

## مدل سازی قیمت گذاری چندکاناله با در نظر گرفتن اثر قیمت مرجع و اینترنت اشیا: ارائه یک چارچوب تحلیلی-عددی با شکل کلی تابع تقاضا

فاطمه قویدل<sup>۱</sup>، راشد صحرائیان<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

### خلاصه

هدف این پژوهش ارائه چارچوبی جامع برای تحلیل اثر همزمان قیمت مرجع، اینترنت اشیا، رفتار مشتری و ساختار چندکاناله بر تصمیمات قیمت گذاری است. زنجیره تأمین مورد بررسی دو سطحی شامل یک تولیدکننده و یک خرده فروش است. شکل تابع تقاضا کلی است و می تواند خطی، محدب یا مقعر باشد تا امکان تحلیل رفتار مشتری در شرایط مختلف بازار را فراهم سازد. تابع تقاضا علاوه بر قیمت، به سطح سرمایه گذاری اینترنت اشیا نیز وابسته است چراکه اینترنت اشیا می تواند کیفیت ادراک شده خدمات و در نتیجه تمایل به پرداخت مشتری را افزایش دهد. برای تحلیل این ساختار، سه سناریوی تصمیم گیری شامل فروش تک کاناله، فروش چندکاناله با ساختار متمرکز و فروش چندکاناله با ساختار غیرمتمرکز بررسی می شود. در ادامه فرم بسته پاسخ بهینه برای حالتی که تابع تقاضا خطی است ارائه شده و سپس برای حالت های غیرخطی از یک رویکرد جستجو کارا استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که سرمایه گذاری اینترنت اشیا به همراه فروش چندکاناله قادر است سود زنجیره را به طور معناداری افزایش دهد. همچنین تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای رفتاری و فناوری بینش های مدیریتی مهمی را برای سیاست گذاری قیمت و سرمایه گذاری اینترنت اشیا فراهم می کند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۸/۰۸

بازنگری ۱۴۰۴/۱۱/۱۷

پذیرش ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

قیمت گذاری چندکاناله

قیمت مرجع

رفتار مشتری

تابع تقاضای خطی/غیرخطی

برنامه ریزی زنجیره تأمین.

### ۱. مقدمه

رشد فزاینده فناوری های دیجیتال و گسترش فروش چندکاناله، ساختارهای سنتی بازاریابی و برنامه ریزی زنجیره های تأمین را با تغییرات اساسی مواجه کرده است. استفاده از اینترنت اشیا و داده های بلادرنگ در فرآیندهای فروش، خدمت رسانی و بازاریابی سطح جدیدی از تجربه مشتری را ایجاد کرده که رفتار خرید، ارزیابی کیفیت خدمت یا محصول و در نتیجه قیمت مرجع مشتری را تحت تأثیر قرار می دهد. در ادبیات مدیریت و بازاریابی، قیمت مرجع یکی از عوامل مهم در تصمیم گیری مشتری است و اختلاف میان قیمت محصول و قیمت مرجع می تواند به طور مستقیم بر احساس ارزش، انصاف و تمایل به

خرید اثر بگذارد [۱]. پژوهش ها نشان داده اند که کیفیت خدمات آنلاین - به ویژه در حضور فناوری هایی مانند اینترنت اشیا - می تواند ادراک مشتری از ارزش محصول و تجربه خرید را تغییر دهد [۲،۳]. به علاوه، سرمایه گذاری در اینترنت اشیا این امکان را برای مدیران فراهم می کند که با جمع آوری داده های رفتاری مشتریان و استفاده از تبلیغات شخصی سازی شده، ارزش ادراک شده محصول را افزایش داده و در نتیجه تمایل به پرداخت مشتریان را ارتقا دهند [۴].

با وجود اهمیت این عوامل، بخش عمده ای از مطالعات پیشین هر یک از این ابعاد را به صورت جداگانه بررسی کرده اند. تحقیقات مرتبط با رفتار مشتری عمدتاً بر ساختار قیمت، قیمت مرجع و حساسیت

\* نویسنده مسئول: راشد صحرائیان

تلفن: ۰۲۱-۵۱۲۱۲۰۴۰؛ پست الکترونیکی: [Sahraeian@shahed.ac.ir](mailto:Sahraeian@shahed.ac.ir)

«فروش چندکاناله» را در مدلی یکپارچه تحلیل کند، بسیار محدود است. پژوهش حاضر باهدف پر کردن این شکاف، چارچوبی ارائه می دهد که در آن قیمت کانال های فروش و سطح سرمایه گذاری اینترنت اشیا باهدف افزایش قیمت مرجع به صورت همزمان تعیین می شوند. علاوه بر این، سه ساختار متفاوت تصمیم گیری شامل -فروش تک کاناله، فروش چندکاناله متمرکز و چندکاناله غیرمتمرکز- بررسی می شود تا اثر نوع هماهنگی میان اعضای زنجیره روشن گردد. این رویکرد علاوه بر پوشش شکاف های موجود، بینش های مدیریتی مهمی را در مورد سطح بهینه قیمت ها و سرمایه گذاری در فناوری ارائه داده و نشان می دهد چگونه اینترنت اشیا می تواند به طور مستقیم رفتار مشتری و سود زنجیره را بهبود دهد. شکل (۱) توپولوژی مفهومی مسأله پژوهش را نشان می دهد.

ساختار مقاله در ادامه به این ترتیب است: در بخش دوم ادبیات مرتبط با موضوع پژوهش ارائه می شود. بخش سوم شامل بیان مسأله، ارائه مدل ریاضی و استخراج روابط تحلیلی در حالت کلی تابع تقاضا است. بخش چهارم رویکرد حل شامل روش جستجوی عددی برای حالت کلی تابع تقاضا و رابطه تحلیلی برای حالت خاص تابع تقاضای خطی را تشریح می کند. بخش پنجم شامل مثال عددی، ارزیابی رویکرد حل، تحلیل حساسیت و بحث مدیریتی است و نهایتاً بخش ششم به جمع بندی و پیشنهاد های آینده می پردازد.



شکل (۱). توپولوژی مفهومی مسأله پژوهش

## ۲. مرور ادبیات

در سال های اخیر ادبیات مرتبط با قیمت گذاری، فروش چندکاناله، اثر قیمت مرجع و به کارگیری فناوری های نوین مانند اینترنت اشیا در زنجیره های تأمین رشد چشم گیری داشته است. با این حال، همان گونه که اشاره شد پژوهش های موجود عمدتاً به صورت جداگانه به هر یک از این ابعاد پرداخته اند و چارچوبی که بتواند اثر همزمان رفتار مشتری و

تقاضا تمرکز داشته اند [۵،۶]. در حالی که ادبیات مرتبط با فناوری اغلب نقش اینترنت اشیا را در کاهش هزینه ها و بهبود هماهنگی زنجیره بررسی کرده اند [۲،۳]. به علاوه، مطالعات اندکی اثر مستقیم سرمایه گذاری اینترنت اشیا بر قیمت مرجع و رفتار مشتری در یک محیط چندکاناله را مطالعه کردند؛ در حالی که شواهد نشان می دهد کیفیت خدمات و یا تبلیغات شخصی سازی شده مبتنی بر فناوری های نوین می تواند به طور اثربخشی قیمت مرجع را تغییر دهد.

از سوی دیگر بیشتر مدل های موجود از تابع تقاضای خطی یا مقعر استفاده کرده اند در حالی که رفتار مشتری در شرایط خاص می تواند شکل محدب نیز داشته باشد [۵]. این موضوع اهمیت توسعه رویکردهای تصمیم گیری برای توابع تقاضا به شکل کلی را برجسته می کند تا بتوان در هر سه حالت خطی، مقعر و محدب و یا ترکیبی از این حالت ها رفتار پیچیده مشتریان در بازارها را با دقت بیشتری تحلیل کرد. در چنین شرایطی، ارائه همزمان محصول در کانال های مختلف فروش و تمایل مشتریان به خرید از کانال های خاص، پیچیدگی تصمیمات قیمت گذاری را افزایش می دهد.

ایده اصلی در طرح مسأله پژوهش حاضر این است که امروزه با توسعه فناوری اینترنت اشیا در کسب و کارها، امکان گردآوری و تحلیل داده های رفتاری مشتریان را از طریق دستگاه های هوشمند فراهم آورده است. این داده ها، که به طور مستقیم ترجیحات و الگوهای خرید مشتریان را نمایان می سازد، بنگاه ها را قادر می کند پیشنهادهای شخصی سازی شده و تصمیمات بازاریابی هدفمند ارائه دهند؛ موضوعی که در ادبیات، از جمله در پژوهش میرباقری و همکاران [۷] نیز مورد تأکید قرار گرفته است. ارتقای تجربه مشتری از طریق اینترنت اشیا همچنین می تواند ادراک او از ارزش محصول و قیمت مرجع ذهنی وی را تغییر دهد و از این طریق بر سطح تقاضا اثر بگذارد. از سوی دیگر، ساختار تابع تقاضا در بازارهای واقعی معمولاً یکنواخت نیست و می تواند برای گروه های مختلف مشتری خطی، محدب یا مقعر باشد. در چنین شرایطی، قیمت مرجع نقش تعیین کننده ای در جهت و میزان تقاضا ایفا می کند؛ زیرا مشتریان معمولاً قیمت محصول را با یک معیار ذهنی مقایسه کرده و براساس این مقایسه تصمیم به خرید می گیرند. هنگامی که اینترنت اشیا موجب تغییر قیمت مرجع مشتری می شود، تابع تقاضا به طور همزمان به قیمت و قیمت مرجع وابسته می شود و رفتار آن ماهیتی غیرخطی و چندشکلی پیدا می کند. حل مدل ریاضی حاصل از این ساختار پیچیده یکی از چالش های اصلی این پژوهش است. این مسأله در محیط فروش چندکاناله اهمیت بیشتری پیدا می کند؛ زیرا تصمیمات قیمت گذاری در کانال تولیدکننده و خرده فروش بر رفتار مشتریان اثرگذار است. علاوه بر این، به کارگیری اینترنت اشیا در چنین محیطی نیازمند سرمایه گذاری مشترک در زیرساخت های فناورانه است و نحوه تسهیم هزینه میان اعضای زنجیره تأمین نیز به یک چالش مهم تبدیل می شود.

با وجود این پیچیدگی ها پژوهشی که ترکیب سه گانه «رفتار مشتری و قیمت مرجع»، «فناوری های نوین مانند اینترنت اشیا» و

رفتار مرجع‌گرای مشتری در نظر گرفتند. به‌طور کلی، در اکثر موارد، ساختار تقاضای خطی باقی‌مانده و صرفاً پارامترهای تابع تقاضا تغییر یافته است. بنابراین، توسعه مدل‌هایی که ساختار کلی برای تابع تقاضا در نظر بگیرد و به‌طور همزمان بر رفتارشناختی خطی و غیرخطی مشتریان متمرکز شود، ضروری به نظر می‌رسد.

ادبیات مرتبط با قیمت‌گذاری به‌طور وسیعی ساختار فروش چندکاناله را مورد توجه قرار داده‌اند. عابدینی ندوشن و همکاران [۱۵] و همچنین حقیقی و جعفری [۱۶] تصمیمات قیمت‌گذاری و خدمات لجستیکی و خرده‌فروشی را در زنجیره تأمین دوکاناله با استفاده از نظریه بازی تحلیل کردند. به‌علاوه، بخش قابل توجهی از ادبیات قیمت مرجع به این موضوع پرداخته‌اند که اثر قیمت مرجع چگونه در محیط‌های دوکاناله رفتار مشتری را هدایت می‌کند. دای و همکاران [۱۳] نشان می‌دهند که مشتریان در کانال‌های آنلاین و آفلاین قیمت‌های متفاوتی را به‌عنوان قیمت مرجع در ذهن دارند و این اختلاف باعث می‌شود قیمت مرجع نقش متفاوتی در هر کانال ایفا کند. در مدل‌های چندکاناله، قیمت مرجع معمولاً یا از قیمت‌های تاریخی یا از قیمت مقایسه‌ای میان دو کانال تعیین می‌شود؛ بنابراین ممکن است رفتار مشتری نسبت به کانال آنلاین و کانال آفلاین ناهمگن باشد [۱۴]. ادبیات نشان می‌دهد که قیمت مرجع در بازارهای چندکاناله، علاوه بر اثرگذاری بر مقدار تقاضا، تصمیمات انتخاب کانال را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مشتریان هنگام مقایسه قیمت آنلاین و خرده‌فروشی، اگر قیمت حقیقی یکی از کانال‌ها پایین‌تر از قیمت مرجع ادراک‌شده باشد، تمایلشان به انتخاب آن کانال افزایش می‌یابد. این الگو در مطالعات ژانگ و همکاران [۱۷] و دای و همکاران [۱۸] کاملاً تکرار شده است؛ در تمام این موارد، اثر قیمت مرجع باعث افزایش توان رقابتی کانالی است که تجربه بهتر یا قیمت پایین‌تر نسبت به مرجع ارائه می‌دهد.

در مجموع، مشاهده می‌شود که اگرچه ادبیات قیمت‌گذاری با اثر قیمت مرجع به بلوغ قابل توجهی رسیده -به‌ویژه در مدل‌سازی تفاوت قیمت واقعی و قیمت مرجع- اما دو شکاف روشن باقی‌مانده است: (۱) اکثر مدل‌ها تابع تقاضا را خطی نگه داشته‌اند، و رفتارهای شناختی غیرخطی یا اثرات پیچیده‌تر قیمت مرجع به‌ندرت بررسی شده‌اند؛ (۲) هیچ یک از پژوهش‌ها قیمت مرجع و فروش چندکاناله را با فناوری‌های هوشمند که می‌تواند با تبلیغات هدفمند ارزش ادراک‌شده مشتری را افزایش دهد، به‌صورت همزمان ترکیب نکرده‌اند. بنابراین، پژوهش حاضر می‌تواند با ادبیات قیمت‌گذاری با حضور اثر قیمت مرجع را با طراحی یک تابع تقاضای جامع (خطی یا غیرخطی) مبتنی بر اثرات رفتاری و نیز ترکیب قیمت مرجع با فناوری‌های هوشمند، شکاف‌های اصلی ادبیات را پر کند.

## ۲-۲. مطالعات مرتبط با اینترنت اشیا و بلاکچین

گسترش فناوری‌های هوشمند و داده‌محور، آن‌ها را به ابزارهای کلیدی در مدیریت زنجیره تأمین و تصمیمات بازاریابی تبدیل کرده است. این فناوری‌های با فراهم‌سازی امکان ردیابی لحظه‌ای کالا، جمع‌آوری

ساختار چندکاناله و فناوری‌های هوشمند را در یک مدل واحد بررسی کند، هنوز کمیاب است. در این بخش ادبیات در دو زیرگروه اصلی ارائه می‌شود: بخش اول به مطالعات قیمت‌گذاری با در نظر گرفتن اثر قیمت مرجع پرداخته و در بخش دوم پژوهش‌هایی که بر نقش فناوری‌های هوشمند مانند اینترنت اشیا و بلاکچین در مدیریت زنجیره تأمین متمرکز بوده‌اند، بررسی می‌شوند. در پایان نیز شکاف‌های تحقیقاتی استخراج و جایگاه پژوهش نسبت به مطالعات پیشین تبیین می‌گردد.

## ۱-۲. مطالعات مرتبط با رفتار مشتری و قیمت مرجع

ادبیات قیمت‌گذاری با اثر قیمت مرجع نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها قیمت مرجع را به‌عنوان یک عنصر رفتاری تعیین‌کننده در مطلوبیت مصرف‌کننده و در نتیجه در تابع تقاضا در نظر گرفته‌اند. در اغلب این مدل‌ها، قیمت مرجع ممکن است از تاریخچه قیمت، تبلیغات، یا کیفیت ادراک شده کالا تعیین شده باشد. برای مثال، در مطالعه ما و هو [۶] قیمت مرجع به‌طور پویا از مسیر اعتبار برند و بازاریابی داده محور شکل می‌گیرد و به‌عنوان پایه مقایسه ذهنی مشتری در تصمیم خرید وارد می‌شود؛ زمانی که قیمت واقعی کمتر از قیمت مرجع باشد، مطلوبیت افزایش یافته و تقاضا بالا می‌رود. این ساختار تقریباً در اکثر مدل‌ها نیز مشاهده می‌شود، اگرچه شدت اثر و نحوه ورود اثر قیمت مرجع در مدل‌ها متفاوت است [۸،۹،۱۰،۱۱]. در مجموع، همه مقالات بهره‌برداری از قیمت مرجع را به‌عنوان یک محرک رفتاری تقاضا پذیرفته‌اند، اما سازوکار ایجاد آن در هر مطالعه متفاوت است. برخی پژوهش‌ها نیز بر تنوع مشتریان و ناهمگن بودن بازار تمرکز کردند. به‌عنوان نمونه، ستونه و همکاران [۱۲] یک مدل ریاضی دو دوره‌ای برای بهینه‌سازی همزمان قیمت‌گذاری و سطح نوآوری محصول در حضور مشتریان استراتژیک و نزدیک‌بین و سیاست مبادله محصول قدیم با جدید ارائه کردند. ایده اصلی مقاله در ترکیب قیمت‌گذاری پویا و ناهمگنی رفتاری مشتریان در یک چارچوب دو دوره‌ای است. این نوع چارچوب‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد چگونه می‌توان رفتار خرید ناهمگن و سیاست‌های مدیریتی را به‌صورت یکپارچه وارد تصمیمات قیمت‌گذاری کرد.

در ارتباط با ساختار تابع تقاضا، اکثر مقالات از تقاضای خطی استفاده کرده‌اند و قیمت مرجع به‌عنوان یک عامل افزایشی یا کاهش‌ی در مطلوبیت مشتری وارد آن شده است. تقاضا معمولاً به‌صورت تفاوت قیمت فروش و قیمت مرجع مدل می‌شود، یعنی هرچه قیمت فروش کمتر از قیمت مرجع باشد، مصرف‌کننده سود ادراک شده بیشتری تجربه کرده و احتمال خرید افزایش می‌یابد [۱۰،۱۱]. در مدل چن و همکاران [۱۳] نیز قیمت مرجع و قیمت فروش در قالب یک رابطه تفاضلی در تصمیم خرید ظاهر می‌شوند که میان قیمت مرجع و قیمت فروش همبستگی معناداری ایجاد می‌کند. دبو و همکاران [۵] ساختاری را در نظر گرفتند که می‌تواند خطی، مقعر و یا محدب باشد و مسأله انتخاب فناوری و قیمت‌گذاری برای محصول بازتولید و در کنار قیمت‌گذاری محصولات جدید را بر این اساس حل کردند. وی و لی [۱۴] هم تقاضا را به‌عنوان یک متغیر درون‌زا در مسأله چندکاناله با

داده های محیطی و تحلیل بلادرنگ آن ها، موجب افزایش شفافیت و کاهش ریسک عملیاتی شده اند. همچنین این قابلیت ها بستر مناسبی برای درک بهتر رفتار مشتری و استراتژی های قیمت گذاری هوشمند را فراهم می کنند. گروه دوم مطالعات به بررسی تأثیر فناوری های نوین، به ویژه اینترنت اشیا و بلاکچین، بر تصمیمات قیمت گذاری در زنجیره تأمین اختصاص دارد.

