E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 8, No. 3 (2023) 642–653.

Paper Type: Original-Application Paper

A Mixed Integer Linear Programming Model for Fish Farming Scheduling in Different Chains and Customers Demand Management

Sajad Moradi*

Department of Applied Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran; sajadmoradi@aut.ac.ir.

Citation:

Moradi, S. (2023). A mixed integer linear programming model for fish farming scheduling in different chains and customers demand management. *Journal of decisions and operations research, 8*(3), 642-653.

Received: 05/04/2022 Reviewed: 07/05/2022 Revised: 19/06/2022 Accepted: 17/07/2022

Abstract

Purpose: This article studies an issue in the fish farming industry in which the goal is to find the best multi-period planning for handling various chains, including ordering, breeding, and selling of trout over a time horizon.

Methodology: In this study, a new formulation is presented as a mixed integer linear programming model that could find the optimum solution quickly. In the new proposed formulation, some intermediate stages of the breeding chain that do not affect decisions are ignored, and therefore, the size and complexity of the proposed model reduce without compromising the optimality of the answers.

Findings: After implementing the proposed model, using different data samples, it can be seen that this model achieves the optimal solution in a short time, including volume and time of spawning in each breeding chain and different periods, harvesting time, and accepting or rejecting the main demands.

Originality/Value: In this paper, the issue of scheduling of fish farming chains and sales management, which there are a few studies in this field, has been studied and a new mixed integer linear programming model is presented. Compared to the previous model, this model has more realistic assumptions and less complexity and execution time.

Keywords: Order acceptance, Lot sizing, Fishing industry, Mathematical modeling.

Corresponding Author: sajadmoradi@aut.ac.ir

http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.3.5.1

Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۸، شماره (۳)، (۱۴۰۲)، ۶۵۳-۶۴۲

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی-کاربردی

یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای زمان‌بندی پرورش ماهی در زنجیره‌های مختلف و مدیریت تقاضای مشتریان

سجاد مرادی*

گروه ریاضی کاربردی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

چکیده

هدف: این مقاله به مطالعه مساله برنامه‌ریزی پرورش ماهی در زنجیره‌های مختلف و مدیریت فروش در یک مزرعه پرورش ماهی در طول یک افق زمانی مشخص می‌پردازد و هدف آن تعیین بهینه زمان شروع و میزان تخم‌ریزی در زنجیره‌های مختلف، زمان صید و مدیریت سفارشات موجود در دوره‌های مختلف می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش: در این مطالعه، یک فرمول‌بندی جدید در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته ارایه شده است که می‌تواند جواب بهینه مساله را در مدت زمان کوتاهی پیدا کند. در مدل پیشنهادی جدید، برخی از مراحل میانی زنجیره پرورش ماهی که هیچ تاثیری بر تصمیمات کلیدی ندارند، نادیده گرفته می‌شوند و درنتیجه اندازه و پیچیدگی مدل پیشنهادی بدون نادیده گرفتن فرضیات حاکم بر مساله و از دست رفتن بهینگی جواب‌ها کاهش می‌یابد.

یافته‌ها: پس از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، با استفاده از نمونه داده‌های مختلف، مشاهده می‌شود که اندازه مدل، تعداد متغیرها و زمان اجرای آن در مقایسه با مدل مشابه کم‌تر است و با وجود اضافه کردن فرضیات واقعی جدیدی به مساله، این مدل قادر است در زمان کوتاهی جواب مساله شامل حجم و زمان تخم‌ریزی در هر زنجیره پرورش، زمان صید و نیز پذیرش یا رد تقاضاهای عمده را در دوره‌های مختلف به‌صورت بهینه تعیین کند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این مطالعه برای مساله زمان‌بندی زنجیره‌های پرورش ماهی و مدیریت فروش که تاکنون مطالعات اندکی در این زمینه صورت گرفته است، یک مدل جدید برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته ارایه شده است که در مقایسه با مدل موجود قبلی هم فرضیات واقعی بیشتری در آن لحاظ شده است و هم زمان اجرای کم‌تری دارد.

کلیدواژه‌ها: پذیرش سفارشات، تعیین اندازه انباشته، صنعت پرورش ماهی، مدل‌سازی ریاضی.

۱- مقدمه

زنجیره تامین مواد غذایی مانند بسیاری از زنجیره‌های تامین دیگر از سه بخش اصلی تشکیل شده است: تولید، فرآوری/بسته‌بندی و توزیع. در بخش اول، تولید مواد اصلی شامل کشت و پرورش گیاهان در زمین‌های کشاورزی، باغات و گل‌خانه‌ها، پرورش حیوانات اهلی و آبزیان در مزارع و یا صید آبزیان از رودخانه‌ها و دریاها، صورت می‌گیرد. در سطح دوم، محصولات اصلی و فرعی مانند غلات، حبوبات، لبنیات و گوشت که از سطح اول به‌دست می‌آیند در کارخانه‌های صنعتی فرآوری و بسته‌بندی می‌شوند. در سطح سوم، محصولات نهایی توسط برخی شرکت‌های توزیع به‌دست مصرف‌کنندگان می‌رسد. برنامه‌ریزی مناسب در هر سه سطح این زنجیره تامین تضمین می‌کند که

* نویسنده مسئول

sajadmoradi@aut.ac.ir

http://dorl.net/dor/20.1001.1.25385097.1402.8.3.5.1

محصولات غذایی با کیفیت بالا به‌موقع به‌دست مصرف‌کنندگان می‌رسند و هم‌چنین از هدر رفتن منابع جلوگیری می‌شود. مطالعات زیادی در این زمینه با اهدافی از جمله افزایش تولید، کاهش مصرف آب و انرژی، بهبود کیفیت تولید و توزیع و کاهش هزینه‌ها و ضایعات انجام شده است. برنامه‌ریزی کشت، پرورش حیوانات اهلی، تولید تخم‌مرغ و فرآورده‌های لبنی، برنامه‌ریزی تولید مواد غذایی صنعتی، برنامه‌ریزی تولید و توزیع مواد غذایی فاسدشدنی از مهم‌ترین مطالعات در زمینه زنجیره تامین مواد غذایی می‌باشد. کی و همکاران [1] مدلی ارایه کردند که می‌تواند با موفقیت یک برنامه کشت بهینه برای چند محصول کشاورزی پیشنهاد دهد به‌طوری‌که سود را به حداکثر برساند و رضایت مشتریان را جلب کند. بونمی [2] یک مدل برنامه‌ریزی خطی و یک روش حل بر اساس الگوریتم ذرات جمعی برای برنامه‌ریزی جوجه‌کشی و پرورش مرغ‌های تخم‌گذار در یک مرغداری ارایه داد تا بتوان برای تولید به‌موقع تخم‌مرغ جهت تامین نیازهای بازار برنامه‌ریزی کرد. توئیل و همکاران [3] برای مساله زمان‌بندی مراحل مختلف فرآوری و تولید فرآورده‌های لبنی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته[1] ارایه دادند. آموریم و همکاران [4] دو مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید در مجموعه‌ای شامل چندین کارخانه تولید مواد فاسدشدنی و توزیع بین برخی مراکز خرید ارایه دادند و توانستند هزینه‌های تولید، توزیع و ضایعات را کاهش دهند. پالس‌ورم و همکاران [5] به بررسی مساله برنامه‌ریزی تولید در یک کارخانه مواد غذایی با طول عمر محدود پرداختند و با هدف تعیین میزان تولید و تحویل در دوره‌های مختلف با درنظر گرفتن تقاضای نامشخص یک مدل تصادفی برای آن ارایه کردند. نگویان وهمکاران [6] در یک مطالعه مروری به بررسی مقالاتی پرداختند که در سال‌های اخیر با موضوع مدل‌سازی مسایل زنجیره تامین میوه‌های تازه در حالت قطعیت و عدم قطعیت داده‌ها منتشر شده‌اند. مقالات بررسی‌شده بیشتر به مسایلی مانند کشت، برداشت، لجستیک و انبارکردن و توزیع در بازارهای مصرف می‌پردازند که با درنظر گرفتن شرایط مختلف به ارایه مدل‌های ریاضی مختلفی منجر شده است که می‌توانند برای اخذ تصمیمات استراتژیک و عملیاتی درست از آن‌ها استفاده کرد. در تمام موارد مطالعه‌شده فسادپذیری میوه تازه در زنجیره و زمان چرخه کشت و برداشت فاکتورهای مهمی هستند که مورد توجه قرارگرفته‌اند.

