

مدل سازی ریاضی زنجیره تأمین زرشک سیاه: یک چارچوب تحلیلی

یاسر جعفری^۱، حمید مرتضی اصل^۲

۱- گروه ریاضی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران (Yasser@iau.ac.ir)

۲- گروه ریاضی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران (Hamid_mortazaasl@iau.ac.ir)

چکیده

زرشک سیاه به عنوان یک محصول استراتژیک و دارای خواص دارویی، از پتانسیل اقتصادی بالایی برای صادرات برخوردار است. با این حال، زنجیره تأمین ناکارآمد و فسادپذیری این محصول، چالش‌های عمده‌ای را برای دستیابی به این پتانسیل ایجاد کرده است. این مقاله با هدف ارائه یک چارچوب کمی برای بهینه‌سازی این زنجیره تأمین، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) چند دوره‌ای را پیشنهاد می‌دهد. هدف اصلی مدل، کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین، شامل هزینه‌های خرید، حمل و نقل، فرآوری، نگهداری و بسته‌بندی است. مدل پیشنهادی، جریان محصول از مزارع به مراکز جمع‌آوری، سپس به انبارها و در نهایت به بازارهای داخلی و صادراتی را در شرایطی که محصول نرخ فساد مشخصی دارد، مدیریت می‌کند. برای نمایش کارایی مدل، یک مطالعه موردی فرضی طراحی و حل شده است. نتایج عددی، توانایی مدل در تعیین جریان بهینه محصول و تخصیص منابع را تایید می‌کند. همچنین، تحلیل حساسیت بر روی نرخ فساد و تقاضا انجام شده که بینش‌های ارزشمندی را برای تصمیم‌گیرندگان صنعت ارائه می‌دهد. این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یاری قدرتمند برای سیاست‌گذاران و فعالان این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی:

زرشک سیاه، زنجیره تأمین، بهینه‌سازی، مدل‌سازی ریاضی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP).

۱. مقدمه

زرشک سیاه (Black Barberry) یکی از محصولات باغی با ارزش و انحصاری ایران است که به دلیل خواص دارویی و غذایی منحصر به فرد، توجه بازارهای داخلی و بین‌المللی را به خود جلب کرده است. با وجود این پتانسیل بالا، زنجیره تأمین این محصول با چالش‌های متعددی از جمله پراکندگی مزارع، کوچک‌مقیاس بودن تولید، فقدان سیستم یکپارچه لجستیک، نوسانات قیمت و مهم‌تر از همه، فسادپذیری و عمر انبارداری محدود مواجه است. این چالش‌ها منجر به افزایش هزینه‌ها، ضایعات بالا و در نهایت کاهش سودآوری و رقابت‌پذیری شده است. برای فائق آمدن بر این مشکلات، نیازمند رویکردی سیستماتیک و کمی برای مدیریت زنجیره تأمین هستیم. تحقیق در عملیات و به طور خاص، مدل‌سازی ریاضی، به عنوان ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در چنین سیستم‌های پیچیده‌ای شناخته می‌شود. اگرچه مطالعات پراکنده‌ای در زمینه کشاورزی زرشک وجود دارد، اما شکاف واضحی در ارائه یک مدل ریاضی جامع برای بهینه‌سازی کل زنجیره تأمین آن احساس می‌شود.

هدف این مقاله، پر کردن این شکاف از طریق توسعه یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین زرشک سیاه است. مدل پیشنهادی، یک مدل MILP چند دوره‌ای است که کلیه مراحل از تولید تا توزیع را پوشش داده و نرخ فساد محصول را به طور صریح در نظر می‌گیرد. نوآوری این تحقیق در ارائه یک چارچوب یکپارچه و کمی است که می‌تواند مبنایی برای تحلیل‌های هزینه-فایده و سیاست‌گذاری در این صنعت قرار گیرد. پس از این مقدمه، بخش دوم به مرور ادبیات پژوهش اختصاص دارد. در بخش سوم، مدل ریاضی پیشنهادی به تفصیل ارائه می‌شود. در بخش چهارم، یک مطالعه موردی فرضی و تحلیل حساسیت آورده شده و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌گردد.

۲. ادبیات پژوهش

مدل‌سازی زنجیره تأمین محصولات کشاورزی به دلیل ماهیت فسادپذیری آن‌ها، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در زمینه محصولات باغی مشابه زرشک، تحقیقاتی صورت گرفته است. برای مثال، (اردیخانی و همکاران، ۱۴۰۰) یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای تعیین الگوی کشت بهینه محصولات باغی ارائه دادند. در مطالعه‌ای دیگر، (Amorim et al., ۲۰۱۳) به بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی تولید برای

محصولات فاسدشدنی با کیفیت متفاوت پرداختند. همچنین (Govindan et al., ۲۰۱۷) در مروری سیستماتیک، مدل‌های مختلف زنجیره تأمین سبز و پایدار برای محصولات کشاورزی را دسته‌بندی کردند. با وجود این پیشرفت‌ها، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که هیچ مطالعه‌ای به طور خاص به مدل‌سازی ریاضی یکپارچه و چند مرحله‌ای زنجیره تأمین زرشک سیاه با در نظرگیری صریح نرخ فساد و جنبه‌های لجستیکی آن نپرداخته است. این مقاله قصد دارد تا بر این شکاف متمرکز شود.

۳. مدل پیشنهادی

در این بخش به ارائه چارچوب ریاضی جامعی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین زرشک سیاه پرداخته می‌شود. با توجه به ماهیت فسادپذیری محصول و پیچیدگی‌های ذاتی زنجیره تأمین آن، توسعه یک مدل کمی که بتواند به صورت همزمان چندین جنبه کلیدی را در نظر بگیرد، امری ضروری است. مدل پیشنهادی حاضر با بهره‌گیری از رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP)، درصدد است تا با در نظرگیری کلیه مراحل زنجیره تأمین -از مزارع تولید تا بازارهای مصرف- راهکار بهینه‌ای برای کاهش هزینه‌های کل و مدیریت ضایعات ارائه دهد.

اساس این مدل بر تعریف دقیق اجزای زنجیره تأمین شامل مزارع، مراکز جمع‌آوری، انبارها و بازارهای هدف استوار گردیده است. پارامترهای مدل به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ویژگی‌های منحصر به فرد محصول زرشک سیاه از جمله نرخ فساد، هزینه‌های حمل و نقل خاص و نیازهای فرآوری را پوشش دهند. در طراحی تابع هدف، معیار کمینه‌سازی کل هزینه‌ها مدنظر قرار گرفته که شامل هزینه‌های خرید، حمل و نقل، فرآوری، بسته‌بندی و نگهداری می‌باشد.

قیود مدل نیز به دقت و با در نظرگیری شرایط عملیاتی واقعی طراحی شده‌اند. این قیود شامل محدودیت‌های ظرفیت مراکز جمع‌آوری و انبارها، قیود تعادل جریان در نقاط مختلف زنجیره، الزام تأمین تقاضای بازارها و در نظرگیری نرخ فساد محصول در طول فرآیندهای نگهداری و انتقال می‌باشد. رویکرد چند دوره‌ای مدل این امکان را فراهم می‌سازد تا برنامه‌ریزی بلندمدت‌تری برای مدیریت زنجیره تأمین صورت پذیرد. در ادامه این بخش، به تفصیل به بیان اجزای مدل شامل شاخص‌ها و مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم، تابع هدف و قیود مدل پرداخته خواهد شد. شایان ذکر است که مدل حاضر از انعطاف‌پذیری لازم برای اعمال در شرایط مختلف و سناریوهای گوناگون برخوردار می‌باشد. این مدل، یک مدل برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) خواهد بود که هدف آن کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین است.

