

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور در قالب یک بازی کوانتومی

اکبر احمدی*

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲

چکیده

بازی‌های کوانتومی یکی از زمینه‌های تحقیقاتی به نسبت جدید در حوزه مطالعات بین رشته‌ای فیزیک نظری و نظریه بازی‌ها است که تلاش می‌کند با استفاده از قوانین فیزیک کوانتوم، فضای استراتژی بازی‌های کلاسیک را به گونه‌ای تعمیم دهد که علاوه بر افزایش برد بازیکنان، برخی از پارادوکس‌ها و تناقضات بازی‌های کلاسیک، مانند معمای زندانی‌ها را از بین ببرد. در این مقاله، موضوع ارزیابی فروش محصولات شرکت‌های تولیدی پتروشیمی کشور را که بعد از آغاز فرآیند خصوصی‌سازی صنایع پتروشیمی از سال ۱۳۸۷ و کاهش فعالیت‌های شرکت بازرگانی پتروشیمی به صورت مستقل انجام می‌شود در قالب یک بازی کوانتومی بررسی می‌کنیم. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد فروش یکپارچه محصولات پتروشیمی در مجموع هم به نفع صنایع تولیدی و هم به نفع صنعت پتروشیمی کشور است.

طبقه‌بندی JEL: C79, L13, L65

کلیدواژه‌ها: بازی کوانتومی، تعادل نش، صنعت پتروشیمی ایران، انحصار چندجانبه.

a.ahmadi@atu.ac.ir

* عضو هیات علمی پژوهشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی،

این مقاله بر اساس طرح پژوهشی «امکانسنجی یکپارچگی بازرگانی و فروش محصولات پتروشیمی کشور» در پژوهشکده اقتصاد دانشگاه علامه طباطبائی تهیه شده است. نویسنده از مساعدت و راهنمایی‌های ارزنده آقایان دکتر «احمد مهدوی» دبیر محترم انجمن صنفی کارفرمایان صنعت پتروشیمی، مهندس «فریبرز کریمایی» قائم مقام و مهندس «پرویز صحاف زاده» معاونت اجرایی انجمن و همچنین آقایان دکتر «اسفندیار جهانگرد» و مهندس «مصطفی باصری» صمیمانه سپاسگزاری می‌نماید.

۱- مقدمه

مکانیک کوانتومی، شاخه‌ای از فیزیک نظری است که در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۸ برای فهمیدن دنیای اتم‌ها و مولکول‌ها و توصیف رفتار ذرات بنیادی تشکیل دهنده عالم، توسط افرادی چون ماکس پلانک^۱، نیلز بور^۲، ورنر هایزنبرگ^۳، اروین شرودینگر^۴، لویی دوبروی^۵ و پل دیراک^۶ توسعه یافت. یکی از کشفیات مهم این رشته، دوگانگی «موج-ذره» پدیده‌های زیر اتمی^۷ است، خاصیتی که براساس آن، این پدیده‌ها می‌توانند هم مانند یک «ذره» در نقطه‌ای از فضا متمرکز و هم مانند «موج» در فضا پخش باشند. نکته عجیب در این خصوص آن است که موج یا ذره بودن پدیده‌های زیر اتمی یا ذرات کوانتومی، بستگی به ناظر دارد به این معنی که آشکارسازی ذرات کوانتومی باعث فروپاشی خاصیت موجی بودن ذرات و تبدیل آن‌ها به ذره می‌شود. به این ترتیب، مشاهده‌گر در هر تعامل با جهان موجب تغییراتی در آن می‌شود و بر «مشاهده شونده» تاثیر می‌گذارد. «این موضوع موجب شد تا پایه رئالیسم در شناخت فیزیک که تا قرن نوزدهم برقرار بود و براساس آن، موضوع شناخت از شخص مشاهده‌گر (شناسنده) مجزا بود، جای خود را به امتزاج و تاثیر مشاهده‌گر در موضوع شناخت دهد. در کل، همه آنچه می‌دانیم، نتیجه مشاهدات ما است، نه حقیقت محض؛ زیرا از زاویه ما آن موضوع مفهوم پیدا کرده است.» (صمدی، ۱۳۸۰).

کشفیات مکانیک کوانتوم موجب ایجاد تفاوت‌های اساسی در مکتب فکری کلاسیک و مکتب فکری جدید شد. علاوه بر رد اصل قطعیت و موجیت در مکتب فکری کلاسیک؛ خردگرایی، منظم دیدن دنیا و سیستم‌های خطی نیز جای خود را به عدم قطعیت، طرد موجیت، کل گرایی، آشوبی دیدن دنیا و سیستم‌های غیر خطی داد. گسترش نظریه‌های مکانیک کوانتوم و تثبیت آن‌ها باعث توجه دانشمندان سایر رشته‌ها به این حوزه و استفاده از نتایج آن در مطالعات ایشان شد. یکی از این زمینه‌ها، نظریه بازی‌ها بود که با بررسی عمل‌ها و

1- Max Planck

2- Niels Bohr

3- Werner Heisenberg

4- Erwin Schrodinger

5- Louis De Broglie

6- Paul Dirac

۷- پدیده‌ها و ذراتی هستند که از اتم کوچک‌ترند و به دو دسته ذرات بنیادی اولیه (شامل فرمیون، بوزون، لپتون،

کوارک و...) و ذرات ترکیبی (شامل هادرون، مزون، باریون، هسته و...) طبقه‌بندی می‌شوند.

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۳

عکس‌العمل‌های افراد، گروه‌ها یا سیستم‌هایی که دارای منافع مشترک هستند به دنبال یافتن پاسخ برای این سوال است که «مناسب‌ترین استراتژی تصمیم‌گیری چیست»؟
خاستگاه نظریه بازی‌ها به انتشار کتاب «نظریه بازی‌ها و رفتار اقتصادی»^۱ توسط فون نیومن^۲ و مورگنشرن^۳ در سال ۱۹۴۴ برای حل مسائل اقتصادی برمی‌گردد و از این منظر، پیوندی محکم با مباحث اقتصادی دارد. اما سال‌ها بعد، تلاش‌های جان نش^۴ از دانشگاه پرینستون و دستاوردهای چشمگیری در فرموله کردن یک ساختار ریاضی رسمی برای این نظریه در به جامعیت رسیدن آن کمک شایانی کرد (کوتینهو^۵، ۲۰۱۲). این دستاوردها منجر به گسترش و کاربرد روزافزون این نظریه در سایر رشته‌های علمی از جمله علوم اجتماعی، فیزیک، زیست‌شناسی، علوم تصمیم‌گیری و سیستم‌های پشتیبان تصمیم، علم سیاست و... شد و این گسترش نشان از اهمیت و نقش برجسته آن در میان نظریات علمی دارد.

در دنیای واقعی، هر فردی در تصمیم‌گیری‌های خود با عکس‌العمل دیگران مواجه است. پیامد موقعیت‌هایی که فرد در آن قرار می‌گیرد از یک طرف به تصمیمات او و از طرف دیگر به تصمیمات دیگران بستگی دارد. از این رو، افراد در زندگی واقعی خود همواره با حالاتی مواجه هستند که می‌توانند با دیگران همسویی و همکاری یا تضاد و تعارض داشته باشند (سوری، ۱۳۹۱). این حالات مختلف یا استراتژی‌ها در حالت معمول به صورت متغیرهای گسسته یا یک ترکیب خطی احتمالی از آن‌ها است و نظریه بازی‌ها تلاش می‌کند با فروض خاصی همچون عقلایی بودن بازیکنان، بهترین موقعیت ممکن را برای آن‌ها نشان دهد. تکنیک‌های ریاضی زیادی برای فرموله کردن ابعاد مختلف نظریه بازی‌ها به کار گرفته شده و زمینه‌های متنوعی نیز در این خصوص معرفی شده‌اند؛ نظیر بازی‌های با اطلاعات کامل یا اطلاعات ناقص، بازی‌های ییزی، بازی‌های تصادفی، بازی‌های علامت‌دهی، بازی‌های تفاضلی، بازی‌های دیفرانسیلی، بازی‌های ماتریسی، بازی‌های تکاملی، بازی‌های تفکیک‌پذیر، بازی‌های همکارانه و عناوین بسیار دیگر در این زمینه که بیشتر توسط ریاضی‌دانان معرفی و بسط داده شده و توسط اقتصاددانان و متخصصین سایر

1- Theory of Games and Economic Behavior

2- John Von-Neumann

3- Oskar Morgenstern

4- John Nash

5- Coutinho A.M

رشته‌های علمی به کار گرفته شده‌اند. با توجه به مطالعات انجام شده، شاید به نظر برسد که ابعاد مختلف نظریه بازی‌ها به طور کامل پوشش یافته و فرموله شده است؛ با این اوصاف، آیا استفاده از روابط مکانیک کوانتومی در نظریه بازی‌ها می‌تواند مفید باشد؟ و اصولاً آیا استفاده از قوانین و روابط فیزیکی در مسائل اقتصادی و اجتماعی قابل توجیه هستند؟ یافته‌های اخیر آزمایشگاهی در زمینه «درهم‌تنیدگی کوانتومی»^۱ ذرات، مبتنی بر یکی از بنیادی‌ترین ارکان فیزیک کوانتوم، یعنی موضوع «اطلاعات» از یک سو و ابزار، نحوه اندازه‌گیری و پردازش آن از سوی دیگر است. براساس این یافته‌ها، نمی‌توان پردازش اطلاعات را از مبانی فیزیکی مربوط به آن‌ها جدا کرد و جنبه‌های فیزیکی پردازش اطلاعات باید مورد توجه قرار گیرد. این موضوع به درک و مفاهیم جدیدی از پردازش اطلاعات، رمزنگاری و روش‌ها و تکنیک‌های ارتباطات منجر شده که جملگی بر مبنای نظریه کوانتوم قرار دارند (اقبال و دیگران، ۲۰۱۶). از آنجایی که فرموله کردن صحیح و درک نظریه بازی‌ها نیز، مستلزم فروض معینی در مورد میزان و نوع اطلاعاتی است که هر یک از بازیکنان بازی در اختیار دارند، محققان از اوایل قرن ۲۱ ایده ارتباط بین نظریه بازی‌ها و نظریه کوانتوم را با سرعت و جدیت دنبال کرده‌اند (روی و یو و ژیاو^۲، ۲۰۱۲). این تلاش‌ها را که در نوع خود زیاد و بسیار متنوع بوده و بیشتر توسط فیزیکدانان توسعه یافته‌اند، می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد؛ دسته‌ای که در آن بازیکنان سیگنال‌ها یا علائمی، همانند بازی‌های کلاسیکی، اما درهم‌تنیده کوانتومی از بیرون از بازی (از طبیعت) دریافت می‌کنند و می‌توانند براساس آن‌ها انتخاب‌های استراتژیک خود را بنا کنند. دسته دیگر، تلاش می‌کنند استراتژی‌های جدیدی را که در ماهیت کوانتومی هستند به بازی اضافه کنند (گراب^۳، ۲۰۰۵). به عبارت دیگر، فضای استراتژی‌ها تعمیم داده می‌شود و

۱- Quantum Entanglement؛ درهم‌تنیدگی یا وابستگی کوانتومی اصطلاحی است در نظریه کوانتوم برای توصیف راه‌ها و میزان همبستگی و تعامل ذرات انرژی و ماده بدون در نظر گرفتن فاصله بین آن‌ها. در این پدیده اگر دو ذره کوانتومی با هم کنش داشته باشند، سپس از هم جدا شوند و در فواصل دور از یکدیگر قرار گیرند، اندازه‌گیری ویژگی‌های یکی از ذرات، مستقیماً و به صورت آنی بر روی ذره دیگر اثر خواهد گذاشت.

