

A Game-Theoretic Approach for Pricing in a Sustainable Supply Chain Considering Governmental Intervention and Water Rebound Effect: A Case Study of Iranian Food Products

Zahra Rezaei, z.rezaei@in.iut.ac.ir

PhD student, Department of Industrial Engineering, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Naser Molaverdi Isfahani, naserm@iut.ac.ir

Assistant Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Morteza Rasti-Barzoki, (corresponding author), rasti@cc.iut.ac.ir

Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Escalating freshwater depletion and contamination driven by anthropogenic activities pose a significant threat to global water accessibility, jeopardizing food security, environmental integrity, and economic prosperity. The dearth of water resources worldwide and the significance of the negative effects of wastewater pollution on the environment have promoted the discussion of water and wastewater treatment in the supply chain in this research. To create a sustainable supply chain, a subsidy has been proposed to encourage the producer to treat wastewater. The subsidy will be determined by the government. Wastewater generated during the production process undergoes treatment and is subsequently marketed for reuse within the supply chain. Wastewater treatment coupled with the reuse of treated wastewater in the supply chain effectively reduces freshwater consumption. Subsequently, the green manufacturer determines the selling price of each green product unit by considering the cost of wastewater treatment, the rise in fresh water consumption due to the rebound effect, and the impact of the amount of government subsidy for wastewater treatment. Given the concurrent roles of the government and the green producer within this domain and the impact of their decisions on each other, the game theory approach has been employed for the first time for pricing the green product under the mentioned conditions. This holistic approach offers a more realistic appraisal of freshwater consumption in production and paves the way for formulating effective water management strategies towards sustainable production. In this study, the designed game has been solved under two structures, namely Nash and Stackelberg. A parametric analysis of the parameters of the problem is conducted. A real-life case study from food industry of Iran is solved. The analysis of the results revealed that wastewater treatment for both the government and the green producer as players in both structures generally yield higher profits than not treating wastewater.

Keywords: Sustainable Supply Chain, Water Rebound Effect, Pricing, Game theory.

یک رویکرد نظریه بازی برای قیمت‌گذاری در یک زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن مداخلات دولتی و اثر بازگشتی آب: یک مطالعه موردی محصولات غذایی از ایران

زهرا رضائی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران z.rezaei@in.iut.ac.ir

ناصر ملاوردی اصفهانی

استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران naserm@iut.ac.ir

مرتضی راستی برزکی^۱

استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران rasti@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق با توجه به کمبود آب در جهان و اهمیت آلودگی زیست‌محیطی فاضلاب، به موضوع آب و تصفیه فاضلاب در زنجیره تأمین پرداخته شده است. پرداخت سوبسید دولتی برای تشویق تولیدکننده به تصفیه فاضلاب پیشنهاد شده است. تصفیه فاضلاب و فروش فاضلاب تصفیه شده برای استفاده مجدد منجر به ایجاد اثر بازگشتی حاصل از افزایش کارایی آب می‌شود که میزان مصرف آب تازه را برای تولید بالا می‌برد. با توجه به نقش همزمان دولت و تولیدکننده در این زمینه و تأثیر تصمیمات آن‌ها روی هم، رویکرد نظریه بازی برای قیمت‌گذاری محصول سبز استفاده شده است. تحلیل نتایج و حل یک مثال واقعی از صنعت لبنیات ایران نشان داد که با توجه به هدف دولت برای کاهش آلودگی زیست‌محیطی و کاهش مصرف آب در بخشی که پساب تصفیه شده استفاده می‌شود، معمولاً تصفیه فاضلاب برای هر دو بازیکن دولت و تولیدکننده، سود بیشتری نسبت به تصفیه نکردن فاضلاب دارد.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین پایدار، پایداری، اثر بازگشتی آب، قیمت‌گذاری، نظریه بازی.

^۱ نویسنده مسئول: مرتضی راستی برزکی، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها تلفن ۰۳۱۳۳۹۱۱۴۸۰ شماره ۰۳۱۳۳۹۱۵۵۲۶

رودخانه بسیار هزینه‌برتر و سخت‌تر خواهد بود [۱۱]. در بسیاری از بخش‌های جهان، مصرف بیش از حد آب تازه و آلودگی به وسیله فعالیت‌های انسانی فشار زیادی را روی دسترسی به آب می‌آورد که به دنبال آن می‌تواند روی امنیت غذایی، کیفیت محیط زیست و توسعه اقتصادی اثر بگذارد. در دهه‌های اخیر، رقابت برای منابع آب به دلیل رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و افزایش تقاضا برای تولیدات کشاورزی رو به افزایش بوده است [۱۲]. استفاده کارا و منصفانه از آب می‌تواند آسیب‌پذیری اقتصادی که به منابع آبی وابسته است را کم کند و به امنیت غذایی پایدار کمک کند [۱۳، ۱۴]. بنابراین، با توجه به اهمیت آب و محیط زیست، کنترل آلودگی آب ضروری است [۱۵] و باید سیاست‌ها و استراتژی‌هایی برای آن به کار برد.

پژوهش‌های زیادی در زمینه روش‌های بهره‌برداری از فاضلاب و پاک کردن آن انجام شده است. معمولاً برای پالایش فاضلاب، استفاده از روش‌های مختلف شیمی-فیزیکی یا زیستی یا استفاده از انرژی خورشیدی پیشنهاد می‌شود [۱۶-۲۰]. از فاضلاب تصفیه شده می‌توان در کشاورزی استفاده کرد [۲۱-۲۳]. برخی مطالعات نیز به بهره‌برداری از فاضلاب مثلاً برای تولید برق یا سوخت زیستی می‌پردازند [۲۴، ۲۵]. هم‌چنین در پژوهش‌هایی به تولید جلبک با استفاده از فاضلاب پرداخته‌اند که این جلبک تولیدی علاوه بر این که مصرف آب پاک برای تولید جلبک را کم می‌کند، آلودگی فاضلاب را کاهش می‌دهد و می‌تواند ارزش افزوده ایجاد کند. این جلبک در تولید دارو، مکمل‌های سلامتی، لوازم آرایشی و غذای حیوانات و سوخت زیستی کاربرد دارد [۲۶-۲۸].

به طور کلی، فاضلاب به دلیل پایین بودن نمک‌های معدنی محلول، نسبت به آب دریاها جزء آب‌های شیرین اما آلوده محسوب می‌شود. استفاده مجدد و بهره‌گیری از فاضلاب تصفیه شده به جای آب شیرین جهت آبیاری کشاورزی و هم‌چنین فضاهای سبز و ... دارای فواید اقتصادی فراوانی بوده و در مقایسه با شیرین‌سازی آب شور دریاها به مراتب ارزان‌تر می‌باشد [۲۳، ۲۹، ۳۰].

از جمله صنایعی که در ایجاد چالش‌های مرتبط با موضوع آب و فاضلاب نقش پررنگی دارد، صنایع غذایی است. صنعت غذا هم برای تولید محصولات با کیفیت و هم برای مسائل مرتبط با بهداشت در مرحله تولید، یک مصرف‌کننده بزرگ آب باکیفیت است [۳۱، ۳۲]. حجم فاضلابی که از کارخانجات تولید مواد غذایی حاصل می‌شود، قابل توجه بوده و قابل صرف نظر کردن نیست [۲۲، ۳۳]. در تولید مواد لبنی و گوشت و سایر مواد غذایی فاضلاب زیادی تولید می‌شود. مثلاً در صنعت لبنیات به ازای هر لیتر فرآوری شیر حدود ۰/۲ - ۱۰ لیتر فاضلاب تولید می‌شود و همانطور که می‌دانید صنعت لبنیات یکی از صنایع اصلی مواد غذایی است که اهمیت اقتصادی بالایی

در دنیای امروز که با چالش‌های متعددی از جمله تغییرات آب و هوایی، تخریب محیط زیست، نابرابری اجتماعی و اقتصادی روبرو هستیم، پایداری به عنوان یک ضرورت انکارناپذیر مطرح می‌شود. پایداری مفهومی چندوجهی است که به معنای توسعه‌ای پایدار در نظر گرفته می‌شود که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای برآورده کردن نیازهای خود، تأمین می‌کند [۱]. شریواستاوا پایداری را توان کاهش ریسک‌های بلندمدت مرتبط با مصرف منابع، نوسانات هزینه انرژی، تعهدات محصول و مدیریت آلودگی و ضایعات تعریف کرده است [۲]. ستینکایا و همکارانش یک سیستم متریک شامل سه بُعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را پیشنهاد داده‌اند که هر کدام از این سه بُعد شامل زیربخش‌هایی هستند که باعث افزایش پایداری در کل زنجیره تأمین می‌شوند. بُعد اجتماعی شامل زیربخش‌های سلامت و امنیت، کارکنان و کارمندان، اغتشاش و سر و صدا است و بُعد اقتصادی شامل زیربخش‌های کیفیت، کارآیی و مسئولیت‌پذیری است و بُعد زیست‌محیطی زیربخش‌های میزان انتشار گاز، بهره‌برداری از منابع طبیعی، ضایعات و بازیافت را شامل می‌شود [۳، ۴].

در عصر حاضر، رشد فزاینده تقاضا برای کالاها و خدمات، پیامدهای منفی متعددی را از جمله افزایش نرخ آلودگی، وقوع بلایای زیست‌محیطی و تخریب منابع طبیعی با استخراج بیش از حد منابع برای محیط زیست به دنبال دارد. این پدیده ضرورت انجام تحقیقات گسترده در زمینه پایداری زیست‌محیطی را بیش از پیش آشکار می‌سازد [۵، ۶].

تحقیق در زمینه پایداری زیست‌محیطی می‌تواند به یافتن راه‌حل‌های نوآورانه برای کاهش اثرات منفی فعالیت‌های انسانی بر محیط زیست کمک کند. توسعه روش‌های تولید کارآتر، استفاده از مواد اولیه پایدار، طراحی مجدد فرآیندها، ایجاد زنجیره تأمین شفاف، آموزش مصرف‌کنندگان از جمله اقداماتی هستند که می‌توان برای افزایش پایداری در تولید و زنجیره تأمین انجام داد [۵، ۷]. توسعه راه‌حل‌های پایدار برای تولید و زنجیره تأمین، نیازمند همکاری بین ذینفعان مختلف از جمله دولت‌ها، کسب‌وکارها، سازمان‌های غیردولتی و مصرف‌کنندگان است [۸-۱۰].

یکی از چالش‌های موجود در صنایع که به پایداری زیست‌محیطی مربوط می‌شود، مصرف بالای آب و ورود فاضلاب به محیط زیست است. ورود فاضلاب‌های صنعتی به محیط زیست (مثلاً به رودخانه) موجب آلودگی آب و کاهش کیفیت آب و آسیب رساندن به موجودات زنده محیط می‌شود و تصفیه آب در محیط زیست یا تصفیه آب

دارد و در سال‌های اخیر، تقاضا برای محصولات لبنی رشد قابل توجهی داشته است که به دنبال آن مصرف آب و تولید فاضلاب رو به افزایش بوده است [۲۸، ۳۴، ۳۵]. هم‌چنین، از آنجا که تعداد کارخانجات تولید مواد غذایی بسیار زیاد است، آب مصرفی و فاضلاب تولیدی آن‌ها باید مورد توجه قرار گیرد و نیاز به پژوهش در این زمینه احساس می‌شود.

