

توسعه چندین مدل قیمتگذاری در زنجیره تأمین سبز تحت ریسک با رویکرد نظریه بازیها

غزاله علامه^۱، مریم اسمعیلی^۲، ترانه تجویدی^۳

چکیده: مدیریت زنجیره تأمین سبز، رویکردی زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین است که هدف آن، کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی در دوره عمر محصول هاست. در این میان، زنجیره تأمین بسته، با جمع‌آوری و بازیافت محصول‌های مضر در طبیعت، سعی در رسیدن به این هدف دارد. در این مقاله، با توجه به استراتژی‌های مختلف جمع‌آوری محصول، تعدادی مدل قیمتگذاری در زنجیره تأمین بسته دوسطحی ارائه می‌شود. تعامل‌های میان تولیدکننده و خرده‌فروش در قیمتگذاری، براساس بازی استکلبرگ بررسی می‌شود و تصمیم‌گیری بهینه تولیدکننده و خرده‌فروش برای هر مدل تعیین می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت پویای زنجیره تأمین در دنیای واقعی، عامل ریسک با استفاده از روش میانگین-واریانس در زنجیره بسته بررسی می‌شود. برای درک بهتر، مدل‌ها در قالب یک مثال عددی بررسی می‌شوند و مدل مناسب با مقایسه مقادیر سود اعضا انتخاب می‌شود. همچنین بر پارامترهای نرخ جمع‌آوری، نرخ بازیافت و میزان ریسک‌گریزی، آنالیز حساسیت انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که مدل هماهنگی تولیدکننده و خرده‌فروش در نرخ‌های جمع‌آوری زیاد و میزان ریسک‌گریزی کم، جایگزین مناسبی برای سایر مدل‌هاست.

واژه‌های کلیدی: بازی استکلبرگ، حلقه بسته، ریسک، زنجیره تأمین سبز، قیمتگذاری.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران
۳. استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۸
نویسنده مسئول مقاله: مریم اسمعیلی
Email: esmaeili_m@alzahra.ac.ir

مقدمه

امروزه همراه با رشد سریع صنعت در جهان، مسئله محیط زیست و آثار اکولوژیکی محصولات به مسئله‌ای مهم تبدیل شده است. نگرانی جدی در مورد آثار زیست‌محیطی و افزایش خطرهای ناشی از فعالیت‌های صنعتی برای سلامتی انسان‌ها، به افزایش پژوهش‌های مربوط به مدیریت زنجیره تأمین سبز منجر شده است (براری و همکاران، ۲۰۱۲). زنجیره تأمین سبز عبارت است از مجموعه اقدام‌های داخلی و خارجی بنگاه در سراسر زنجیره تأمین که به بهبود محیط زیست و جلوگیری از ایجاد آلودگی منجر می‌شود. به عبارت دیگر، ایده کلی زنجیره تأمین سبز، ماکزیمم کردن سود در کنار جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی است. هدف مدیریت زنجیره تأمین سبز، یافتن نقطه تعادل بین سود و هزینه‌های زیست‌محیطی در بحث قیمتگذاری در روابط عناصر زنجیره است. از جمله موضوع‌هایی که در این مبحث مطرح می‌شود، کاهش ورود کربن در حین تولید (ژاو و همکاران، ۲۰۱۲؛ ناگورنی و یو، ۲۰۱۲) و زنجیره تأمین با حلقه بسته است.

زنجیره تأمین حلقه بسته، نوعی از زنجیره تأمین سبز است که در آن، یک حلقه بسته برای جمع‌آوری و بازیافت محصولات مصرفی وجود دارد. با به‌کارگیری این نوع از زنجیره تأمین سبز، علاوه بر آنکه از مواد خام در دسترس، حداکثر استفاده صورت می‌گیرد (آندیچ و همکاران، ۲۰۱۲)، از ماندن مواد مضر در محیط زیست نیز جلوگیری خواهد شد. گاید و ون‌ویسنهاو (۲۰۰۹)، به بررسی تکامل پژوهش در زمینه زنجیره بسته پرداخته‌اند. یکی از مسائل مهم در زنجیره‌های حلقه بسته، انتخاب استراتژی مناسب برای جمع‌آوری محصول از مشتریان است. برای مقایسه استراتژی‌های مختلف، از مدل‌های قیمتگذاری استفاده می‌شود که از طریق آنها، هریک از خرده‌فروشان و تولیدکنندگان، قیمت‌های فروش محصول خود، میزان تولید و هزینه‌های خود را تعیین می‌کنند. نظریه بازی‌ها، یکی از ابزارهای کاربردی برای تحلیل روابط (همکاری یا رقابت) بین اعضای زنجیره تأمین و ایجاد هماهنگی میان آنهاست که از آن در مباحث قیمتگذاری به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. در واقع، با استفاده از نظریه بازی‌ها، تعامل‌های میان اعضای زنجیره تأمین (تولیدکننده و خرده‌فروش) بررسی و استراتژی بهینه آنها در تعامل با یکدیگر تعیین می‌شود.

در این پژوهش، چندین مدل زنجیره تأمین حلقه بسته دوسطحی، با استفاده از نظریه بازی‌ها ارائه می‌شود که در آن، به دنبال پاسخگویی به این سؤال هستیم که در یک زنجیره تأمین حلقه بسته، با توجه به ریسک تولیدکننده در بازیافت، از میان استراتژی‌های متفاوت جمع‌آوری محصول‌های مصرفی، استراتژی مناسب برای هریک از اعضا کدام است؛ به‌نحوی که سود هریک از اعضا را ماکزیمم کند؟ به‌همین منظور، براساس هر استراتژی، مقادیر بهینه قیمت عمده‌فروشی،

قیمت محصول، سرمایه‌گذاری (هزینه) برای جمع‌آوری محصول‌های مصرفی و میزان سفارش تعیین می‌شود.

پیشینه پژوهش

مسئله تعیین سیاست‌های بهینه قیمتگذاری در زنجیره تأمین، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است (حجی و همکاران، ۱۳۸۸؛ صادقی مقدم و همکاران، ۱۳۸۸)، اما به تازگی، با توجه به بروز مشکل‌های زیست‌محیطی، زنجیره‌های سبز به‌ویژه حلقه بسته، توجه بیشتر محققان را جلب کرده است. پژوهش‌های روزافزونی در زمینه قیمتگذاری زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با رویکرد نظریه بازی‌ها وجود دارد. برای نمونه، مجومدر و گرینولت (۲۰۰۱) یک مدل قیمتگذاری، به‌صورت بازی دومرحله‌ای ارائه دادند که در آن، تولیدکننده و شرکت سوم، برای بازیافت محصول‌ها رقابت می‌کنند. ساواسکان و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش خود برای جمع‌آوری محصول‌های مصرفی، سه حالت مختلف توسط تولیدکننده، خرده‌فروش و شرکت سوم را پیشنهاد دادند و به مقایسه آنها پرداختند. همچنین ساواسکان و ون‌ویسنهاو (۲۰۰۶) بحث رقابت میان دو خرده‌فروش را در تحقیق خود در نظر گرفتند و مدل‌های مختلف در جمع‌آوری محصول‌ها را مقایسه کردند. پژوهش‌های مشابه دیگری در این زمینه صورت گرفته است که در آنها، خرده‌فروش (یان و ژیان، ۲۰۰۸) و شرکت سوم (چانگ و همکاران، ۲۰۰۸) مسئولیت جمع‌آوری محصول از مشتریان را بر عهده دارند. هوانگ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی رقابت خرده‌فروش و شرکت سوم در بازیافت محصول‌های بازیافتی پرداختند و نتایج را با حالت بدون رقابت یک‌کاناله مقایسه کردند. در تمامی پژوهش‌های ذکرشده، تقاضای مشتریان، تابعی خطی از قیمت در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در دسته‌ای از تحقیق‌های مربوط به زنجیره تأمین، نظیر اسمعیلی و همکاران (۲۰۰۹)، زای و وی (۲۰۰۹) و کری (۲۰۱۱) تقاضا، تابعی از قیمت محصول و فعالیت‌های تبلیغاتی در نظر گرفته شده است. همچنین در هیچ‌یک از پژوهش‌های پیشین، حالتی که اعضا با یکدیگر به جمع‌آوری محصول می‌پردازند، دیده نشده است. این در حالی است که در دنیای واقعی، نمونه‌هایی از این نوع استراتژی وجود دارد. برای نمونه، کمپانی اپل^۱ آپادهای قدیمی از مشتریان را به دو روش ۱. فرستادن آنها برای تولیدکننده و ۲. تحویل دادن به خرده‌فروشان و دریافت هدیه جمع‌آوری می‌کند.