ماهی‌گیری و آبزی‌پروری یکی دیگر از روش‌های تولید مواد غذایی است. در زمینه صنعت ماهی مطالعات زیادی در موضوعات مختلف از جمله صید، پرورش ماهی، فرآوری، بسته‌بندی و توزیع انجام شده است. آگرا و همکاران [7] یک کارخانه خوراک ماهی درنظر گرفتند که غذای ماهی تولید می‌کند و وظیفه تامین خوراک مزارع پرورش ماهی در نروژ را برعهده دارد و برای توزیع محصول خود از دو کشتی تخصصی استفاده می‌کند. هدف آن‌ها برنامه‌ریزی برای حرکت کشتی‌ها به مزارع مختلف در طول افق زمانی و هم‌چنین مدیریت موجودی در کارخانه‌ها و مزارع بود و برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارایه کردند . یوشیوکا [8] یک مدل ریاضی برای شناسایی بهترین زمان شروع برداشت در یک مزرعه شیلات به‌منظور بیشینه‌سازی سود نهایی ارایه داد و با تجزیه‌وتحلیل نتایج نشان داد که این زمان به شرایط محیطی بستگی دارد. یو [9] موضوع برنامه‌ریزی تولید در شبکه‌ای از کارخانه‌های برش و فیله‌سازی ماهی را مورد بررسی قرار داد که در آن ماهی‌های خام وارد کارخانه‌هایی با ظرفیت‌های مختلف شده، سپس به‌صورت فیله‌شده و در اندازه‌های مختلف به مشتریان تحویل داده می‌شوند. هدف آن‌ها تعیین تعداد برش‌ها براساس الگوهای مختلف و تهیه به‌موقع فیله در اندازه‌های مختلف مورد نیاز بود. جورجیادیس و همکاران [10] برنامه‌ریزی خط تولید را در یک کارخانه کنسرو ماهی شامل مراحل پر کردن، استریل کردن و بسته‌بندی انواع محصولات مطالعه کرده و دو مدل و رویکرد حل برای این مساله پیشنهاد دادند. در مطالعات دیگری بر اساس روش تحقیق پیمایشی، به‌طور شماتیک یک مدل ساختاریافته برای بهبود کارایی سیستم توزیع ماهی و میگو در بنگلادش و کاهش هزینه مصرف‌کننده و مصرف مواد نگهدارنده شیمیایی ارایه شد [11] یا بر اساس ابزارهای مدیریت کیفیت به ارایه مدلی عملی پرداخته شده است که برای کاهش تلفات در صنعت تولید و فرآوری ماهی طراحی شده است [12]. ارایه یک مدل دو سطحی برای برنامه‌ریزی توزیع ماهی زنده در بازارهای مختلف مطالعه دیگری است که سود هر یک از اعضای زنجیره تامین را افزایش می‌دهد [13].

یکی از موضوعاتی که در صنعت پرورش ماهی نیازمند مطالعه و بررسی جدی است و کم‌تر به آن پرداخته شده و در هیچ‌یک از مطالعات اشاره‌شده در بالا راجع‌به آن بحث نشده برنامه‌ریزی مراحل مختلف پرورش ماهی از تخم‌ریزی تا صید است. پرورش مصنوعی گونه‌های آبزی در استخرها یا مخازن یکی از روش‌های تولید پربازده است که طرفداران زیادی را به‌خود جلب کرده است و در سال‌های اخیر نسبت آبزی‌پروری به ماهی‌های صیدشده از آب‌های آزاد افزایش یافته است [14]. در این روش ماهیان کوچک پس از تخم‌ریزی در استخرها یا تانکرهای مختلف با غذای مناسب تغذیه می‌شوند و پس از چند هفته به وزن ایده‌آل برای صید می‌رسند. موضوع پرورش ماهی یکی از مسایل مطرح‌شده در زمینه برنامه‌ریزی تولید است که فاصله زمانی زیادی بین شروع تا پایان فرآیند وجود دارد و مانند

[1] Mixed Integer Linear Programming (MILP)

موارد مشابه دیگر [15]، زمان دقیق شروع فرآیند، حجم فرآیند و زمان تحویل محصول نهایی به مشتریان اهمیت زیادی دارد و با روش‌های آزمون و خطا و تصمیم‌گیری‌های لحظه‌ای نمی‌توان پاسخگوی مشتریان بود. با توجه به فاصله زمانی زیاد بین تخم‌ریزی و صید ماهی‌ها، تعیین زمان مناسب و حجم تخم‌ریزی و شروع زنجیره پرورش ماهی و زمان صید برای تامین به‌موقع نیاز بازار و جلوگیری از مرگ‌ومیر ماهی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. علی‌رغم اهمیت این موضوع، تاکنون مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است. یکی از معدود مقالاتی که در این زمینه وجود دارد توسط عابدی و ویهانگ [16] ارایه شده است. در این تحقیق یک مزرعه ماهی قزل‌آلا درنظر گرفته شده است که در آن زنجیره‌ای از مخازن یا استخرها وجود دارد که برای پرورش ماهی در سنین مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. آن‌ها یک مدل *MILP* برای تعیین بهینه زمان شروع و حجم تخم‌ریزی در یک زنجیره پرورش ماهی و تعیین زمان صید ماهی‌های بالغ و تعیین اولویت تامین تقاضای مشتریان ارایه کردند. تابع هدف این مدل بیشینه‌سازی سود فروش و به حداقل رساندن هزینه‌های تولید شامل هزینه تخم‌ریزی، تغذیه و تلفات ماهی‌هاست. در این مدل هر زنجیره پرورش ماهی شامل شش مرحله مجزاست و تمام این مراحل در مدل‌سازی مساله مورد توجه قرار گرفته و لذا تعداد متغیرهای تعریف‌شده بسیار زیاد است و برای مواردی که تعداد مشتریان بیش از سه مورد باشد، اندازه و پیچیدگی مدل و زمان اجرای آن به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مناسب برای تولید محصولات می‌تواند تا حد زیادی مانع از مواجهه تولیدکنندگان با کمبود یا مازاد محصولات تولیدی گردد [17]. از مهم‌ترین عواملی که بر سفارشات و برنامه‌ریزی تولید تاثیر می‌گذارد می‌توان به میزان موجودی محصولات در دوره‌های مختلف و نحوه تامین تقاضای مشتریان اشاره کرد. برنامه‌ریزی تولید ممکن است براساس عرضه به‌موقع تقاضا یا پذیرش و رد سفارشات باشد. در برخی موارد از روش برنامه‌ریزی پویا برای مدیریت سفارشات و موجودی‌ها استفاده می‌شود که در آن زمان پرشدن مجدد انبارها با درنظر گرفتن سقف و کف موجودی در دوره‌های مختلف تعیین می‌شود [18]. وقتی سطح موجودی کم‌تر از سطح مورد نظر باشد، فروشنده یا تامین‌کننده باید مقداری کالا سفارش دهد که موجودی را تا حد امکان به ظرفیت انبار نزدیک کند؛ درغیر این‌صورت، هیچ سفارشی نباید ثبت شود. در برخی موارد دیگر از مدل‌های ریاضی جامع برای مدیریت هم‌زمان سفارشات و برنامه‌ریزی تولید استفاده می‌شود. آنوام و همکاران [19] یک مدل خطی برای تصمیم‌گیری در مورد پذیرش یا رد برخی از سفارشات با تاریخ تحویل مشخص پیشنهاد کردند تا بتوانند تعیین کنند که چه سفارش‌هایی باید پذیرفته شوند و برنامه‌ریزی تولید مناسبی برای عرضه به‌موقع آن‌ها انجام دهند. در تحقیق پیش رو دو نوع تقاضا را درنظر گرفته می‌شود: نوع اول تقاضاهایی با حجم بالا برای عمده‌فروشان است که باید پذیرفته یا رد شوند و در صورت قبول هر سفارش باید همه آن را به‌موقع تامین کرد. نوع دوم تقاضاهایی با حجم کم‌تر است که در صورت وجود مازاد برآورده می‌شوند.