در این تحقیق به منظور افزایش پایداری در زنجیره تأمین، به تصفیه فاضلاب برای کاهش آلودگی زیست‌محیطی آن و استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده در بخش دیگری از زنجیره به منظور کاهش مصرف آب پرداخته می‌شود. در زنجیره تأمین محصولات غذایی از پساب تصفیه شده می‌توان در کشاورزی استفاده کرد و کارایی استفاده از آب را در این زنجیره افزایش داد. ایده اقتصاد دایره‌ای در تعداد زیادی از صنایع نتیجه شده است و محدوده کاربرد آن در صنایع کلیدی فاضلاب و تولید غذا است. مفهوم اقتصاد دایره‌ای می‌تواند پایداری را از طریق بازسازی الگوهای تولید و مصرف، با استفاده از مدل‌ها و طرح‌های تجاری نوآورانه افزایش دهد [۳۶]. اقتصاد دایره‌ای برای افزایش کارایی استفاده از منابع، با استفاده از فرآیندهایی مثل استفاده مجدد، بازتولید و بازیافت پیشنهاد شده است [۳۷].

در تحقیقات اشاره شده است که دولت می‌تواند در ایجاد توسعه پایدار از هر سه بُعد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی نقش داشته باشد و این نقش را با سیاست‌های تعرفه‌ای مثل دادن سوبسید یا گرفتن مالیات ایفا می‌کند [۳۸]. از این رو، در این پژوهش برای تشویق تولیدکننده به تصفیه فاضلاب، سوبسید برای تصفیه فاضلاب پیشنهاد می‌شود [۳۹]. کاهش آلودگی زیست‌محیطی فاضلاب که با تصفیه فاضلاب محقق خواهد شد و کاهش مصرف آب تازه در بخش‌هایی که پساب تصفیه شده استفاده می‌شود برای مثال در کشاورزی، پایداری را از بُعد زیست‌محیطی تقویت خواهد کرد. بعلاوه به دلیل ارزان‌تر بودن پساب تصفیه شده نسبت به آب تازه، پایداری از بُعد اقتصادی افزایش می‌یابد.

با تصفیه فاضلاب و فروش آن، کارایی استفاده از آب در زنجیره تأمین بالا می‌رود. تولیدکننده سبز محصولات در مصرف آب صرفه‌جویی کم‌تری می‌کند و مصرف آب افزایش می‌یابد. پس هدف افزایش کارایی آب که با استفاده مجدد از آب (برای مثال در بخش کشاورزی) مورد نظر بوده است، آنطور که انتظار می‌رود محقق نمی‌شود و آب در بخش تولید اثر بازگشتی را تجربه می‌کند. اثر بازگشتی به هر شرایطی گفته می‌شود که کارایی $X\%$ بهبود پیدا می‌کند اما مصرف منبع کم‌تر از $X\%$ رد می‌شود یا افزایش می‌یابد [۴۰-۴۳]. افزایش کارایی در حوزه‌ی انرژی در پژوهش‌هایی بررسی

شده است [۴۴] و بنابراین مفهوم اثر بازگشتی بیشتر در حوزه‌ی انرژی مطرح شده است و بدین معناست که با افزایش کارایی استفاده از انرژی، مصرف انرژی بیشتر می‌شود [۴۵].

پژوهش‌های کمی به موضوع اثر بازگشتی آب پرداخته‌اند که جملگی به موضوع اثر بازگشتی آب در بخش کشاورزی و به‌ویژه در زمینه آبیاری توجه کرده‌اند. به عنوان نمونه، سانگ و همکارانش متوجه شدند که اگرچه در سال‌های اخیر، بهره‌وری آب تا حد زیادی در کشور چین به طور پیوسته، به دلیل بهبود تکنولوژی آبیاری، افزایش یافته است اما کل مصرف آب کشاورزی، آن طور که انتظار می‌رفت، کاهش نیافته است. آن‌ها دریافتند که به علت افزایش مداوم خروجی کشاورزی به دلیل پیشرفت تکنولوژیکی، آب کشاورزی در چین اثر بازگشتی را تجربه می‌کند. آن‌ها در پژوهش خود با استفاده از داده‌های موجود از سال‌های مختلف میزان افزایش بهره‌وری آب و اثر بازگشتی آب در سطح کلان را با روش‌های مختلفی فراهم کردند [۴۶].

پژوهش دیگری که بریل و همکاران در ارتباط با افزایش کارایی آبیاری به عنوان یک راه حل، برای مناطقی که دچار کمبود آب هستند، انجام داده‌اند، نشان می‌دهد که پتانسیل اثر بازگشتی توجه در حال رشدی را به خود جلب کرده است. در این پژوهش روش تحلیلی اقتصاد خرد برای دستیابی به سرمایه‌گذاری‌های ذخیره آب و کارایی آبیاری منتج در مصرف آب ارائه شده است. به علاوه این پژوهش رابطه بین کارایی آبیاری و تقاضای آب و قیمت‌گذاری آب را نیز تحلیل کرده است [۴۷].

با بررسی پژوهش‌های انجام شده، ملاحظه می‌شود که به پیامدهای اثر بازگشتی و جنبه‌های کنترل و مدیریت آن توجه نشده است. به طور کلی، با توجه به نقشی که دولت در تشویق تولیدکننده به تصفیه فاضلاب می‌تواند داشته باشد و نقش تولیدکننده در راستای حل چالش مربوط به آب در زنجیره تأمین و تأثیرگذاری تصمیمات آن‌ها بر هم، بکارگیری نظریه بازی برای قیمت‌گذاری محصول سبز ضروری به نظر می‌رسد که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. به طور خلاصه این پژوهش از دو جنبه قابل تأمل است:

۱. هیچ پژوهشی چالش موجود در زمینه مصرف آب و اثر بازگشتی آن در زنجیره تأمین را با رویکرد نظریه بازی مورد بررسی قرار نداده است (مواردی وجود دارد که به موضوع آب در زمینه آبیاری زمین‌های کشاورزی و ارتقاء کارایی تجهیزات آبیاری و اثر بازگشتی مرتبط با آن پرداخته شده است و میزان اثر بازگشتی آب اندازه‌گیری شده است که با آنچه در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار خواهد گرفت، متفاوت است).

۲. علاوه بر این که هیچ یک از کارهای پژوهشی انجام شده در زمینه زنجیره تامین به اثر بازگشتی آب و رفتار آن در این زنجیره اشاره‌ای نکرده است، اثر آن بر عوامل مربوط دیگر مانند سیاست‌های قیمت‌گذاری نیز بررسی نشده است. بخش‌های مختلف مقاله بدین ترتیب بیان شده‌اند که در بخش ۲ مسئله تعریف شده است. فرمول‌بندی مسئله در بخش ۳ مطرح شده است. دو ساختار بازی برای حل مسئله در بخش ۴ مطرح و تعادل مربوط به آن‌ها محاسبه شده است. تحلیل حساسیت مسئله در بخش ۵ انجام شده است و بخش ۶ شامل حل و بررسی یک مثال عددی از صنعت غذا در ایران است. نتیجه‌گیری کلی از مسئله مورد بررسی در این پژوهش در بخش ۷ بیان شده است.

۲ تعریف مسئله

دولت و تولیدکننده سبزی را در نظر بگیرید. هدف دولت افزایش پایداری زیست‌محیطی با کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از ورود فاضلاب به محیط زیست و کاهش مصرف آب و افزایش عایدی است. با این هدف، دولت در مورد مقدار سوبسید اعطایی به مصرف‌کننده محصول سبزی تصمیم‌گیری می‌کند. تولیدکننده سبزی با هدف افزایش عایدی، قیمت محصول خود را با توجه به هزینه تولید و سوبسید اعطایی دولت به مصرف‌کننده محصول تعیین می‌کند. هزینه تولید محصول سبزی با توجه به میزان آب مصرفی تولیدکننده برای تولید هر واحد محصول تعیین می‌شود که عواملی چون هزینه تصفیه فاضلاب، قیمت پساب تصفیه شده فروخته شده و اثر بازگشتی وابسته به درصد تصفیه فاضلاب روی آن مؤثرند. یک پارامتر جدید که عوامل مؤثر مطرح شده روی میزان آب مصرفی تولیدکننده برای تولید هر واحد محصول را در بر دارد، تعریف شده است. تقاضای تولیدکننده به قیمت محصول با احتساب سوبسید دولتی و تقاضای بازار پایه وابسته است.

۲-۱ علائم

علائم مورد استفاده در این مقاله عبارتند از:

زیروندها

P تولیدکننده

g دولت

پارامترها

α سهم بازار تولیدکننده P

β کشسانی تقاضای هر محصول ناشی از تغییر قیمت محصول

خود^۲

w_0 مصرف آب برای تولید هر واحد محصول قبل از تصفیه فاضلاب بر حسب لیتر

w_f میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول سبزی بر حسب لیتر

e میزان اثر بازگشتی

a ضریب تأثیر عوامل مطرح شده روی میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول

δ مقداری از آب مصرفی تولیدکننده است که در تولید محصول استفاده شده و به شکل فاضلاب خارج نمی‌شود. بر حسب لیتر

σ درصد حجمی تصفیه فاضلاب

P_w قیمت هر لیتر آب تازه بر حسب دلار

t_p درصد مالیات بر محصول

t_w درصد مالیات بر مصرف آب

c_0 هزینه اولیه تولید هر واحد محصول بدون احتساب هزینه آب بر حسب دلار

c_{ts} هزینه تصفیه هر واحد فاضلاب بر حسب دلار

P_{ts} قیمت فروش فاضلاب تصفیه شده بر حسب دلار

m بخشی از هزینه ثابت اولیه احداث تصفیه‌خانه بر حسب دلار

η ضریب تأثیر ارزش مالی حاصل از تصفیه فاضلاب هر واحد محصول برای دولت در عایدی دولت

v ارزش مالی کاهش آلودگی زیست‌محیطی و کاهش مصرف آب برای دولت حاصل از تصفیه فاضلاب به ازای تولید هر واحد محصول بر حسب دلار

متغیرهای تصمیم

Sb_g^j مضرپی از هزینه تصفیه فاضلاب برای محاسبه سوبسید

پرداختی دولت در ساختار j ($j = N, S$)

p_p^j قیمت تولیدکننده (قیمت مصرف‌کننده نهایی بدون احتساب

سوبسید و مالیات) در ساختار j ($j = N, S$)

توابع تقاضا و سود

d_p^j تقاضای محصول سبزی در ساختار j که $j = N, S$

π_p^j تابع سود تولیدکننده در ساختار j که $j = N, S$

π_g^j تابع سود دولت در ساختار j که $j = N, S$

علامت‌های اختصاری (بالاوند)

N بازی نش

S بازی استکلبرگ (رهبر: دولت و پیرو: تولیدکننده)

² Self-price elasticity

۲-۲ مفروضات

مفروضاتی که در این تحقیق در نظر گرفته شده‌اند، به شرح زیر می‌باشند:

- (۱) پارامترها و قیمت‌ها و توابع تقاضا نامنفی هستند.
- (۲) تقاضا برای محصولات یک تابع خطی کاهشی از قیمت است [۴۸].
- (۳) قیمت هر واحد فاضلاب تصفیه شده برای فروش بیشتر از هزینه تصفیه هر واحد فاضلاب است؛ یعنی $p_{ts} > c_{ts}$.
- (۴) بدیهی است که به ازای تولید هر واحد محصول، مقدار آبی که در فرآیند تولید استفاده شده و به صورت فاضلاب خارج نمی‌شود کم‌تر از مقدار آب تازه ورودی اولیه است؛ یعنی $w_0 > \delta$.

- (۵) تصفیه فاضلاب و فروش فاضلاب تصفیه شده، افزایش کارایی آب و اثر بازگشتی آب را به دنبال دارد. اثر بازگشتی آب روی میزان مصرف آب و هزینه تولید تولیدکننده اثرگذار است و رابطه بین اثر بازگشتی و هزینه تولید، خطی است.
- (۶) هزینه تصفیه فاضلاب و درآمد حاصل از فروش فاضلاب تصفیه شده روی میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول مؤثر است.

