *A. tonsa* وجود داشته باشد. نتایج مطالعه حاضر در این زمینه نشان داده است که مرحله کوپه پودیت رابطه قوی تری روی دیگر مراحل دارد. این موضوع می‌تواند به خاطر شباهت غذایی و نزدیک بودن کنج اکولوژیکی این مرحله با ۲ مرحله ناپلیوس و بلوغ باشد.

مدل RF برای شناسایی روابط مکانی و زمانی بین مراحل زندگی (لاروی، کوپه پودیت و بلوغ) *A. tonsa* و شاخصه‌های فیزیکی‌شیمیایی و زیستی بود. عملکرد مطلوب مدل RF در این مطالعه محتملاً به دلیل توانایی این مدل در مدنظر قرار دادن برخی از ویژگی‌های داده‌های اکولوژیکی، نظیر ناپیوستگی شدید و وجود روابط متقابل قوی بین شاخصه‌های مستقل می‌باشد.

در این مطالعه، دما به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مرتبط با پراکنش مکانی (تغییرات ناشی از ترانسکت، ایستگاه و لایه) در سه مرحله زندگی *A. tonsa* تشخیص داده شد (شکل ۲). مطالعات نشان داده است که دما به واسطه اثر بر میزان سوخت و ساز و تقسیم سلولی، می‌تواند نقش به‌سزایی در سرعت رشد و نمو جانوران داشته باشد (Peck و Holste، ۱۹۹۹، روحی و همکاران، ۱۳۹۴). به طوری که زمان رشد و دگرگونی *A. tonsa* از ۴۰ روز در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد تا ۹ روز در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (Leandro و همکاران، ۲۰۰۶). از طرف دیگر، در سواحل جنوبی دریای خزر مشخص شده است که عامل اصلی اختلاط و یا عدم اختلاط عمودی، شیب دمایی آب (تشکیل لایه ترموکلاین در عمق ۲۰-۵۰ متر) می‌باشد (Jamshidi و Abu Bakar، ۲۰۱۲) که می‌تواند با ایجاد شرایط متفاوت غذایی و اکسیژنی بر تغییرات مکانی این گونه تاثیرگذار باشد. بررسی وضعیت تغییرات مکانی *A. tonsa* در منطقه مورد مطالعه نیز نشان داده است که بیش‌ترین تغییرات دمایی با تغییرات لایه صورت گرفته است و با تغییرات ترانسکت‌ها و دور شدن از ساحل تغییرات قابل ملاحظه‌ای صورت نگرفت. در مطالعات آزمایشگاهی روحی و همکاران (۱۳۹۴) مشخص شده است که شرایط مطلوب برای رسیدن به مراحل تکاملی بالاتر، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این دما در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان بین اعماق ۰ تا ۳۰ متر مشاهده گردید که در همین اعماق نیز بیش‌ترین تراکم *A. tonsa* مشاهده شد (شکل‌های ۳ و ۴).

علاوه بر این نتایج، با توجه به شکل ۲ مشخص شده است که از اهمیت دما به ترتیب مراحل دگرگونی کاسته شده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر مرحله لاروی *A. tonsa* به تغییرات دما نسبت به سایر مراحل زیستی آن باشد. در این راستا، مطالعات آزمایشگاهی Elliot و Tang (۲۰۱۱) در ارتباط با میزان مرگ و میر هر کدام از مراحل *A. tonsa* در ارتباط با تغییرات دما نیز نتیجه مشابهی را گزارش کردند. آنالیز توصیفی از پراکنش مرحله بلوغ *A. tonsa* در مطالعه حاضر نیز نشان داده است، با وجود این که دمای مطلوب رشد و تکامل *A. tonsa* محدوده بین ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (روحی و همکاران، ۱۳۹۴) اما تراکم مرحله بلوغ در زیر لایه ترموکلاین در فصل تابستان (دمای بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد) چشمگیر بود



۵۰-۲۰-۱۰ متر مشابه بوده، در صورتی که برخلاف سایر ایستگاه‌ها در ایستگاه ۵ متر، تراکم مرحله لاروی *A. tonsa* بیش از تراکم مرحله بلوغ بوده است.