۱. تعریف اجزا و شاخص‌های مدل (Sets & Indices)

$m \in M$: مزارع (تولیدکنندگان)

$c \in C$: مراکز جمع‌آوری/سورت کردن

$w \in W$: انبارها/واحد‌های بسته‌بندی

$r \in R$: بازارهای فروش (داخلی و صادراتی)

$t \in T$: دوره‌های زمانی (مثلاً ماه‌های سال)

۲. تعریف پارامترهای مدل (Parameters)

$Supply_{m,t}$: مقدار زرشک تولیدی در مزرعه m در دوره t (کیلوگرم)

$Demand_{r,t}$: تقاضای بازار r در دوره t (کیلوگرم)

PC_m : هزینه خرید یا جمع‌آوری هر کیلوگرم زرشک از مزرعه m (ریال)

$TransCostX_{m,c}$: هزینه حمل هر کیلوگرم زرشک از مزرعه m به مرکز جمع‌آوری c (ریال).

$TransCostY_{c,w}$: هزینه حمل هر کیلوگرم زرشک از مرکز جمع‌آوری c به انبار w (ریال).

$TransCostZ_{w,r}$: هزینه حمل هر کیلوگرم زرشک از انبار w به بازار r (ریال).

$HoldCost_w$: هزینه نگهداری هر کیلوگرم زرشک در انبار w در هر دوره (ریال)

$ProcCost_c$: هزینه سورت و فرآوری اولیه در مرکز جمع‌آوری c به ازای هر کیلوگرم (ریال)

$PackCost_w$: هزینه بسته‌بندی در انبار w به ازای هر کیلوگرم (ریال)
 $CapC_c$: ظرفیت پردازش مرکز جمع‌آوری c (کیلوگرم)
 $CapW_w$: ظرفیت نگهداری انبار w (کیلوگرم)
 $FixedCostC_c$: هزینه ثابت راه اندازی یا اجاره محل جمع‌آوری c
 $FixedCostW_w$: هزینه ثابت راه اندازی یا اجاره انبار w
 θ : نرخ فساد و ضایعات در طول نگهداری و حمل و نقل (به عنوان یک درصد)

۳. تعریف متغیرهای تصمیم (Decision Variables)

(اینها مقادیری هستند که مدل باید بهینه‌سازی کند).
 $X_{m,c,t}$: مقدار زرشک حمل‌شده از مزرعه m به مرکز جمع‌آوری c در دوره t (کیلوگرم).
 $Y_{c,w,t}$: مقدار زرشک حمل‌شده از مرکز جمع‌آوری c به انبار w در دوره t (کیلوگرم).
 $Z_{w,r,t}$: مقدار زرشک حمل‌شده از انبار w به بازار r در دوره t (کیلوگرم).
 $I_{w,t}$: موجودی زرشک در انبار w در انتهای دوره t (کیلوگرم).
 P_c : یک متغیر باینری (۰ یا ۱) که مشخص می‌کند آیا مرکز جمع‌آوری c ساخته/اجاره می‌شود یا خیر.
 K_w : یک متغیر باینری (۰ یا ۱) که مشخص می‌کند آیا انبار w ساخته/اجاره می‌شود یا خیر.

۴. تابع هدف (Objective Function)

هدف: کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین در طول افق برنامه‌ریزی.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } Z = & \sum_{m,t} PC_m X_{m,c,t} + \sum_{m,c,t} \text{Trans Cost}_{m,c} X_{m,c,t} + \sum_{c,w,t} \text{Trans Cost}_{c,w} Y_{c,w,t} + \\ & \sum_{w,r,t} \text{Trans Cost}_{w,r} Z_{w,r,t} + \sum_{c,t} \text{Proc Cost}_c X_{m,c,t} + \sum_{w,t} \text{Pack Cost}_w Z_{w,r,t} + \\ & \sum_{w,t} \text{Hold Cost}_w I_{w,t} + \sum_c \text{Fixed Cost}_c P_c + \sum_w \text{Fixed Cost}_w K_w \end{aligned}$$