۳ فرمول‌بندی

در این تحقیق برای اولین بار رابطه‌ای برای اندازه‌گیری میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول سبز ارائه شده است که در آن اثر بازگشتی و هزینه تصفیه فاضلاب و درآمد حاصل از فروش فاضلاب تصفیه شده به عنوان عوامل تأثیرگذار در نظر گرفته شده است. میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول سبز در این تحقیق، مطابق با آنچه که در پیوست بیان شده است؛ از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$w_f = w_0 + ae\sigma(w_0 - \delta)(p_{ts} - c_{ts}) \quad (1)$$

بنابراین، هزینه تولید محصول سبز که از مجموع هزینه تولید محصول بدون هزینه آب بعلاوه هزینه آب مصرفی به ازای تولید هر واحد محصول تشکیل شده است؛ از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شود.

$$c_{pT} = c_0 + c_{fw} \quad (2)$$

$$c_{fw} = w_f(I + t_w)p_w + \sigma(w_f - \delta)c_{ts} \quad (3)$$

با توجه به تعریف مسئله و مفروضات مطرح شده، تقاضا برای محصول سبز تابعی از تقاضای بازار پایه و قیمت محصول با اعمال سوبسید دولتی است که از رابطه ۴ به دست می‌آید. دولت سوبسید خود را با توجه به هزینه تصفیه پساب به ازای هر واحد محصول در نظر می‌گیرد و مالیات بر محصول نیز بر قیمت تولیدکننده اعمال می‌شود.

$$d_p = \alpha - \beta((I + t_p)p_p - \sigma(w_f - \delta)c_{ts}sb_g) \quad (4)$$

توابع سود برای تولیدکننده سبز و دولت به ترتیب در روابط ۵ و ۶ بیان شده است. تابع سود تولیدکننده از سود حاصل از کسر هزینه تولید از قیمت محصول و درآمد حاصل از فروش فاضلاب تصفیه شده و نیز کسر هزینه اولیه احداث تصفیه‌خانه به دست آمده است. سود دولت از ارزش کاهش آلودگی زیست‌محیطی فاضلاب و کاهش مصرف آب در بخشی که پساب تصفیه شده استفاده می‌شود و کسر سوبسید پرداختی به مصرف‌کننده نهایی بعلاوه مالیات بر محصول و مالیات بر آب مصرفی به ازای تولید هر واحد محصول سبز حاصل می‌شود. کاهش آلودگی زیست‌محیطی فاضلاب و کاهش مصرف آب شاخص‌هایی برای افزایش پایداری در زنجیره تأمین از بُعد زیست‌محیطی هستند.

$$\pi_p = ((I + t_p)p_p - c_{pT} + \sigma(w_f - \delta)p_{ts})d_p - (m/2)\sigma^2 \quad (5)$$

$$\pi_g = \eta v \sigma(w_f - \delta)d_p - \sigma(w_f - \delta)c_{ts}sb_g d_p + t_p p_p d_p + t_w p_w w_f d_p \quad (6)$$

۴ ساختارهای بازی

از آنجا که در دنیای واقعی تولیدکنندگان به استفاده از روش‌های سنتی که کم‌هزینه‌تر هستند و برای آن‌ها اقتصادی‌تر است، نسبت به استفاده از روش‌های تولید سبز که معمولاً هزینه‌برتر هستند، بیشتر مایلند [۴۹]، بنابراین دولت در سطح بالاتر یا هم‌سطح با تولیدکننده سوبسیدی را پیشنهاد می‌دهد تا تولیدکننده را به تولید سبز تشویق کند. پس مسئله تعریف شده در این تحقیق تحت دو ساختار حل می‌شود که در هر ساختار دولت تعیین‌کننده سوبسید پرداختی خود و تولیدکننده محصول سبز قیمت محصول را معین می‌کند. در ساختار اول، یک بازی ایستا یا همزمان بین دولت و تولیدکننده سبز وجود دارد که متغیرهای تصمیم در تعادل نش تعیین می‌شوند. ساختار دوم یک بازی استکلبرگ است که دولت رهبر و تولیدکننده سبز پیرو است و متغیرهای تصمیم در تعادل استکلبرگ محاسبه می‌شوند.

لم ۱. تابع سود تولیدکننده (π_p) نسبت به قیمت محصول سبز بدون احتساب سوبسید دولتی و مالیات (p_p) مقعر است.

لم ۲. تابع سود دولت (π_g) نسبت به sb_g مقعر است.

۴-۱ بازی ایستا برای رسیدن به تعادل نش

در این بازی، بین تولیدکننده سبز و دولت همکاری وجود دارد که به طور همزمان به تصمیم‌گیری می‌پردازند.

قضیه ۱. p_p^N و sb_g^N از روابط ۷ و ۸ حاصل می‌شوند.

$$p_p^N = (A_1(A_2 + A_3) - A_4A_5) / \beta(3 + 2t_p) \quad (7)$$

$$sb_g^N = (A_6 + A_7 + \frac{A_8 + A_9}{A_{10}}) / \sigma c_{ts}(3 + 2t_p) \quad (8)$$

$$c_0 < (\alpha + \alpha t_p - \beta p_w w_0 + \beta p_w t_p t_w w_0) / \beta \quad (20)$$

اگر $\sigma > 0$ آنگاه باید رابطه ۲۱ برقرار باشد.

$$m < B_{27} (B_{28} + \beta \delta \sigma (B_{29} B_{30} + B_{31} + B_{32}) - B_{33})^2 \quad (21)$$

برای نامنفی بودن سود تولیدکننده در بازی استکلبرگ با در نظر گرفتن مفروضات، اگر $\sigma = 0$ آنگاه باید رابطه ۲۰ برقرار باشد و اگر $\sigma > 0$ آنگاه باید رابطه ۲۲ برقرار باشد.

$$m < B_{37} (B_{28} + \beta \delta \sigma (B_{29} B_{30} + B_{31} + B_{32}) - B_{33})^2 \quad (22)$$

برای نامنفی بودن سود دولت در بازی ایستا و استکلبرگ با در نظر گرفتن مفروضات، شرط زیر که در رابطه ۲۳ آمده است، باید برقرار باشد.

$$\alpha > B_{38} (B_{39} + \delta \sigma (B_{40} + B_{41} - c_{is} (B_{42} + a B_{43})) + B_{44}) \quad (23)$$

توجه: روابط مربوط به نمادهای A_1 تا A_{13} و نمادهای A_{20} تا A_{55} و A_{60} تا A_{69} و B_0 تا B_{47} و B_{51} تا B_{60} در پیوست آمده است.

۵ برخی نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مسئله

در این بخش به بررسی برخی روابط منتج مربوط به جوابهای تعادلی مسئله پرداخته شده است.

۵-۱ تغییر در سهم بازار پایه تولیدکننده (α)

لم ۵. با افزایش سهم بازار پایه محصول سبز سوبسید پرداختی دولت به مصرفکننده در هر دو ساختار بازی کاهش پیدا می کند.

لم ۶. با افزایش سهم بازار پایه محصول سبز، تقاضا برای محصول بالا می رود.

۵-۲ تغییر در کشسانی تقاضای محصول سبز ناشی از

تغییر قیمت محصول سبز (β)

لم ۷. با افزایش کشسانی تقاضای محصول سبز ناشی از تغییر قیمت محصول سبز (β) در هر دو ساختار بازی سوبسید پرداختی دولت به مصرفکننده افزایش پیدا می کند.

۵-۳ تغییر در مالیات بر آب مصرفی (t_w)

لم ۸. سوبسید پرداختی نهایی دولت به مصرفکننده در حالت تعادلی رابطه مستقیمی با مالیات بر آب مصرفی تولیدکننده سبز دارد.

لم ۹. تقاضا برای محصول سبز در حالت تعادلی در هر دو بازی، رابطه مستقیم با مالیات بر آب مصرفی تولیدکننده سبز دارد.

توجه: اثبات قضایای ۱ و ۳ و لمهای ۱ و ۲ و ۵ تا ۹ در پیوست ارائه شده است.

۶ نتایج عددی و تحلیل حساسیت مربوط به مثال عددی

در این بخش از مقاله به حل یک مثال واقعی و بررسی نتایج حاصل از آن پرداخته شده است.

قضیه ۲. تقاضا و سود تعادلی تولیدکننده و سود تعادلی دولت در تعادل نش به ترتیب در روابط ۹ و ۱۰ و ۱۱ آورده شده است:

$$d_p^N = \frac{1}{3 + 2t_p} (A_{25} + \beta (A_{23} - A_{22} + (A_{21} + A_{24}) A_{20})) \quad (9)$$

$$\pi_p^N = A_{32} (A_{31} + \beta (A_{30} - A_{29} + A_{28} + A_{27} A_{26} (-\delta + w_0)))^2 \quad (10)$$

$$\pi_g^N = A_{39} (A_{38} + \beta (A_{37} - A_{36} + A_{35} + A_{34} A_{33} A_{40}))^2 \quad (11)$$

تقاضای تعادلی تولیدکننده و سودهای تعادلی تولیدکننده و دولت با

جایگذاری p_p^N و sb_g^N در توابع تقاضا و سود حاصل شده اند. □

۴-۲ بازی استکلبرگ

در این بازی، دولت رهبر است و تولیدکننده پیرو است.

قضیه ۳. جوابهای تعادل استکلبرگ در روابط ۱۲ و ۱۳ آمده است.

$$s_g^S = \frac{(1 + t_p)(v\eta\sigma + \sigma c_{is} - \sigma p_{is} + p_w + 2p_w t_w) + A_{41}}{\sigma c_{is} (2 + t_p)} \quad (12)$$

$$p_p^S = A_{42} (A_{43} + A_{44} + \beta (A_{45} + A_{46} A_{41} + t_p (A_{12} A_{13}))) \quad (13)$$

قضیه ۴. سود تعادلی دولت و تقاضا و سود تعادلی تولیدکننده به ترتیب در روابط ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ آورده شده است:

$$\pi_g^S = A_{53} (A_{52} + \beta (A_{55} + A_{48} A_{47} A_{54}))^2 \quad (14)$$

$$d_p^S = B_{57} (B_{56} + \beta (B_{60} + B_{52} (\sigma p_{is} + B_{51}) B_{59})) \quad (15)$$

$$\pi_p^S = \frac{1}{4} ((A_{66} + \beta (A_{69} + A_{61} A_{60} A_{68}))^2) \quad (16)$$

تقاضای تعادلی تولیدکننده و سودهای تعادلی تولیدکننده و دولت با

جایگذاری p_p^S و sb_g^S در توابع تقاضا و سود حاصل شده اند. □

لم ۳. در این لم، شدنی بودن قیمت‌ها و سوبسیدهای تعادلی با در نظر گرفتن غیر منفی بودن آن‌ها بررسی شده است.

برای نامنفی بودن قیمت برقراری مفروضات مطرح شده کافی است. برای نامنفی بودن سوبسید در بازی ایستا با در نظر گرفتن مفروضات، شرطی که در رابطه ۱۷ آمده است، باید برقرار باشد.

$$\alpha < B_0 + \delta \sigma (B_1 + B_2 + B_3 - 2v\eta t_p) + B_4 (B_5 + B_6) - B_7 \quad (17)$$

برای نامنفی بودن سوبسید در بازی استکلبرگ با در نظر گرفتن مفروضات، شرطی که در رابطه ۱۸ آمده است، باید برقرار باشد.

$$\alpha < B_{11} (B_{12} + B_{13} B_{14} - B_{15} B_{16} w_0) \quad (18)$$

لم ۴. شدنی بودن تقاضاها و سودهای تعادلی با در نظر گرفتن غیر منفی بودن آن‌ها در این لم بررسی شده است.