به‌طور کلی این مطالعه نشان داده است که مدل RF توانایی قابل قبولی برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی مراحل زیستی *A. tonsa* شده است. براساس این مدل شاخصه‌های دما، شانه‌دار *M. leidy*، کدورت، فسفات، نیتريت، شوری و اکسیژن و مراحل زیستی گونه *A. tonsa* با اولویت‌های متفاوت برای هر مرحله به‌عنوان مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر پراکنش مراحل زیستی *A. tonsa* می‌باشد. استفاده از داده‌های طولانی مدت خزر جنوبی، به‌کاربردن متغیرهای بیش‌تر مخصوصاً شاخصه‌های فیزیکی از جمله شدت جریان، تنوع و تراکم موجودات در شبکه غذایی میکروبی خزر جنوبی، استفاده از مدل‌های قوی‌تر و هم‌چنین مطالعات آزمایشگاهی (Mesocosm) به‌منظور افزایش کارایی تحلیل مطالعه حاضر پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

از مدیریت و پرسنل محترم دانشکده علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس که در فراهم کردن امکانات این تحقیق نهایت همکاری را مبذول داشتند، تقدیر و تشکر می‌شود. هم‌چنین از آقایان دکتر ابوالقاسم روحی، دکتر جلیل علوی، مهندس کیهان‌ثانی و مهندس نصرالله‌تبار، خانم‌ها دکتر روشن‌طبری، دکتر تهامی، مهندس مخلوق، مهندس واحدی، مهندس رحمتی به‌خاطر همکاری علمی مفیدشان قدردانی می‌گردد.

منابع

۱. اسماعیلی فریدونی، ا.؛ سیف‌آبادی، ج.، جوانشیرخوئی، آ. و عابدیان‌کناری، ع.، ۱۳۸۳. تاثیر کیفی غذا بر هم‌آوری و تولید پلت مدفوعی پاروپای *Acartia clausi* دریای خزر. مجله علوم و فنون دریایی ایران. دوره ۳، شماره ۲ و ۳، صفحات ۱ تا ۱۴.
۲. روحی، ا.؛ آذری، ر.؛ شاپوری، م. و نادری‌جلودار، م.، ۱۳۹۴. بررسی چرخه زندگی کوپه پود *Acartia tonsa* تحت تیمارهای دمایی و شوری مختلف آب حوزه جنوبی دریای خزر. مجله اقیانوس‌شناسی. دوره ۶، شماره ۲۳، صفحات ۴۹ تا ۵۴.
۳. روشن‌طبری، م.؛ نجات‌خواه، پ.؛ حسینی، س.ع.؛ خداپرست، ن. و رستمیان، م.ت.، ۱۳۸۶. تنوع، تراکم و پراکنش زئوپلانکتون حوزه جنوبی دریای خزر در زمستان ۱۳۸۴ و مقایسه آن با سال‌های قبل، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ۹، شماره ۴، صفحات ۱۲۹ تا ۱۳۸.

به‌طور کلی مطالعات در زمینه رقابت غذایی این ۳ مرحله بسیار کم است. مهم‌ترین تغییرات ساختاری از مرحله ناپلیوس تا مرحله بلوغ به‌وجود آمدن پاهای شنا، بزرگ‌تر شدن حلقه‌های شکمی و دوکی شدن بدن (مرحله ناپلیوس گلابی شکل) می‌باشد. قاعدتاً این تغییرات منجر به تغییراتی در اولویت بخشی روش تغذیه این گونه خواهد شد. براساس مطالعات آزمایشگاهی و میدانی قبلی، این گونه دارای دو نوع تغذیه غیرمتحرک یا سوسپانسیونی (روش متداول در تغذیه فیتوپلانکتون) و متحرک یا کمینی (روش متداول در تغذیه میکروزئوپلانکتون مخصوصاً مژه‌داران) می‌باشد (Saiz و Kioboe، ۱۹۹۵، Takahashi و Tiselius، ۲۰۰۵). در این راستا، با توجه به این‌که مرحله کوپه‌پودیت دارای ابزار ترکیبی شکار (در اوایل این مرحله شبیه ناپلیوس و در اواخر مرحله شبیه بلوغ) به‌نظر می‌رسد رقابت غذایی بین این مرحله با ۲ مرحله دیگر بیش‌تر مشهود باشد. روابط موجود بین این ۳ مرحله از زندگی *A. tonsa* هم‌چنین می‌تواند ناشی از تغذیه بالغین از مراحل پایین‌تر به‌ویژه مرحله لاروی آن باشد. مطالعات در مورد هم‌جنس‌خواری *A. tonsa* نیز نشان داده است که بالغین از مرحله لاروی و به‌ویژه تخم خود نیز می‌توانند تغذیه کنند (Daan و همکاران، ۱۹۸۸؛ Drillet و همکاران، ۲۰۱۴؛ Shipman، ۲۰۱۵). مطالعات بیش‌تر و جامع‌تر در این زمینه در خزر جنوبی پیشنهاد می‌گردد. آنالیز توصیفی از نسبت جمعیت مرحله ناپلیوس به مرحله بلوغ در مطالعه حاضر (شکل‌های ۴ و ۵) نیز نشان می‌دهد که در همه لایه‌ها و ایستگاه‌ها (به‌غیر از ایستگاه‌های نزدیک ساحل به‌ویژه ۵ متر) درصد مرحله بلوغ بصورت غیرقابل‌انتظاری بیش‌تر بود. به‌نظر می‌رسد این نتیجه نیز تاییدکننده پدیده هم‌جنس‌خواری و تغذیه بالغین از تخم و لارو خود و هم‌چنین افزایش نرخ تغذیه از طریق مکانیسم کمین کردن (ambush) در منطقه مورد مطالعه (که با کمبود فیتوپلانکتون‌های مفید مواجه است) می‌باشد. با این وجود با توجه به عدم بررسی میکروزئوپلانکتون‌ها در این مطالعه و درصد خیلی کم فیتوپلانکتون‌های مفید در تابستان به‌نظر می‌رسد مطالعات آزمایشگاهی و گسترده‌تری برای شناسایی منابع غذایی اصلی *A. tonsa* در خزر جنوبی تحت این شرایط نیاز است.