2- Ruiwu Yu and R.Xiao

3- Orlin Grabbe

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۵

استراتژی‌های جدیدی که در وضعیت «برهم نهی»^۱ (ابرموقعیت) قرار دارند، معرفی می‌شوند. مقاله حاضر در دسته دوم این مطالعات قرار می‌گیرد.

سوال این است که آیا می‌توان استراتژی‌های بازیکنان را به گونه‌ای گسترش داد که بتوانند به مفهوم کوانتومی آن «درهم‌تیده» شوند؟ و پیامد کوانتیزه کردن استراتژی‌ها در یک بازی کلاسیکی مانند معمای زندانی‌ها چیست؟ در پاسخ به این سوال‌ها که سرمنشا پیدایش نظریه بازی‌های کوانتومی هستند به طور خلاصه باید گفت براساس مطالعات انجام شده، انتخاب یک استراتژی کوانتومی توسط یک بازیکن، متناسب با درجه درهم‌تیدگی آن با استراتژی بازیکن دیگر، علاوه بر اینکه می‌تواند نتایج بازی را دستخوش تغییر کند، موجب حذف برخی از پارادوکس‌ها و تناقضات در بازی‌هایی مانند معمای زندانی‌ها می‌شود.

در این مقاله، تلاش می‌شود با استفاده مختصری از محاسبات کوانتومی و برخی مفاهیم کلیدی آن، زمینه و دریچه‌ای برای انجام مطالعات بیشتر در این حوزه و ارتقای روش‌های مقداری در اقتصاد گشوده شود. در بخش ابتدایی، مروری بر منتخبی از مطالعات علمی انجام شده در حوزه بازی‌های کوانتومی به خصوص کارهای مرتبط با مفاهیم اقتصادی، خواهیم داشت. از محدود کارهایی که به صورت کمی در ایران در زمینه بازی‌های کوانتومی صورت گرفته، تحقیقاتی است که در گروه فیزیک دانشکده علوم پایه دانشگاه ارومیه انجام شده است. در بخش دوم، به طور مختصر تعاریف و مفاهیم اصلی مربوط به مکانیک کوانتومی و مبانی نظریه بازی‌های کوانتومی طرح خواهد شد. برای آشنایی خواننده با ریاضیات و علامت‌گذاری‌های مورد استفاده در مکانیک کوانتومی به بیان برخی از تعاریف اساسی و نمادگذاری‌های مربوطه خواهیم پرداخت. بخش سوم مقاله، به زمینه کاربردی تحقیق؛ یعنی «یکپارچگی فروش محصولات پتروشیمی کشور» می‌پردازد. این مساله از آنجا اهمیت دارد که بعد از واگذاری‌های صنایع دولتی به بخش خصوصی، موضوع سیاست‌های اجرایی اصل ۴۴ قانون اساسی، هر یک از شرکت‌های تولیدی پس از

۱-Superposition؛ برهم نهی در فیزیک به حالتی اطلاق می‌شود که دو موج با یکدیگر تداخل کرده و در نتیجه آن موج حاصله، تقویت شده دو موج قبلی است یا یک موج ضعیف شده است. اصل برهم نهی در مکانیک کوانتومی مدعی این است که تا زمانی که چیزی از وضعیت هر ذره ندانیم، آن ذره به صورت واقعی و همزمان دربرگیرنده تمام وضعیت‌های ممکن است و فقط بعد از اندازه‌گیری و مشاهده است که به یک وضعیت محدود می‌شود.

سال‌ها فروش یکپارچه، با ایجاد واحدهای بازرگانی خارجی به صورت مستقل اقدام به فروش محصولات خود به بازارهای خارجی کردند. اکنون این سوال مطرح است که آیا بازگشت به گذشته و یکپارچه فروختن محصولات تولیدی پتروشیمی کشور، می‌تواند به نفع صنعت و شرکت‌های تولیدی باشد یا خیر؟ این سوال را در قالب یک بازی کوانتومی و محاسبه تعادل نش آن پاسخ خواهیم داد.

۲- مروری بر مطالعات انجام شده

بازی کوانتومی اولین بار توسط میر^۱ (۱۹۹۹) معرفی شد. او با کوانتیزه کردن استراتژی‌های یک بازی کلاسیک نشان داد که یک بازیکن در چارچوب بازی کوانتومی، می‌تواند همیشه رقبای کلاسیک خود را شکست دهد. به دنبال آن، آیزرت و دیگران^۲ (۱۹۹۹) با کوانتومی کردن بازی معروف «معمای زندانی» نشان دادند مشکل معمای این بازی از بین می‌رود. ماریناتو و وبر^۳ (۲۰۰۰) با هیلبرتی کردن فضای استراتژی‌های بازیکنان و تعمیم ترکیب استراتژی‌های کوانتومی در این فضا به بازی «دعوای زن و شوهر» به این نتیجه رسیدند که تعادل نش چندگانه به وجود می‌آید. پیوتروفسکی و اسلادکوفسکی^۴ (۲۰۰۲) با بررسی یک بازی چانه‌زنی کوانتومی به این نتیجه رسیدند که پیامد بازی در یک وضعیت «برهم نهی» قرار دارد. هویی لی و همکاران^۵ (۲۰۰۲) با بررسی نقش «درهم‌تنیدگی»^۶ استراتژی‌های یک بازی انحصار دوجانبه کورنو به این نتیجه رسیدند که با کوانتیزه کردن استراتژی‌ها، خواص بازی به طور پیوسته با تغییر میزان درهم‌تنیدگی تغییر می‌کند. به بیان دیگر، با افزایش میزان درهم‌تنیدگی استراتژی‌ها، علاوه بر سود بنگاه‌های اقتصادی، همکاری بین دو بنگاه نیز افزایش می‌یابد.

اقبال و تور^۷ (۲۰۰۲a) به بررسی بازی‌های همکارانه کوانتومی پرداخته‌اند. آن‌ها یک بازی همکارانه متقارن سه بازیکنی را به دو صورت کلاسیکی و کوانتومی بررسی کرده و

1- Meyer

2- Eisert et al.

3- Marinatto, L and Tullio Weber

4- Piotrowski and Sladkowski

5- Hui Li, Jiangfeng Du, Serge Massar

6- Entanglement

7- Iqbal, A.H. Toor

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۷

نتیجه گرفته‌اند که در بازی کلاسیکی، تشکیل ائتلاف موجب افزونی سود بازیکنان می‌شود در صورتی که در بازی کوانتومی، این افزونی وجود ندارد و بازیکنان انگیزه‌ای برای تشکیل ائتلاف ندارند. اقبال و تور (۲۰۰۲b) در مطالعه دیگری، بازی‌های کوانتومی تکراری را مورد بررسی قرار داده و نسخه کوانتومی بازی معمای زندانی‌ها را به صورت یک بازی دو مرحله‌ای فرموله کرده و نتیجه گرفته‌اند که برخلاف بازی دو مرحله‌ای کلاسیک، بازیکنان تصمیم می‌گیرند که در مرحله اول با پلیس همکاری و در مرحله دوم موضوع را انکار کنند.

کلیو و دیگران^۱ (۲۰۰۴) با بررسی پیامدها و محدودیت‌های استراتژی‌های غیرمحملی در چارچوب یک بازی همکارانه سه نفره، نشان دادند اعمال شرایط روی موقعیت‌های اولیه می‌تواند مانع از شکل‌گیری ائتلاف شود. کارلوس پدرو گونچالوز و کارلوس گونچالوز^۲ (۲۰۰۷) با بررسی نوسانات و پویایی بازارهای مالی براساس یافته‌های اخیر در زمینه نظریه‌های «اقتصاد عصبی»^۳ و «زیست‌شناسی عصبی»^۴ در تصمیم‌گیری، یک الگوی نظری از بازی تکاملی برای بازارهای مالی طراحی کرده و نشان دادند که این الگو در صورتی که بجای فرض کلاسیکی تصادفی بودن فرآیندهای جدید، این فرآیندها کوانتومی فرض شوند، می‌تواند یک توصیف کوانتومی کامل از بازارهای مالی فراهم کند.

شیاره لا و سیداروسکی^۵ (۲۰۰۵) به بررسی بازارهای انحصار چندجانبه با محصولات متمایز و دانش غیردقیق از عملکرد قیمت‌ها به بررسی و تحلیل پایداری حادی در حالت خطی بودن بازار پرداختند. جیانگ فنگگ دو و همکاران^۶ (۲۰۰۵) با هدف کاهش زیان‌های رقابت انحصار چندجانبه به ارائه یک چارچوب قانون‌گذاری اقتصادی عمومی مبتنی بر نظریه بازی کوانتومی پرداخته و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند به دولت‌ها در بهبود کارایی اقتصادی در بازارهای انحصار چندجانبه و جلوگیری از شکل‌گیری انحصار به‌دلیل اطلاعات ناصحیح کمک کند. براساس یافته‌های آنها، این بهبود تنها ناشی از به‌کارگیری موضوع درهم‌تنیدگی کوانتومی است.

1- Cleve, R. et al.

2- Carlos Pedro Gonçalves and Carlos Gonçalves

3- Neuroeconomics

4- Neurobiology

5- Chiarella and Szidarovszky

6- Jiangfeng Du, et al.

سلمان خان و دیگران^۱ (۲۰۱۰) به ارائه الگوی کوانتومی انحصار دوجانبه برتراند و بررسی رفتار درهم تنیده بر سود بنگاه‌های تولیدی پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که با افزایش میزان درهم تنیدگی کوانتومی در وضعیت اولیه بنگاه‌ها، سود بنگاه‌ها در تعادل نش نسبت به حالت کلاسیکی بیشتر می‌شود و مشکل پارادوکسی این نوع بازی‌های کلاسیکی مرتفع می‌شود. نامیت آناند و بنیامین^۲ (۲۰۱۵) با تعدیل جزئی بازی کوانتومی «میر» نشان دادند که بازی با استراتژی‌های کوانتومی در تمام موارد نتیجه‌ای بیشتر از بازی کلاسیکی با استراتژی‌های خالص دارند، اما اگر در بازی کلاسیکی، بازیکنان از استراتژی‌های احتمالی (مخلوط) استفاده کنند در برخی حالات خاص و انتخاب‌های معین برای مقدار احتمال p ، برد آن می‌تواند بیشتر از برد بازی کوانتومی باشد.

در ایران، گودرزی و بیرامی (۱۳۹۱)، وضعیت تعادل نش در بازی کوانتومی را با افزایش پارامترهای سیستم سه ذره‌ای بررسی کرده و نشان داده‌اند افزایش پارامترهای سیستم، نتایج بازی سه ذره‌ای را بهبود می‌بخشد. همچنین جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۳) در قالب نظریه بازی همکارانه نشان داده‌اند که صادرات مستقیم گاز به اروپا برای هر سه کشور ایران، ارکمنستان و آذربایجان منافع کمتری در مقایسه با صادرات از طریق خط لوله نابوکو در پی دارد.

۳- مبانی نظری و ادبیات موضوع

نظریه بازی به دنبال درک رفتارهای متعارض یا همکارانه در بین تصمیم‌گیران عقلایی است. به عبارت نظری، بازی به موقعیتی اطلاق می‌شود که دو یا چند شخص یا سیستم که بازیکن نامیده می‌شوند از طریق همکاری یا رقابت به وضعیت دیگری دست یابند که بهترین هدف قابل دستیابی از نقطه نظر همکاری یا فردی محسوب می‌شود (ماریناتو و وبر، ۲۰۰۰). در این نظریه، یک بازی مجموعه‌ای از قواعد، ترتیبات و مناسباتی است که برای تمام بازیکنان شناخته شده و معلوم است و معین می‌کند که هر بازیکن چه انتخاب‌هایی می‌تواند داشته باشد و هر انتخاب چه پیامدهایی را به دنبال دارد. فرض بر این است که تمام بازیکنان عقلایی تصمیم‌گیری می‌کنند و با عمل منطقی، تلاش دارند پیامدهای انتظاری

1- Salman Khan, et al.