فناوری های هوشمندی مانند بلاکچین و اینترنت اشیا در ادبیات برنامه ریزی زنجیره تأمین و قیمت گذاری، عمدتاً برای «قابل مشاهده و قابل اعتماد کردن اطلاعات» به کار رفته اند؛ یعنی اطلاعاتی همچون کیفیت، منشأ، تازگی، و رفتار مشتری را از حالت مبهم خارج کرده و به داده های قابل استفاده تبدیل می کنند. نتیجه این کار، در سطح بازار گاهی به افزایش تقاضا از مسیر پایش کیفیت [۳، ۱۹]، شفافیت و اعتماد [۲۰، ۲۱، ۲۲]، بهبود عملکرد سیستم در حوزه های نگهداری و تولید مبتنی بر شرایط [۲۳] و گاهی تقویت اثر شبکه ای منجر می شود [۲۴]. همچنین فناوری می تواند منجر به نوآوری [۲] و یا ایجاد ارزش افزوده در محصول شود [۲۵] و یا از طریق افزایش ارزش ادراک شده باعث افزایش تمایل به پرداخت [۲۶] و شکل گیری قیمت افزوده [۲۷] در مشتریان گردد.

از منظر تصمیم گیری عملیاتی و قیمت گذاری، داده های لحظه ای و ردیابی معتبر، زمینه را برای قیمت گذاری مبتنی بر کیفیت متغیر در زمان فراهم می کنند؛ یعنی وقتی کیفیت/تازگی در طول زمان افت می کند، فناوری امکان مشاهده این تغییر و تنظیم سیاست قیمت و عرضه را ایجاد می کند [۲۱، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱]. علاوه بر این، در اقتصاد چرخشی، پایش دوام و کیفیت به کنترل نرخ بازگشت و بهینه سازی تصمیمات حلقه بسته کمک می کند [۳۲]. در مدل های بازار محور نیز فناوری با فراهم کردن زیرساخت تبادل سریع اطلاعات، توسعه بازارهای لحظه ای و سازوکارهای جدید خرید/فروش را پشتیبانی می کند [۳۳]. به علاوه، زیرساخت های اطلاعاتی مبتنی بر فناوری می توانند دسته بندی مشتریان و در نتیجه قیمت گذاری تفکیکی را امکان پذیر کنند [۳۴] و یا بستری مناسب برای تأمین داده های مورد نیاز ایجاد نمایند [۳۵، ۳۶]. برخی مطالعات نیز از فناوری های نوین برای ایجاد خدمات ارزش افزوده لجستیکی و دیجیتالی مبتنی بر ردیابی استفاده کرده اند [۲۲، ۳۷].

از نظر مدل سازی، مطالعات نشان می دهد در برخی پژوهش ها فناوری های هوشمند صرفاً به عنوان زیرساخت اطلاعاتی یا سناریوی مقایسه ای در مدل ها ظاهر می شوند و هیچ پارامتر یا متغیر تصمیم مستقلی به آن ها اختصاص داده نمی شود. در این مطالعات، فناوری شرط لازم برای پایش کیفیت، شفافیت یا گردآوری داده ها است و امکان مشاهده و استفاده از آن ها را فراهم می کند، بدون آن که خود وارد مسأله بهینه سازی شود و تصمیم گیری مستقیماً بر متغیرهای عملیاتی یا قیمتی آن انجام می شود [۲۵، ۲۸، ۲۹، ۳۱، ۳۳، ۳۶]. در مقابل، برخی مطالعات با اینکه فناوری های هوشمند را همچنان به عنوان متغیر

تصمیم مستقیم در نظر نگرفته اند، اما پارامترهایی مرتبط با فناوری را در مدل لحاظ نمودند که باعث می شود استفاده از فناوری به طور غیرمستقیم بر تصمیمات اصلی زنجیره اثر بگذارد. این پارامترها شامل ضریب اثر فناوری بر تقاضا، ترجیح ردیابی مشتری، شدت اعتماد، کاهش نرخ افت کیفیت، یا هزینه های اطلاعاتی هستند [۳، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۷، ۲۹، ۳۲، ۳۴، ۳۵]. در این مقالات، فناوری ساختار اطلاعاتی مسأله را تغییر می دهد و از طریق تغییر پارامترها، سیاست های بهینه قیمت گذاری، تلاش کیفیت، کاهش انتشار یا بازگشت محصول را تحت تأثیر قرار می دهد، بدون آنکه درباره فناوری تصمیم گیری توسط مدل انجام شود. در نهایت، گروه سوم مقالات فناوری های هوشمند را نه تنها به عنوان زیرساخت و منبع پارامتر، بلکه به عنوان متغیر تصمیم مستقیم وارد مدل می کنند که در آن سطح دیجیتال سازی، میزان نوآوری محصول، شدت سرمایه گذاری فناورانه، ارائه خدمات دیجیتال و ... باید بهینه سازی شود. در این دسته، تصمیم درباره فناوری که معمولاً با هزینه های محذب همراه است در کنار سایر تصمیمات اتخاذ می شود [۲، ۲۰، ۲۴، ۲۶، ۳۷]. این رویکرد نشان دهنده رشد مدل سازی فناوری هوشمند در ادبیات است، به طوری که فناوری از یک ابزار پشتیبان اطلاعاتی به یک تصمیم استراتژیک هم سطح قیمت گذاری و طراحی زنجیره ارتقا می یابد.

ارزیابی پژوهش ها در حوزه رفتار مشتری نشان می دهد در بخشی از ادبیات، فناوری های هوشمند بر رفتار مشتری یا بهبود تابع تقاضا وارد نمی شوند و نقش آن ها صرفاً به جمع آوری/ثبت اطلاعات محدود می ماند. حتی اگر تقاضا به کیفیت یا قیمت مرجع وابسته باشد، این وابستگی از طریق پارامترهای فیزیکی/بازاری مدل می شود و فناوری صرفاً امکان مشاهده آن ها را فراهم می سازد [۲۸، ۲۹، ۳۱]. در دسته دیگر مطالعات، فناوری های هوشمند به صورت پارامتر یا متغیر تصمیم در تابع تقاضا وارد می شوند و به عنوان عاملی برای افزایش سهم بازار یا بهبود تقاضا در نظر گرفته می شوند. برای مثال، یان و همکاران [۱۹] نشان می دهند اینترنت اشیا از طریق پایش کیفیت و افزایش شفافیت اطلاعات، به صورت پارامتری تقاضا را تقویت می کند. پن و همکاران [۲] سطح نوآوری مبتنی بر فناوری هوشمند را مستقیماً در تابع تقاضا لحاظ کرده و اثر آن را بر سیاست های قیمت گذاری بررسی می کند. به طور مشابه، دی و همکاران [۳۰] و جنا و همکاران [۲۰] دیجیتال سازی/بلاکچین را به عنوان محرک های افزایش تقاضا مدل سازی کرده اند که از مسیر پارامترهای مرتبط با فناوری، اندازه بازار را جابجا می کند.

در پژوهش های محدودی، تمرکز اصلی بر این است که فناوری های هوشمند می توانند ارزش ادراک شده مشتری را افزایش داده و در نتیجه تمایل به پرداخت بالاتر یا قیمت افزوده ایجاد کنند. ژانگ و یو [۲۶] نشان می دهند فناوری/اطلاعات با افزایش ارزش محصول در ذهن مشتری، آمادگی پرداخت را بالا می برد و این موضوع در سیاست قیمت گذاری منعکس می شود. ژائو و لی [۲۷] نیز استدلال می کنند بلاکچین و قابلیت ردیابی باعث ایجاد قیمت افزوده می شود، زیرا

مشتری برای اطلاعات معتبر و اعتماد پذیر حاضر به پرداخت بیشتر است.

با وجود تفاوت در نحوه ورود فناوری‌های هوشمند به مدل‌ها، نقطه ضعف مشترک اغلب این مطالعات آن است که تابع تقاضا به صورت خطی و در نتیجه حساسیت قیمتی مشتریان را یکنواخت در نظر گرفته‌اند و اثر فناوری معمولاً به شکل یک جمله افزایشی در تقاضا یا ارزش ادراک شده ظاهر می‌گردد. این در حالی است که مشتریان می‌توانند به شکل‌های متفاوتی به تغییرات قیمت واکنش نشان دهند (مثلاً حساسیت بالا حتی در قیمت‌های پایین). این ساده‌سازی رفتاری، یکی از خلأهای مهم ادبیات در تبیین تعامل فناوری هوشمند، رفتار مشتری و تصمیمات قیمت‌گذاری محسوب می‌شود و انگیزه‌ای برای توسعه مدل‌های مبتنی بر تقاضای غیرخطی فراهم می‌کند.

در نهایت، در برخی از مطالعات اخیر، فروش چندکاناله در کنار فناوری‌های هوشمند مدل‌سازی شده است. برای مثال، هه و همکاران [۳۴] با بررسی ساختارهای مختلف کانالی در یک پلتفرم مبتنی بر بلاکچین نشان می‌دهند که فناوری هوشمند با کاهش عدم تقارن اطلاعاتی و امکان دسته‌بندی مشتریان، می‌تواند تعارض کانالی را کاهش داده و قیمت‌گذاری تفکیکی را در کانال‌های مختلف تسهیل کند. وانگ و همکاران [۲۱] نیز در یک چارچوب دوکاناله نشان می‌دهند که فناوری‌های ردیابی و بلاکچین با بهبود شفافیت و اعتماد، تخصیص تقاضا بین کانال‌ها را کاراتر کرده و منجر به افزایش سود کل زنجیره می‌شوند. به‌طور مشابه، ژائو و لی [۲۷] نشان می‌دهند که در حضور محصولات قابل ردیابی، فروش چندکاناله امکان استخراج قیمت افزوده در یک کانال و جذب مشتریان حساس به قیمت در کانال دیگر را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، فروش چندکاناله در حضور فناوری‌های هوشمند می‌تواند از طریق تفکیک بهتر مشتریان، کاهش تعارض کانالی، و بهره‌برداری مؤثرتر از اطلاعات، مزیت رقابتی و سودآوری بالاتری برای زنجیره تأمین ایجاد کند.

## ۲-۳. جمع‌بندی و شکاف‌های تحقیقاتی

بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های قیمت‌گذاری با در نظر گرفتن اثر قیمت مرجع اغلب بر رفتار یکنواخت مشتریان و مقایسه کانال‌های مختلف فروش تمرکز کرده‌اند، اما فناوری را به‌عنوان محرک قیمت مرجع و مؤثر بر تقاضا در قالب شکل کلی آن در نظر نگرفته‌اند. از سوی دیگر، مطالعات فناوری عمدتاً بر کارایی عملیاتی، رهگیری، کاهش هزینه یا بهبود کیفیت با تقاضای پارامتری یا خطی پرداخته‌اند و کمتر اثر مستقیم اینترنت اشیا بر ارزش ادراک شده یا قیمت مرجع را بررسی کرده‌اند.

باهدف روشن‌سازی این شکاف‌ها، مقایسه نظام‌مند ادبیات موجود در جدول (۱) ارائه شده است. این جدول تلاش می‌کند نشان دهد هر مطالعه کدام بعد از ابعاد کلیدی قیمت مرجع، فروش چندکاناله، شکل تابع تقاضا و فناوری‌های هوشمند را پوشش داده‌اند و شکاف‌های اصلی در کدام نقاط رخ داده‌اند و چگونه پژوهش حاضر این شکاف‌ها را به‌صورت ساختاری رفع می‌کند. این مقایسه ضرورت توسعه مدلی

یکپارچه را بیش‌ازپیش برجسته کرده و زمینه را برای معرفی نوآوری پژوهش فراهم می‌کند.

بررسی مقالات و جدول (۱) نشان می‌دهد اگرچه ادبیات موجود به‌طور جداگانه در حوزه‌های رفتار مشتری، قیمت مرجع، فروش چندکاناله و فناوری‌های هوشمند رشد قابل توجهی داشته است، اما چند شکاف کلیدی همچنان باقی است که نوآوری‌های پژوهش حاضر براساس این شکاف‌ها تعریف شده است:

۱. به‌جز پژوهش ژانگ و یو [۲۶]، هیچ پژوهشی اثر تصمیمات سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا را بر قیمت مرجع بررسی نکرده است. با این وجود، در مقاله اشاره شده تقاضا یک پارامتر ورودی است، در حالی که شواهد تجربی نشان می‌دهد اینترنت اشیا می‌تواند منجر به افزایش قیمت مرجع و در نتیجه افزایش تقاضا شود. بنابراین ورود همزمان اینترنت اشیا، قیمت مرجع و تقاضای وابسته به آن‌ها در یک مدل ساختاری برای تصمیم‌سازی صحیح ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس مدل‌سازی اثر سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا بر قیمت مرجع و تقاضا به‌صورت همزمان در این پژوهش یک حلقه بازخورد رفتاری-فناورانه ایجاد می‌کند که در اکثر مطالعات پیشین مغفول مانده است.
۲. تقریباً اکثر مطالعات قیمت‌گذاری در حضور قیمت مرجع (به‌جز دبو و همکاران [۵]) یا فناوری‌های هوشمند، تابع تقاضا را خطی فرض کرده‌اند. این در حالی است که تحقیقات نظری و عملی نشان می‌دهد رفتار مشتری می‌تواند غیرخطی، مقعر یا حتی محدب باشد و به شرایط بازار، شدت رقابت و ارزش ادراک شده وابسته است. بنابراین توسعه مدل‌های پیشنهادی براساس یک تابع تقاضای کلی برای تحلیل رفتار مشتری در سه شکل خطی، مقعر و محدب امکان تغییر شکل تقاضا میان حالت‌های مختلف و تحلیل دقیق‌تر پدیده‌های رفتاری را امکان‌پذیر نموده و پژوهش حاضر را از بسیاری از مدل‌های قیمت‌گذاری کلاسیک متمایز می‌کند.

۳. پژوهش‌های معدودی به‌صورت همزمان فروش چندکاناله و اثر قیمت مرجع را بررسی کرده‌اند اما هیچ یک به‌صورت همزمان این دو ویژگی را در کنار اثر فناوری‌های هوشمند و رفتار متفاوت مشتری در نظر نگرفته‌اند. ارائه چارچوبی که در آن «فروش چندکاناله»، «قیمت مرجع»، «سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا» و «شکل کلی تابع تقاضا» به‌طور همزمان تحلیل شوند، پژوهش حاضر را در جایگاهی منحصربه‌فرد قرار می‌دهد که می‌تواند برای تعیین سیاست‌های قیمت‌گذاری، سرمایه‌گذاری در فناوری و مدیریت کانال‌های فروش در بازارهای مختلف با رفتار متفاوت مشتریان کاربرد داشته باشد.

درواقع، نوآوری اصلی این پژوهش توسعه یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل همزمان چهار مؤلفه قیمت مرجع، ساختار کلی تابع تقاضا، سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا و فروش چندکاناله است. در حالی که در اغلب مطالعات پیشین، تقاضا به‌صورت خطی یا پارامتری فرض شده است، مقاله حاضر از یک چارچوب تابع تقاضای کلی ارائه شده در مطالعه دبو و همکاران [۵] استفاده می‌کند که می‌تواند رفتارهای خطی، مقعر یا محدب مشتریان را پوشش دهد.

زنجیره و مقایسه کارایی ساختارها در حضور اینترنت اشیاء و قیمت مرجع را فراهم می سازد. همچنین ارائه رویکرد حل تحلیلی- عددی برای حل کارای مدل های پیشنهادی در حالت های مختلف از دیگر نقاط برجسته پژوهش حاضر است.

### ۳. بیان مسئله و مدل سازی

زنجیره مورد مطالعه در این پژوهش شامل یک تولیدکننده است که محصولات خود را از طریق کانال آنلاین به فروش می رساند. به علاوه، تولیدکننده می تواند برای توسعه بازار از ظرفیت فروش آفلاین (خرده فروشی) نیز استفاده کند. وجود خرده فروشی و کانال فروش آفلاین به ویژه زمانی ضرورت دارد که بازار شامل مشتریان سنتی باشد که تمایل یا امکان خرید اینترنتی ندارند. بازار مورد مطالعه ناهمگن بوده و از مشتریانی تشکیل شده است که سطوح متفاوتی از تمایل به پرداخت (قیمت مرجع) دارند. همچنین فرض شده گروهی از مشتریان صرفاً تمایل به خرید از خرده فروشی دارند و در صورت عدم امکان خرید حضوری از بازار هدف حذف می شوند.

همان طور که بیان شد، یکی از راهکارهای افزایش تقاضا و ایجاد پویایی در تصمیم گیری، سرمایه گذاری در فناوری اینترنت اشیاء است. مطابق انتظار، رابطه بین سطح سرمایه گذاری اینترنت اشیاء و تمایل به پرداخت مشتریان صعودی است و افزایش سرمایه گذاری به جذب مشتریان با سطوح بالاتر تمایل به پرداخت منجر می شود. به کارگیری اینترنت اشیاء به صورت پیشنهاددهی هوشمند و تبلیغات هدفمند موجب افزایش ادراک ارزش محصول و تقویت تمایل مشتریان به خرید می شود [۷]. با این حال، در مدل پیشنهادی سرمایه گذاری در اینترنت اشیاء یک متغیر تصمیم است و هزینه های مربوط به پیاده سازی آن در تابع سود زنجیره تأمین لحاظ شده است. بنابراین، در شرایطی که منافع ناشی از افزایش تقاضا نتواند هزینه های فناوری را جبران کند، مقدار بهینه سرمایه گذاری در اینترنت اشیاء به صفر میل خواهد کرد. بدین ترتیب، مدل الزاماً سرمایه گذاری در اینترنت اشیاء را در همه شرایط مطلوب فرض نمی کند، بلکه سطح بهینه آن را براساس موازنه هزینه و منفعت تعیین می کند. در صورت استفاده از ظرفیت فروش آفلاین، خرده فروش نیز ممکن است در این سرمایه گذاری مشارکت داشته باشد که این موضوع باید در تصمیم گیری ها لحاظ گردد.