برای نامنفی بودن تقاضا در بازی ایستا و استکلبرگ با در نظر گرفتن مفروضات، شرطی که در رابطه ۱۹ آمده است، باید برقرار باشد.

$$\alpha > B_{17} (B_{18} + \delta \sigma (B_{19} + B_{20} - c_{is} (B_{21} + B_{22})) + B_{23}) \quad (19)$$

برای نامنفی بودن سود تولیدکننده در بازی ایستا با در نظر گرفتن مفروضات، اگر $\sigma = 0$ آنگاه باید رابطه ۲۰ برقرار باشد.

پارامتر	مقدار پارامتر	منبع
α^*	۲۲۰۰۰۰۰۰۰	[۵۱, ۵۰]
P_{TS}^*	۰/۰۰۱۷۴	[۵۲]
δ	۲/۱۸۵۷۱۴۸	[۵۳]
P_W	۰/۱۱۹	[۵۴]
m^*	۶۵۰	[۵۵]
w_0	۱۲/۱۴۲۸۶	[۵۶]
a^*	۱۰۰	[۵۷]
c_{TS}^*	۰/۰۰۱۱۹	[۵۵]
t_W	۰/۰۹	[۵۸]
c_0	۰/۶۸۵۹۵	[۵۷, ۵۲]
σ^*	۰/۶۰	[۵۹]
t_p	۰/۰۹	[۶۰]
β	۸۵۰۰۰۰۰۰	
η	۰/۲	
ν	۰/۲	
w_f	۱۲/۵۴۹۱	محاسبه شده
e	۱/۱۴	

(۱ دلار معادل ۴۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است)

* مقادیر این پارامترها از طریق روش‌های میدانی مثل مصاحبه با شرکت‌های مرتبط در سال ۱۴۰۰ شمسی به دست آمده است.

مقادیر پارامترهای مسئله مربوط به محصول ماست تولید شرکت کاله در سال ۱۴۰۰ در ایران است که در جدول ۱ آمده است. در این مثال فرض شده است که تولیدکننده محصول غذایی پساب تولیدی خود را تصفیه کرده و به کشاورز می‌فروشد. جواب‌های تعادلی محاسبه شده در جدول ۲ آورده شده است. توجه شود که قیمت‌ها بر حسب دلار است و واحد اندازه‌گیری آب لیتر است.

محاسبات برای مثال واقعی این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل تأثیر عوامل مطرح شده بویژه اثر بازگشتی، میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول غذایی پس از تصفیه فاضلاب به اندازه‌ی $w_f - w_0$ که برابر با ۰/۴۰۶ لیتر است؛ افزایش یافته است.

پساب تصفیه شده طبق $\sigma(w_f - \delta)$ محاسبه می‌شود که برابر با ۶/۲۱۷۸ لیتر است که مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد. بنابراین در زنجیره تأمین که تولیدکننده و کشاورز را در بر دارد، به اندازه ۶/۲۱۷۸ کاهش زیست‌محیطی و نیز صرفه‌جویی در مصرف آب تازه به ازای هر واحد تقاضا ایجاد می‌شود که مقدار قابل توجهی است. این مقدار نشان‌دهنده‌ی افزایش چشمگیر و بارزی در پایداری زیست‌محیطی در زنجیره تأمین محصولات غذایی است.

در ادامه این بخش، رفتار جواب‌های تعادلی به دست آمده از حل مثال عددی نسبت به تغییرات برخی پارامترها بررسی می‌شود. جدول ۲ مقادیر متغیرهای مسئله در حالت تعادل حاصل از حل مثال واقعی

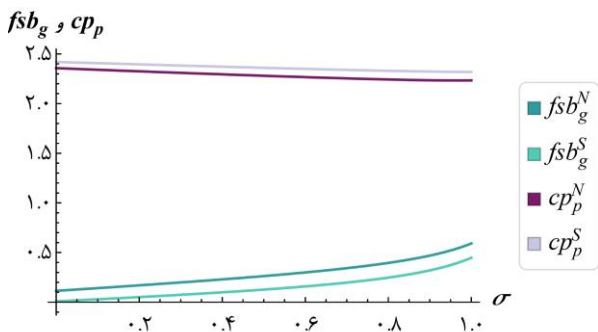
ساختارهای بازی		
ایستا یا نش (N)	استکلبرگ (S)	
۲/۳۹۳۷۳	۲/۳۲۸۰۷	p_p
۳۹/۹۳۳۴	۲۲/۰۷۶	sb_g
۲/۲۸۹۰۶	۲/۳۶۰۶۳	cp_p
۰/۳۲۰۱۱	۰/۱۷۶۹۶۴	fsb_g
۲/۱۵۱۴۱×۱۰ ^۷	۱/۹۳۴۶۲×۱۰ ^۷	d_p
۷/۶۰۷۹×۱۰ ^۶	۴/۴۰۳۱۲×۱۰ ^۶	π_p
۷/۶۰۸۰۳×۱۰ ^۶	۸/۴۴۲۹۴×۱۰ ^۶	π_g

۶-۱ تغییرات درصد حجمی تصفیه فاضلاب (σ)

با افزایش درصد تصفیه فاضلاب، میزان اثر بازگشتی و به دنبال آن میزان مصرف آب افزایش پیدا می‌کند. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود که این روند با افزایش σ شیب تندتری به خود گرفته است و از حدود $\sigma = 0.872$ شیب نمودار بسیار بیشتر از قبل است.

سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده با افزایش درصد تصفیه فاضلاب افزایش می‌یابد که این افزایش ابتدا با شیب کم‌تر و سپس با شیب بیشتری پیش می‌رود. این روند با توجه به رفتار اثر بازگشتی و میزان مصرف آب نسبت به درصد تصفیه فاضلاب منطقی است. با افزایش درصد تصفیه فاضلاب، قیمت نهایی مصرف‌کننده نزولی است که با توجه به رفتار سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده قابل توجه است. در واقع، روند تغییرات قیمت بدون احتساب سوبسید پرداختی دولت و مالیات نسبت به افزایش درصد تصفیه فاضلاب روندی صعودی است که با اعمال سوبسید پرداختی دولت روندی نزولی پیدا می‌کند. به طور کلی حساسیت سوبسید پرداختی نسبت به تغییرات درصد تصفیه فاضلاب بیشتر از قیمت است. این رفتارها در شکل ۲ قابل مشاهده است.

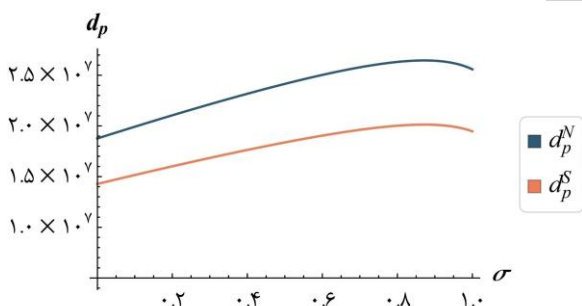
همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، روند تغییرات تقاضا با توجه به تغییرات درصد تصفیه فاضلاب بدین صورت است که با افزایش درصد تصفیه فاضلاب، تقاضا صعود می‌کند. البته روند صعودی تقاضا نسبت به σ تا پایان ادامه‌دار نیست. رفتار صعودی تقاضا تا حدود $\sigma = 0.872$ ادامه دارد که به دلیل سوبسید دولتی برای تصفیه فاضلاب است. پس از حدود $\sigma = 0.872$ که میزان آب مصرفی به دلیل اثر بازگشتی با شیب تندتری افزایش یافته است (شکل ۱ را



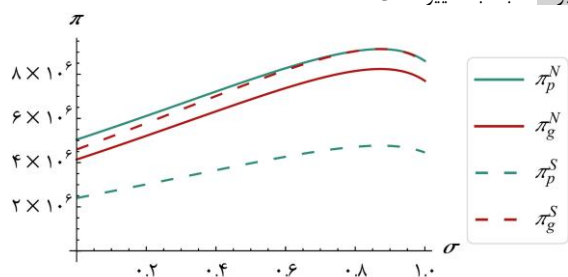
شکل ۲ نمودار مربوط به روند تغییرات سوبسید پرداختی دولت به مصرف کننده و قیمت نهائی مصرف کننده در حالت تعادل در دو بازی نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات σ

۶-۳ تغییرات اثر بازگشتی (e)

افزایش میزان اثر بازگشتی کاهش تقاضا برای محصول سبز را در دو بازی ایستا و استکلبرگ به دنبال خواهد داشت. حساسیت تقاضا نسبت به تغییرات اثر بازگشتی در هر دو ساختار بازی یکسان است. شکل ۶ را ببینید.



شکل ۳ نمودار مربوط به روند تغییرات تقاضاهای تعادلی تولیدکننده در دو ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات σ



شکل ۴ نمودار مربوط به روند تغییرات سودهای تعادلی دولت و تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات σ

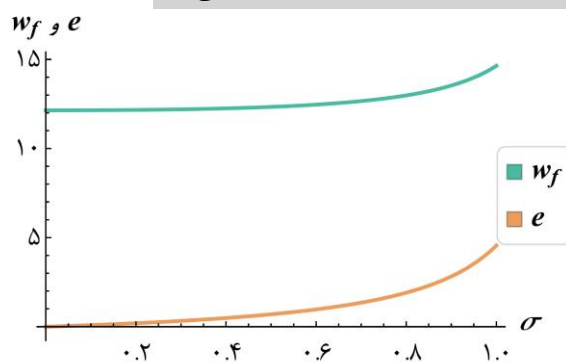
سودهای تعادلی تولیدکننده و دولت در ساختار نش و استکلبرگ رابطه‌ای معکوس با اثر بازگشتی دارند. حساسیت سودهای تعادلی نسبت به تغییرات اثر بازگشتی مشابه حساسیت تقاضاها در هر دو ساختار بازی یکسان است که در شکل ۷ قابل ملاحظه است.

۶-۴ تغییرات مالیات بر محصول (t_p)

در هر دو بازی با زیاد شدن درصد مالیات بر محصول، سوبسید پرداختی دولت به مصرف کننده نهائی کمی افزایش خواهد یافت و قیمت نهائی مصرف کننده کمی کاهش می یابد. شکل ۸

ببینید)، تقاضا هم با شیب تندتری کاهش می یابد. این موضوع اثر منفی مصرف بالای آب را که به علت وجود اثر بازگشتی پدید آمده است، روی تقاضا نشان می دهد. در واقع می توان گفت که با توجه به شرایط مسئله بهترین مقدار σ برای تولیدکننده مقدار $\sigma = 0.872$ است. هم چنین، حساسیت تقاضا نسبت به درصد تصفیه فاضلاب در ساختار نش کمی بیش تر است.

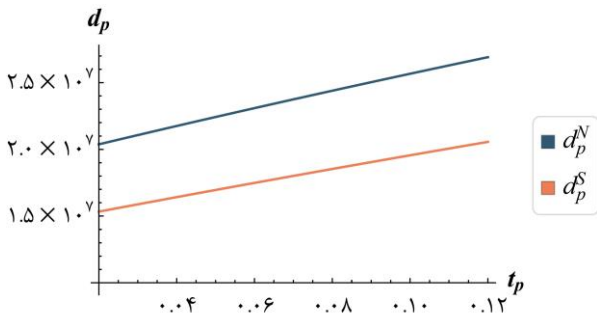
با توجه به شکل ۴، بررسی تغییرات سودهای تعادلی دو بازیکن در دو ساختار بازی نسبت به تغییرات درصد تصفیه فاضلاب نشان می دهد که روند سودها روندی مشابه با روند تقاضا است و در مقدار $\sigma = 0.872$ به بیش ترین مقدار خود می رسد.