2- Namit Anand and Colin Benjamin

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۹

موقعیت‌هایی را که در آن قرار دارند یا در نتیجه انتخاب تمام بازیکنان در آن قرار خواهند گرفت، پیشینه کند. بنابراین، هر بازی از سه عنصر اصلی «بازیکن»، «استراتژی» و «پیامد یا برد» تشکیل می‌شود.

بازی کوانتومی، فضای «استراتژی» بازی را تعمیم و مفهوم یک استراتژی کلاسیکی خالص یا مخلوط را به یک «استراتژی کوانتومی» بسط می‌دهد به گونه‌ای که استراتژی‌های قبلی را نیز به عنوان یک زیر فضا دربر بگیرد. در اینجا علاوه بر مجموعه متناهی و گسسته از استراتژی‌های کلاسیکی با تغییر فضای استراتژی‌ها به یک «فضای هیلبرتی»^۱، استراتژی‌هایی که با یکدیگر در وضعیت «برهم‌نهی» قرار دارند نیز معرفی می‌شوند. به این ترتیب، امکان به دست آوردن استراتژی‌های خالص کوانتومی به صورت یک ترکیب خطی با ضرایب مختلط از استراتژی‌های خالص کلاسیکی فراهم می‌شود. براساس تفسیر سنتی مکانیک کوانتومی، مجذور این ضرایب را می‌توان به عنوان احتمال اینکه کدام یک از استراتژی‌های کلاسیکی خالص بازی شود، در نظر گرفت. قبل از پرداختن به بازی کوانتومی فروش محصولات پتروشیمی کشور برای آشنایی با محاسبات کوانتومی به علامت گذاری‌ها و ریاضیات مقدماتی مورد استفاده اشاره می‌شود.

۱-۳- تعاریف، علائم و ریاضیات بازی کوانتومی^۲

در نظریه اطلاعات کلاسیک، اطلاعات روی یک سیستم کلاسیکی دو حالت ثابت می‌شود که در اصطلاح به آن «بیت» می‌گویند و کوچک‌ترین یا اساسی‌ترین واحد اطلاعات است. اگر حالت‌های این سیستم کلاسیکی را ۰ و ۱ بنامیم در این صورت هر بیت فقط می‌تواند

۱- Hilbert Space؛ یک فضای برداری مختلط با ابعاد متناهی یا نامتناهی است. در این فضا، روش‌های جبر برداری و حسابان از صفحه دو بعدی اقلیدسی و فضای سه بعدی به فضاهایی با ابعادی به هر تعداد متناهی یا نامتناهی تعمیم داده می‌شوند. برای تعریف فضای هیلبرت و زمینه‌های کاربردی در مکانیک کوانتومی به کتاب زتیلی (۱۳۹۰) مراجعه شود.

۲- در بیشتر کتب مقدماتی مکانیک کوانتومی یا کتاب‌های مربوط به محاسبات کوانتومی، بخش‌هایی به چگونگی محاسبات و ریاضیات آن اختصاص دارد و خواننده علاقه‌مند می‌تواند مطالب این بخش از مقاله را به طور تفصیلی در آن‌ها دنبال کند. در میان این کتب می‌توان به کتاب *محاسبات کوانتومی و اطلاعات کوانتومی*، نیلسن و چانگ (۲۰۱۰)، کتاب *مقدمه‌ای بر محاسبات کوانتومی*، کای و دیگران (۲۰۰۷) و کتاب *ارزشمند مکانیک کوانتومی، اصول*

و کاربردها تالیف نورالدین زتیلی مراجعه کرد.

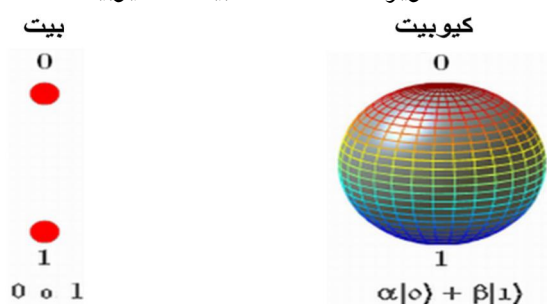
یکی از این دو مقدار را اختیار کند. در مورد ذرات بسیار ریز نظیر یک «یون باردار»، حالت (وضعیت) آن ذره در چارچوب مکانیک کوانتومی «کیوبیت» (به معنی بیت کوانتومی) نامیده می‌شود. «کیوبیت» هم‌ارز با یک بردار پایه در فضای مختلط دو بعدی (کوانتومی) است و معمولاً به صورت $|0\rangle$ و $|1\rangle$ نشان داده می‌شوند که می‌توان آن‌ها را با وضعیت‌هایی همانند ۰ و ۱ «یک بیت» کلاسیکی مقایسه کرد. ثبت اطلاعات کلاسیکی روی یک کیوبیت و پردازش، مخابره و خواندن اطلاعات، تابع قوانین مکانیک کوانتومی است که این موضوع اساس تفاوت بین نظریه کلاسیکی اطلاعات و نظریه کوانتومی آن است. معمولاً کیوبیت را به صورت $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ و $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ نشان می‌دهند (تصویر (۱)).

علامت $|\cdot\rangle$ (کت ket) که معرف تمام اطلاعات یک سیستم کوانتومی است توسط «دیراک»^۱ معرفی شده و به نمادگذاری دیراک معروف است. برخلاف بیت، کیوبیت‌ها می‌توانند علاوه بر وضعیت‌های $|0\rangle$ و $|1\rangle$ در همان حال در یک وضعیت برهم نهی از دو وضعیت اصلی مانند معادله (۱) نیز قرار بگیرند.

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

اعداد α و β اعداد مختلط هستند و ψ هم معرف وضعیت کیوبیت قبل از اندازه‌گیری است.

تصویر (۱): تفاوت بیت و کیوبیت



۱- Paul Dirac؛ فیزیکدان و ریاضیدان بریتانیایی و از پایه‌ریزان مکانیک کوانتومی که در سال (۱۹۳۳) برنده جایزه

نوبل شد.

یکی از ویژگی‌های اطلاعات کوانتومی این است که با فرض وجود یک کیوبیت، مشاهده گر نمی‌تواند وضعیت آن را به طور دقیق تعیین کند، بلکه می‌تواند با انجام عمل «اندازه‌گیری» اطلاعاتی در مورد آن به دست آورد. به عنوان مثال، اگر کیوبیت قبل از انجام اندازه‌گیری در وضعیتی مانند معادله (۱) باشد، آنگاه بعد از اندازه‌گیری به یکی از دو حالت $|1\rangle$ یا $|0\rangle$ تنزل می‌یابد و مشاهده گر می‌تواند تشخیص دهد که کدام یک از این دو حالت رخ داده است. براساس قوانین مکانیک کوانتوم، $|\alpha\rangle$ را احتمال فروپاشی معادله (۱) به وضعیت $|0\rangle$ (یعنی احتمال پیدا کردن سیستم در وضعیت $|0\rangle$) و $|\beta\rangle$ را احتمال فروپاشی به وضعیت $|1\rangle$ می‌نامند و مجموع آن‌ها برابر واحد است. بردار مختلط $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ را که جمع مجذور آن‌ها برابر واحد باشد، «بردار یکه» می‌نامند. علاوه بر اندازه‌گیری، عملیات دیگری نیز هستند که می‌توانند وضعیت یک کیوبیت را تغییر دهند. این عملیات، تبدیل‌های خطی هستند که روی مجموعه بردارهای واحد دوبعدی تعریف می‌شوند. اگر هر یک از این تبدیل‌های خطی، خاصیت «واحد بودن بردار» را حفظ کند، آن را «تبدیل یکانی»^۱ یا «عملگر یکانی»^۲ می‌نامند. عملگرهای یکانی معمولاً روی بردارهای واحد دو بعدی تعریف می‌شوند و می‌توانند به شکل ماتریس‌های 2×2 تعریف شوند. مجموعه چهار عملگر مهمی که در محاسبات کوانتومی مورد استفاده قرار می‌گیرد با عنوان «عملگرهای پائولی» یا «ماتریس‌های پائولی»^۳ شناخته می‌شوند و به صورت معادله (۲) تعریف می‌شوند.

$$I = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}; \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

نمونه دیگری از زیرمجموعه‌های تبدیل‌های خطی که در نظریه بازی‌های کوانتومی، اولین بار توسط آیزرت و دیگران (۱۹۹۹) مورد استفاده قرار گرفته، ماتریس دو پارامتری مطابق معادله (۳) است.

$$\hat{J}(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi} \cos \theta / 2 & \sin \theta / 2 \\ -\sin \theta / 2 & e^{-i\varphi} \cos \theta / 2 \end{pmatrix}; 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq \pi / 2 \quad (3)$$

1- Unitary Transformation

2- Unitary Operator

3- Pauli Matrices

که در آن $i = \sqrt{-1}$ است. مزدوج هرمیتی (همیوگ) ماتریس (۳) با $\hat{J}^\dagger(\theta, \varphi)$ نشان داده می شود:

$$\hat{J}^\dagger(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} e^{-i\varphi} \cos\theta / 2 & -\sin\theta / 2 \\ \sin\theta / 2 & e^{i\varphi} \cos\theta / 2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

می دانیم که حاصل ضرب دو ماتریس $\hat{J}^\dagger(\theta, \varphi)$ و $\hat{J}(\theta, \varphi)$ یک ماتریس واحد است. اگر به جای یک کیوبیت که تاکنون بحث شد، n کیوبیت در یک وضعیت «برهم نهی» قرار داشته باشند، 2^n وضعیت خالص برای آن‌ها قابل محاسبه است. به عنوان مثال، برای «دو کیوبیت»، چهار حالت محاسباتی پایه به شکل $|11\rangle$ ، $|10\rangle$ ، $|01\rangle$ و $|00\rangle$ خواهیم داشت

$$\text{که به صورت بردارهای چهاربعدی پایه } |00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |01\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |10\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ و } |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ نمایش داده می شوند.}$$

در واقع، هر بردار پایه‌ای از وضعیت مطرح شده، یک سیستم کوانتومی است که از دو کیوبیت تشکیل شده و این دو کیوبیت حاصل «ضرب تانسوری»^۱ بردارهای کیوبیت پایه

$$\text{هستند. به عنوان مثال: } |01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ که در حالت کلی به صورت معادله (۵) می تواند بازنویسی شود.}$$

۱- Tensor Products؛ به نوعی معادل «ضرب کرونگر» در متون اقتصادسنجی است. اقتصاددانان هنگام تخمین ضرایب سیستم معادلات به ظاهر غیرمرتبط SURE از ضرب کرونگر که روی ماتریس‌های با ابعاد دلخواه انجام می‌شود، استفاده می‌کنند. می‌توانیم دو ماتریس داده شده را نماینده نگاشت‌های خطی بین فضاهای برداری با یک پایه منتخب تصور کنیم. در این صورت ضرب کرونگر دو ماتریس، معرف ضرب تانسوری دو نگاشت خطی است.

$$|\psi_s, \psi_r\rangle = |\psi_s\rangle \otimes |\psi_r\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha\gamma \\ \alpha\delta \\ \beta\gamma \\ \beta\delta \end{pmatrix} \quad (5)$$

در این صورت، وضعیت سیستم کوانتومی را می‌توان به صورت معادله (۶) نشان داد که

$$\sum_{i,j=0}^1 |\alpha_{ij}|^2 = 1 \text{ یعنی؛ یک بردار واحد است؛ یعنی: } \begin{pmatrix} \alpha_{..} \\ \alpha_{.1} \\ \alpha_{1.} \\ \alpha_{11} \end{pmatrix} \text{ در آن بردار}$$

$$|\psi\rangle = \alpha_{..} |00\rangle + \alpha_{.1} |01\rangle + \alpha_{1.} |10\rangle + \alpha_{11} |11\rangle = \sum_{i,j=0}^1 \alpha_{ij} |ij\rangle \quad (6)$$

محاسبات کوانتومی، مبتنی بر تبدیل‌های یکانی کیوبیت‌ها هستند. توسعه الگوریتم‌های کوانتومی مستلزم شناخت و تصریح «وضعیت شروع» و انجام تبدیل‌های یکانی برای رسیدن به نتیجه دلخواه است. بعضی از این تبدیل‌های یکانی، نظیر «تبدیل هادامارد»^۱ وضعیتی مانند $|0\rangle$ را به یک وضعیت «برهم نهی» با احتمالات برابر برای هر وضعیت می‌برد؛ یعنی (معادله (۷)):

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \quad (7)$$

در اینجا احتمال مشاهده هر یک از وضعیت‌های $|0\rangle$ و $|1\rangle$ برابر $\frac{1}{2}$ است. برای مواقعی که n کیوبیت وجود دارد به‌منظور به‌دست آوردن یک برهم نهی مساوی از

ضرب تانسوری استفاده می‌کنیم. به عنوان مثال، در سیستم دو کیوبیتی $|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ که یک فضای چهار بعدی است، می‌توانیم عملگر یکانی را به صورت معادله (۸) تعریف کنیم.