از جمله موضوع‌های دیگری که در مقاله‌های ذکرشده نادیده گرفته شده است، مباحث مربوط به ریسک و بی‌ثباتی است. با توجه به ماهیت پیچیده و پویای زنجیره تأمین، بی‌ثباتی و ریسک،

1. <http://www.apple.com/recycling/ipod-cell-phone/>

در آن امری قابل انتظار است (میرغفوری و همکاران، ۱۳۹۱). ریسک در زنجیره تأمین ممکن است ناشی از عوامل بیرونی مانند تقاضا، رفتار مشتریان و تأمین‌کنندگان باشد. پژوهش‌های ژیاو و یانگ (۲۰۰۸) و زو و همکاران (۲۰۱۳) از این گروه به شمار می‌روند. همچنین ریسک ممکن است ناشی از عوامل سیستمی، مانند ریسک در تولید، جمع‌آوری و بازیافت محصول باشد. افزایش رشد صنایع و آگاهی مشتریان از مشکل‌های اکولوژیکی، تمایل آنها به خرید کالاهای دوستدار محیط زیست را افزایش داده است؛ بنابراین، می‌توان از فعالیت‌های سبز، به عنوان ابزار تبلیغاتی شرکت‌ها برای افزایش تقاضای محصول استفاده کرد. در این مقاله، چندین مدل قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین سبز دارای حلقه بسته ارائه می‌شود که در آن، تقاضا علاوه بر قیمت محصول، به تبلیغات سبز نیز حساس است. علاوه بر آن، هزینه تبلیغات سبز، تابعی از هزینه‌های سبز (هزینه جمع‌آوری محصول‌های مصرف‌شده از مشتریان) در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل‌های ارائه‌شده، در تولید محصول‌های جدید از مواد بازیافتی، نوعی ریسک وجود دارد. به‌گونه‌ای که دسته‌ای از محصول‌های تولیدشده از مواد بازیافتی، لزوماً کیفیت محصول اولیه را ندارند و در نتیجه، در بازرسی، کنار گذاشته می‌شوند. در این مقاله، ابتدا حالتی در نظر گرفته می‌شود که در آن، تولیدکننده و خرده‌فروش، فرایند جمع‌آوری محصول‌ها از مشتریان برای بازیافت را با یکدیگر انجام می‌دهند. سپس برای مقایسه، مدل‌هایی که در آنها، تولیدکننده و خرده‌فروش به‌تنهایی به جمع‌آوری محصول می‌پردازند، ارائه می‌شوند. در ادامه، سیاست‌های بهینه قیمت‌گذاری در قالب بازی استکلبرگ تولیدکننده به‌دست می‌آیند. در نهایت با استفاده از یک مثال، مدل‌های ارائه‌شده بیشتر بررسی می‌شوند و بر پارامترهای کلیدی، نظیر نرخ جمع‌آوری، نرخ بازیافت و میزان ریسک‌گریزی، آنالیز حساسیت انجام می‌شود.

مفروضات و نمادگذاری

در این بخش، برای درک بهتر، به معرفی پارامترها، متغیرهای تصمیم و مفروضات به‌کاررفته در مدل، پرداخته می‌شود.

۱. پارامترها

k	مقدار ثابت در تابع تقاضا؛
α	میزان حساسیت تقاضا نسبت به قیمت خرده‌فروشی ($\alpha > 1$)؛
β	میزان حساسیت تقاضا نسبت به هزینه بازاریابی ($\beta > 0, \beta + 1 < \alpha$)؛
M	هزینه‌های تبلیغات سبز؛

D	تقاضای سالیانه مشتریان برای محصول؛
i	درصدی از هزینه هر واحد محصول نگهداری شده در انبار، در هر سال؛
τ	نرخ جمع‌آوری ($0 \leq \tau \leq 1$)؛
τ_r	نرخ بازیافت احتمالی با میانگین $\bar{\tau}_r$ و واریانس $\sigma_{\tau_r}^2$ ($0 \leq \bar{\tau}_r \leq \tau$)؛
O_M	هزینه راه‌اندازی تولیدکننده (\$/ راه‌اندازی)؛
O_R	هزینه سفارش‌دهی خرده‌فروش (\$/ سفارش)؛
C_m	هزینه خرید مواد اولیه اصلی و تولید یک واحد محصول از این مواد (\$/ واحد)؛
C_r	هزینه تولید یک واحد محصول از مواد بازگردانده شده (\$/ واحد)؛
b	هزینه‌ای که تولیدکننده به‌ازای خرید هر واحد محصول جمع‌آوری شده توسط خرده‌فروش می‌پردازد (\$/ واحد)؛
t	مالیات محیط زیستی که تولیدکننده در اثر بازیافت‌نشدن محصول، باید به‌ازای هر واحد محصول جمع‌آوری نشده بپردازد (\$/ واحد)؛
λ	میزان ریسک‌گریزی تولیدکننده ($0 \leq \lambda \leq 1$).

۲. متغیرهای تصمیم

W	قیمت فروش تولیدکننده (قیمت عمده‌فروشی)؛
r_M	هزینه جمع‌آوری محصول از مشتریان، توسط تولیدکننده؛
x	میزان همکاری تولیدکننده در جمع‌آوری محصول‌های مصرف‌شده توسط مشتری (متغیر تصمیم تولیدکننده در مدل اول، مقدار ۱ نشان‌دهنده جمع‌آوری فقط توسط تولیدکننده است)؛
P	قیمت فروش خرده‌فروش (قیمت خرده‌فروشی)؛
r_R	هزینه جمع‌آوری محصول‌ها از مشتریان، توسط خرده‌فروش؛
Q	میزان سفارش.

۳. مفروضات

۱. افق برنامه‌ریزی نامحدود است؛
۲. پارامترهای مسئله، قطعی و معین‌اند؛
۳. کمبود مجاز نیست؛

۴. کالاهایی که پس از بازیافت، از نظر کیفیت، مانند کالاهای جدید نیستند، از سوی واحد بازرسی کنار گذاشته می‌شوند. در نتیجه، محصولی که مجدداً به دست مشتری می‌رسد، از نظر کیفیت، هیچ تفاوتی با محصول‌های تولیدی قبل ندارد؛

۵. در صورت بازیافت‌نشدن محصول، تولیدکننده مجبور به پرداخت مالیات به دولت است؛
۶. تولید یک واحد محصول از محصول‌های بازگردانده‌شده، کم‌هزینه‌تر از تولید یک واحد از مواد اولیه اصلی است؛

۷. تولیدکننده به دلیل پرداخت مالیات، به‌عنوان رهبر، قدرت بیشتری نسبت به خرده‌فروش دارد؛
۸. تقاضای مشتری، تابعی از قیمت فروش کالا و هزینه‌های تبلیغات سبز است (اسمعیلی و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین تبلیغات سبز، خود تابعی از هزینه‌های سبز نظیر جمع‌آوری محصول‌های مصرف‌شده است. در نتیجه، تابع تقاضا به این صورت بیان می‌شود:

$$D = P^{-\alpha} M^{\beta} = P^{-\alpha} (k + r_M + r_R)^{\beta} \quad (1)$$

در رابطه بالا، قیمت محصول، با تقاضای آن، رابطه عکس دارد. دلیل آن این است که با افزایش قیمت محصول، تمایل مشتریان برای خرید محصول و در نتیجه تقاضا کاهش می‌یابد. همچنین تقاضا تابعی مستقیم از هزینه تبلیغات سبز است؛ به این معنا که هرچه شرکت‌ها در راستای حفظ محیط زیست، هزینه بیشتری صرف محصول‌های خود کنند (نظیر جمع‌آوری محصول‌های مصرفی)، مشتریان تمایل بیشتری برای خرید دارند و در نتیجه، تقاضا برای آن افزایش می‌یابد.

مدل مسئله

یک زنجیره تأمین بسته دوسطحی را که در یک سطح آن، تولیدکننده و در سطح دیگر، خرده‌فروش قرار دارد در نظر بگیرید. در این زنجیره، در مسیر روبه‌جلو، تولیدکننده، محصول قابل بازیافت را تولید می‌کند و آن را از طریق خرده‌فروش به مشتریان می‌رساند. در زنجیره معکوس، محصول‌های مصرف‌شده، از مشتریان جمع‌آوری و دوباره به خط تولید بازگردانده می‌شوند. سپس تولیدکننده با استفاده از عملیات بازیافتی، آنها را مجدداً به مواد خام تبدیل می‌کند و از آنها برای تولید محصول جدید استفاده می‌کند. برای جمع‌آوری محصول‌ها، سه استراتژی در نظر گرفته شده که در قالب مدل‌های مختلف ارائه شده است و در ادامه به تشریح آن می‌پردازیم.