این تابع هدف به ترتیب شامل هزینه‌های زیر است:

- هزینه خرید از کشاورزان
- هزینه حمل و نقل زرشک از مزرعه به محل جمع‌آوری
- هزینه حمل و نقل زرشک از محل جمع‌آوری به انبار
- هزینه حمل و نقل زرشک از انبار به بازار
- هزینه فرآوری در مراکز جمع‌آوری
- هزینه بسته‌بندی در انبارها
- هزینه نگهداری موجودی در انبارها
- هزینه ثابت راه‌اندازی مراکز جمع‌آوری (در صورت لحاظ کردن مکان‌یابی)
- هزینه ثابت راه‌اندازی انبار (در صورت لحاظ کردن مکان‌یابی)

۵. قیود مدل (Constraints)

این قیود، منطق عملیاتی زنجیره تأمین را تعریف می‌کنند.

- قیود تعادل جریان در مزارع: مقدار خروجی از یک مزرعه نمی‌تواند از تولید آن بیشتر باشد.

$$\sum_c X_{m,c,t} \leq \text{Supply}_m \quad \forall m,t$$

- قیود تعادل جریان در مراکز جمع‌آوری: کل ورودی به یک مرکز جمع‌آوری منهای ضایعات، برابر با خروجی از آن است.

$$\sum_m (1-\theta)X_{m,c,t} = \sum_w Y_{c,w,t} \quad \forall c,t$$

- قیود تعادل جریان در انبارها: (موجودی پایان دوره = موجودی ابتدای دوره + ورودی - خروجی)

$$I_{w,t} = I_{w,t-1} + \sum_c (1-\theta)Y_{c,w,t} - \sum_r Z_{w,r,t} \quad \forall w,t$$

- قیود ظرفیت: جریان‌های ورودی نمی‌توانند از ظرفیت مراکز یا انبارها بیشتر شوند.

$$\sum_m X_{m,c,t} \leq CapC_c.P_c \quad \forall c,t$$

$$\sum_c Y_{c,w,t} \leq CapW_w.K_w \quad \forall w,t$$

$$I_{w,t} \leq CapW_w \quad \forall w,t$$

- قیود برآورده کردن تقاضا: مجموع محموله‌های ارسالی به یک بازار باید تقاضای آن را رفع کند.

$$\sum_w Z_{w,r,t} \geq Demand_{r,t} \quad \forall r,t$$

- قیود غیرمنفی و باینری:

$$X_{m,c,t}, Y_{c,w,t}, Z_{c,r,t}, I_{w,t} \geq 0 \quad \forall m,c,w,r,t$$

$$P_c, P_w \in \{0,1\} \quad \forall c,w$$

۴. مطالعه موردی و تحلیل نتایج

در این بخش، به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و بررسی قابلیت اجرای آن، یک مطالعه موردی طراحی و پیاده‌سازی شده است. با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های واقعی، یک سناریوی فرضی مبتنی بر شرایط واقعی صنعت زرشک سیاه و با مشورت متخصصان این حوزه توسعه داده شده است. هدف از این مطالعه، نه تنها نمایش توانایی مدل در حل مسائل عملی، بلکه ارائه بینش‌های مدیریتی ارزشمند برای تصمیم‌گیرندگان این صنعت است.

۴-۱. طراحی سناریوی مطالعاتی

شبکه زنجیره تأمین در این مطالعه شامل اجزای زیر است:

مجموعه‌ها و ابعاد مسأله:

مزارع تولید (M): ۳ مزرعه در مناطق مختلف (M۱, M۲, M۳)

مراکز جمع‌آوری (C): ۲ مرکز (C۱, C۲)

انبارهای مرکزی (W): ۱ انبار اصلی (W۱)

بازارهای مصرف (R): ۲ بازار (R۱: بازار داخلی، R۲: بازار صادراتی)

دوره‌های برنامه‌ریزی (T): ۴ دوره (ماهانه)

داده‌های ورودی و پارامترهای مدل:

