

# هماهنگی اعضاء زنجیره‌ی تأمین سوخت‌زیستی با در نظر گرفتن سطح فناوری کشاورزان و شرکت خدمات حمایتی کشاورزی

فرخنده اکبری (کارشناس ارشد)

سعید یعقوبی\* (دانشیار)

حمیده بهرامی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

مهندسی صنایع و مدیریت، (زمستان ۱۴۰۳)  
دوره ۴۰، شماره ۲، صص. ۳۰-۵۶، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، ارتباط اعضاء زنجیره‌ی تأمین انرژی‌زیستی، شامل کشاورزهای (الف) و (ب) به ترتیب به‌عنوان نمایندگان کشاورزان روستایی و مدرن، شرکت کشاورزی، و پالایشگاه در حالت همکاری و عدم همکاری بررسی شده است. کشاورزان در زمینه‌ی سطح فناوری استفاده‌شده و قیمت زیست‌توده، شرکت کشاورزی در مورد مقدار سفارش اولیه، و پالایشگاه نیز بر روی قیمت نهایی سوخت‌زیستی تصمیم می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که همکاری با شرکت کشاورزی منجر به افزایش سطح فناوری و سود کشاورز شده است. در حالی که قیمت فناوری کشاورز (ب) کاهش یافته است، اما با تقبل بخشی از هزینه‌های عملیات توسط شرکت، سود نهایی کشاورز افزایش یافته است. همچنین، تسهیم درآمد پالایشگاه با شرکت، موجب افزایش سفارش اولیه‌ی زیست‌توده و قیمت سوخت‌زیستی شده است. پژوهش حاضر نشان می‌دهد استفاده از قراردادهای همکاری میان اعضاء زنجیره‌ی تأمین مذکور و همچنین دخالت شرکت کشاورزی در زمینه‌ی ارتقاء سطح فناوری می‌تواند در راستای ارتقاء سود اعضا و سطح فناوری مؤثر باشد.

fa\_akbari@ind.iust.ac.ir  
yaghoubi@iust.ac.ir  
hamideh\_bahrami@ind.iust.ac.ir

**واژگان کلیدی:** زنجیره‌ی تأمین انرژی‌زیستی، قرارداد همکاری، نظریه‌ی بازی، شرکت خدمات حمایتی کشاورزی.

## ۱. مقدمه

آلودگی زیست‌محیطی حاصل از مصرف بی‌رویه‌ی سوخت‌های فسیلی و همچنین، فجایع طبیعی چون آتش‌سوزی، موجب انتشار بیش از حد گاز CO<sub>2</sub> و سایر گازهای گلخانه‌ای شده است و در نتیجه؛ عواقب جبران‌ناپذیری برای نسل‌های بعدی باقی خواهد گذاشت. بنابراین، در عصر حاضر لازم است تا جوامع مختلف به منابع انرژی جایگزین که قابلیت تجدیدپذیری با عمر طولانی داشته باشند، روی آورند و در این زمینه، مطالعات، پژوهش‌ها، و سرمایه‌گذاری خود را توسعه دهند. انرژی‌زیستی، یکی از منابع متنوع موجود برای تأمین تقاضای انرژی است، که به‌عنوان انرژی تجدیدپذیر از سوخت‌زیستی<sup>۱</sup> تأمین می‌شود. سوخت‌زیستی نیز از مواد آلی زنده که با نام زیست‌توده<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند، گرفته شده است و می‌تواند برای تولید سوخت‌های حمل‌ونقل، گرما، برق، و محصولات آن استفاده شود.<sup>۳</sup> منابع زیست‌توده را به‌طور کلی می‌توان به دو دسته‌ی زمینی و آبی تقسیم کرد، که زیست‌توده از نوع زمینی، خود شامل دو دسته است: گروه اول، شامل محصولات غذایی و مورد مصرف انسان،

امروزه انرژی، زیرمجموعه‌ای از نظام اقتصادی و اجتماعی است، که تأثیر زیادی در فرایند توسعه‌ی اقتصادی می‌گذارد. اهمیت اقتصادی انرژی به‌دلیل اشتغال‌زایی، افزایش درآمدهای ناشی از مبادله‌های تجاری انرژی، نقش عمده‌ی آن در بخش‌های تولیدی و خدماتی و همچنین، ایجاد تعامل‌های گسترده‌ی سیاسی، اقتصادی، و... است.<sup>۱</sup> به‌طور کلی منابع تأمین انرژی به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر قابل تقسیم هستند. امروزه با وجود اینکه منابع فسیلی ارزان و دستیابی به آن‌ها آسان‌تر است، اما با به‌کارگیری بی‌رویه‌ی منابع فسیلی توسط جوامع صنعتی، منابع زیرزمینی مذکور در آینده‌ی نه‌چندان دور به اتمام خواهند رسید. از طرف دیگر، نرخ رشد جمعیت، موجب افزایش فشار بر منابع تأمین‌کننده‌ی انرژی، از جمله: منابع فسیلی، اختلال در امنیت انرژی، تغییرات آب‌وهوایی، و افزایش بهای انرژی و غذا خواهد شد.<sup>۲</sup> از سویی، افزایش جمعیت،

\*نویسنده مسئول

تاریخ‌دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷، تاریخ‌اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶، تاریخ‌پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸.

استناد به این مقاله:

اکبری، فرخنده، یعقوبی، سعید، بهرامی، حمیده، ۱۴۰۳. هماهنگی اعضاء زنجیره‌ی تأمین سوخت‌زیستی با در نظر گرفتن سطح فناوری کشاورزان و شرکت خدمات حمایتی کشاورزی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۰(۲)، صص. ۳۰-۵۶. DOI: 10.24200/J65.2023.61662.2335

<sup>۱</sup> Biofuel

<sup>۲</sup> Biomass

عوامل رقابتی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:<sup>[۶]</sup> (۱) عوامل مربوط به قیمت، مانند: قیمت محصول، مقدار تولید، و میزان موجودی در انبار؛ و (۲) عوامل غیرمرتبط با قیمت، مانند: تبلیغات، خدمات پس از فروش، و کیفیت محصول. بنابراین، ایجاد همانگی میان اعضا می‌تواند در عوامل مذکور و تصمیم‌گیری اعضا در مورد آن‌ها تأثیرگذار باشد. لذا با توجه به اهمیت همانگی میان اعضا زنجیره، در اینجا به مفاهیم همانگی و نظریه‌ی بازی پرداخته شده است:

همانگی در مسئله‌هایی تعریف می‌شود که بیش از یک سطح از زنجیره‌ی تأمین در دست بررسی باشد. به عبارت دیگر، از آنجایی که یک زنجیره‌ی تأمین، شامل: تأمین‌کننده، تولیدکننده، خرده‌فروش، مصرف‌کننده، و مشتری نهایی، دولت و غیره است و هر یک می‌توانند اهداف متضاد با سایرین داشته باشند؛ بنابراین برای کمک به تصمیم‌گیری در مسائل مربوط به حوزه‌ی اخیر، استفاده از نظریه‌ی بازی، راه‌حل مناسبی به نظر می‌رسد؛ که می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری در تصمیم‌گیری و در نهایت سود زنجیره شود. بنابراین، مدل‌های همانگی به دنبال یافتن راه‌حلی هستند که اعضا مستقل یک زنجیره‌ی تأمین قانع شوند، تا مشابه با حالتی که زنجیره‌ی تأمین به صورت متمرکز<sup>۴</sup> اداره می‌شود، تصمیم‌گیری کنند. این تذکر لازم است که با وجود برقراری شرط ذکر شده، ممکن است سود یکی از اجزاء زنجیره، در حالت متمرکز کمتر از حالت غیرمتمرکز خود شده باشد؛ بنابراین، حاضر به همانگی با سایر اعضا نباشد. لذا لازم است قراردادهایی جهت ترغیب آن تنظیم شود، که به گرفتن تصمیم‌های حالت متمرکز روی آورد. به عبارت دیگر لازم است از قراردادهای زنجیره‌ی تأمین به‌گونه‌ی استفاده شود که هر دو طرف راضی باشند و تا حد امکان به سود حالت متمرکز برسند.<sup>[۷]</sup>

در راستای مفاهیم همانگی، نظریه‌ی بازی، شاخه‌ای از ریاضیات کاربردی است، که در آن برای بیان رفتار و تعامل راهبردی میان تصمیم‌گیران از مدل ریاضی استفاده می‌شود. در حقیقت، زمانی که موفقیت یک فرد به راهبردهای سایر بازیکنان وابسته باشد، از نظریه‌ی ریاضی جهت یافتن راهبرد بهینه برای بازیکنان استفاده می‌شود. مدل‌های نظریه‌ی بازی را می‌توان از جنبه‌های متفاوتی بررسی و دسته‌بندی کرد. از جمله دسته‌بندی‌ها می‌توان به بازی همکارانه و غیرهمکارانه<sup>۵</sup> اشاره کرد. در بازی‌های همکارانه، رقابتی بین بازیکنان وجود ندارد و شرکت‌کنندگان تمایل دارند تا به توافق‌های مشترک برسند. دو احتمال برای بازی‌های همکارانه، شامل رویکرد چانه‌زنی - قراردادهای و رویکرد ائتلاف وجود دارد. در بازی‌های غیرهمکارانه، بازیکنان رقیب یکدیگر هستند و بین آن‌ها تضاد و اختلاف وجود دارد. در واقع، در بازی‌های غیرهمکارانه، هر یک از اعضا یک راهبرد را دنبال می‌کنند و هر یک از رقبای سعی در بیشینه‌سازی سود خود بدون توجه به سود رقیب دارد. از نظر تعادل در بازی نیز مهم‌ترین مفاهیم مربوط به نظریه‌ی بازی، تعادل نش<sup>۶</sup> و تعادل استکلبرگ<sup>۷</sup> هستند، که کاربرد فراوانی در اقتصاد نیز پیدا کرده‌اند.

در مدیریت زنجیره‌ی تأمین، هدف هماهنگ‌سازی<sup>۸</sup> هر یک از بخش‌ها در زنجیره، تولید و توزیع محصول با کیفیت و با قیمت مناسب به مشتری است؛

از جمله: دانه‌ی ذرت، نیشکر، سویا، دانه‌های روغنی و غیره، که سرشار از قند یا لیپید هستند، و پس از تبدیل به اتانول زیستی یا دیزل زیستی، بازدهی بالایی دارند. در حال حاضر، بیشتر سوخت‌های زیستی از مواد اولیه‌ی اخیر ساخته می‌شوند، چرا که فناوری تولید آن نسبت به سایر گروه‌ها پیشرفته‌تر بوده و در نتیجه، هزینه‌ی واحد تولید سوخت از آن‌ها کمتر است.<sup>[۴]</sup> این گروه با نام سوخت زیستی نسل اول<sup>۱</sup> نیز شناخته می‌شوند. گروه دوم، به عنوان زیست‌توده‌ی سلولزی، می‌تواند از آثار منفی در زنجیره‌ی تأمین غذا جلوگیری کند، زیرا مواد خوراکی غیرنشاسته‌ای، غیرخوراکی و غیرغذایی را شامل می‌شوند. مواد اولیه‌ی سلولزی زیست‌توده را می‌توان از منابع مختلفی مانند بقایای کشاورزی، بقایای جنگل، و محصولات انرژی‌زا به دست آورد. بقایای کشاورزی، معمولاً قسمت‌هایی از گیاه هستند که پس از برداشت در مزرعه باقی می‌مانند. با وجود اینکه منابع ذکر شده، مسئله‌ی غذایی را تا حدودی حل می‌کنند و بازدهی بیشتری از نظر بهره‌وری برای تولید سوخت دارند، اما فرآیند تولید سوخت دشوارتر و پرهزینه‌تر می‌شود.<sup>[۴]</sup> این گروه با نام سوخت زیستی نسل دوم<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شوند.

از سوی دیگر، امروزه با توجه به پیچیدگی بازارها و رشد سریع روابط و تعامل میان افراد، تغییرات فناوری و تغییر سبک زندگی و همچنین، نحوه‌ی تقاضای خدمات و محصولات، توجه به طول عمر محصولات و زمان پاسخگویی به مشتریان و از طرف دیگر، افزایش انعطاف‌پذیری موجب اهمیت زنجیره‌ی تأمین برای بقای سازمان‌ها و شرکت‌ها شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت زنجیره‌ی تأمین، سیستمی متشکل از سازمان‌ها و افراد است، که میان فعالیت‌ها و فرایندها، اطلاعات، منابع پولی و همچنین، جریان فیزیکی کالا و خدمات، ارتباط برقرار می‌کند، تا در نهایت بتواند کالا و یا خدمت مورد نظر را از عرضه‌کننده به مشتری نهایی برساند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اجرای تمامی مراحل نمی‌تواند به عهده‌ی یک عضو زنجیره باشد. مدیریت زنجیره‌ی تأمین، عبارت است از: برنامه‌ریزی و مدیریت کلیه‌ی فعالیت‌های مربوط به تهیه و تدارکات، تغییر و تبدیل، کلیه‌ی فعالیت‌های مدیریت لجستیک، و مهم‌تر از همه، ایجاد همانگی و همکاری میان اعضا، شامل: تأمین‌کنندگان، واسطه‌ها، و مشتریان. در واقع، مدیریت زنجیره‌ی تأمین، مدیریت عرضه و تقاضای درون و بین شرکت‌ها را یکپارچه می‌سازد.<sup>[۵]</sup> از طرف دیگر، در چند دهه‌ی اخیر، با توجه به پیشرفت سریع فناوری، رشد جمعیت و تقاضا، توسعه و افزایش سازمان‌ها در حوزه‌ها و محصولات مختلف، رقابت در زنجیره‌ی تأمین برای هر یک از آن‌ها مفهوم پیدا کرده است، چرا که مایل‌اند با راهبردهای مناسب، به جذب مشتریان جدید و حفظ مشتریان فعلی بپردازند. همچنین، ایجاد ارتباط با سایر رقبای جهت کسب سود بیشتر در دنیای تجارت امروز، امری اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر آن، به دلیل تأثیرگذاری قدرت طرفین در رفتار ذکر شده و نوع همانگی و قرارداد بین آن‌ها، بررسی مفهوم رقابت و همانگی در زنجیره‌ی تأمین و همچنین، نحوه‌ی بازی و راهبرد<sup>۳</sup> هر یک از طرفین اهمیت بسزایی دارد؛ بنابراین مطالعات و پژوهش‌ها در زمینه‌ی اخیر رو به افزایش است. از نظر دسته‌بندی رقابت، طبق ادبیات مربوط به زنجیره‌ی تأمین،

<sup>۵</sup> Cooperative and Non-cooperative

<sup>۶</sup> Nash Equilibrium

<sup>۷</sup> Stackelberg Equilibrium

<sup>۸</sup> Simultaneous

<sup>۱</sup> First generation biofuel

<sup>۲</sup> Second generation biofuel

<sup>۳</sup> strategy

<sup>۴</sup> Centralized

چرا که فعالیت‌های هر یک از بخش‌ها در انجام مناسب فعالیت‌های بخش‌های دیگر به شدت تأثیرگذار است.<sup>[۸]</sup> نظریه‌ی هماهنگی، دامنه‌ی وسیعی از مباحث و جنبه‌های مختلف ارتباط میان اعضاء زنجیره‌ی تأمین را بیان می‌کند. هماهنگی میان اعضاء زنجیره‌ی غیرمتمرکز را می‌توان با استفاده از مکانیزم‌های هماهنگی و از طریق ایجاد انگیزه در اعضاء زنجیره ایجاد کرد، به نحوی که در بهینه‌سازی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین مشارکت کنند. قراردادهای زنجیره‌ی تأمین به‌عنوان ابزاری برای هماهنگی در رابطه‌ی تجاری بین دو یا چند شرکت‌کننده‌ی مستقل در زنجیره‌ی تأمین استفاده می‌شود.<sup>[۹]</sup> هماهنگی اعضاء زنجیره‌ی تأمین انرژی‌زیستی نیز از جمله موضوعات مهم است. به‌طور کلی، زنجیره‌ی تأمین انرژی‌زیستی، شامل مراحل، از جمله: تهیه‌ی مواد اولیه و فرایند استخراج آن‌ها، ذخیره‌سازی، مسیرهای فناوری و درنهایت، تولید محصولات نهایی زیست‌توده برای تبدیل شدن به انرژی موردنظر است. در حال حاضر، انرژی زیستی متناسب با منبع مورد استفاده، شامل اتانول زیستی<sup>۱</sup> و دیزل زیستی<sup>۲</sup> است، که می‌توان از آن به‌صورت ترکیبی با سوخت فسیلی جهت مصارف حمل‌ونقل استفاده کرد. منبع استفاده‌شده برای انرژی زیست‌توده، ماده‌ای تجدیدپذیر است، که برای تولید طیف وسیعی از محصولات، مواد شیمیایی، و مصالح استفاده می‌شود. زیست‌توده موجب جذب ثروت و اشتغال‌زایی می‌شود و آثار مثبتی در اقتصاد، محیط‌زیست، و جامعه دارد و به‌طور کلی، در راستای اهداف پایدار است.<sup>[۱۰]</sup> بنابراین، زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده نیز در مطالعات بررسی شده است. طبق نظر سامساتلی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، زنجیره‌ی اخیر شامل مراحل کاشت و رشد زیست‌توده، برداشت، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل، پیش‌پردازش، و تبدیل نهایی به انرژی است.<sup>[۱۰]</sup> در صنعت کشاورزی به‌طور سنتی، خریدار و تأمین‌کننده‌ی هر یک به‌صورت مستقل، پیش از فصل رشد، قرارداد خرید را امضا خواهند کرد. سپس، تأمین‌کننده، محصولات تولیدشده را به خریدار می‌فروشد. با این حال ممکن است شرایط طبیعی، مانند آب و هوا یا آفت‌ها به‌گونه‌ای باشد که محصول‌های کشاورزی به مقدار موردانتظار کشت نشود؛ بنابراین، نیاز است تا پایداری زنجیره‌ی تأمین تولید سوخت‌زیستی با استفاده از قرارداد تضمین شود و عملکرد زنجیره‌ی تأمین سوخت‌زیستی را به‌طور کلی بهبود بخشند. از طرفی، با توجه به ویژگی‌های زنجیره‌ی تأمین سوخت‌زیستی، همکاری میان شرکت کشاورزی و کشاورزان در قالب کشاورزی قراردادی می‌تواند موجب افزایش مواد اولیه شود.<sup>[۱۱]</sup> کشاورزان بزرگ معمولاً قادرند محصول‌های خود را با کارایی بیشتر و با هزینه‌ی کمتر تولید کنند. اما همچنان از نظر فناوری و تجهیزات عملیاتی و آگاهی از فناوری‌های جدید از شرکت‌های کشاورزی کمک می‌گیرند. کشاورزان کوچک از نظر شبکه‌ی توزیع و دسترسی به بازار، حمایت دولت، و دسترسی به تکنولوژی محدودیت بیشتری دارند؛ بنابراین می‌توانند با سایر سازمان‌ها همکاری کنند و به‌صورت مؤثر در رقابت با سایر کشاورزان باشند. مثلاً در یکی از نوشتارها اشاره شده است که ارائه‌ی کمک‌های فناوری در ارتقاء کیفیت می‌تواند به کشاورزان کوچک در افزایش درآمد خانوار و بهبود معیشت کمک کند و فشار جنگل‌زدایی را کاهش دهد.<sup>[۱۵]</sup> قراردادهای برای کشاورزان، دسترسی گسترده‌ای از خدمات مدیریتی و

فنی را فراهم می‌کند. به‌عبارتی، کشاورزان کوچک از نظر خدمات تولیدی، دسترسی به اعتبار، معرفی فناوری مناسب، انتقال مهارت، و دسترسی به بازارهای قابل‌اعتماد بهره‌مند خواهند شد.<sup>[۱۶]</sup> شرکت‌ها از کشاورزان کوچک حمایت می‌کنند تا آن‌ها را به سطح قابل‌قبولی از بازار برسانند، تا با قرارداد طولانی‌مدت، محصولات موردنیاز کشور را تولید کنند و در عین حال، موجب افزایش بهره‌وری در صنعت کشاورزی و افزایش درآمد خانوارهای روستایی شوند. مانند شرکت کارگیل<sup>۴</sup>، که یکی از پیشروها در زمینه‌ی کشاورزی، مواد غذایی، و تجارت مرتبط با آن است و در تمام مراحل فرآوری، از کشاورزی و دامپروری تا پردازش، توزیع و بازاریابی محصولات غذایی و دامی، و همچنین تولید زیست‌توده مشارکت دارد. به اعتقاد شرکت کارگیل، کشاورزان متولیان اصلی آب و خاک هستند و امروزه، آن‌ها با اطلاعات و فناوری‌های جدیدی که دارند می‌توانند عملیات کشاورزی را در راستای بهره‌وری بیشتر و پایداری پیش ببرند. اگر همه‌ی کشاورزان به ابزارها، فناوری‌ها، و آموزش‌هایی دسترسی داشته باشند، می‌توانند به آن‌ها در تصمیم‌گیری بهتر برای تجارت و اهداف پایدار کمک کند. متأسفانه، برخی کشاورزان در برخی از نقاط جهان، به این منابع دسترسی ندارند؛ به همین دلیل شرکت‌های کشاورزی، مانند کارگیل، نقشی بسیار حیاتی دارند.<sup>[۱۷]</sup> بنابراین، در زنجیره‌ی مورد مطالعه، کشاورزان در جهت افزایش تولید خود از نظر سطح فناوری و قیمت رقابت می‌کنند. شرکت کشاورزی تحت قرارداد همکاری سعی دارد به آن‌ها در زمینه‌ی فناوری کمک کند. از سوی دیگر، میان پالایشگاه و شرکت کشاورزی قرارداد تسهیم درآمد وجود دارد تا شرکت به کشاورزان در افزایش عرضه‌ی محصول کمک کند و درنهایت، موجب افزایش بهره‌وری کل زنجیره‌ی تأمین سوخت‌زیستی شود.