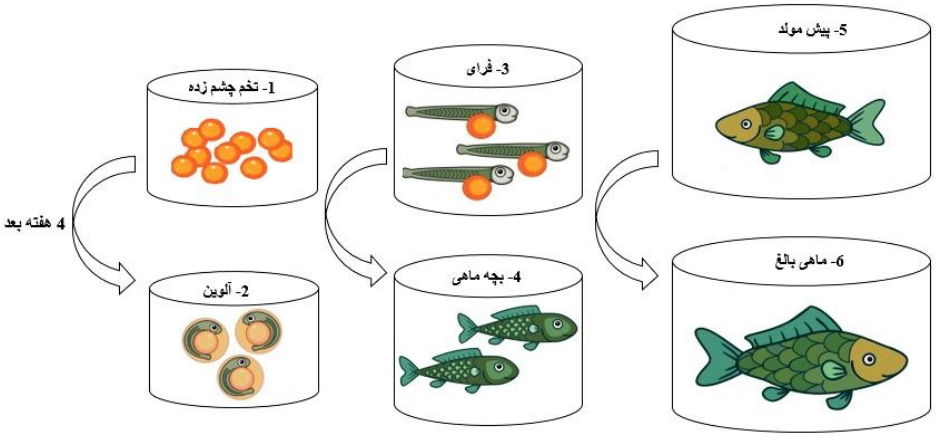
نکته مهم دیگری که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود این است که گاهی اوقات یک مساله تعریف‌شده در دنیای واقعی، می‌تواند با نگرش‌های متفاوتی مدل‌سازی شود. تفاوت در نگرش می‌تواند منجر به فرمول‌بندی‌های مختلفی شود، درحالی‌که خروجی همه آن‌ها یک برنامه واحد است اما پیچیدگی و زمان اجرای آن‌ها متفاوت است [20]. نوآوری اصلی این مطالعه ارایه یک فرمول‌بندی جدید در قالب یک مدل ریاضی، برای کمک به فرآیند تصمیم‌گیری برای یافتن زمان و حجم بهینه تخم‌ریزی، زمان صید و نیز پذیرش یا رد سفارشات در یک مزرعه پرورش ماهی است. در مقایسه با مدل مشابه قبلی که به مدل‌سازی همین مساله پرداخته است [16]، برخی از مراحل میانی از فرآیند مدل‌سازی حذف شده و با وجود افزودن فرضیات واقعی بیشتر به مدل و درنظر گرفتن چندین زنجیره پرورش ماهی، این مدل دارای متغیرهای کم‌تری است و می‌تواند در مدت زمان کوتاهی جواب بهینه را ارایه دهد.

بخش‌های مختلف این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: بخش ۲ به تعریف مساله و بیان مفروضات حاکم بر آن می‌پردازد. در بخش ۳، فرمول‌بندی جدید مساله در قالب یک مدل *MILP* ارایه می‌شود. در بخش ۴، نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل پیشنهادی و تحلیل خروجی‌ها ارایه شده است. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای آتی ارایه شده است.

۲- تعریف مساله و فرضیات حاکم بر آن

در این مطالعه، یک مزرعه پرورش ماهی درنظر گرفته شده است که در آن زنجیره‌ای از مخازن مجزا با ظرفیت‌های متفاوت برای پرورش ماهی وجود دارد. پرورش‌دهنده ماهی تخم‌های ماهی را در زمان‌های مختلف خریداری کرده و پس از تغذیه مناسب در سنین مختلف، زمانی که به وزن مورد نظر می‌رسند آن‌ها را به‌فروش می‌رساند. برای پرورش ماهی، همان‌طور که در **شکل ۱** نشان داده شده است، به

زنجیره‌ای از مخازن یا حوضچه‌های جداگانه نیاز است که در طول دوره‌های پرورش، ماهیان در سنین مختلف باید به‌ترتیب به این مخازن منتقل شوند. ماهی‌ها در هر مخزن به‌مدت چهار هفته تغذیه می‌شوند و سپس به مخزن بعدی منتقل می‌شوند و پس از گذشت بیست هفته به سن صید رسیده و به آخرین مخزن منتقل می‌شوند. ماهی‌های بالغ منتقل‌شده به آخرین مخزن را می‌توان در همان هفته اول صید کرده و فروخت و یا صید آن‌ها را تا چهار هفته به تعویق انداخت. هر چه ماهی‌ها در آخرین مخزن بیشتر بمانند، سنگین‌تر می‌شوند، اگرچه هزینه تغذیه و احتمال مرگ‌ومیرشان نیز افزایش می‌یابد. در این مزرعه دو نوع تقاضا درنظر گرفته شده است. در حالت اول مشتریان عمده‌فروشی که تقاضای نسبتا بالایی دارند و درصورت پذیرش تقاضایشان باید به‌موقع تحویل داده شوند. در حالت دوم مشتریان خرده‌فروشی که حجم تقاضای کم‌تری دارند و درصورت داشتن موجودی مازاد می‌توان همه یا بخشی از تقاضای آن‌ها را نیز تامین کرد.



شکل ۱- مراحل مختلف یک زنجیره پرورش ماهی.

Figure 1- The various stages of a fish farming chain.

در این مساله یک افق زمانی با طول ۳۳ هفته به سه زیرمجموعه جداگانه تقسیم می‌شود ($T = T_1 \cup T_2 \cup T_3$). زیرمجموعه اول شامل ۱۰ هفته اول (T_1) است که در این هفته‌ها می‌توان تعدادی زنجیره پرورش ماهی را با عملیات تخم‌ریزی آغاز کرد. هر زنجیره پس از ۲۰ هفته به مرحله صید و برداشت می‌رسد، بنابراین هفته‌های ۲۱ تا ۳۳ به‌عنوان هفته‌های برداشت درنظر گرفته می‌شود (T_3). در هفته‌های ۱۱ تا ۲۰ فقط مراحل تغذیه و پرورش ماهی‌ها ادامه دارد و در این هفته‌ها هیچ‌گونه عملیات تخم‌ریزی یا ماهی‌گیری صورت نمی‌گیرد و در این مدت تصمیم خاصی اتخاذ نمی‌شود (T_2). هر زنجیره شامل شش مرحله است و مدت زمان هر مرحله چهار هفته است. مرحله اول تخم‌ریزی است که در ۱۰ هفته اول اتفاق می‌افتد و برداشت آخرین مرحله است که در ۱۳ هفته آخر اتفاق می‌افتد. مراحل دوم تا پنجم هر زنجیره پرورش ماهی شامل تغذیه ماهی‌ها در سنین مختلف است. درصدی از تخم‌ها و ماهی‌های کوچک در فصول تخم‌ریزی و پرورش تلف می‌شوند و بقیه پس از ۲۰ هفته به ماهی‌های بالغ تبدیل می‌شوند. تصمیمات مهمی که در این زمینه باید گرفته شود عبارت است از زمان شروع و حجم تخم‌ریزی در هر زنجیره پرورش ماهی که در هفته‌های اول تا دهم اتخاذ می‌شود و هم‌چنین زمان صید و نحوه تامین تقاضاها که مربوط است به هفته‌های ۲۱ تا ۳۳ (صید ماهی‌های بالغ ممکن است تا ۴ هفته طول بکشد؛ بنابراین، زنجیره‌ای که در هفته دهم شروع می‌شود ماهی‌های آن در هفته ۳۱ بالغ و تا هفته ۳۳ صید می‌شوند). با توجه به این نکات می‌توان دریافت که برخلاف مدل ارایه‌شده قبلی [16] که تمامی مراحل انتقال ماهی به مخازن مختلف را در فرمول‌بندی مساله لحاظ کرده‌اند، تمامی مراحل ۲ تا ۵ نیاز به رصد کردن و فرمول‌بندی ندارند و کافی است که فقط مراحل اول و ششم را در مدل لحاظ کرد.