۱. جمع آوری توسط تولیدکننده و خرده فروش

در این مدل، تولیدکننده و خرده فروش با یکدیگر به فرایند جمع آوری محصول های مصرف شده از مشتریان می پردازند. یک مثال واقعی از این حالت، آگهی کمپانی اپل برای دریافت آبیادهای قدیمی از مشتریان است. در این مدل، خرده فروش با دریافت مبلغی از تولیدکننده، با او در جمع آوری محصول ها همکاری می کند. همچنین نرخ همکاری در این مدل با x نشان داده شده است. نکته مهم در تمامی مدل های این مقاله این است که بازی میان تولیدکننده و خرده فروش، از نوع غیر همکارانه است و هریک از اعضا به صورت جداگانه درصدد ماکزیمم کردن سود خود هستند.

هدف تولیدکننده در این زنجیره، تعیین قیمت عمده فروشی، هزینه های سبز و نرخ همکاری بهینه به گونه ای است که سود دریافتی او حداکثر شود. تابع سود تولیدکننده، متشکل از درآمد حاصل از فروش، هزینه تولید از مواد اصلی و مواد بازگردانده شده، هزینه سفارش دهی، هزینه نگهداری، هزینه جمع آوری، هزینه پرداختی توسط تولیدکننده به خرده فروش برای جمع آوری و هزینه مالیات به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \Pi_M(W, r_M, x) = & WD - (1 - \tau_r)DC_m - \tau_r DC_r - O_M DQ^{-1} - \\ & \cdot / \delta i (C_m + C_r)Q - (\tau Dr_M)x - (\tau Db)(1 - x) - (1 - \tau)Dt \end{aligned} \quad (2)$$

با توجه به اینکه موجودی محصول ها در انبار، در طول زمان متغیر است، در رابطه ۲، هزینه نگهداری (جمله پنجم) در عدد 0.5 ضرب شده است تا متوسط محصول های نگهداری شده در انبار، در محاسبات لحاظ شود (فاطمی قمی، ۱۳۸۰). همچنین با توجه به اینکه نرخ بازیافت محصول ها، یک متغیر تصادفی با میانگین $\bar{\tau}_r$ و واریانس $\sigma_{\tau_r}^2$ است، تولیدکننده با نوعی ریسک مالی در بازیافت محصول ها مواجه است. در نتیجه، سود مورد انتظار و واریانس سود تولیدکننده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} E(\Pi_M(W, r_M, x)) = & WD - (1 - \bar{\tau}_r)DC_m - \bar{\tau}_r DC_r - O_M DQ^{-1} - \\ & \cdot / \delta i (C_m + C_r)Q - (\tau Dr_M)x - (\tau Db)(1 - x) - (1 - \tau)Dt \end{aligned} \quad (3)$$

$$Var(\Pi_M(W, r_M, x)) = \sigma_{\tau_r}^2 D^2 (C_m + C_r)^2 \quad (4)$$

با توجه به ریسک مالی که تولیدکننده در زنجیره بسته با آن مواجه است، به محاسبه تابع مطلوبیت سود تولیدکننده به صورت رابطه ۵ پرداخته می شود. به این منظور، از روش میانگین-واریانس استفاده می شود. در این روش، تولیدکننده درصدد است که تعادلی میان میانگین و

وارایانس سود خود به وجود آورد. λ نشان‌دهنده رفتار تولیدکننده در مقابل ریسک (ریسک‌گریزی) است. مقادیر زیاد λ ، نشان‌دهنده محافظه‌کاربودن و ریسک‌گریزی تولیدکننده است (ژیابو و یانگ، ۲۰۰۸).

$$U\left(\Pi_M(W, r_M, x)\right) = E\left(\Pi_M(W, r_M, x)\right) - \lambda \text{Var}\left(\Pi_M(W, r_M, x)\right) \quad (۵)$$

هدف خرده‌فروش، تعیین قیمت فروش کالا، میزان سفارش و هزینه‌های سبز به‌گونه‌ای است که سود دریافتی او حداکثر شود. سود سالیانه خرده‌فروش نیز در زیر آمده است:

$$\Pi_R(P, Q, r_R) = PD - WD - O_R DQ^{-1} - \cdot / \delta i WQ - \tau D(1-x)(r_R - b) \quad (۶)$$

بررسی تعامل تولیدکننده و خرده‌فروش در جمع‌آوری محصول‌های مصرفی، براساس بازی استکلبرگ است. در بازی‌های استکلبرگ، ابتدا پیرو، استراتژی بهینه خود را تعیین می‌کند و سپس رهبر، استراتژی بهینه خود را با توجه به استراتژی بهینه پیرو معین می‌کند (عبدلی، ۱۳۹۰). در این مقاله، فرض شده است تولیدکننده، رهبر استکلبرگ است (فرض ۷). از این‌رو، ابتدا استراتژی بهینه خرده‌فروش محاسبه می‌شوند. برای مقربودن رابطه ۵ نسبت به P و r_R برای یک Q ثابت، مشتق مرتبه اول نسبت به P برای یک Q و r_R ثابت را محاسبه می‌کنیم تا مقدار بهینه P به‌ازای یک Q ثابت به‌دست آید؛ به‌طوری‌که:

(۷)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_R(P, Q, r_R)}{\partial P} &= (-\alpha + 1)P^{-\alpha} (k + r_M + r_R)^\beta + \alpha W P^{-\alpha-1} (k + r_M + r_R)^\beta + \\ &\alpha O_R Q^{-1} P^{-\alpha-1} (k + r_M + r_R)^\beta + \tau (r_R - b) P^{-\alpha-1} (k + r_M + r_R)^\beta (1-x) = \cdot \\ P^*(Q, r_R) &= \frac{\alpha [W + O_R Q^{-1} + \tau (1-x)(r_R - b)]}{\alpha - 1} \end{aligned} \quad (۸)$$

با جایگذاری رابطه ۸ در رابطه ۶ و به‌کاربردن شرایط مشتق مرتبه اول نسبت به r_R ، مقدار بهینه r_R به‌ازای یک Q ثابت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۹)

$$\frac{\partial \Pi_R(P^*(Q, r_R), Q, r_R)}{\partial r_R} =$$

$$\frac{\alpha^{-\alpha}(-\alpha+1)}{(\alpha-1)^{-\alpha+1}}(O_R Q^{-1}+W+\tau(r_R-b)(1-x))^{-\alpha}(k+r_M+r_R)^\beta \tau(1-x)+$$

$$\frac{\alpha^{-\alpha}}{(\alpha-1)^{-\alpha+1}}(O_R Q^{-1}+W+\tau(r_R-b)(1-x))^{-\alpha+1} \beta(k+r_M+r_R)^{\beta-1} = \cdot$$

$$\rightarrow (-\alpha+1)(k+r_M+r_R)\tau(1-x)+(O_R Q^{-1}+W+\tau(r_R-b)(1-x))\beta = \cdot$$

$$r_R(Q) = \frac{\beta(W+O_R Q^{-1})+\tau(1-x)[(1-\alpha)(k+r_M)-b\beta]}{\tau(1-x)(\alpha-\beta-1)} \quad (10)$$

با جایگذاری مقدار بهینه رابطه ۱۰ در ۸ مقدار بهینه P نسبت به یک Q ثابت به صورت زیر تعیین می شود:

$$P^*(Q) = \frac{\alpha[W+O_R Q^{-1}-\tau(1-x)(k+b+r_M)]}{\alpha-\beta-1} \quad (11)$$

مجدداً با جایگذاری رابطه ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۶ و به کار بردن مشتق مرتبه اول نسبت به Q، داریم:

$$\partial \Pi_R(P^*(Q), r_R^*(Q), Q) =$$

$$\frac{\alpha^{-\alpha} \beta^\beta}{\tau^\beta (\beta-\alpha+1)^{-\alpha+\beta+1}} (\tau(k+b)-W-O_R Q^{-1})^{-\alpha+\beta+1} - \cdot \Delta i W Q \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Pi_R(P^*(Q), r_R^*(Q), Q)}{\partial r_R} =$$

$$\frac{\alpha^\alpha \beta^\beta O_R Q^{-\tau}}{\tau^\beta (\beta-\alpha+1)^{-\alpha+\beta+1}} (-\alpha+\beta+1)(\tau(k+b)-W-O_R Q^{-1})^{-\alpha+\beta} - \cdot \Delta i W Q = \cdot \quad (13)$$

$$Q^\tau [W+O_R Q^{-1}-\tau(1-x)(k+b+r_M)]^{\alpha-\beta} - \frac{\tau O_R (\alpha-\beta-1)^{\alpha-\beta} \beta^\beta}{i W \alpha^\alpha [\tau(1-x)]^\beta} = \cdot \quad (14)$$