1- Hadamard atrix: $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$

$$\hat{J} = \frac{1}{\sqrt{2}}(I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2}) \quad (۸)$$

که در آن I یک ماتریس 2×2 واحد و σ_x ماتریس پائولی در معادله (۲) است. علامت \otimes به معنی حاصل ضرب تانسوری ماتریس در خودش است. واضح است که $\hat{J}\hat{J}^\dagger = I_\rho$ حاصل عملگر یکانی معادله (۸) در وضعیت $|00\rangle$ یک وضعیت برهم‌نهی با احتمالات مساوی از سیستم دو کیوبیتی به دست خواهد داد (معادله (۹)).

$$\hat{J}|00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2})|00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + i|11\rangle) \quad (۹)$$

معادله (۹) با مفهوم درهم‌تنیدگی کوانتومی که پیشتر معرفی شد، مرتبط است. وضعیت حاصل در این معادله را «وضعیت بل» و زوجی از کیوبیت‌ها که دارای چنین وضعیتی باشند، زوج EPR^۲ می‌نامند. عملگر یکانی \hat{J} را عملگر درهم‌تنیده‌ساز می‌نامند که وضعیت اولیه را به یک وضعیت متداخل تبدیل می‌کند. وقتی یکی از کیوبیت‌های یک زوج EPR اندازه‌گیری شود، باعث می‌شود که این وضعیت با احتمال برابر به یکی از دو وضعیت $|0\rangle$ و $|1\rangle$ تنزل کند. در کمال تعجب، اندازه‌گیری کیوبیت دیگر، باعث می‌شود زوج EPR به همان وضعیتی که اولین کیوبیت اندازه‌گیری شده بود، تنزل کند. بنابراین، می‌توان گفت که دو کیوبیت زوج EPR «درهم‌تنیده» هستند. به عبارت دیگر، وضعیت‌های کوانتومی در این حالت، شدیداً همبسته کوانتومی و تفکیک‌ناپذیرند و نمی‌توانند به شکل حاصل ضرب تانسوری سیستم‌های جزئی نوشته شوند. به عنوان مثال، وضعیت $|\psi_1\rangle = a|00\rangle + b|01\rangle$ را می‌توان به یک حاصل ضرب تانسوری از دو کیوبیت به شکل $|\psi_1\rangle = a|00\rangle + b|01\rangle = |0\rangle \otimes (a|0\rangle + b|1\rangle)$ تجزیه کرد؛ زیرا:

$$a|00\rangle + b|01\rangle = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \otimes \left[\begin{pmatrix} a \\ \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} \right]$$

بنابراین، وضعیت $|\psi_1\rangle = a|00\rangle + b|01\rangle$ درهم‌تنیده نیست اما وضعیت $|\psi_2\rangle = a|00\rangle + b|11\rangle$ را نمی‌توان به صورت حاصل ضرب تانسوری دو بردار تجزیه کرد. از این رو، این وضعیت را درهم‌تنیده می‌گویند.

Bell State-۱ بر گرفته از نامساوی معروف بل، برای توصیف ساده‌ترین نمونه‌های درهم‌تنیدگی است.

اثرات درهم تنیدگی کوانتومی به شکل بسیار گسترده‌ای در حوزه اطلاعات کوانتومی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این مفهوم در نظریه بازی‌های کوانتومی نیز نقش کلیدی ایفا می‌کند؛ «در بازی کوانتومی اگر بازیکن نتیجه‌ای که می‌گیرد روی نتایج دیگر بازیکنان اثر بگذارد و همبستگی خارج از اراده بازیکنان در نتایج وجود داشته باشد، آنگاه بازی دچار درهم تنیدگی می‌شود.» (گودرزی و بیرامی، ۱۳۹۱).

۲-۳- بازی کوانتومی

در این بخش به تعمیم مفهوم استراتژی کلاسیکی و معرفی بازی کوانتومی براساس الگوی آیزرت می‌پردازیم.^۱ همانند این الگو، بازی معمای زندانی‌ها را برای تبیین بازی کوانتومی در نظر می‌گیریم. هر یک از دو زندانی این بازی A و B باید به صورت مستقل در مورد «همکاری با پلیس» یا «انکار اتهام» به عنوان دو استراتژی پیش‌رو تصمیم‌گیری کنند. ماتریس برد این بازی به صورت جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱): برد بازیکنان در معمای زندانی‌ها

		بازیکن B	
		همکاری C	انکار D
بازیکن A	همکاری C	(۳,۳)	(۵,۰)
	انکار D	(۰,۵)	(۱,۱)

هدف هر بازیکن بیشینه‌سازی برد شخصی خود است. معمای این بازی در اینجا است که هر دو زندانی از طریق همکاری با پلیس و انتخاب استراتژی (C,C) به سود بیشتری می‌رسند، اما استدلال‌های منطقی آن‌ها به عدم همکاری با پلیس و انکار موضوع منتهی می‌شود که در نتیجه (D,D) را که سود کمتری نسبت به وضعیت همکاری دارد برای آن‌ها دربر خواهد داشت. به زبان نظریه بازی‌ها، استراتژی (D,D) تعادل نش بازی است، اما استراتژی (C,C) بهینه پارتو است.

۱- ساختار کلی این بخش از مقاله آیزرت و دیگران (۱۹۹۹) اقتباس شده است.

آیزرت و همکاران با ارائه یک مدل فیزیکی از بازی معمای زندانی‌ها، نشان داده‌اند در صورتی که هر دو بازیکن این بازی در چارچوب مدل آن‌ها از استراتژی‌های کوانتومی استفاده کنند، معمای زندانی از بین می‌رود. این مدل فیزیکی شامل منبع تولید بیت (استراتژی‌ها)، ابزار فیزیکی ایجاد تغییر در استراتژی‌ها و وسیله اندازه‌گیری فیزیکی نتیجه بازی است که فرض شده هر دو بازیکن به طور کامل از این سه جزء آگاهی دارند. فرموله کردن کوانتومی بازی شامل مراحل زیر است:

۱- انتخاب یک وضعیت اولیه از فضای حالت: در ابتدا باید پیشامدهای ممکن هر یک از استراتژی کلاسیکی C و D را با نگاشت به فضای هیلبرت به دو بردار پایه $|D\rangle$ و $|C\rangle$ (بیت) تبدیل کنیم. وضعیت بازی در هر لحظه توسط برداری در فضای ضرب تانسوری به شکل $|CC\rangle$ ، $|CD\rangle$ ، $|DC\rangle$ و $|DD\rangle$ توصیف می‌شود که اولین حرف مربوط به استراتژی بازیکن اول و حرف دوم مربوط به استراتژی بازیکن دوم است. به‌عنوان مثال، $|CD\rangle$ ، یعنی وضعیتی که در آن استراتژی C توسط بازیکن اول و استراتژی D توسط بازیکن دوم انتخاب شده است. وضعیت اولیه بازی $|\psi_{in}\rangle$ در فضای کوانتومی از حاصل ضرب یکانی عملگر مربوطه در یک وضعیتی از بازی مثل $|CC\rangle$ به‌دست می‌آید؛ یعنی: $|\psi_{in}\rangle = \hat{J}|CC\rangle$ عملگر \hat{J} برای هر دو بازیکن معلوم و نسبت به جابه‌جایی بازیکنان متقارن است.

آیزرت و همکارانش از عملگر $\hat{J} = \exp\{i\gamma\hat{D} \otimes \hat{D} / 2\}$ استفاده کرده‌اند که در آن پارامتر $\gamma \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ به عنوان درجه درهم‌تنیدگی کوانتومی استفاده شده و میزان آن نتیجه بازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۲- انجام حرکت یا اعمال استراتژی هر بازیکن در وضعیت اولیه: فضای استراتژی بازی را با معرفی استراتژی‌های کوانتومی تعمیم داده و متناظر با آن حرکت‌های استراتژیک U_A و U_B دو بازیکن را از فضای استراتژی تعمیم یافته S انتخاب می‌کنیم. فضای استراتژی به شکل مجموعه‌ای از ماتریس‌های 2×2 یکانی دو پارامتری به صورت

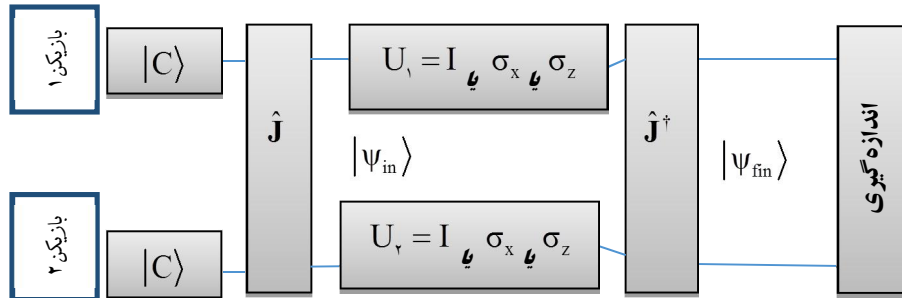
$$U(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi} \cos\theta / 2 & \sin\theta / 2 \\ -\sin\theta / 2 & e^{-i\varphi} \cos\theta / 2 \end{pmatrix}; 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq \pi / 2$$

می‌شود. بر این اساس، استراتژی همکاری به شکل $C = U(0, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ و استراتژی

انکار به شکل $D = U(\pi, 0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ تعریف می‌شود. برای حصول اطمینان از اینکه این فضای استراتژی، مساله معمای زندانی‌های معمولی را به طور کامل به نمایش می‌گذارد، سه شرط جابجایی پذیری^۱ $[\hat{J}, \hat{D} \otimes \hat{D}] = \hat{J}(\hat{D} \otimes \hat{D}) - (\hat{D} \otimes \hat{D})\hat{J} = 0$ ، $[\hat{J}, \hat{D} \otimes \hat{C}] = 0$ و $[\hat{J}, \hat{C} \otimes \hat{D}] = 0$ بر شرایط اولیه اضافه شده است. استراتژی کوانتومی در صورتی که مقدار $\gamma = \pi/2$ انتخاب شود؛ یعنی دو استراتژی به طور کامل درهم‌تنیده باشند به صورت $Q = U(0, \pi/2) = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$ تعریف می‌شود.

۳- تعیین برد انتظاری هر بازیکن: در آخرین مرحله باید برد بازیکنان ناشی از حرکت قبلی آن‌ها اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری یک سیستم کوانتومی؛ یعنی تصویر کردن وضعیت نهایی سیستم کوانتومی به بردارهای پایه فضای H. ابتدا وضعیت نهایی را مشخص و سپس برد انتظاری حاصل برای هر یک از بازیکنان محاسبه می‌شود. در نمودار (۱) مراحل این بازی نشان داده شده است.