مفروضات حاکم بر این مساله به‌شرح زیر است:

۱. در این مزرعه فقط یک نوع ماهی پرورش داده می‌شود.
۲. چند زنجیره از مخازن با ظرفیت و هزینه‌های راه‌اندازی متفاوت در دسترس هستند.
۳. هر زنجیره مخازن از شش مخزن مجزا با ظرفیت مشخص تشکیل شده است.
٤. هزینه خرید تخم‌ها و تغذیه ماهیان در بیست هفته اول به‌صورت یک‌جا برای هر ماهی محاسبه می‌شود.
٥. در طی هر یک از شش مرحله پرورش، ماهی دیگری به مخازن اضافه نمی‌شود.
٦. مدت زمان نگه‌داری ماهی‌ها در هر مخزن چهار هفته است.

۷. میزان مرگ‌ومیر در هر مخزن به‌صورت یک ثابت شناخته‌شده درنظر گرفته می‌شود.
۸. تقاضای عمده‌فروشان و خرده‌فروشان از ابتدا مشخص و بر حسب وزن ثبت می‌شود.
۹. ماهی‌هایی که وارد مخزن ششم می‌شوند آماده صید هستند و ممکن است تا چهار هفته در این مخزن بمانند.
۱۰. نرخ رشد و تلفات ماهی‌های بالغ در تانک ششم در طول چهار هفته مشخص است.
۱۱. یک زنجیره پرورش حداقل پس از بیست هفته به مرحله فروش می‌رسد.
۱۲. تقاضای مشتریان از هفته بیست‌ویکم به‌بعد ثبت می‌شود.

۳- فرمول‌بندی مدل پیشنهادی

برای فرمول‌بندی مساله کل افق زمانی (T) به سه زیرمجموعه تقسیم می‌شود: ده هفته اول (T_1) که طی آن در زنجیره‌های مختلف تخم‌ریزی انجام و پرورش ماهی شروع می‌شود. ده هفته دوم (T_2) که در طول این هفته‌ها فقط مراحل دوم تا پنجم زنجیره‌های آغازشده تکمیل می‌شود و سیزده هفته آخر (T_3) فصل صید و فروش ماهیان بالغ است. باتوجه به این‌که در هفته‌های یازده تا بیست هیچ عملیات تخم‌ریزی یا صیدی صورت نمی‌گیرد و تصمیم کلیدی در این دوران اتخاذ نمی‌شود، تمامی متغیرهای تصمیم‌گیری براساس دو مجموعه T_1 و T_3 تعریف می‌شوند و نیازی به رصد کردن مراحل پرورش در دوره T_2 نیست. فرض بر این است که $|I|$ مجموعه از این زنجیره‌های مخازن وجود دارد و هر زنجیره با اندیس i نشان داده می‌شود و متغیر باینری y_{it} تعیین می‌کند که زنجیره پرورش i در چه هفته‌هایی آغاز می‌شود. هم‌چنین متغیر پیوسته X_{it} میزان تخم‌ریزی در زنجیره i در دوره t را مشخص می‌کند. مشتریان عمده با اندیس k معرفی می‌شوند و متغیر باینری z_k تعیین می‌کند که آیا سفارش مشتری k، به اندازه q_k و موعد تحویل dl_k، پذیرفته شود یا خیر.

در این مساله متغیرهای تصمیم عبارتند از زمان و مقدار تخم‌ریزی در زنجیره‌ها و دوران مختلف که در ده هفته اول اتفاق می‌افتد (T_1) و زمان و مقدار برداشت در فصل صید که در دوره T_3 اتفاق می‌افتد و هم‌چنین تعیین قبول یا رد سفارشات عمده مشتریان؛ بنابراین، متغیرهای تصمیم X_{it} و y_{it} فقط برای ده هفته اول و سایر متغیرها فقط برای سیزده هفته آخر تعریف می‌شوند و هیچ متغیری برای هفته‌های یازده تا بیست تعریف نشده است. از طرف دیگر با توجه به این‌که مدت زمان باقی ماندن ماهی‌ها در هر مخزن و میزان مرگ‌ومیر در هر مرحله مشخص است، مراحل انتقال ماهی به مخازن دوم تا پنجم در مدل‌سازی مساله درنظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین، در مقایسه با مدل مشابه، هرچند به‌جای یک زنجیره مخازن، چند زنجیره درنظر گرفته شده است، اما پیچیدگی مدل به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. تمامی نمادهای درنظر گرفته‌شده برای مجموعه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مساله در **جدول ۱** معرفی شده‌اند. با استفاده از این نمادگذاری مدل پیشنهادی در ادامه تشریح خواهد شد.

در تابع هدف کل درآمد حاصل از فروش ماهی به مشتریان عمده و خرده‌فروش بیشینه می‌شود و درعین حال هزینه‌های تولید شامل هزینه ثابت راه‌اندازی زنجیره‌های پرورش، هزینه خرید و تخم‌ریزی، هزینه تغذیه و حمل‌ونقل ماهی‌ها در سنین مختلف پرورش، هزینه تغذیه ماهیان بالغ در دوران صید و نیز هزینه عدم تامین تقاضاهای پذیرفته‌شده کمینه‌سازی می‌شود.

$$\textbf{Max } Z = \sum_{k\in K}(\pi_k q_k z_k - cs_k S_k) + \sum_{t\in T_3} pr_t D_t - \sum_{i\in I, t\in T_1} cf_{it} y_{it} - \sum_{i\in I, t\in T_1} \rho_{it} X_{it} - \sum_{l\in L, t\in T_3} cr_l Q_{lt}. \qquad (۱)$$

اگر تخم‌ریزی در زنجیره پرورش i در دوره t انجام شود متغیر دودویی y_{it} مقدار ۱ می‌گیرد و هزینه ثابت راه‌اندازی این زنجیره (cf_{it}) در تابع هدف لحاظ می‌گردد و متغیر X_{it} که نشان‌دهنده میزان تخم‌ریزی در این زنجیره در دوره t می‌باشد می‌تواند مقداری حداکثر به‌اندازه ظرفیت مشخص زنجیره i (cap_i) اخذ کند.

$$X_{it} \le cap_i y_{it} \qquad for\ all\ \ i \in I,\ \ for\ all\ \ t \in T_1. \qquad (۲)$$

یک زنجیره مخازن پرورش ماهی ممکن است در طول افق زمانی بیش از یک بار مورد استفاده قرار گیرد اما از آن‌جاکه هر مرحله از پرورش ماهی چهار هفته به‌طول می‌انجامد اگر در زنجیره پرورش i در دوره t تخم‌ریزی انجام شود این زنجیره تا چهار هفته نمی‌تواند مجددا به‌کار گرفته شود.

$$y_{it} + y_{it+1} + y_{it+2} + y_{it+3} \le 1 \qquad for\ all\ \ i \in I, t \in T_1. \qquad (۳)$$

اگر تخم‌ریزی در یک زنجیره پرورش ماهی در دوره t انجام شود ماهیان بالغ در این زنجیره پس از بیست هفته به مخزن ششم منتقل می‌شوند و در طول این بیست هفته درصدی از آن‌ها به‌خاطر مرگ‌ومیر تلف می‌شوند. فرض می‌شود نرخ مرگ‌ومیر در زنجیره‌های مختلف مشخص

مرادی / تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه: ۶۵۳-۶۴۲

است و $100(1-\alpha_{it})\%$ از کل تخم‌های رهاشده در زنجیره i سرانجام به ماهی بالغ تبدیل می‌شوند. ماهیان بالغ را می‌توان حداکثر تا چهار هفته در مخزن ششم هر زنجیره نگه‌داری کرد. کل ماهیان بالغی که به تانک ششم می‌رسند را می‌توان به ماهیانی دسته‌بندی کرد که در هفته اول تا چهارم پس از بلوغ صید می‌شوند.

$$\sum_{i\in I}(1-\alpha_{it})X_{it} = \sum_{l=1}^{4} Q_{lt+20} \qquad for\ all\ \ t \in T_1. \tag{۴}$$

توجه کنید که در **محدودیت (٤)** با استفاده از لغزاندن اندیس‌ها دیگر نیازی به رصد کردن مراحل پرورش ماهیان در سنین ۲ تا ۲۰ هفتگی‌شان و تعریف متغیر و محدودیت‌های متناظر با آن نیست و مشاهده می‌شود که ماهیانی که تخم‌ریزی آن‌ها در هفته tth صورت می‌گیرد (X_{it}) بین بیست تا بیست‌وسه هفته بعد صید می‌شوند ($\sum_{l=1}^{4} Q_{lt+20}$).