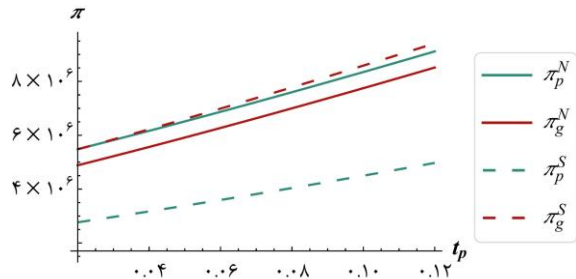
شکل ۱ نمودار مربوط به روند تغییرات w_f و e نسبت به تغییرات σ

۶-۲ ناحیه تقاضای مثبت با توجه به تغییرات درصد حجمی تصفیه فاضلاب (σ) و میزان اولیه آب مصرفی (w_0)

همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می کنید برای مقادیر کم تر w_0 تقاضا برای هر درصد تصفیه فاضلاب مثبت است اما برای مقادیر بیشتر از ۱۸ لیتر این روند صدق نمی کند. برای مثال اگر میزان اولیه آب مصرفی برای تولید هر واحد محصول حدود ۲۲/۷ لیتر باشد، حدود ۸۳ درصد از فاضلاب تولیدی باید تصفیه شود تا تقاضا مثبت باشد یا اگر میزان اولیه آب مصرفی برای تولید هر واحد محصول حدود ۲۲ لیتر باشد، حداقل ۶۳ درصد و حداکثر ۸۳ درصد از فاضلاب تولیدی باید تصفیه شود تا تقاضا مثبت باشد. اگر میزان اولیه آب مصرفی بالای حدود ۲۳ لیتر باشد تقاضا منفی می شود که در این صورت اثر منفی روی سود تولیدکننده خواهد داشت. مقادیر بالای w_0 تولید بیشتر پساب را به دنبال دارد و بنابراین تصفیه فاضلاب اهمیت بیشتری پیدا می کند. بنابراین در این شرایط لازم است با استفاده از روش های کارآتر تولید، آب مصرفی را کاهش داد و یا با بکارگیری روش های بازاریابی و آگاهی دادن به مصرف کنندگان در مورد مزایای تولید محصول سبز، تقاضا را افزایش داد.



شکل ۹ نمودار مربوط به روند تغییرات تقاضاهای تعادلی تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات t_p



شکل ۱۰ نمودار مربوط به روند تغییرات سودهای تعادلی دولت و تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات t_p

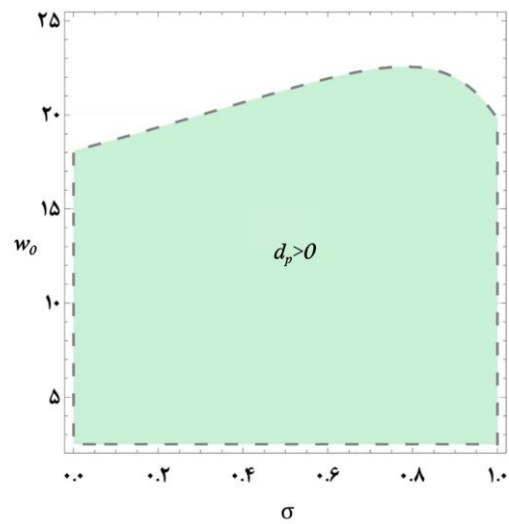
۶-۵ تغییرات قیمت آب (p_w)

همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود؛ با بالا رفتن قیمت آب مصرفی تولیدکننده، سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده و همچنین قیمت نهایی مصرف‌کننده افزایش پیدا می‌کنند که حساسیت سوبسید پرداختی دولت نسبت به تغییرات p_w در مقایسه با قیمت نهایی مصرف‌کننده بیشتر است. تقاضاها و سودها در هر دو بازی رابطه‌ای غیرمستقیم با p_w دارند. در مقادیر پایین قیمت آب، یعنی مقادیر کم‌تر از $0/09$ دلار برای هر لیتر آب، سوبسید پرداختی دولت در ساختار استکلبرگ منفی است. در واقع اگر آب ارزان باشد، دولت تمایلی به پرداخت سوبسید برای تصفیه فاضلاب ندارد و پرداخت سوبسید برای دولت سودآور نخواهد بود. شکل ۱۱ را ببینید. البته در نمودار مربوط به تابع سود در شکل ۱۳، سود دولت برای این مقادیر قیمت آب مثبت شده است. با توجه به این که در واقعیت سوبسید منفی قابل قبول نیست؛ این مورد دریافت سوبسید بوسیله دولت تلقی شده است که سود دولت را مثبت کرده است.

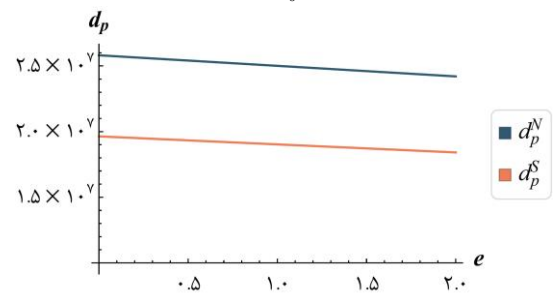
۶-۶ جمع‌بندی

نتیجه یک: به دلیل وجود اثر بازگشتی که افزایش مصرف آب تازه را به ازای تولید هر واحد محصول سبز به دنبال دارد، به دلیل افزایش هزینه‌های تولید، اثر بازگشتی تأثیری منفی روی تقاضاها و سودهای تعادلی دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که حتی با وجود اثر بازگشتی آب، تصفیه فاضلاب هم به نفع دولت و هم به نفع تولیدکننده است اما برای تشویق بیشتر تولیدکنندگان به تصفیه

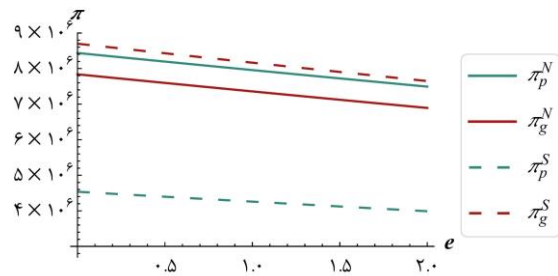
با افزایش درصد مالیات بر محصول، تقاضا برای محصول سبز زیاد می‌شود. سودهای تعادلی بازیکنان افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به تغییرات مالیات بر محصول را در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ می‌بینید.



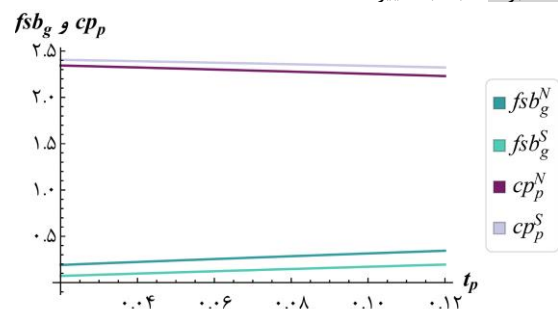
شکل ۵ نمودار مربوط به ناحیه تقاضاهای تعادلی مثبت تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات σ و w_0



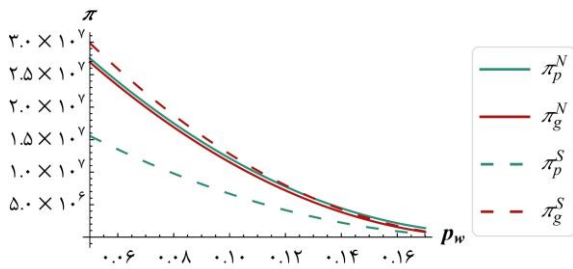
شکل ۶ نمودار مربوط به روند تغییرات تقاضاهای تعادلی تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات e



شکل ۷ نمودار مربوط به روند تغییرات سودهای تعادلی دولت و تولیدکننده در دو ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات e



شکل ۸ نمودار مربوط به روند تغییرات سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده و قیمت نهایی مصرف‌کننده در حالت تعادل در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات t_p



شکل ۱۳ نمودار مربوط به روند تغییرات سودهای تعادلی دولت و تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات p_w

نتیجه چهارم: با بررسی تغییرات تقاضاها و عواید تولیدکننده سبز و دولت نسبت به افزایش درصد تصفیه فاضلاب ملاحظه شد که در حالتی که درصد تصفیه فاضلاب صفر باشد، یعنی تولیدکننده فاضلاب را تصفیه نکند، تقاضاها و سودها در حالت مینیمم خود قرار دارند. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که تصفیه فاضلاب در شرایط مطرح شده در این پژوهش برای هر دو بازیکن دولت و تولیدکننده بهتر از تصفیه نکردن فاضلاب است.

۷ نتیجه‌گیری

در این پژوهش قیمت‌گذاری محصول سبز و تعیین مقدار سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده محصول سبز با توجه به هزینه تصفیه فاضلاب انجام شد. قیمت نهایی مصرف‌کننده و سوبسید پرداختی دولت و تقاضاها و سودها در حالت تعادلی برای دو بازیکن دولت و تولیدکننده محصول سبز تحت یک بازی ایستا و یک بازی استکلبرگ محاسبه شد و مسئله با یک مطالعه موردی از صنعت غذا در ایران حل شد. نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی پارامتریک قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که اگرچه اثر بازگشتی میزان مصرف آب تازه را برای تولید محصول بالا می‌برد، تصفیه فاضلاب برای هر دو بازیکن سود بیشتری نسبت به تصفیه نکردن فاضلاب دارد. این مسئله را می‌توان با تعمیم ساختار زنجیره تأمین از جمله در نظر گرفتن نقش تأمین‌کننده آب توسعه داد. هم‌چنین بررسی سایر چالش‌های موجود در زنجیره تأمین محصولات غذایی پیشنهاد می‌شود.

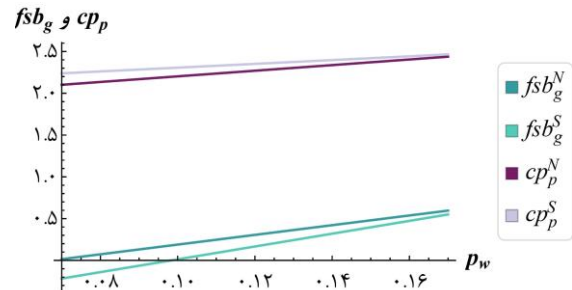
تشکر و قدردانی

از داوران محترم این مقاله که با نظرات ارزنده خود ما را در ارائه این پژوهش یاری دادند، سپاسگزاریم.