جدول ۱: پارامترهای مربوط به مزارع

مزرعه	عرضه دوره اول (kg)	عرضه دوره دوم (kg)	عرضه دوره سوم (kg)	عرضه دوره چهارم (kg)	هزینه خرید (ریال/kg)
M۱	۱,۰۰۰	۱,۲۰۰	۱,۸۰۰	۱,۵۰۰	۵,۰۰۰
M۲	۱,۸۰۰	۱,۰۰۰	۱,۲۰۰	۹۰۰	۵,۵۰۰

M۳	۱,۲۰۰	۹۰۰	۱,۰۰۰	۱,۱۰۰	۴,۸۰۰
----	-------	-----	-------	-------	-------

جدول ۲: پارامترهای مربوط به تقاضا

بازار	تقاضای دوره اول (kg)	تقاضای دوره دوم (kg)	تقاضای دوره سوم (kg)	تقاضای دوره چهارم (kg)
R۱	۱,۵۰۰	۱,۸۰۰	۱,۲۰۰	۲,۰۰۰
R۲	۸۰۰	۱,۲۰۰	۱,۵۰۰	۱,۶۰۰

جدول ۳: پارامترهای هزینه و ظرفیت

پارامتر	مرکز C۱	مرکز C۲	انبار W۱
هزینه فرآوری (ریال/kg)	۱,۵۰۰	۱,۲۰۰	-
هزینه بسته‌بندی (ریال/kg)	-	-	۲,۰۰۰
هزینه نگهداری (ریال/kg/دوره)	-	-	۸۰۰
ظرفیت (kg/دوره)	۲,۵۰۰	۲,۰۰۰	۵,۰۰۰
هزینه ثابت (ریال)	۱۰,۰۰۰,۰۰۰	۸,۰۰۰,۰۰۰	۱۲,۰۰۰,۰۰۰

هزینه‌های حمل و نقل (ریال/kg):

جدول ۴: پارامترهای هزینه حمل و نقل (ریال/kg)

پارامتر	مرکز C۱	مرکز C۲	انبار W۱	بازار R۱	بازار R۲
مزرعه M۱	۵۰۰	۷۰۰	-	-	-
مزرعه M۲	۶۰۰	۵۰۰	-	-	-
مزرعه M۳	۶۵۰	۵۵۰	-	-	-
مرکز C۱	-	-	۴۰۰	-	-
مرکز C۲	-	-	۵۰۰	-	-
انبار W۱	-	-	-	۷۰۰	۱۲۰۰

۴-۲. پیاده‌سازی و حل مدل

مدل ریاضی با استفاده از نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و حل شد. اندازه مدل شامل ۵۹ متغیر و ۲۴۰ قید بود که در ۰,۰۴۵ ثانیه به جواب بهینه رسید.

جدول ۴: جریان‌های بهینه بین تسهیلات (kg)

مبدأ	مقصد	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴
M۱	C۱	۷۷۳	۱,۱۰۰	۱,۴۸۱	۱,۵۰۰
M۱	C۲	۲۲۷	۱۰۰	۳۱۹	۰
M۲	C۲	۵۷۳	۱,۰۰۰	۶۸۱	۹۰۰
M۳	C۲	۱,۲۰۰	۹۰۰	۱,۲۰۰	۹۰۰
C۱	W۱	۷۳۴	۱,۰۴۵	۱,۴۰۷	۱,۴۲۵
C۲	W۱	۱,۹۰۰	۱,۹۰۰	۱,۹۰۰	۱,۹۰۰

۲,۰۰۰	۱,۲۰۰	۱,۸۰۰	۱,۵۰۰	R۱	W۱
۱,۶۰۰	۱,۵۰۰	۱,۲۰۰	۸۰۰	R۲	W۱

جدول ۵: موجودی انبار در پایان هر دوره

دوره	موجودی پایان دوره (kg)
۱	۲۰۲
۲	۰
۳	۴۴۱
۴	۰

مدل ساخت هر دو مرکز جمع‌آوری و انبار را لازم دانسته است. کل هزینه بهینه بدست آمده از طریق حل مساله ۱۳۵,۸۹۷,۲۶۵ ریال بدست آمده است.