رابطه ۱۴ یک تابع مقعر- محدب است که به رابطه به دست آمده توسط اسمعیلی و همکاران (۲۰۰۹) شباهت دارد. زمانی این رابطه، محدب است که شرط زیر برقرار باشد:

$$Q > \frac{O_R (\alpha-\beta-2)}{\tau(W-\tau(1-x)(k+b+r_M))} \quad (15)$$

برای اثبات فرض مقرب بودن رابطه ۶ نسبت به P و r_R و Q، ماتریس هیشین زیر باید معین منفی باشد.

$$H(\Pi_R) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P \partial r_R} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P \partial Q} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial r_R \partial P} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial r_R^2} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial r_R \partial Q} \\ \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial Q \partial P} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial Q \partial r_R} & \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial Q^2} \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

شروط لازم و کافی برای معین منفی بودن ماتریس هیشین، رابطه ۱۶ به شرح زیر است:

$$۱ \rightarrow \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^2} < 0. \quad (۱۷)$$

$$۲ \rightarrow \left[\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^2} \right] \left[\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^{*2}} \right] - \left[\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \right]^2 > 0. \quad (۱۸)$$

$$۳ \rightarrow \left[\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^2} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^{*2}} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial Q^2} + \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^* \partial Q^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial Q^*} + \right. \\ \left. \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^* \partial Q^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial Q^*} \right] - \left[\frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^* \partial Q^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^* \partial Q^*} + \right. \\ \left. \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial Q^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial G_R^* \partial Q^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial Q^*} + \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial P^* \partial G_R^*} \frac{\partial^2 \Pi_R}{\partial Q^*} \right] < 0. \quad (۱۹)$$

از آنجا که شرط $(k + r_M + r_R) = \frac{\beta P^*}{\alpha \tau (1-x)}$ همواره برقرار است، با محاسبه ماتریس

هیشین و دترمینان مینورها و جایگذاری روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۴ در آنها، ماتریس معین منفی است:

$$۱ \rightarrow -\frac{P^{-\alpha+\beta-\gamma} \beta^\beta}{(\alpha \tau (1-x))^\beta} (\gamma \alpha + 1) < 0. \quad (۲۰)$$

$$۲ \rightarrow \left[\frac{-P^{-\alpha+\beta-\gamma} \beta^\beta}{(\alpha \tau (1-x))^\beta} (\gamma \alpha + 1) \right] \left[\frac{-P^{-\alpha+\beta-\gamma} \beta^{\beta-\gamma}}{(\alpha \tau (1-x))^{\beta-\gamma}} (\beta + 1) \tau (1-x) \right] - \\ \left[\frac{P^{-\alpha+\beta-\gamma} \beta^\beta}{(\alpha \tau (1-x))^\beta} (\alpha \tau (1-x)) \right]^2 = \left[\frac{P^{-\alpha+\beta-\gamma} \beta^\beta}{(\alpha \tau (1-x))^\beta} \right]^2 \left[\frac{(\tau(1-\tau))^\gamma}{\beta} \right] [\alpha^{\gamma\beta} + \gamma \alpha^\gamma + \alpha \beta + \alpha] > 0. \quad (۲۱)$$

$$۳ \rightarrow \frac{P^{-\tau\alpha+\gamma\beta-\gamma} \beta^{\gamma\beta} O_R^\gamma Q^{-\gamma}}{(\alpha \tau (1-x))^{\gamma\beta-\gamma}} \left[-\gamma(\gamma \alpha + 1) \frac{(\beta + 1)}{\beta} \tau (1-x) + \gamma \right] - \frac{P^{-\tau\alpha+\gamma\beta-\gamma} \beta^{\gamma\beta} O_R^\gamma Q^{-\gamma}}{(\alpha \tau (1-x))^{\gamma\beta-\gamma}} \\ \left[-\gamma \alpha^\gamma \tau (1-x) + \alpha^\gamma \frac{(\beta + 1)}{\beta} \tau (1-x) + \gamma \alpha + 1 \right] < 0. \quad (۲۲)$$

در نهایت، مدل بازی استکلبرگ تولیدکننده ارائه می‌شود. در این مدل، تابع هدف، ماکزیمم سود تولیدکننده است که در رابطه ۵ ارائه شده است و محدودیت‌های این مدل، روابط ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ هستند. مفهوم مدل این است که تولیدکننده با توجه به شناخت خود از سیاست‌های خرده‌فروش، سود خود را ماکزیمم می‌کند. در ادامه، با جایگذاری روابط ۱۰، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ در تابع هدف، مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی بدون محدودیت تغییر می‌یابد که به وسیله نرم‌افزار، قابل حل است.

۲. جمع‌آوری توسط تولیدکننده

در این مدل، تولیدکننده به‌تنهایی به جمع‌آوری محصول‌های مصرف‌شده می‌پردازد. مثال واقعی این مدل، شرکت کانن است که کارتریج‌های مصرف‌شده را به‌طور مستقیم، از مشتریان جمع‌آوری می‌کند.^۱ سود تولیدکننده در این مدل، به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \Pi_M(W, r_M) = & WD - (1 - \tau_r)DC_m - \tau_r DC_r - O_M DQ^{-1} - \\ & \cdot / \delta i (C_m + C_r)Q - \tau D r_M - (1 - \tau)Dt \end{aligned} \quad (23)$$

مشابه مدل قبل، با توجه به بی‌ثباتی در نرخ بازیافت، سود مورد انتظار و واریانس سود تولیدکننده به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} E(\Pi_M(W, r_M)) = & WD - (1 - \bar{\tau}_r)DC_m - \bar{\tau}_r DC_r - O_M DQ^{-1} - \\ & \cdot / \delta i (C_m + C_r)Q - \tau D r_M - (1 - \tau)Dt \end{aligned} \quad (24)$$

$$var(\Pi_M(W, r_M)) = \sigma_{\tau_r}^2 D^2 (C_m + C_r)^2 \quad (25)$$

با جایگذاری روابط ۲۴ و ۲۵ در رابطه ۵، تابع مطلوبیت تولیدکننده، با استفاده از روش میانگین-واریانس در این مدل نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U(\Pi_M(W, r_M)) = E(\Pi_M(W, r_M)) - \lambda var(\Pi_M(W, r_M)) \quad (26)$$

مشابه مدل قبل، سود خرده‌فروش نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Pi_R(P, Q) = PD - WD - O_R DQ^{-1} - \cdot / \delta i WQ \quad (27)$$

1. <http://www.usa.canon.com/cusa/consumer/standard display/ink recycle>

همان‌طور که در مدل قبل اثبات شد، رابطه ۲۱ نسبت به P و Q مقعر است. در نتیجه، سیاست‌های بهینه این مدل نیز با استفاده از شرایط مشتق مرتبه اول، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P^*(Q) = \frac{\alpha[W + O_R Q^{-1}]}{\alpha - 1} \quad (28)$$

$$Q^* [W + O_R Q^{-1}]^\alpha - \frac{2O_R(k + r_M)^\beta}{iW} \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)^\alpha = 0 \quad (29)$$

$$Q^* \geq \frac{O_R(\alpha - 2)}{2W} \quad (30)$$

مشابه مدل قبل، مدل بازی استکلبرگ تولیدکننده عبارت است از ماکزیم سود تولیدکننده در رابطه ۲۶ با محدودیت‌های روابط ۲۸، ۲۹ و ۳۰. مجدداً با جایگذاری محدودیت‌ها در تابع هدف، مسئله به یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بدون محدودیت تبدیل می‌شود.

۳. جمع‌آوری توسط خرده‌فروش

در این مدل، تولیدکننده با پرداخت مبلغی به خرده‌فروش، مسئولیت جمع‌آوری محصول‌ها از مشتریان را به خرده‌فروش واگذار می‌کند. این مدل در واقعیت، مشابه شرکت کداک^۱ است که دوربین‌های یک‌بارمصرف خود را از طریق خرده‌فروشان جمع‌آوری می‌کند (ساواسکان و همکاران، ۲۰۰۴). سود تولیدکننده و خرده‌فروش در این مدل در زیر آمده است:

$$\Pi_M(W) = WD - (\alpha - \tau_r) DC_m - \tau_r DC_r - O_M DQ^{-1} - \quad (31)$$

$$\cdot / \delta i (C_m + C_r) Q - \tau D b - (\alpha - \tau) D t$$

$$\Pi_R(P, Q, R_r) = PD - WD - O_r DQ^{-1} - \cdot / \delta i W Q - \tau D r_r + \tau D b \quad (32)$$

مشابه مدل‌های قبل، تابع مطلوبیت تولیدکننده از روش میانگین-واریانس محاسبه می‌شود. براساس سیاست‌های بهینه خرده‌فروش، تولیدکننده درصد ماکزیم کردن تابع مطلوبیت خود است. در نتیجه، مدل بازی استکلبرگ تولیدکننده به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\text{Max} U \left(\Pi_M(W) \right) = E \left(\Pi_M(W) \right) - \lambda \text{var} \left(\Pi_M(W) \right) \quad (33)$$

$$P^*(Q) = \frac{\alpha[W + O_R Q^{-1} - \tau(k + b)]}{\alpha - \beta - 1} \quad (34)$$

$$r_R^*(Q) = \frac{\beta(W + O_R Q^{-1}) + \tau[(1-\alpha)k - b\beta]}{\tau(\alpha - \beta - 1)} \quad (35)$$

$$Q^* [W + O_R Q^{-1} - \tau(k + b)]^{\alpha - \beta} - \frac{\tau O_R (\alpha - \beta - 1)^{\alpha - \beta} \beta^\beta}{iW \alpha^\alpha \tau^\beta} = . \quad (36)$$

$$Q^* > \frac{O_R (\alpha - \beta - 2)}{\tau(W - \tau(k + b))} \quad (37)$$

با جایگذاری روابط ۳۴، ۳۵، ۳۶ و ۳۷، مسئله، به مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بدون محدودیت تبدیل می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار قابل حل است.