جدول ۱- نمادهای استفاده‌شده در مدل‌سازی مساله.

Table 1- The symbols used in problem modeling.

نمادها	توضیحات
مجموعه‌ها	
$t \in T = T_1 \cup T_2 \cup T_3$	تمام دوره‌های افق زمانی شامل ۳۳ هفته
$t \in T_1 = \{1,2,\dots,10\}$	دوره‌های تخم‌ریزی در زنجیره‌های مختلف
$t \in T_3 = \{21,22,\dots,33\}$	هفته‌های صید ماهیان بالغ
$l \in L = \{1,2,3,4\}$	دوران ماندن ماهیان بالغ در مخازن نهایی
$i \in I$	مجموعه همه زنجیره‌های مخازن
$k \in K$	تقاضاهای عمده
پارامترها	
π_k	قیمت پیشنهادی مشتری k برای هر کیلوگرم ماهی
q_k	مقدار تقاضای عمده k به کیلوگرم
cs_k	هزینه عدم تامین هر کیلوگرم تقاضای پذیرفته‌شده
pr_t	قیمت فروش یک کیلوگرم ماهی در دوره t
ρ_{it}	هزینه تجمیعی تخم‌ریزی، تغذیه و حمل‌ونقل برای یک ماهی
cf_{it}	هزینه ثابت راه‌اندازی زنجیره i در دوره t
cr_l	هزینه تغذیه ماهیان بالغ در طول دوران صید
cap_i	ظرفیت پرورش ماهی در زنجیره i
α_{it}	نرخ مرگ‌ومیر در زنجیره i در دوران مختلف
β_l	نرخ مرگ‌ومیر ماهیان بالغ در دوران صید
w_l	وزن هر ماهی بالغ در دوران مختلف صید
dl_k	موعد تحویل تقاضای عمده k
dem_t	میزان تقاضای خرد در دوره t
متغیرهای تصمیم	
X_{it}	میزان تخم‌ریزی در زنجیره i در دوره t
D_t	مقدار تقاضای خرد تامین‌شده در دوره t
Q_{lt}	تعداد ماهی که در هفته t بالغ و در هفته lام بلوغ صید می‌شود.
S_k	بخشی از تقاضای kth که به‌موقع تامین نشده است.
y_{it}	متغیر دودویی که اگر در دوره t در زنجیره i تخم‌ریزی انجام شود مقدار ۱ می‌گیرد.
z_k	متغیر دودویی که اگر تقاضای kth پذیرفته شود مقدار ۱ می‌گیرد.

در این مدل تقاضاها به دو شکل درنظر گرفته می‌شوند. نوع اول مربوط است به تقاضاهای مشتریان عمده‌فروش که حجم بالایی دارند و قیمت پیشنهادی خرید و موعد تحویل مشخصی دارند و ما می‌توانیم آن‌ها را قبول یا رد کنیم و در صورت پذیرش باید به‌موقع تامین شوند. نوع دوم تقاضاهای خرد است که حجم کم‌تری دارند و درصورت وجود می‌توان همه یا بخشی از آن‌را تامین کرد. متغیر دودویی z_k تعیین می‌کند که تقاضای عمده kth پذیرفته یا رد شود و در صورت قبول باید در موعد مشخص dl_k به اندازه q_k کیلوگرم ماهی تحویل داده شود (اگر به اندازه S_k کیلوگرم کمبود در تامین تقاضای kth پیش بیاید در تابع هدف جریمه متناسب لحاظ می‌شود). همه تقاضاهای مورد قبول در دوره tth را می‌توان از ماهیان بالغی که در این دوره در دسترس هستند تامین کرد.

$$\sum_{k\in K|dl_k=t}(q_k z_k - S_k) + D_t = \sum_{l=1}^{4}\sum_{\acute{t}\in T_3|\acute{t}+l-1=t} w_l(1-\beta_l)Q_{l\acute{t}} \qquad for\ all \quad t\in T_3. \qquad (۵)$$

در این قید فرض شده است که نرخ مرگ‌ومیر و وزن ماهیان بالغ در طول چهار هفته مجاز صید به‌ترتیب مقادیر مشخص β_l و w_l می‌باشد.

همه یا بخشی از تقاضاهای خرد در هر دوره را می‌توان در صورت داشتن موجودی تامین کرد (هزینه‌ای بابت عدم تامین این نوع تقاضا اعمال نمی‌شود) که این مقدار با متغیر D_t مشخص می‌شود و مقدار آن حداکثر برابر است با تقاضای مشخص آن دوره (dem_t).

$$D_t \le dem_t \qquad for\ all \quad t\in T_3. \qquad (۶)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه قیود فوق محدودیت‌های مساله فقط برای دوره‌های زمانی T_1 و T_3 نوشته شده‌اند و هیچ متغیر یا قیدی با اندیس t برای دوره T_2 نوشته نشده است. **محدودیت (۱)** تا **محدودیت (٤)** فقط برای ده هفته اول (T_1) و **محدودیت‌های (۵)** و **(٦)** فقط برای هفته‌های بیست‌ویکم تا سی‌وسوم (T_3) نوشته شده‌اند و **محدودیت (٤)** این دو دوره را به‌هم مرتبط می‌سازد. به‌همین خاطر تعداد متغیرها و محدودیت‌های مساله در مقایسه با مدل مشابه قبلی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

۴- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی آن‌را در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی 12.4 اجرا می‌کنیم. در این اجرا چهار زنجیره شش‌تایی از مخازن در یک مزرعه پرورش ماهی درنظر گرفته شده است. داده‌های مساله با الهام از مطالعه موردی انجام‌شده توسط [16] شبیه‌سازی شده‌اند. مشخصات کلی *Aimms*، توسط یک کامپیوتر شخصی با مشخصات پردازنده اینتل ۲ گیگاهرتز و ۲ گیگابایت رم و حل‌کننده *CPLEX* این زنجیره‌ها شامل هزینه ثابت راه‌اندازی، ظرفیت و میزان مرگ‌ومیر در **جدول ۲** گزارش شده است.

جدول ۲- مشخصات زنجیره‌های مختلف.

Table 2- The characteristics of different chains.

زنجیره	هزینه ثابت راه‌اندازی($)	ظرفیت پرورش ماهی	نرخ مرگ‌ومیر
C1	250	2500	0.1
C2	300	3000	0.1
C3	350	3500	0.1
C4	400	4000	0.1

مشخصات تقاضاهای عمده شامل مقدار تقاضا، قیمت پیشنهادی برای هر کیلوگرم ماهی، موعد تحویل و هزینه عدم تامین تقاضاهای پذیرفته‌شده، به‌صورت تصادفی در قالب بیست نمونه بر اساس الگوی ارایه‌شده در **جدول ۳** ایجاد می‌شوند.

جدول ۳- الگوی استفاده‌شده برای تولید داده‌های مختلف برای تقاضاهای عمده.

Table 3- The template used to generate different data for major requests.

تعداد تقاضاهای عمده	مقدار تقاضا (kg)	قیمت پیشنهادی ($)	موعد تحویل	هزینه عدم تامین به موقع ($)
6-20	Uniform [2000,4000]	Uniform [4,8]	Uniform [21,34]	100

گزارش کامل داده‌های تولیدشده شامل مقدار سفارش، قیمت پیشنهادی و زمان تحویل در **جدول ٤** آورده شده است. سایر پارامترهای کلیدی مساله نیز در **جدول ۵** نشان داده شده است.