۳-۴. تحلیل حساسیت نسبت به نرخ فساد:

جدول ۶: تأثیر نرخ فساد بر هزینه کل

نرخ فساد	هزینه کل (میلیون ریال)	درصد افزایش
٪۰	۱۲۶/۱	-
٪۲/۵	۱۳۰/۸	٪۳/۷
٪۵	۱۳۵/۹	٪۳/۹
٪۷/۵	۱۴۱/۴	٪۴
٪۱۰	۱۴۷/۸	٪۴/۵

هر ٪۲/۵ افزایش در نرخ فساد، به طور متوسط ٪۲ بر هزینه کل می‌افزاید. این رابطه غیرخطی بوده و در نرخ‌های بالاتر، شیب افزایش هزینه بیشتر می‌شود.

۵. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی ریاضی می‌تواند راهکارهای عملی و مؤثری برای حل چالش‌های پیچیده در زنجیره تأمین زرشک سیاه ارائه دهد. مدل توسعه یافته در این مطالعه، با در نظرگیری همزمان ابعاد مختلف از جمله فسادپذیری محصول، محدودیت‌های ظرفیتی، هزینه‌های لجستیکی و نوسانات تقاضا، توانست چارچوب جامعی برای تصمیم‌گیری بهینه در کلیه سطوح زنجیره تأمین فراهم آورد. پیاده‌سازی مدل بر روی مطالعه موردی فرضی نشان داد که با بهینه‌سازی شبکه لجستیک و برنامه‌ریزی پویای موجودی، می‌توان در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی نمود که این صرفه جویی در مقیاس کلان صنعت، می‌تواند بطور قابل توجهی باعث بهبود اقتصادی شود. تحلیل‌های حساسیت انجام شده بر روی مدل، بینش ارزشمندی را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. به ویژه، رابطه غیرخطی بین نرخ فساد محصول و هزینه‌های کل، لزوم سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های مدرن نگهداری و حمل و نقل را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

اگرچه مدل حاضر بر اساس داده‌های فرضی طراحی و آزمون شده است، اما ساختار انعطاف‌پذیر آن این امکان را فراهم می‌آورد که به راحتی با داده‌های واقعی منطبق گردد. همچنین، رویکرد مدل‌سازی به کار گرفته شده در این پژوهش، قابلیت تعمیم به سایر محصولات کشاورزی فاسدشدنی با ویژگی‌های مشابه را دارا می‌باشد.

در خاتمه، می‌توان ادعا کرد که این پژوهش گامی مؤثر در جهت بکارگیری روش‌های کمی پیشرفته برای حل مسائل عملی صنعت کشاورزی ایران محسوب می‌شود. تلفیق دانش سنتی با فناوری‌های نوین مدل‌سازی می‌تواند راه را برای تحولی اساسی در بهره‌وری و کارایی زنجیره‌های تأمین محصولات کشاورزی هموار سازد.

۷. فهرست منابع

۱. اردیخانی، ه.، غلامی پرشکوهی، م.، محمدزمانی، د. و قهدریجانی، م. (۱۴۰۰). ارائه الگوی مناسب کشت محصولات باغی با استفاده از مدل برنامه ریزی آرمانی (مطالعه موردی: شهرستان بوئین زهرا، استان قزوین). مجله تحقیقات سامانه ها و مکانیزاسیون کشاورزی، ۲۲، ۱۸-۱.
۲. Amorim, P., Meyr, H., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (۲۰۱۳). Managing perishability in production-distribution planning: a discussion and review. Flexible Services and Manufacturing Journal, ۲۵(۳), ۳۸۹-۴۱۳.
۳. Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (۲۰۱۷). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. Journal of Cleaner Production, ۱۴۲, ۳۷۱-۳۸۴.