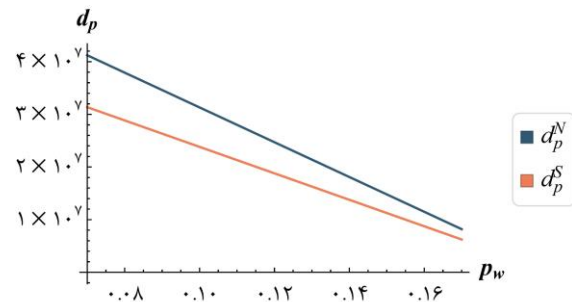
<https://doi.org/10.5465/amr.1995.9512280026>

- Cetinkaya, B., Cuthbertson, R., Ewer, G., Klaas-Wissing, T., Piotrowicz, W. & Tyssen, C. 2011. *Sustainable supply chain management: practical ideas for moving towards best practice*, Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12023-7>
- Zhou, Y. & Qin, F. A Review of Sustainable Supply Chain Management Based on Game

فاضلاب و هم‌چنین جلوگیری از افزایش مصرف آب لازم است که راه‌حلهایی برای کنترل و مدیریت آن اندیشیده شود. به عنوان راهکارهایی برای کنترل اثر بازگشتی آب، افزایش آگاهی تولیدکنندگان درباره وجود اثر بازگشتی و یا وضع قوانین سخت‌گیرانه و اعمال محدودیت‌هایی از جانب دولت برای جلوگیری از افزایش مصرف آب پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۱ نمودار مربوط به روند تغییرات سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده و قیمت نهایی مصرف‌کننده در حالت تعادل در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات p_w



شکل ۱۲ نمودار مربوط به روند تغییرات تقاضاهای تعادلی تولیدکننده در ساختار نش و استکلبرگ نسبت به تغییرات p_w

نتیجه دوم: با توجه به عواید دولت که علاوه بر مالیات بر محصول تولیدی، اهداف کاهش آلودگی زیست محیطی و کاهش مصرف آب را شامل می‌شود؛ می‌توان گفت که اهداف پایداری دولت محقق شده است. بنابراین، دادن سوبسید برای تصفیه فاضلاب با وجود اثر بازگشتی، به دولت‌ها توصیه می‌شود.

نتیجه سه: مقایسه نتایج دو ساختار بازی ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهد که از دیدگاه دولت، بازی استکلبرگ بهتر است. از دیدگاه تولیدکننده، بازی ایستا سودآورتر است و از دیدگاه مصرف‌کننده، بازی ایستا بهتر است چون قیمت نهایی مصرف‌کننده پایین‌تر است.

۸ مراجع (References)

- Imperatives, S. 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future. Accessed Feb, 10.
- Shrivastava, P. 1995. The role of corporations in achieving ecological sustainability. *Academy of management review*, 20, 936-960.

- Industry*, 29, 100206.
<https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100206>
15. Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X. & Gao, K. 2018. A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 119, 338-352.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.007>
 16. Brar, A., Kumar, M. & Pareek, N. 2019. Comparative appraisal of biomass production, remediation, and bioenergy generation potential of microalgae in dairy wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 10, 443920.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00678>
 17. Choi, H.-J. 2016. Dairy wastewater treatment using microalgae for potential biodiesel application. *Environmental Engineering Research*, 21, 393-400.
<https://doi.org/10.4491/eer.2015.151>
 18. Chokshi, K., Pancha, I., Ghosh, A. & Mishra, S. 2016. Microalgal biomass generation by phycoremediation of dairy industry wastewater: an integrated approach towards sustainable biofuel production. *Bioresource technology*, 221, 455-460.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.070>
 19. Sharshir, S. W., Algazzar, A. M., Elmaadawy, K., Kandeal, A., Elkadeem, M., Arunkumar, T., Zang, J. & Yang, N. 2020. New hydrogel materials for improving solar water evaporation, desalination and wastewater treatment: A review. *Desalination*, 491, 114564.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114564>
 20. Slavov, A. K. 2017. Dairy wastewaters—general characteristics and treatment possibilities—a review. *Food Technol. Biotechnol*, 55, 14.
<http://dx.doi.org/10.17113/ftb.55.01.17.4520>
 21. Wang, C., Jiang, L., Hu, M., Wang, C., Peng, Y., Zhang, S. & Qi, W. 2023. Long-term performance of ZVI-stimulating anaerobic/aerobic system-PEI modified ceramic membrane SMBR in reusing food wastewater for irrigation: An industrial project and microbial community shift. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104261.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104261>
 22. He, J., Xia, S., Li, W., Deng, J., Lin, Q. & Zhang, L. 2023. Resource recovery and valorization of food wastewater for sustainable development: An overview of current approaches. *Journal of Environmental Management*, 347, 119118.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119118>
5. Kovács, G. & Illés, B. 2019. Development of an optimization method and software for optimizing global supply chains for increased efficiency, competitiveness, and sustainability. *Sustainability*, 11, 1610.
<https://doi.org/10.3390/su11061610>
 6. Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S. & Govindan, K. 2017. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of cleaner production*, 162, 299-314.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>
 7. Kovács, G. & Kot, S. 2016. New logistics and production trends as the effect of global economy changes. *Polish Journal of Management Studies*, 14, 115-126.
 8. Chen, J.-Y., Dimitrov, S. & Pun, H. 2019. The impact of government subsidy on supply Chains' sustainability innovation. *Omega*, 86, 42-58.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.012>
 9. Mahmoudi, R. & Rasti-Barzoki, M. 2018. Sustainable supply chains under government intervention with a real-world case study: An evolutionary game theoretic approach. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 130-143.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.028>
 10. Xing, G., Xia, B. & Guo, J. 2019. Sustainable cooperation in the green supply chain under financial constraints. *Sustainability*, 11, 5977.
<https://doi.org/10.3390/su11215977>
 11. Falkenmark, M., Rockström, J. & Karlberg, L. 2009. Present and future water requirements for feeding humanity. *Food security*, 1, 59-69.
<https://doi.org/10.1007/s12571-008-0003-x>
 12. Ercin, E. 2019. Overuse of water resources: Water stress and the implications for food and agriculture.
 13. De Fraiture, C. & Wichelns, D. 2010. Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural water management*, 97, 502-511.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>
 14. Siyal, A. W., Gerbens-Leenes, P. & Vaca-Jiménez, S. 2023. Freshwater competition among agricultural, industrial, and municipal sectors in a water-scarce country. Lessons of Pakistan's fifty-year development of freshwater consumption for other water-scarce countries. *Water Resources and*

- wastewater reuse in agriculture in low-and middle-income countries: Systematic analysis and decision-making trees for diverse management approaches. *Environmental Development*, 46, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100849>
31. Shrivastava, V., Ali, I., Marjub, M. M., Rene, E. R. & Soto, A. M. F. 2022. Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere*, 293, 133553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133553>
 32. Waldron, K. W. 2009. *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*, Elsevier
 33. Li, K., Liang, S., Liang, Y., Feng, C., Qi, J., Xu, L. & Yang, Z. 2021. Mapping spatial supply chain paths for embodied water flows driven by food demand in China. *Science of the Total Environment*, 786, 147480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147480>
 34. Ummalyma, S. B. & Sukumaran, R. K. 2014. Cultivation of microalgae in dairy effluent for oil production and removal of organic pollution load. *Bioresource technology*, 165, 295-301. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.028>
 35. Aootu, F. N. 2019. Overview of global dairy market developments in 2018. *Dairy Market Review*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca3879en>
 36. Al-Saidi, M., Das, P. & Saadaoui, I. 2021. Circular economy in basic supply: Framing the approach for the water and food sectors of the Gulf cooperation council countries. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1273-1285. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.004>
 37. Mahmoudgonbadi, A. 2023. *STRATEGIC PLANNING OF CIRCULAR SUPPLY CHAINS WITH MULTIPLE DOWNGRADED MARKET LEVELS: A METHODOLOGICAL PROPOSAL*. University of Sheffield.
 38. Jafarnejad, E., Makui, A., Hafezalkotob, A. & Aghsami, A. 2024. Governance intervention policies in the production competition of biofuels and fossil fuels: a pathway to sustainable development. *Operations Management Research*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12063-024-00441-z>
 39. Safarzadeh, S., Rasti-Barzoki, M. & Hejazi, S. R. 2020. A review of optimal energy policy instruments on industrial energy efficiency programs, rebound effects,
 23. Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtacz, J., Esmaeili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., Badawi, M., Lima, E. C. & Maķinia, J. 2023. Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 116711. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116711>
 24. Kothari, R., Pathak, V. V., Kumar, V. & Singh, D. 2012. Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production. *Bioresource technology*, 116, 466-470. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.121>
 25. Sekar, A. D., Jayabalan, T., Muthukumar, H., Chandrasekaran, N. I., Mohamed, S. N. & Matheswaran, M. 2019. Enhancing power generation and treatment of dairy waste water in microbial fuel cell using Cu-doped iron oxide nanoparticles decorated anode. *Energy*, 172, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.102>
 26. Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M. & Takriff, M. S. 2014. An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 21, 1-10. <https://doi.org/10.1186/2241-5793-21-6>
 27. Najjar-Almanzor, C. E., Velasco-Iglesias, K. D., Nunez-Ramos, R., Uribe-Velázquez, T., Solis-Bañuelos, M., Fuentes-Carrasco, O. J., Chairez, I., García-Cayuela, T. & Carrillo-Nieves, D. 2023. Microalgae-assisted green bioremediation of food-processing wastewater: A sustainable approach toward a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, 345, 118774. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118774>
 28. Gramegna, G., Scortica, A., Scafati, V., Ferella, F., Gurrieri, L., Giovannoni, M., Bassi, R., Sparla, F., Mattei, B. & Benedetti, M. 2020. Exploring the potential of microalgae in the recycling of dairy wastes. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100604>
 29. Haddon, A., Rapaport, A., Roux, S. & Harmand, J. 2023. Model based optimization of fertilization with treated wastewater reuse. *Advances in Water Resources*, 181, 104561. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104561>
 30. Hosney, H., Tawfik, M. H., Duker, A. & Van Der Steen, P. 2023. Prospects for treated

49. Xie, G., Yue, W., Liu, W. & Wang, S. 2012. Risk based selection of cleaner products in a green supply chain. *Pacific Journal of Optimization*, 8, 473-484.
50. Shayegan, H. 2021. *A sharp decrease in per capita consumption of dairy products in Iran / increasing demand for yogurt-based dairy products* [Online]. Moj news agency. Available: <https://www.mojnews.com/n/1vD9> [Accessed]. [In Persian]
51. Asr Iran News Analysis, W. 2016. *Survey of yogurt consumption per capita in Iran and the world and the role of yogurt* [Online]. Asr Iran news analysis website. Available: <https://www.asriran.com/001xa9> [Accessed]. [In Persian]
52. Regional Water Company of Qazvin, A. 2020. *Tariff rate for water consumption in 2020* [Online]. Available: <https://www.qzrw.ir/st/400> [Accessed]. [In Persian]
53. Eskenasi, H. A., Ebrahim 2015. Investigating the amount of water consumption and the conversion rate of water to wastewater in industry (a case study of food industry in Razavi Khorasan province). National conference on civil engineering and needs-oriented research, 2015. <https://civilica.com/doc/461175>. [In Persian]
54. Iran Water Industry. 2022. *The cost of supplying each cubic meter of water from deep sources is 2.5 euros* [Online]. Bazar. Available: www.tahlilbazaar.com/x3mDG [Accessed]. [In Persian]
55. Farsi Rad, S. 2020. *Iran Water and Wastewater Treatment Company (The former fenoman)* [Online]. Available: <https://tavfi.ir/> [Accessed]. [In Persian]
56. Ghorbani, F. 2019. Water consumption reduction project in Kale Amol dairy factory [Online]. specialized meeting and exhibition of water scarcity adaptation. First National Dehydration Adaptation Event, Experiences in the industry sector, 2019. <https://www.mccima.com/files/agriculture/%d8%b5%d9%86%d8%a7%db%8c%d8%b9.pdf>. [In Persian]
57. Iranian Dairy Industry. 2022. *The chaotic state of the dairy products market/ an economic expert: the per capita consumption of dairy products by Iranians has reached below 70 kg* [Online]. Etemad On Line. Available: <https://www.etemadonline.com/tiny/news-625518> [Accessed]. [In Persian]
58. Hasanpour, B. 2019. *Calculation of water price and sewage disposal cost* [Online]. Iran Water and Wastewater Engineering Company East Azarbaijan Water and
- and government policies. *Energy Policy*, 139, 111342. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111342>
40. Kong, L., Hu, G., Mu, X., Li, G. & Zhang, Z. 2023. The energy rebound effect in households: Evidence from urban and rural areas in Beijing. *Applied Energy*, 343, 121151. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121151>
41. Sonnberger, M. & Gross, M. 2018. Rebound effects in practice: an invitation to consider rebound from a practice theory perspective. *Ecological Economics*, 154, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.07.013>
42. York, R. & Mcgee, J. A. 2016. Understanding the Jevons paradox. *Environmental Sociology*, 2, 77-87. <https://doi.org/10.1080/23251042.2015.1106060>
43. Du, K., Liu, X. & Zhao, C. 2023. Environmental regulation mitigates energy rebound effect. *Energy Economics*, 125, 106851. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106851>
44. Safarzadeh, S., Rasti-Barzoki, M., Hejazi, S. R. & Piran, M. J. 2020. A game theoretic approach for the duopoly pricing of energy-efficient appliances regarding innovation protection and social welfare. *Energy*, 200, 117517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117517>
45. Lou, Z., Lou, X. & Dai, X. 2020. Game-theoretic models of green products in a two-echelon dual-channel supply chain under government subsidies. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2425401>
46. Song, J., Guo, Y., Wu, P. & Sun, S. 2018. The agricultural water rebound effect in China. *Ecological Economics*, 146, 497-506. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.016>
47. Berbel, J., Gutiérrez-Martín, C. & Expósito, A. 2018. Impacts of irrigation efficiency improvement on water use, water consumption and response to water price at field level. *Agricultural Water Management*, 203, 423-429. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.026>
48. Manteghi, Y., Arkat, J., Mahmoodi, A. & Farvareh, H. 2021. Competition and cooperation in the sustainable food supply chain with a focus on social issues. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124872>