در این موقعیت‌ها، تئوری بازی، ابزاری قدرتمند برای مطالعه‌ی مدل‌های ریاضی مربوط به تعارض و همکاری میان اعضاء سیستم زنجیره‌ی تأمین است. در تئوری بازی‌ها، برای مدل‌سازی تعاملات و رقابت بین طرفین، بسته به رفتار آن‌ها، می‌توان از انواع مختلف بازی‌ها، از جمله بازی‌های مشارکتی یا غیرمشارکتی، بازی‌های متقارن و نامتقارن، بازی‌های هم‌زمان و ترتیبی استفاده کرد.<sup>[۱۸]</sup> در مطالعه‌ی حاضر، از بازی‌های هم‌زمان و بازی‌های ترتیبی برای به‌دست‌آوردن سایر متغیرهای تصمیم زنجیره استفاده شده است، که در قسمت بیان مسئله تعریف شده است.

<sup>۴</sup> Cargill

<sup>۵</sup> Peng

<sup>۱</sup> Bioethanol

<sup>۲</sup> Biodiesel

<sup>۳</sup> Samsatli

از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تلاش می‌کنند تا برنامه‌ریزی بهینه برای تعداد ایستگاه‌های سوخت‌گیری و فروش سوخت‌زیستی انجام دهند. نتایج مطالعه‌ی اخیر نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش نظریه‌ی بازی دوسطحی در برنامه‌ریزی بهینه‌ی ایستگاه‌های سوخت‌گیری زیستی مؤثر واقع می‌شود.<sup>[۲۰]</sup>

طبق بررسی‌های مفاخری و همکاران (۲۰۲۱)، ضعف اقتصادی مانع استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در مناطق کوچک، پراکنده و بدون شبکه می‌شود. همانگی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده می‌تواند در بهبود کارایی هزینه‌ها و ایجاد اعتبار تولید انرژی زیستی از طریق بهینه‌سازی سفارش‌ها و ایجاد مراکز ذخیره‌سازی کمک کند. مطالعه‌ی مذکور یک مدل مدیریت زنجیره‌ی تأمین با تأمین‌کنندگان متعدد و مناطق مصرف نهایی ارائه داده است؛ که در آن، راهبردهای همکارانه و غیرهمکارانه مقایسه شده‌اند. برنامه‌ریزی سفارش‌ها با ارائه‌ی هزینه‌های غیرخطی سفارش و توزیع از طریق موجودی‌های هماهنگ مدل‌سازی شده است.<sup>[۲۱]</sup>

یه<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، در زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده و عرضه‌ی آن مدلی ارائه داده‌اند، که در آن بازی استکلبرگ نیز ادغام شده است. برداشت‌کننده به‌عنوان رهبر در مورد میزان برداشت محصول و تولیدکننده‌ی سوخت به‌عنوان پیرو در مورد میزان استفاده از زیست‌توده‌ی برداشت‌شده تصمیم‌گیری می‌کنند. در مدل دوسطحی ذکرشده، عدم‌قطعیت به‌عنوان نوآوری پژوهش است و در مرحله‌ی اول، در مورد تصمیم‌های لجستیکی پالایشگاه زیستی و در مرحله‌ی دوم، تصمیم‌های مربوط به جنگلداری و عدم‌قطعیت در آن بررسی شده است.<sup>[۸]</sup> فن<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهش خود، مدلی جهت بهبود هماهنگی میان اعضا زنجیره‌ی تأمین سوخت جامد حاصل از زیست‌توده ارائه داده‌اند؛ به‌طوری که سود و کارایی همه‌ی بازیگران افزایش یابد. در نوشتار اخیر، زنجیره‌ی تأمین سه سطحی، شامل: کشاورزان، واسطه‌ها، و تولیدکنندگان با فرض تصادفی بودن زمان سفارش و میزان عرضه و تقاضا در نظر گرفته شده و برای هماهنگی میان اعضا، قرارداد "قیمت محافظه‌کارانه و یارانه" بین کشاورزان و تولیدکننده و یک قرارداد "خرید بازگشتی‌ها و تقسیم درآمد" بین واسطه و تولیدکننده تشریح شده است.<sup>[۲۲]</sup> ون و ژانگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۵)، از تنوع بازی برای مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین کاه در چین استفاده و با استفاده از روش‌های هماهنگی، حالت مناسب برای جمع‌آوری کاه به‌عنوان زیست‌توده‌ی موردنیاز نیروگاه را تعیین کرده‌اند، چرا که مشکل اصلی نیروگاه‌های ذکرشده، کمبود مالی ناشی از هزینه‌ی بالای عملیات و کمبود مواد اولیه بوده است. آن‌ها در مدل خود سه حالت تهیه‌ی زیست‌توده را در نظر گرفته‌اند: حالت اول، تهیه‌ی زیست‌توده‌ی موردنیاز نیروگاه مستقیماً از کشاورزان؛ حالت دوم، تهیه‌ی آن از طریق واسطه؛ و حالت سوم، ترکیبی از دو حالت قبل. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده بیانگر آن است که اگر نیروگاه، زیست‌توده‌ی خود را مستقیماً از کشاورزان تهیه کند، به سود بالاتری خواهد رسید.<sup>[۲۳]</sup> یه<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، برای اطمینان از پایداری در تأمین مواد اولیه‌ی کشاورزی برای تولید سوخت‌های زیستی و بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین آن، هماهنگی در زنجیره‌ی تأمین سوخت‌های زیستی را تحت شرایط عدم‌قطعیت مطالعه

رقابت افقی (از نظر سطح فناوری و قیمت) در یک سطح در نظر گرفته شده‌اند. سطح‌های دوم و سوم نیز مربوط به شرکت کشاورزی و پالایشگاه هستند. به‌عبارت دیگر، سطح اول متشکل از دو نوع کشاورز (الف) و (ب) به ترتیب به‌عنوان نماینده‌ی کشاورزان کوچک روستایی و کشاورزان با مقیاس بزرگ هستند. شرکت کشاورزی به‌عنوان سطح دوم و پالایشگاه نیز به‌عنوان سطح سوم زنجیره تعریف شده‌اند. در کنار آن، رقابت عمودی میان شرکت کشاورزی و پالایشگاه در نظر گرفته شده است، تا بعد از آن، تأثیر همکاری میان پالایشگاه و شرکت (تسهیم درآمد) در سود اعضا زنجیره تحلیل شود.

در قسمت بیان مسئله، به تشریح مسئله و مقایسه‌ی دو حالت همکاری و عدم همکاری میان آن‌ها پرداخته شده است.

## ۲. پیشینه‌ی پژوهش

مباحث انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، از مهم‌ترین جنبه‌های پایداری هستند. پژوهشگران حوزه‌های مختلف نیز در زمینه‌ی انرژی و موضوعات مرتبط با آن، از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، زنجیره‌ی تأمین انرژی، ذخیره و مدیریت انرژی، و همچنین فناوری‌های مربوط به تولید انرژی پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. از آنجایی که این زمینه، پژوهش و مطالعات بسیار گسترده‌ای صورت گرفته است، و تمرکز پژوهش حاضر بر زنجیره‌ی تأمین انرژی زیستی و به‌ویژه زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده بوده است، بنابراین سعی شده است با وجود پژوهش‌ها و نوشتارهایی در این زمینه، پژوهش حاضر نیز به بررسی برخی از آن‌ها بپردازد.

وظیفه و همکاران (۲۰۲۳)،<sup>[۱۴]</sup> به بررسی هماهنگی زنجیره‌ی تأمین انرژی زیست‌توده تحت سیاست‌های انگیزشی دولت با استفاده از نظریه‌ی بازی پرداخته‌اند. ایشان از رویکرد استکلبرگ برای مدل‌سازی دوسطحی تعاملات بین اعضا زنجیره‌ی تأمین استفاده و تأثیر سیاست‌های مختلف دولت در هماهنگی میان آن‌ها را تحلیل کرده‌اند. نویسندگان بر اهمیت سیاست‌های مستقیم و غیرمستقیم دولت در ترویج استفاده از انرژی زیستی تأکید داشته و بر این باور بوده‌اند که هماهنگی بین عوامل زنجیره‌ی تأمین می‌تواند کمک‌کننده باشد.

هی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>[۱۹]</sup> با استفاده از نظریه‌ی بازی تکاملی، تأثیر سیاست‌های دولت در زنجیره‌ی تأمین انرژی زیستی و مبتنی بر کاهش پسماند گیاهی را بررسی کرده‌اند. بازیگران شامل کشاورز، برداشت‌کننده، مسئول فراوری، و تولیدکنندگان انرژی زیستی بوده‌اند. ایشان با مدل‌سازی تعاملات بین اعضا و تحلیل سیاست‌های دولتی مختلف در ترویج توسعه‌ی پایدار، دریافته‌اند که مقررات دولتی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در رفتار عوامل زنجیره‌ی تأمین داشته باشد و سیاست‌های ترویج همکاری و هماهنگی بین عوامل مذکور، منجر به نتایج پایدارتر خواهد شد. ونگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، برنامه‌ریزی بهینه‌ی چنددوره‌ای ایستگاه‌های سوخت‌زیستی را با استفاده از روش نظریه‌ی بازی دوسطحی انجام داده‌اند. در سطح بالاتر، دولت تلاش می‌کند تا با تعریف سیاست مالیات کربن، توسعه‌ی ایستگاه‌های سوخت‌گیری زیستی را تشویق کند. در سطح پایین‌تر، شرکت‌های سوخت‌زیستی با استفاده

<sup>۴</sup> Fan

<sup>۵</sup> Wen & Zhang

<sup>۶</sup> Ye

<sup>۱</sup> He

<sup>۲</sup> Wang

<sup>۳</sup> Yeh

را برای انجام فعالیت‌های حامی اهداف پایدار افزایش می‌دهد، روش‌هایی مانند یارانه، مجوزهای خاص، و غیره، که در اختیار دولت است، استفاده می‌شود.<sup>۳۰</sup> بدین جهت، در مطالعات سال‌های اخیر، توجه به نقش دولت در تصمیم‌گیری‌ها و هماهنگی در زنجیره تأمین پررنگ‌تر شده است. به طور مثال، جیانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، راهبرد بهینه‌ی تأمین یارانه‌ی دولت برای یک زنجیره‌ی تأمین انرژی زیست‌توده، متشکل از نیروگاه، انجمن روستائیان و کشاورز بررسی می‌کنند. آن‌ها سه راهبرد یارانه برای نیروگاه یا روستائیان و یا کشاورز و تأثیر آن در هدف دولت را بررسی و مقایسه کرده‌اند.<sup>۳۱</sup> باجگیران و جانگ<sup>۴</sup> (۲۰۲۱)، به بررسی سیاست یارانه‌ای دولت پرداخته‌اند، به طوری که به نفع همه‌ی اعضا باشد و تولید پیشرفته سوخت‌زیستی را افزایش دهد و به دستور آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA)<sup>۵</sup> عمل کند. آن‌ها در پژوهش خود دریافته‌اند که با ساخت پالایشگاه‌های بیشتر، دولت یارانه‌های بیشتری نیاز دارد و با قیمت سوخت کمتر، افزایش مصرف در بازار سوخت‌زیستی، توسعه‌ی رفاه اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. همچنین، نتیجه حاکی از آن بوده است که پیشرفت فناوری سوخت‌زیستی، مهم‌ترین عامل در بین پارامترهای در نظر گرفته‌شده است.<sup>۳۲</sup> ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، یک بازی تکاملی برای مدل‌سازی میان دولت، شرکت‌های سوخت‌زیستی و رستوران‌ها، در نظر گرفته و سیاست‌های پیش رو در زنجیره‌ی تأمین مذکور را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که برای دستیابی به این اهداف بلندمدت، دولت‌ها باید در هزینه‌های دفع زباله‌ی رستوران‌ها کمک کنند و هم‌زمان یارانه‌های مربوط به شرکت‌های سوخت‌زیستی را افزایش دهند.<sup>۳۳</sup>

خراجی و یعقوبی (۲۰۱۹)، یک مدل هماهنگی و رقابت در زنجیره‌ی تأمین سلول‌های خورشیدی تحت دخالت دولت ارائه داده و در زنجیره‌ی دوسطحی مذکور، سه سناریو در بازار رقابتی، شامل وجود تأمین‌کننده‌ی داخلی به صورت انحصاری در بازار، وجود تأمین‌کننده‌ی داخلی، و تأمین‌کننده‌ی خارجی به‌عنوان رقیب در بازار، دخالت دولت در بازار رقابتی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها سناریوی دخالت دولت را تحت شرایط عدم همکاری نش (غیرمتمرکز)، متمرکز، و همکاری تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند. تابع هدف مربوط به نقش دولت به‌عنوان هدف اصلی برای محاسبه‌ی تعرفه‌های بهینه‌ی دولت تعریف شده و اعضاء زنجیره‌ی تأمین در حالت متمرکز، سود بیشتری نسبت به وضعیت غیرمتمرکز داشته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که مداخله‌ی دولت در قیمت، کارایی، و سود اعضا تأثیرگذار بوده است.<sup>۳۴</sup>

### ۳. بررسی شکاف تحقیقاتی

با توجه به نوشتارهای بررسی‌شده در پژوهش حاضر، تعداد محدودی از نوشتارها به مطالعه‌ی مدل‌های هماهنگی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده و انرژی‌زیستی پرداخته‌اند. آن‌ها برای ایجاد همکاری میان اعضا و افزایش سود، قراردادهای میان اعضاء زنجیره را بررسی کرده‌اند.

با وجود اینکه تاکنون مطالعات متعددی در خصوص بهینه‌سازی ریاضی زنجیره‌ی تأمین انرژی و زیست‌توده وجود داشته است، اما مطالعات مذکور همچنان در حال پیشرفت هستند. همچنین، هماهنگی میان اعضاء زنجیره

کرده‌اند. ایشان در مطالعه‌ی خود سه نوع قرارداد هماهنگی برای تسهیم ریسک ناشی از تولید در نظر گرفته‌اند: قرارداد تسهیم ریسک ناشی از تولید بیش از حد؛ قرارداد تسهیم ریسک تولید کمتر از حد نیاز؛ و قرارداد ترکیبی از دو قرارداد اخیر. در انتها به این نتیجه دست یافته‌اند که مدل قرارداد ترکیبی موجب بهینه‌سازی و کارآمدشدن زنجیره‌ی تأمین می‌شود و همه‌ی بازیگران به‌صورت هم‌زمان به سود بیشتری می‌رسند.<sup>۳۵</sup> سان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، رقابت بر سر مواد زیست‌توده‌ی کشاورزی بین صنایع تولید برق و صنایع تفاله‌ی کاه در یک منطقه‌ی محلی را بررسی کرده و مدل بازی دوسطحی بر اساس ساختار توزیع زیست‌توده و هزینه‌ی جمع‌آوری ارائه داده‌اند، و به تجزیه‌وتحلیل پارامترهایی، مانند هزینه‌ی واحد حمل‌ونقل و میزان سود پرداخته‌اند.<sup>۳۶</sup> سان و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهش دیگر خود، جهت تعیین راهبردهای بهینه برای مدیریت زنجیره‌ی تأمین کشاورزی زیست‌توده، مدل بازی متشکل از یک تأمین‌کننده و دو خریدار برای افزایش سود را ارائه داده‌اند. سپس، بعد از تجزیه‌وتحلیل شرایط صنعتی، آثار آن در پارامترهای مدل و سود اعضا را ارزیابی کرده‌اند.<sup>۳۷</sup> وظیفه و همکاران (۲۰۲۱)، از رویکرد نظریه‌ی بازی در زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده، شامل تأمین‌کنندگان، هاب‌ها، و تبدیل‌کنندگان انرژی استفاده کرده‌اند. برای بررسی تعاملات راهبردی شرکت‌کنندگان، سه سناریوی تصمیم‌گیری تحت بازی استکلبرگ در نظر گرفته‌اند، تا به بررسی تأثیر توزیع نیرو، نقش پرداخت‌های جانبی در جریان تصمیم‌ها، و در نتیجه، کارایی و بهبود عملکرد بپردازند.<sup>۳۸</sup> مطالعات دیگری نیز در حوزه‌ی سایر انرژی‌های تجدیدپذیر صورت گرفته است. به‌طور مثال، در نوشتار لیو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین تجهیزات انرژی بادی، سه قرارداد مبتنی بر تسهیم درآمد و هزینه پیشنهاد شده است. تسهیم درآمد، تولیدکننده‌ی تجهیزات را تشویق می‌کند تا کیفیت تجهیزات خود را افزایش دهد. از طرفی، ترکیب قرارداد تسهیم درآمد، و هزینه‌ی نگهداری تعمیرات، منجر به افزایش بهینگی در خروجی خواهد شد.<sup>۳۹</sup> خراجی و همکاران (۲۰۲۰)، مدل دوسطحی زنجیره‌ی تأمین سلول‌های خورشیدی را ارائه داده‌اند، که در آن سه سناریو تحت بازی نش غیرهمکارانه برای دو محصول مدل‌سازی شده و نتایج بازی مذکور در مدل ریاضی چنددوره‌ی نیروگاه انرژی خورشیدی قرار گرفته‌اند. در مدل اخیر، فرسایش سلول‌های خورشیدی در نظر گرفته‌شده و در نهایت مدل ارائه‌شده تعیین می‌کند چه تعداد سلول خورشیدی از هر نوع، در هر دوره، و تحت چه سناریویی باید احداث یا جایگزین شود.<sup>۴۰</sup>

علاوه بر موارد مذکور، توجه دولت‌ها به مباحث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مسائل اجتماعی، و مالی در سیاست‌هایشان، جهت حل مسائل ملی و جهانی امری اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر، زنجیره‌ی تأمین‌ها به مقررات دولت و مداخله‌های مالی پاسخ داده و جهت کسب مزیت رقابتی خود در صنعت، رقابت و تلاش می‌کنند.<sup>۴۱</sup> سیاست‌هایی که دولت در زنجیره‌ی تأمین می‌تواند اتخاذ کند، مستقیماً یا غیرمستقیم و در دو دسته‌ی تنبیهی و تشویقی تقسیم می‌شوند. در سیاست تنبیهی، که به نوعی می‌تواند مکانیسم پیشگیرانه باشد، از ابزارهایی مانند مالیات و تعرفه‌ها، به‌عنوان محدودکننده‌ی برخی فعالیت‌های آسیب‌رسان استفاده می‌شود و در سیاست تشویقی، که انگیزه‌ی اعضاء زنجیره

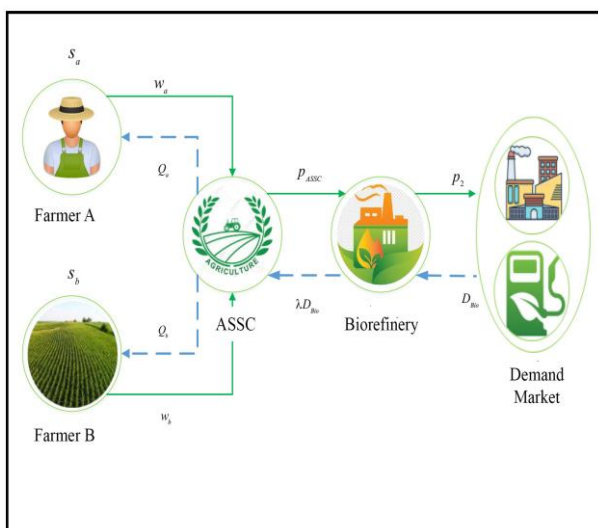
<sup>۵</sup> Environmental Protection Agency

<sup>۱</sup> Sun

<sup>۲</sup> Liu

<sup>۳</sup> Jiang

<sup>۴</sup> Bajgiran & Jang



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین مورد مطالعه.

کشاورزی خریداری می‌کند تا تولید و تأمین سوخت مورد نیاز را انجام دهد. لازم به توضیح است که شرکت کشاورزی در مدل ریاضی با نام اختصاری ASSC<sup>۱</sup> بیان شده است. مشتریان پالایشگاه، شامل صنایع مختلفی از جمله شرکت‌های سوخت و صنایع آرایشی و بهداشتی هستند. در این مسئله، کشاورز (الف)، بیانگر کشاورزان روستایی (کوچک)<sup>۲</sup> و دارای زمین‌های کشاورزی کوچک هستند، که برای فعالیت‌های کشاورزی خود در مقایسه با کشاورزان با مقیاس بزرگ نیازمند کمک در زمینه‌ی زیرساخت فناوری هستند، چرا که در هزینه‌های زیرساخت و عملیاتی و در نهایت سود آن تأثیر می‌گذارد. در مقابل کشاورزان (الف)، کشاورز (ب) به‌عنوان کشاورزان با مقیاس بزرگ<sup>۳</sup> (مدرن) هستند و علی‌رغم اینکه ممکن است از نظر فناوری پیشرفته‌تر باشند، اما در هزینه‌های مربوط به ماشین‌آلات کشاورزی طی فرآیند برداشت و پیش‌پردازش زیست‌توده و جهت ارسال نیازمند کمک شرکت هستند. عضو بعدی زنجیره، شرکت کشاورزی است که در موارد مذکور به کشاورزان کمک می‌کند و در مقابل به فروش زیست‌توده به پالایشگاه می‌پردازد. این شرکت بر میزان خرید اولیه‌ی خود از کشاورز (الف) به جهت تلاش برای مشارکت‌دادن و تسهیل کار کشاورز (الف) تصمیم‌گیری می‌کند و مابقی سفارش خود را جهت تولید سوخت زیستی مورد نیاز، از کشاورز (ب) خریداری می‌کند. این تذکر لازم است که شرکت کشاورزی با قیمتی معادل ضریبی مشخص از قیمت کشاورز، به فروش زیست‌توده به پالایشگاه می‌پردازد. بعد از همه‌ی مراحل اخیر، پالایشگاه به‌عنوان عضو نهایی زنجیره، که در مورد قیمت سوخت زیستی که با پالایشگاه‌های نفتی در رقابت است، تصمیم‌گیری می‌کند، که در ادامه، تابع تقاضای آن بیان شده است. علاوه بر توضیحات مذکور، شایان ذکر است که نقش شرکت کشاورزی در زنجیره‌ی مذکور جهت کمک به کشاورزان کوچک‌تر برای حضور در بازار و فروش محصولات‌شان است. در زمینه‌ی کمک شرکت کشاورزی به کشاورزان کوچک نیز، از آنجایی که کشاورزان کوچک و روستایی در مقایسه با کشاورزان بزرگ نیاز به حمایت بیشتر در فرایندهای پس از برداشت محصول و توزیع و فروش آن با بازار دارند، بنابراین شرکت کشاورزی در کنار کمک به کشاورزان بزرگ، توجه به کشاورزان روستایی و کوچک را در اهمیت بالاتر قرار می‌دهد، تا موجب رونق اقتصادی در صنعت کشاورزی شود.