با استفاده از داده‌های تولیدشده و با تغییر تعداد زنجیره‌های موجود از ۱ به ٤ و تعداد تقاضاهای عمده بین ٦، ۱۲ و ۲۰ مورد، نمونه داده‌های مختلفی به‌دست می‌آید (*Sample*1 تا *Sample*12). مدل پیشنهادی برای این ۱۲ نمونه داده پیاده‌سازی شده و نتایج مشاهده‌شده در خروجی مدل‌های اجراشده شامل تعداد محدودیت‌ها، تعداد متغیرها و زمان اجرا در **جدول ٦** نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول گزارش شده است، با افزایش تعداد تقاضاهای اصلی و ثابت ماندن تعداد زنجیره‌ها، تعداد محدودیت‌ها ثابت می‌ماند اما تعداد متغیرها افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش تعداد زنجیره‌ها، تعداد محدودیت‌ها و متغیرها نیز افزایش می‌یابد. مهم‌ترین نکته در این جدول این است که مدل پیشنهادی برای همه نمونه داده‌ها در مدت زمان کوتاهی به جواب بهینه می‌رسد و افزایش تعداد زنجیره‌ها و تقاضاهای اصلی (که منجر به افزایش تعداد متغیرهای باینری می‌شود) تاثیر چندانی بر زمان اجرای مدل پیشنهادی ندارد. این درحالی است که در مدل مشابه قبلی [16] با این‌که فقط یک زنجیره از مخازن درنظر گرفته می‌شود، با افزایش تعداد مشتریان زمان اجرای مدل به‌صورت تصاعدی افزایش

می‌یابد. برای مثال در یکی از موارد پیاده‌سازی‌شده با درنظر گرفتن یک زنجیره از تانک‌ها برای یک دوره شامل ۳۰ هفته و ۳ مشتری مدت زمان ۲۱۲۹ ثانیه و شکاف محاسباتی ۱% گزارش شده و در یک مورد دیگر برای یک دوره شامل ۳۰ هفته و ۱۰ مشتری مدت زمان ۳۲۹۳۲ ثانیه و شکاف محاسباتی ۲۳% گزارش شده است. این درحالی است که مدل جدید برای حالت‌هایی که حتی تعداد زنجیره‌های پرورش به ٤ زنجیره می‌رسد و تعداد مشتریان نیز ۲۰ مورد است در مدت زمان کوتاهی به جواب بهینه می‌رسد.

جدول ۴- مشخصات تقاضاهای عمده.

Table 4- The characteristics of major requests.

تقاضای عمده	مقدار سفارش (kg)	قیمت پیشنهادی ($)	موعد تحویل
K1	2875	7	31
K2	3480	5	25
K3	2960	4	28
K4	2214	4	21
K5	2897	4	22
K6	2982	7	32
K7	2762	6	33
K8	2951	4	28
K9	3163	4	21
K10	3871	6	22
K11	3417	7	22
K12	3031	7	31
K13	2292	4	31
K14	2312	6	32
K15	2439	7	30
K16	2773	6	31
K17	3292	6	28
K18	2435	6	29
K19	3991	5	32
K20	3540	7	25

جدول ۵- مشخصات پارامترهای کلیدی مساله.

Table 5- The characteristics of key parameters.

هزینه‌های تخم‌ریزی، پرورش و حمل‌ونقل	0.1+2.5+0.5 ($)
هزینه تغذیه ماهیان بالغ در طول هفته‌های صید (cr_1)	0, 0.1, 0.15, 0.2 ($)
نرخ مرگ‌ومیر ماهیان بالغ در طول هفته‌های صید (β_1)	0, 0.02, 0.05, 0.1
وزن ماهیان بالغ در طول هفته‌های صید (w_1)	0.9, 1, 1.1, 1.2 (kg)
قیمت فروش خرده‌فروشی(pr_t)	Uniform [3,6] ($)
مقدار تقاضای خرده‌فروشی(dem_t)	Uniform [10,100] (kg)

جدول ۶- مشخصات مدل‌های پیاده‌سازی‌شده با نمونه داده‌های مختلف.

Table 6- The characteristics of impelemented models with different data samples.

نمونه داده‌ها	# زنجیره‌ها	# تقاضاهای عمده	# قیود	# متغیرها	#متغیرهای دودویی	زمان اجرا (sec)
Sample 1	1	6	57	86	16	0.11
Sample 2	1	12	57	98	22	0.05
Sample 3	1	20	57	114	30	0.05
Sample 4	2	6	77	106	26	0.16
Sample 5	2	12	77	118	32	0.19
Sample 6	2	20	77	134	40	0.19
Sample 7	3	6	97	126	36	0.11
Sample 8	3	12	97	138	42	0.28
Sample 9	3	20	97	154	50	0.36
Sample 10	4	6	117	146	46	0.25
Sample 11	4	12	117	158	52	0.05
Sample 12	4	20	117	174	60	0.52

نتایج حاصل از خروجی مدل شامل تعداد کل زنجیره‌های به‌کار گرفته شده، تعداد هفته‌های صید، تعداد تقاضاهای عمده پذیرفته‌شده، مقدار کل برداشت برای نمونه داده‌های مختلف در **جدول ۷** نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول گزارش شده است، با افزایش تعداد و مقدار تقاضاهای اصلی و ثابت ماندن تعداد زنجیره‌های موجود، تعداد کل زنجیره‌های به‌کار گرفته‌شده و نیز تقاضاهای پذیرفته‌شده، مقدار کل صید و مقدار تابع هدف با شیب اندک افزایش می‌یابد و در برخی موارد حتی ثابت می‌ماند. هم‌چنین با افزایش

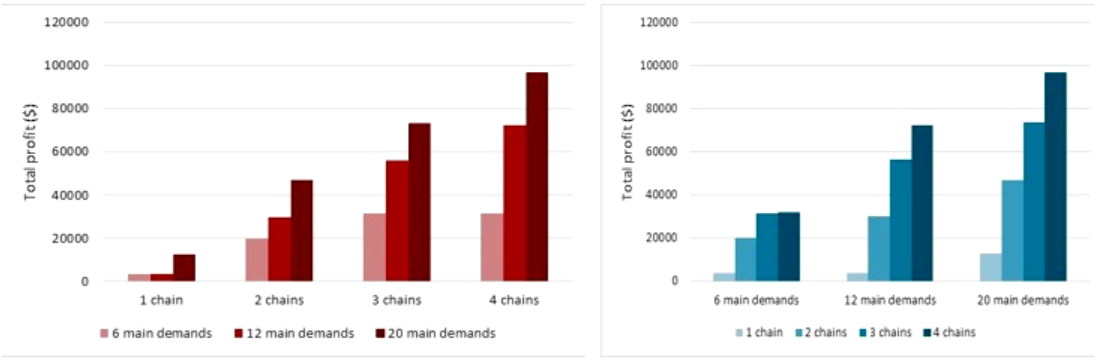
تعداد زنجیره‌های در دسترس و ثابت ماندن تعداد تقاضاهای اصلی، تعداد کل زنجیره‌های به‌کار گرفته‌شده و نیز تقاضاهای پذیرفته‌شده و مقدار کل صید به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، می‌توان چنین استنباط کرد که اگرچه تعداد و حجم تقاضاها افزایش می‌یابد، اما برای پذیرش و تامین به‌موقع آن‌ها و کسب سود بیشتر باید ظرفیت تولید (تعداد و ظرفیت زنجیره‌های در دسترس) افزایش یابد و در صورت کم بودن تعداد و ظرفیت زنجیره‌های موجود، حجم بالایی از تقاضا را نمی‌توان برآورده ساخت. این نکته در **شکل ۲** به‌خوبی نشان داده شده است. با توجه به **شکل ۲**، واضح است که سود نهایی مزرعه پرورش ماهی هم به تعداد زنجیره‌های موجود و هم به تعداد و مقدار تقاضاها بستگی دارد.

جدول ۷- نتایج پیاده‌سازی مدل با نمونه داده‌های مختلف.

Table 7- The results of model implementation with different data samples.