آنالیز حساسیت

در این قسمت، مثالی برای درک بهتر مدل‌های ارائه‌شده در قسمت قبل ارائه می‌شود. علاوه بر آن، آنالیز حساسیت بر تعدادی از پارامترهای کلیدی مدل (τ ، \bar{r} و λ)، رفتار مدل‌ها نسبت به آن‌ها را مشخص می‌کند.

زنجیره تأمین بسته‌ای، شامل یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش را در نظر بگیرید. در این زنجیره، تولیدکننده موظف به پرداخت مالیات برای $0/3$ محصول‌های بازیافت‌نشده است. هزینه خرید مواد اولیه اصلی و تولید یک واحد محصول از آنها، ۲۰ واحد پولی و هزینه تولید همان محصول از مواد بازگردانده‌شده، برابر با ۵ واحد پولی است. در این زنجیره، هزینه راه‌اندازی و سفارش‌دهی، برای تولیدکننده و خرده‌فروش، به ترتیب، ۴۰ و ۳۸ واحد پولی است. نرخ هزینه نگهداری محصول در انبار، برابر با $0/38$ است. در زنجیره تأمین بسته، $3/1$ درصد از کل محصول‌ها برای بازیافت، توسط تولیدکننده و خرده‌فروش جمع‌آوری می‌شوند که در این میان، تنها تعدادی از کل محصول‌های استفاده‌شده مشتری بازیافت می‌شوند و بقیه، از سوی بازرسی رد می‌شوند. در واقع، نرخ بازیافت در این زنجیره، مقداری تصادفی با میانگین $0/02$ و واریانس $0/001$ است. در ضمن، میزان ریسک‌گریزی تولیدکننده، برابر $0/4$ است. همچنین خرده‌فروش برای جمع‌آوری محصول‌ها، به ازای هر واحد محصول، مبلغ ۲ واحد پولی از تولیدکننده دریافت می‌کند. تقاضای مشتریان برای این محصول‌ها، وابسته به قیمت محصول و تبلیغات سبز است. ضریب کششی قیمت در تابع تقاضا، $3/09$ و ضریب کششی تبلیغات، برابر $2/05$ است. علاوه بر این، مقدار ثابت در تابع تقاضا ۲۳۰۰ در نظر گرفته شده است. مقدار پارامترها در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای عناصر زنجیره تأمین در سه مدل ارائه‌شده، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مقدار پارامترها

پارامترها	α	β	k	O_M	O_R	i	C_m
مقادیر	۳/۰۹	۲/۰۵	۲۳۰۰	۴۰	۳۸	۰/۳۸	۲۰
پارامترها	C_r	τ	$\bar{\tau}_r$	$\sigma_{\tau_r}^2$	λ	b	t
مقادیر	۵	۰/۰۳۱	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۴	۲	۰/۳

جدول ۲. مقادیر بهینه عناصر زنجیره تأمین در مدل‌های ارائه شده

مدل	W	r_M	x	Q	P	r_R	Π_M	Π_R
۱	۲۵۶/۹۹۳	۹۸۳۷/۲۱۵	۰/۲۵۴	۱/۱۶۴	۴۲۸/۱۵۷	۰/۱۴۵	۳۱۶/۵۶۲	۱۸۴/۴۰۰۵
۲	۴۱/۱۷۹	.	-	۹/۲۹۸۵	۶۶/۹۲۴	-	۲۰۲/۵۸۶	۳۱۲/۸۲۴
۳	۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۸/۵۸۱	۱۰۰/۲۳۰۴

برای مشخص شدن اثر ریسک تولیدکننده که در مدل‌ها در نظر گرفته شده است، یک‌بار مدل‌ها در این مثال، در حالت بدون ریسک در نظر گرفته شده و نتایج آن در جدول ۳ به صورت زیر ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۳، مشاهده می‌شود که با حذف اثر ریسک تولیدکننده در باز یافت محصول‌های بازگردانده شده، سود تولیدکننده و خرده‌فروش افزایش یافته است.

جدول ۳. مقادیر بهینه عناصر زنجیره تأمین در مدل‌های ارائه شده بدون در نظر گرفتن ریسک

مدل	W	r_M	x	Q	P	r_R	Π_M	Π_R
۱	۳۱/۱۸۹	.	۰/۵۴۱	۱۷/۱۰۴	۴۹/۳۵۵	۰/۰۰۷	۳۲۹/۱۶۶	۶۲۷/۳۱۴
۲	۳۱/۱۶۱	.	-	۱۷/۱۱۲		-	۳۲۹/۲۲۲	۶۲۷/۳۷۳
۳	۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۱۲/۱۴۵	۱۰۰/۲۳۰۴

در این مقاله همچنین برای تحلیل بیشتر مدل‌های ارائه شده، اثر نرخ جمع‌آوری (τ)، نرخ باز یافت (τ_r) و میزان ریسک‌گریزی (λ) روی مدل‌ها بررسی شده که به ترتیب، در جداول ۴ تا ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۴. آنالیز حساسیت مدل‌ها نسبت به نرخ جمع‌آوری (τ)

مدل	τ	W	r_M	x	Q	P	r_R	Π_M	Π_R
۱		۳۰۲/۰۵۳	۱۲۷۴۹/۹۲	۰/۲۴	۱/۰۵۴	۴۹۹/۸۱۸	۰	۲۵۴/۸۸۸	۲۱۰/۸۲۸
۲	۰/۲۹	۴۱/۱۸	۰	-	۹/۲۹۸	۶۶/۹۲۵	-	۲۰۲/۵۷۵۵	۳۱۲/۸۱۴
۳		۵۸/۸۹۴	-	-	۴/۱۴۶	۱۰۰/۵۲۸	۰/۰۰۵	۱۲۲/۷۵۴	۱۱۸/۳۱۲
۱		۲۸۰/۷۶۹	۱۱۳۰۵/۳۵	۰/۲۴۲	۱/۰۹۷	۴۶۶/۲۳۱	۰	۲۳۴/۶۶۳	۱۹۶/۵۸۷
۲	۰/۰۳	۴۱/۱۸	۰	-	۹/۲۹۸	۶۶/۹۲۵	-	۲۰۲/۵۸۱	۳۱۲/۸۱۹
۳		۶۰/۶۰۹	-	-	۳/۸۷۸۵	۱۰۴/۰۰۵	۰/۰۰۳	۱۱۵/۹۲۲	۱۰۸/۷۷۷
۱		۲۵۶/۹۹۳	۹۸۳۷/۲۱۵	۰/۲۵۴	۱/۱۶۴	۴۲۸/۱۵۷	۰/۱۴۵	۲۱۶/۵۶۲	۱۸۴/۴۰۰۵
۲	۰/۰۳۱	۴۱/۱۷۹	۰	-	۹/۲۹۸۵	۶۶/۹۲۴	-	۲۰۲/۵۸۶	۳۱۲/۸۲۴
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	۰	۱۰۸/۵۸۱	۱۰۰/۲۳۰۴
۱		۴۱/۲۱۶	۰	۰/۳۹۷	۹/۲۹۴	۶۶/۹۲۵	۰	۲۰۲/۵۴۴۵	۳۱۲/۷۸۷
۲	۰/۰۳۲	۴۱/۱۷۹	۰	-	۹/۲۹۹	۶۶/۹۲۴	-	۲۰۲/۵۹۱۵	۳۱۲/۸۲۹
۳		۶۳/۹۷۸۵	-	-	۳/۴۱۷	۱۱۰/۹۳۹	۰/۰۰۷	۱۰۱/۷۱۶	۹۲/۵۴۵
۱		۴۱/۲۱۶	۰	۰/۴۱۵	۹/۲۹۴	۶۶/۹۲۴	۰/۰۰۹	۲۰۲/۵۷	۳۱۲/۷۹۹
۲	۰/۰۳۳	۴۱/۱۷۹	۰	-	۹/۲۹۹	۶۶/۹۲۳۵	-	۲۰۲/۵۹۷	۳۱۲/۸۳۵
۳		۶۵/۶۳۴	-	-	۳/۲۱۷	۱۱۴/۴۰۵	۰	۹۵/۵۶۲	۸۵/۶۱۳