تأمین زیست‌توده و انرژی زیستی، از موضوعات به‌روز مطرح‌شده در مطالعات است، چرا که همانگی میان اعضا آن موجب بازدهی بهتر و سود بیشتر در زنجیره خواهد شد. در پژوهش حاضر، با تأکید بر ضرورت پرکردن خلأ تحقیقاتی، یک مدل همانگی ارائه شده است؛ که نه فقط سه سطح از زنجیره‌ی سوخت زیستی، شامل کشاورزان، شرکت کشاورزی، و پالایشگاه را در بر می‌گیرد، بلکه قابلیت برقراری همانگی میان اعضا مختلف زنجیره‌ی تأمین را نیز فراهم خواهد کرد. با توجه به مرور ادبیات انجام‌شده، مطالعه‌ی که هم‌زمان با در نظر گرفتن سطح بالادستی، میان دست، و پایین دست زنجیره به مفاهیم فناوری در کشاورزی و تقاضای سوخت زیستی توجه کند، وجود نداشته است. به‌عبارتی دیگر، در مطالعه‌ی حاضر تقاضای سوخت زیستی در میزان تأمین مواد اولیه، یعنی زیست‌توده، تأثیرگذار است. از آنجایی که قرار است کشاورزان کوچک و بزرگ در تأمین مواد اولیه‌ی ذکر شده نقش داشته باشند، بنابراین بازار رقابتی میان آن‌ها وجود خواهد داشت. طبق ادبیات موجود، جهت بررسی اینکه شرکت کشاورزی می‌تواند در فرایند کشاورزی نقش داشته باشد، مفاهیمی چون کشاورزی قراردادی مطرح شده است؛<sup>۱۴، ۱۹، ۱۴۸</sup> بنابراین، در مدل حاضر نیز حالت همکارانه بین شرکت و هر یک از کشاورزان وجود دارد، به‌طوری که با هر یک از آن‌ها قرارداد جداگانه بسته می‌شود. این قراردادها جهت بررسی نقش شرکت کشاورزی در سطح فناوری کشاورزان و سود آن‌ها می‌تواند ارائه شود. از جهتی دیگر، همکاری پالایشگاه نیز با استفاده از قرارداد تسهیم درآمد با شرکت کشاورزی، در راستای بررسی سطح فناوری، افزایش مقدار زیست‌توده، و در نهایت، سود اعضا زنجیره بیان شده است. بنابراین سطح فناوری در کشاورزی نیز از جمله موارد مهمی است که با توجه به شکاف تحقیقاتی، می‌توان در مدل‌های همانگی زنجیره‌ی تأمین به آن پرداخت.

اهداف پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- ایجاد همکاری میان اعضا زنجیره‌ی سوخت زیستی با توجه به سطوح فناوری؛
- بررسی تأثیر سطح سرمایه‌گذاری فناوری هر یک از اعضا زنجیره در سود خود و سایر اعضا؛
- توجه به نقش شرکت‌های کشاورزی در تصمیم‌گیری‌ها و سود اعضا زنجیره؛
- توجه به مفهوم قرارداد همکاری با استفاده از شرکت کشاورزی.

#### ۴. بیان مسئله و مدل‌سازی

در بخش کنونی، ابتدا به تعریف مسئله به‌صورت مبسوط و بیان جزئیات آن پرداخته شده است. در ادامه، پارامترها و متغیرهای تصمیم ارائه و سپس مدل‌سازی ریاضی بیان شده است.

زنجیره‌ی تأمین سوخت زیستی متشکل از دو کشاورز تولیدکننده‌ی زیست‌توده، شرکت کشاورزی، و پالایشگاه زیستی در نظر گرفته شده است. با توجه به ساختار زنجیره‌ی تأمین مذکور، که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، کشاورزهای (الف) و (ب) و یک شرکت کشاورزی که در برخی از فرایندهای کشاورزی به‌صورت قراردادی مشارکت می‌کند، وجود دارند. پالایشگاه زیستی نیز زیست‌توده‌ی مورد نیاز را متناسب با تقاضای سوخت زیستی از شرکت

<sup>۲</sup> Large-scale farmer

<sup>۱</sup> Agricultural Support Services Company

<sup>۲</sup> Small-holder farmer

روستایی (کوچک) است، که ممکن است در صورت آموزش روش‌های مدرن، کود، سموم دفع آفات، روش‌های آبیاری، تهیه‌ی ماشین‌آلات کشاورزی، و به‌طور کلی سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید کشاورزی برای بهبود سطح فناوری<sup>۳</sup>، به کمک شرکت کشاورزی نیاز داشته باشند، که کشاورز در مورد آن تصمیم می‌گیرد.

• کشاورز (ب) به‌عنوان کشاورزان با مقیاس بزرگ ممکن است برای اجاره و نگهداری برخی ماشین‌آلات کشاورزی یا یادگیری در مورد دستگاه‌های آبیاری و فناوری نوین به کمک شرکت کشاورزی جهت ارتقاء کیفیت و کمیت زیست‌توده نیاز داشته باشد.

• شرکت کشاورزی، مانند شرکت کارگیل در دنیای واقعی، در فناوری کشاورزی به کشاورزان کمک می‌کند. در واقع، در هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای زیرساخت کشاورز (الف) و هزینه‌ی عملیات کشاورز (ب) مشارکت و همکاری می‌کند؛ که هدف آن، بهبود فرایند کشاورزی به‌ویژه تولید زیست‌توده‌ی خام و افزایش بهره‌وری است.<sup>[۱۷]</sup>

• از آنجایی که هزینه‌های تولید در هر منطقه‌ی معین متفاوت است؛<sup>[۴۰]</sup> در نتیجه، قیمت زیست‌توده نیز به‌عنوان متغیر تصمیم هر دو کشاورز در نظر گرفته می‌شود.

• فرض بر این است که هزینه‌ی حمل‌ونقل و اقدام‌های مربوط به پردازش و سایر اقدام‌های لازم، به شرکت کشاورزی و پالایشگاه اختصاص می‌یابد.<sup>[۴۱]</sup>

• به‌صورت ضریبی از قیمت کشاورز (ب) تعیین می‌شود.  $P_{ASSC}$

## ۵. مدل ریاضی

در هماهنگی زنجیره‌ی تأمین، در نظر گرفتن مشخصات تقاضا مهم است.<sup>[۴۰]</sup> عوامل مؤثر در تقاضای سوخت می‌توانند متنوع و گاه پیچیده باشند. با توجه به شکل زنجیره‌ی تأمین پیشنهادی، پالایشگاه از زیست‌توده استفاده می‌کند و در نهایت، با تولید اتانول زیستی به‌عنوان یکی از محصولات خود، آن را به مشتریان نهایی از جمله مراکز سوخت‌گیری عرضه می‌کند. اتانول یک سوخت تجدیدپذیر است، که از زیست‌توده ساخته می‌شود و با بنزین برای افزایش اکتان و کاهش مونوکسیدکربن بهره می‌برد. رایج‌ترین ترکیب اتانول،  $E_{10}$  (۱۰٪ اتانول و ۹۰٪ بنزین) بوده و برای استفاده در بیشتر خودروهای معمولی بنزینی تا  $E_{15}$  (اتانول ۱۵٪ و ۸۵٪ بنزین) تأیید شده است. بنابراین، در مراکز سوخت، ترکیبی از بنزین و اتانول زیستی ارائه می‌شود، که اتانول مذکور از جانب پالایشگاه به‌عنوان یکی از محصولات عرضه می‌شود.<sup>[۴۲]</sup> از جمله عوامل کلیدی که در تقاضای سوخت اشاره‌شده تأثیر می‌گذارد، قیمت بنزین و سوخت

در برخی مطالعات نیز با موضوعات مشابه به نقش توزیع‌کننده به‌عنوان سطح دوم زنجیره‌ی کشاورزی و هماهنگی میان آن‌ها پرداخته شده است. به‌طور مثال، در زنجیره‌ی بررسی‌شده‌ی پنگ و همکاران (۲۰۲۳)، دو کشاورز با دو سطح کیفیت از محصولات، بخشی از محصول را مستقیماً یا از طریق توزیع‌کننده به بازار می‌فروشند. در نهایت نیز حالت‌های مختلف همکاری میان اعضاء آن بررسی شده است.<sup>[۳۶]</sup> شرکت ADM نیز یکی از شرکت‌های موفق در دنیاست، که کشاورزان را به مصرف‌کنندگان متصل می‌کند. شرکت ADM، پردازش و بازرگانی، محصولات زراعی را از کشاورزان سراسر جهان خریداری و توزیع می‌کند. آن‌ها طیف گسترده‌ای از این محصولات را تولید و توزیع می‌کنند، از جمله سوخت‌های زیستی، خوراک دام، و مواد غذایی.<sup>[۳۷]</sup>

در مدل موردنظر، مشابه مدل کارای<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، تصمیم‌گیری در دو مرحله‌ی زمانی<sup>۲</sup> صورت گرفته است، به این معنا که به‌دلیل اهمیت بالاتر سطح فناوری و مقدار سفارش اولیه توسط شرکت کشاورزی نسبت به قیمت‌گذاری، این متغیرها از نظر تصمیم‌گیری در مرحله‌ی اول قرار گرفته و بعد از آن به روش استکلبرگ متغیرهای قیمت به‌دست آمده‌اند.<sup>[۳۸]</sup> دلیل این نوع تصمیم‌گیری آن است که سطح فناوری، تصمیمی راهبردی و تعیین قیمت، تصمیمی عملیاتی است؛ بنابراین، از نظر ترتیب تصمیم‌گیری، قیمت در مرحله‌ی دوم تصمیم‌گیری قرار گرفته است (جدول ۱).

برای توضیح بیشتر، با توجه به نظر خبرگان، در صنعت کشاورزی، تعیین سطح فناوری و تعیین قیمت، هر دو متغیرهای مهمی هستند و باید با توجه به شرایط بازار و نیازهای مشتریان، به تعادل مناسبی بین آن‌ها دست پیدا کرد. با این حال، در بسیاری از موارد، تعیین سطح فناوری به‌دلیل توانایی آن در بهبود عملکرد و بهره‌وری در بخش کشاورزی، نوآوری و پایداری در کشاورزی از نظر مصرف آب و استفاده از فناوری‌های جدید در زمینه‌ی کاشت و داشت محصولات می‌تواند در تصمیم‌گیری راهبردی اولویت بالاتری داشته باشد. از طرف دیگر، این تصمیم‌گیری می‌تواند موجب تغییر هزینه‌های تولید کشاورزی شود و در نتیجه، در قیمت نهایی محصول نیز تأثیرگذار باشد.<sup>[۳۹]</sup> بنابراین، سطح فناوری در مرحله‌ی اول و قیمت در مرحله‌ی دوم تصمیم‌گیری می‌شود. جهت درک بهتر، ترتیب تصمیم‌گیری مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

در ادامه، به شرح این نوع حل مسئله پرداخته شده است. ابتدا به تعریف پارامترها و متغیرهای مسئله در جدول ۲ پرداخته شده است.

مفروضات اصلی مدل ذکرشده به این شرح است:

• همان‌طور که قبلاً ذکر شد، کشاورز (الف) نماینده‌ی تمام کشاورزان

جدول ۱. مراحل مربوط به تصمیم‌گیری اعضا.

مرحله	کشاورز (الف)	کشاورز (ب)	شرکت کشاورزی	پالایشگاه
۱	$s_a$	$s_b$	$Q$	
۲	$w_a$	$w_b$		$p_r$

<sup>۳</sup> Technology level

<sup>۱</sup> Karray

<sup>۲</sup> Strategic Timing Decision

جدول ۲. نمادها و متغیرهای تصمیم مدل ریاضی.

"پارامترها"	
A	پتانسیل تقاضای اولیه برای سوخت زیستی.
$\beta$	ضریب تأثیر قیمت سوخت زیستی در تقاضا.
$\gamma$	ضریب تأثیر قیمت سوخت فسیلی در تقاضا.
$\lambda$	ضریب تعیین‌کننده‌ی مقدار زیست‌توده‌ی موردنیاز برای تولید هر لیتر سوخت زیستی.
$c_{.1}$	هزینه‌ی اولیه مربوط به عملیات کشاورز (الف).
$c_{.2}$	هزینه‌ی اولیه مربوط به عملیات کشاورز (ب).
$k_1$	ضریب مربوط به سطح فناوری کشاورز (الف)، که در میزان سفارش شرکت از کشاورز (الف) تأثیر دارد.
$k_2$	ضریب مربوط به قیمت زیست‌توده‌ی کشاورز (ب)، که در میزان سفارش شرکت از کشاورز (الف) تأثیر دارد.
$k_3$	ضریب مربوط به قیمت زیست‌توده‌ی کشاورز (الف)، که در میزان سفارش شرکت از کشاورز (الف) تأثیر دارد.
$\delta_1$ و $\delta_2$	به ترتیب، ضرایب سطح فناوری کشاورزان (الف) و (ب)، که مربوط به هزینه‌ی عملیاتی آن‌هاست.
$\gamma$	ضریب قیمت شرکت کشاورزی.
$c_{Bio}$	واحد هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل و عملیات تولید سوخت زیستی توسط پالایشگاه.
$c_1$	واحد هزینه‌ی حمل‌ونقل و پردازش زیست‌توده توسط شرکت کشاورزی از کشاورز (الف).
$c_2$	واحد هزینه‌ی حمل‌ونقل زیست‌توده توسط شرکت کشاورزی از کشاورز (ب).
$\tau_a$	هزینه‌ی زیرساخت کشاورز (الف) برای سطح فناوری.
$\tau_b$	هزینه‌ی زیرساخت کشاورز (ب) برای سطح فناوری.
$\alpha_1$	میزان مشارکت شرکت کشاورزی در هزینه‌های زیرساخت و سرمایه‌گذاری در فناوری جدید کشاورز (الف).
$\alpha_2$	میزان مشارکت شرکت کشاورزی در هزینه‌های مربوط به عملیات (ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی و تعمیرات آن‌ها) برای کشاورز (ب).
$\alpha_3$	درصد تسهیم درآمد پالایشگاه با شرکت کشاورزی.
"متغیرها"	
$s_a$	سطح فناوری کشاورز (الف).
$s_b$	سطح فناوری کشاورز (ب).
$w_a$	قیمت زیست‌توده توسط کشاورز (الف).
$w_b$	قیمت زیست‌توده توسط کشاورز (ب).
$p_f$	قیمت سوخت فسیلی.
$Q_0$	مقدار اولیه‌ی سفارش توسط شرکت از کشاورز (الف).

مقدار زیست‌توده را از کشاورزان بخرد و به قیمت خود، که ضریبی از قیمت کشاورز (ب) است، بفروشد. در نهایت، در سطح سوم زنجیره، پالایشگاه زیستی، سوخت زیستی موردنیاز را به مشتریان می‌فروشد. علاوه بر این، به‌منظور نمایش تأثیر سطح فناوری کشاورزان در سود اعضا زنجیره، به آن‌ها متغیرهای  $s_a$  و  $s_b$  تخصیص داده می‌شوند. در واقع، مقدار سفارش و هزینه‌های سطح عملیات به دو متغیر اخیر بستگی دارد، به‌طوری که هر چه سرمایه‌گذاری در سطح فناوری بیشتر باشد، مقدار سفارش از کشاورز (الف) بیشتر و هزینه‌های سطح عملیات کمتر می‌شود. توجه داشته باشید که هزینه‌های زیرساخت برای سطح فناوری براساس برخی مطالعات مرتبط تابع درجه‌ی دوم است.<sup>[۴۴ و ۴۵]</sup> در مدل اخیر، به‌منظور بررسی سطح فناوری، براساس نظر خبرگان و بررسی ادبیات، ۴ گروه طبقه‌بندی شده برای سطح فناوری تعریف شده است:<sup>[۴۷]</sup>

- کاشت [۰/۵-۰)

فسیلی است. به‌عبارت دیگر، افزایش قیمت آن موجب افزایش تقاضا برای سوخت زیستی خواهد شد؛ چون مصرف‌کنندگان به‌دنبال جایگزین کردن منابع انرژی ارزان‌تر و پایدارتر هستند.<sup>[۴۳ و ۴۴]</sup> تابع تقاضا به‌صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:

$$D_{Bio} = A - \beta p_f + \gamma p_f \quad 0 < \beta, \gamma < 1 \quad (1)$$

که در آن، به‌منظور اجتناب از پیچیدگی ریاضی، تقاضای سوخت زیستی به‌عنوان یک تابع خطی از تقاضای بالقوه‌ی بازار، قیمت سوخت زیستی، و قیمت سوخت فسیلی در نظر گرفته می‌شود، تا هنگام به‌دست‌آوردن قیمت سوخت زیستی بتوان بررسی کرد که پالایشگاه با توجه به قیمت سوخت فسیلی در بازار، چه قیمتی را در نظر خواهد گرفت. در این مسئله، از آنجایی که برای تولید یک لیتر سوخت زیستی به مقدار خاصی از زیست‌توده نیاز است، نرخ  $\lambda$  در نظر گرفته شده است.<sup>[۴۰]</sup> بر این اساس، مقدار زیست‌توده‌ی موردنیاز برای تقاضای سوخت زیستی  $\lambda D_{Bio}$  است. شرکت می‌تواند این



موردنیاز پالایشگاه از طریق کشاورز (ب) فراهم می‌شود. در هر یک از توابع سود ۲ و ۳، عبارت دوم نیز بیانگر هزینه‌ی زیرساخت فناوری هر کشاورز است. این هزینه به صورت تابع درجه‌ی دوم بر حسب سطح فناوری برای هر کشاورز نشان داده شده است.<sup>[۴۵ و ۴۶]</sup>

تابع سود شرکت کشاورزی مطابق روابط ۸ و ۹ است:

$$\pi_{ASSC}^{NC}(Q) = \quad (8)$$

$$P_{ASSC} \lambda D_{Bio} - Q_b (w_b + c_1) - Q_a (w_a + c_1)$$

$$P_{ASSC} = yw_b \quad (9)$$

که در آن، عبارت اول درآمد حاصل از فروش زیست‌توده به پالایشگاه و عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب هزینه‌های مربوط به خرید زیست‌توده از کشاورزان (الف) و (ب) هستند. در انتها، تابع سود پالایشگاه به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشته می‌شود:

$$\pi_B^{NC}(p_r) = p_r D_{Bio} - (P_{ASSC} + c_{Bio}) \lambda D_{Bio} \quad (10)$$

که در آن، عبارت اول درآمد حاصل از فروش سوخت و عبارت دوم نیز بیانگر هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیات پالایشگاه است. در ساختار عدم همکاری، جهت به دست آوردن متغیرهای اعضا، همان‌طور که در ابتدای شرح مسئله بیان شده است، فرض بر این است که متغیرهای سطح فناوری کشاورز (الف):  $(s_a)$ ، کشاورز (ب):  $(s_b)$ ، و مقدار سفارش اولیه توسط شرکت کشاورزی:  $(Q_0)$  نسبت به متغیرهای قیمت اهمیت بیشتری دارند. نحوه‌ی محاسبات مشابه به ترتیب محاسباتی در مدل کارای<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹) است.<sup>[۳۸]</sup> برای توضیح بیشتر، هنگام حل مدل ریاضی، در ابتدا متغیرهای قیمت  $w_a, w_b, w_c$ ، و  $p_r$  به دست می‌آید و سپس در توابع سود شرکت کشاورزی و دو کشاورز (الف) و (ب) جایگذاری می‌شوند تا متغیرهای با درجه‌ی اهمیت اول، یعنی  $s_a, s_b$ ، و  $Q$  به دست آیند. هنگام محاسبات ریاضی، همانند روند حل بازی‌های استکلبرگ، مطابق مراحل در شکل پیوست-الف، ابتدا شرط تقعر توابع سود کشاورزان و پالایشگاه بررسی می‌شود. سپس متغیرهای تصمیم مرحله‌ی ۲ (یعنی  $w_a, w_b, w_c$ ، و  $p_r$ ) به دست می‌آیند و در توابع سود کشاورزان و شرکت کشاورزی جایگذاری می‌شوند و پس از بررسی شرط تقعر توابع به دست آمده، مقادیر متغیرهایشان (یعنی  $s_a, s_b$ ، و  $Q$ ) که متغیرهای مرحله‌ی ۱ هستند، به دست خواهند آمد (مراجعه به پیوست الف).

برای توضیح بیشتر، در حالت عدم همکاری این مسئله، ابتدا جهت بررسی شرط تقعر، از توابع سود کشاورزان و پالایشگاه نسبت به متغیرهای تصمیم  $w_a, w_b$ ، و  $p_r$  مشتق دوم گرفته می‌شود، و روابط ۱۱ الی ۱۳ به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_a}^{NC}}{\partial w_a^2} = -2k_r < 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_b}^{NC}}{\partial w_b^2} = -2k_r < 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_B^{NC}}{\partial p_r^2} = -2\beta < 0 \quad (13)$$

• کاشت + آبیاری [۱ و ۵/۰]:

• کاشت + آبیاری + برداشت [۱/۵ و ۱]:

• کاشت + آبیاری + برداشت + پیش‌فراوری [۲/۵ و ۱/۵].