کدورت عامل دیگری است که بر پراکنش مکانی (ترانسکت، ایستگاه، لایه) *A. tonsa* در مراحل مختلف زیستی تاثیرگذار بوده است (شکل ۲). این تاثیرپذیری به‌ترتیب توسعه مراحل تکاملی کاهش می‌یابد. کاهش تراکم شانه‌دار *M. leidy* با افزایش کدورت (به‌دلیل چسبیدن مواد معلق به اندام‌های شکار و در نتیجه کاهش کارایی شکار (Shiganova و همکاران، ۲۰۰۳) و به‌دنبال آن کاهش شکار *A. tonsa* توسط شانه‌دار (رابطه متقابل کدورت با شانه‌دار و اثر بر *A. tonsa*) می‌تواند پراکنش این گونه را تحت تاثیر قرار دهد. در آنالیز توصیفی مشخص گردید، تراکم مراحل دگردیسی *A. tonsa* در ایستگاه‌های



۴. محمودی، ن.، ۱۳۹۳. روابط متقابل جوامع پلانکتونی با تاکید بر شانه‌دار *Mnemiopsis leidyi* در سواحل مازندران. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
۵. Abrantes, N.; Antunes, S.C.; Pereira, M.J. and Gonçalves, F., 2006. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake (Lake Vela, Portugal). Journal of Acta Oecologica. Vol. 29, pp: 54-64.
۶. Breiman, L.; Friedman, J.H.; Olshen, R.A. and Stone, C.J., 1984. Classification and regression trees. Wadsworth International Group, Belmont. 368 p.
۷. Burian, A.; Schagerl, M. and Yasindi, A., 2013. Microzooplankton feeding behaviour: grazing on the microbial and the classical food web of African soda lakes. Hydrobiologia. Vol. 710, pp: 61-72.
۸. Daan, R.; Gonzalez, S.R. and Klein Breteler, W.C.M., 1988. Cannibalism in omnivorous calanoid copepods. Marine ecology progress series. Oldendorf. Vol. 47, No. 1, pp: 45-54.
۹. Davis, T.W.; Koch, F.; Marcoval, M.A.; Wilhelm, S.W. and Gobler, C.J., 2012. Mesozooplankton and microzooplankton grazing during cyanobacterial blooms in the western basin of Lake Erie. Harmful Algae. Vol. 15, pp: 26-35.
۱۰. De'ath, G. and Fabricius, K.E., 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis, Ecology. Vol. 81, No. 11, pp: 3178-3192.
۱۱. Elliott, D.T. and Tang, K.W., 2011. Influence of carcass abundance on estimates of mortality and assessment of population dynamics in *Acartia tonsa*. Marine Ecology Progress Series. Vol. 427, pp: 1-12.
۱۲. Drillet, G.; Maguet, R.; Mahjoub, M.S.; Roullier, F. and Fielding, M. J., 2014. Egg cannibalism in *Acartia tonsa*: effects of stocking density, algal concentration, and egg availability. Aquaculture international. Vol. 22, No. 4, pp: 1295-1306.
۱۳. Hagemann, A.; Øie, G.; Evjemo, J.O. and Olsen, Y., 2016. Effects of light and short-term temperature elevation on the 48-h hatching success of cold-stored *Acartia tonsa* Dana eggs, Journal of Aquaculture International. Vol. 24, No. 1, pp: 57-68.
۱۴. Holste, L. and Peck, M.A., 2006. The effects of temperature and salinity on egg production and hatching success of Baltic *Acartia tonsa* (Copepoda: Calanoida): a laboratory investigation. Marine Biology. Vol. 148, No. 5, pp: 1061-1070.
۱۵. Jamshidi, S.; Bakar, A. and Noordin, M. 2010., Temperature, Salinity and Density Measurements in the Coastal Waters of the Rudsar, South Caspian Sea. Journal of the Persian Gulf. Vol. 1, No. 1, pp: 27-36.