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در مدل ۲ با افزایش نرخ جمع‌آوری، سود، افزایش می‌یابد. این امر به این دلیل است که مسئولیت جمع‌آوری محصول‌های مصرف‌شده از مشتری، تنها به عهده تولیدکننده است. هرچه محصول‌های بیشتری جمع‌آوری شوند، به دلیل پایین‌تر بودن هزینه تولید از مواد مصرف‌شده، هزینه تولید کمتر است و در نتیجه، سود تولیدکننده و خرده‌فروش بیشتر است. این در حالی است که در مدل ۳، با توجه به آنکه خرده‌فروش وظیفه جمع‌آوری محصول را بر عهده دارد، هرچه نرخ جمع‌آوری بیشتر باشد، تولیدکننده پول بیشتری را به ازای محصول‌های جمع‌آوری‌شده به او می‌پردازد. همچنین این امر، سبب بالارفتن قیمت عمده‌فروشی (جدول ۴) می‌شود. با افزایش قیمت عمده‌فروشی، با توجه به اینکه قیمت بهینه از قیمت عمده‌فروشی در رابطه ۳۴ تعیین می‌شود، قیمت محصول نیز بالا می‌رود. این امر سبب کاهش تقاضای مشتریان (با توجه به رابطه معکوس قیمت محصول و تقاضا) می‌شود و در نهایت، سود هر دو، تولیدکننده و خرده‌فروش، با توجه به یکسان‌بودن تابع تقاضا برای آنها کاهش می‌یابد. در مدل ۱ که جمع‌آوری، توسط هر دو سطح انجام می‌شود، با افزایش نرخ جمع‌آوری، میزان همکاری تولیدکننده در جمع‌آوری (x) افزایش می‌یابد. با افزایش میزان x ، رفتار تولیدکننده و خرده‌فروش، از مدل ۳ به ۲ تغییر می‌کند؛ به عبارت دیگر، سودها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند.

جدول ۵. آنالیز حساسیت مدل‌ها نسبت به میانگین نرخ باز یافت (\bar{r}_r)

مدل	\bar{r}_r	W	r_M	X	Q	P	r_R	Π_M	Π_R
۱		۲۶۵/۴۱	۱۰۲۱۷/۰۹	-/۲۴۴	۱/۱۲۴	۴۴۲/۳۰۲۵	.	۲۱۶/۳۰۶	۱۸۳/۳۹۳
۲	./۰۱	۴۱/۳۱۴	.	-	۹/۲۳۲	۶۷/۱۶۷	-	۱۹۹/۹۳۱	۳۱۰/۲۰۷۵
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۷/۹۶۳	۱۰۰/۲۳
۱		۲۶۱/۲۳	۱۰۰۲۸/۴۷	-/۲۴۴	۱/۱۴۴	۴۳۵/۲۷۶۵	.	۲۱۶/۴۳۳	۱۸۳/۸۸۶
۲	./۰۱۵	۴۱/۲۴۶۵	.	-	۹/۲۶۵	۶۷/۰۴۵۵	-	۲۰۱/۲۵۵	۳۱۱/۵۱۴
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۸/۲۷۲	۱۰۰/۲۳
۱		۲۵۶/۹۹۳	۹۸۳۷/۲۱۵	-/۲۴۴	۱/۱۶۴	۴۲۸/۱۵۷	-/۱۴۵	۲۱۶/۵۶۲	۱۸۴/۴۰۰۵
۲	./۰۲	۴۱/۱۷۹	.	-	۹/۲۹۸۵	۶۶/۹۲۴	-	۲۰۲/۵۵۶	۳۱۲/۸۲۴
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۸/۵۸۱	۱۰۰/۲۳
۱		۲۵۲/۶۹۲	۹۶۴۳/۰۹۷	-/۲۴۴	۱/۱۸۵	۴۲۰/۹۲۴	-/۰۴۶	۲۱۶/۶۹۴۵	۱۸۴/۹۳۸
۲	./۰۲۵	۴۱/۱۱۲۵	.	-	۹/۳۳۲	۶۶/۸۰۴	-	۲۰۳/۹۲۵	۳۱۴/۱۳۷
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۸/۸۹۵	۱۰۰/۲۳
۱		۲۱۶/۸۲۹	۹۴۴۵/۸۵۴	-/۲۴۴	۱/۲۰۸	۴۱۳/۵۷۴	.	۲۱۶/۸۲۹	۱۸۵/۵۰۱
۲	./۰۳	۴۱/۰۴۶	.	-	۹/۳۶۶	۶۶/۶۸۴	-	۲۰۵/۲۷۱۵	۳۱۵/۴۵۲
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۹/۱۹۸۵	۱۰۰/۲۳

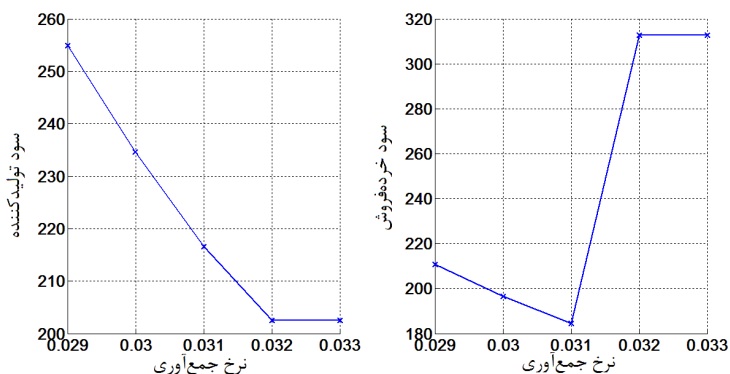
در نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود که در یک نرخ جمع‌آوری ثابت، هرچه نرخ باز یافت افزایش یابد، سود افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه تعداد محصول‌ها با کیفیت باز یافتی بیشتر شود، تولید محصول‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه، هزینه تولید کمتر می‌شود و سود افزایش می‌یابد.

جدول ۶. آنالیز حساسیت مدل‌ها نسبت به میزان ریسک‌گریزی تولیدکننده (λ)

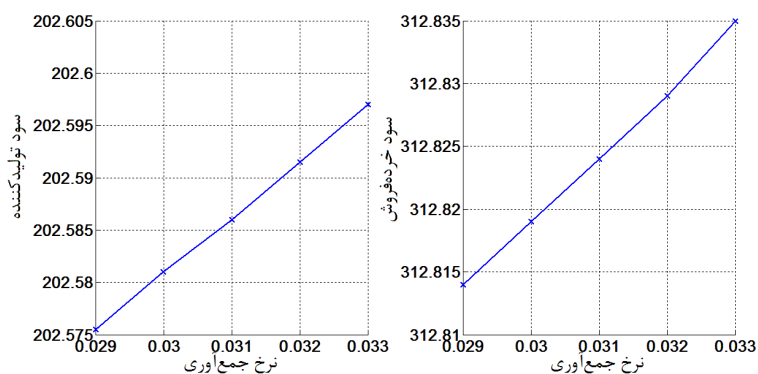
مدل	λ	W	r_M	X	Q	P	r_R	Π_M	Π_R
۱		۳۱/۴۵۳	.	-/۵۲۶۵	۱۶/۷۹۴۵	۴۹/۸۰۵	.	۳۲۱/۷۴۳	۶۱۴/۵۹۵
۲	.	۳۱/۴۲۵	.	-	۱۶/۸۰۲		.	۳۲۱/۷۹۹	۶۱۴/۶۵۳
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۱۱/۷۷۴۵	۱۰۰/۲۳۰۴
۱		۳۷/۹۲۲	.	-/۴۳۲	۱۱/۱۶۹	۶۱/۰۴۴۵	-/۰۰۷	۲۳۷/۹۸۳	۳۸۶/۸۱۳
۲	./۰۲	۳۷/۸۸۸	.	-	۱۱/۱۷۴	۶۱/۰۴۴	-	۲۳۸/۰۳۳	۳۸۶/۸۵۹۵
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۹/۴۰۵	۱۰۰/۲۳۰۴
۱		۲۵۶/۹۹۳	۹۸۳۷/۲۱۵	-/۲۴۴	۱/۱۶۴	۴۲۸/۱۵۷	-/۱۴۵	۲۱۶/۵۶۲	۱۸۴/۴۰۰۵
۲	./۰۴	۴۱/۱۷۹	.	-	۹/۲۹۸۵	۶۶/۹۲۴	-	۲۰۲/۵۵۶	۳۱۲/۸۲۴
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۸/۵۸۱	۱۰۰/۲۳۰۴
۱		۲۷۲/۳۵۳	۱۰۵۳۰/۴۴	-/۲۴۳	۱/۰۹۳	۴۵۳/۹۷۹	.	۲۱۶/۳۳۲	۱۸۲/۶۰۳
۲	./۰۶	۴۳/۵۳۴	.	-	۸/۲۱۹	۶۹/۷۲	.	۱۸۰/۴۲۵۵	۲۸۷/۵۵۱
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۷/۴۴۷	۱۰۰/۲۳۰۴
۱		۲۸۵/۵۳۱	۱۱۱۲۵/۰۷	-/۲۴۱	۱/۰۳۹	۴۷۶/۱۳۸	.	۲۱۶/۱۰۹	۱۸۱/۱۹۸
۲	./۰۸	۴۵/۴۰۴	.	-	۷/۴۸۲	۷۴/۶۳۸	-	۱۶۴/۵۷۷	۲۴۲/۴۲۷
۳		۶۲/۳۰۳۵	-	-	۳/۶۳۶	۱۰۷/۴۷۲	.	۱۰۵/۶۹۶	۱۰۰/۲۳۰۴