نمودار (۱): بازی کوانتومی معمای زندانی‌ها



ماخذ: آیزرت و دیگران (۱۹۹۹)

قبل از محاسبه برد بازیکنان باید با اعمال یک تبدیل یکانی، وضعیت نهایی بازی را برای اندازه‌گیری برد بازی آماده کنیم. تبدیل یکانی مورد استفاده در این مرحله، مزدوج هرمیتی تبدیل یکانی مورد استفاده در مرحله نخست است که به صورت

^۱ برای اینکه دو کمیت فیزیکی A, B به صورت همزمان قابل مشاهده باشند، بایستی جابجا پذیر باشند یعنی $[A, B] = [B, A] = AB - BA = 0$

$\hat{J}^\dagger = \exp\{-i\gamma\hat{D} \otimes \hat{D} / 2\}$ تعریف می‌شود. در حقیقت، وضعیت بازی را با تبدیل یکانی اولیه به فضای کوانتومی می‌بریم و پس از انجام حرکت‌های بازیکنان (انتخاب استراتژی‌های آن‌ها) مجدد با یک تبدیل یکانی که مزدوج تبدیل قبلی است به حالت اولیه و قابل اندازه‌گیری برمی‌گردانیم. بنابراین، وضعیت نهایی به صورت معادله (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$|\psi_f\rangle = \hat{J}^\dagger (U_A \otimes U_B) \hat{J} |CC\rangle \quad (10)$$

اندازه‌گیری بازی کوانتومی با توجه ماهیت احتمالاتی آن به صورت برد انتظاری تعریف می‌شود؛ یعنی مقدار برد هر بازیکن در احتمال وقوع آن حالت با برد انتظاری بازیکن برابر می‌شود. اندازه‌گیری سیستم به صورت تصویر کردن وضعیت نهایی آن در یکی از چهار بردار پایه $|CC\rangle$ ، $|CD\rangle$ ، $|DC\rangle$ و $|DD\rangle$ با احتمالات متناظر هر یک از آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به ارقام جدول (۱) برد انتظاری بازیکنان به صورت معادله (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\$A = 3|\langle CC|\psi_f\rangle|^2 + 0|\langle CD|\psi_f\rangle|^2 + 5|\langle DC|\psi_f\rangle|^2 + 1|\langle DD|\psi_f\rangle|^2 \quad (11)$$

$$\$B = 3|\langle CC|\psi_f\rangle|^2 + 5|\langle CD|\psi_f\rangle|^2 + 0|\langle DC|\psi_f\rangle|^2 + 1|\langle DD|\psi_f\rangle|^2$$

که در آن $|\langle CC|\psi_f\rangle|^2$ توان دوم قدر مطلق حاصل ضرب داخلی بردار وضعیت نهایی (به صورت مزدوج هرمیتی) در بردار پایه $|CC\rangle$ است که معادل احتمال اندازه‌گیری بازی در وضعیت CC است. برای حالتی که دو استراتژی معمولی باشند، مقدار $\gamma = 0$ است و نتیجه بازی همان، حالت قبلی است؛ یعنی نقطه تعادل (D,D) است. برای حالتی که دو استراتژی کاملاً درهم‌تنیده باشند، $\gamma = \pi/2$ خواهد بود و در نتیجه تعادل نش جدیدی به صورت (Q,Q) شکل می‌گیرد که برد هر یک از بازیکنان برابر $\$A(Q,Q) = \$B(Q,Q) = 3$ به دست خواهد آمد. از آنجایی که

$$\$A[U(\theta, \varphi), Q] = \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) (3\sin^2\varphi + \cos^2\varphi) \leq 3; \quad \forall \theta \in [0, \pi], \quad \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

و به همین ترتیب $\$B[Q, U_B] \leq \$B[Q, Q]$ ، بنابراین، وضعیت هیچ بازیکنی از تغییر استراتژی خود به صورت یک‌جانبه از $Q \otimes Q$ بهتر نمی‌شود. این استراتژی بهینه و یکتا است. به این ترتیب با کوانتیزه کردن استراتژی‌های بازیکنان، تناقض معمای زندانی‌ها از بین می‌رود.

۴- بازی کوانتومی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی ایران

«پتروشیمی» که از ترکیب دو کلمه «پترول» و «شیمی» به معنی مواد شیمیایی حاصله از نفت تشکیل شده است و اولین بار در سال ۱۹۴۲ توسط عده‌ای از سازندگان مواد شیمیایی در تبلیغات محصولاتشان به کار برده شد به صنایعی گفته می‌شود که در آن هیدروکربورهای موجود در نفت خام و یا گاز طبیعی پس از فرآوری یا تغییر شکل یافتن در یک سری فرآیندهای شیمیایی به فرآورده‌های جدید شیمیایی تبدیل می‌شوند. محصولات پتروشیمی دارای موارد استعمال عمومی و صنعتی متعددی هستند و در ساخت موادی از قبیل نایلون، پشم، پنبه مصنوعی، لوازم الکتریکی، کودهای شیمیایی، حلال‌ها، مواد پاک‌کننده، رنگ‌ها، چسب‌ها، سموم و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. این محصولات یا به‌طور مستقیم مصرف می‌شوند یا به عنوان ماده اولیه صدها محصول دیگر به کار می‌روند. محصولات پتروشیمی به لحاظ سلسله مراتب تولید به سه دسته «محصولات پایه‌ای» مانند اتیلن گوگرد و آمونیاک، «محصولات میانی» مانند PVC و «محصولات نهایی» مانند لاستیک و کود شیمیایی تقسیم می‌شوند، اما از لحاظ کلی، محصولات پتروشیمی را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد:

۱- پلیمرها: به موادی گفته می‌شود که از مولکول‌های بسیار بزرگ درست شده‌اند. این مولکول‌های بزرگ از تکرار و اتصال واحدهای کوچک‌تر (مونومر) تشکیل شده‌اند که با توجه به نوع و تعداد مونومرها و همچنین چگونگی تکرار و طرز قرار گرفتن آن‌ها در ابعاد مختلف، مواد پلیمری با خواص مختلف تولید می‌شوند. تولید انواع محصولات مانند ظروف نگه‌دارنده سوخت، جامه‌دان‌ها، لوله‌ها، فیلم و ورق جهت مصرف در روکش‌های طلقی شفاف، چمدان‌ها، انواع کاغذدیواری، رومبلی و... با استفاده از این مواد امکان‌پذیر است.

۲- آروماتیک‌ها: مهم‌ترین ترکیبات تجاری از شاخه هیدروکربورهای حلقوی هستند و بنزن با فرمول شیمیایی C_6H_6 معروف‌ترین ترکیب این گروه است. نام‌گذاری آروماتیک به این شاخه از ترکیبات هیدروکربنی به علت جداسازی گروهی از ترکیبات اشباع نشده است که بوی هیدروکربور می‌دهند و نام آروماتیک به معنی بودار است. مهم‌ترین محصولات این گروه عبارتند از: بنزن، تولوئن و زایلین. از این محصولات در تولید انواع حشره‌کش‌ها، حلال‌های صنعتی و مواد منفجره استفاده می‌شود.

۳- محصولات شیمیایی: دارای تنوع زیادی هستند و شامل انواع اسیدها، الکل‌ها، گازها نظیر اتیلن، پروپیلن، بوتادین، اتیلن گلاکول، متانول و کلر می‌شود. از این محصولات در تولید انواع موکت، طناب، البسه، پلاستیک، اسباب‌بازی، رنگ، ضدیخ و... استفاده می‌شود.

۴- سوخت‌ها: شامل پروپان، بوتان و پنتان از محصولات میانی هستند که علاوه بر مصرف سوخت، به عنوان خوراک در صنایع پتروشیمی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۵- کودها: شامل اوره، دی‌آمونیم فسفات، نترات آمونیوم و سولفات آمونیوم بوده که با توجه به مصرف بالا در بخش کشاورزی بیشتر در این بخش به شکل‌های مختلفی از جمله کود شیمیایی، خوراک دام، صنایع دارویی، تهیه پودرهای آتش‌نشانی، الیاف مصنوعی، مواد منفجره، ملامین و... استفاده می‌شوند.

تولید محصولات پتروشیمی به گونه‌ای است که معمولاً یک واحد اصلی در بالادست، ماده اولیه واحدهای دیگر را تولید می‌کند. به عنوان مثال، واحد «الفین»^۱ با تولید اتیلن و پروپیلن، نیاز واحدهای «پلی‌اتیلن» را تامین می‌کند. به این ترتیب صنایع مرتبط با فعالیت‌های پتروشیمی را به پنج دسته صنایع بالادستی، صنایع پایه، صنایع میانی، واحدهای نهایی، و صنایع پایین دست تقسیم می‌کنند.

در واحدهای بالادستی هیدروکربن‌های سبک خطی-حلقوی موجود در نفت خام یا گاز طبیعی جدا شده و مواد خام مورد نیاز واحدهای پایه مانند واحد «الفین» تولید می‌شود. واحدهای پایه خوراک خود نظیر «نفتا» و «اتان» استحصال یا گاز طبیعی را به‌طور مستقیم از واحدهای بالادستی دریافت کرده و موادی مانند «اتیلن» و «پروپیلن» را به عنوان ماده اولیه واحدهای میانی تولید می‌کنند. واحدهای میانی یا صنایع واسطه‌ای به واحدهایی گفته می‌شود که از نظر خط تولید و برحسب ضرورت در میان واحدهای پایه و واحدهای نهایی قرار گرفته باشند و مواد اولیه واحدهای نهایی را تولید می‌کنند. به عنوان مثال، برای تولید «PVC» از «اتیلن»، به دو واحد واسطه‌ای، یکی برای ساختن «دی‌کلرواتیلن» و دیگری برای ساختن «کلرور وینیل» نیاز است. واحدهای نهایی، فرآورده‌های نهایی پتروشیمی را مانند «PVC» و لاستیک مصنوعی تولید و به بازار عرضه می‌کنند. واحدها یا در اصطلاح صنایع پایین‌دستی، فرآورده‌های نهایی پتروشیمی را دریافت و آن‌ها را به محصولات مصرفی بسیاری از صنایع مصرفی یا مصرف‌کننده‌های نهایی در بخش‌های مختلف

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۲۱

اقتصادی از جمله صنعت و کشاورزی تحویل می‌دهند. صنایع لاستیک، پلاستیک، شوینده‌ها، رنگ، رزین، کود شیمیایی و... در این گروه قرار می‌گیرند. البته این تقسیم‌بندی کلی است و از این لحاظ مرز ثابت و مشخصی بین مجتمع‌های پتروشیمی وجود ندارد. یک مجتمع پتروشیمی می‌تواند تلفیقی از محصولات پایه، میانی و نهایی را تولید کند و بخشی از تولیدات خود را هم در فرآیندی دیگر مصرف کند.

علاوه بر این سه بخش اصلی در صنعت پتروشیمی، صنایع تامین‌کننده قطعات و ماشین‌آلات و صنایع ارائه‌دهنده خدمات فنی و مهندسی به‌عنوان صنایع جانبی در زنجیره ارزش این صنعت نقش ایفا می‌کنند. گستره این زنجیره ارزشی و وجود ذخایر غنی نفت و گاز در کشور و توان اشتغال‌زایی بالای آن به‌خوبی نقش پیشرو صنعت پتروشیمی در اقتصاد ملی را نشان می‌دهد.