با توجه به توضیحات اخیر، ابتدا در قسمت اول، سود اعضاء زنجیره، سطوح فناوری و قیمت بهینه در حالت عدم همکاری<sup>۱</sup> و بعد از آن در حالت همکاری<sup>۲</sup> بین کشاورزان- شرکت کشاورزی در قالب تسهیم هزینه و میان پالایشگاه- شرکت کشاورزی در قالب تسهیم درآمد بررسی شده است. بدین معنا که در حالت عدم همکاری، متغیرهای تصمیم اعضاء زنجیره براساس یک توالی جداگانه به دست خواهند آمد. پس از آن، جهت بررسی تأثیر همکاری شرکت کشاورزی در سود هر دو کشاورز (الف) و (ب) و پالایشگاه، بین شرکت و کشاورز (الف) قرارداد تسهیم هزینه‌ی زیرساخت فناوری، میان شرکت و کشاورز (ب) قرارداد تسهیم هزینه‌ی عملیات، و میان شرکت و پالایشگاه نیز همکاری تسهیم درآمد وجود خواهد داشت. در ادامه، به بیان مفصل مدل مذکور و توالی آن پرداخته شده است.

### ۱.۵. حالت عدم همکاری

در ساختار عدم همکاری، هر یک از اعضاء زنجیره‌ی تأمین به صورت مستقل و جداگانه تصمیم‌گیری می‌کنند، به گونه‌ی که تابع سود خود را تا حد امکان افزایش دهند. در ادامه، به شرح توابع سود هر یک از اعضا پرداخته شده است، که در آن‌ها NC<sup>۳</sup> به اختصار بیانگر حالت عدم همکاری است. توابع سود کشاورزان به شکل روابط ۲ و ۳ در نظر گرفته می‌شوند:

$$\pi_{F_a}^{NC}(s_a, w_a) = Q_a (w_a - c_a) - \tau_a \frac{s_a^r}{\gamma} \quad (2)$$

$$\pi_{F_b}^{NC}(s_b, w_b) = Q_b (w_b - c_b) - \tau_b \frac{s_b^r}{\gamma} \quad (3)$$

که عبارت اول در هر معادله، بیانگر سود حاصل از فروش زیست‌توده است و در آن، هزینه‌ی عملیات هر یک از کشاورزان (الف) و (ب) به ترتیب مطابق روابط ۴ و ۵ هستند:

$$c_a = c_{a1} (1 - \delta_1 s_a) \quad (4)$$

$$c_b = c_{b1} (1 - \delta_1 s_b) \quad (5)$$

که در آن‌ها، هزینه‌های عملیات کشاورزان بسته به سطح فناوری‌شان، به عنوان یک تابع خطی فرض شده است. در واقع، با فرض هزینه‌ی اولیه‌ی  $c_{a1}$  و  $c_{b1}$  برای عملیات هر کشاورز، هزینه‌ی کل عملیات با ضریب مشخصی از سطح فناوری کاهش می‌یابد.<sup>[۳۹]</sup> همچنین، مقدار سفارش از کشاورزان (الف) و (ب) به ترتیب مطابق روابط ۶ و ۷ است:

$$Q_a = Q_0 (1 + k_1 s_a) + k_2 w_b - k_3 w_a \quad (6)$$

$$Q_b = \lambda D_{Bio} - Q_a \quad (7)$$

در رابطه‌ی ۶، با فرض مقدار سفارش اولیه از کشاورز (الف)، به ازاء افزایش سطح تکنولوژی کشاورز، مقدار سفارش با ضریبی از سطح تکنولوژی افزایش و به ازاء کاهش قیمت آن و افزایش قیمت کشاورز (ب) به عنوان رقیب، مقدار نهایی سفارش افزایش می‌یابد. با استفاده از رابطه‌ی ۷ نیز مابقی زیست‌توده‌ی

<sup>۳</sup> Cooperation Structure

<sup>۴</sup> Karray

<sup>۱</sup> Non-Cooperative

<sup>۲</sup> Cooperative

### ۲.۵. حالت همکارانه

در بخش قبل به محاسبه‌ی متغیرهای تصمیم‌باز یگران در حالت عدم همکاری پرداخته شده است. در زنجیره‌ی تأمین بررسی شده، با توجه به اینکه قرار است نقش شرکت کشاورزی در زنجیره بررسی شود، سه همکاری در نظر گرفته شده است: **همکاری اول**، میان شرکت کشاورزی و کشاورز (الف) و با عنوان مشارکت در هزینه‌ی زیرساخت بوده است. از آنجایی که کشاورز (الف) در هزینه‌های زیرساخت کشاورزی به کمک مالی شرکت کشاورزی نیاز دارد، بنابراین فقط  $\alpha_1$  درصد هزینه‌ی مذکور را پرداخت می‌کند و مابقی آن را شرکت کشاورزی متقبل می‌شود. به‌طور هم‌زمان، در **همکاری دوم**، کشاورز (ب) در هزینه‌های مربوط به عملیات کشاورزی خود، از جمله نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی و یا مواد اولیه‌ی مورد نیاز کشاورزی، از شرکت کشاورزی به مقدار  $\alpha_2$  درصد کمک دریافت می‌کند. در **همکاری سوم**، به جهت اینکه شرکت کشاورزی تشویق شود به کشاورزان در

با توجه به برقراری شرایط تقعر در روابط اخیر، مشتق اول توابع ذکر شده معادل صفر قرار داده شده‌اند، (پیوست الف-۴ تا الف-۶) سپس با حل سه معادله و سه مجهول به ترتیب متغیرهای  $W_a, W_b, p_f$  به دست می‌آیند. مقادیر پارامتریک متغیرهای مذکور در روابط ۱۴ الی ۱۶ ارائه شده‌اند.

پس از آن، متغیرهای به‌دست‌آمده از مرحله‌ی قبل، در توابع سود کشاورزان و شرکت کشاورزی (روابط ۲، ۳، ۸) قرار داده می‌شوند (پیوست الف-۱۰ تا الف-۱۲) و از آن‌ها به ترتیب نسبت به متغیرهای  $s_a, s_b, Q$  مشتق دوم گرفته می‌شود، تا شرط تقعر معادلات بررسی شود.

**قضیه:** تابع سود کشاورزان (الف)، (ب)، و شرکت کشاورزی طبق شرایط تعریف شده در روابط ۱۷ الی ۱۹، مقعر هستند.

با توجه به برقراری شرایط تقعر، مشتق اول روابط جدید (پیوست الف-۱۶ تا الف-۱۸) نسبت به  $s_a, s_b, Q$  مساوی صفر قرار داده می‌شود. روابط

$$w_a^{*nc} = \frac{\tau k_f (Q + k_f Q s_a - \tau c_f k_f (-1 + s_z \delta_1) + c_f (k_f - k_f s_b \delta_1)) + k_f (A + p_f \gamma) \lambda + \beta (-c_{Bio} k_f + y (Q + k_f Q s_a + c_f (k_f - k_f s_a \delta_1))) \lambda^\tau}{\tau k_f (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)} \quad (14)$$

$$w_b^{*nc} = \frac{Q + k_f Q s_a + c_f k_f (-1 + s_z \delta_1) + \tau c_f k_f (-1 + s_b \delta_1) + \lambda (-A - p_f \gamma + c_{Bio} \beta \lambda)}{-\tau k_f - y \beta \lambda^\tau} \quad (15)$$

$$p_f^{*nc} = \frac{\tau k_f (A + p_f \gamma) + \beta \lambda \left( -y \left( \frac{Q + k_f Q s_a + c_f k_f (-1 + s_z \delta_1)}{\tau c_f k_f (-1 + s_z \delta_1)} \right) \right) + \tau c_{Bio} k_f + \tau y \beta (A + p_f \gamma) \lambda^\tau}{\tau \beta (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \pi_{F_a}^{NC}}{\partial s_a^\tau} = \frac{(k_f Q + c_f k_f \delta_1)^\tau (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau}{\tau k_f (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau} - \tau_a < 0 \quad \text{اگر} \quad \frac{(k_f Q + c_f k_f \delta_1)^\tau (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau}{\tau k_f (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau} < \tau_a \quad (17)$$

$$\frac{\partial \pi_{F_b}^{NC}}{\partial s_b^\tau} = \frac{\tau c_f k_f \delta_1^\tau (k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau}{(\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau} - \tau_b < 0 \quad \text{اگر} \quad \frac{\tau c_f k_f \delta_1^\tau (k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau}{(\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau} < \tau_b \quad (18)$$

$$\frac{\partial \pi_{ASSC}^{NC}}{\partial Q^\tau} = - \left( \frac{(1 + k_f s_a)^\tau (\tau k_f (k_f + k_f) + \tau y (\tau k_f + k_f y) \beta \lambda^\tau + y^\tau \beta^\tau \lambda^\tau)}{\tau k_f (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)} \right) < 0 \quad \text{اگر} \quad (1 + k_f s_a)^\tau (\tau k_f (k_f + k_f) + \tau y (\tau k_f + k_f y) \beta \lambda^\tau + y^\tau \beta^\tau \lambda^\tau) > 0 \quad (19)$$

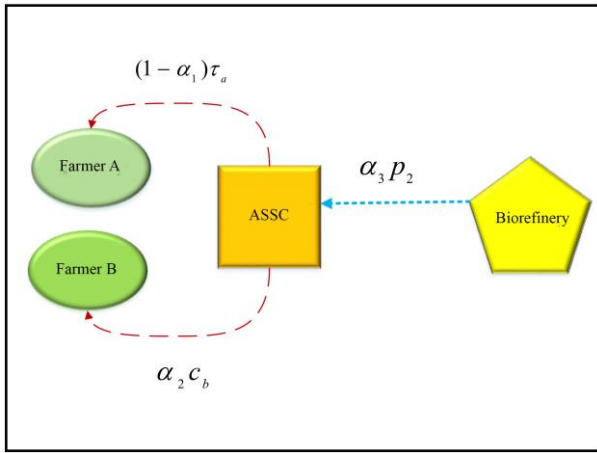
حاصل شده به دلیل طولانی بودن، در پیوست بیان شده‌اند. با حل سه معادله - زمینیه ارتقاء سطح فناوری کمک کند، پالایشگاه نیز  $\alpha_3$  درصد از درآمد خود را با عنوان تسهیم درآمد با شرکت کشاورزی به اشتراک می‌گذارد. در سه مجهول، مقادیر بهینه‌ی متغیر طبق روابط ۲۰ الی ۲۲ به‌دست می‌آیند:

$$s_a^{*nc} = \frac{(k_f Q + c_f k_f \delta_1) (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau) (\tau k_f (-c_{Bio} k_f + Q + c_f (k_f - k_f s_b \delta_1)) + k_f (A + p_f \gamma) \lambda - (c_{Bio} k_f + c_f k_f y - Q y) \beta \lambda^\tau)}{-(k_f Q + c_f k_f \delta_1) (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau + \tau k_f (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau \tau_a} \quad (20)$$

$$s_b^{*nc} = \frac{\tau c_f k_f \delta_1 (k_f + y \beta \lambda^\tau) (c_f k_f - c_f k_f + Q + k_f Q s_a + c_f k_f s_a \delta_1 - (A + p_f \gamma) \lambda + (c_{Bio} + c_f y) \beta \lambda^\tau)}{\tau c_f k_f \delta_1^\tau (k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau - (\tau k_f + y \beta \lambda^\tau)^\tau \tau_b} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \tau c_f k_f k_f - \tau c_f k_f k_f - \tau A k_f \lambda + \tau A k_f \lambda - \tau A k_f y \lambda - \tau k_f p_f \gamma \lambda + \tau k_f k_f p_f \gamma \lambda - \tau k_f k_f p_f y \gamma \lambda + \tau c_{Bio} k_f \beta \lambda^\tau \\ & - \tau c_{Bio} k_f k_f \beta \lambda^\tau + \tau c_f k_f k_f y \beta \lambda^\tau - \tau c_f k_f k_f y \beta \lambda^\tau + \tau c_{Bio} k_f k_f y \beta \lambda^\tau - A k_f y \beta \lambda^\tau + A k_f y^\tau \beta \lambda^\tau - k_f p_f y \beta \gamma \lambda^\tau \\ & + k_f p_f y^\tau \beta \gamma \lambda^\tau + c_{Bio} k_f y \beta^\tau \lambda^\tau - c_f k_f y^\tau \beta^\tau \lambda^\tau - c_{Bio} k_f y^\tau \beta^\tau \lambda^\tau + c_f k_f (-1 + s_a \delta_1) \end{aligned} \quad (22)$$

$$Q^{*nc} = \frac{(\tau k_f^\tau - \tau k_f k_f + k_f y \beta \lambda^\tau - \tau k_f y^\tau \beta \lambda^\tau) + \tau c_f k_f (-1 + s_b \delta_1) (\tau k_f^\tau + k_f (1 - \tau y) y \beta \lambda^\tau + k_f (-k_f + y \beta \lambda^\tau))}{(1 + k_f s_a) (\tau k_f^\tau + y^\tau \beta \lambda^\tau) (\tau k_f + \beta \lambda^\tau) + \tau k_f (k_f + y \beta \lambda^\tau)} \quad (23)$$



شکل ۲. حالت همکاری میان اعضاء زنجیره.

در این ساختار جهت به دست آوردن متغیرهای اعضا، همانند حالت NC عمل می‌شود؛ با این تفاوت که در بخش حاضر، سه پارامتر جدید  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  با عنوان قراردادهای اضافه شده‌اند. بنابراین همانند قبل، متغیرهای سطح فناوری کشاورز (الف):  $(s_a)$ ، کشاورز (ب):  $(s_b)$ ، و مقدار سفارش اولیه توسط شرکت کشاورزی:  $(Q)$  متغیرهای مرحله اول هستند. نحوه محاسبات نیز مطابق ساختار عدم همکاری است.

**قضیه:** تابع سود کشاورز (الف)، کشاورز (ب)، و پالایشگاه، مقعر است، اگر مشتق دوم توابع سود نسبت به متغیرهای تصمیم هر یک کوچک‌تر از صفر باشند. با توجه به برقراری شرایط اخیر در عبارتهای ۲۷ الی ۲۹، مشتق اول آن‌ها مساوی صفر قرار داده شده‌اند (پیوست‌های ب-۴ الی ب-۶). مقادیر متغیرهای تصمیم  $w_a, w_b$ ، و  $p_r$  طبق روابط ۳۰ الی ۳۲ برآورد خواهند شد.

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_a}^c}{\partial w_a^2} = -2k_r < 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_b}^c}{\partial w_b^2} = -2k_r < 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_B^c}{\partial p_r^2} = -2\beta(1 - \alpha_r) < 0 \quad (29)$$

واقع با این کار، هزینه کلی کشاورز کاهش می‌یابد و فرصت برای سرمایه‌گذاری در سطح فناوری افزایش می‌یابد، که می‌تواند در افزایش مقدار زیست‌توده و در نتیجه فروش سوخت‌زیستی و سود پالایشگاه تأثیرگذار باشد. در نهایت، جهت درک بهتر ساختار ذکر شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

در ادامه، مدل‌سازی مسئله در حالت همکاری بیان شده است، که در آن حرف C<sup>۱</sup> به اختصار بیانگر حالت همکاری است. توابع سود کشاورزان به صورت روابط ۲۳ و ۲۴ در نظر گرفته شده‌اند:

$$\pi_{F_a}^c(s_a, w_a) = Q_a(w_a - c_a) - \alpha_1 \tau_a \frac{s_a^r}{\gamma} \quad (23)$$

$$\pi_{F_b}^c(s_b, w_b) = Q_b(w_b - (1 - \alpha_r)c_b) - \tau_b \frac{s_b^r}{\gamma} \quad (24)$$

که عبارت اول در هر معادله، مانند حالت قبل، بیانگر سود حاصل از فروش زیست‌توده است. در قسمت دوم معادله ۲۳، کشاورز (الف) به میزان  $\alpha_1$  درصد هزینه زیرساخت را پرداخت می‌کند. در قسمت اول معادله ۲۴، شرکت کشاورزی به اندازه  $\alpha_r$  درصد در هزینه عملیاتی کشاورز (ب) کمک می‌کند.

تابع سود شرکت کشاورزی مطابق رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$\pi_{ASSC}^c(Q) = p_{ASSC} \lambda D_{Bio} - Q_b(w_b + c_b) - Q_a(w_a + c_a) - (1 - \alpha_1) \tau_a \frac{s_a^r}{\gamma} - \alpha_r c_b Q_b + \alpha_r p_r \quad (25)$$

که در آن، عبارت اول درآمد حاصل از فروش زیست‌توده به پالایشگاه و عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب هزینه‌های مربوط به خرید و پردازش زیست‌توده از کشاورزان (الف) و (ب) است. عبارت چهارم، هزینه ناشی از تسهیم هزینه کشاورز (الف) در زیرساخت و عبارت پنجم برگرفته از تسهیم هزینه عملیات است. در عبارت آخر، نیز بخشی از درآمد پالایشگاه با شرکت به اشتراک گذاشته شده است.

در انتها، تابع سود پالایشگاه به صورت رابطه ۲۶ نوشته می‌شود:

$$\pi_B^c(p_r) = (1 - \alpha_r) p_r D_{Bio} - (p_{ASSC} + c_{Bio}) \lambda D_{Bio} \quad (26)$$

عبارت اول، درآمد حاصل از فروش سوخت است، که  $\alpha_r$  درصد از درآمدش را با شرکت به اشتراک می‌گذارد. عبارت دوم، نیز بیانگر هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیات پالایشگاه است.

$$w_a^c = \frac{\tau c_r k_r + Q + k_r Q s_a - \tau c_r k_r s_a \delta_r + c_r k_r (1 - s_b \delta_r) (1 - \alpha_r) + \lambda \left( A + p_r \gamma - \left( \tau k_r (A + p_r \gamma) + \beta \left( \tau c_{Bio} k_r - y \left( \frac{Q + k_r Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r)}{+ \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r)} \right) \right) \lambda \right) \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda' - \tau k_r \alpha_r)} \quad (30)$$

$$w_b^c = \frac{-c_r k_r + Q + k_r Q s_a + c_r k_r s_a \delta_r + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r) - (A + p_r \gamma) \lambda + c_{Bio} \beta \lambda' + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r) \alpha_r (-1 + \alpha_r) + \alpha_r (-Q (1 + k_r s_a) + c_r k_r (1 - s_a \delta_r) - \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r) + (A + p_r \gamma) \lambda)}{-\tau k_r - y \beta \lambda' + \tau k_r \alpha_r} \quad (31)$$

$$p_r^c = \frac{\beta \lambda (\tau c_{Bio} k_r - y (Q + k_r Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r)) + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r)) + \tau y \beta (A + p_r \gamma) \lambda' + \tau c_r k_r y \beta (-1 + s_b \delta_r) \lambda \alpha_r + \tau k_r (A + p_r \gamma) (1 - \alpha_r)}{\tau \beta (\tau k_r + y \beta \lambda' - \tau k_r \alpha_r)} \quad (32)$$

<sup>۱</sup> Cooperative



شده است، ارتقاء دهد. این امر موجب کاهش سفارش از کشاورز (ب) خواهد شد؛ بنابراین کشاورز (ب) ناچار خواهد بود برای ماندن در زنجیره رقابتی و افزایش سود خود، قیمت و هزینه‌های خود را کاهش دهد. این کار مستلزم آن است که سطح فناوری خود را نسبت به قبل از همکاری کاهش دهد، چرا که در هزینه‌ی زیرساخت تأثیرگذار است.

برخلاف تصور، در تمام سناریوها، قیمت فروش کشاورز (الف) افزایش داشته است (مثلاً در سناریوی اول به میزان ۱۲۹/۷۶۱ دلار). در واقع، با افزایش قابل توجه سطح فناوری، هزینه‌ی زیرساخت افزایش می‌یابد؛ بنابراین قیمت نهایی کشاورز (الف) نیز زیاد می‌شود تا هزینه‌ها را جبران کند و سود نهایی را افزایش دهد. قیمت کشاورز (ب) نیز فقط در سناریوی اول کاهش یافته است، زیرا همان‌طور که پیشتر بیان شد، جهت حفظ یا افزایش مقدار سفارش‌های خود، به ناچار قیمت خود را کاهش می‌دهد.

در تمام سناریوها، توابع سود کشاورزان، شرکت، و پالایشگاه نیز در حالت همکاری افزایش یافته‌اند. برای کشاورزان بیشترین افزایش سود ناشی از همکاری در سناریوی ۴ (به ترتیب به میزان ۱۲۶۹/۵۳ و ۳۳۲۱/۲۱ دلار) برای شرکت کشاورزی نیز در سناریوی ۴ (به مقدار ۴۷۱۲۱/۴۵ دلار) اتفاق افتاده است. در پالایشگاه نیز در سناریوی اول به میزان ۱۲۶۶۲۶/۷۲ دلار افزایش سود ناشی از همکاری مشاهده می‌شود.

جهت بررسی دلیل تغییرات رخ داده، سود کشاورز (الف) افزایش یافته است؛ چرا که افزایش سطح فناوری منجر به افزایش میزان سفارش و در نتیجه افزایش سود خواهد شد. در خصوص کشاورز (ب)، با وجود اینکه قیمت خود را در حالت همکاری کاهش داده است و می‌تواند موجب کاهش سود شود، شرکت کشاورزی با کشاورز (ب) در هزینه‌های عملیاتی مشارکت می‌کند. این امر موجب کاهش هزینه خواهد شد؛ بنابراین مقدار سود کشاورز (ب) نیز در مقایسه با حالت عدم همکاری افزایش یافته است. همچنین شرکت علی‌رغم اینکه با کشاورزان در هزینه‌های زیرساخت و عملیاتی همکاری می‌کند، افزایش سود داشته است؛ چرا که پالایشگاه نیز درصدی از درآمد خود را با آن

کارایی و اعتبار مدل‌های ارائه شده، نتایج حاصل از حل عددی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و سپس با انجام تحلیل حساسیت، تغییرات توابع سود و برخی متغیرهای تصمیم نسبت به پارامترهای مختلف مسئله بررسی شده‌اند.