آنالیز حساسیت مدل‌های ارائه‌شده نسبت به λ نیز در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که هرچه ریسک‌گریزی تولیدکننده بیشتر باشد، کمتر ریسک می‌کند و کمتر به زنجیره معکوس اهمیت می‌دهد. از آنجا که تولید محصول از مواد اصلی پرهزینه‌تر است، سود کاهش می‌یابد.

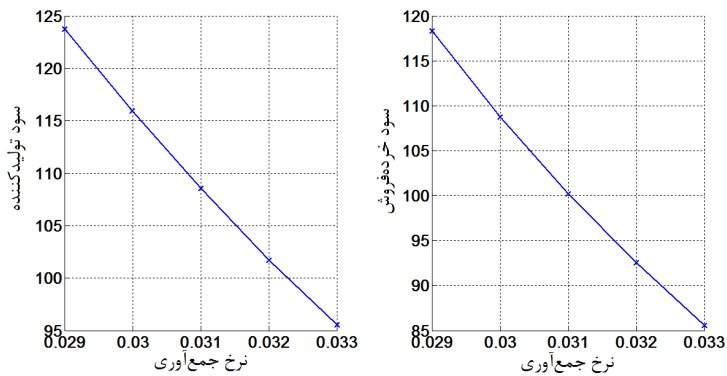
برای انتخاب مدل مناسب جهت جمع‌آوری محصول، با مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده، سود هر سه مدل در مثال ارائه‌شده، مدل دوم، مناسب به‌نظر می‌رسد. این در حالی است که با افزایش نرخ جمع‌آوری، واضح است که تمایل به مدل اول افزایش می‌یابد و انتخاب مدل اول توصیه می‌شود. این حالت در میزان ریسک‌گریزی کم نیز مشاهده می‌شود. برای درک بهتر مدل‌ها، خلاصه نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر پارامترهای نرخ جمع‌آوری، نرخ بازیافت و میزان ریسک‌گریزی بر مدل‌ها، در نمودارهای ۱ تا ۵ آمده است.



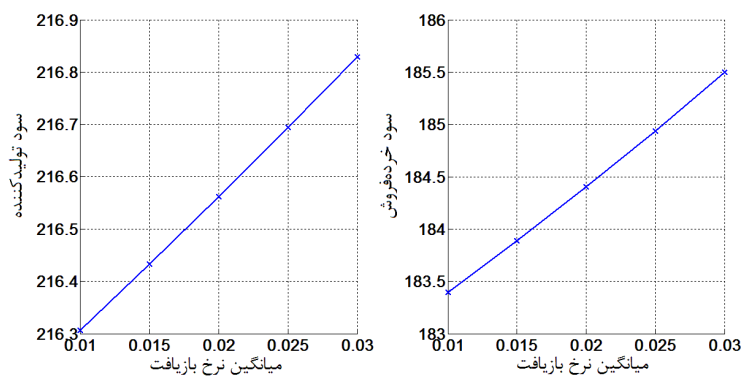
نمودار ۱. اثر نرخ جمع‌آوری (τ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۱



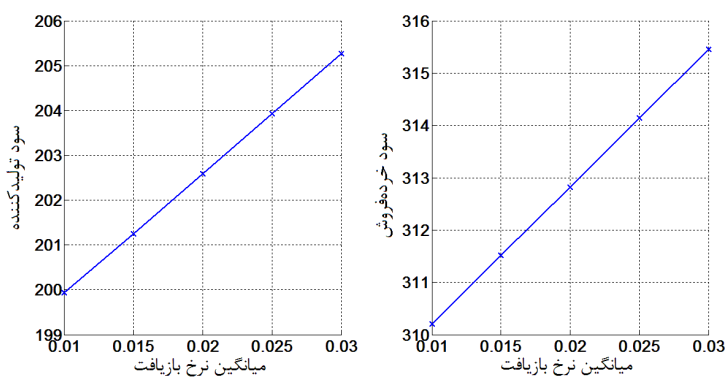
نمودار ۲. اثر نرخ جمع‌آوری (τ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۲



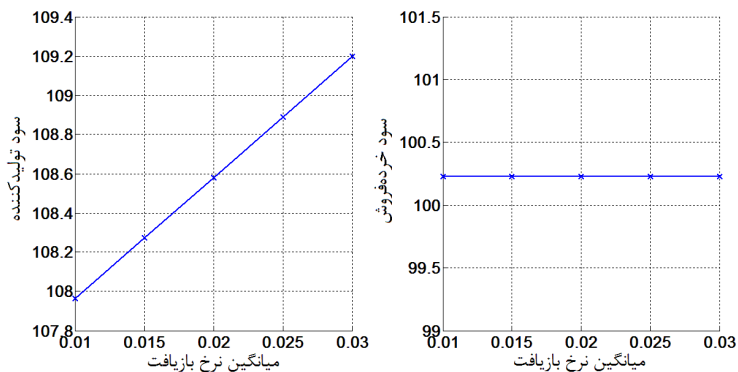
نمودار ۳. اثر نرخ جمع آوری (τ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۳



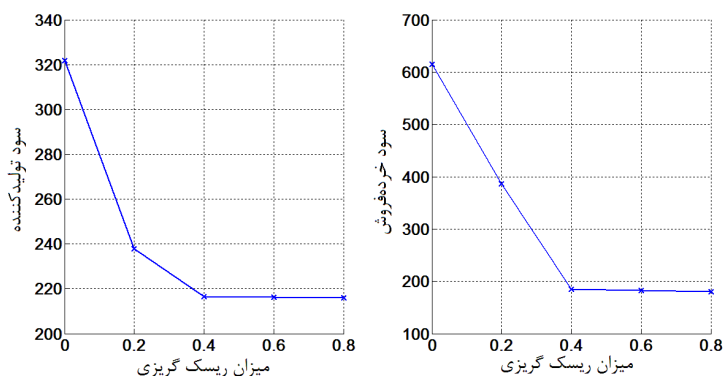
نمودار ۴. اثر میانگین نرخ بازیافت ($\bar{\tau}_r$) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۱



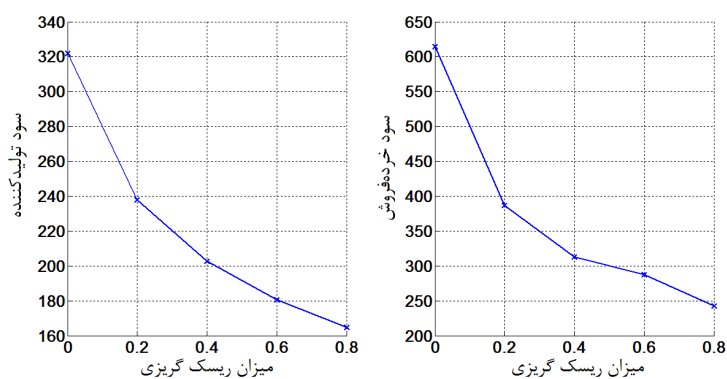
نمودار ۵. اثر میانگین نرخ بازیافت ($\bar{\tau}_r$) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۲