بر این اساس، پژوهش حاضر به دنبال تعیین استراتژی بهینه قیمت گذاری و سرمایه گذاری فناوری در سه سناریوی تصمیم گیری است: سناریوی اول فروش آنلاین توسط تولیدکننده را با اتکا بر خدمات مبتنی بر اینترنت اشیاء در بازار هدف، بررسی می کند. سناریوی دوم فروش با ساختار متمرکز از طریق هر دو کانال در آن تولیدکننده و خرده فروش با ساختاری متمرکز عمل می کنند و تصمیمات را به صورت هماهنگ اتخاذ می کنند، ارزیابی می کند. سناریوی سوم نیز فروش دوکاناله در ساختار غیرمتمرکز که در آن تولیدکننده و خرده فروش به صورت مستقل عمل کرده و تعاملات بین آن ها در چارچوب قیمت عمده فروشی مدل می شود، را در نظر می گیرد. در این ساختار، میزان

جدول (۱). خلاصه مطالعات در حوزه قیمت گذاری، اثر قیمت مرجع و

| فناوری هوشمند          |           |        |           |
|------------------------|-----------|--------|-----------|
| تابع تقاضا             | قیمت مرجع | فناوری | چندکاناله |
| چن و بل [۱]            | L         | *      | *         |
| پن و همکاران [۲]       | L         | *      |           |
| لیو و همکاران [۳]      | L         | *      |           |
| دبو و همکاران [۵]      | L / NL    | *      |           |
| ما و هو [۶]            | L         | *      |           |
| لینگ و شو [۸]          | L         | *      |           |
| شو و همکاران [۹]       | L         | *      |           |
| ژانگ و ژانگ [۱۰]       | L         | *      |           |
| چنگ و وانگ [۱۱]        | L         | *      |           |
| چن و همکاران [۱۳]      | L         | *      |           |
| وی و لی [۱۴]           | P         | *      | *         |
| ژانگ و همکاران [۱۷]    | L         | *      | *         |
| دای و همکاران [۱۸]     | L         | *      | *         |
| یان و همکاران [۱۹]     | L         | *      |           |
| جنا و سینقال [۲۰]      | L         | *      |           |
| وانگ و همکاران [۲۱]    | L         | *      | *         |
| شیا و همکاران [۲۲]     | L         | *      |           |
| یانگ و پن [۲۴]         | L         | *      |           |
| ژانگ و ژانگ [۲۵]       | L         | *      |           |
| ژانگ و یو [۲۶]         | P         | *      |           |
| ژائو و لی [۲۷]         | L         | *      | *         |
| بهرون و همکاران [۲۸]   | L         | *      |           |
| بن دایا و همکاران [۲۹] | L         | *      |           |
| دی و همکاران [۳۰]      | L         | *      |           |
| هسینی و همکاران [۳۱]   | L         | *      |           |
| دی جیووانی [۳۲]        | NL        | *      |           |
| ما و همکاران [۳۳]      | P         | *      |           |
| هه و همکاران [۳۴]      | L         | *      | *         |
| یه و همکاران [۳۵]      | L         | *      |           |
| نوذری و همکاران [۳۶]   | *         | *      |           |
| ژانگ و لیو [۳۷]        | P         | *      |           |
| پژوهش حاضر             | L / NL    | *      | *         |

\*حروف اختصاری L و NL و P به ترتیب نشان دهنده تقاضا به صورت تابع خطی، تابع غیرخطی و پارامتر هستند.

تمایز دیگر پژوهش حاضر در آن است که اینترنت اشیاء به عنوان محرک ادراک ارزش و در نتیجه قیمت مرجع مشتری وارد مدل شده و بدین ترتیب یک حلقه بازخورد میان سرمایه گذاری در فناوری، قیمت مرجع و سطح تقاضا ایجاد می شود. به علاوه، این تعاملات در بستر یک سیستم فروش چندکاناله مورد تحلیل قرار می گیرد که امکان بررسی تصمیمات قیمت گذاری در حضور فناوری های هوشمند را در شرایطی واقع بینانه تر فراهم می سازد. در نظر گرفتن ساختارهای مختلف تصمیم گیری زنجیره تأمین در مسئله پیشنهادی امکان مطالعه رفتار اعضای

|                  |                     |
|------------------|---------------------|
| $d_n(p_n, \rho)$ | تابع تقاضای آنلاین  |
| $d_r(p_r, \rho)$ | تابع تقاضای آفلاین  |
| $\Pi_M$          | تابع سود تولیدکننده |
| $\Pi_R$          | تابع سود خرده‌فروش  |
| $\Pi_{SC}$       | تابع سود کل زنجیره  |

علامت‌های اختصاری (سناریوها)

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| $S_1$ | فروش آنلاین                              |
| $S_2$ | فروش آنلاین و آفلاین با ساختار متمرکز    |
| $S_3$ | فروش آنلاین و آفلاین با ساختار غیرمتمرکز |

لازم به ذکر است که متغیرهای نسبتی یا رفتاری شامل  $(\theta, \gamma)$

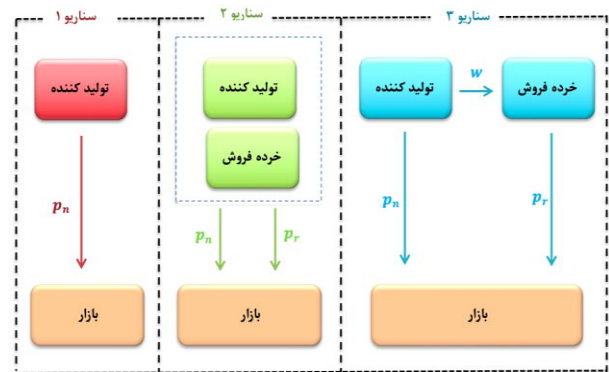
$\alpha, \eta$  و  $k$  به صورت بدون واحد یا درصدی در مدل لحاظ می‌شوند.

### ۲-۳. ساختار تابع تقاضا

ساختار تابع تقاضای پیشنهادی در این پژوهش که مبتنی بر تمایل به پرداخت مشتریان و رفتار آن‌ها نسبت به تغییرات قیمتی است، براساس مدل دبو و همکاران [۵] و با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا توسعه یافته است. در این مدل، تمایل به پرداخت مشتریان  $(v)$  براساس تابع توزیع تجمعی  $F(v)$  در بازه  $[0, 1]$  توزیع شده است، به طوری که  $F(v)$  نشان‌دهنده مجموع مشتریانی است که تمایل به پرداخت آن‌ها در بازه  $[0, v]$  قرار دارد. این تابع، اکیداً صعودی و پیوسته است و داریم  $F(0) = 0$  و  $F(1) = 1$ . بر این اساس تقاضا برای محصولی با قیمت  $v$  معادل  $1 - F(v)$ ، یعنی تعداد مشتریانی که تمایل به پرداخت آن‌ها حداقل  $v$  باشد  $[v, 1]$ ، خواهد بود. علاوه بر قیمت مرجع، بازارهای مختلف از نظر تمرکز مصرف‌کنندگان در سطوح یکسان  $v$  نیز متفاوت هستند. بر این اساس، نویسندگان یک ساختار کلی برای تابع توزیع تجمعی به صورت  $F(v) = 1 - (1 - v)^k$  و تابع چگالی  $f(v) = k(1 - v)^{k-1}$  ارائه کرده‌اند که در آن  $k \in (0, \infty)$  پارامتر شکل تابع تقاضا است. در حالت خاص  $k = 1$ ، تابع  $F$  به یک توزیع یکنواخت روی  $[0, 1]$  تبدیل می‌شود که در ادبیات تقسیم‌بندی بازار به طور گسترده استفاده شده است [۵].

شکل (۳) نمودار تقاضا بر حسب  $v$  یعنی  $1 - F(v) = (1 - v)^k$  را برای مقادیر مختلف  $k$  نشان می‌دهد. این پارامتر می‌تواند براساس نوع محصول (اساسی یا لوکس) یا نوع مشتری (رده بالا یا رده پایین) تعیین شود [۵]. مشاهده می‌شود، با افزایش  $k$  حساسیت مشتری به قیمت افزایش می‌یابد. برای مقادیر  $k > 1$ ، تقاضا با شیب بیشتری نسبت به قیمت کاهش یافته و شکل تابع تقاضا محدب است. برای مقادیر  $k < 1$ ، کاهش تقاضا نسبت به قیمت از شیب کمتری برخوردار بوده و شکل تابع تقاضا مقعر است. در حالت خاص  $k = 1$ ، کاهش تقاضا نسبت به قیمت دارای شیب یکنواخت است که منجر به تابع تقاضای خطی می‌شود. با به کارگیری این ساختار کلی برای تابع تقاضا می‌توان دو ویژگی مهم در رفتار خرید مشتریان (قیمت مرجع و حساسیت به قیمت) را در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ نمود.

مشارکت خرده‌فروش در هزینه‌های سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا نیز لحاظ می‌گردد. هدف حداکثرسازی سود اعضای زنجیره است و چارچوب ارائه شده می‌تواند به زنجیره کمک کند تا با انتخاب ساختار مناسب فروش و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، عملکرد اقتصادی خود را در شرایط ناپایدار محیطی و بازارهای ناهمگن بهبود بخشد. شکل (۲) ساختار مسأله مورد بررسی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۲). ساختار مسأله مورد بررسی در سناریوهای مختلف

در ادامه، ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی و ساختار تابع تقاضا با در نظر گرفتن دو ویژگی اصلی رفتار خرید مشتریان (قیمت مرجع و حساسیت به قیمت) و سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا تشریح می‌شود. سپس مفروضات اصلی مسأله بیان شده و مدل نهایی مسأله تحت سناریوهای مختلف ارائه خواهد شد.

### ۳-۱. نمادها

علائم مورد استفاده در این مقاله عبارتند از :

#### پارامترها

|          |                                                    |
|----------|----------------------------------------------------|
| $c_m$    | هزینه تولید هر واحد محصول (واحد پولی)              |
| $c_n$    | هزینه لجستیک هر واحد فروش آنلاین (واحد پولی)       |
| $c_r$    | هزینه لجستیک هر واحد فروش آفلاین (واحد پولی)       |
| $\eta$   | ضریب شدت هزینه اینترنت اشیا                        |
| $\alpha$ | ضریب اثر اینترنت اشیا بر قیمت مرجع                 |
| $\gamma$ | درصد مشتریان سنتی                                  |
| $v$      | قیمت مرجع (واحد پولی)                              |
| $k$      | پارامتر شکل تابع تقاضا                             |
| $D^0$    | تقاضای پایه (وزن)                                  |
| $\theta$ | درصد مشارکت خرده‌فروش در سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا |

#### متغیرهای تصمیم

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| $p_n$  | قیمت فروش آنلاین (واحد پولی)                |
| $p_r$  | قیمت فروش آفلاین (واحد پولی)                |
| $w$    | قیمت عمده‌فروشی (واحد پولی)                 |
| $\rho$ | میزان سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا (واحد پولی) |

#### توابع مطلوبیت، تقاضا و سود

|          |                                   |
|----------|-----------------------------------|
| $U_n(v)$ | تابع مطلوبیت مشتری در خرید آنلاین |
| $U_r(v)$ | تابع مطلوبیت مشتری در خرید آفلاین |

### ۳-۳. مفروضات

با توجه به مطالب ذکر شده برخی از مهم‌ترین فرضیات مدل‌سازی ریاضی عبارتند از:

- (۱) تابع توزیع تجمعی تمایل به پرداخت مشتریان از رابطه  $F(v) = (1-v)^k$  پیروی می‌کند که در آن  $k > 0$  پارامتر شکل تابع تقاضا و بیانگر حساسیت بازار نسبت به تغییرات قیمت است.
- (۲) شرط نامنفی بودن تقاضا در کانال‌های فروش عبارت است از:  $0 \leq p_r - \alpha\rho \leq 1$  و  $p_n - \alpha\rho \leq 1$ .
- (۳) مشتریان سنتی فقط از خرده‌فروشی و به‌صورت آفلاین خرید می‌کنند و سایر مشتریان با فرض  $p_r \geq p_n$  خرید خود را به‌صورت آنلاین انجام می‌دهند.

(۴) حاشیه سود تولیدکننده در فروش آنلاین  $p_n - c_m - c_n$  و در فروش آفلاین  $w - c_m$  است. حاشیه سود خرده‌فروش نیز در ساختار متمرکز  $p_r - c_m - c_r$  و در ساختار غیرمتمرکز  $p_r - c_r - w$  است.

(۵) تابع هزینه سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا تابعی محدب از مقدار سرمایه‌گذاری  $\rho$  به‌صورت  $C(\rho) = \frac{1}{\gamma}\eta\rho^2$  در نظر گرفته می‌شود که در ادبیات رایج است. هزینه فناوری‌ها و خدمات خاص و هزینه خدمات نرم‌افزاری با توجه به کیفیت خدمات به شکل تابع محدب مدل می‌شود [۲۶].

(۶) در سناریوی فروش دوکاناله با ساختار غیرمتمرکز خرده‌فروش به‌اندازه  $\theta$  در هزینه اینترنت اشیا سهیم می‌شود. در این صورت سهم تولیدکننده  $(1-\theta)C(\rho)$  و سهم خرده‌فروش  $\theta C(\rho)$  خواهد بود.

### ۳-۴. مدل‌سازی

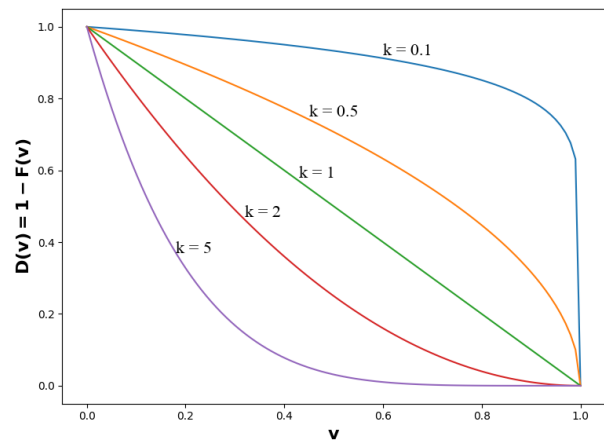
در این بخش مسأله پیشنهادی تحت سه سناریوی مختلف (فقط فروش آنلاین، فروش دوکاناله با ساختار متمرکز و فروش دوکاناله با ساختار غیرمتمرکز) بررسی و پس از تجزیه و تحلیل با هم مقایسه می‌شوند.

#### ۳-۴-۱. فروش آنلاین

در سناریوی اول، تنها کانال فروش آنلاین از سوی تولیدکننده برقرار است. بنابراین، مشتریان سنتی به دلیل عدم امکان خرید حضوری، از بازار حذف می‌شوند و تنها مشتریان منعطف بازار هدف تولیدکننده هستند. تولیدکننده سطح قیمت آنلاین و سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که سودش حداکثر شود. با توجه به تابع تقاضای فروش آنلاین و حاشیه سود تولیدکننده، تابع سود کل تولیدکننده به‌صورت رابطه (۱۱) است:

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_M^S(p_n, \rho) = & (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma) D^0 [1 - p_n + \alpha\rho]^k \\ & - \frac{1}{\gamma} \eta \rho^2 \end{aligned} \quad (11)$$

گزاره ۱. در سناریو فروش تک‌کاناله یک نقطه داخلی کاندید بهینگی برای سود تولیدکننده از روابط (۱۲) و (۱۳) به‌دست می‌آید اگر شرط



شکل (۳). تابع  $(1-v)^k$  به ازای مقادیر  $k = 0.1, 0.5, 1, 2, 5$

پیش‌تر ذکر شد که سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا می‌تواند محصول را در نگاه مشتری ارزشمندتر کند و در نهایت منجر به افزایش سهم بازار شود. براساس ژانگ و یو [۲۶] اینترنت اشیا به‌صورت خطی و براساس رابطه زیر تمایل به پرداخت مشتری برای یک محصول خاص را افزایش می‌دهد:

$$v' = v + \alpha\rho \quad (1)$$

تقاضای محصول در کانال‌های آنلاین و آفلاین براساس حداکثرسازی مطلوبیت مشتریان تعیین می‌شود. مطلوبیت مشتری با تمایل به پرداخت  $v$  برای خرید از کانال‌های آنلاین و آفلاین به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_n(v) = (v + \alpha\rho) - p_n \quad (2)$$

$$U_r(v) = (v + \alpha\rho) - p_r \quad (3)$$

مشتریان سنتی فقط به‌صورت آفلاین و زمانی اقدام به خرید می‌کنند که  $U_r \geq 0$  باشد:

$$U_r \geq 0 \Rightarrow v \geq p_r - \alpha\rho \quad (4)$$

سایر مشتریان که ما آن‌ها را مشتریان منعطف می‌نامیم، قیمت‌های دو کانال را مقایسه کرده و اگر  $U_n \geq U_r$  و  $U_n \geq 0$  باشد از کانال آنلاین خرید می‌کنند:

$$U_n \geq 0 \Rightarrow v \geq p_n - \alpha\rho \quad (5)$$

$$U_n \geq U_r \Rightarrow p_r \geq p_n \quad (6)$$

و اگر  $U_r \geq U_n$  و  $U_r \geq 0$  باشد از کانال آفلاین خرید می‌کنند:

$$U_r \geq 0 \Rightarrow v \geq p_r - \alpha\rho \quad (7)$$

$$U_r \geq U_n \Rightarrow p_n \geq p_r \quad (8)$$

از آنجایی که در اکثر بازارها قیمت خرده‌فروشی به علت هزینه‌های جانبی بیشتر از قیمت فروش آنلاین است [۱۸]، یعنی با فرض  $p_r \geq p_n$ ، مشتریان منعطف از کانال آنلاین خرید خود را انجام می‌دهند. با در نظر گرفتن تقاضای پایه و درصد مشتریان سنتی و منعطف در بازار تابع تقاضای کانال‌های آنلاین و آفلاین به ترتیب برابر خواهد بود با:

$$d_n = (1 - \gamma) D^0 [1 - p_n + \alpha\rho]^k \quad (9)$$

$$d_r = \gamma D^0 [1 - p_r + \alpha\rho]^k \quad (10)$$

می‌کند. خرده‌فروش به‌عنوان پیرو، با مشاهده تصمیم‌های تولیدکننده، قیمت خرده‌فروشی را طوری انتخاب می‌کند که سود خودش (رابطه ۱۹)) حداکثر شود. مشتریان سنتی فقط از خرده‌فروش و مشتریان منعطف از کانال آنلاین خرید می‌کنند.

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_M^{S_r}(p_n, w, \rho) = & (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k \\ & + (w - c_m)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k \\ & - \frac{(1 - \theta)}{\gamma} \eta \rho^\gamma \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_R^{S_r}(p_r) = & (p_r - w - c_r)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k \\ & - \frac{\theta}{\gamma} \eta \rho^\gamma \end{aligned} \quad (19)$$

گزاره ۳. در سناریو فروش دوکاناله با ساختار غیرمتمرکز که در آن تولیدکننده رهبر و خرده‌فروش پیرو باشد، در صورت برقراری شرط

$$\begin{aligned} & (1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^{k-1} \\ & + \gamma D^0\left(\frac{k}{k+1}\right)^k [\alpha\rho - c_r - w + 1]^{k-1} \\ & < \min\left\{\frac{\eta(1 - \theta)(k+1)}{\alpha^\gamma k^\gamma}, \frac{\eta}{\alpha^\gamma(k-1)}\right\} \end{aligned}$$

یک نقطه داخلی کاندید بهینگی برای سود تولیدکننده و خرده‌فروش از روابط (۲۰)–(۲۳) به‌دست می‌آید.