۴-۱- صنعت پتروشیمی در ایران

صنعت پتروشیمی در ایران قدمتی ۵۰ ساله دارد. ایران در حال حاضر بعد از عربستان دومین تولیدکننده محصولات پتروشیمی در خاورمیانه به‌حساب می‌آید، اما دستیابی به سهم ۳۴ درصدی از کل ارزش تولید محصولات پتروشیمی در خاورمیانه (ظرفیت تولیدی معادل ۱۲۶ میلیون تن در سال) و کسب جایگاه نخست پتروشیمی در منطقه که در افق چشم‌انداز ۱۴۰۴ بر آن تاکید شده است، نیازمند شناخت وضعیت کنونی و فرصت‌ها و چالش‌های صنعت پتروشیمی کشورمان و همچنین شرایط این صنعت در کشورهای مهم منطقه است.

«دسترسی به منابع غنی گاز و میعانات نفتی با قیمت رقابتی مناسب»، «دارا بودن حدود ۲۰۰ کیلومتر ساحل مناسب برای ساخت بندرهای صادراتی»، «قرار گرفتن منابع گازی خوراک پتروشیمی در کرانه خلیج فارس»، «موقعیت جغرافیایی مناسب به لحاظ نزدیکی به بازارهای آسیا از جمله چین و هند و همچنین اروپا»، «فراوانی جمعیت کشور به لحاظ ظرفیت‌های تقاضای داخلی با توجه به سرانه اندک مصرف مواد پلیمری نسبت به استانداردهای بین‌المللی»، «برخوردار بودن از تجارب ارزشمند و تخصصی بیش از ۵ دهه فعالیت متخصصان ایرانی در این صنعت» و «نیروی انسانی تحصیل‌کرده، جوان و ارزان برای کار در طرح‌های جدید» از جمله مزیت‌های رقابتی صنعت پتروشیمی در ایران است. علاوه

بر این موارد، براساس آخرین گزارش رسمی شرکت ملی نفت ایران، حجم ذخایر گاز طبیعی و متعارف ایران بیش از ۳۳/۷ تریلیون مترمکعب و حجم ذخایر نفت خام متعارف و قابل برداشت حدود ۱۵۷ میلیارد بشکه است. در حال حاضر صنعت پتروشیمی کشور تنها حدود ۷ درصد از مصارف سالانه ذخایر هیدروکربوری را به‌عنوان خوراک مصرف می‌کند و با وجود اینکه کل سرمایه‌گذاری در این صنعت در مجموع ۴۵ میلیارد دلار است، اما ارزش تولیدات آن سالانه ۲۰ میلیارد دلار است.

تقریباً تمام خوراک صنعت پتروشیمی - به‌عنوان یکی از صنایع کلیدی در اقتصاد ایران - از نفت، گاز طبیعی و میعانات گازی تامین می‌شود. به عبارت دیگر، تمام مواد اولیه و خوراک لازم برای تولید محصولات پتروشیمی که دامنه وسیعی از صنایع را دربر می‌گیرد در داخل کشور وجود دارد. از این منظر، این صنعت می‌تواند با خلق ارزش افزوده بالا و گسترش صنایع جانبی اعم از صنایع پایین‌دستی و یا صنایع تامین‌کننده نیازهای فنی، مهندسی و تحقیقاتی کشور نقش مهمی در اقتصاد ملی ایفا کند.

قریب به ۶۰ شرکت تولیدکننده در صنعت پتروشیمی فعال است که مالکیت آن‌ها از زمان اجرایی شدن اصل ۴۴ قانون اساسی به بخش خصوصی واگذار شده است. تا پیش از واگذاری این شرکت‌ها به بخش خصوصی، شرکت بازرگانی پتروشیمی - که یک شرکت دولتی بود - عهده‌دار انجام فعالیت‌های تجمع و فروش محصولات پتروشیمی در داخل و خارج از کشور بود. بعد از انجام واگذاری‌ها به بخش خصوصی، هلدینگ‌های پتروشیمی به‌عنوان مالکان جدید شرکت‌های تولیدی به صورت مستقل اقدام به فروش محصولات خود در بازارهای جهانی کردند. این موضوع گاه تبعاتی از جمله رقابت قیمتی بین تولیدکنندگان داخلی و افزایش هزینه‌ها را دربر داشته است. ضمن اینکه فروش محصولات به صورت یکپارچه نیز به دلیل تاخیر در اعاده وجوه درآمدی تولیدکنندگان و نیز قیمت‌گذاری‌های آغشته به رفتارهای سیاسی، مورد اعتراض تولیدکنندگان قرار داشته است. بنابراین، بررسی موضوع «استقلال در فروش» یا بازگشت به گذشته و «یکپارچه‌سازی فروش محصولات پتروشیمی کشور» هم از جهت میزان تاثیر آن بر درآمدهای ارزی کل صنعت (و به تبع آن درآمدهای ارزی کشور) و هم از جهت درآمدهای هر یک از تولیدکننده‌ها، حائز اهمیت است. اهمیت این مساله به‌خصوص در دوران پسابرجام و رفع برخی از مهم‌ترین موانع حقوقی صادرات ایران به

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۲۳

کشورهای خارجی در قالب بیشترین ارزش آوری و کسب درآمد ارزی برای شرکت‌های تولیدی و به تبع آن کشور دوجندان شده است.

خوشبختانه تنوع محصولات پتروشیمی و نیاز روزافزون جهان به این محصولات، چشم‌انداز خوبی برای صادرات محصولات فراهم ساخته است. این درحالی است که وجود شرکت‌های متعدد خارجی در عرصه بین‌المللی، فضایی به نسبت رقابتی در عرضه محصولات پتروشیمی ایجاد کرده است. مقایسه ارزش صادرات محصولات پتروشیمی طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ و همچنین نسبت این میزان به ارزش کل صادرات غیرنفتی کشور، جایگاه و اهمیت ویژه این صنعت را به خوبی نشان می‌دهد (جدول (۳)).

براساس اطلاعات جدول (۳)، صادرات محصولات پتروشیمی در سال ۱۳۹۴ قریب به ۲۷۳ هزار میلیارد ریال (معادل ۹/۶ میلیارد دلار با نرخ ارز ۲۸۵۰۰ ریالی) کشور بوده است که نزدیک به ۲۶/۸ درصد ارزش صادرات کالاهای غیرنفتی و ۲۲/۶ درصد از کل صادرات (کل صادرات در سال ۱۳۹۴ برابر ۴۲/۴ میلیارد دلار) را دربر می‌گیرد.

جدول (۳): روند صادرات پتروشیمی و سهم آن در صادرات کالاهای غیرنفتی کشور طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴

سال	صادرات پتروشیمی (هزار دلار)	میزان صادرات قطعی کالاهای غیرنفتی (بدون احتساب میعانات گازی) (هزار دلار)	درصد صادرات محصولات پتروشیمی از کل صادرات غیرنفتی
۱۳۸۷	۷,۸۴۳,۴۰۰	۱۸,۳۳۳,۵۷۷	۴۲/۸
۱۳۸۸	۹,۱۲۴,۶۰۰	۲۱,۸۹۱,۴۶۱	۴۱/۷
۱۳۸۹	۱۱,۵۵۹,۰۰۰	۲۶,۵۵۱,۸۳۴	۴۳/۵
۱۳۹۰	۱۴,۶۶۲,۰۰۰	۳۳,۸۱۸,۶۴۱	۴۳/۴
۱۳۹۱	۱۲,۰۶۱,۳۵۳	۳۲,۵۶۷,۲۴۴	۳۷
۱۳۹۲	۹,۸۶۹,۰۷۵	۳۱,۵۵۲,۳۹۹	۳۱/۳
۱۳۹۳	۱۰,۲۷۲,۹۶۰	۳۶,۵۵۵,۱۹۷	۲۸/۱
۱۳۹۴	۹,۵۸۶,۳۴۹	۳۵,۷۵۰,۰۰۲	۲۶/۸

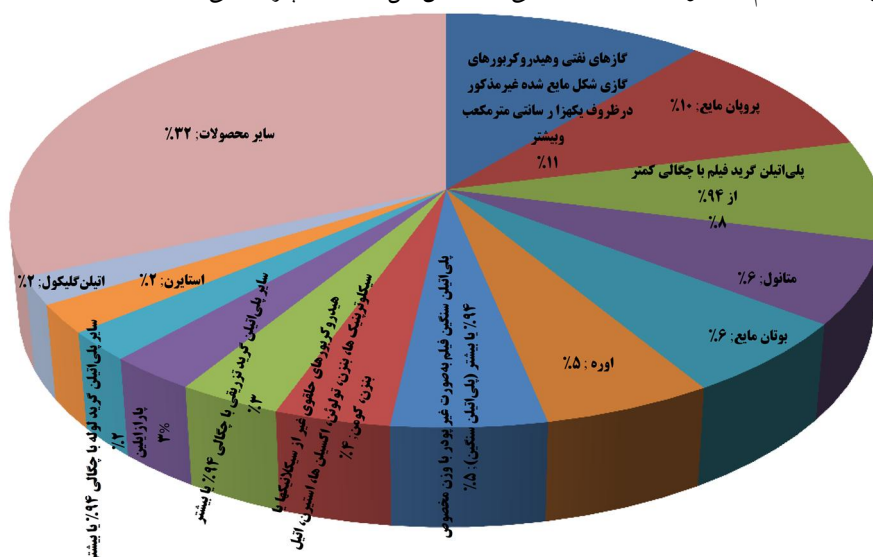
ماخذ: محاسبات محقق براساس گزارش‌های سالانه شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران و گزارش‌های سالانه گمرک جمهوری اسلامی ایران

آمار مربوط به صادرات محصولات پتروشیمی براساس گزارش سال ۱۳۹۴ گمرک جمهوری اسلامی ایران، نشان می‌دهد گازهای نفتی و هیدروکربن‌های گازی شکل

۲۴ فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۷

مایع شده (غیر از گاز طبیعی، پروپان، بوتان، اتیلن، پروپیلن، بوتیلن و بوتادین) با ارزش ۱/۵۸ میلیارد دلار، بالاترین درصد ارزش را در بین محصولات پتروشیمی به خود اختصاص داده‌اند. بعد از آن، پروپان مایع و پلی اتیلن سبک گرید فیلم در جایگاه‌های بعدی قرار دارند که به ترتیب ۱۰ و ۸ درصد از ارزش دلاری صادرات محصولات پتروشیمی را شامل می‌شوند.

نمودار (۲): سهم محصولات عمده صادراتی در ارزش کل صادرات پتروشیمی سال ۱۳۹۴



ماخذ: مستخرج از گزارش آمار صادرات سال ۱۳۹۴ گمرک جمهوری اسلامی ایران

در جدول (۴)، ۲۰ شرکت برتر که در سال ۱۳۹۴ بالاترین ارزش صادراتی محصولات را داشته‌اند به ترتیب نمایش داده شده‌اند. مجموع صادرات این ۲۰ شرکت ۹۲/۸ درصد از کل صادرات محصولات پتروشیمی را تشکیل می‌دهد و شرکت پتروشیمی نوری، بندر امام، پارس، زاگرس و جم ۵ شرکت برتر صادراتی در این سال هستند.