جدول ۴، برای نشان دادن کاربرد مدل همکاری پیشنهادی ارائه شده است. با توجه به نظر خبرگان، ضرایب مربوط به قیمت کشاورزان و ضریب سطح فناوری کشاورز (الف)  $(k_1, k_r, k_p)$  و عبارت  $Q_a$  و همچنین، ضرایب مربوط به هزینه‌های عملیاتی دو کشاورز (الف و ب)  $(\delta_1, \delta_r)$  تحت سناریوهای مختلف ارائه شده‌اند. شش ستون اول، بیانگر متغیرهای تصمیم هستند و چهار ستون آخر نیز مقادیر سود اعضاء زنجیره را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، طبق بررسی سناریوها، همکاری باعث افزایش سطح فناوری و قیمت کشاورزان شده است؛ به جز در سناریوی اول، که موجب کاهش آن برای کشاورز (ب) شده است. برای توضیح بیشتر، از سناریوی اول می‌توان دریافت که با ایجاد همکاری میان شرکت و کشاورزان، سطح فناوری کشاورز (الف) حدود ۰/۱۹ افزایش داشته است. در واقع کشاورز (الف) مایل است سطح فناوری خود را تا سطح سوم، که در تعریف مسئله بیان

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مشترک در مثال‌ها.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$A$	۵۰۰۰۰۰	$c_{r1}$	۸/۵	$\delta_1$	۰/۱۹
$\beta$	۸۹۵۰۰	$c_{r2}$	۱۲	$\delta_r$	۰/۹۲
$\gamma$	۶۷۲۰۰	$k_1$	۹۵	$c_{Bio}$	۴۸۰
$\lambda$	۰/۰۰۵	$k_r$	۸۰	$y$	۱/۲
$p_f$	۱/۴	$k_p$	۴۲	$c_{r1}$	۲۵
$\tau_a$	۵۰۰۰	$\tau_b$	۳۲۰۰	$c_{r2}$	۱۰
$\alpha_1$	۰/۲	$\alpha_r$	۰/۶	$\alpha_r$	۰/۳۵

جدول ۴. راه‌حل‌های بهینه برای ۴ مثال مختلف طبقه‌بندی شده با مقادیر مختلف  $k_i$  و  $\delta_i$ .

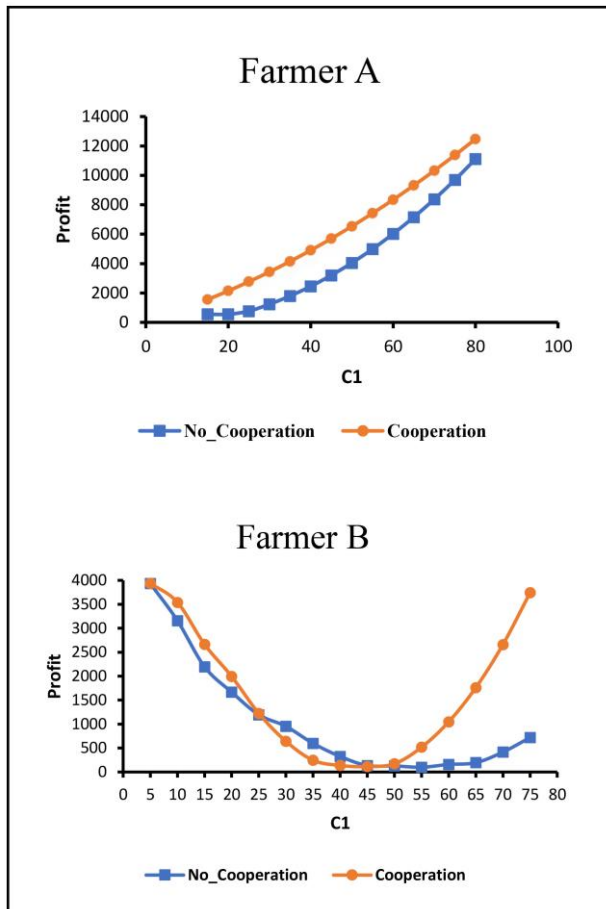
سود پالایشگاه	سود شرکت	سود کشاورز (ب)	سود کشاورز (الف)	$Q$	$p_r$	$w_b$	$w_a$	$s_b$	$s_a$	
					$\delta_r = 0.92$	$\delta_1 = 0.19$	$k_r = 42$	$k_r = 80$	$k_1 = 95$	سناریوی ۱
۱۰۲۰۱۲/۳۴	۹۰۶۴۷/۸۳	۱۳۹۴/۹۶	۷۶۶/۷۲	۲/۵۵	۳/۵۱۲۸۷	۱۰/۴۵۴۱۱	۱۳/۸۴۱۲۳	۰/۷۹۵۶۲۹	۰/۱۹۹۰۷۵	حالت عدم همکاری
۲۲۸۶۳۹/۰۶	۱۳۵۵۲۳/۱۶	۲۱۹۶/۵۷	۱۹۰۶/۵۲	۲/۹۰۲۵۱	۴/۸۵۰۷۸	۸/۵۰۸۴۷	۱۵/۱۳۸۸۴	۰/۴۲۱۱۱۸	۱/۱۱۱۱۴۶	حالت همکاری
					$\delta_r = 0.98$	$\delta_1 = 0.35$	$k_r = 42$	$k_r = 80$	$k_1 = 95$	سناریوی ۲
۱۰۴۹۲۹	۸۹۹۰۵/۴	۱۰۸۶	۴۳۲/۷۷۱	۶/۰۱۸۱۵	۳/۴۹۷۹۶	۵/۴۸۲۲۳	۱۱/۸۴۳۸	۰/۱۲۴۵۰۷	۰/۴۳۲۶۱	حالت عدم همکاری
۲۲۹۰۳۶	۱۳۵۷۲۴	۱۹۵۹/۹۷	۱۹۸۶/۴۱	۲/۵۳۲۱۶	۴/۸۴۹۲۴	۸/۰۹۵۲۴	۱۳/۷۱۶۷	۰/۴۲۷۴۶۹	۱/۲۵۴۷۳	حالت همکاری
					$\delta_r = 0.26$	$\delta_1 = 0.15$	$k_r = 30$	$k_r = 73$	$k_1 = 90$	سناریوی ۳
۱۰۴۲۰۷	۲/۸۹۶۳۸	۱۶۲۸/۳۸	۶۲۰/۵۶۲	۲/۷۸۳۰۵	۳/۵۰۱۶۳	۶/۷۰۶۴۶	۱۳/۱۲۲۱	۰/۰۳۸۳۱۳	۰/۱۸۸۲۵۲	حالت عدم همکاری
۲۲۶۶۲	۱۳۵۲۰۱	۳۱۱۷/۱۵	۳۰۸۸۶۹	۱۰۰۲۰۶۴	۴۸۶۰۸۹	۱۱۰۲۰۲	۱۸۰۳۶۳	۰/۱۲۸۳۰۹	۰۰۵۲۶۱۷	حالت همکاری
					$\delta_r = 0.98$	$\delta_1 = 0.35$	$k_r = 40$	$k_r = 15$	$k_1 = 32$	سناریوی ۴
۹۶۲۰۴/۶	۹۴۶۶۱/۵	۵۲۸۲/۹۵	۲۶۳/۷۵۱	۲۰/۴۸۹۸	۳/۵۴۳۲	۲۰/۵۶۱۸	۱۱/۷۳۸۸	۰/۱۲۸۶۲۲	۰/۵۰۳۴۴۸	حالت عدم همکاری
۲۱۱۰۵۳	۱۴۱۷۸۳	۸۶۰۴/۱۶	۱۵۳۳/۲۸	۹/۶۶۴۹۱	۴/۹۲۰۸۹	۲۷/۲۰۱۵	۱۳/۵۲۲	۰/۴۰۷۰۷	۱/۷۰۳۱۶	حالت همکاری

به کاهش سفارش از کشاورز (ب)  $(Q_b)$  بوده است، که منجر به افزایش سفارش از کشاورز (الف) شده است.

علاوه بر آن، در شکل ۴، از آنجایی که با افزایش مقدار  $c_1$  سفارش اولیه‌ی شرکت  $(Q_c)$  روندی رو به افزایش داشته است؛ بنابراین، در تابع سود کشاورز (الف) نیز تأثیر مثبت داشته است. به طوری که با توجه به شیب موجود، افزایش آن در حالت همکاری نسبت به عدم همکاری بسیار قابل توجه است؛ چرا که همکاری موجب افزایش سطح فناوری کشاورز (الف) و در نتیجه میزان سفارش از کشاورز (الف)  $(Q_a)$  و سود خواهد شد. همچنین، تابع سود در ابتدای بازه در دو حالت همکاری و عدم همکاری مقادیر نزدیک داشته‌اند. از طرف دیگر، با توجه به اینکه مابقی سفارش‌های شرکت از کشاورز (ب) تهیه می‌شود  $(Q_b = \lambda D_{Bio} - Q_a)$ ، می‌توان نتیجه گرفت مقدار ذکر شده، کاهش یافته و به دنبال آن موجب کم شدن سود کشاورز (ب) شده است. بنابراین، سود کشاورز (ب) نزولی بوده است، تا اینکه در نقطه‌ی  $c_1 = 25$ ، حالت همکاری و عدم همکاری، مجدداً مقادیر نزدیک به هم پیدا کرده‌اند و پس از آن شیب کاهشی در حالت همکاری بیشتر شده است. همچنین، از نقاط  $c_1 = 50$  و  $c_1 = 60$  به بعد، روند صعودی سود به ترتیب برای حالت‌های همکاری و عدم همکاری ادامه یافته است.

#### ۲.۶. بررسی تأثیر $c_{Bio}$ در سطح فناوری

افزایش  $c_{Bio}$  منجر به کاهش میزان تقاضای سوخت زیستی و در نتیجه،



شکل ۴. تفاوت سود کشاورزان میان حالت همکاری و عدم همکاری به‌ازاء تغییرات  $c_1$ .

سهیم می‌شود. در نهایت، با توجه به افزایش قیمت سوخت زیستی در حالت همکاری، سود پالایشگاه نیز افزایش یافته است.

طی مقایسه‌ی سناریوها با هم، در سناریوی ۲ با ثابت ماندن سایر پارامترها و افزایش  $\delta_i$  می‌توان دریافت که قیمت کشاورزان و پالایشگاه چه در حالت همکاری و چه در عدم همکاری نسبت به سناریوی ۱ کاهش یافته است. در ادامه، مقایسه‌ی دو سناریوی اخیر نیز نشان می‌دهد که میزان سفارش اولیه در حالت همکاری به میزان ۴ تن افزایش و در عدم همکاری حدود ۰/۴ تن کاهش یافته است.

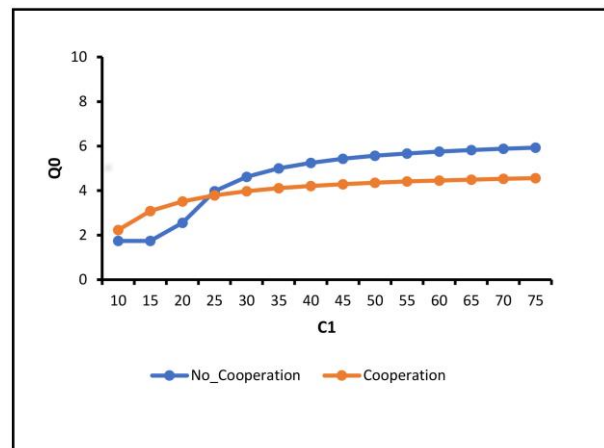
طی بررسی سناریوهای ۳ و ۴، با کاهش مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  و افزایش  $\delta_i$  و  $k_p$ ، سطح فناوری در هر دو کشاورز (الف و ب) افزایش، قیمت کشاورز (الف) کاهش، و در کشاورز (ب) افزایش یافته است. این افزایش قیمت به دلیل جبران افزایش ضریب  $k_p$  بوده است، تا بتواند میزان سفارش خود را حفظ کند (رابطه‌ی ۶). به دنبال آن، به دلیل کاهش قیمت کشاورز (الف)، میزان سفارش اولیه نیز افزایش یافته است.

به طور کلی، در خصوص مقدار سفارش اولیه‌ی شرکت، می‌توان گفت همکاری موجب افزایش سطح فناوری می‌شود و در نتیجه‌ی آن، طبق رابطه‌ی ۶، مقدار  $Q_c$  افزایش می‌یابد، که موجب افزایش مقدار سفارش اولیه نیز می‌شود.

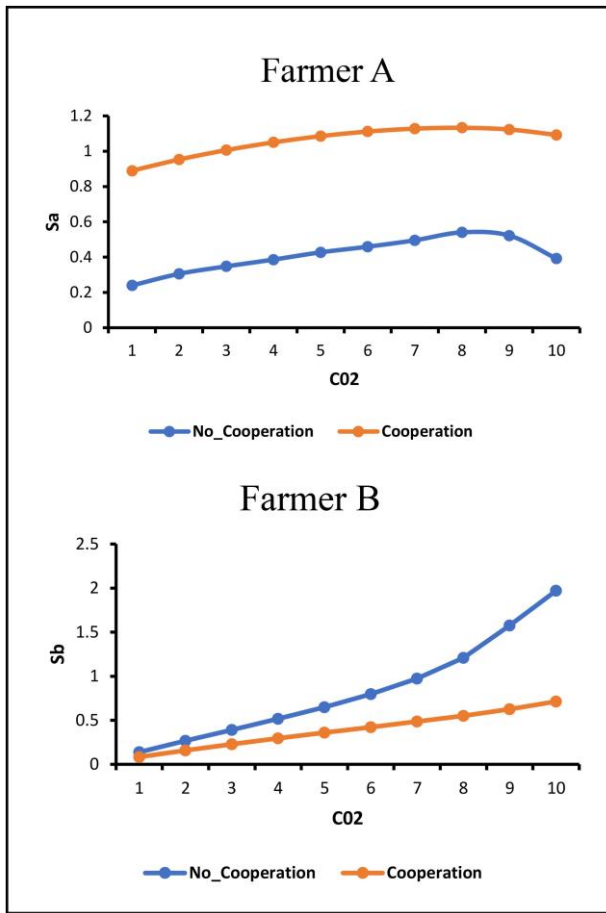
در ادامه، به تحلیل حساسیت متغیرهای مهم مسئله و برخی توابع سود اعضا زنجیره‌ی تأمین نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف مسئله پرداخته شده است.

#### ۱.۶. بررسی تأثیر $c_1$ در توابع سود و میزان سفارش اولیه

جدول ۳ را در نظر بگیرید. مقادیر تمام پارامترهای موجود در مسئله‌ی مذکور به جز  $c_1$  ثابت بوده و فرض شده است که  $c_1$  بین ۱۰ تا ۸۰ دلار تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، با افزایش هزینه‌ی شرکت برای حمل‌ونقل و پردازش زیست‌توده‌ی کشاورز (ب)، میزان سفارش اولیه توسط شرکت که در سود کشاورز (الف) تأثیر دارد، روندی تقریباً صعودی را طی کرده است؛ به گونه‌ی که قبل از نقطه‌ی  $c_1 = 30$  این مقدار در مدل همکاری بیشتر از حالت عدم همکاری بوده و پس از آن روندی با شیب ملایم و رو به افزایش داشته است؛ که دلیل آن، افزایش هزینه‌ی منجر



شکل ۳. تفاوت میزان سفارش اولیه میان حالت همکاری و عدم همکاری به‌ازاء تغییرات  $c_1$ .



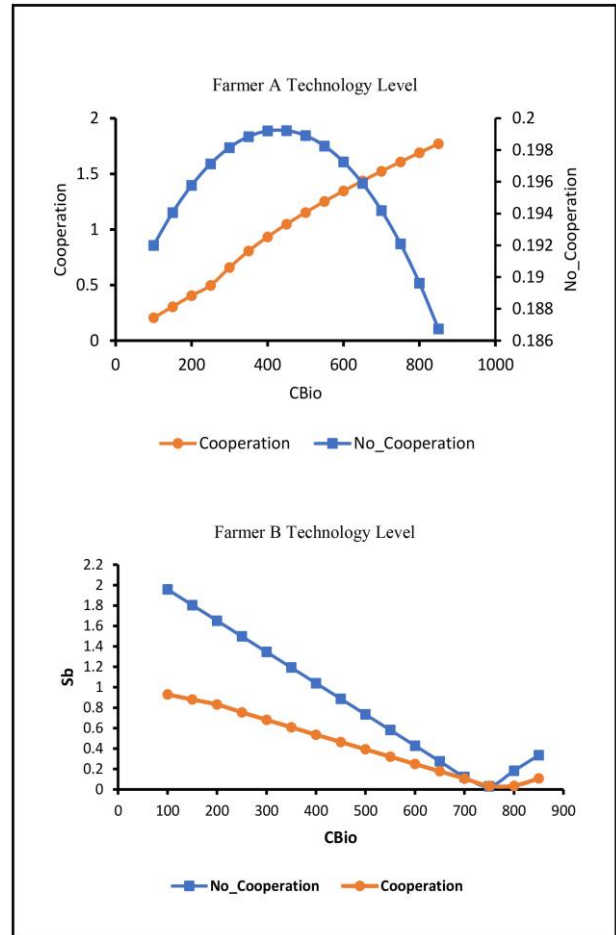
شکل ۶. بررسی سطح فناوری کشاورزان براساس هزینه‌ی اولیه‌ی کشاورز (ب).

هزینه‌ی زیرساخت توسط شرکت پرداخت می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت تمایل کشاورز برای افزایش سطح فناوری افزایش می‌یابد و مقدار آن بیشتر از حالت عدم همکاری است. همچنین، با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت با افزایش هزینه‌ی اولیه‌ی کشاورز (ب)، هزینه‌ی عملیات و در نتیجه قیمت فروش افزایش یافته است؛ بنابراین، بخش قابل توجهی از سفارش‌ها مربوط به کشاورز (الف) است. پس کشاورز (ب) جهت کاهش هزینه‌ی عملیات و در نتیجه افزایش سود خود باید سطح فناوری را افزایش دهد. در نقاط ابتدایی  $c_r$  سطح فناوری در حالت همکاری و عدم همکاری تقریباً نزدیک به هم هستند، اما شیب حالت عدم همکاری بیشتر است؛ چرا که در حالت همکاری، بخشی از هزینه‌ی عملیاتی توسط شرکت پرداخت و در نتیجه از هزینه‌ی کشاورز (ب) کاسته می‌شود و به افزایش قابل توجه سطح فناوری نیازی ندارد.

#### ۴.۶. بررسی تأثیر $\delta_1$ در قیمت کشاورزان

مطابق نمودار قیمت کشاورز (الف) در شکل ۷، از آنجایی که با افزایش ضریب سطح فناوری کشاورز (الف)، هزینه‌ی عملیاتی کاهش یافته است، قیمت فروش کشاورز (الف) نیز روندی کاهشی در پیش گرفته است. همچنین چون در حالت همکاری، کشاورز (الف) تمایل دارد تا سطح فناوری خود را افزایش دهد؛ بنابراین کاهش قیمت فروش نسبت به حالت عدم همکاری محسوس‌تر است. در نقطه‌ی  $\delta_1 = 0.4$  نیز قیمت در دو حالت همکاری و عدم همکاری به هم نزدیک بوده است.

در نمودار اخیر، قیمت کشاورز (ب)، از آنجایی که با افزایش ضریب فناوری



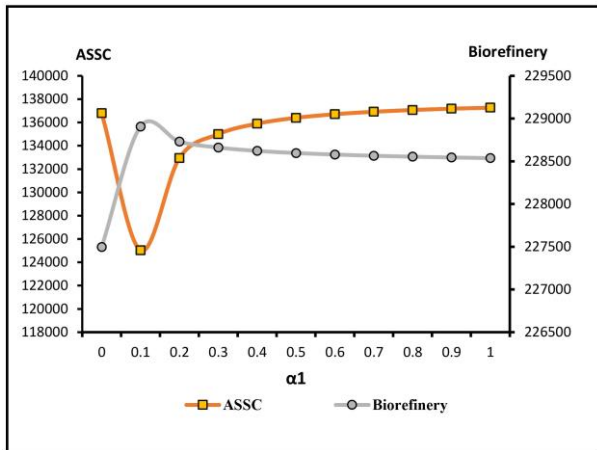
شکل ۵. تغییرات سطح فناوری کشاورزان به ازاء افزایش  $c_{Bio}$ .

کاهش سفارش از کشاورز (ب) شده است؛ بنابراین، میزان سفارش از کشاورز (الف) افزایش یافته است، که این روند موجب افزایش سطح فناوری کشاورز (الف) شده است. اما این روند حدوداً تا نقطه‌ی  $c_{Bio} = 450$  ادامه و پس از آن کاهش یافته است؛ که به دلیل بالا بردن افزایش سطح فناوری هزینه‌ی زیرساخت و در نتیجه، کاهش دادن سود بوده است. بنابراین، تا نقطه‌ی مشخصی، افزایش هزینه‌ی ذکر شده، سطح فناوری را بالا خواهد برد. برخلاف آن در حالت همکاری، روند اخیر افزایشی بوده است، که به دلیل همکاری شرکت در هزینه‌ی زیرساخت کشاورز (الف) است (تغییرات ذکر شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود). با افزایش  $c_{Bio}$ ، میزان سفارش از کشاورز (ب) کاهش یافته است، لذا کشاورز (ب) به ناچار سطح فناوری خود را کاهش داده است، تا از هزینه‌ها کاسته شود و سود خود را تا حد امکان افزایش دهد. لازم به توضیح است با وجود اینکه کاهش سطح فناوری منجر به افزایش هزینه‌ی عملیاتی می‌شود، اما تأثیر آن در هزینه‌ی زیرساخت بیشتر خواهد بود.

#### ۳.۶. بررسی تأثیر $c_r$ در سطح فناوری

مطابق نمودار سطح فناوری در شکل ۶ مشخص است که با افزایش هزینه‌ی اولیه‌ی کشاورز (ب)، هزینه‌ی عملیات افزایش یافته است. در نتیجه، کشاورز (ب) برای کاهش هزینه‌ی خود، سطح فناوری خود را افزایش داده است. بنابراین روند آن صعودی شده است. در خصوص کشاورز (الف)، با توجه به افزایش میزان سفارش، سطح فناوری کشاورز (الف) نیز افزایش یافته است، تا هزینه‌های خود را کاهش دهد. در حالت همکاری، به دلیل اینکه بخشی از





شکل ۹. تغییرات سود شرکت و پالایشگاه

براساس تغییرات میزان مشارکت کشاورز (الف) در هزینه زیرساخت.