اثبات. مقادیر فوق از شرط لازم مرتبه اول بهینگی و پس از ارزیابی شرط کافی مرتبه دوم بهینگی به‌دست می‌آید. برای حل از روش استنتاج معکوس استفاده می‌کنیم از آنجایی که خرده‌فروش واکنش بهینه خود را نسبت به تصمیمات تولیدکننده تعیین می‌کند؛ بنابراین به‌دست آوردن تابع بهترین پاسخ خرده‌فروش، پیش‌نیاز حل مسأله تولیدکننده است. در ادامه با جایگذاری این پاسخ در تابع سود تولیدکننده، مسأله بهینه‌سازی رهبر تنها برحسب متغیرهای تصمیم او فرموله و حل می‌شود. برای اثبات پیوست را ببینید.

$$p_r^{S_r}(w, \rho) = \frac{\alpha\rho + k(w + c_r) + 1}{(k+1)} \quad (20)$$

$$p_n^{S_r} = \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_n) + 1}{(k+1)} \quad (21)$$

$$w^{S_r} = \frac{\alpha\rho + k c_m - c_r + 1}{(k+1)} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \rho^{S_r} = & \frac{\alpha k}{\eta(1 - \theta)} \left[ (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^{k-1} \right. \\ & + \left(\frac{k}{k+1}\right)^k (w - c_m)\gamma D^0[\alpha\rho - c_r - w + 1]^{k-1} \\ & \left. + 1 \right] \end{aligned} \quad (23)$$

#### ۴. رویکرد حل

با توجه به اینکه در هر سه سناریو، نقاط ریشه‌ای حاصل از شرط مرتبه اول بهینگی را نمی‌توان به‌عنوان بهینه سراسری پذیرفت، باید رویکرد مناسبی برای جستجوی صحیح کل فضای جواب تعیین کنیم. در ادامه

$$\begin{aligned} & (1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^{k-1} \\ & < \min\left\{\frac{\eta(k+1)}{\alpha^\gamma k^\gamma}, \frac{\eta}{\alpha^\gamma(k-1)}\right\} \end{aligned}$$

برقرار باشد.

$$p_n^{S_r} = \frac{(1 + k(c_m + c_n) + \alpha\rho)}{(k+1)} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \rho^{S_r} = & \frac{(p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0 \alpha k [1 - p_n + \alpha\rho]^{k-1}}{\eta} \end{aligned} \quad (13)$$

اثبات. مقادیر فوق از شرط لازم مرتبه اول بهینگی و پس از ارزیابی شرط کافی مرتبه دوم بهینگی به‌دست می‌آید. برای اثبات پیوست را ببینید.

#### ۳-۴-۲. فروش دوکاناله با ساختار متمرکز

در سناریوی دوم، تولیدکننده و خرده‌فروش به‌صورت یک مجموعه واحد عمل می‌کنند و منافعشان هم‌راستا است. هدف، حداکثرسازی سود کل زنجیره است. در این شرایط، قیمت آنلاین، قیمت آفلاین و سطح سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء به‌طور هماهنگ تعیین می‌شوند. مشتریان سنتی از خرده‌فروش و مشتریان منعطف از کانال آنلاین خرید می‌کنند. با توجه به توابع تقاضای آفلاین و آفلاین و حاشیه سود اعضای زنجیره در این حالت، تابع سود کل زنجیره به‌صورت رابطه (۱۴) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_{SC}^{S_r}(p_n, p_r, \rho) = & (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k \\ & + (p_r - c_m - c_r)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k \\ & - \frac{1}{\gamma} \eta \rho^\gamma \end{aligned} \quad (14)$$

گزاره ۲. در سناریو فروش دوکاناله با ساختار متمرکز اگر شرط

$$\begin{aligned} & (1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^{k-1} + \gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^{k-1} \\ & < \min\left\{\frac{\eta(k+1)}{\alpha^\gamma k^\gamma}, \frac{\eta}{\alpha^\gamma(k-1)}\right\} \end{aligned}$$

برقرار باشد، روابط (۱۵)–(۱۷) یک نقطه داخلی کاندید بهینگی برای سود کل زنجیره را ارائه می‌دهند:

$$p_n^{S_r} = \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_n) + 1}{(k+1)} \quad (15)$$

$$p_r^{S_r} = \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_r) + 1}{(k+1)} \quad (16)$$

$$\rho^{S_r} = \frac{\alpha k}{\eta} [(p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k + (p_r - c_m - c_r)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k] \quad (17)$$

اثبات. مقادیر فوق از شرط لازم مرتبه اول بهینگی و پس از ارزیابی شرط کافی مرتبه دوم بهینگی به‌دست می‌آید. برای اثبات پیوست را ببینید.

#### ۳-۴-۳. فروش دوکاناله با ساختار غیرمتمرکز

در سناریوی سوم، تولیدکننده و خرده‌فروش اهداف مستقل دارند و هر کدام سود خود را حداکثر می‌کند. رابطه بین اعضای زنجیره با بازی استکلبرگ بررسی می‌شود. در زنجیره تأمین مورد بررسی تولیدکننده رهبر و خرده‌فروش پیرو است. بنابراین ابتدا تولیدکننده به‌عنوان رهبر زنجیره با هدف حداکثر کردن سود خود (رابطه ۱۸))، قیمت آنلاین، قیمت عمده‌فروشی و سطح سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء را تعیین

هم باید انجام شود. بنابراین تابع سود تک متغیره (۲۷) برحسب  $\rho$  را برای جستجوی مستقیم با از جایگذاری  $p_n$  در رابطه (۱۱)، به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\Pi_M^{S_1}(\rho) = \frac{(1-\gamma)D^0 k^k [1 - c_m - c_n + \alpha\rho]^{k+1}}{(k+1)^{k+1}} - \frac{1}{\gamma} \eta \rho^2 \quad (27)$$

سناریو دوم. در این سناریو نیز مشابه سناریو اول، مقادیر به دست آمده از روابط (۱۵) و (۱۶) را به عنوان بهترین جواب برای  $p_n$  و  $p_r$  در نظر می گیریم و با جایگذاری آن ها در رابطه (۱۷) معادله تک متغیره (۲۸) برحسب  $\rho$  را به دست می آوریم. در حالت  $k=1$  نیز پاسخ تحلیلی از رابطه (۲۹) به دست می آید:

$$\rho^{S_2} = \frac{\alpha k^k}{\eta(k+1)^k} [(1-\gamma)D^0 [1 - c_m - c_n + \alpha\rho]^k + \gamma D^0 [1 - c_m - c_r + \alpha\rho]^k] \quad (28)$$

$$\rho^{S_2}(k=1) = \frac{\alpha[(1-\gamma)D^0(1 - c_m - c_n + \alpha\rho) + \gamma D^0(1 - c_m - c_r + \alpha\rho)]}{2\eta} \quad (29)$$

شرط کافی برای اینکه (۲۹) به ازای  $k=1$  پاسخ بهینه  $\rho$  باشد،  $\eta 2 > D^0 \alpha^2$  است که با انتخاب مقدار مناسب برای پارامترها همواره برقرار خواهد بود. اما برای مقادیر عمومی  $k$ ، چون شرط مرتبه دوم بهینگی برای  $\rho$  همواره برقرار نیست، ارزیابی نقاط مرزی نقاط مرزی  $\rho_{max}$  و  $\rho_{min}$  علاوه بر نقاط ریشه مرتبه اول لازم خواهد بود. همچنین برای اینکه هیچ نقطه از دست نرود، بهینه سازی مستقیم روی تابع سود (۳۰) که از جایگذاری  $p_n$  و  $p_r$  در رابطه (۱۴)، به صورت تک متغیره برحسب  $\rho$  به دست می آید، انجام خواهد شد.

$$\Pi_{SC}^{S_2}(\rho) = \frac{k^k}{(k+1)^{k+1}} [(1-\gamma)D^0 [1 - c_m - c_n + \alpha\rho]^{k+1} + \gamma D^0 [1 - c_m - c_r + \alpha\rho]^{k+1}] - \frac{1}{\gamma} \eta \rho^2 \quad (30)$$

سناریو سوم. در این سناریو  $p_r^{S_2}$  بهترین جواب خرده فروش است. همچنین مشابه سناریو اول و دوم،  $p_n^{S_2}$  و  $w^{S_2}$  را به عنوان بهترین جواب در نظر می گیریم و با جایگذاری آن ها در رابطه (۲۳) معادله تک متغیره (۳۱) برحسب  $\rho$  را به دست می آوریم. در حالت  $k=1$  نیز پاسخ تحلیلی  $\rho$  طبق رابطه (۳۲) محاسبه می شود:

$$\rho^{S_3} = \frac{\alpha k^k}{\eta(k+1)^k} \left[ (1-\gamma)D^0 [1 - c_m - c_n + \alpha\rho]^k + \frac{\gamma D^0 k^k}{(k+1)^k} [1 - c_m - c_r + \alpha\rho]^k \right] \quad (31)$$

$$\rho^{S_3}(k=1) = \frac{\alpha[(1-\gamma)D^0(1 - c_m - c_n + \alpha\rho) + \gamma D^0(1 - c_m - c_r + \alpha\rho)]}{2\eta} \quad (32)$$

و  $\rho_{max}$  علاوه بر نقاط ریشه مرتبه اول لازم خواهد بود. همچنین برای اینکه هیچ نقطه از دست نرود، بهینه سازی مستقیم روی تابع سود (۳۳) که از جایگذاری  $p_n^{S_3}$  و  $w^{S_3}$  در رابطه (۱۷)، به صورت تک متغیره برحسب  $\rho$  به دست می آید، انجام خواهد شد:

رویکرد پیشنهادی برای سناریوهای مختلف تشریح می شود.

سناریو اول. در این سناریو تابع هدف تولیدکننده نسبت به  $p_n$  کاملاً مقعر بوده و می توان مقدار به دست آمده از رابطه (۱۲) را به عنوان بهترین جواب برای  $p_n$  در نظر گرفت. با جایگذاری  $p_n$  در رابطه (۱۳) معادله تک متغیره برحسب  $\rho$  (رابطه (۲۴)) به دست می آید که در حالت خاص  $k=1$  خطی است و به شکل بسته قابل حل است. در این حالت پاسخ تحلیلی  $\rho$  طبق رابطه (۲۵) محاسبه می شود که مبنای اعتبارسنجی رویکرد جستجوی پیشنهادی نیز خواهد بود:

$$\rho^{S_1} = \frac{(1-\gamma)D^0 \alpha k^k [1 - c_m - c_n + \alpha\rho]^k}{\eta(k+1)^k} \quad (24)$$

$$\rho^{S_1}(k=1) = \frac{(1 - c_m - c_n + \alpha\rho)(1-\gamma)D^0 \alpha}{2\eta} \quad (25)$$

لازم به ذکر است براساس گزاره ۱ شرط کافی برای اینکه (۲۵) به ازای  $k=1$  پاسخ بهینه  $\rho$  باشد،  $\eta 2 > (1-\gamma)D^0 \alpha^2$  است که با انتخاب مقدار مناسب برای پارامترها همواره برقرار خواهد بود. اما برای مقادیر عمومی  $k$ ، معادله (۲۴) غیرخطی بوده و حل بسته ساده ای ندارد اما ساختار تک متغیره مسأله، فرآیند محاسبه عددی را ساده و پایدار می کند. در این حالت، چون شرط کافی مرتبه دوم بهینگی برای  $\rho$  همواره برقرار نیست، ارزیابی نقاط مرزی علاوه بر نقاط ریشه مرتبه اول لازم خواهد بود. بدیهی است که حداقل مقدار  $\rho$  می تواند صفر باشد و حداکثر مقدار آنجایی است که کل هزینه سرمایه گذاری اینترنت اشیاء درآمد تولیدکننده را صفر کند. از آنجایی که حداکثر تقاضای تولیدکننده  $D^0(1-\gamma)$  و حداکثر قیمت فروش  $1+\alpha\rho$  است، خواهیم داشت:

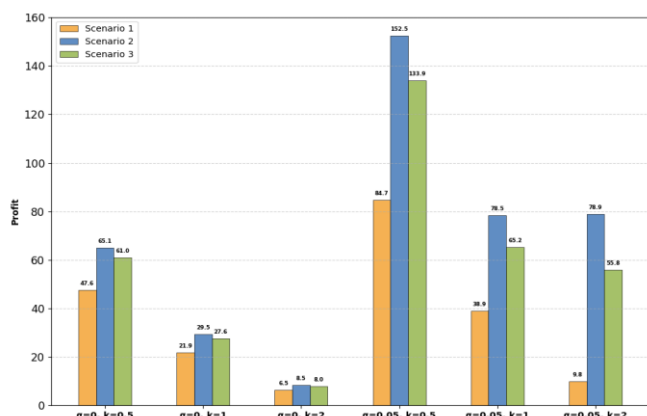
$$(1+\alpha\rho)(1-\gamma)D^0 = \frac{1}{\gamma} \eta \rho^2 \Rightarrow \rho_{max} = \frac{\alpha(1-\gamma) + \sqrt{2\eta(1-\gamma)D^0 + \alpha^2(1-\gamma)^2 D^0}}{\eta} \quad (26)$$

پس علاوه بر پاسخ ریشه ای حاصل از رابطه (۲۴)، نقاط مرزی  $\rho_{max}$  و  $\rho_{min}$  نیز باید ارزیابی شود. از سوی دیگر، ممکن است نقطه بهینه واقعی نه در مرزها و نه در ریشه مشتق اول قرار داشته باشد؛ به ویژه زمانی که تابع سود غیرمقعر یا چند قله باشد. در نهایت، براساس [۳۸] برای هر مسأله برنامه ریزی غیر محدب، علاوه بر ریشه مرتبه اول و نقاط مرزی، برای اینکه هیچ نقطه داخلی - که ممکن با ریشه یابی به دست نیاید - از دست نرود، یک بهینه سازی مستقیم روی تابع سود

شرط کافی برای اینکه (۳۲) به ازای  $k=1$  پاسخ بهینه  $\rho$  باشد،  $\eta 2(1-\theta) > D^0 \alpha^2$  است که با انتخاب مقدار مناسب برای پارامترها همواره برقرار خواهد بود. اما برای مقادیر کلی  $k$ ، چون شرایط کافی مرتبه دوم بهینگی برای  $\rho$  همواره برقرار نیست، ارزیابی نقاط مرزی

جدول (۲). مقدار پارامترها

| پارامتر  | مقدار     | پارامتر | مقدار |
|----------|-----------|---------|-------|
| $D^0$    | ۵۰۰       | $c_m$   | ۰/۴   |
| $\alpha$ | ۰، ۰/۰۵   | $c_n$   | ۰/۱   |
| $\gamma$ | ۰/۳       | $c_r$   | ۰/۱۵  |
| $\theta$ | ۰/۱       | $\eta$  | ۱     |
| $k$      | ۲، ۱، ۰/۵ |         |       |

شکل (۴). سود کل به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  و  $k$  به تفکیک سناریوها

مقایسه سه سناریو تحت مقادیر مختلف پارامتر شکل تابع تقاضا نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء در تمامی حالت‌ها موجب افزایش سود زنجیره می‌شود، اما شدت این اثر به ساختار تصمیم‌گیری بستگی دارد. سناریوی دوم بیشترین بهره‌مندی را از اینترنت اشیاء تجربه می‌کند، زیرا هماهنگی تصمیمات قیمت‌گذاری و سرمایه‌گذاری باعث بهبود کارایی کل سیستم می‌شود. سناریوی سوم نیز با وجود رقابت بین تولیدکننده و خرده‌فروش، از مزایای اینترنت اشیاء بهره می‌برد، اما این سود کمتر از ساختار متمرکز است.

در سناریوی اول که تنها کانال آنلاین فعال است، محدودیت در پوشش بازار موجب می‌شود که اثر اینترنت اشیاء کمتر از دو سناریوی دیگر باشد، به‌ویژه در بازارهایی که سهم مشتریان سنتی قابل توجه است.

در بازارهایی با مقدار کوچک  $k$  (تقاضای مقعر) تفاوت سود سناریوهای مختلف کمتر است، زیرا تقاضا نسبت به تغییرات قیمت واکنش ملایم‌تری نشان می‌دهد. با افزایش  $k$  (تحدب تابع تقاضا و حساس‌تر شدن بازارها) فاصله سناریوی متمرکز با دو سناریوی دیگر بیشتر شده و اهمیت هماهنگی قیمتی و چندکاناله افزایش می‌یابد. بنابراین، در بازارهای کم حساس و دیجیتال محور، ساختار فقط آنلاین با سرمایه‌گذاری معقول در اینترنت اشیاء می‌تواند قابل قبول باشد. اما هرچه این نتیجه، نشان می‌دهد حتی در حضور فناوری پیشرفته‌ای مانند اینترنت اشیاء، تضاد منافع ذاتی در ساختار غیرمتمرکز مانع از دستیابی به سطح سود ایده‌آل در ساختار یکپارچه می‌شود. بنابراین، اولویت استراتژیک اول برای یک تصمیم‌گیرنده کلان مانند یک

$$\Pi_M^{Sr}(\rho) = \frac{k^k}{(k+1)^{k+1}} \left[ (1 - \gamma) D^0 [1 - c_m - c_n + \alpha \rho]^{k+1} + \frac{\gamma D^0 k^k}{(k+1)^k} [1 - c_m - c_r + \alpha \rho]^{k+1} \right] - \frac{1}{\gamma} \eta \rho^{\gamma} \quad (33)$$

ترکیب سه دسته نقطه - ریشه معتبر شرط مرتبه اول، نقاط مرزی، و نقطه حاصل از بهینه‌سازی مستقیم - یک مجموعه کامل از نقاط کاندید را تشکیل می‌دهد و انتخاب بهترین مقدار سود از میان آن‌ها، حل نهایی قابل اعتماد را ارائه می‌کند. برای یافتن جواب‌هایی که نه در مرزها قرار دارند و نه از شرط مرتبه اول قابل استخراج هستند از روش جستجوی نسبت طلایی برای توابع تک متغیره، مبتنی بر الگوریتم برنت (Brent) استفاده شده که در ادبیات کلاسیک بهینه‌سازی [۳۹، ۴۰، ۴۱] یک روش معتبر و پایدار برای بهینه‌سازی بدون نیاز به مشتق محسوب می‌شود. این ترکیب تضمین می‌کند که هیچ نقطه بهینه داخلی در مسأله از دست نرود.

## ۵. مثال عددی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت

در این بخش با استفاده از یک مثال عددی، عملکرد مدل‌های پیشنهادی در سه ساختار متفاوت شامل فروش آنلاین (سناریو ۱)، فروش دوکاناله متمرکز (سناریو ۲) و دوکاناله غیرمتمرکز (سناریو ۳) بررسی می‌شود. هدف این تحلیل‌ها مقایسه عملکرد سناریوها با/بدون فناوری اینترنت اشیاء، ارزیابی رویکرد جستجوی پیشنهادی برای یافتن نقطه بهینه، تأثیر پارامترهای رفتاری و فناورانه بر تصمیمات بهینه و میزان واکنش‌پذیری سود نسبت به تغییرات محیطی است. این مجموعه آزمایش‌ها تصویری جامع از رفتار مدل در شرایط مختلف ارائه می‌کند که منجر به ارائه بینش‌های مدیریتی خواهد شد. پارامترهای استفاده شده در مثال عددی با حفظ مقیاس‌پذیری و انطباق با الهام مستقیم از یک مطالعه موردی در ابعاد کوچک‌تر مقداردهی شده‌اند.