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۲۵

جدول (۴): رتبه‌بندی شرکت‌های تولیدی براساس ارزش صادراتی آن‌ها در سال ۹۴

رتبه	شرکت	مقدار تولید (هزار تن)	مقدار صادراتی هزار تن	ارزش صادراتی هزار دلار
۱	شرکت پتروشیمی نوری (برزویه)	۴,۰۸۰	۲,۳۶۱	۱,۰۶۷,۸۰۵
۲	شرکت فراورش بندر امام	۵,۲۰۷	۱,۸۹۵	۸۱۶,۱۸۳
۳	شرکت پتروشیمی پارس	۳,۷۰۶	۱,۶۳۲	۷۷۷,۴۸۲
۴	شرکت پتروشیمی زاگرس	۲,۸۹۹	۲,۷۶۰	۷۱۸,۸۳۶
۵	شرکت پتروشیمی جم	۲,۶۱۳	۵۲۳	۵۸۵,۸۰۳
۶	شرکت پتروشیمی مارون	۴,۳۱۰	۶۷۵	۵۶۵,۱۳۱
۷	شرکت پلیمر آریا ساسول	۱,۶۶۳	۴۳۵	۵۵۰,۳۰۹
۸	تبریز	۷۴۰	۱۶۰	۴۹۷,۹۰۹
۹	شرکت پتروشیمی پردیس	۳,۲۸۱	۱,۶۹۲	۴۵۰,۰۴۴
۱۰	شرکت پتروشیمی شازند (اراک)	۱,۴۵۷	۵۵۶	۳۵۳,۰۳۳
۱۱	لاله	۳۵۰	۲۷۶	۳۳۷,۴۷۸
۱۲	مهر	۳۲۷	۲۸۲	۲۹۵,۶۳۷
۱۳	شرکت پتروشیمی خارک	۱,۰۹۹	۱,۰۵۸	۲۹۴,۰۰۰
۱۴	شرکت پتروشیمی رازی	۱,۶۰۴	۸۶۸	۲۸۰,۹۰۰
۱۵	شرکت پتروشیمی بوعلی سینا	۱,۳۳۶	۴۶۴	۲۴۹,۹۸۹
۱۶	پلیمر کرمانشاه	۳۰۳	۱۷۴	۲۳۵,۳۹۰
۱۷	شرکت پتروشیمی امیرکبیر	۱,۰۰۵	۱۸۶	۲۲۵,۶۸۲
۱۸	فرسا شیمی	۳۲۰	۳۵۹	۲۱۲,۱۲۴
۱۹	شرکت پتروشیمی اروند	۱,۵۱۰	۳۲۳	۱۷۵,۶۳۲
۲۰	خراسان	۸۵۰	۲۲۹	۱۲۸,۰۶۷
	جمع	۳۸,۶۵۹	۱۶,۹۰۸	۸,۸۱۷,۴۳۴

ماخذ: مستخرج از گزارش عملکرد سال ۱۳۹۴ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران

سهام مالکیت این ۲۰ شرکت به صورت عام در بازار بورس تهران عرضه شده و به صورت سهامی اداره می‌شوند. بخشی از سهامداران این شرکت‌ها از بین گروه‌ها و شرکت‌های سرمایه‌گذاری یا افراد حقیقی دارای خرده سهم و بخش قابل توجهی نیز در اختیار شرکت‌ها و افراد حقوقی غیردولتی قرار دارند. بخش‌هایی نیز تحت عنوان سهام عدالت (که در هیچ حالتی از ۳۰ درصد ارزش کل سهام بیشتر نیست) در اختیار شرکت سرمایه‌گذاری عدالت قرار دارد

۲۶ فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۷

که سهام آن‌ها در بین مردم توزیع شده است. نهادهای سهامدار عمده این شرکت‌ها تحت مدیریت یکپارچه با عنوان گروه یا هلدینگ اداره می‌شوند. هم‌اکنون ۹ هلدینگ یا گروه اصلی در زمینه محصولات پتروشیمی فعالیت دارند که دو هلدینگ اصلی (شامل هلدینگ خلیج فارس و هلدینگ سازمان تامین اجتماعی نیروهای مسلح - ساتا) در مجموع ۵۰ درصد میزان تولید محصولات سال ۱۳۹۴ را به خود اختصاص داده‌اند و در این مقاله به عنوان بازیکنان بازی یکپارچه‌سازی فروش مورد بررسی قرار می‌گیرند. هلدینگ خلیج فارس را با H1 و هلدینگ ساتا را با H2 نشان می‌دهیم.

جدول (۵): سهم هلدینگ‌های اصلی پتروشیمی کشور از کل تولیدات پتروشیمی در سال ۱۳۹۴

هلدینگ	سهم هلدینگ از تولید سال ۱۳۹۴ (هزار تن)	نسبت سهم هلدینگ از تولید به کل تولید در سال ۱۳۹۴ (درصد)
H1	۱۴,۲۱۱	۳۰/۶
H2	۸,۹۵۹	۱۹/۵
جمع	۲۳,۱۷۰	۵۰/۱

ماخذ: محاسبات محقق براساس گزارش عملکرد سال ۱۳۹۴ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران

هلدینگ خلیج فارس متشکل از سهام شرکت‌های صنایع پتروشیمی خلیج فارس، پتروشیمی فارس، پتروشیمی بندر امام، مدیریت توسعه صنایع پتروشیمی، شرکت پترول و شرکت بازرگانی مدیران اقتصاد است که هر یک از این شرکت‌ها بخشی از سهام شرکت‌های تولیدی را در اختیار دارند. هلدینگ ساتا نیز متشکل از شرکت‌ها و گروه‌های سرمایه‌گذاری نفت و گاز پارسیان، سرمایه‌گذاری هامون سپاهان، شرکت گسترش تجارت هامون، پارس تامین مجد، خدمات مدیریت هامون سپاهان، شرکت سرمایه‌گذاری غدیر، ساتا و پالایش نفت تبریز است.

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۲۷

جدول (۶): درصد مالکیت و گروه‌های تشکیل‌دهنده هلدینگ خلیج فارس در سال ۱۳۹۴

درصد مالکیت	میزان صادرات ۱۳۹۴ (هزار تن)	میزان تولید ۱۳۹۴ (هزار تن)	مجتمع تولیدی	گروه سرمایه‌گذاری
۶۹/۲۷	۱۸۹۵	۵،۲۰۷	پتروشیمی بندر امام	شرکت صنایع پتروشیمی خلیج فارس
۷۶/۵۵	۲،۳۶۰	۴،۰۷۹	پتروشیمی برزویه	
۶۰	۱،۶۳۲	۳،۷۰۵	پتروشیمی پارس	
۷۹	۳۲۳	۱،۵۱۰	پتروشیمی اروند	
۷۰	۴۶۳	۱،۳۳۶	پتروشیمی بوعلی سینا	
۷۵	۷۸	۸۳۳	شهید تندگویان	
۴۰	۲۸۲	۳۲۶	پتروشیمی مهر	
۲۰	۰	۵۵۸	پتروشیمی کاویان	
۷۰	۲	۲۱	پتروشیمی خوزستان	
۸۷/۱۱	۰	۰	پتروشیمی مبین	
۶۰/۵۶	۰	۰	پتروشیمی فجر	پتروشیمی پارس
۵۰	۴۳۵	۱،۶۶۳	پلیمر آریاساسول	
۴۰/۸	۵	۱۱۷	پتروشیمی کارون	پتروشیمی بندر امام
۱۰	۲۶	۲۲۶	پتروشیمی غدیر	
۳/۵۵	۳۷۳	۹۸۳	پتروشیمی کرمانشاه	مدیریت توسعه صنایع پتروشیمی
۳/۱۸	۲،۷۵۹	۲،۸۹۹	پتروشیمی زاگرس	پترول
۱۲/۱۱	۵۲۳	۲،۶۱۳	پتروشیمی جم	
۵۵/۵	۰	۴۹	پتروشیمی ارومیه	
۴۹	۰	۱۴۰	پتروشیمی ایلام	
۲۰/۶۷	۳۷۳	۹۸۳	پتروشیمی کرمانشاه	
۳۰/۴۶	۳۷۰	۱،۹۴۷	پتروشیمی شیراز	بازرگانی مدیران اقتصاد
۱/۰۱	۳۷۴	۹۸۳	پتروشیمی کرمانشاه	

ماخذ: مستخرج از گزارش انجمن صنفی کارفرمایی صنعت پتروشیمی و گزارش عملکرد سال ۱۳۹۴

شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران در پاییز سال ۱۳۹۵

۲۸ فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۷

جدول (۷): درصد مالکیت و گروه‌های تشکیل دهنده هلدینگ خلیج فارس در سال ۱۳۹۴

هلدینگ ساتا				
گروه سرمایه‌گذاری	مجتمع تولیدی	میزان تولید ۱۳۹۴ (هزار تن)	میزان صادرات ۱۳۹۴ (هزار تن)	درصد مالکیت
	پتروشیمی شیراز	۱,۹۴۷,۲	۳۷۰,۴	۵۱/۶۷
	پتروشیمی پردیس	۳,۲۸۱,۱	۱,۶۹۱,۹	۶۶/۹۹
	صنایع پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,۵	۳۷۳,۷	۴۲/۲۲
	پتروشیمی زاگرس	۲,۸۹۹,۲	۲,۷۵۸,۹	۳۶/۱۳
شرکت گروه گسترش نفت و گاز پارسیان	پتروشیمی خراسان	۸۵۰,۵	۲۲۸,۹	۱۸/۰۰
	پتروشیمی مارون	۴,۳۱۰,۱	۶۷۴,۵	۶/۶۸
	پتروشیمی پارس	۳,۷۰۵,۷	۱,۶۳۲,۰	۱۹/۷۸
	پتروشیمی اروند	۱,۵۰۹,۵	۳۲۲,۷	۱
	پتروشیمی ایلام	۱۳۹,۹	۰	۲
	پتروشیمی مروارید	۳۳۴,۱	۰	۱
سرمایه‌گذاری هامون سپاهان	پتروشیمی فن‌آوران	۱,۲۱۷,۱	۷۸۳,۰	۱/۰۷
	پتروشیمی پردیس	۳,۲۸۱,۱	۱,۶۹۱,۹	۲/۵۱
	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,۵	۳۷۳,۷	۲/۶۸
شرکت گسترش تجارت هامون	شرکت کربن ایران	۲۸,۱	۴,۳	۱/۷
پارس تامین مجد	پلیمر آریاساسول	۱,۶۶۳,۳	۴۳۴,۸	۵۰
خدمات مدیریت هامون سپاهان	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,۵	۳۷۳,۷	۰/۵
شرکت سرمایه‌گذاری غدیر	پتروشیمی پارس	۳,۷۰۵,۷	۱,۶۳۲,۰	۱۹/۷۸
ساتا	پتروشیمی مارون	۴,۳۱۰,۱	۶۷۴,۵	۲۳/۵۳
	پتروشیمی تبریز	۷۳۹,۸	۱۵۹,۶	۴
پالایش نفت تبریز	پتروشیمی تبریز	۷۳۹,۸	۱۵۹,۶	۴۸/۵۸۶

ماخذ: مستخرج از گزارش انجمن صنفی کارفرمایی صنعت پتروشیمی و گزارش عملکرد سال ۱۳۹۴

شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران در پاییز سال ۱۳۹۵

۵- چارچوب مدل بازی

براساس شاخص تمرکز n بنگاه که معمولاً برای ۲، ۴ و یا ۸ بنگاه به صورت $C_n = \sum_{i=1}^n S_i$ تعریف می شود (در این رابطه S_i سهم بازاری بنگاه i ام و C_n نسبت تمرکز بنگاه‌ها یعنی سهم n بنگاه از بازار است که به صورت درصد بیان می شود) در صورتی که از دو تا چهار بنگاه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد سهم بازار را در اختیار داشته باشند، آن بازار دارای ساختار انحصار چندجانبه است. همانطور که در جدول (۷) نشان داده شده است، دو هلدینگ اصلی ۵۰ درصد سهم تولید داخلی را در دست دارند و در واقع ساختار بازار داخلی به شکل انحصار چندجانبه است. اما از حیث بازار خارجی و براساس آخرین گزارش سازمان تجارت جهانی در سال ۲۰۱۴، سهم صادرات محصولات پتروشیمی ایران با رقم ۹/۶ میلیارد دلار در مقایسه با صادرات ۲۰۵۴ میلیارد دلاری جهان حدود ۰/۵ درصد است که نشان می دهد ایران در اثرگذاری روی قیمت محصولات در این صنعت قدرت چندانی ندارد.