۱۶. Knudby, A.; Brenning, A. and LeDrew, E. 2010., New approaches to modelling fish-habitat relationships. Journal of Ecological Modelling. Vol. 221, pp: 503-511.
۱۷. Leandro, S.M.; Tiselius, P. and Queiroga, H., 2006. Growth and development of nauplii and copepodites of the estuarine copepod *Acartia tonsa* from southern Europe (Ria de Aveiro, Portugal) under saturating food conditions. Journal of Marine Biology. Vol. 150, No. 1, pp: 121-129
۱۸. Meunier, C.L.; Boersma, M.; Wiltshire, K.H. and Malzahn, A.M., 2016. Zooplankton eat what they need: copepod selective feeding and potential consequences for marine systems. Journal of Oikos. Vol. 125, No. 1, pp: 50-58.
۱۹. Reynolds, C.S., 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press.
۲۰. Roohi, A.; Pourgholam, R.; Ganjian Khenari, A.; Kideys, A.; Sajjadi, A. and Abdollahzade Kalantari, R., 2013, Factors Influencing the Invasion of the Alien Ctenophore *Mnemiopsis leidyi* Development in the Southern Caspian Sea. Journal of Ecopersia. Vol. 1, No. 3, pp: 299-313.
۲۱. Saiz, E. and Kjørboe, T., 1995. Predatory and suspension feeding of the copepod *Acartia tonsa* in turbulent environments. Marine Ecology-Progress Series. Vol. 122, No. 1-3, pp: 147-158.
۲۲. Shiganova, T.A.; Sapozhnikov, V.V.; Musaeva, E.I.; Domanov, M.M.; Bulgakova, Y.V.; Belov, A.A.; Zazulya, N.I.; Zernova, V.V.; Kuleshov, A.F.; Sokol-skii, A.F.; Imirbaeva, R.I. and Mikuiza A.S., 2003. Factors determining the conditions of distribution and quantitative characteristics of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in the North Caspian. Oceanology. Vol. 43, pp: 676-693.
۲۳. Shipman, K., 2015. Measuring Cannibalism Rates in the Zooplankton Copepod Species, *Acartia tonsa*.
۲۴. Swadling, K.M. and Marcus, N.H., 1994. Selectivity in the natural diets of *Acartia tonsa* Dana (Copepoda: Calanoida): Comparison of juveniles and adults, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. Vol. 181, No. 1, pp: 91-103.
۲۵. Takahashi, K. and Tiselius, P., 2005. Ontogenetic change of foraging behaviour during copepodite development of *Acartia clausi*. Marine Ecology Progress Series. Vol. 303, pp: 213-223.
۲۶. Teixeira, P.F.; Kaminski, S.M.; Avila, T.R.; Cardozo, A.P.; Bersano, J.G. and Bianchini, A., 2010. Diet influence on egg production of the copepod *Acartia tonsa* (Dana, 1896). Anais da Academia Brasileira de Ciências. Vol. 82, No. 2, pp: 333-339.
۲۷. White, J.R. and Roman, M.R., 1992. Egg production by the calanoid copepod *Acartia tonsa* in the mesohaline Chesapeake Bay: the importance of food resources and temperature. Marine Ecology-Progress Series. Vol. 86, pp: 239-239.
۲۸. Zuur A.F.; Ieno E.N. and Elphick C.S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems, Journal of Methods in Ecology and Evolution. Vol. 1, pp: 3-14.