### ۵-۱. مقایسه عملکرد سناریوها

در این بخش، پس از مقداردهی پارامترهای مدل مطابق جدول (۲)، مدل‌ها با استفاده از رویکرد جستجوی پیشنهادی حل شدند. مقادیر عددی طوری لحاظ شده‌اند که محدودیت‌های ذکر شده در فرضیات و گزاره‌های به‌دست آمده را برآورده سازند. دو مقدار  $\alpha$  برای ارزیابی سناریوها با  $(\alpha = 0)$  و بدون  $(\alpha = 0/0.5)$  سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء در نظر گرفته شده است. همچنین، برای پارامتر شکل تابع تقاضا که نوع بازار از نظر حساسیت مشتری به قیمت را نشان می‌دهد، سه مقدار متفاوت  $k = 0/5, 1, 2$  در نظر گرفته شد، تا اثر کانال‌های فروش، ساختار تصمیم‌گیری، و اینترنت اشیاء را در انواع بازارها با حساسیت کم، معمولی و زیاد نسبت به تغییرات قیمتی ارزیابی شود. جدول (۳) مقدار متغیرهای تصمیم و توابع هدف را در حالت  $k = 1$  و شکل (۴) مقدار تابع هدف کل زنجیره به ازای سناریوهای مختلف می‌دهند.

پس از تعیین مقدار  $\rho^*$ ، قیمت آنلاین و سود تولیدکننده به ترتیب از روابط (۱۲) و (۱۱) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$p_n^{s_1} = \frac{(1 + k(c_m + c_n) + \alpha\rho)}{(k + 1)} = \frac{(1 + 0.4 + 0.1 + 0.05 \times 7/78)}{2} = 0.94 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Pi_M^{s_1}(p_n, \rho) &= (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma) D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k \\ &\quad - \frac{1}{2} \eta \rho^2 \\ &= (0.94 - 0.4 - 0.1) \times 0.7 \times 500 [1 - 0.94 \\ &\quad + 0.05 \times 7/78] - \frac{1}{2} (7/78)^2 \\ &= 38/89 \end{aligned} \quad (37)$$

برای سناریوی دوم نیز ابتدا مقدار بهینه سرمایه گذاری اینترنت اشیا از رابطه (۲۹) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \rho^{s_2} &= \frac{\alpha[(1 - \gamma)D^0(1 - c_m - c_n + \alpha\rho) + \gamma D^0(1 - c_m - c_r + \alpha\rho)]}{\eta} \\ &= \frac{0.05[0.7 \times 500(1 - 0.4 - 0.1 + 0.05\rho) + 0.3 \times 500(1 - 0.4 - 0.15 + 0.05\rho)]}{2} \\ &\Rightarrow \rho = 16/17 \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} &+ (p_r - c_m - c_r) \gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k - \frac{1}{2} \eta \rho^2 \\ &\Rightarrow \\ &= (1/15 - 0.4 - 0.1) \times 0.7 \times 500 [1 - 1/15 \\ &\quad + 0.05 \times 16/17] \\ &\quad + (1/18 - 0.4 - 0.15) \times 0.3 \times 500 [1 - 1/18 \\ &\quad + 0.05 \times 16/17] - \frac{1}{2} (16/17)^2 \\ &= 78/47 \end{aligned} \quad (41)$$

در سناریوی سوم ابتدا تولیدکننده مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم خود را تعیین و سپس خرده فروش مقدار بهینه متغیر خود را محاسبه می کند. پس مشابه دو سناریوی قبل، ابتدا مقدار بهینه سرمایه گذاری اینترنت اشیا برای تولیدکننده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \rho^{s_3} &= \frac{\alpha[(1 - \gamma)D^0(1 - c_m - c_n + \alpha\rho) + 0.5 \gamma D^0(1 - c_m - c_r + \alpha\rho)]}{\eta} \\ &= \frac{0.05[0.7 \times 500(1 - 0.4 - 0.1 + 0.05\rho) + 0.5 \times 0.3 \times 500(1 - 0.4 - 0.15 + 0.05\rho)]}{2} \\ &\Rightarrow \rho = 14/15 \end{aligned} \quad (42)$$

هلدینگ که هر دو بخش تولید و خرده فروشی را در اختیار دارد، باید حرکت به سمت یکپارچه سازی عمودی و هماهنگی باشد.

## ۲-۵. ارزیابی عملکرد رویکرد جستجوی پیشنهادی

برای اعتبارسنجی رویکرد حل پیشنهادی، مقادیر پارامترهای جدول (۲) را برای حالت  $k = 1$  در نظر می گیریم. در این حالت، تقاضا تابعی خطی از قیمت و سرمایه گذاری اینترنت اشیا است و مقادیر همه متغیرهای تصمیم در هر سه سناریو فرم بسته قابل حل دارند. بنابراین، می توان نتایج جواب های تحلیلی دقیق و روش عددی را مقایسه نمود. برای محاسبه جواب تحلیلی سناریوی ۱، ابتدا از رابطه (۲۵) مقدار بهینه سرمایه گذاری اینترنت اشیا را به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\begin{aligned} \rho^{s_1} &= \frac{(1 - c_m - c_n + \alpha\rho)(1 - \gamma)D^0\alpha}{\eta} \\ &= \frac{(1 - 0.4 - 0.1 + 0.05\rho)(1 - 0.3)500 \times 0.05}{2} \\ &\Rightarrow 8/75 - 1/125\rho = 0 \Rightarrow \rho = 7/78 \end{aligned} \quad (35)$$

سپس براساس مقدار  $\rho^*$  و از روابط (۱۵) و (۱۶)، قیمت کانال های فروش آنلاین و آفلاین به ترتیب زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} p_n^{s_2} &= \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_n) + 1}{(k + 1)} = \frac{0.05 \times 7/78 + 1}{2} = 1/15 \\ &\Rightarrow p_n \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} p_r^{s_2} &= \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_r) + 1}{(k + 1)} = \frac{0.05 \times 7/78 + 1}{2} = 1/18 \\ &\Rightarrow p_r \end{aligned} \quad (40)$$

و در نهایت مقدار سود کل زنجیره براساس مقدار بهینه همه متغیرهای تصمیم از رابطه (۱۴) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Pi_{SC}^{s_2}(p_n, p_r, \rho) = (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k$$

جدول (۳). مقادیر متغیرهای تصمیم و توابع سود برای حالت  $k = 1$  با روش عددی

| $\alpha = 0.05$ |         |         |        |      |       |       | $\alpha = 0$ |         |         |        |       |       |       |
|-----------------|---------|---------|--------|------|-------|-------|--------------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|
| $\Pi_{SC}$      | $\Pi_R$ | $\Pi_M$ | $\rho$ | $w$  | $p_r$ | $p_n$ | $\Pi_{SC}$   | $\Pi_R$ | $\Pi_M$ | $\rho$ | $w$   | $p_r$ | $p_n$ |
| ۳۸/۸۹           | -       | ۳۸/۸۹   | ۷/۷۸   | -    | -     | ۰/۹۴  | ۲۱/۸۸        | -       | ۲۱/۸۸   | ۰      | -     | -     | ۰/۷۵  |
| ۷۸/۴۷           | -       | -       | ۱۶/۱۷  | -    | ۱/۱۸  | ۱/۱۵  | ۲۹/۴۷        | -       | -       | ۰      | -     | ۰/۷۸  | ۰/۷۵  |
| ۶۵/۱۵           | ۲/۵۵    | ۶۲/۶    | ۱۴/۱۵  | ۰/۹۸ | ۱/۴۲  | ۱/۱   | ۲۷/۵۷        | ۱/۹     | ۲۵/۶۷   | ۰      | ۰/۶۲۵ | ۰/۸۹  | ۰/۷۵  |

سناریو ۱

سناریو ۲

سناریو ۳

بهترین جواب را پیدا کند.

### ۵-۳. تحلیل حساسیت پارامترها

در این بخش، برای استخراج بینش‌های عمیق‌تر و ارزیابی وضعیت متغیرهای تصمیم و توابع هدف در سناریوهای مختلف نسبت به تغییرات محیطی، رفتار سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای کلیدی مدل شامل درصد مشتریان سنتی در بازار ( $\gamma$ )، سهم خرده‌فروش از هزینه اینترنت اشیا ( $\theta$ ) و ترکیب پارامترهای فناوری ( $\alpha, \eta$ ) بررسی شده است. لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن سه مقدار  $k = 1, 2, 5$  برای پارامتر شکل تابع تقاضا، نتایج تغییرات سایر پارامترها به تفکیک بازارهای مختلف تحلیل و اثر این پارامتر بر فضای تصمیم-گیری تشریح می‌شود. شکل‌های (۵) تا (۷) نتایج این تحلیل‌ها را نشان می‌دهند.

نتایج شکل (۵) در تحلیل پارامتر  $\gamma$  - که معادل درصد مشتریانی است که فقط از کانال آنلاین خرید می‌کنند - نشان می‌دهد که در سناریوی فروش آنلاین، افزایش  $\gamma$  باعث کاهش شدید سود می‌شود، زیرا به دلیل عدم استفاده از کانال فروش آنلاین بخش مهمی از بازار از دست می‌رود. این کاهش در بازارهای بسیار حساس به قیمت شدیدتر است. در مقابل، سناریوی فروش دوکاناله متمرکز به دلیل پوشش هم‌زمان بازارهای آنلاین و آفلاین مقاومت بیشتری در برابر افزایش  $\gamma$  دارد و سود آن کاهش ملایم‌تری دارد.

این نتیجه به‌وضوح محدودیت مدل‌های کسب‌وکار کاملاً دیجیتال را در بازارهایی با جمعیت سنتی قابل توجه نشان می‌دهد. استراتژی چندکاناله نه یک گزینه، بلکه یک اجبار برای دستیابی به این بخش از بازار است. بنابراین، حضور خرده‌فروش در بازارهای سنتی اهمیت بیشتری دارد و کانال آنلاین در چنین بازارهایی مزیت رقابتی کمتری دارد. نکته جالب این است که در بازارهای بسیار حساس، حتی ساختار چندکاناله نیز با افزایش  $\gamma$  با سود کمتر مواجه می‌شود که این به دلیل هزینه بالای خدمات‌رسانی به مشتریان سنتی در بازارها است. در بازارهایی با  $\gamma$  پایین، اختلاف عملکرد سناریوها کمتر است و مدیر می‌تواند با تکیه بیشتر بر کانال آنلاین نیز به سود قابل قبولی دست یابد.

شکل (۶) نشان می‌دهد که افزایش  $\theta$  یعنی افزایش سهم خرده‌فروش در پرداخت هزینه اینترنت اشیا باعث کاهش محسوس و یکنواخت سود خرده‌فروش و افزایش سود تولیدکننده می‌شود، در حالی که سود کل زنجیره تغییر چشم‌گیری نمی‌کند. این، یک بازی با حاصل جمع صفر درون زنجیره است. افزایش  $\theta$  صرفاً موجب انتقال ثروت از خرده‌فروش به تولیدکننده می‌شود. سپس، از منظر کل زنجیره  $\theta$  بیش از آنکه ارزش جدیدی خلق یا کارایی ایجاد کند، یک ابزار چانه‌زنی است که نحوه توزیع سود را میان اعضای زنجیره تعیین می‌کند و نه یک ابزار بهینه‌سازی کل.

اگر  $\theta$  خیلی بزرگ انتخاب شود، انگیزه خرده‌فروش برای مشارکت در پیاده‌سازی و ترویج خدمات مبتنی بر اینترنت اشیا کاهش می‌یابد؛ به‌ویژه در بازارهای بسیار حساس به قیمت که حاشیه سود او محدود

سپس سایر متغیرهای تولیدکننده شامل قیمت کانال آنلاین و قیمت عمده‌فروشی از روابط (۲۱) و (۲۲) و در نهایت مقدار بهینه متغیر تصمیم خرده‌فروش یعنی قیمت کانال آفلاین از رابطه (۲۰) و براساس مقادیر بهینه متغیرهای تولیدکننده به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$p_n^{sr} = \frac{\alpha\rho + k(c_m + c_n) + 1}{(k+1)} \quad (43)$$

$$= \frac{(1 + 0.5 + 0.5 \times 14/15)}{2} \Rightarrow p_n = 1/1$$

$$w^{sr} = \frac{\alpha\rho + kc_m - c_r + 1}{(k+1)} \quad (43)$$

$$= \frac{(1 + 0.3 + 0.5 \times 14/15)}{2} \Rightarrow w = 0.98$$

$$p_r^{sr}(w, \rho) = \frac{\alpha\rho + k(w + c_r) + 1}{(k+1)} \quad (44)$$

$$= \frac{(1 + 0.98 + 0.15 + 0.5 \times 14/15)}{2} \Rightarrow p_r = 1/42$$

و در نهایت سود تولیدکننده و خرده‌فروش به ترتیب براساس روابط (۱۸) و (۱۹) به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Pi_M^{sr}(p_n, w, \rho) = (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma)D^0[1 - p_n + \alpha\rho]^k + (w - c_m)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k - \frac{(1 - \theta)}{2}\eta\rho^2 \Rightarrow$$

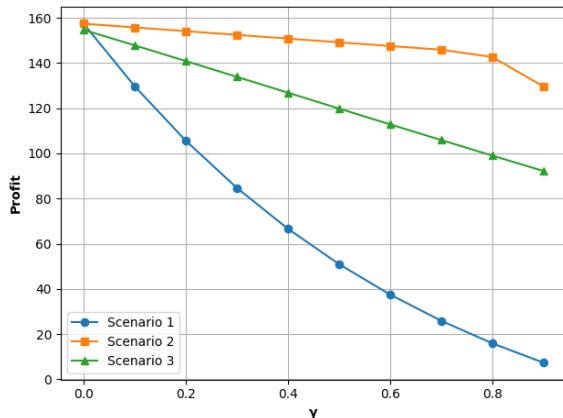
$$(1/1 - 0.4 - 0.1) \times 0.7 \times 500 [1 - 1/1 + 0.5 \times 14/15] + (0.98 - 0.4) \times 0.3 \times 500 [1 - 1/42 + 0.5 \times 14/15] - \frac{0.9}{2}(14/15)^2 = 62/6 \quad (46)$$

$$\Pi_R^{sr}(p_r) = (p_r - w - c_r)\gamma D^0[1 - p_r + \alpha\rho]^k - \frac{\theta}{2}\eta\rho^2 \Rightarrow$$

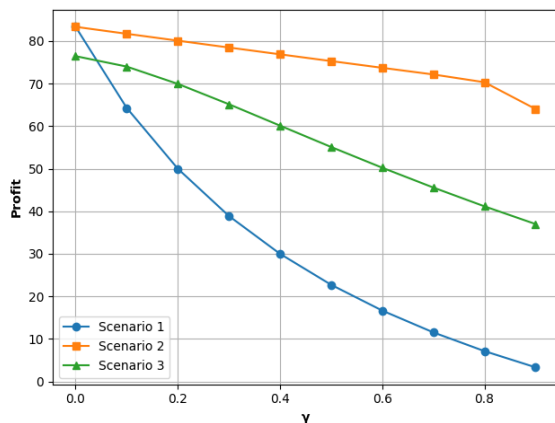
$$(1/42 - 0.98 - 0.15) \times 0.3 \times 500 [1 - 1/42 + 0.5 \times 14/15] - \frac{0.1}{2}(14/15)^2 = 2/55 \quad (47)$$

مقایسه این نتایج با جدول (۳) نشان می‌دهد که در هر سه سناریو مقادیر متغیرهای تصمیم و توابع هدف حاصل از دو رویکرد عددی و تحلیلی کاملاً منطبق هستند و اختلافی مشاهده نشده است. این همپوشانی نشان می‌دهد که رویکرد جستجوی پیشنهادی در شرایطی که جواب دقیق براساس شرط مرتبه اول مشتق وجود دارد، بهینه سراسری را پیدا می‌کند و در دام بهینه‌های محلی گرفتار نمی‌شود. این موضوع اطمینان ما را نسبت به صحت نتایج در حالت‌های عمومی افزایش می‌دهد، چراکه رویکرد پیشنهادی در صورت وجود جواب تحلیلی به‌عنوان بهینه سراسری آن را می‌یابد و در صورت لزوم می‌تواند جستجوی بیشتر در فضای حل را نیز انجام دهد و از بین نقاط کاندید

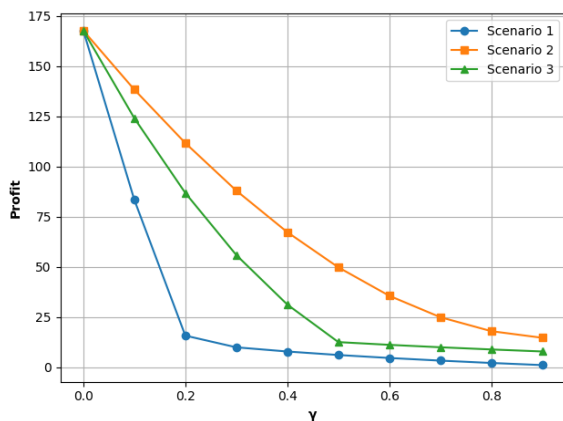
مشتریان سنتی) بهره‌بردار و فشار برای یکپارچه‌سازی کمتر احساس می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵). تغییرات سود نسبت افزایش  $\gamma$  به تفکیک سناریوها در بازارهای مختلف الف:  $k = 0.5$  ب:  $k = 1$  ج:  $k = 2$

بازارهای خطی ( $k = 1$ ) بازارهای استاندارد با رقابت متعادل هستند. این حالت، نمایانگر بازاری با توزیع یکنواخت مشتریان از نظر تمایل به پرداخت است. حساسیت تقاضا به قیمت ثابت و قابل پیش‌بینی است. این بازار اغلب مربوط به کالاهای مصرفی بادوام یا

است. این موضوع بر اهمیت طراحی قراردادهای مشارکت هزینه منصفانه و مبتنی بر شرایط بازار تأکید دارد؛ به گونه‌ای که ضمن جبران هزینه‌های تولیدکننده، فضای کافی برای سودآوری خرده‌فروش نیز باقی بماند.

شکل (۷) تحلیل دوبعدی پارامترهای  $(\alpha, \eta)$  یعنی شدت اثر اینترنت اشیا بر تمایل به پرداخت و شدت هزینه سرمایه‌گذاری آن برای  $k = 1$  را نشان می‌دهد. نمودارها در این شکل بر وجود یک ناحیه بهینه در فضای  $(\alpha, \eta)$  را تأکید می‌کنند. سرمایه‌گذاری در اینترنت اشیا تنها زمانی توجیه‌پذیر است که بازدهی آن ( $\alpha$ ) به اندازه کافی بالا و هزینه آن ( $\eta$ ) به اندازه کافی پایین باشد. اگرچه سود هر سه سناریو با افزایش  $\alpha$ ، افزایش و با افزایش  $\eta$  کاهش می‌یابد، اما شیب و شکل این تغییرات در سناریوها متفاوت است. سطح سود برای سناریوی متمرکز (شکل ۷ب) مقادیر بیشتری دارد و بازه گسترده‌تری از ترکیب  $(\alpha, \eta)$  وجود دارد که در آن سرمایه‌گذاری اینترنت اشیا سودآور باقی می‌ماند، درحالی‌که در سناریوی فروش آنلاین (شکل ۷الف)، منطقه سودآور محدودتر و حساسیت بیشتر است. بنابراین ساختار متمرکز می‌تواند حتی در شرایطی که بازدهی اینترنت اشیا متوسط است ( $\alpha$  متوسط) یا هزینه آن بالا است ( $\eta$  بالا)، همچنان سودآوری قابل قبولی ایجاد کند. این به دلیل هماهنگی در تصمیمات و جلوگیری از اتلاف منابع است. در ساختار غیرمتمرکز (شکل ۷ج) نیز برای رقابت، به فناوری با بازدهی بسیار بالا ( $\alpha$  بزرگ) نیاز است تا اثرات منفی عدم هماهنگی را جبران کند.