نمونه داده‌ها	#زنجیره‌ها	# تقاضاهای عمده	# دفعات تخم‌ریزی	# هفته‌های صید	کل تقاضای عمده و خرده (kg)
Sample 1	1	6	2	3	768+17390
Sample 2	1	12	2	3	768+36585
Sample 3	1	20	3	5	768+59659
Sample 4	2	6	5	6	768+17390
Sample 5	2	12	5	6	768+36585
Sample 6	2	20	6	6	768+59659
Sample 7	3	6	6	8	768+17390
Sample 8	3	12	9	9	768+36585
Sample 9	3	20	9	8	768+59659
Sample 10	4	6	6	9	768+17390
Sample 11	4	12	10	9	768+36585
Sample 12	4	20	12	10	768+59659

همان‌طور که در **شکل ۲-الف** نشان داده شده است، برای تعداد ثابتی از زنجیره‌ها، سود را می‌توان با افزایش تعداد تقاضاهای اصلی افزایش داد. به‌عنوان مثال، اگر فقط یک زنجیره از مخازن را در نظر بگیریم و تعداد تقاضاهای اصلی را از ٦ به ١٢ و سپس به ٢٠ تغییر دهیم، سود کل به‌ترتیب برابر با ٣٥٩٤، ٣٥٩٤ و ١٢٧٢٤ واحد خواهد بود و اگر دو زنجیره را در نظر بگیریم و تعداد تقاضاهای عمده را از ٦ تا ١٢ و سپس به ٢٠ تغییر دهیم، سود کل به‌ترتیب برابر با ١٩٩٥٠، ٢٩٩١٠ و ٤٦٨٣٧ واحد می‌باشد. می‌توان گفت یکی از دلایل این افزایش این است که همه تقاضاهای موجود مقرون به‌صرفه نیستند، اما با افزایش تعداد تقاضاهای اصلی، تنوع آن‌ها از نظر قیمت پیشنهادی، مقدار و زمان تحویل افزایش می‌یابد و در نتیجه شانس داشتن پیشنهادات قابل قبول افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، هنگامی که یک زنجیره در دسترس است، تنها یک پیشنهاد خوب برای پذیرش در بین ٦ و ١٢ تقاضای اصلی وجود دارد (در **جدول ٤** گزارش شده است)، درحالی‌که در بین ٢٠ تقاضای اصلی، ٢ پیشنهاد مقرون به‌صرفه وجود دارد. نکته دیگری که در این مورد به‌چشم می‌خورد این است که با افزایش تعداد زنجیره‌ها می‌توان انتظار سود بیشتری را داشت. به‌عنوان مثال، زمانی که یک زنجیره در دسترس باشد و ٢٠ تقاضای اصلی وجود داشته باشد، سود کل ١٢٧٢٤ واحد است، درحالی که اگر ٢ زنجیره در دسترس باشد، با وجود کاهش تعداد تقاضاهای اصلی به ٦، سود به‌دست‌آمده به اندازه ١٩٩٥٠-١٢٧٢٤=٧٢٢٦ واحد، بالاتر است.

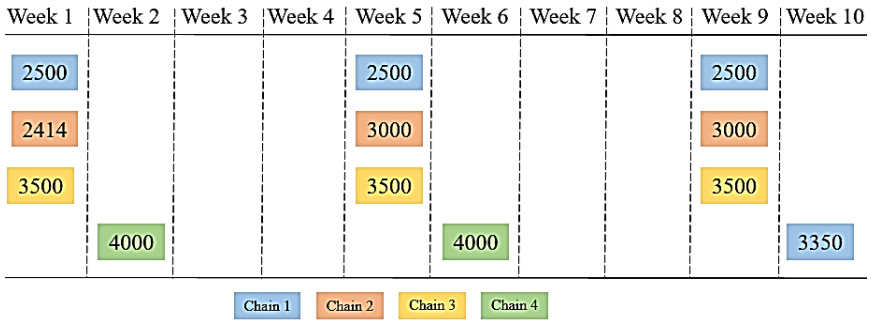


شکل ۲- نمودار تغییرات تابع هدف متناسب با تغییر تعداد زنجیره‌های در دسترس (a) و تعداد تقاضاهای اصلی (b).

Figure 2- The graph of changes in the objective function in proportion to the change in the number of available chains (a) and main demands (b).

به‌طور مشابه، در **شکل ۲-ب** مشاهده می‌شود که وقتی چند زنجیره پرورش ماهی در دسترس باشد، سود شرکت با وجود تعداد زیاد سفارشات پایین است. این مورد به این دلیل است که مزرعه ظرفیت پاسخ‌گویی به‌موقع به همه پیشنهادات خوب را ندارد. به‌عنوان مثال، زمانی که فقط یک زنجیره در دسترس باشد و ۲۰ تقاضای اصلی وجود داشته باشد، تنها دو خواسته قابل قبول است، درحالی‌که زمانی‌که تعداد زنجیره‌ها به ٤ زنجیره افزایش یابد، می‌توان به ۱۱ خواسته پاسخ داد. مدل پیشنهادی قادر به تعیین بهینه مقدار و زمان تخم‌ریزی در زنجیره‌های مختلف است.

نمونه‌ای از خروجی مدل پیشنهادی برای نمونه داده *sample 12* به‌صورت شماتیک در **شکل ۳** نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که عملیات تخم‌ریزی در زنجیره‌های شماره ۱ تا ۳ به‌طور هم‌زمان در هفته‌های اول، پنجم و نهم و در زنجیره شماره ٤ در هفته‌های دوم، ششم و دهم انجام می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همیشه یک فاصله زمانی ٤ هفته‌ای برای اطمینان از تکمیل تمام مراحل پرورش بین دو تخم‌ریزی در هر زنجیره وجود دارد و مشاهده می‌شود که در اکثر این زنجیره‌ها مقدار تخم‌ریزی تقریبا برابر است با حداکثر ظرفیت هر زنجیره. خروجی دیگری که مدل اجراشده ارایه می‌دهد مقدار و زمان صید ماهی‌های بالغ پرورش‌یافته در سنین مختلف از ۱ تا ٤ هفته است.

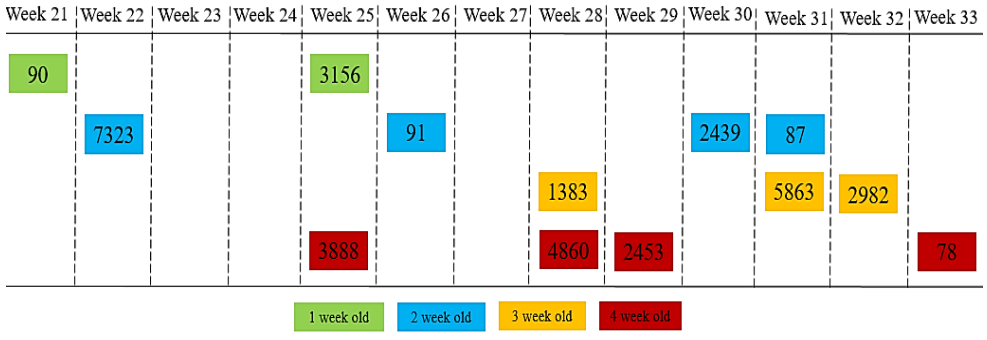


شکل ۳- زمان‌بندی و مقدار تخم‌ریزی در زنجیره‌های مختلف در ده هفته نخست بر اساس نمونه داده sample12.

Figure 3- Scheduling and amount of spawning in different chains in the first ten weeks based on sample12.

نمونه‌ای از خروجی مدل پیشنهادی در مورد زمان و کمیت صید برای نمونه داده *sample12* به‌صورت شماتیک در **شکل ٤** نشان داده شده است. ماهی‌های بالغ را می‌توان در سن ۱ تا ٤ هفتگی صید کرد و با درنظر گرفتن هم‌زمان **شکل‌های۳** و **٤** مشاهده می‌شود که تخم‌ریزی ۸٤۱٤ ماهی جوان در سه زنجیره در هفته اول انجام می‌شود و در هفته بیست‌ویکم تعداد ۷۵۷۳ عدد از آن‌ها به ماهی بالغ تبدیل می‌شوند (میزان تلفات تخمینی ۱۰% است) و به مخزن ویژه ماهی‌گیری منتقل می‌شوند. صد عدد از این ماهی‌ها در هفته ۲۱ صید می‌شوند و مابقی نیز یک هفته دیگر در مخازن نهایی می‌مانند که در طول این هفته نیز ۲% از آن‌ها تلف شده و مابقی (۷۳۲۳) در هفته ۲۲ صید می‌شوند. بنابراین با توجه به وزن ماهیان بالغ در هفته‌های مختلف، در هفته ۲۱ به میزان ۹۰=۱۰۰×۰/۹ کیلوگرم ماهی بالغ یک‌هفته‌ای صید می‌شود و در هفته ۲۲ به میزان ۷۳۲۳=۱×۷۳۲۳ کیلوگرم ماهی بالغ دوهفته‌ای صید می‌شود. به‌همین ترتیب در هفته دوم در زنجیره چهارم تخم‌ریزی ٤۰۰۰ ماهی انجام می‌شود که ۳٦۰۰ عدد از آن‌ها به ماهی بالغ تبدیل می‌شوند.