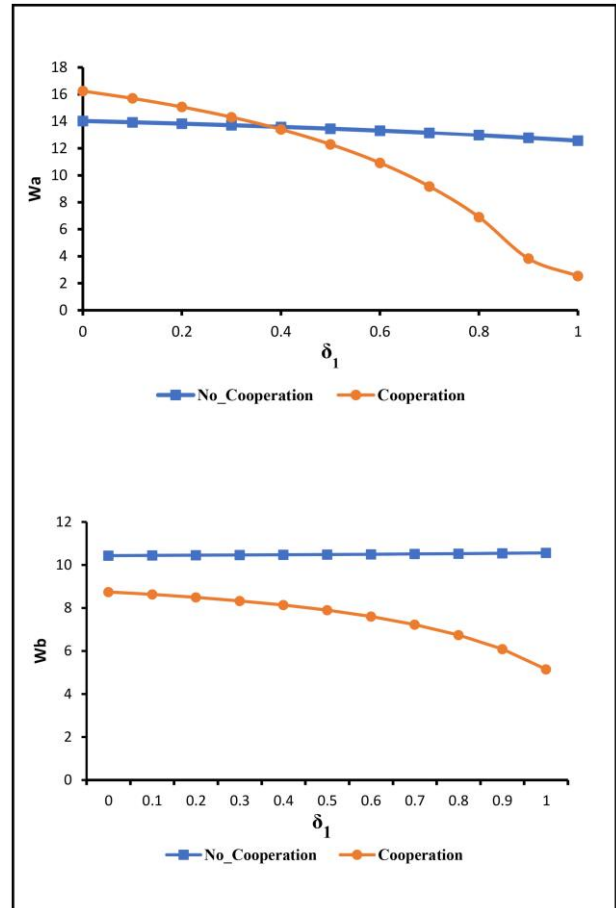
است. به دنبال کاهش هزینه‌ی عملیات، قیمت کشاورز (ب) نیز کاهش یافته و در رقابت با کشاورز (الف) سهم بیشتری از سفارش را به خود اختصاص داده است؛ بنابراین کشاورز (الف) برای حفظ میزان سفارش خود، سطح فناوری را افزایش داده است.

### ۶.۶. بررسی تأثیر درصد مشارکت کشاورز (الف) برای هزینه زیرساخت ( $\alpha_1$ )

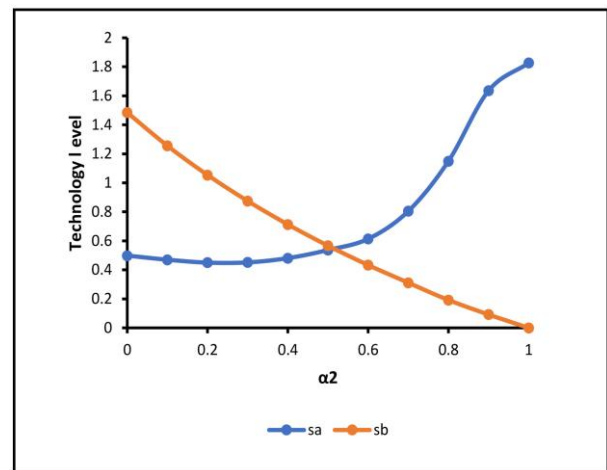
طبق شکل ۹، شرکت کشاورزی از نقطه‌ی  $\alpha_1 = 0.1$  به بعد سود افزایشی داشته است. برخلاف آن، سود پالایشگاه تا نقطه‌ی  $\alpha_1 = 0.1$ ، شیب افزایشی داشته است. در واقع همان‌طور که پیشتر بیان شد، افزایش  $\alpha_1$  از نقطه‌ی ۰.۱٪ منجر به افزایش قیمت کشاورز (ب) و در نتیجه، افزایش قیمت شرکت کشاورزی و سود آن شده است. بنابراین، در هزینه‌ی پالایشگاه تأثیر داشته و از سود آن کاسته شده است.

### ۷. نتیجه‌گیری

در بخش‌های قبل به شرح مسئله، ارائه‌ی مدل و تحلیل حساسیت برخی متغیرها و توابع سود به ازاء تغییر برخی پارامترها پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که شرکت کشاورزی با همکاری خود در هزینه‌ی زیرساخت کشاورز (الف) موجب ارتقاء سطح فناوری از کاشت و آبیاری به کاشت، آبیاری، و برداشت می‌شود. برخلاف تصور، با وجود اینکه سطح فناوری کشاورز (ب) افزایش نداشته است؛ اما قیمت آن کاهش یافته است، که ممکن است سود آن را کاهش دهد. اما به دلیل تقبل بخشی از هزینه‌ی عملیات توسط شرکت، سود نهایی در حالت همکاری افزایش یافته است. بنابراین، کشاورز تمایل به همکاری با شرکت خواهد داشت. از آنجایی که پالایشگاه با تسهیم درآمد خود با شرکت کشاورزی موجب افزایش سفارش اولیه‌ی زیست‌توده می‌شود، این مقدار در تولید پالایشگاه اثر می‌گذارد. در نهایت، پالایشگاه با تسهیم درآمد خود موجب افزایش قیمت سوخت زیستی و سود پالایشگاه خواهد شد. بنا بر تمام نتایج بحث‌شده، می‌توان گفت استفاده از قراردادهای همکاری میان اعضا این زنجیره‌ی تأمین و همچنین دخالت شرکت کشاورزی در زمینه‌ی ارتقاء سطح فناوری می‌تواند در راستای ارتقاء سود اعضا و سطح فناوری مؤثر باشد. به عبارت دیگر، همکاری با شرکت کشاورزی برای کشاورزان کوچک مزایایی دارد؛ از جمله: دسترسی به فناوری‌های نوین در زمینه‌ی کشاورزی، دسترسی به بازارهای بزرگ‌تر و توانایی رقابت با کشاورزان مدرن جهت فروش محصولات



شکل ۷. بررسی تغییرات قیمت کشاورزان براساس ضریب سطح فناوری کشاورز (الف).



شکل ۸. بررسی تغییرات سطح فناوری براساس  $\alpha_2$ .

کشاورز (الف)، هزینه‌ی عملیات کشاورز (الف) کاهش می‌یابد، قیمت فروش نیز کم می‌شود؛ بنابراین کشاورز (ب) نیز در رقابت با کشاورز (الف) قیمت خود را کاهش داده است تا بتواند در بازار محصول خود را بفروشد. کاهش قیمت اخیر در حالت همکاری محسوس‌تر از عدم همکاری است.

### ۵.۶. بررسی تأثیر درصد مشارکت کشاورز (الف) در هزینه‌ی عملیات ( $\alpha_2$ ) در سطح فناوری

با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت با افزایش  $\alpha_2$ ، سهم هزینه‌ی عملیات برای کشاورز (ب) کاهش یافته و نیازی به افزایش سطح فناوری‌اش نبوده



شرکت‌های کشاورزی با کمک به کشاورزان می‌توانند از کمک‌های دولتی بهره‌مند شوند و از این طریق کیفیت محصولات دریافت‌شده از کشاورزان را تضمین کنند و به منابع مالی بیشتری دست یابند. برای پژوهش‌های آتی می‌توان تقاضای سوخت‌زیستی و هزینه‌های اولیه‌ی کشاورزان را غیرقطعی در نظر گرفت. همچنین می‌توان سناریوی عرضه‌ی مستقیم کشاورزان به پالایشگاه را بررسی کرد. برای بررسی بیشتر مباحث پایداری نیز می‌توان سطح فناوری را به میزان مصرف آب و فرسایش خاک مرتبط ساخت.

با قیمت بهتر، داشتن منابع مالی و فنی جهت دستیابی به اهداف پایدار از طریق شرکت کشاورزی، کاهش هزینه‌های زیرساخت، افزایش سطح درآمد به دلیل افزایش توانایی تولید و کیفیت محصول، افزایش آگاهی در زمینه‌ی کشاورزی، و در نتیجه‌ی آن، ارتقاء کیفیت محصول و افزایش سود. کشاورزان مدرن نیز علی‌رغم داشتن تجهیزات مناسب و بازار بزرگ‌تر می‌توانند از شرکت‌های کشاورزی در زمینه‌های گسترش بازار و فروش محصولات، کاهش هزینه‌های عملیات با استفاده از بهسازی فرایندهای کشاورزی، دسترسی به منابع مالی در نگهداری و تعمیر تجهیزات کمک بگیرند. از سوی دیگر،

## References - منابع

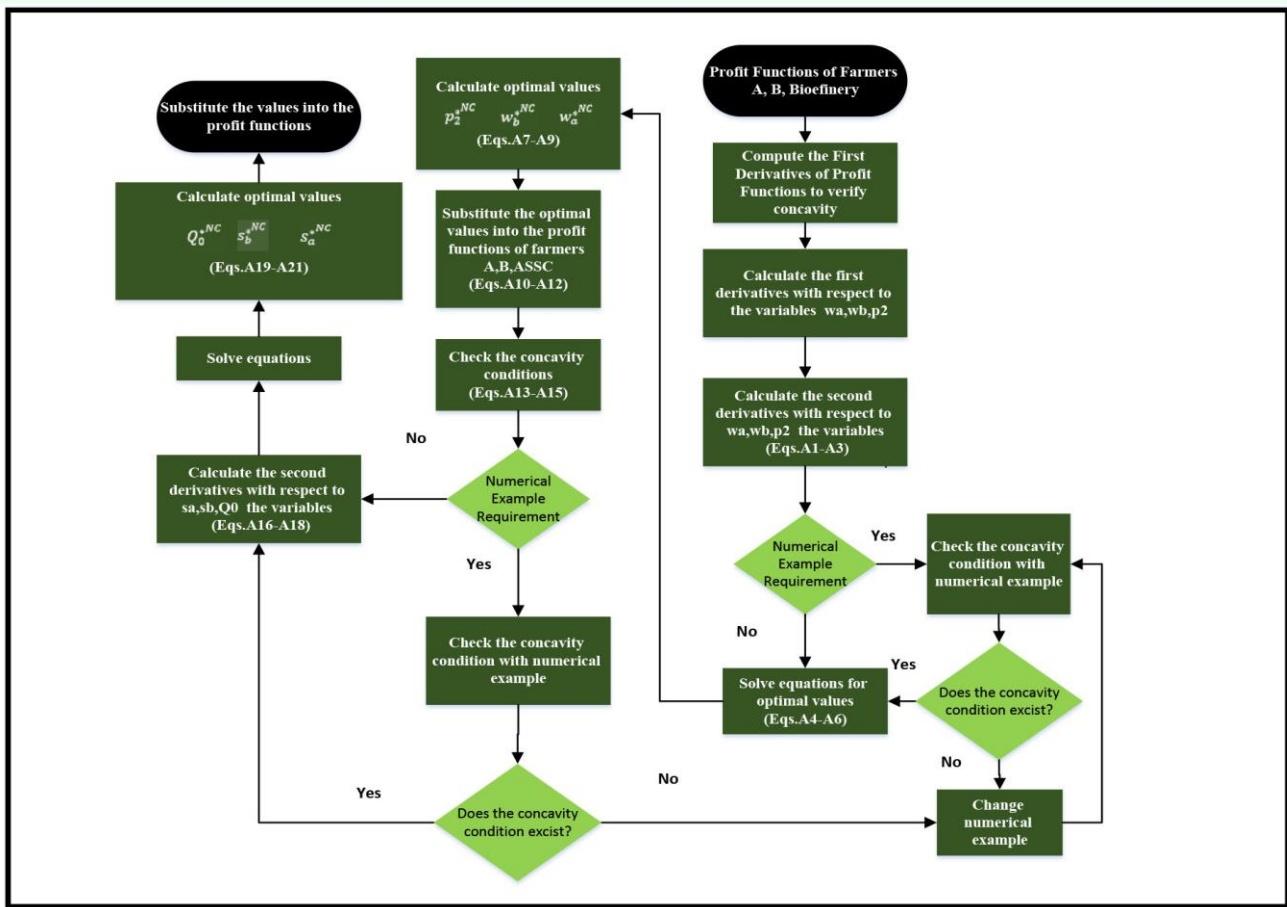
- Atchuthen, M.T. J., and Kumar, S. S. M., 2023. How the energy sector is affecting economic growth—comparing the United Kingdom with India. *International Journal of Economic Sciences*, 12(1), pp.1-14 <https://doi.org/10.52950/es.2023.12.1.001>.
- Boța-Avram, C., Apostu, S.A., Ivan, R. and Achim, M.V., 2024. Exploring the impact of macro-determinant factors on energy resource depletion: Evidence from a worldwide cross-country panel data analysis. *Energy Economics*, 130, p.107341. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107341>.
- Rogers, J.N., Stokes, B., Dunn, J., Cai, H., Wu, M., Haq, Z. and Baumes, H., 2017. An assessment of the potential products and economic and environmental impacts resulting from a billion ton bioeconomy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(1), pp.110-128. <https://doi.org/10.1002/bbb.1728>.
- Yue, D., You, F. and Snyder, S.W., 2014. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, pp.36-56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>.
- Sachan, A. and Adhikari, A., 2024. Demand issues in supply chain management. In *Supply Chain Management*, pp.34-57. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003509561>.
- Cachon, G.P. and Netessine, S., 2006. Game theory in supply chain analysis. *Models, Methods, and Applications for Innovative Decision Making*, pp.200-233. <https://doi.org/10.1287/educ.1063.0023>.
- Govindan, K., Popiuc, M.N. and Diabat, A., 2013. Overview of coordination contracts within forward and reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 47, pp.319-334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.001>.
- Yeh, K., Whittaker, C., Realff, M.J. and Lee, J.H., 2015. Two stage stochastic bilevel programming model of a pre-established timberlands supply chain with biorefinery investment interests. *Computers & Chemical Engineering*, 73, pp.141-153. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.11.005>.
- Razik, A.H.A., Khor, C.S. and Elkamel, A., 2019. A model-based approach for biomass-to-bioproducts supply chain network planning optimization. *Food and Bioproducts Processing*, 118, pp.293-305. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.001>.
- Samsatli, S., Samsatli, N.J. and Shah, N., 2015. BVCM: A comprehensive and flexible toolkit for whole system biomass value chain analysis and optimisation—mathematical formulation. *Applied Energy*, 147, pp.131-160. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.078>.
- Papapostolou, C., Kondili, E. and Kaldellis, J.K., 2011. Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. *Energy*, 36(10), pp.6019-6026. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.013>.
- Ye, F., Li, Y. and Yang, Q., 2018. Designing coordination contract for biofuel supply chain in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, pp.306-314. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.023>.
- Ren, Y., Peng, Y., Campos, B.C. and Li, H., 2021. The effect of contract farming on the environmentally sustainable production of rice in China. *Sustainable Production and Consumption*, 28, pp.1381-1395. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.08.011>.
- Vazifeh, Z., Mafakheri, F. and An, C., 2023. Coordination of bioenergy supply chains under government incentive policies: A game-theoretic analysis. *Clean Technologies and Environmental*

- Policy*, 25(7), pp.2185-2201.  
<https://doi.org/10.1007/s10098-023-02498-z>.
15. Stabile, M.C., Guimarães, A.L., Silva, D.S., Ribeiro, V., Macedo, M.N., Coe, M.T., Pinto, E., Moutinho, P. and Alencar, A., 2020. Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. *Land Use Policy*, 91, p.104362.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>.
  16. Shepherd, A.W., 2013. An introduction to Contract Farming. *FAO*.  
<https://www.fao.org/uploads/media/Contract-Farming-Introduction.pdf>.
  17. Kolling, J., 2019. Perspectives: Agriculture is how <https://www.cargill.com/story/perspectives-agriculture-is-how>.
  18. Dutta, P.K., 1999. Strategies and games: Theory and practice. *MIT Press*.  
<https://mitpress.mit.edu/9780262041690/strategies-and-games/>.
  19. He, N., Jiang, Z.Z., Huang, S. and Li, K., 2023. Evolutionary game analysis for government regulations in a straw-based bioenergy supply chain. *International Journal of Production Research*, 61(18), pp.6093-6114.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2030067>.
  20. Wang, G., Liao, Q., Wang, C., Liang, Y. and Zhang, H., 2022. Multiperiod optimal planning of biofuel refueling stations: A bi-level game-theoretic approach. *Renewable Energy*, 200, pp.1152-1165.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.054>.
  21. Mafakheri, F., Adebajo, D. and Genus, A., 2021. Coordinating biomass supply chains for remote communities: A comparative analysis of non-cooperative and cooperative scenarios. *International Journal of Production Research*, 59(15), pp.4615-4632.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1767312>.
  22. Fan, K., Li, X., Wang, L. and Wang, M., 2019. Two-stage supply chain contract coordination of solid biomass fuel involving multiple suppliers. *Computers & Industrial Engineering*, 135, pp.1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.016>.
  23. Wen, W. and Zhang, Q., 2015. A design of straw acquisition mode for China's straw power plant based on supply chain coordination. *Renewable Energy*, 76, pp.369-374.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.062>.
  24. Sun, J.C., Li, P.X. and Hou, L.N., 2011. Game equilibrium of agricultural biomass material competition-its assumptions, conditions and probability. *Energy Procedia*, 5, pp.1163-1171.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.204>.
  25. Sun, J., Lin, J. and Qian, Y., 2013. Game-theoretic analysis of competitive agri-biomass supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 43, pp.174-181.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.026>.
  26. Vazifeh, Z., Mafakheri, F. and An, C., 2021. Biomass supply chain coordination for remote communities: A game-theoretic modeling and analysis approach. *Sustainable Cities and Society*, 69, p.102819.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102819>.
  27. Liu, R., Dan, B., Zhou, M. and Zhang, Y., 2020. Coordinating contracts for a wind-power equipment supply chain with joint efforts on quality improvement and maintenance services. *Journal of Cleaner Production*, 243, p.118616.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118616>.
  28. Manouchehrabadi, M.K., Yaghoubi, S. and Tajik, J., 2020. Optimal scenarios for solar cell supply chain considering degradation in powerhouses. *Renewable Energy*, 145, pp.1104-1125.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.096>.
  29. Hafezalkotob, A., 2017. Competition, cooperation, and cooperation of green supply chains under regulations on energy saving levels. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, pp.228-250.  
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.11.004>.
  30. Hafezalkotob, A., Alavi, A. and Makui, A., 2016. Government financial intervention in green and regular supply chains: Multi-level game theory approach. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 11(3), pp.167-177.  
<https://doi.org/10.1080/17509653.2015.1004202>.
  31. Esmaeili, M., Allameh, G. and Tajvidi, T., 2016. Using game theory for analysing pricing models in closed-loop supply chain from short-and long-term perspectives. *International Journal of Production Research*, 54(7), pp.2152-2169.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115907>.
  32. Jiang, Z.Z., He, N., Xiao, L. and Sheng, Y., 2019. Government subsidy provision in biomass energy supply chains. *Enterprise Information Systems*, 13(10), pp.1367-1391.  
<https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1658807>.
  33. Bajgiran, A.H. and Jang, J., 2021. A study of subsidizing a biofuel supply chain to incentivize the production of advanced biofuel: An equilibrium problem with equilibrium constraints approach.

- International Journal of Energy Research*, 45(11), pp.16932-16946. <https://doi.org/10.1002/er.6914>.
34. Zhang, H., Xu, Z., Zhou, D. and Cao, J., 2017. Waste cooking oil-to-energy under incomplete information: Identifying policy options through an evolutionary game. *Applied Energy*, 185, pp.547-555. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.133>.
35. Kharaji Manouchehrabadi, M. and Yaghoubi, S., 2019. Solar cell supply chain coordination and competition under government intervention. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(2). <https://doi.org/10.1063/1.5035266>.
36. Peng, H., Sun, W. and Pang, T., 2023. Optimal strategies for a dual-channel farming supply chain with horizontal competition and cooperation. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 40(02), p.2250015. <https://doi.org/10.1142/S0217595922500154>.
37. Who is ADM and what do we do. <https://www.adm.com/en-us/about-adm/>.
38. Karray, S. and Martín-Herrán, G., 2019. Fighting store brands through the strategic timing of pricing and advertising decisions. *European Journal of Operational Research*, 275(2), pp.635-647. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.066>.
39. Gandhi, V.P., 1997. Technology, cost reduction, and returns in agriculture: A study of wheat and rice in Punjab. *Vikalpa*, 22(2), pp.35-48. <https://doi.org/10.1177/0256090919970207>.
40. Brechbill, S.C., Tyner, W.E. and Ileleji, K.E., 2011. The economics of biomass collection and transportation and its supply to Indiana cellulosic and electric utility facilities. *BioEnergy Research*, 4, pp.141-152. <https://doi.org/10.1007/s12155-010-9108-0>.
41. Wicke, B., Smeets, E., Watson, H. and Faaij, A., 2011. The current bioenergy production potential of semi-arid and arid regions in sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), pp.2773-2786. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.03.010>.
42. Bioenergy Technologies Office., Biofuel basics. *Energy.Gov*. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics>.
43. Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H. and Honnery, D., 2012. Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production. *Fuel*, 98, pp.131-139. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.031>.
44. Winchester, N. and Ledvina, K., 2017. The impact of oil prices on bioenergy, emissions and land use. *Energy Economics*, 65, pp.219-227. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.05.008>.
45. Liu, Y., Quan, B.T., Xu, Q. and Forrest, J.Y.L., 2019. Corporate social responsibility and decision analysis in a supply chain through government subsidy. *Journal of Cleaner Production*, 208, pp.436-447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.121>.
46. Kang, K., Wang, M. and Luan, X., 2021. Decision-making and coordination with government subsidies and fairness concerns in the poverty alleviation supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 152, p.107058. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107058>.
47. Maleki, F., Yaghoubi, S. and Fander, A., 2023. Organic level vs. sales effort in coordination of green food supply chain for deteriorating items. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), pp.13065-13097. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02603-0>.
48. Swain, B.B., 2012. Determinants of farmers' participation in contract farming: The cases of gherkin and paddy seed in Andhra Pradesh, India. *Millennial Asia*, 3(2), pp.169-185. <https://doi.org/10.1177/097639961200300203>.

پیوست - الف

در ابتدا لازم است قبل از ارائه توضیحات، به شکل (الف-۱)، که روند حل در حالت عدم همکاری را نشان می‌دهد، توجه شود.