به‌طور کلی استراتژی بهینه سرمایه‌گذاری در اینترنت اشیا تابعی است نه خطی و نه یکنواخت، بلکه تابعی هم‌زمان از اثر فناوری ( $\alpha$ )، هزینه آن ( $\eta$ )، نوع بازار و رفتار مشتریان ( $k$ ) و ساختار تصمیم‌گیری است. برای بازارهایی با  $\alpha$  بالا و  $\eta$  متوسط یا پایین سرمایه‌گذاری در اینترنت اشیا همراه با ساختار دوکاناله متمرکز مناسب‌ترین گزینه است؛ در حالی که در بازارهای با  $\alpha$  بسیار پایین یا  $\eta$  بسیار بالا، حتی در حضور چندکاناله، سرمایه‌گذاری زیاد در اینترنت اشیا توجیه اقتصادی ندارد.

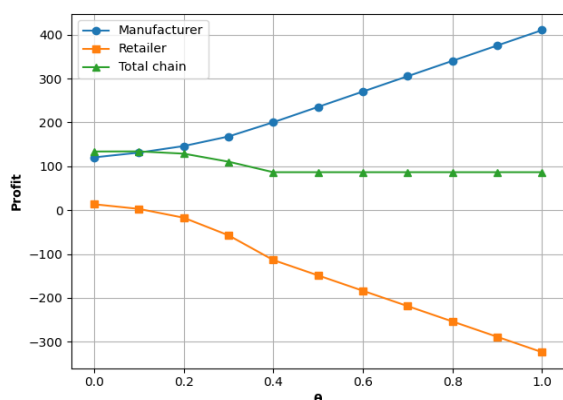
#### ۴-۵. تحلیل اثر پارامتر شکل تابع تقاضا

پارامتر شکل تابع تقاضا یعنی  $k$  که تراکم مشتریان در سطوح مختلف تمایل به پرداخت را نشان می‌دهد، نه تنها یک پارامتر فنی، بلکه شاخصی از نوع و بلوغ بازار محسوب می‌شود.

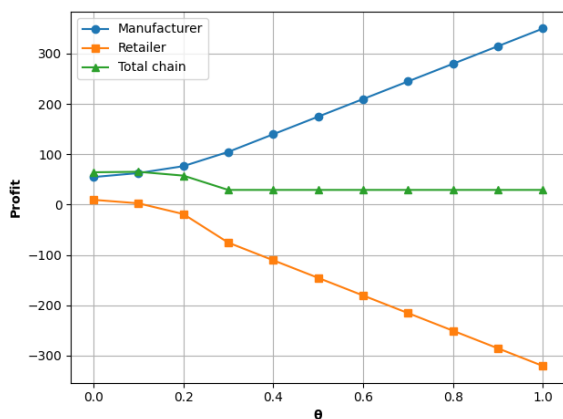
در بازارهای مقعر ( $k < 1$ ) تقاضا نسبت به قیمت کمتر حساس است. این بازارها اغلب یا مربوط به کالاهای ضروری هستند که مشتریان گزینه‌های کمی دارند و یا مشتریان برای محصول ارزش بیشتری قائل هستند یا قدرت خرید بیشتری دارند.

شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهند در این بازارها، منحنی‌های سود ملایم‌تر هستند و شکاف سود بین سناریوها کمترین مقدار خود را دارد. در این بازارها، قدرت چانه‌زنی تولیدکننده بالاست. استراتژی غیرمتمرکز می‌تواند گزینه جذابی باشد، زیرا تولیدکننده می‌تواند بدون از دست دادن سود زیاد، از مزایای فروش خرده‌فروش (دسترسی به

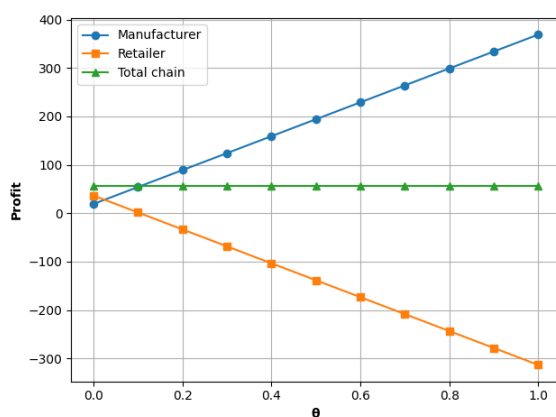
بازار هدف خود به‌دقت برآورد کنند. یک برآورد اشتباه (مثلاً  $k < 1$  در حالی که  $k > 1$  است) می‌تواند منجر به انتخاب یک ساختار نادرست و از دست دادن سود شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۶). تغییرات سود نسبت افزایش  $\theta$  به تفکیک سناریوها در

بازارهای مختلف الف:  $k = 0.5$ ; ب:  $k = 1$ ; ج:  $k = 2$

- سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند: اینترنت اشیا یک تقویت‌کننده است، نه یک معجزه‌گر، مزایای آن در بستر یک ساختار کارآمد (متمرکز) به حداکثر می‌رسد. سرمایه‌گذاری باید مبتنی بر تحلیل دقیق هزینه-فایده ( $\alpha$ ) در مقابل ( $\eta$ ) باشد.

خدمات رقابتی است که در آن مشتریان گزینه‌های متنوع اما نه بی‌نهایتی دارند. در این حالت می‌توان جواب‌های تحلیلی بسته برای متغیرهای بهینه به‌دست آورد. این امر مدل را بسیار شفاف و قابل تحلیل می‌کند. تفاوت سود بین سناریوها آشکار و معنادار است، اما نه به‌شدت بازارهای محدب. شکل (۵ب) به‌وضوح نشان می‌دهد که در این حالت سود ساختار متمرکز از سود غیرمتمرکز و سود غیرمتمرکز از سود تک‌کاناله پیشی می‌گیرد، اما شکاف بین آن‌ها از حالت ( $k = 2$ ) کمتر است. اگرچه سناریوی دوم همچنان از نظر تئوری بهینه است، اما سناریوی سوم نیز با قراردادهای مناسب، قابلیت بقا و رقابت دارد. از آنجا که شکاف سود بین سناریو ۲ و ۳ متوسط است، امکان طراحی قراردادهای هماهنگ‌کننده (مانند قراردادهای اشتراک سود، قیمت‌گذاری دوبخشی، یا تخفیف‌های حجمی) برای نزدیک کردن سود غیرمتمرکز به سود متمرکز وجود دارد.

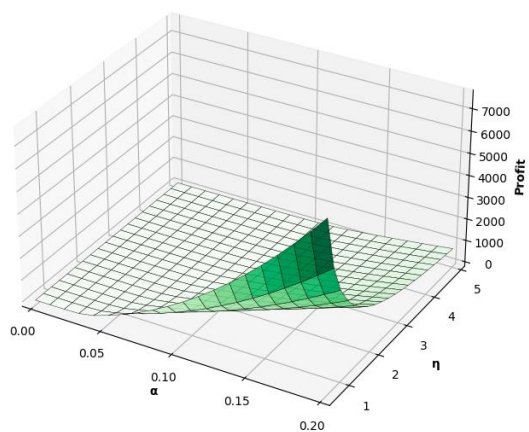
در بازارهای محدب ( $k > 1$ ) تقاضا نسبت به قیمت بسیار حساس است. این بازارها بسیار رقابتی هستند و مشتریان گزینه‌های فراوانی دارند (مثلاً کالاهای لوکس یا دیجیتال) و یا اینکه مشتریان قدرت خرید بالایی ندارند. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش  $k$ ، شکاف سود بین سناریوها به‌طور چشم‌گیری زیاده‌تر می‌شود. در این بازارهای پررقابت و حساس، هر واحد بهینه‌سازی اهمیت حیاتی دارد. ساختار غیرمتمرکز به دلیل عدم هماهنگی هزینه‌های گزافی را تحمیل می‌کند. شکل (۴) نشان می‌دهد سود در سناریوی تک‌کاناله نیز به‌شدت افت می‌کند. بنابراین، سناریوی ۲ یک ضرورت بقا است. اگر یکپارچه‌سازی ممکن نباشد، باید از قراردادهای پیچیده هماهنگ‌کننده (مشارکت سود، قیمت‌گذاری دوبخشی و ...) فراتر از صرف اشتراک هزینه اینترنت اشیا استفاده کرد.

#### ۵-۵. جمع‌بندی مدیریتی و پیشنهادهایی برای عمل

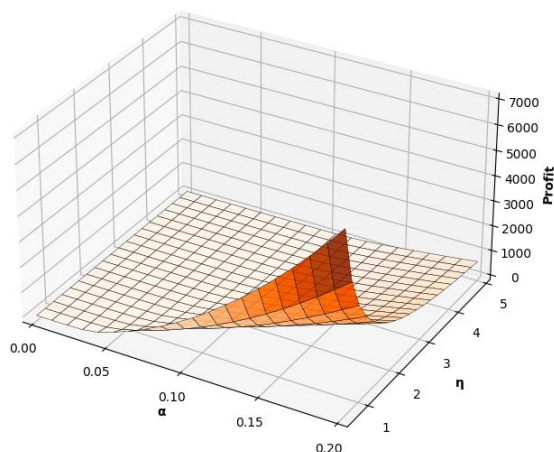
تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، چارچوبی قدرتمند برای درک تعامل پیچیده بین فناوری، رفتار مصرف‌کننده و قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین فراهم می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌ها بر ضرورت نگرشی یکپارچه برای مدیریت در عصر دیجیتال تأکید می‌کنند. در ادامه بینش‌های روشن برای تصمیم‌گیری مناسب در حوزه‌های مختلف تشریح می‌گردد:

- اولویت هماهنگی و یکپارچه‌سازی: مؤثرترین اهرم برای افزایش سود، حرکت از ساختارهای غیرمتمرکز به سمت هماهنگی بیشتر است. این امر می‌تواند از طریق ادغام، ایجاد اتحادهای استراتژیک بلند مدت، یا طراحی قراردادهای هوشمندانه حاصل شود. تصمیمات هماهنگ به‌خصوص در بازارهای بسیار حساس به قیمت برای بهره‌برداری کامل از مزایای فناوری‌های هوشمند ضروری است.

- تشخیص بازار پیش از تعیین استراتژی: پارامتر  $k$  باید به‌عنوان یک شاخص استراتژیک در نظر گرفته شود. در بازارهای حساس و رقابتی ( $k > 1$ ) ریسک ساختارهای ناهماهنگ بسیار بالا است. مدیران باید با استفاده از داده‌های بازار، مقدار  $k$  را برای محصول و



(ب)



(ج)

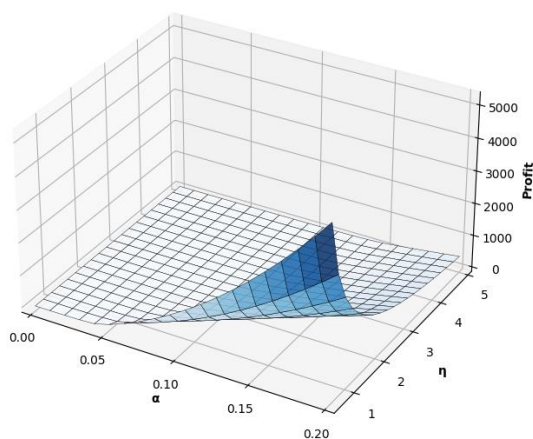
شکل (۷). تغییرات سود نسبت تغییرات  $\alpha$  و  $\eta$  به ازای  $k = 1$  به تفکیک سناریوها (الف سناریو ۱ (ب) سناریو ۲ (ج) سناریو ۳

- نکته قابل توجه دیگر، چالش های مدیریتی پیاده سازی راهبرد قیمت گذاری چندکاناله مبتنی بر اینترنت اشیا در ایران است. نخست، در حوزه ارزیابی و داده های رفتار مصرف کننده، ابزارها و پلتفرم های تولید و به اشتراک گذاری داده های رفتاری و تجربیات مشتریان هنوز دارای محدودیت هایی مثل کیفیت و پوشش داده ها، استاندارد نبودن و عدم یکپارچگی منابع داده هستند که مانع از استفاده گسترده آنها می گردد. در حال حاضر دید و آگاهی، بزرگترین محدودیت بازاریابی در ایران است؛ بنابراین، حتی در صورت دسترسی به داده های حجیم، نبود ظرفیت تحلیلی مناسب و عدم وجود داشبوردهای یکپارچه رفتار مشتری، استفاده مؤثر از داده برای تصمیمات قیمت گذاری و ترفیع دشوار خواهد بود. مدل ارائه شده در این مقاله نشان می دهد چگونه می توان اثر تجمعی داده های رفتار مصرف کننده را در قالب چند پارامتر کلیدی وارد تصمیمات قیمت گذاری کرد؛ با این حال، ناهمگنی و عدم قطعیت داده های واقعی رفتار مشتری در مدل حاضر به صورت میانگین گرفته و قطعی لحاظ شده و توسعه مدل به سمت چارچوب های تصادفی یا فازی، موضوعی مهم برای پژوهش های آتی است.

مدیران باید پیش از اقدام به سرمایه گذاری های کلان، از طریق پروژه های آزمایشی، این دو پارامتر را برای کسب و کار خود کمی سازی کنند.

- حضور در بازارهای سنتی: در بازارهایی با سهم بالای مشتریان سنتی، اتکا به فروش آنلاین - حتی با وجود اینترنت اشیا - ریسک بالایی دارد و راهبرد غالب، حفظ یا تقویت کانال آفلاین در قالب ساختار دوکاناله است. البته در بازارهای دیجیتال با  $(\alpha)$  پایین و حساسیت قیمتی متوسط، تمرکز بر کانال آنلاین و سرمایه گذاری در فناوری می تواند کارا باشد؛ اما در بازارهای سنتی و یا حساسیت بالای قیمتی، حفظ کانال آفلاین برای بهره برداری کامل از مزایای اینترنت اشیا ضروری است. البته یک راه حل جایگزین، می تواند تبدیل تدریجی مشتریان سنتی به دیجیتال باشد.
- طراحی قراردادهای چند بعدی: قرارداد اشتراک هزینه اینترنت اشیا  $(\theta)$  به تنهایی کافی نیست. قراردادهای باید مشوق هایی برای هماهنگی قیمت گذاری و افزایش تقاضای کل ایجاد کنند تا سود همه اعضا افزایش یابد و بازی از حالت حاصل جمع صفر خارج شود. برای ایجاد انگیزه واقعی در خرده فروش برای مشارکت مؤثر، باید قراردادهای را به گونه ای طراحی کرد که سود خرده فروش نیز با افزایش  $\theta$  و سرمایه گذاری بیشتر در اینترنت اشیا، افزایش یابد (مثلاً از طریق کاهش قیمت عمده فروشی درازای افزایش  $\theta$ . این نیازمند مدل سازی بازی های همکارانه است.

به طور کلی، تحلیل های عددی نشان می دهد که انتخاب ساختار بهینه زنجیره و سطح سرمایه گذاری اینترنت اشیا به صورت همزمان به پارامترهای رفتاری  $(k, \gamma)$  و فناوریانه  $(\alpha, \eta, \theta)$  وابسته است. از منظر عملی، مهم ترین یافته این است که ارزیابی درست نوع بازار و ترکیب مشتریان، پیش نیاز تصمیم گیری درباره حذف یا افزودن کانال ها و نیز تعیین سطح سرمایه گذاری فناوری است. تصمیم گیری صرفاً بر مبنای روندهای فناوری یا تقلید از رقبا می تواند به انتخاب ساختاری منجر شود که با ویژگی های بازار سازگار نیست و بخش قابل توجهی از سود بالقوه زنجیره را از بین می برد.



(الف)

ساختارها سودآور بوده و شدت این سودآوری به هماهنگی بین اجزای زنجیره بستگی دارد. روش جستجوی پیشنهادی نیز با استفاده از اعتبارسنجی تحلیلی برای حالت  $k = 1$  به طور کامل تأیید شد.

یافته‌های مقاله نشان می‌دهد که هماهنگی تصمیمات در زنجیره متمرکز بیشترین بهره‌وری را از فناوری اینترنت اشیاء ایجاد می‌کند و در نتیجه سود کل زنجیره در این ساختار بیشترین مقدار را دارد. در زنجیره غیرمتمرکز، تضاد منافع میان تولیدکننده و خرده‌فروش موجب می‌شود که نیاز به قرارداد مناسب برای تقسیم هزینه و منفعت وجود داشته باشد. از سوی دیگر مشاهده شد که اثر پارامترهای  $\alpha$  و  $\eta$  بر سود و تصمیمات قابل توجه بوده و سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء تنها در بازارهایی با جذابیت کافی ( $\alpha$  بالا) و هزینه‌های معقول ( $\eta$  پایین) توجیه اقتصادی دارد.

همچنین تحلیل‌ها تحت تأثیر پارامتر شکل تابع تقاضا، نشان می‌دهد هماهنگی استراتژیک بین سرمایه‌گذاری در فناوری و طراحی ساختار حاکمیت زنجیره، عاملی تعیین‌کننده در سودآوری است. اگرچه ساختار متمرکز چندکاناله به عنوان نقطه ایده‌آل نظری عمل می‌کند، اما در عمل، دستیابی به منافع آن مستلزم طراحی قراردادهای هماهنگ‌کننده در ساختارهای غیرمتمرکز است. این نتایج تأکید می‌کند که ارزیابی صحیح ماهیت بازار (مقعر، خطی یا محدب) پیش‌نیاز هرگونه تصمیم‌گیری در مورد قیمت‌گذاری و سرمایه‌گذاری فناورانه است.