60. Mehr News Agency. 2019. *Examples of goods and services exempt from value added tax were determined* [Online]. Iran Products Industry Association. Available: <https://www.ir-dis.org/fa/> [Accessed]. [In Persian]

Wastewater Company. Available: <https://abfaazarbaijan.ir/?pageid=0> [Accessed]. [In Persian]

59. Abniko. 2021. *Dairy wastewater treatment* [Online]. Nik Pouyan Alborz water treatment engineering company. Available: <https://abnikco.com/> [Accessed]. [In Persian]

پیوست:

اثبات رابطه ۱:

نرخ اثر بازگشتی، با توجه به نرخ بهبود کارآیی استفاده از آب، قبل و بعد از تصفیه فاضلاب طبق رابطه * محاسبه می‌شود. میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول قبل از تصفیه فاضلاب برابر با w_0 است و میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول پس از تصفیه σ درصد فاضلاب (اگر اثر بازگشتی و سایر عوامل مؤثر را نادیده بگیریم) در زنجیره تأمین که شامل تولیدکننده محصول و بخشی است که پساب تصفیه شده مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد، برابر با مقدار $w_0 - \sigma(w_0 - \delta)$ است. δ مقداری از آب مصرفی تولیدکننده است که در تولید محصول استفاده شده و به شکل فاضلاب خارج نمی‌شود. پس در رابطه *، کارآیی استفاده از آب در تولید محصول با تصفیه σ درصد فاضلاب از $1/w_0$ به $\frac{I}{w_0 - \sigma(w_0 - \delta)}$ بهبود پیدا کرده است. برای سادگی در محاسبه کارآیی آب در تولید محصول، به دلیل ثابت بودن مقدار تولید به عنوان خروجی و ثابت بودن سایر هزینه‌ها (بجز آب) به عنوان ورودی پس از تصفیه فاضلاب، مقدار آن‌ها بدون آنکه به کلیت مطلب خللی وارد شود، به ترتیب برابر با یک و صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین نرخ بهبود کارآیی استفاده از آب در تولید که همان نرخ اثر بازگشتی است، برابر با $\frac{I}{w_0 - \sigma(w_0 - \delta)} - \frac{I}{w_0}$ حاصل می‌شود.

$$e = \frac{\frac{I}{w_0 - \sigma(w_0 - \delta)} - \frac{I}{w_0}}{\frac{1}{w_0}} = \frac{\sigma(w_0 - \delta)}{w_0 - \sigma(w_0 - \delta)} \quad (**)$$

$$\partial_\sigma^e = \frac{w_0(-\delta + w_0)}{(\delta\sigma - (-1 + \sigma)w_0)^2} \quad (***)$$

در رابطه *، با افزایش درصد تصفیه فاضلاب، نرخ اثر بازگشتی باید افزایش یابد یعنی e باید طوری تعریف شود که $\partial_\sigma^e > 0$. در رابطه * مشتق e نسبت به σ محاسبه شده است. با توجه به این که $0 \leq \sigma \leq 1$ و $(w_0 - \delta) > 0$ پس $\partial_\sigma^e > 0$. رابطه‌ای که برای محاسبه نرخ اثر بازگشتی در رابطه * به دست آمده است بیان می‌کند

که در واقع نرخ اثر بازگشتی با نسبت مقدار فاضلاب تصفیه شده به مقدار فاضلاب تصفیه نشده رابطه مستقیم دارد.

با تصفیه σ درصد فاضلاب و استفاده مجدد از آن در زنجیره تأمین انتظار می‌رود که حدود σ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب اتفاق بیفتد یعنی مصرف آب $w_0 - \sigma(w_0 - \delta)$ شود. اما به دلیل وجود اثر بازگشتی، e درصد میزان صرفه‌جویی برمی‌گردد. یعنی اگر $\sigma(w_0 - \delta)$ میزان صرفه‌جویی در مصرف آب باشد، $e\sigma(w_0 - \delta)$ به میزان مصرف آب پس از صرفه‌جویی اضافه می‌شود. پس مقدار w_f متناسب با رابطه *** خواهد بود.

میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول سبز در زنجیره تأمین با وجود اثر بازگشتی

$$= (w_0 - \sigma(w_0 - \delta)) + e\sigma(w_0 - \delta) \quad (***)$$

اگر قیمت فروش هر واحد فاضلاب تصفیه شده p_{ts} ، هزینه تصفیه هر واحد فاضلاب c_{ts} برای تولیدکننده محصول سبز باشد، w_f متناسب با $p_{ts} - c_{ts}$ تغییر می‌کند، یعنی هرچه این سود حاصل از تصفیه فاضلاب بیش‌تر باشد، به دلیل رفتار سازگاران تولیدکننده، میزان مصرف آب برای تولید هر واحد محصول (w_f) افزایش می‌یابد. در حالتی که $p_{ts} = c_{ts}$ ، یعنی تصفیه فاضلاب سودی برای تولیدکننده نداشته باشد، در این حالت مصرف آب تولیدکننده تغییری نمی‌کند زیرا این شرایط همانند شرایطی است که فاضلاب تصفیه نشده و فروخته نمی‌شود و افزایش کارآیی آب و بنابراین اثر بازگشتی وجود ندارد. در این حالت $w_f = w_0$.

در حالتی که فاضلاب تصفیه شده در طبیعت رها شده و فروخته نشود یا به صورت رایگان به بخش‌های دیگر داده شود، یعنی $p_{ts} = 0$ آنگاه در این شرایط، تولیدکننده به دلیل هزینه آب مصرفی علاوه هزینه تصفیه فاضلاب سعی می‌کند که مصرف آب را کاهش دهد که این اثر منفی روی w_f منطقی است.

پس با توجه به عوامل مطرح شده که روی w_f اثر گذارند، طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$w_f = w_0 + ae\sigma(w_0 - \delta)(p_{ts} - c_{ts}) \quad (1)$$

طبق رابطه ۱ میزان آب مصرفی برای تولید هر واحد محصول از میزان آب مصرفی اولیه (قبل از تصفیه فاضلاب) علاوه مقدار آبی که به دلیل اثر بازگشتی با در نظر داشتن سود حاصل از تصفیه فاضلاب بیشتر مصرف خواهد شد، حاصل می‌شود.

روابط مربوط به نمادهای A_1 تا A_{13} و نمادهای A_{20} تا A_{35} و A_{60} تا A_{69} مربوط به B_0 تا B_{51} و B_{47} تا B_{60} :

$$A_{53} = \frac{1}{4\beta(1+t_p)(2+t_p)}, A_{54} = (-\delta + w_0)$$

$$A_{55} = A_{51} - A_{50} + v\eta\sigma w_0 + A_{49}$$

$$A_{60} = (\sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$A_{61} = ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts}), A_{62} = p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0 + p_w t_p t_w w_0$$

$$A_{63} = v\eta\sigma w_0 + \sigma p_{ts} w_0$$

$$A_{64} = \sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{65} = -c_0 - \delta\sigma p_{ts} - v\delta\eta\sigma t_p, A_{66} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p$$

$$A_{67} = -2m\sigma^2 + \frac{1}{\beta(2+t_p)^2}, A_{68} = (-\delta + w_0)$$

$$A_{69} = A_{65} - A_{64} + A_{63} - A_{62}$$

$$B_0 = \beta(c_0(1+2t_p), B_1 = -2v\eta + ae\sigma c_{ts}^2 + p_{ts}$$

$$B_2 = aep_{ts}(-2v\eta\sigma + \sigma p_{ts} - p_w)$$

$$B_3 = c_{ts}(-1 + 2aev\eta\sigma + ae(-2\sigma p_{ts} + p_w))$$

$$B_4 = \delta\sigma(c_{ts} - p_{ts})$$

$$B_5 = 2(-1 + aev\eta\sigma + ae(\sigma c_{ts} - \sigma p_{ts} + p_w))t_p$$

$$B_6 = aep_w(3 + 4t_p)t_w$$

$$B_7 = B_8(B_9 - B_{10})w_0; B_8 = (-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$B_9 = 2v\eta\sigma(1+t_p) + c_{ts}(\sigma + 2\sigma t_p)$$

$$B_{10} = p_{ts}(\sigma + 2\sigma t_p) + p_w(1+2t_p + (3+4t_p)t_w)$$

$$B_{11} = \beta(1+t_p)$$

$$B_{12} = -v\delta\eta\sigma + c_0, B_{13} = \delta\sigma(c_{ts} - p_{ts})$$

$$B_{14} = (-1 + aev\eta\sigma + ae(\sigma c_{ts} - \sigma p_{ts} + p_w + 2p_w t_w))$$

$$B_{15} = (-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$B_{16} = (v\eta\sigma + \sigma c_{ts} - \sigma p_{ts} + p_w + 2p_w t_w)$$

$$B_{17} = \frac{1}{1+t_p}\beta, B_{18} = v\delta\eta\sigma + c_0$$

$$B_{19} = ae\sigma c_{ts}^2 + p_{ts} + ae\sigma p_{ts}^2 + v\eta t_p$$

$$B_{20} = aep_{ts}(v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$B_{21} = 1 + aev\eta\sigma$$

$$B_{22} = ae(2\sigma p_{ts} + v\eta\sigma t_p + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$B_{23} = B_{24}(B_{25} + B_{26})w_0; B_{24} = (-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$B_{25} = -\sigma c_{ts} + \sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p)$$

$$B_{26} = p_w(-1+t_p t_w), B_{27} = \frac{1}{\beta\sigma^2(3+2t_p)^2}2$$

$$B_{28} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma - \beta c_0 + \alpha t_p, B_{29} = -(c_{ts} - p_{ts})$$

$$B_{30} = (-1 - aev\eta\sigma + ae(\sigma c_{ts} - \sigma p_{ts} + p_w))$$

$$B_{31} = v\eta(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))t_p$$

$$B_{32} = ae(c_{ts} - p_{ts})p_w t_p t_w, B_{33} = B_{34}(B_{35} + B_{36})w_0;$$