اما صید آن‌ها تا چهار هفته به تعویق می‌افتد و در نتیجه در طول این چهار هفته نیز ۱۰% از آن‌ها تلف شده و لذا در هفته ۲۵ به میزان ۳۸۸۸=۱/۲×۳۲٤۰ کیلوگرم ماهی بالغ چهارهفته‌ای صید می‌شود.



شکل ۴- تعیین مقدار (kg) و زمان صید ماهیان بالغ در ۱۳ هفته آخر براساس نمونه داده sample12.

Figure 4- Determining the volume (kg) and time of catching adult fishes in the last weeks based on sample 12.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله مدل جدیدی را برای مساله برنامه‌ریزی پرورش ماهی ارایه می‌کند که شامل مراحل تخم‌ریزی، پرورش، صید و مدیریت فروش می‌باشد. در این مدل برخلاف مدل مشابه قبلی [16]، تمامی مراحل پرورش ماهی در فرمول‌بندی لحاظ نشده است و تنها مراحلی که نیازمند تصمیم‌گیری هستند یعنی مرحله اول (حجم تخم‌ریزی در زنجیره‌ها و دوره‌های مختلف) و آخرین مرحله (زمان‌بندی صید و فروش) مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین، تعداد قیود و متغیرهای مساله به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. در مدل جدید چند زنجیره با ظرفیت‌های مختلف درنظر گرفته شده و تقاضاها به‌صورت تقاضاهای عمده و خرد درنظر گرفته شده است، اما با این‌که این محدودیت‌ها و فرضیات واقعی نیز به مساله اضافه شده است پس از اجرای مدل مشاهده می‌شود که برای نمونه داده‌های مختلف مدل در زمان کوتاهی به جواب بهینه می‌رسد. خروجی این مدل زمان شروع هر زنجیره پرورش، حجم تخم‌ریزی در هر زنجیره، زمان صید ماهیان پرورشی، پذیرش یا رد سفارشات عمده و تعیین میزان فروش به خریداران خرد را به‌صورت بهینه تعیین می‌کند. این مطالعه به‌خوبی نشان می‌دهد که با تغییر نگرش به یک مساله واحد می‌توان آن‌را به‌شکل مناسب‌تری مدل‌سازی کرد به‌طوری‌که بدون نادیده گرفتن فرضیات حاکم بر مساله و از دست دادن بهینگی جواب‌ها، در مدت زمان کم‌تری به جواب نهایی دست پیدا کرد. مدل پیشنهادی برای یک مساله شامل پرورش یک نوع ماهی در مزرعه‌ای دارای یک تا چهار زنجیره مختلف پرورش ماهی با استفاده از نرم‌افزارها و روش‌های موجود حل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مانند روش شاخه و کران به‌راحتی به‌صورت بهینه حل می‌شود و نیازی به روش‌های ابتکاری نیست اما اگر مساله را به حالت چندگونه ماهی توسعه دهیم ممکن است که پیچیدگی مساله بالا رفته و نیاز به روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مساله باشد. برای کارهای آینده، پیشنهاد می‌شود که مدل پیشنهادی به مزرعه‌ای گسترش یابد که چند گونه مختلف ماهی را پرورش می‌دهد، و هم‌چنین عدم قطعیت داده‌ها مانند میزان تقاضا یا میزان مرگ‌ومیر نیز در نظر گرفته شود و در صورت نیاز الگوریتم‌های مناسب برای حل آن ارایه شود.

تعارض با منافع

هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد. همه نویسندگان، نسخه نهایی ارسال‌شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله، اثر اصلی آن‌ها بوده، قبلا چاپ نشده، و در حال حاضر تحت انتشار نمی‌باشد.

منابع

[1] Ke, S., Guo, D., Niu, Q., & Huang, D. (2015). Optimized production planning model for a multi-plant cultivation system under uncertainty. *Engineering optimization*, *47*(2), 204–220.

[2] Boonmee, A., & Sethanan, K. (2016). A GLNPSO for multi-level capacitated lot-sizing and scheduling problem in the poultry industry. *European journal of operational research*, *250*(2), 652–665.

[3] Touil, A., Echchatbi, A., & Charkaoui, A. (2016). An MILP model for scheduling multistage, multiproducts milk processing. *IFAC-papersonline*, *49*(12), 869–874.

[4] Amorim, P., Günther, H. O., & Almada-Lobo, B. (2012). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International journal of production economics*, *138*(1), 89–101.

[5] Pauls-Worm, K. G. J., Hendrix, E. M. T., Alcoba, A. G., & Haijema, R. (2016). Order quantities for perishable inventory control with non-stationary demand and a fill rate constraint. *International journal of production economics*, *181*, 238–246.

[6] Nguyen, T. D., Nguyen-Quang, T., Venkatadri, U., Diallo, C., & Adams, M. (2021). Mathematical programming models for fresh fruit supply chain optimization: a review of the literature and emerging trends. *AgriEngineering*, *3*(3), 519–541.

[7] Agra, A., Christiansen, M., Ivarsøy, K. S., Solhaug, I. E., & Tomasgard, A. (2017). Combined ship routing and inventory management in the salmon farming industry. *Annals of operations research*, *253*, 799–823.

[8] Yoshioka, H., & Yaegashi, Y. (2016). Finding the optimal opening time of harvesting farmed fishery resources. *Pacific journal of mathematics for industry*, *8*(1), 1–6.

[9] Yu, Q., & Strandhagen, J. O. (2019). Multi-site production planning in a fresh fish production environment. In *Advanced manufacturing and automation VIII 8* (pp. 439-447). Springer Singapore.

[10] Georgiadis, G. P., Pampín, B. M., Cabo, D. A., & Georgiadis, M. C. (2020). Optimal production scheduling of food process industries. *Computers & chemical engineering*, *134*, 106682. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106682

[11] Islam, S. B., & Habib, M. M. (2013). Supply chain management in fishing industry: a case study. *International journal of supply chain management*, *2*(2), 40–50.

[12] Paladini, E. P., Avilés, B. G., Schumacher, L., Lorenz, M., & Urquiza, Y. R. (2019). Quality management model for perishable food in a fishing industry. *Journal of food process engineering*, *42*(6), e13171. https://doi.org/10.1111/jfpe.13171

[13] Tabrizi, S., Ghodsypour, S. H., & Ahmadi, A. (2018). Modelling three-echelon warm-water fish supply chain: A bi-level optimization approach under Nash--Cournot equilibrium. *Applied soft computing*, *71*, 1035–1053.

[14] Mosallanezhad, B., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Triki, C. (2021). Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft computing*, *25*, 7399–7422.

[15] Moradi, S., MirHassani, S. A., & Hooshmand, F. (2019). Efficient decomposition-based algorithm to solve long-term pipeline scheduling problem. *Petroleum science*, *16*, 1159–1175.

[16] Abedi, A., & Zhu, W. (2017). An optimisation model for purchase, production and distribution in fish supply chain--a case study. *International journal of production research*, *55*(12), 3451–3464.

[17] Nurprihatin, F., Gotami, M., & Rembulan, G. D. (2021). Improving the Performance of Planning and Controlling Raw Material Inventory in Food Industry. *International journal of research in industrial engineering*, *10*(4), 332-345.

[18] Chen, Z., & Rossi, R. (2021). A dynamic ordering policy for a stochastic inventory problem with cash constraints. *Omega*, *102*, 102378. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048320307325

[19] Aouam, T., Geryl, K., Kumar, K., & Brahimi, N. (2018). Production planning with order acceptance and demand uncertainty. *Computers & operations research*, *91*, 145–159.

[20] Moradi, S., & MirHassani, S. A. (2015). Transportation planning for petroleum products and integrated inventory management. *Applied mathematical modelling*, *39*(23–24), 7630–7642.