در این پژوهش نسبت مشتریان سنتی (۷) به صورت یک پارامتر برون‌زا و قطعی در نظر گرفته شده است تا اثر ساختار اولیه ترجیحات بازار از اثر تصمیمات قیمت‌گذاری و سرمایه‌گذاری اینترنت اشیاء تفکیک شود. مدل‌سازی غیرقطعی یا درون‌زای این پارامتر می‌تواند به عنوان یکی از مسیرهای توسعه پژوهش در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. همچنین کاربرد موردنظر از اینترنت اشیاء در این پژوهش ارسال پیام‌های شخصی‌سازی شده برای افزایش آگاهی و تمایل به پرداخت مشتریان است و با توجه به اینکه این ابزار مستقل از کانال خرید عمل می‌کند، شدت اثر آن ( $\alpha$ ) در کانال‌های آنلاین و آفلاین یکسان است. با این حال، در کاربردهای دیگر اینترنت اشیاء (مانند ردیابی سفارش) ممکن است اثر این فناوری بر تقاضا در کانال‌های فروش، متفاوت و حتی غیرقطعی باشد که بررسی آن می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، مشابه بسیاری از مدل‌های تحلیلی قیمت‌گذاری، مقدار قیمت مرجع به صورت یک پارامتر برآورد شده در نظر گرفته شد، زیرا در بسیاری از شرایط بازار تغییرات آن در کوتاه مدت محدود و تدریجی است. با این وجود، مدل‌سازی قیمت مرجع به صورت پویا، تابعی از داده‌های گذشته یا غیرقطعی می‌تواند گامی در جهت افزایش واقع‌گرایی مدل در برخی شرایط باشد. مدل‌سازی تقاضای بالقوه به صورت احتمالی یا فازی نیز می‌تواند در برخی شرایط به مدل‌هایی نزدیک‌تر به واقعیت منجر شود.

بررسی قراردادهای مشارکت در هزینه یا درآمد میان تولیدکننده و خرده‌فروش می‌تواند به عنوان یک حوزه کاربردی برای پژوهش‌های

دوم، در حوزه پیاده‌سازی اینترنت اشیاء، پیاده‌سازی موفق سامانه‌ها با مجموعه‌ای از چالش‌های فنی، اقتصادی و سازمانی همراه است و این چالش‌ها برای اجرای موفق، نیازمند توجه ویژه هستند. این چالش‌ها شامل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، پیچیدگی یکپارچه‌سازی سامانه‌های موجود با پلتفرم‌های اینترنت اشیاء، نگرانی‌های حریم خصوصی و امنیت داده و عدم شفافیت در بازگشت سرمایه هستند. مدل این مقاله به طور خاص به یکی از این چالش‌ها، یعنی اقتصاد سرمایه‌گذاری در اینترنت اشیاء و تسهیم منافع و هزینه در زنجیره تأمین می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به شکل تابع تقاضا، ساختار قیمت مرجع و ترکیب مشتریان در کانال‌های مختلف، سطح سرمایه‌گذاری بهینه در اینترنت اشیاء می‌تواند مثبت یا حتی صفر باشد؛ بنابراین، مدل حاضر به مدیران کمک می‌کند تا قبل از پیاده‌سازی، سودآوری احتمالی یک کاربرد مشخص اینترنت اشیاء (مانند ارسال پیامک‌های شخصی‌سازی شده) را ارزیابی و نحوه تسهیم هزینه و منافع آن بین تولیدکننده و خرده‌فروش را طراحی کنند. در عین حال، سایر جنبه‌های اجرایی و فنی پیاده‌سازی (مانند انتخاب زیرساخت، استانداردها و مدیریت تغییر) خارج از دامنه این مدل بوده و نیازمند مطالعات تکمیلی است.

سوم، در حوزه فروش چندکاناله، نبود دید یکپارچه نسبت به رفتار مشتری در کانال‌های مختلف و پیچیدگی یکپارچه‌سازی فرایندها و سامانه‌ها، به ویژه در بستریهایی مانند ایران که با نابرابری زیرساخت‌های دیجیتال و سهم قابل توجه مشتریان سنتی مواجه‌اند، پیاده‌سازی راهبردهای چندکاناله را دشوار می‌سازد. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد که افزایش سهم مشتریان سنتی از یک سو سودآوری فروش آنلاین را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر، اهمیت حفظ و مدیریت هم‌زمان کانال‌های سنتی و مدرن را افزایش می‌دهد. از این منظر، مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزاری تحلیلی برای طراحی راهبرد چندکاناله ترکیبی در شرایطی که مشتریان سنتی و دیجیتال هم‌زمان حضور دارند مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، مدل حاضر تنها بخشی از پیچیدگی‌های چندکاناله بودن (مانند ناهمگنی رفتار مشتری در هر کانال، انتخاب کانال توسط مشتری و محدودیت‌های عملیاتی لجستیک) را در سطح تجمیعی و ایستا لحاظ کرده است و توسعه آن به مدل‌های پویاتر و مطالعه‌های موردی واقعی، مسیر مناسبی برای پژوهش‌های آینده به شمار می‌رود.

## ۶. جمع‌بندی و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، سه ساختار تصمیم‌گیری زنجیره تأمین شامل فروش آنلاین، فروش دوکاناله متمرکز، فروش دوکاناله غیرمتمرکز در حضور یک تابع تقاضای کلی (خطی/غیرخطی) مبتنی بر فناوری اینترنت اشیاء توسعه داده شد و نقش این ویژگی‌ها در عملکرد زنجیره مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که مدل‌های پیشنهادی در برخی حالت‌ها فرم بسته قابل حل نداشتند، یک رویکرد کارآمد برای جستجوی پاسخ بهینه ارائه شد. نتایج حل مدل‌ها نشان داد که اینترنت اشیاء در تمامی

$c_n$  و در نتیجه  $(p_n - c_m - c_n) = \frac{x}{k}$ . با استفاده از این تعریف، مشتقات دوم به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 p_n} &= -(k+1)(1-\gamma)D^0 x^{k-1} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial p_n \partial \rho} &= \frac{\partial^2 \Pi_{SC}^{S_1}}{\partial \rho \partial p_n} = (1-\gamma)D^0 \alpha x^{k-1} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 \rho} &= \alpha^2 (k-1)(1-\gamma)D^0 x^{k-1} - \eta\end{aligned}$$

برای اینکه ماتریس هشین معین منفی باشد، سه شرط زیر باید برقرار باشد.

(۱) شرط  $\frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 p_n} < 0$  چون  $k > 0$  و  $x^{k-1} > 0$  و  $(1-\gamma)D^0 > 0$  هستند، این شرط برقرار است.

(۲) شرط  $\frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 \rho} < 0$  به ازای  $1 < k < 0$  شرط برقرار است، چون  $(k-1) < 0$ . همچنین به ازای  $k=1$ ، حاصل برابر  $-\eta$  می‌شود و در نتیجه شرط برقرار است. اما به ازای  $k > 1$  باید شرط  $x^{k-1} < \frac{\eta}{\alpha^2 (k-1)(1-\gamma)D^0}$  برقرار باشد.

(۳) شرط  $\det(H) > 0$ : دترمینان ماتریس هشین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\det(H) &= \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 p_n} \times \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 \rho} - \left( \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial \rho \partial p_n} \right)^2 \\ \det(H) &= [-(k+1)(1-\gamma)D^0 x^{k-1}] \\ &\quad \times [\eta - (1-\gamma)D^0 \alpha^2 (k-1)x^{k-1}] \\ &= (1-\gamma)D^0 x^{k-1} [\eta(k+1) \\ &\quad - (1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2 x^{k-1}] \\ \text{از آنجایی که } \eta(k+1) - (1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2 x^{k-1} &> 0 \text{ و } \gamma(1-\gamma)D^0 > 0 \text{ هستند، علامت} \\ \text{دترمینان به عبارت داخل کروشه بستگی دارد:} \\ [\eta(k+1) - (1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2 x^{k-1}] &> 0 \\ \Rightarrow x^{k-1} &< \frac{\eta(k+1)}{(1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2}\end{aligned}$$

بنابراین، ماتریس هشین معین منفی است، اگر:

$$\begin{aligned}(1-p_n + \alpha\rho)^{k-1} < \min \left\{ \frac{\eta(k+1)}{(1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2}, \frac{\eta}{(1-\gamma)D^0 \alpha^2 (k-1)} \right\}\end{aligned}$$

با توجه به اینکه ماتریس هشین در نقطه  $(p_n^{S_1}, \rho^{S_1})$  به صورت مشروط و در بخشی از فضای جواب، معین منفی است، پس پاسخ به دست آمده براساس ریشه‌یابی می‌تواند به عنوان یک نقطه داخلی کاندید بهینگی در نظر گرفته شود.

اثبات گزاره ۲. شرط لازم مرتبه اول بهینگی تابع  $\Pi_{SC}^{S_1}$  نسبت به  $p_n$ ،  $p_r$  و  $\rho$  را می‌نویسیم:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi_{SC}^{S_1}}{\partial p_n} &= (1-\gamma)D^0 k[1-p_n + \alpha\rho]^{k-1}[(1-p_n + \alpha\rho) \\ &\quad - k(p_n - c_m - c_n)] = 0 \\ \text{چون } (1-p_n + \alpha\rho)^{k-1} &> 0 \text{، عبارت } (1-\gamma)D^0 [1-p_n + \alpha\rho]^{k-1} \\ &\quad - k(p_n - c_m - c_n) \text{ باید صفر باشد:} \\ (1-p_n + \alpha\rho) - k(p_n - c_m - c_n) &= 0 \\ \Rightarrow p_n^{S_1} &= \frac{1 + k(c_m + c_n) + \alpha\rho}{k+1}\end{aligned}$$

آتی باشد و ساختارهای مختلف تقسیم ریسک و منفعت را تحلیل کنند. همچنین توسعه مدل در محیط‌های رقابتی با وجود چندین تولیدکننده یا پلتفرم آنلاین می‌تواند دید عمیق‌تری از رقابت مبتنی بر اینترنت اشیاء ارائه دهد. بررسی عدم قطعیت در تقاضای بالقوه و هزینه فناوری، گسترش مدل به شبکه‌های چندلایه زنجیره تأمین و تحلیل اثرات چندگانه سرمایه‌گذاری فناوریانه نیز می‌تواند مسیرهای مفید برای ادامه این پژوهش باشد.

## پیوست

اثبات گزاره ۱. برای تعیین پاسخ با استفاده از شرط لازم مرتبه اول بهینگی که همان برابر صفر قرار دادن مشتق مرتبه اول  $\Pi_M^{S_1}$  نسبت به  $p_n$  و  $\rho$  و حل معادلات است، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi_{SC}^{S_1}}{\partial p_n} &= (1-\gamma)D^0 k[1-p_n + \alpha\rho]^{k-1}[(1-p_n + \alpha\rho) \\ &\quad - k(p_n - c_m - c_n)] = 0 \\ \text{چون } (1-\gamma)D^0 [1-p_n + \alpha\rho]^{k-1} &> 0 \text{، عبارت } (1-\gamma)D^0 [1-p_n + \alpha\rho]^{k-1} \\ &\quad - k(p_n - c_m - c_n) \text{ باید صفر باشد:} \\ (1-p_n + \alpha\rho) - k(p_n - c_m - c_n) &= 0 \\ \Rightarrow p_n^{S_1} &= \frac{1 + k(c_m + c_n) + \alpha\rho}{k+1} \\ \frac{\partial \Pi_{SC}^{S_1}}{\partial \rho} &= \alpha k[(1-\gamma)D^0 (p_n - c_m - c_n)[1-p_n + \alpha\rho]^{k-1} - \eta\rho] \\ &= 0 \\ \Rightarrow \rho^{S_1} &= \frac{\alpha k[(1-\gamma)D^0 (p_n - c_m - c_n)[1-p_n + \alpha\rho]^{k-1}]}{\eta}\end{aligned}$$

برای اینکه پاسخ  $(p_n^{S_1}, \rho^{S_1})$  ماکزیمم سراسری باشد، باید شرط کافی مرتبه دوم بهینگی در این نقطه برقرار باشد. برای توابع دو متغیره این شرط معادل معین منفی بودن ماتریس هشین است. برای به دست آوردن ماتریس هشین، مشتقات جزئی دوم تابع سود را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{aligned}H(\Pi_M^{S_1}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial p_n \partial p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial \rho \partial p_n} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial p_n \partial \rho} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial \rho \partial \rho} \end{bmatrix} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 p_n} &= (1-\gamma)D^0 k[1-p_n + \alpha\rho]^{k-2}[(k-1)(p_n - c_m - c_n) - 2(1-p_n + \alpha\rho)] \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial \rho \partial p_n} &= \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial p_n \partial \rho} = (1-\gamma)D^0 \alpha k[1-p_n + \alpha\rho]^{k-2}[(1-p_n + \alpha\rho) - (k-1)(p_n - c_m - c_n)] \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{S_1}}{\partial^2 \rho} &= (1-\gamma)D^0 \alpha^2 k(k-1)(p_n - c_m - c_n)[1-p_n + \alpha\rho]^{k-2} - \eta\end{aligned}$$

با توجه به شرایط مرتبه اول را برای سادگی در تحلیل وضعیت بهینگی تعریف می‌کنیم  $x = (1-p_n + \alpha\rho) = k(p_n - c_m - c_n)$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_r} = -(k+1)\gamma D^0 x_r^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} = (1-\gamma)D^0 \alpha x_n^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_r} = \gamma D^0 \alpha x_r^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 \rho} = \alpha^2 (k-1)[(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 x_r^{k-1}] - \eta$$

برای اینکه ماتریس هشین فوق معین منفی باشد، پنج شرط زیر

باید برقرار باشد:

$$(1) \text{ شرط } \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_n} < 0 \text{ چون } k > 0 \text{ و } x_n^{k-1} > 0 \text{ و } (1-\gamma)D^0 > 0 \text{ هستند، این شرط برقرار است.}$$

$$(2) \text{ شرط } \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_r} < 0 \text{ چون } k > 0 \text{ و } x_r^{k-1} > 0 \text{ و } \gamma D^0 > 0 \text{ هستند، این شرط برقرار است.}$$

$$(3) \text{ شرط } \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 \rho} < 0 \text{ به ازای } 1 < k < 0 \text{ شرط برقرار است چون } (k-1) < 0 \text{ همچنین به ازای } k=1 \text{ حاصل برابر } -\eta \text{ می-شود و شرط برقرار است. اما به ازای } k > 1 \text{ لازم است که شرط } \alpha^2 (k-1)[(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 x_r^{k-1}] < \frac{\eta}{\alpha^2 (k-1)} \text{ برقرار باشد.}$$

$$(4) \text{ شرط } \det(H_r) > 0 \text{ دترمینان طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود و چون } k, x_n^{k-1}, x_r^{k-1} \text{ و } (1-\gamma)D^0 \text{ و } \gamma D^0 \text{ همگی مثبت هستند، حاصل هر گروه به‌تنهایی منفی و حاصل ضرب دو عبارت منفی، مثبت است و شرط برقرار است.}$$

$$\det(H_r) = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_n} \times \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_r} - \left( \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial p_r} \right)^2 = [- (k+1)(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1}] \times [- (k+1)\gamma D^0 x_r^{k-1}] - 0$$

$$(5) \text{ شرط } \det(H_r) < 0 \text{ دترمینان ماتریس هشین از رابطه زیر به‌دست می‌آید:}$$

$$\det(H_r) = \gamma(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} x_r^{k-1} (k+1)[(1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \alpha^2 k^2 x_r^{k-1} - \eta(k+1)]$$

$$\text{از آنجایی که } \gamma(1-\gamma)D^0 > 0, k+1 > 0, x_n^{k-1} > 0 \text{ و } x_r^{k-1} > 0 \text{ هستند، علامت دترمینان به عبارت داخل گروه بسته دارد:}$$

$$[(1-\gamma)D^0 \alpha^2 k^2 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \alpha^2 k^2 x_r^{k-1} - \eta(k+1)] > 0 \Rightarrow (1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 x_r^{k-1} < \frac{\eta(k+1)}{\alpha^2 k^2}$$

بنابراین، ماتریس هشین معین منفی است، اگر:

$$(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 x_r^{k-1} < \min \left\{ \frac{\eta(k+1)}{\alpha^2 k^2}, \frac{\eta}{\alpha^2 (k-1)} \right\}$$

با توجه به اینکه ماتریس هشین در نقطه  $(p_n^{sr}, p_r^{sr}, \rho^{sr})$  به‌صورت مشروط و در بخشی از فضای جواب، معین منفی است، پس پاسخ به‌دست آمده براساس ریشه‌یابی می‌تواند به‌عنوان یک نقطه داخلی کاندید بهینگی در نظر گرفته شود.

$$\frac{\partial \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r} = \gamma D^0 k [1 - p_r + \alpha \rho]^{k-1} [(1 - p_r + \alpha \rho) - k(p_n - c_m - c_r)] = 0$$

$$\text{چون } \gamma D^0 [1 - p_r + \alpha \rho]^{k-1} > 0 \text{ عبارت } (1 - p_r + \alpha \rho) - k(p_n - c_m - c_r) = 0$$

$$\Rightarrow p_r^{sr} = \frac{1 + k(c_m + c_r) + \alpha \rho}{k + 1}$$

$$\frac{\partial \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho} = \alpha k [(1-\gamma)D^0 (p_n - c_m - c_n)[1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} + \gamma D^0 (p_r - c_m - c_r)[1 - p_r + \alpha \rho]^{k-1}] - \eta \rho = 0 \Rightarrow \rho^{sr} = \frac{\alpha k [(1-\gamma)D^0 (p_n - c_m - c_n)[1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} + \gamma D^0 (p_r - c_m - c_r)[1 - p_r + \alpha \rho]^{k-1}]}{\eta}$$

برای اینکه پاسخ  $(p_n^{sr}, p_r^{sr}, \rho^{sr})$  ماکزیمم سراسری باشد، کافی است وضعیت ماتریس هشین از جهت معین منفی بودن بررسی شود. بنابراین مشتقات جزئی دوم تابع سود را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$H(\Pi_{sc}^{sr}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial p_r} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial p_r} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_r} \\ \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial \rho} & \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial \rho} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_n} = (1-\gamma)D^0 k [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-2} [(k-1)(p_n - c_m - c_n) - 2(1 - p_n + \alpha \rho)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial p_n} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial p_r} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_r} = \gamma D^0 k [1 - p_r + \alpha \rho]^{k-2} [(k-1)(p_n - c_m - c_r) - 2(1 - p_r + \alpha \rho)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} = (1-\gamma)D^0 \alpha k [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-2} [(1 - p_n + \alpha \rho) - (k-1)(p_n - c_m - c_n)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_r \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial \rho \partial p_r} = \gamma D^0 \alpha k [1 - p_r + \alpha \rho]^{k-2} [(1 - p_r + \alpha \rho) - (k-1)(p_r - c_m - c_r)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 \rho} = \alpha^2 k (k-1) [(1-\gamma)D^0 (p_n - c_m - c_n)[1 - p_n + \alpha \rho]^{k-2} + \gamma D^0 (p_r - c_m - c_r)[1 - p_r + \alpha \rho]^{k-2}] - \eta$$

با توجه به شرط مرتبه اول برای  $p_n$  و  $p_r$  برای سادگی در تحلیل وضعیت بهینگی  $x_n$  و  $x_r$  را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$x_n = (1 - p_n + \alpha \rho) = k(p_n - c_m - c_n) \Rightarrow (p_n - c_m - c_n) = \frac{x_n}{k}$$

$$x_r = (1 - p_r + \alpha \rho) = k(p_r - c_m - c_r) \Rightarrow (p_r - c_m - c_r) = \frac{x_r}{k}$$