شکل ۱-الف. روند حل مسئله در حالت عدم همکاری.

در حالت عدم همکاری، ابتدا باید مقادیر متغیرهای مرحله دوم به دست آید، تا همانند روش استکلیبرگ، در توابع سود مرحله اول جایگذاری شوند و متغیرهای مرحله اول به دست آیند. به عبارت دیگر، از تابع هدف کشاورزهای (الف) و (ب) و پالایشگاه، متغیر قیمت آن‌ها محاسبه می‌شوند. سپس در توابع سود کشاورزان و شرکت کشاورزی جایگذاری می‌شوند و متغیرهای تصمیم سطح فناوری و میزان سفارش اولیه به دست می‌آیند. لذا، ابتدا از تابع هدف کشاورزهای (الف)، (ب) و پالایشگاه به ترتیب نسبت به متغیرهای  $w_a, w_b, p_2$  و مشتق اول گرفته می‌شود. جهت بررسی تقعر توابع سود مذکور نسبت به متغیرهای اخیر مشتق دوم نیز محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_a}^{NC}}{\partial w_a^2} = -2k_r < 0 \tag{الف-۱}$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{F_b}^{NC}}{\partial w_b^2} = -2k_r < 0 \tag{الف-۲}$$

$$\frac{\partial^2 \pi_B^{NC}}{\partial p_r^2} = -2\beta < 0 \tag{الف-۳}$$

با توجه به برقراربودن شرط تقعر، مشتق اول توابع اخیر مساوی صفر قرار داده می‌شود.

$$\frac{\partial \pi_{F_a}^{NC}}{\partial w_a} = Q_1 + k_r Q_2 s_a + k_r w_b + k_r (c_{r1} - 2w_a - c_{r1} s_a \delta_1) = 0 \tag{الف-۴}$$

$$\frac{\partial \pi_{f_b}^{NC}}{\partial w_b} = -Q \cdot (1 + k_s s_a) + k_p w_a + k_r (c_r - \tau w_b - c_r s_b \delta_r) + (A - p_f \beta + p_f \gamma) \lambda = \cdot \quad (\text{الف-۵})$$

$$\frac{\partial \pi_{f_b}^{NC}}{\partial p_r} = A - \tau p_r \beta + p_f \gamma + (c_{Bio} + w_b y) \lambda \beta = \cdot \quad (\text{الف-۶})$$

با حل سه معادله و سه مجهول، روابط (الف-۷ تا الف-۹) به دست می آیند:

$$w_a^{*NC} = \frac{\tau k_r (Q + k_s Q s_a - \tau c_r k_r (-1 + s_z \delta_r) + c_r (k_r - k_r s_b \delta_r)) + k_r (A + p_f \gamma) \lambda + \beta (-c_{Bio} k_r + y (Q + k_s Q s_a + c_r (k_r - k_r s_a \delta_r))) \lambda^\tau}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau)} \quad (\text{الف-۷})$$

$$w_b^{*NC} = \frac{Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_z \delta_r) + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r) + \lambda (-A - p_f \gamma + c_{Bio} \beta \lambda)}{-\tau k_r - y \beta \lambda^\tau} \quad (\text{الف-۸})$$

$$p_r^{*NC} = \frac{\tau k_r (A + p_f \gamma) + \beta \lambda \left( -y \left( \frac{Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_z \delta_r)}{\tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r)} \right) \right) + \tau c_{Bio} k_r + \tau y \beta (A + p_f \gamma) \lambda^\tau}{\tau \beta (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau)} \quad (\text{الف-۹})$$

حال با به دست آوردن مقادیر متغیرهای مرحله ی دوم، آن ها مجدداً در توابع سود کشاورزهای (الف)، (ب) و همچنین شرکت کشاورزی جایگذاری می شوند، تا محاسبات متغیرهای مرحله ی اول انجام شود.

با جایگذاری مقادیر بهینه ی  $w_b^{*NC}$ ,  $w_a^{*NC}$ ,  $p_r^{*NC}$  در توابع سود شرکت کشاورزی و کشاورزان این روابط به دست می آیند:

$$\pi_{f_a}^{NC}(s_a) = \frac{-\tau s_a \tau + \left( \tau k_r (Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r) + c_r k_r (1 - s_a \delta_r)) + k_r (A + p_f \gamma) \lambda + \beta \lambda^\tau (-c_{Bio} k_r + y (Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r))) \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau)} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$\pi_{f_b}^{NC}(s_b) = \frac{-\frac{1}{\tau} s_b \tau + k_r \left( -Q \cdot (1 + k_s s_a) + c_r k_r (1 - s_a \delta_r) + \lambda (A + p_f \gamma - c_{Bio} \beta \lambda) \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau)} \quad (\text{الف-۱۱})$$

$$\pi_{ASSC}^{NC}(Q) = \frac{\left( -\tau k_r (Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r) + c_r k_r (1 - s_b \delta_r)) - k_r (A + p_f \gamma) \lambda \right)^* + \beta (c_{Bio} k_r - y (Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r))) \lambda^\tau}{\left( -\tau c_r k_r k_r + \tau c_r k_r k_r + \tau (k_r + k_r) Q \cdot (1 + k_s s_a) - \tau c_r k_r (k_r - \tau k_r) - (1 + s_b \delta_r) + (k_r - \tau k_r) (A + p_f \gamma) \lambda + (-c_{Bio} (k_r - \tau k_r) + (-\tau c_r k_r + \tau c_r k_r + Q + k_s Q s_a) y) \beta \lambda^\tau + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r) (-\tau k_r + \tau k_r - y \beta \lambda^\tau) \right)} \cdot \lambda \left( \tau A k_r p_f \gamma + \beta (-\tau c_{Bio} k_r + y (Q + k_s Q s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r) + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r))) \lambda \right)^* + \left( \tau c_r k_r (-1 + y) (-1 + s_b \delta_r) + c_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau) + (-1 + y) (-c_r k_r + Q + k_s Q s_a + c_r k_r s_a \delta_r - (A + p_f \gamma) \lambda + c_{Bio} \beta \lambda^\tau) \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau)} \quad (\text{الف-۱۲})$$

حال نیاز است تا تعذر توابع نسبت به  $Q, s_b, s_a$  متغیرهای محاسبه شود.

$$\frac{\partial \pi_{f_a}^{NC}}{\partial s_a} = \frac{1}{\tau} \left( -\tau \tau \alpha_1 + \frac{\tau (k_r Q + c_r k_r \delta_r) (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau - \tau k_r \alpha_r)}{k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau - \tau k_r \alpha_r)} \right) < \cdot \quad \text{اگر } \frac{\tau (k_r Q + c_r k_r \delta_r) (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau - \tau k_r \alpha_r)}{k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^\tau - \tau k_r \alpha_r)} < \tau \tau \alpha_1 \quad (\text{الف-۱۳})$$

$$\frac{\partial \pi_{F_a}^c}{\partial s_b^r} = -\tau_b + \frac{\tau c_r k_r \delta_r^r (-1 + \alpha_r) (k_r + y \beta \lambda^r - k_r \alpha_r)^r}{(\tau k_r + y \beta \lambda^r - \tau k_r \alpha_r)^r} < \cdot \quad ; \quad \frac{\tau c_r k_r \delta_r^r (-1 + \alpha_r) (k_r + y \beta \lambda^r - k_r \alpha_r)^r}{(\tau k_r + y \beta \lambda^r - \tau k_r \alpha_r)^r} < \tau_b \quad \text{اگر} \quad (14\text{-الف})$$

$$: \quad \left( \begin{array}{l} -\tau k_r (k_r + k_r) + \tau y (\tau k_r + k_r y) \beta \lambda^r + y^r \beta^r \lambda^r \\ + \tau \alpha_r (\tau k_r (k_r + k_r) + y (\tau k_r + k_r y) \beta \lambda^r - \tau k_r (k_r + k_r) \alpha_r) \end{array} \right) > \cdot \quad \text{اگر} \quad (15\text{-الف})$$

$$\frac{\partial \pi_{ASSC}^r}{\partial Q_r^r} = \frac{-(1 + k_r s_a)^r \left( \begin{array}{l} -\tau k_r (k_r + k_r) + \tau y (\tau k_r + k_r y) \beta \lambda^r + y^r \beta^r \lambda^r \\ + \tau \alpha_r (\tau k_r (k_r + k_r) + y (\tau k_r + k_r y) \beta \lambda^r - \tau k_r (k_r + k_r) \alpha_r) \end{array} \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^r - \tau k_r \alpha_r)^r} < \cdot$$

سپس از توابع اخیر به ترتیب نسبت به متغیرهای مشتق اول گرفته می‌شود، که این روابط به دست می‌آیند:

$$Q_0, s_b, s_a$$

$$\frac{\partial \pi_{F_a}^{NC}}{\partial s_a} = \frac{(k_r Q_r + c_r k_r \delta_r^r) (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^* \left( \begin{array}{l} \tau k_r (Q_r + k_r Q_r s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r^r) + c_r k_r (1 - s_b \delta_r^r)) \\ + k_r (A + p_f \gamma) \lambda + \beta (-c_{Bio} k_r + y (Q_r + k_r Q_r s_a + c_r k_r (-1 + s_a \delta_r^r))) \lambda^r \end{array} \right) - \tau_a s_a}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r} \quad (16\text{-الف})$$

$$\frac{\partial \pi_{F_b}^{NC}}{\partial s_b} = \frac{\tau c_r k_r \delta_r^r (k_r + y \beta \lambda^r) \left( \begin{array}{l} -Q_r (1 + k_r s_a) + c_r k_r (1 - s_a \delta_r^r) \\ + \lambda (A + p_f \gamma - c_{Bio} \beta \lambda) + c_r (-1 + s_b \delta_r^r) (k_r + y \beta \lambda^r) \end{array} \right) - s_b \tau_b}{(\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r} \quad (17\text{-الف})$$

$$\frac{\partial \pi_{ASSC}^{NC}}{\partial Q_r} = \frac{\left( \begin{array}{l} (-\tau k_r (-\tau c_r k_r k_r + \tau c_r k_r k_r + \tau (k_r + k_r) Q_r (1 - s_b \delta_r^r) (1 + k_r s_a)) + k_r (\tau k_r + k_r (-\tau + \tau y)) (A + p_f \gamma) \lambda) \\ (+ \beta \lambda^r (-\tau c_r k_r (k_r - \tau k_r) + k_r (-\tau c_r k_r + \tau c_r k_r - \tau c_r k_r + \tau Q_r + \tau k_r Q_r s_a) y + \tau k_r Q_r (1 + k_r s_a) y^r) \\ (1 + k_r s_a) + y (k_r - k_r y) \beta (A + p_f \gamma) \lambda^r + y (-c_r k_r + ((c_r + c_{Bio}) k_r + Q_r + k_r Q_r s_a) y) \beta^r \lambda^r \\ + \tau c_r k_r (-1 + s_b \delta_r^r) (k_r (-\tau k_r + k_r) - y (k_r + k_r - \tau k_r y) \beta \lambda^r) + c_r k_r (-1 + s_b \delta_r^r) (-\tau k_r (k_r - \tau k_r) + y (-k_r + \tau k_r y) \beta \lambda^r) \end{array} \right)}{\tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r} \quad (18\text{-الف})$$

با توجه به برقراربودن شرایط تقعر، روابط (الف-۱۶) تا (الف-۱۸) مساوی صفر قرار می‌گیرد و با حل سه معادله و سه مجهول این روابط به دست می‌آیند:

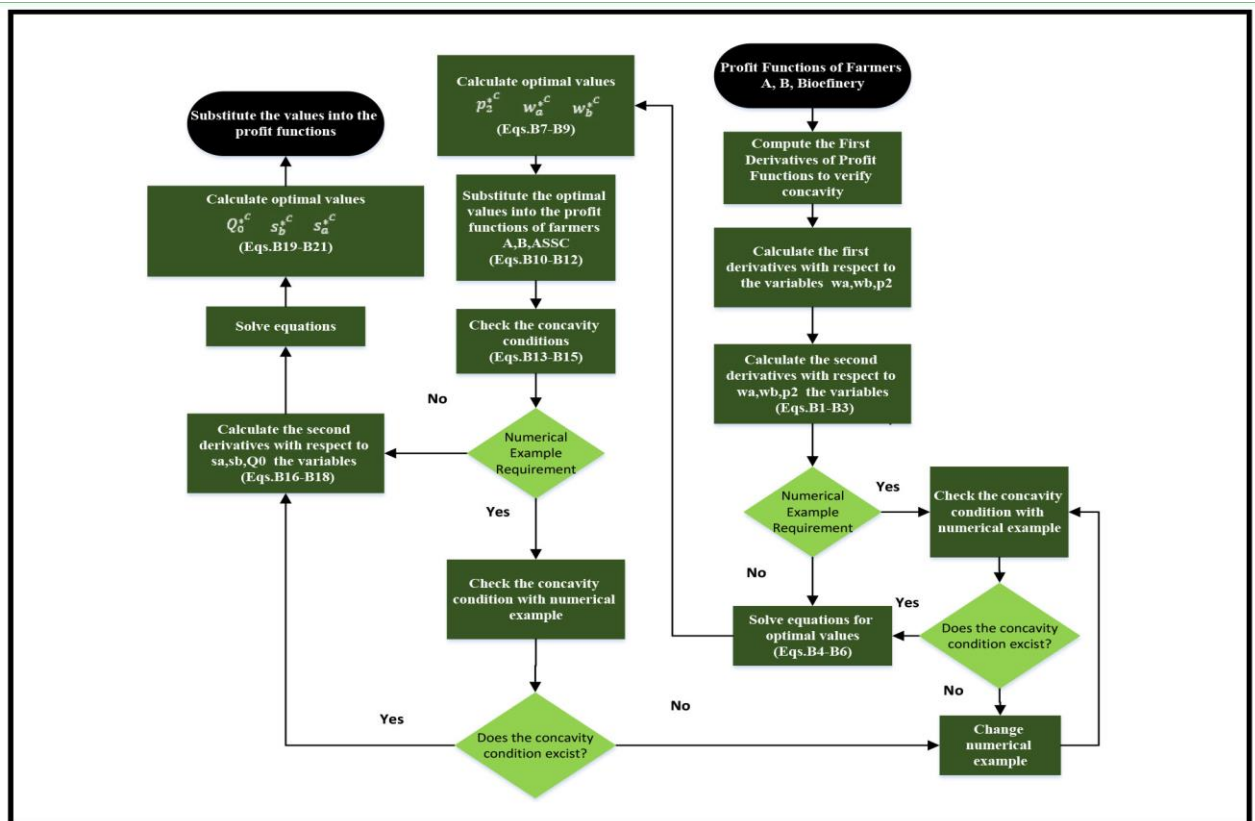
$$s_a^{*NC} = \frac{(k_r Q_r + c_r k_r \delta_r^r) (\tau k_r + y \beta \lambda^r) \left( \begin{array}{l} \tau k_r (-c_r k_r + Q_r + c_r (k_r - k_r s_b \delta_r^r)) \\ + k_r (A + p_f \gamma) \lambda - (c_{Bio} k_r + c_r k_r y - Q_r y) \beta \lambda^r \end{array} \right)}{-(k_r Q_r + c_r k_r \delta_r^r)^r (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r + \tau k_r (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r \tau_a} \quad (19\text{-الف})$$

$$s_b^{*NC} = \frac{\tau c_r k_r \delta_r^r (k_r + y \beta \lambda^r) (c_r k_r - c_r k_r + Q_r + k_r Q_r s_a + c_r k_r s_a \delta_r^r - (A + p_f \gamma) \lambda + (c_{Bio} + c_r y) \beta \lambda^r)}{\tau c_r k_r \delta_r^r (k_r + y \beta \lambda^r)^r - (\tau k_r + y \beta \lambda^r)^r \tau_b} \quad (20\text{-الف})$$

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon c_{\tau} k_{\tau} - \varepsilon c_{\tau} k_{\tau} k_{\tau} - \varepsilon A k_{\tau} \lambda + \varepsilon A k_{\tau} k_{\tau} \lambda - \varepsilon A k_{\tau} k_{\tau} y \lambda - \varepsilon k_{\tau} p_{\tau} \gamma \lambda + \varepsilon k_{\tau} k_{\tau} p_{\tau} \gamma \lambda \\
 & - \varepsilon k_{\tau} k_{\tau} p_{\tau} y \gamma \lambda + \varepsilon c_{Bio} k_{\tau} \beta \lambda^{\tau} - \varepsilon c_{Bio} k_{\tau} k_{\tau} \beta \lambda^{\tau} + \varepsilon c_{\tau} k_{\tau} k_{\tau} y \beta \lambda^{\tau} - \varepsilon c_{\tau} k_{\tau} k_{\tau} y \beta \lambda^{\tau} \\
 & + \varepsilon c_{Bio} k_{\tau} k_{\tau} y \beta \lambda^{\tau} - A k_{\tau} y \beta \lambda^{\tau} + A k_{\tau} y^{\tau} \beta \lambda^{\tau} - k_{\tau} p_{\tau} y \beta \gamma \lambda^{\tau} + k_{\tau} p_{\tau} y^{\tau} \beta \gamma \lambda^{\tau} + c_{Bio} k_{\tau} y \beta^{\tau} \lambda^{\tau} \\
 & - c_{\tau} k_{\tau} y^{\tau} \beta^{\tau} \lambda^{\tau} - c_{Bio} k_{\tau} y^{\tau} \beta^{\tau} \lambda^{\tau} + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_1) (\varepsilon k_{\tau} - \varepsilon k_{\tau} k_{\tau} + k_{\tau} y \beta \lambda^{\tau} - \varepsilon k_{\tau} y^{\tau} \beta \lambda^{\tau}) \\
 & + \varepsilon c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_1) (\varepsilon k_{\tau} + k_{\tau} (1 - \tau y) y \beta \lambda^{\tau} + k_{\tau} (-k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau})) \\
 Q_{\tau}^{*AC} = & \frac{\quad}{(1 + k_{\tau} s_a) (\varepsilon k_{\tau} + y^{\tau} \beta \lambda^{\tau} (\varepsilon k_{\tau} + \beta \lambda^{\tau}) + \varepsilon k_{\tau} (k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau}))}
 \end{aligned}
 \tag{الف-۲۱}$$

**پیوست - ب**

در حالت همکاری نیز روند به دست آوردن متغیرهای تصمیم و ترتیب محاسبات همانند حالت عدم همکاری است. در ابتدا لازم است قبل از ارائه ی توضیحات، به شکل (ب-۱)، که روند حل در حالت همکاری را نشان می دهد، توجه شود.



شکل ۱-ب. روند حل مسئله در حالت همکاری.

ابتدا لازم است متغیرهای تصمیم  $W_a, W_b, p_{\tau}$  و به دست آیند. بدین منظور شرط تعقر توابع سود کشاورزهای (الف)، (ب)، و پالایشگاه محاسبه می شود:

$$\frac{\partial^{\tau} \pi_{F_a}^c}{\partial w_a^{\tau}} = -\varepsilon k_{\tau} < 0 \tag{ب-۱}$$

$$\frac{\partial^{\tau} \pi_{F_b}^c}{\partial w_b^{\tau}} = -\varepsilon k_{\tau} < 0 \tag{ب-۲}$$

$$\frac{\partial^{\tau} \pi_B^c}{\partial p_{\tau}^{\tau}} = -\varepsilon \beta (1 - \alpha_{\tau}) < 0 \tag{ب-۳}$$

سپس مشتق اول توابع اخیر مساوی صفر قرار داده می شود:

$$\frac{\partial \pi_{F_a}^c}{\partial w_a} = Q_{\tau} + k_{\tau} Q_{\tau} s_a + k_{\tau} w_b + k_{\tau} (c_{\tau} - \varepsilon w_a - c_{\tau} s_a \delta_1) = 0 \tag{ب-۴}$$

$$\frac{\partial \pi_{\tau}^c}{\partial w_b} = -Q \cdot (1 + k_s s_a) + k_{\tau} w_a - \tau k_{\tau} w_b + (A - p_{\tau} \beta + p_f \gamma) \lambda + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) (-1 + \alpha_{\tau}) = 0 \quad (5-ب)$$

$$\frac{\partial \pi_B^c}{\partial p_{\tau}} = (A - \tau p_{\tau} \beta + p_f \gamma) (1 - \alpha_{\tau}) + (c_{Bio} + w_b y) \lambda \beta = 0 \quad (6-ب)$$

با حل سه معادله و سه مجهول اخیر، روابط ب- ۷ الی ب- ۹ به دست می‌آیند:

$$w_a^{*c} = \frac{\tau c_{\tau} k_{\tau} + Q + k_{\tau} Q s_a - \tau c_{\tau} k_{\tau} s_a \delta_{\tau} + c_{\tau} k_{\tau} (1 - s_b \delta_{\tau}) (1 - \alpha_{\tau}) + \lambda \left[ A + p_f \gamma - \left( \tau k_{\tau} (A + p_f \gamma) + \beta \left( \tau c_{Bio} k_{\tau} - y \left( \frac{Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau})}{+\tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau})} \right) \right) \lambda \right) \right]}{\tau k_{\tau} (\tau k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau} - \tau k_{\tau} \alpha_{\tau})} \quad (7-ب)$$

$$w_b^{*c} = \frac{-c_{\tau} k_{\tau} + Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} s_a \delta_{\tau} + \tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) - (A + p_f \gamma) \lambda + c_{Bio} \beta \lambda^{\tau} + \tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) \alpha_{\tau} (-1 + \alpha_{\tau}) + \alpha_{\tau} \left( \frac{-Q (1 + k_s s_a)}{+c_{\tau} k_{\tau} (1 - s_a \delta_{\tau}) - \tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) + (A + p_f \gamma) \lambda} \right) \lambda}{-\tau k_{\tau} - y \beta \lambda^{\tau} + \tau k_{\tau} \alpha_{\tau}} \quad (8-ب)$$

$$p_{\tau}^{*c} = \frac{\beta \lambda (\tau c_{Bio} k_{\tau} - y (Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau}) + \tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}))) \lambda + \tau y \beta (A + p_f \gamma) \lambda^{\tau} + \tau c_{\tau} k_{\tau} y \beta (-1 + s_b \delta_{\tau}) \lambda \alpha_{\tau} + \tau k_{\tau} (A + p_f \gamma) (1 - \alpha_{\tau})}{\tau \beta (\tau k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau} - \tau k_{\tau} \alpha_{\tau})} \quad (9-ب)$$