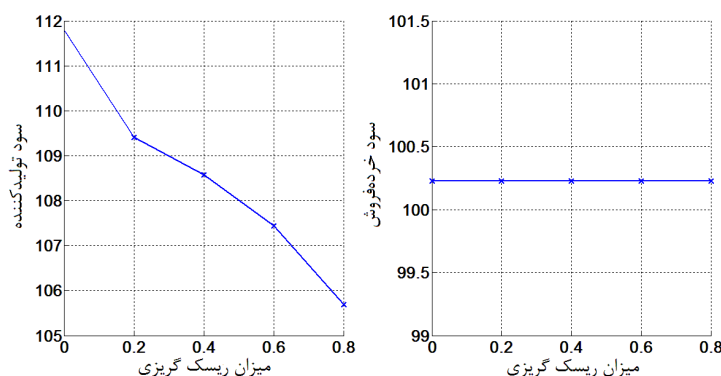
نمودار ۳. اثر میانگین نرخ بازیافت (\bar{r}_p) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۳



نمودار ۴. اثر میزان ریسک (λ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۱



نمودار ۵. اثر میزان ریسک (λ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۲



نمودار ۹. اثر میزان ریسک (λ) بر سود تولیدکننده و خرده‌فروش در مدل ۳

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در سال‌های اخیر با بروز مشکل‌های زیست‌محیطی، به موضوع زنجیره تأمین سبز بسیار توجه شده است. در این میان، زنجیره تأمین سبز دارای حلقه بسته، به دلیل جلوگیری از باقی ماندن مواد مضر در طبیعت، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، با توجه به استراتژی‌های مختلف جمع‌آوری محصول، تعدادی مدل قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین بسته دوسطحی ارائه می‌شود. در مدل اول، تولیدکننده و خرده‌فروش با یکدیگر به جمع‌آوری محصول می‌پردازند. در مدل‌های دوم و سوم، به ترتیب، تولیدکننده و خرده‌فروش به تنهایی به جمع‌آوری محصول می‌پردازند. در این مقاله، تقاضای مشتریان برای محصول، علاوه بر قیمت، به تبلیغات سبز برای معرفی محصول‌های سازگار با محیط زیست نیز وابسته است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن بحث ریسک و بی‌ثباتی در زنجیره معکوس، مدل‌ها به دنیای واقعی نزدیک‌تر شده‌اند. تعامل‌های میان تولیدکننده و خرده‌فروش در قیمت‌گذاری، بر اساس بازی استکلبرگ بررسی می‌شوند و تصمیم‌گیری بهینه تولیدکننده و خرده‌فروش برای هر مدل انجام می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت پویای زنجیره تأمین در دنیای واقعی، عامل ریسک با استفاده از روش میانگین-واریانس برای تولیدکننده در مدل‌ها منظور می‌شود. برای درک بهتر مدل‌های ارائه شده، یک مثال عددی بررسی می‌شود و با توجه به سود به دست آمده برای اعضای زنجیره، استراتژی مناسب جمع‌آوری، انتخاب می‌شود. نتایج نشان داده‌اند که مدل دوم، مناسب‌ترین مدل برای جمع‌آوری محصول است. همچنین برای نشان دادن اثر پارامتر ریسک تولیدکننده بر مدل‌های ارائه شده، در مثال عددی مورد نظر، سیاست‌های بهینه در حالت بدون ریسک هم تعیین و با هم مقایسه شدند. با توجه به نتایج، مشخص است که با وارد کردن بحث ریسک و بی‌ثباتی در بازیافت محصول، سود

اعضای زنجیره تأمین کاهش می‌یابد. در پایان، بر پارامترهای نرخ جمع‌آوری، نرخ بازیافت و میزان ریسک‌گریزی، آنالیز حساسیت انجام شده و تأثیر پارامترهای مذکور بر مدل‌ها مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ جمع‌آوری، سود اعضای زنجیره در مدل اول افزایش می‌یابد و در نرخ‌های بالای جمع‌آوری، مدل اول (جمع‌آوری توسط تولیدکننده و خرده‌فروش) توصیه می‌شود. همچنین در میزان ریسک‌گریزی کمتر تولیدکننده، مدل اول توصیه می‌شود.

پیشنهادهایی که برای پژوهش‌های آینده می‌توان در نظر گرفت، عبارتند از: ۱. در این پژوهش، تمامی اطلاعات زنجیره برای هر دو سطح تولیدکننده و خرده‌فروش مشخص است. این در حالی است که در واقعیت ممکن است این‌گونه نباشد و استفاده از بازی با اطلاعات ناقص، مشابه تحقیق اسمعیلی و همکاران (۲۰۱۰) نیز ممکن است مدل‌ها را واقعی‌تر کند؛ ۲. در پژوهش‌های آتی می‌توان تحلیل بیشتری بر نرخ جمع‌آوری محصول‌ها انجام داد. نرخ جمع‌آوری محصول‌ها می‌تواند خود به‌عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شود و مقدار بهینه آن از طریق مدل محاسبه شود؛ ۳. با توجه به اهمیت مالیات به‌عنوان عامل بازدارنده برای تولیدکنندگان، بی‌توجه به امر بازیافت می‌توان در پژوهش‌های آتی، در مدل‌سازی پارامتر مالیات، پژوهش‌های بیشتری انجام داد و تا حد امکان، مدل‌ها را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرد.

References

- Abdoli, G. (2011). *Game Theory and Applications*, University of Tehran. Tehran. (In Persian)
- Andiç, E., Yurt, Ö. & Baltacıoğlu, T. (2012). Green supply chains: Efforts and potential applications for the Turkish market. *Resources, Conservation and Recycling*, 58: 50-68.
- Barari, S. A. (2012). A decision framework for the analysis of green supply chain contracts: An evolutionary game approach. *Expert systems with applications*, 39(3): 2965-2976.
- Chung, S. L. A. M. C. (2008). Optimal policy for a closed-loop supply chain inventory system with remanufacturing. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(5): 867-881.

- Esmaeili, M. & Zeephongsekul, P. (2010). Seller-buyer models of supply chain management with an asymmetric information structure. *International Journal of Production Economics*, 123(1): 146-154.
- Esmaeili, M., Abad, P. L. & Aryanezhad, M. B. (2009). Seller-buyer relationship when end demand is sensitive to price and promotion. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 26(05): 605-621. (In Persian)
- Esmaeili, M., Aryanezhad, M. B. & Zeephongsekul, P. (2009). A game theory approach in seller--buyer supply chain. *European Journal of Operational Research*, 195(2): 442-448.
- Fatemi Ghomi, M. T. (2001). *Production planing and inventory control*, Amirkabir University of Technology. Tehran. (In Persian)
- Haji, R., Maarefatdoost, M. M. & Ebrahimi, B. (2009). Finding the cost of inventory in make to order supply chain under vendor managed inventory program. *Industrial Management*, 1(3): (In Persian)
- Huang, M., Song, M., Lee, L. H. & Ching, W. K. (2013). Analysis for strategy of closed-loop supply chain with dual recycling channel. *International Journal of Production Economics*, 144(2): 510-520.
- Karray, S. (2011). Effectiveness of retail joint promotions under different channel structures. *European Journal of Operational Research*, 210(3): 745-751.
- Majumder, P. & Groenevelt, H. (2001). Competition in Remanufacturing. *Production and Operations Management*, 10(2): 125-141.
- Mirghafoori, H., Morovati Sharifabadi, A. & Assadian Ardakani, F. (2012). Evaluation of suppliers risk in supply chain using combining Fuzzy VIKOR and GRA techniques. *Industrial Management*, 4(2): 153-178. (In Persian)
- Nagurney, A. & Yu, M. (2012). Sustainable fashion supply chain management under oligopolistic. *International Journal of Production Economics*, 135(2): 532-540.

- Pishvae, M. & Torabi, S. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 2668-2683. (In Persian)
- Sadeghi Moghadam, M. R., Momeni, M. & Nalchigar, S. (2010). Material Flow Modeling in Supply Chain Management with Genetic Algorithm Approach. *Industrial Management*, 1(2), 71-88. (In Persian)
- Savaskan, R. C. & Van Wassenhove, L. N. (2006). Reverse channel design: the case of competing retailers. *Management Science*, 52: 1-14.
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S. & Van Wassenhove, L. N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management science*, 50(2): 239-252.
- Xiang-yun, C. & Jian-jun, Z. (2008). Pricing and coordination analysis for a closed-loop supply chain based on game theory. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. WiCOM'08. 4th International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Xiao, T. & Yang, D. (2008). Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 187-200.
- Xie, J. & Wei, J. C. (2009). Coordinating advertising and pricing in a manufacturer--retailer channel. *European Journal of Operational Research*, 197(2): 785-791.
- Xu, G., Dan, B., Zhang, X. & Liu, C. (2014). Coordinating a dual-channel supply chain with risk-averse under a two-way revenue sharing contract. *International Journal of Production Economics*, 171-179.
- Zhao, R., Neighbour, G., Han, J., McGuire, M. & Deutz, P. (2012). Using game theory to describe strategy selection for environmental risk and carbon emissions reduction in the green supply chain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6): 927-936.