با استفاده از تعاریف فوق، مشتقات دوم به‌صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial^2 p_n} = -(k+1)(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1}$$

$$H(\Pi_M^{sr}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial p_n} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial p_n \partial w} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 w} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial w} \\ \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial \rho} & \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 \rho} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 p_n} = (1 - \gamma) D^0 k [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} [(k-1)(p_n - c_m - c_n) - \gamma(1 - p_n + \alpha \rho)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial p_n} = \frac{\partial^2 \Pi_{sc}^{sr}}{\partial p_n \partial w} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 w} = \gamma D^0 k \left( \frac{k}{k+1} \right)^k [\alpha \rho - c_r - w + 1]^{k-1} [(k-1)(w - c_m) - \gamma(\alpha \rho - c_r - w + 1)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} = (1 - \gamma) D^0 \alpha k [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} [(1 - p_n + \alpha \rho) - (k-1)(p_n - c_m - c_n)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial w} = \gamma D^0 \alpha k [\alpha \rho - c_r - w + 1]^{k-1} [(\alpha \rho - c_r - w + 1) - (k-1)(w - c_m)]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 \rho} = \alpha^2 k (k-1) \left[ (1 - \gamma) D^0 (p_n - c_m - c_n) [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k (w - c_m) [\alpha \rho - c_r - w + 1]^{k-1} \right] - (1 - \theta) \eta$$

با توجه به شرایط مرتبه اول برای  $p_n$  و  $w$ ، برای سادگی در تحلیل وضعیت بهینگی  $x_n$  و  $t$  را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$x_n = (1 - p_n + \alpha \rho) = k(p_n - c_m - c_n) \Rightarrow (p_n - c_m - c_n) = \frac{x_n}{k}$$

$$t = (\alpha \rho - c_r - w + 1) = k(w - c_m) \Rightarrow (w - c_m) = \frac{t}{k}$$

با استفاده از تعاریف فوق، مشتقات دوم به صورت زیر ساده می شوند:

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 p_n} = -(k+1)(1 - \gamma) D^0 x_n^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 w} = -(k+1) \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial p_n \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial p_n} = (1 - \gamma) D^0 \alpha x_n^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial \rho} = \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial \rho \partial w} = \gamma D^0 \alpha t^{k-1}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 \rho} = \alpha^2 (k-1) \left[ (1 - \gamma) D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} \right] - (1 - \theta) \eta$$

برای اینکه ماتریس هشین معین منفی باشد، پنج شرط زیر باید برقرار باشد:

اثبات گزاره ۳. ابتدا شرط لازم مرتبه اول بهینگی تابع سود خرده فروش نسبت به  $p_r$  را می نویسیم:

$$\frac{\partial \Pi_R^{sr}}{\partial p_r} = \gamma D^0 k [1 - p_r + \alpha \rho]^{k-1} [(1 - p_r + \alpha \rho) - k(p_r - c_m - c_r)] = 0 \Rightarrow p_r^{sr} = \frac{1 + k(w + c_r) + \alpha \rho}{k + 1}$$

لازم به ذکر است که شرط مرتبه دوم کافی برای بهینگی برای تابع تک متغیره  $\frac{\partial \Pi_R^{sr}}{\partial p_r} < 0$  به صورت  $\frac{\partial^2 \Pi_R^{sr}}{\partial^2 p_r} < 0$  است. با تعریف  $x_r = (1 - p_r + \alpha \rho) = k(p_r - c_m - c_r)$  عبارت فوق به صورت  $\frac{\partial^2 \Pi_R^{sr}}{\partial^2 p_r} = -(k+1) \gamma D^0 x_r^{k-1}$  ساده می شود که همواره منفی است. پس نقطه به دست آمده  $p_r^{sr}$  شرط لازم و کافی ماکزیمم سراسری را دارد.

سپس قیمت بهینه خرده فروش را در تابع سود تولیدکننده جایگذاری می کنیم، و خواهیم داشت:

$$\Pi_M^{sr}(p_n, w, \rho) = (p_n - c_m - c_n)(1 - \gamma) D^0 [1 - p_n + \alpha \rho]^k + (w - c_m) \gamma D^0 \left[ 1 - \left( \frac{k(\alpha \rho - c_r - w + 1)}{(k+1)} \right)^k - \frac{(1 - \theta)}{\gamma} \eta \rho^2 \right]$$

حال شرط لازم مرتبه اول بهینگی تابع سود تولیدکننده نسبت به  $p_n$ ،  $w$  و  $\rho$  را می نویسیم:

$$\frac{\partial \Pi_M^{sr}}{\partial p_n} = (1 - \gamma) D^0 k [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} [(1 - p_n + \alpha \rho) - k(p_n - c_m - c_n)] = 0 \Rightarrow p_n^{sr} = \frac{1 + k(c_m + c_n) + \alpha \rho}{k + 1}$$

$$\frac{\partial \Pi_M^{sr}}{\partial w} = \gamma D^0 k \left[ 1 - \left( \frac{k(\alpha \rho - c_r - w + 1)}{(k+1)} \right)^{k-1} [(\alpha \rho - c_r - w + 1) - k(w - c_m)] \right] = 0 \Rightarrow w^{sr} = \frac{1 + k(c_m - c_r) + \alpha \rho}{k + 1}$$

$$\frac{\partial \Pi_M^{sr}}{\partial \rho} = \alpha k \left[ (1 - \gamma) D^0 (p_n - c_m - c_n) [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k (w - c_m) [\alpha \rho - c_r - w + 1]^{k-1} \right] - (1 - \theta) \eta \rho$$

$$\Rightarrow \rho^{sr} = \frac{\alpha k \left[ (1 - \gamma) D^0 (p_n - c_m - c_n) [1 - p_n + \alpha \rho]^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k (w - c_m) [\alpha \rho - c_r - w + 1]^{k-1} \right]}{(1 - \theta) \eta}$$

برای اینکه پاسخ  $(p_n^{sr}, w^{sr}, \rho^{sr})$  ماکزیمم سراسری باشد، باید شرط کافی مرتبه دوم بهینگی در این نقطه برقرار باشد. بنابراین درایه های ماتریس هشین را به صورت زیر محاسبه می کنیم:

## مراجع

- [1] Chen, J., Bell, P.C. (2012). Implementing market segmentation using full-refund and no-refund customer returns policies in a dual-channel supply chain structure. *International Journal of Production Economics*, 136(1): 56-66.
- [2] Pan, X.Y., Ma, J.Z., Wu, C.X. (2019). Product pricing considering the consumer preference based on Internet of Things. *Cluster Computing*, 22(6): 15379-15385.
- [3] [3] Liu, P., Zhang, Z., Dong, F.Y. (2022). Subsidy and pricing strategies of an agri-food supply chain considering the application of Big Data and blockchain. *RAIRO-Operations Research*, 56(3): 1995-2014.
- [4] Sima, V., Gheorghe, I.G., Subić, J., Nancu, D. (2020). Influences of the industry 4.0 revolution on the human capital development and consumer behavior: A systematic review. *Sustainability*, 12(10): 4035.
- [5] Debo, L.G., Toktay, L.B., Van Wassenhove, L.N. (2005). Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products. *Management Science*, 51(8): 1193-1205.
- [6] Ma, D., Hu, J. (2020). Research on collaborative management strategies of closed-loop supply chain under the influence of big-data marketing and reference price effect. *Sustainability*, 12(4): 1685.
- [۷] میرباقری، فاطمه؛ محمدیان، ایوب؛ خانلری، امیر (۱۳۹۸). شناسایی و طبقه‌بندی کاربردهای نوآورانه اینترنت اشیاء در بازاریابی دیجیتال. مدیریت بازرگانی، شماره ۱۱ (۴)، ۷۱۹ - ۷۴۱.
- [8] Ling, Y., Xu, J. (2021). Price and greenness competition between duopoly firms considering consumer premium payments. *Environment, Development & Sustainability*, 23(3).
- [9] Xu, L., Peng, Q., Chen, J., Wang, C. (2021). Government subsidies in manufacturing and remanufacturing with consumer segment and heterogeneous demand. *Scientia Iranica*, 28(3): 1817-1829.
- [10] Zhang, Y., Zhang, W. (2023). Optimal pricing and greening decisions in a supply chain when considering market segmentation. *Annals of Operations Research*, 324(1): 93-130.
- [11] Cheng, Y., Wang, J. (2024). Decision-Making in Remanufacturing Supply Chains: Game Theory Analysis of Recycling Models and Consumer Value Perception. *Sustainability*, 16(23): 10476.
- [۱۲] ستونه، شایان؛ شیخ سجادی، محسن؛ زیاری، متینه (۱۴۰۲). مدل‌سازی و تحلیل استراتژی‌های قیمت‌گذاری و نوآوری در توسعه محصول با مشتریان ناهمگن و سیاست‌های دوگانه، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ۹۵-۱۱۷.
- [13] Chen, K., Zha, Y., Alwan, L.C., Zhang, L. (2020). Dynamic pricing in the presence of reference price effect and consumer strategic behaviour. *International Journal of Production Research*, 58(2): 546-561.
- [14] Wei, Y., Li, F. (2020). Omnichannel supply chain operations for luxury products with conspicuous consumers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 137: 101918.
- [۱۵] عابدینی ندوشن، شایسته؛ اقبالی، محمدعلی؛ راستی برزکی، مرتضی (۱۴۰۳). یک رویکرد نظریه بازی برای قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین دوکاناله با در نظر گرفتن خدمات لجستیک، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۲، شماره ۲۴، ۱۱۵-۱۳۱.
- [۱۶] جعفری، حامد و حقیقی، محمدحسین (۱۴۰۰). تصمیمات قیمت‌گذاری و خدمات خرده‌فروشی در زنجیره تأمین شامل یک

(۱) شرط  $\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 p_n} < 0$  چون  $k > 0$  و  $x_n^{k-1} > 0$  و  $(1-\gamma)D^0 > 0$  هستند، این شرط برقرار است.

(۲) شرط  $\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 w} < 0$  چون  $k > 0$  و  $t^{k-1} > 0$  و  $\gamma D^0 > 0$  هستند، این شرط برقرار است.

(۳) شرط  $\frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 \rho} < 0$  به ازای  $0 < k < 1$  شرط برقرار است، چون  $0 < (k-1)$ . به ازای  $k=1$ ، حاصل برابر  $-\eta$  می‌شود و در نتیجه شرط برقرار است. اما به ازای  $k > 1$  لازم است که شرط  $\alpha^r(k-1) \left[ (1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} \right] < \frac{(1-\theta)\eta}{\alpha^r(k-1)}$  برقرار باشد.

(۴) شرط  $\det(H_r) > 0$ : دترمینان از رابطه زیر محاسبه می‌شود و چون  $k$ ،  $x_n^{k-1}$ ،  $t^{k-1}$ ،  $(1-\gamma)D^0$  و  $\gamma D^0$  همگی مثبت هستند، حاصل هر گروه به تنهایی منفی و حاصل ضرب دو عبارت منفی، مثبت است و شرط برقرار است.

$$\det(H_r) = \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 p_n} \times \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial^2 w} - \left( \frac{\partial^2 \Pi_M^{sr}}{\partial w \partial p_n} \right)^2 = [-(k+1)(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1}] \times \left[ -(k+1)\gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} \right] - .$$

(۵) شرط  $\det(H_r) < 0$ : دترمینان ماتریس هشین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\det(H_r) = \gamma(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} t^{k-1} (k + 1) \alpha^r k^r \left[ (1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} - \eta(1-\theta)(k+1) \right]$$

از آنجایی که  $\gamma(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} t^{k-1}$  و  $k+1$ ،  $\alpha^r k^r$  و  $t^{k-1}$  همگی مثبت هستند، علامت  $\det(H_r)$  فقط به عبارت داخل گروه بستگی دارد:

$$(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} - \eta(1-\theta)(k+1) < 0 \Rightarrow (1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} < \frac{\eta(1-\theta)(k+1)}{\alpha^r k^r}$$

بنابراین، ماتریس هشین معین منفی است، اگر:

$$(1-\gamma)D^0 x_n^{k-1} + \gamma D^0 \left( \frac{k}{k+1} \right)^k t^{k-1} < \min \left\{ \frac{\eta(1-\theta)(k+1)}{\alpha^r k^r}, \frac{\eta}{\alpha^r(k-1)} \right\}$$

با توجه به اینکه ماتریس هشین در نقطه  $(p_n^{sr}, p_r^{sr}, w^{sr}, \rho^{sr})$  به صورت مشروط و در بخشی از فضای جواب، معین منفی است، پس پاسخ به دست آمده براساس ریشه‌یابی می‌تواند به عنوان یک نقطه داخلی کاندید بهینگی در نظر گرفته شود.

- chains. In Smart and Sustainable Supply Chain and Logistics—Trends, Challenges, Methods and Best Practices, 1: 381-394.
- [29] Ben-Daya, M., Hassini, E., Bahroun, Z., Saeed, H. (2023). Optimal pricing in the presence of IoT investment and quality-dependent demand. *Annals of Operations Research*, 324(1): 869-892.
- [30] Dey, S.K., Kundu, K., Das, P. (2024). Digital technology based game-theoretic pricing strategies in a three-tier perishable food supply chain. *Annals of Operations Research*, 1-27.
- [31] Hassini, E., Ben-Daya, M., Bahroun, Z. (2025). Modeling the impact of IoT technology on food supply chain operations. *Annals of Operations Research*, 348(3): 1619-1648.
- [32] De Giovanni, P. (2020). "Digital supply chain through IoT, design quality, and circular economy" in *Dynamic quality models and games in digital supply chains: how digital transformation impacts supply chain quality management*, 1<sup>st</sup> Edition, Springer Nature Switzerland, 57-89.
- [33] Ma, S., Li, G., Liu, M. (2021). Procurement competition in the presence of IoT-enabled B2B E-commerce. *Electronic Commerce Research and Applications*, 49: 101091.
- [34] He, L., Bai, W., Lin, X., Yue, X. (2025). Differentiated Pricing and Channel Configuration in Blockchain-Enabled Sustainable Platform Supply Chains. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72: 4155-4170.
- [35] Ye, C., Weng, S., Zhang, X. (2025). Research on low carbon collaborative strategy of supply chain under blockchain information-sharing mechanism. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6): 4655-4670.
- [36] Nozari, H., Abdi, H., Szmelter-Jarosz, A., Motevalli, S.H. (2024). Design of dual-channel supply chain network based on the internet of things under uncertainty. *Mathematical and Computational Applications*, 29: 1-28.
- [37] Zhang, Y., Liu, N. (2021). Optimal internet of things technology adoption decisions and pricing strategies for high-traceability logistics services. *Sustainability*, 13(19): 10597.
- [38] Boyd, S., Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*, 1<sup>st</sup> Edition, Cambridge University Press.
- [39] Brent, R. P. (1973). *Algorithms for Minimization without Derivatives*, 1<sup>st</sup> Edition, Prentice-Hall.
- [40] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 3<sup>rd</sup> Edition, Cambridge University Press.
- [41] Fletcher, R. (1987). *Practical Methods of Optimization*, 1<sup>st</sup> Edition, John Wiley.
- تولیدکننده و یک خرده‌فروش با استفاده از رویکرد نظریه بازی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۹، شماره ۱۹، ۱۳۵-۱۲۵.
- [17] Zhang, M., Ying, S., Xu, X. (2023). Dual-Channel Supply Chain Coordination with Loss-Averse Consumers. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1: 3172590.
- [18] Dai, L., Shu, T., Zheng, Y., Wang, S. (2024). Models for dual-channel remanufacturing supply chain with reference price effect under static and dynamic games. *RAIRO-Operations Research*, 58 (5):4437-4475.
- [19] Yan, B., Wu, X. H., Ye, B., Zhang, Y.W. (2017). Three-level supply chain coordination of fresh agricultural products in the Internet of Things. *Industrial Management & Data Systems*, 117(9): 1842-1865.
- [20] Jena, S.K., Singhal, D. (2023). Optimizing the competitive sustainable process and pricing decision of digital supply chain: A power-balance perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 177: 109054.
- [21] Wang, D., Tian, X., Guo, M. (2024). Pricing decision and channel selection of fresh agricultural products dual-channel supply chain based on blockchain. *Plos one*, 19(3): 0297484.
- [22] Xia, L., Wang, L., Xiao, R., Wang, J., Hou, P. (2025). Blockchain and pricing strategies in supply chains considering consumer traceability preference and power structure. *International Journal of Production Research*, 1-20.
- [۲۳] محمدی پور، پوریا؛ فاروقی، هیوا؛ رسائی، حسن (۱۴۰۳). برنامه‌ریزی توأم نگهداری تعمیرات و تولید مبتنی بر شرایط در یک سیستم با افق برنامه‌ریزی محدود و تقاضا از پیش تعیین‌شده، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، دوره ۱۲، شماره ۲۵، ۴۵-۳۱.
- [24] Yang, Z., Pan, R. (2024). Pricing and coordination strategy of product service supply chain under digital transformation. *IEEE Access*.
- [25] Zhang, X., Zhang, X. (2020). IoT-enabled SmartGreen Products: Environmental Awareness, Network Externality and Competition. *Twenty-Fourth Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, Dubai, UAE.
- [26] Zhang, X., Yue, W.T. (2019). Transformative value of the Internet of Things and pricing decisions. *Electronic Commerce Research and Applications*, 34: 100825.
- [27] Zhao, S., Li, W. (2023). Blockchain-based traceability system adoption decision in the dual-channel perishable goods market under different pricing policies. *International Journal of Production Research*, 61(13): 4548-4574.
- [28] Bahroun, Z., Ben-Daya, M., & Hassini, E. (2020). IoT quality-controlled demand pricing model in food supply



## Omnichannel Pricing with Reference Price and IoT Effects: A General-Demand Function Curve and Analytical- Numerical Framework

Fatemeh Ghavidel<sup>1</sup>, Rashed Sahraeian<sup>\*2</sup>

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

2. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 2025/10/29

Revised 2026/02/06

Accepted 2026/02/11

#### *Keywords:*

Omnichannel Pricing, Internet of Things (IoT),  
Reference Price,  
Customer Behavior,  
Linear/Nonlinear Demand  
Function  
Supply Chain Planning.

### ABSTRACT

This study proposes an integrative framework for examining how reference pricing, Internet of Things (IoT) technologies, customer behavioral responses, and omnichannel structures jointly influence pricing decisions. The analysis focuses on a two-echelon supply chain comprising a manufacturer and a retailer. The demand function has a general form—allowing for linear, convex, and concave specifications—to enable a nuanced investigation of customer behavior under different market conditions. Beyond price, demand is shaped by the level of IoT investment, as IoT technologies enhance perceived service quality and, through reference price effects, strengthen customers' willingness to pay. Three decision-making scenarios are evaluated: single-channel, centralized omnichannel, and decentralized omnichannel selling. For the linear demand case, the closed-form optimal pricing and investment solutions are derived; for nonlinear demand settings, an efficient search-based algorithm is employed. The findings indicate that IoT investments, particularly when combined with omnichannel retailing strategies, substantially increase supply chain profitability. Sensitivity analyses with respect to behavioral and technological parameters further yield actionable managerial insights for designing effective pricing policies and optimizing IoT investment decisions.

\* Corresponding author. R. Sahraeian  
Tel.: 021-51212040; E-mail address: [Sahraeian@shahed.ac.ir](mailto:Sahraeian@shahed.ac.ir)