در مرحله‌ی بعد، مقادیر بهینه‌ی  $p_{\tau}^{*c}, w_b^{*c}, w_a^{*c}$  در توابع سود شرکت کشاورزی و کشاورزان جایگذاری می‌شوند:

$$\pi_{\tau}^c(s_a) = \frac{1}{\tau} \left( -\tau s_a^{\tau} \tau_a \alpha_1 + \frac{\left( \begin{array}{l} -\tau k_{\tau} (Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau}) + c_{\tau} k_{\tau} (1 - s_b \delta_{\tau})) - k_{\tau} (A + p_f \gamma) \lambda + \\ \beta \lambda^{\tau} (c_{Bio} k_{\tau} - y (Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau}))) + \tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) \alpha_{\tau} (-1 + \alpha_{\tau}) \\ + k_{\tau} \left( \frac{\tau (Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau}))}{-\tau c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) + (A + p_f \gamma) \lambda} \right) \alpha_{\tau} \end{array} \right)}{k_{\tau} (\tau k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau} - \tau k_{\tau} \alpha_{\tau})^{\tau}} \right) \quad (10-ب)$$

$$\pi_b^c(s_b) = \frac{-\frac{1}{\tau} s_b^{\tau} \tau_b + k_{\tau} \left( \begin{array}{l} -Q (1 + k_s s_a) + c_{\tau} k_{\tau} (1 - s_a \delta_{\tau}) + \lambda (A + p_f \gamma - c_{Bio} \beta \lambda) + \\ c_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) \alpha_{\tau} (-k_{\tau} - y \beta \lambda^{\tau} + k_{\tau} \alpha_{\tau}) + c_{\tau} (-1 + s_b \delta_{\tau}) (k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau}) + \\ (Q + k_{\tau} Q s_a + c_{\tau} k_{\tau} (-1 + s_a \delta_{\tau}) + c_{\tau} k_{\tau} (1 - s_b \delta_{\tau}) - (A + p_f \gamma) \lambda) \alpha_{\tau} \end{array} \right)}{(\tau k_{\tau} + y \beta \lambda^{\tau} - \tau k_{\tau} \alpha_{\tau})^{\tau}} \quad (11-ب)$$



$$\begin{aligned}
 & \left( \begin{aligned}
 & \tau k_s \tau_a \beta \tau_a (-1 + \alpha_\tau) (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau + \tau k_\tau \alpha_\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau) \\
 & \left( \tau k_\tau (A + p_f \gamma) + \beta \left( \tau c_{Bio} k_\tau - y \left( \begin{aligned}
 & Q + k Q s_a + c_\tau k_\tau (-1 + s_a \delta_\tau) \\
 & + \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau)
 \end{aligned} \right) \right) \right) \lambda + \\
 & \left( \tau y \beta (A + p_f \gamma) \lambda^\tau + \tau c_\tau k_\tau y \beta (-1 + s_b \delta_\tau) \lambda \alpha_\tau - \tau k_\tau (A + p_f \gamma) \alpha_\tau \right) \\
 & + \tau k_\tau y \beta \lambda \left( \begin{aligned}
 & \tau A k_\tau + \tau k_\tau p_f \gamma - \tau c_{Bio} k_\tau \beta \lambda - \tau c_\tau k_\tau y \beta \lambda - c_\tau k_\tau y \beta \lambda \\
 & + Q y \beta \lambda + k Q s_a y \beta \lambda + c_\tau k_\tau s_a y \beta \lambda \\
 & + \tau c_\tau k_\tau s_b y \beta \delta_\tau \lambda - \tau c_\tau k_\tau y \beta (-1 + s_b \delta_\tau) \lambda \alpha_\tau - \tau k_\tau (A + p_f \gamma) \alpha_\tau
 \end{aligned} \right) \\
 & \left( \begin{aligned}
 & \tau c_\tau k_\tau + c_\tau k_\tau - Q (1 - k_s) - c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - \tau c_\tau k_\tau s_b \delta_\tau + \lambda (A + p_f \gamma) - c_{Bio} \beta \lambda^\tau \\
 & - \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-1 + \alpha_\tau) + Q (1 + k_s) + c_\tau k_\tau (-1 + s_a \delta_\tau) \\
 & + \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) - \lambda (A + p_f \gamma) \alpha_\tau
 \end{aligned} \right) - \\
 & \left( \begin{aligned}
 & \tau c_\tau k_\tau + \tau c_\tau k_\tau k_\tau + \tau c_\tau k_\tau k_\tau + \tau k_\tau Q + \tau k_\tau k_\tau Q s_a - \tau c_\tau k_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - \tau c_\tau k_\tau s_b \delta_\tau \\
 & + \lambda k_\tau (A + p_f \gamma) - c_{Bio} k_\tau \beta \lambda^\tau + y \beta \lambda^\tau (\tau c_\tau k_\tau + Q + k Q s_a - c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau) \\
 & - \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-1 + \alpha_\tau) + k_\tau \left( \begin{aligned}
 & -\tau c_\tau k_\tau - \tau Q (1 - k_s) \\
 & + \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_a \delta_\tau) + \tau c_\tau k_\tau \alpha_\tau \\
 & (-1 + s_b \delta_\tau) - \lambda (A + p_f \gamma)
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned} \right) * \\
 & \left( \begin{aligned}
 & \tau c_\tau k_\tau - \tau c_\tau k_\tau k_\tau + \tau k_\tau Q + \tau k_\tau k_\tau Q s_a + \tau c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - \tau c_\tau k_\tau s_b \delta_\tau + \lambda k_\tau (A + p_f \gamma) - c_{Bio} k_\tau \beta \lambda^\tau \\
 & + y \beta \lambda^\tau (-C_\tau k_\tau + Q + k Q s_a + C_\tau k_\tau s_a \delta_\tau) - \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-1 + \alpha_\tau) \\
 & - k_\tau \left( \begin{aligned}
 & \tau Q + \tau k_\tau Q s_a + \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_a \delta_\tau) \\
 & - \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) + \lambda (A + p_f \gamma)
 \end{aligned} \right) \alpha_\tau \\
 & + \tau c_\tau k_\tau k_\tau \beta (1 - s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau) \\
 & \left( \begin{aligned}
 & c_\tau k_\tau - c_\tau k_\tau + Q (1 + k_s) + c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - C_\tau k_\tau s_b \delta_\tau - \lambda (A + p_f \gamma) + \\
 & \beta \lambda^\tau (c_{Bio} + c_\tau y - c_\tau s_b y \delta_\tau) + \left( \begin{aligned}
 & c_\tau k_\tau - Q - k Q s_a - c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau + \\
 & c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) + \lambda (A + p_f \gamma)
 \end{aligned} \right) \alpha_\tau \\
 & - c_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-k_\tau - y \beta \lambda^\tau + k_\tau \alpha_\tau)
 \end{aligned} \right) + \tau k_\tau k_\tau \beta \\
 & \left( \begin{aligned}
 & \tau c_\tau k_\tau + \tau C_\tau k_\tau + C_\tau k_\tau - Q - k Q s_a - C_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - \tau c_\tau k_\tau s_b \delta_\tau \\
 & + \lambda (A + p_f \gamma) + \beta \lambda^\tau (-c_{Bio} + c_\tau y) - \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-1 + \alpha_\tau) \\
 & + (-\tau c_\tau k_\tau - C_\tau k_\tau + Q + k Q s_a + C_\tau k_\tau s_a \delta_\tau + \tau c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) - \lambda (A + p_f \gamma)) \alpha_\tau \\
 & \left( \begin{aligned}
 & c_\tau k_\tau - C_\tau k_\tau + Q + k Q s_a + C_\tau k_\tau s_a \delta_\tau - c_\tau k_\tau s_b \delta_\tau - \lambda (A + p_f \gamma) \\
 & + \beta \lambda^\tau (c_{Bio} + c_\tau y - c_\tau s_b y \delta_\tau) + \left( \begin{aligned}
 & c_\tau k_\tau - Q - k Q s_a - c_\tau k_\tau s_a \delta_\tau + \\
 & c_\tau k_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) + \lambda (A + p_f \gamma)
 \end{aligned} \right) \alpha_\tau \\
 & - c_\tau (-1 + s_b \delta_\tau) \alpha_\tau (-k_\tau - y \beta \lambda^\tau + k_\tau \alpha_\tau)
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned} \right) \\
 \end{aligned} \right) = \frac{\pi_{ASSC}^{NC}(Q)}{\tau K_\tau \beta (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau}
 \end{aligned}
 \tag{۱۲-ب}$$

جهت بررسی شرط تقعر روابط به دست آمده، از توابع اخیر به ترتیب نسبت به متغیرهای  $Q, S_b, S_a$  مشتق دوم گرفته می شود:

$$\frac{\partial^2 \pi_F^C}{\partial s_a^\tau} = \frac{1}{4} \left( -\tau \tau_a \alpha_\tau + \frac{\tau (k_\tau Q + c_\tau k_\tau \delta_\tau)^\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau}{k_\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau} \right) < \frac{\tau (k_\tau Q + c_\tau k_\tau \delta_\tau)^\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau}{k_\tau (\tau k_\tau + y \beta \lambda^\tau - \tau k_\tau \alpha_\tau)^\tau} < \tau \tau_a \alpha_\tau \tag{۱۳-ب}$$

$$\frac{\partial \pi_{F_i}^c}{\partial s_b} = -\tau_b + \frac{\tau c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot} (-1 + \alpha_{\cdot}) (k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}}{(\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} < \frac{\tau c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot} (-1 + \alpha_{\cdot}) (k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}}{(\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} < \tau_b \quad \text{اگر (۱۴-ب)}$$

$$\frac{\partial \pi_{F_i}^c}{\partial s_a} = 1 - \left( -\tau_a \alpha_{\cdot} + \frac{\tau (k_{\cdot} Q + c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot}) (k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}}{k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} \right) < \frac{\tau (k_{\cdot} Q + c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot}) (k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}}{k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} < \tau_a \alpha_{\cdot} \quad \text{اگر (۱۵-ب)}$$

با توجه به برقراربودن شرط تقعر، مشتق اول توابع سود مذکور نسبت به متغیرهای  $Q, S_b, S_a$  محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial \pi_{F_i}^c}{\partial s_a} = -s_a \tau_a \alpha_{\cdot} + \frac{\left( \begin{array}{l} (k_{\cdot} Q + c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot}) (-\tau k_{\cdot} - y \beta \lambda^{\cdot} + \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot}) \\ -\tau k_{\cdot} (Q + k_{\cdot} Q s_a + C_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}) + C_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot})) - \\ k_{\cdot} (A + p_f \gamma) \lambda + \beta (c_{\cdot} k_{\cdot} - y (Q + k_{\cdot} Q s_a + c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}))) \lambda^{\cdot} \\ + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) \alpha_{\cdot} (-1 + \alpha_{\cdot}) + k_{\cdot} \left( \begin{array}{l} \tau (Q + k_{\cdot} Q s_a + C_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot})) \\ -\tau C_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) + (A + p_f \gamma) \lambda \end{array} \right) \alpha_{\cdot} \end{array} \right)}{\tau k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} \quad \text{(۱۶-ب)}$$

$$\frac{\partial \pi_{F_i}^c}{\partial s_b} = -s_b \tau_b + \frac{\tau c_{\cdot} k_{\cdot} \delta_{\cdot} (-1 + \alpha_{\cdot}) (-k_{\cdot} - y \beta \lambda^{\cdot} + k_{\cdot} \alpha_{\cdot})}{(\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} \left( \begin{array}{l} -Q (1 + k_{\cdot} s_a) + c_{\cdot} k_{\cdot} (1 - s_a \delta_{\cdot}) + \lambda (A + p_f \gamma - c_{\cdot} \beta \lambda) \\ + C_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) (k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot}) \\ + (Q + k_{\cdot} Q s_a + c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}) + C_{\cdot} k_{\cdot} (1 - s_b \delta_{\cdot})) - (A + p_f \gamma) \lambda \alpha_{\cdot} \\ + c_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) \alpha_{\cdot} (-k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} + k_{\cdot} \alpha_{\cdot}) \end{array} \right) \quad \text{(۱۷-ب)}$$

$$\frac{\partial \pi_{ASSC}^{NC}}{\partial Q} = \frac{\left( \begin{array}{l} \tau k_{\cdot} \left( -\tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau (k_{\cdot} + k_{\cdot}) Q + \tau k_{\cdot} (k_{\cdot} + k_{\cdot}) Q s_a \right) + k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} + k_{\cdot} (-\tau + \tau y)) \\ - c_{\cdot} (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot}) k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}) - c_{\cdot} k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} - k_{\cdot}) (-1 + s_b \delta_{\cdot}) \\ + c_{\cdot} k_{\cdot} (-\tau k_{\cdot} + k_{\cdot} (\tau - \tau y)) + \\ (A + p_f \gamma) \lambda + \beta \lambda^{\cdot} \left( \begin{array}{l} -\tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau k_{\cdot} Q + \tau k_{\cdot} k_{\cdot} Q s_a \\ + \tau k_{\cdot} Q y + c_{\cdot} k_{\cdot} (-k_{\cdot} + \tau k_{\cdot} y) (-1 + s_a \delta_{\cdot}) \\ -\tau c_{\cdot} k_{\cdot} (k_{\cdot} + k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} y) (-1 + s_b \delta_{\cdot}) \end{array} \right) \\ + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) \alpha_{\cdot} (-1 + \alpha_{\cdot}) \left( \begin{array}{l} -\tau k_{\cdot} (k_{\cdot} + k_{\cdot}) - (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} (-1 + y)) y \beta \lambda^{\cdot} \\ + \tau k_{\cdot} (k_{\cdot} + k_{\cdot}) \alpha_{\cdot} \end{array} \right) \\ + \alpha_{\cdot} \left( \begin{array}{l} \tau k_{\cdot} (\tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} - \tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} - \tau (k_{\cdot} + k_{\cdot}) Q (1 + k_{\cdot} s_a)) \\ + k_{\cdot} \left( \begin{array}{l} \tau k_{\cdot} y + A (-\tau k_{\cdot} + \tau k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} y) \\ -\tau p_f (\tau k_{\cdot} + k_{\cdot} (-\tau + \tau y)) \gamma \end{array} \right) \lambda + \\ \left( \begin{array}{l} \tau c_{\cdot} k_{\cdot} (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot}) + k_{\cdot} \left( \begin{array}{l} \tau c_{\cdot} k_{\cdot} - \tau c_{\cdot} k_{\cdot} + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} \\ -\tau Q (1 + k_{\cdot} s_a) \end{array} \right) y \end{array} \right) \beta \\ -\tau k_{\cdot} Q (1 + k_{\cdot} s_a) y^{\cdot} \\ + c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}) (\tau k_{\cdot} (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot}) + y (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} y) \beta \lambda^{\cdot}) \\ + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} (-1 + s_b \delta_{\cdot}) (\tau k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} - k_{\cdot}) + y (k_{\cdot} + k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} y) \beta \lambda^{\cdot}) \\ + k_{\cdot} \left( \begin{array}{l} -\tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau c_{\cdot} k_{\cdot} k_{\cdot} + \tau k_{\cdot} Q + \tau k_{\cdot} Q + \tau k_{\cdot} k_{\cdot} Q s_a \\ + \tau k_{\cdot} k_{\cdot} Q s_a - \tau c_{\cdot} (k_{\cdot} - \tau k_{\cdot}) k_{\cdot} (-1 + s_a \delta_{\cdot}) \\ -\tau c_{\cdot} k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} - k_{\cdot}) (-1 + s_b \delta_{\cdot}) + \tau A k_{\cdot} \lambda - \tau A k_{\cdot} \lambda \\ \lambda (-\tau k_{\cdot} y + \tau A k_{\cdot} y + p_f \gamma (\tau k_{\cdot} - \tau k_{\cdot} + \tau k_{\cdot} y)) \end{array} \right) \alpha_{\cdot} \end{array} \right)}{\tau k_{\cdot} (\tau k_{\cdot} + y \beta \lambda^{\cdot} - \tau k_{\cdot} \alpha_{\cdot})^{\cdot}} \quad \text{(۱۸-ب)}$$

روابط اخیر مساوی صفر قرار داده می شود و این روابط به دست می آید:

$$s_a^{*C} = \frac{(k_1 Q + c_{\cdot 1} k_r \delta_1) (-2k_r - y\beta\lambda^r + 2k_r \alpha_r) \left( \begin{aligned} & 2k_r (c_{\cdot 1} k_r - Q + c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_b \delta_r)) - k_r (A + p_f \gamma) \lambda \\ & + (c_{Bio} k_r + c_{\cdot 1} k_r y - Q y) \beta \lambda^r + 2c_{\cdot 1} k_r^r (-1 + s_b \delta_r) \alpha_r (-1 + \alpha_r) \\ & + k_r (2c_{\cdot 1} k_r - 2c_{\cdot 1} k_r + 2Q - 2c_{\cdot 1} k_r s_b \delta_r + A \lambda + p_f \gamma \lambda) \alpha_r \end{aligned} \right)}{2k_r \tau_a \alpha_r (2k_r + y\beta\lambda^r - 2k_r \alpha_r)^r - (k_1 Q + c_{\cdot 1} k_r \delta_1)^r (2k_r + y\beta\lambda^r - 2k_r \alpha_r)^r} \quad (19-ب)$$

$$s_b^{*C} = \frac{2c_{\cdot 1} k_r \delta_r (-1 + \alpha_r) (-k_r - y\beta\lambda^r + k_r \alpha_r) \left( \begin{aligned} & c_{\cdot 1} k_r - c_{\cdot 1} k_r + Q + k_1 Q s_a + c_{\cdot 1} k_r s_a \delta_1 - (A + p_f \gamma) \lambda \\ & + (c_{Bio} + c_{\cdot 1} y) \beta \lambda^r - \left( c_{\cdot 1} k_r + Q + k_1 Q s_a \right. \\ & \left. + c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_a \delta_1) - (A + p_f \gamma) \lambda \right) \alpha_r \\ & + c_{\cdot 1} \alpha_r (-k_r - y\beta\lambda^r + k_r \alpha_r) \end{aligned} \right)}{2c_{\cdot 1} k_r \delta_r^r (k_r + y\beta\lambda^r)^r - (2k_r - y\beta\lambda^r)^r \tau_b - \epsilon c_{\cdot 1} k_r \delta_r^r \alpha_r (k_r + y\beta\lambda^r - k_r \alpha_r)^r} \quad (20-ب)$$

$$+ 2c_{\cdot 1} k_r \delta_r^r \alpha_r^r (k_r + y\beta\lambda^r - k_r \alpha_r)^r + k_r \alpha_r \left( \begin{aligned} & -\epsilon c_{\cdot 1} k_r \delta_r^r (k_r + y\beta\lambda^r) \\ & + \epsilon (2k_r + y\beta\lambda^r) \tau_b + k_r (2c_{\cdot 1} k_r \delta_r^r - \epsilon \tau_b) \alpha_r \end{aligned} \right)$$

$$Q^{*C} = \frac{\begin{aligned} & \epsilon (c_1 - c_r) k_r^r k_r - k_r (2k_r + k_r (-\epsilon + 2y)) (A + p_f \gamma) \lambda + k_r \left( \begin{aligned} & 2c_{Bio} (k_r - 2k_r) \\ & + (2c_1 - \Delta c_r + 2c_{Bio}) k_r y \end{aligned} \right) \beta \lambda^r \\ & + y (-k_r + k_r y) \beta (A + p_f \gamma) \lambda^r - y (-c_{Bio} k_r + (c_r + c_{Bio}) k_r y) \beta^r \lambda^r \\ & + c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_a \delta_1) (2k_r (k_r - 2k_r) + y (k_r - 2k_r y) \beta \lambda^r) \\ & + 2c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_b \delta_r) (k_r (2k_r - k_r) + y (k_r + k_r - 2k_r y) \beta \lambda^r) \\ & - 2c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_b \delta_r) \alpha_r (-1 + \alpha_r) (-2k_r (k_r + k_r) - (k_r - 2k_r (-1 + y)) y \beta \lambda^r + 2k_r (k_r + k_r) \alpha_r) \\ & + \alpha_r \left( \begin{aligned} & 12 (-c_1 + c_r) k_r^r k_r + k_r (-2k_r y + A (\epsilon k_r - \lambda k_r + \epsilon k_r y) + 2p_f (2k_r + k_r (-\epsilon + 2y)) \gamma) \lambda \\ & + k_r (-2c_{Bio} k_r + c_{Bio} k_r (\epsilon - 2y) + (-2c_1 + \Delta c_r) k_r y) \beta \lambda^r - y \beta (k_r y - (k_r - k_r y) (A + p_f \gamma)) \lambda^r \\ & + 2c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_b \delta_r) (2k_r (-2k_r + k_r) - y (k_r + k_r - 2y k_r) \beta \lambda^r) + c_{\cdot 1} k_r (-1 + s_a \delta_1) \\ & \left( \begin{aligned} & \epsilon (c_1 - c_r) k_r k_r + 2c_{\cdot 1} (k_r - 2k_r) k_r (-1 + s_a \delta_1) \\ & + 2c_{\cdot 1} k_r (2k_r - k_r) (-1 + s_b \delta_r) + \left( \begin{aligned} & -2A k_r + A k_r (\epsilon - 2y) + 2k_r y \\ & - 2k_r p_f \gamma + k_r p_f (\epsilon - 2y) \gamma \end{aligned} \right) \lambda \end{aligned} \right) \alpha_r \end{aligned} \right) \end{aligned}}{(1 + k_1 s_a) \left( \begin{aligned} & \epsilon k_r (k_r + k_r) + 2y (2k_r + k_r y) \beta \lambda^r + y^r \beta^r \lambda^r + \epsilon k_r (k_r + k_r) \alpha_r^r - \\ & 2 (\epsilon k_r (k_r + k_r) + y (2k_r + k_r y) \beta \lambda^r) \alpha_r \end{aligned} \right)}$$

(21-ب)