$$B_{34} = \beta(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$B_{35} = -\sigma c_{ts} + \sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p)$$

$$B_{36} = p_w(-1+t_p t_w)$$

$$B_{37} = \frac{1}{2\beta\sigma^2(2+t_p)^2}, B_{38} = \frac{1}{1+t_p}\beta$$

$$B_{39} = v\delta\eta\sigma + c_0, B_{40} = ae\sigma c_{ts}^2 + p_{ts} + ae\sigma p_{ts}^2 + v\eta t_p$$

$$B_{41} = aep_{ts}(v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$B_{42} = 1 + aev\eta\sigma$$

$$B_{43} = ae(2\sigma p_{ts} + v\eta\sigma t_p + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$B_{44} = B_{45}(B_{46} + B_{47})w_0; B_{45} = (-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$A_1 = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + 2\beta c_0 + \beta\delta\sigma(c_{ts} - p_{ts})$$

$$A_2 = -2 + aev\eta\sigma$$

$$A_3 = ae(2\sigma c_{ts} - 2\sigma p_{ts} + p_w(2 + 3t_w))$$

$$A_4 = \beta(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))$$

$$A_5 = (v\eta\sigma + 2\sigma c_{ts} - 2\sigma p_{ts} + p_w(2 + 3t_w))w_0$$

$$A_6 = 2v\eta\sigma + p_w + 2v\eta\sigma t_p + 2p_w t_p$$

$$A_7 = c_{ts}(\sigma + 2\sigma t_p) - p_{ts}(\sigma + 2\sigma t_p) + 3p_w t_w$$

$$A_8 = -\alpha + \beta(c_0 + \delta p_w)(1 + 2t_p), A_9 = \beta\delta p_w(3 + 4t_p)t_w$$

$$A_{10} = \beta(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{11} = (ae\sigma(c_{ts} - p_{ts})(\delta - w_0) + w_0)$$

$$A_{12} = -v\delta\eta\sigma + (v\eta\sigma + p_w(2 + 3t_w))$$

$$A_{13} = (ae\sigma(c_{ts} - p_{ts})(\delta - w_0) + w_0)$$

$$A_{20} = (\sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))(-\delta + w_0)$$

$$A_{21} = v\eta\sigma w_0 + \sigma p_{ts} w_0 - p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0 + p_w t_p t_w w_0$$

$$A_{22} = \sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{23} = -c_0 - \delta\sigma p_{ts} - v\delta\eta\sigma t_p, A_{24} = ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts})$$

$$A_{25} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p$$

$$A_{26} = (\sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$A_{27} = p_w t_p t_w w_0 + ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts})$$

$$A_{28} = v\eta\sigma w_0 + \sigma p_{ts} w_0 - p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0$$

$$A_{29} = \sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{30} = -c_0 - \delta\sigma p_{ts} - v\delta\eta\sigma t_p, A_{31} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p$$

$$A_{32} = -\frac{m\sigma^2}{2} + \frac{1}{\beta(3+2t_p)^2}$$

$$A_{33} = (\sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$A_{34} = p_w t_p t_w w_0 + ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts})$$

$$A_{35} = v\eta\sigma w_0 + \sigma p_{ts} w_0 - p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0$$

$$A_{36} = \sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{37} = -c_0 - \delta\sigma p_{ts} - v\delta\eta\sigma t_p, A_{38} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p$$

$$A_{39} = \frac{1}{\beta(3+2t_p)^2}, A_{40} = (-\delta + w_0)$$

$$A_{41} = \frac{-\alpha + \beta(1+t_p)(c_0 + \delta p_w(1+2t_w))}{\beta(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)}$$

$$A_{42} = \frac{1}{2\beta(1+t_p)(2+t_p)}, A_{46} = (v\eta\sigma + p_w(3 + 4t_w))$$

$$A_{43} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p + \beta c_0(3 + 2t_p)$$

$$A_{44} = \beta\sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(3 + 2t_p)(\delta - w_0)$$

$$A_{45} = \sigma p_{ts}(1 + ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts}))(3 + 2t_p)(\delta - w_0)$$

$$A_{47} = (\sigma p_{ts} + v\eta\sigma(1+t_p) + p_w(-1+t_p t_w))$$

$$A_{48} = ae\sigma(-c_{ts} + p_{ts})$$

$$A_{49} = \sigma p_{ts} w_0 - p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0 + p_w t_p t_w w_0$$

$$A_{50} = \sigma c_{ts}(-1 + ae\sigma(c_{ts} - p_{ts}))(\delta - w_0)$$

$$A_{51} = -c_0 - \delta\sigma p_{ts} - v\delta\eta\sigma t_p, A_{52} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p$$

اثبات لم ۲:

با توجه به این که

$$\frac{d^2_{sg} \pi g}{dsb_g^2} = -2\beta\sigma^2 c_{is}^2 (-\delta + w_0 + a(p_{is} - c_{is})e\sigma(w_0 - \delta))^2 < 0$$
 تابع سود دولت به سوبسید پرداختی مقعر است. □

اثبات لم ۵:

$$\frac{\partial fsb_g^N}{\partial \alpha} = -\frac{1}{3\beta + 2\beta t_p} \Rightarrow \frac{\partial fsb_g^N}{\partial \alpha} < 0$$

$$\frac{\partial fsb_g^S}{\partial \alpha} = -\frac{1}{2\beta + \beta t_p} \Rightarrow \frac{\partial fsb_g^S}{\partial \alpha} < 0$$

با توجه به روابط مطرح شده که بیان می‌کند مشتق سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده در هر دو تعادل نسبت به سهم بازار محصول سبز منفی است؛ لم ۵ اثبات می‌شود. □

اثبات لم ۶: با محاسبه مشتق اول توابع تقاضا در حالت تعادل نسبت به α در هر دو ساختار بازی داریم:

$$\frac{\partial d_p^N}{\partial \alpha} = \frac{1 + t_p}{3 + 2t_p} \Rightarrow \frac{\partial d_p^N}{\partial \alpha} > 0$$

$$\frac{\partial d_p^S}{\partial \alpha} = \frac{1 + t_p}{4 + 2t_p} \Rightarrow \frac{\partial d_p^S}{\partial \alpha} > 0$$

که نشان می‌دهد لم ۶ برقرار است. □

اثبات لم ۷: با محاسبه مشتق اول سوبسید پرداختی دولت به مصرف‌کننده نسبت به β در هر دو ساختار بازی در حالت تعادل داریم:

$$\frac{\partial fs_g^N}{\partial \beta} = \frac{\alpha}{\beta^2(3 + 2t_p)} \Rightarrow \frac{\partial fs_g^N}{\partial \beta} > 0$$

$$\frac{\partial fs_g^S}{\partial \beta} = \frac{\alpha}{\beta^2(2 + t_p)} \Rightarrow \frac{\partial fs_g^S}{\partial \beta} > 0$$

که نشان می‌دهد لم ۷ برقرار است. □

اثبات لم ۸: با توجه به مفروضات مسئله داریم:

$$\frac{\partial fsb_g^N}{\partial t_w} = \frac{p_w(3 + 4t_p)(ae\sigma(c_{is} - p_{is})(\delta - w_0) + w_0)}{3 + 2t_p} \Rightarrow \frac{\partial fsb_g^N}{\partial t_w} > 0$$

$$\frac{\partial fsb_g^S}{\partial t_w} = \frac{2p_w(1 + t_p)(ae\sigma(c_{is} - p_{is})(\delta - w_0) + w_0)}{2 + t_p} \Rightarrow \frac{\partial fsb_g^S}{\partial t_w} > 0$$

که برقرار بودن لم ۸ را اثبات می‌کند. □

اثبات لم ۹: با توجه به مفروضات مسئله داریم:

$$\frac{\partial d_p^N}{\partial t_w} = \frac{\beta p_w t_p (ae\sigma(c_{is} - p_{is})(\delta - w_0) + w_0)}{3 + 2t_p} \Rightarrow \frac{\partial d_p^N}{\partial t_w} > 0$$

$$\frac{\partial d_p^S}{\partial t_w} = \frac{\beta p_w t_p (ae\sigma(c_{is} - p_{is})(\delta - w_0) + w_0)}{2(2 + t_p)} \Rightarrow \frac{\partial d_p^S}{\partial t_w} > 0$$

بنابراین لم ۹ به درستی برقرار است. □

$$B_{46} = -\sigma c_{is} + \sigma p_{is} + v\eta\sigma(1 + t_p)$$

$$B_{47} = p_w(-1 + t_p t_w)$$

$$B_{51} = v\eta\sigma(1 + t_p) + p_w(-1 + t_p t_w)$$

$$B_{52} = p_w t_p t_w w_0 + ae\sigma(-c_{is} + p_{is})$$

$$B_{53} = \sigma p_{is} w_0 - p_w w_0 + v\eta\sigma t_p w_0$$

$$B_{54} = \sigma c_{is}(-1 + ae\sigma(c_{is} - p_{is}))(\delta - w_0)$$

$$B_{55} = -c_0 - \delta\sigma p_{is} - v\delta\eta\sigma t_p, B_{57} = \frac{1}{2(2 + t_p)}$$

$$B_{56} = \alpha - v\beta\delta\eta\sigma + \alpha t_p, B_{58} = v\eta\sigma w_0$$

$$B_{59} = (-\delta + w_0), B_{60} = B_{55} - B_{54} + B_{58} + B_{53}$$

اثبات قضیه ۱:

با توجه به لم ۱ و ۲ جواب‌های تعادل نش از حل همزمان دستگاه معادلات مشتق مرتبه اول توابع سود به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \frac{d\pi_p}{dp_p} = 0 \\ \frac{d\pi_g}{dsb_g} = 0 \end{cases}$$

که جواب دستگاه بالا جواب‌های تعادلی را نتیجه می‌دهد و اثبات تمام است. □

اثبات قضیه ۳:

برای به دست آوردن جواب‌های تعادلی در این بخش، ابتدا دولت مقدار بهینه pp را با صفر قرار دادن مشتق مرتبه اول تابع سود تولیدکننده محاسبه می‌کند.

$$\frac{d\pi_p}{dp_p} = 0 \Rightarrow pp^* = \frac{\alpha + \beta(c_0 + Q_1 - Q_2 + Q_3)}{2\beta(1 + t_p)}$$

$$Q_1 = \sigma p_{is}(\delta - w_0 - a(p_{is} - c_{is})e\sigma(w_0 - \delta))$$

$$Q_2 = \sigma c_{is}(1 + sb_g)(\delta - w_0 - a(p_{is} - c_{is})e\sigma(w_0 - \delta))$$

$$Q_3 = p_w(1 + t_w)(w_0 + a(p_{is} - c_{is})e\sigma(w_0 - \delta))$$

سپس، مقدار بهینه pp را در تابع سود خود قرار می‌دهد. پس از آن، ریشه مشتق مرتبه اول سود خود را برای به دست آوردن sb_g تعادلی محاسبه می‌کند.

$$\frac{d\pi_g(pp^*)}{dsb_g} = 0$$

تولیدکننده سبز با جایگذاری sb_g تعادلی در مقدار بهینه قیمت

که ابتدا محاسبه شد؛ pp تعادلی را به دست می‌آورد.

$$\square \cdot p_p^S = p_p^* (sb_g^S)$$

اثبات لم ۱:

با توجه به این که $\frac{d^2 \pi_p}{dp_p^2} = -2\beta(1 + t_p)^2 < 0$ ، تابع سود تولیدکننده

نسبت به قیمتش بدون احتساب سوبسید دولتی و مالیات مقعر است. □