چنانچه اتحادیه اروپا را به عنوان یک نظام واحد تولید و عرضه در نظر بگیریم براساس شاخص تمرکز ۴ بنگاه می توان گفت که بازار جهانی صنعت پتروشیمی به صورت انحصار چندجانبه بسته است: $C_4=77/7$

با توجه به اینکه ساختار بازار صنعت پتروشیمی به صورت انحصار چندجانبه است باید رفتارهای بیشینه کردن سود بنگاه‌ها در این بازار از جمله رفتار شبه رقابتی یا تبانی را بررسی و در چارچوب آن‌ها مقدار بهینه تولید مشخص شود. هر یک از این رفتارها مستلزم تخمین تابع تقاضای بازار و تخمین توابع هزینه واحدهای تولیدی است.

۳۰ فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۷

جدول (۸): صادرات محصولات پتروشیمی ایران در مقایسه با صادرات جهانی

کشور	صادرات در سال ۲۰۱۴ (میلیارد دلار)	درصد از صادرات جهانی
اتحادیه اروپا (۲۸ کشور)	۱۰۰۴	۴۸/۹
ایالات متحده	۲۱۲	۱۰/۳
چین	۱۳۴	۶/۵
سوئیس	۹۳	۴/۵
ژاپن	۷۲	۳/۵
جمهوری کره	۶۷	۳/۳
سنگاپور	۵۳	۲/۶
کانادا	۳۸	۱/۸
چین تایپه	۳۸	۱/۸
هند	۳۷	۱/۸
عربستان سعودی	۳۳	۱/۶
روسیه	۳۲	۱/۶
تایلند	۲۵	۱/۲
رژیم صهیونیستی	۱۸	۰/۹
هنگ کنگ	۱۸	۰/۹
مجموع ۱۵ کشور فوق	۱۸۵۷	۹۰/۴
جمهوری اسلامی ایران	۹,۶	۰/۴۶
مجموع صادرات جهانی	۲۰۵۴	۱۰۰

ماخذ: World Trade Organization, International Trade Statistics 2015

تخمین تابع تقاضا برای محصولات صنعت پتروشیمی کشور که دارای تنوعی گسترده و بیش از ۱۲۰ نوع محصول اصلی و جانبی است با فرض همگنی آن‌ها انجام می‌شود. بعضی از این محصولات به عنوان مواد واسطه‌ای برای سایر کارخانه‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما بخش اعظم آن‌ها در قالب محصولات نهایی در بازارهای داخلی و خارجی فروخته می‌شوند. در اینجا برای مدل‌سازی رفتار بهینه این هلدینگ‌ها، فرض می‌کنیم که تمام محصولات پتروشیمی تولید داخل که در بازارهای جهانی فروخته می‌شوند، همگن و معادل یک محصول هستند. قیمت واحد این محصول، معادل ارزش

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۳۱

دلاری فروش به مقدار کل فروش است. تابع تقاضای معکوس این محصول به صورت معادله‌های (۱۱) (۱۲) و براساس داده‌های سال ۱۳۹۴ تخمین زده شده که در آن مقدار q_i مقدار صادرات شرکتهای تولیدی و p قیمت واحد هر تن از محصول بر حسب هزار دلار است.

$$p = F(q_1 + q_2) = \alpha - \beta \sum_i q_i \quad (11)$$

$$\hat{p} = F\left(\sum_i q_i\right) = 661.5 - 0.157\left(\sum_i q_i\right) + \{AR(3), MA(3)\} \quad (12)$$

به منظور نشان دادن اثر تصمیم‌گیری‌های مدیریت فروش بر روی سود بنگاه‌ها، ساختار توابع هزینه شرکتهای تولیدی را توابع درجه ۲ به صورت معادله (۱۳) در نظر می‌گیریم.

$$C_i = \theta_i q_i + \gamma_i q_i^2 \quad (13)$$

برای هر هلدینگ، توابع هزینه براساس ارقام مربوط به هزینه‌های ناخالص شرکتهای زیرمجموعه آن که از اطلاعات مالی سال ۱۳۹۴ آنها مستخرج شده به تفکیک تخمین زده شده است. میزان تولید در این توابع، معادل سهم هلدینگ‌ها از مقادیر صادرشده در نظر گرفته شده است. (نرخ تسعیر ارز برای هر دلار معادل ۲۸,۵۰۰ ریال لحاظ شده است.)

$$C_1 = 156/4 q_1 + 0.0787 q_1^2 \quad \text{تابع هزینه هلدینگ ۱}$$

$$C_2 = 88 q_2 + 0.118 q_2^2 \quad \text{تابع هزینه هلدینگ ۲}$$

با توجه به کوچک بودن سهم ایران در بازار جهانی، هلدینگ‌های ایرانی نمی‌توانند تعیین‌کننده قیمت باشند اما همانند یک بازار شبه رقابتی و در قالب پذیرنده قیمت، هر یک خود می‌توانند راسا اقدام به بازاریابی و فروش محصول کنند. شرط لازم برای بیشینه شدن سود هلدینگ‌ها در این حالت این است که میزان فروش هر یک در سطحی تعیین شود که درآمد نهایی با هزینه نهایی آن مساوی باشد. با توجه به روابط ۱۳ و ۱۱ مقدار فروش بهینه هر یک از هلدینگ‌ها طبق معادله (۱۴) به دست می‌آید. (جدول ۸)

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \beta + 2\gamma_1 & \beta \\ \beta & \beta + 2\gamma_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \alpha - \theta_1 \\ \alpha - \theta_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

بنگاه‌های موجود در بازار انحصار چندجانبه، می‌توانند «با یکدیگر همکاری کرده» و به نوعی تبانی کنند. تبانی، توافقی است که به صورت صریح یا تلویحی بین بنگاه‌های موجود اتفاق می‌افتد و هدف آن بیشتر از بین بردن یا محدود کردن رقابت با یکدیگر است. این تبانی

۳۲ فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال هجدهم، شماره ۶۹، تابستان ۱۳۹۷

ضمانت اجرایی و حقوقی ندارد و بنگاه‌ها این را می‌دانند که در صورت تبعیت از موارد توافق شده، سود آن‌ها در مجموع بیشتر می‌شود. با فرض تبانی، بنگاه‌ها در مورد سطح تولید (فروش) و قیمت با یکدیگر هماهنگی کرده و به طور مشترک به صورت یک انحصارگر عمل می‌کنند؛ یعنی سعی می‌کنند سود صنعت (مجموع بنگاه‌ها) را بیشینه کنند.

جدول (۸): فروش بهینه و سود هلدینگ‌ها با فرض استقلال در فروش (قیمت ۳۲۷ دلار برای هر تن)

نام بنگاه	مقدار بهینه فروش (هزار تن)	سود (هزار دلار)	سود سرانه به ازای هر تن تولید (دلار)
هلدینگ H1	۱,۰۹۷	۹۲,۹۲۲	۸۵
هلدینگ H2	۱,۰۹۱	۱۲۱,۹۷۹	۱۲۰
جمع کل	۲,۱۱۶	۲۱۴,۹۰۱	۱۰۱

ماخذ: محاسبات محقق

همان‌طور که اشاره شد، تصمیمات در تبانی، ضمانت اجرایی حقوقی نداشته و به همین علت با افزایش تعداد شرکت‌کنندگان در موضوع مورد تبانی، احتمال نقض موارد توافق شده افزایش می‌یابد. با فرض اینکه بنگاه‌های تولیدی مفاد مورد توافق (سهامیه تولید و مقدار فروش) را به صورت کامل رعایت کنند، درآمد مجموع بنگاه‌ها به صورت واحد در نظر گرفته شده و سود کل صنعت بیشینه می‌شود؛ سود کل صنعت برابر است با درآمد کل منهای هزینه کل. هزینه کل در اینجا مجموع هزینه‌های هر هلدینگ است. بنابراین، سود کل به صورت معادله (۱۵) است.

$$\pi = \sum_i q_i \left(\alpha - \beta \sum_i q_i \right) - \sum_i \theta_i q_i - \sum_i \gamma_i q_i^2 \quad (15)$$

با حل معادله (۱۵)، مقدار بهینه تولید (فروش) هر هلدینگ از طریق معادله (۱۶) به دست می‌آید که نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است.

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2\beta + 2\gamma_1 & 2\beta \\ 2\beta & 2\beta + 2\gamma_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \alpha - \theta_1 \\ \alpha - \theta_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

براساس جدول (۹)، سود هر هلدینگ و نیز سود کل صنعت در این حالت -با وجود تولید کمتر- بیشتر از حالت استقلال در فروش است. این نتیجه تا زمانی که هلدینگ‌ها به

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۳۳

تبانی و تعهدات خود پایبند باشند و با فرض ثابت ماندن ساختار بازار جهانی محصولات پتروشیمی، متضمن بیشترین سود هم برای هلدینگ‌ها و هم برای کل صنعت پتروشیمی است، اما اگر هر یک از هلدینگ‌ها به تعهدات خود پایبند نباشند، پیامدهای متفاوتی خواهد داشت که می‌تواند یک بازی کلاسیکی با حالت‌های زیر را شکل دهد:

- هر دو هلدینگ تبانی (C) کرده و مفاد تعهدات خود را رعایت کنند.
- یکی از هلدینگ‌ها به مفاد توافق متعهد نباشد (D).
- هیچیک از هلدینگ‌ها به تعهدات خود عمل نکنند.

جدول (۹): فروش بهینه و سود هلدینگ‌ها با فرض تبانی (قیمت ۴۵۶ دلار برای هر تن)

نام بنگاه	مقدار بهینه فروش (هزار تن)	سود (هزار دلار)	سود سرانه به ازای هر تن تولید (دلار)
هلدینگ H1	۶۰۶	۱۵۲,۸۴۱	۲۵۲
هلدینگ H2	۶۹۴	۱۹۹,۰۰۱	۲۸۷
جمع کل	۱۳۰۰	۳۵۱,۸۴۳	۲۷۱

ماخذ: محاسبات محقق

سود هر هلدینگ به ازای هر تن تولید برای حالت‌هایی که هر دو تبانی کرده یا مستقل اقدام به فروش محصول خود می‌کنند را به ترتیب با وضعیت‌های مندرج در جدول (۹) و (۱۰) تطبیق می‌دهیم. در صورتی که هر یک از هلدینگ‌های تولیدی به مفاد تعهد خود پایبند کند، سهم بازاری هلدینگ دیگر را با کاهش قیمت از آن خود می‌کند و در مجموع سود بیشتری به دست خواهد آورد. اگر هلدینگی که مفاد مورد توافق برای شکل دادن تبانی را نپذیرد، مقداری بین ۱,۳۰۰ (سقف فروش در حالت تبانی) و ۲,۱۱۶ هزار تن (مقدار بهینه عرضه در حالت شبه‌رقابتی و مستقل از یکدیگر) با قیمتی کمتر از ۴۵۶ دلار به بازار عرضه کند به صورت نظری سهم بازاری هلدینگ دیگر را به طور کامل از آن خود می‌کند. در این صورت و با در نظر گرفتن عدم نیاز به هزینه‌های تبلیغات و بازاریابی و کاهش هزینه‌های فروش، سود کل «هلدینگ ۲» و سود به ازای هر تن فروش آن افزایش می‌یابد.

در اینجا فرض شده است که «هلدینگ ۲» در حالتی که «هلدینگ ۱» استراتژی تبانی را اتخاذ کرده با عدم پایبندی به تعهدات خود، مقداری برابر با ۱,۵۵۰ هزار تن را به قیمت

۴۱۷ دلار برای هر تن به بازار عرضه می‌کند. در این صورت، علاوه بر به دست آوردن کل سهم بازار، سود سرانه خود را به حدود ۲۹۰ دلار افزایش می‌دهد. برای حالتی که «هلدینگ ۲» استراتژی تبانی را اتخاذ کند و «هلدینگ ۱» استراتژی استقلال در فروش را دنبال کند، می‌تواند با اعمال قیمتی برابر ۴۳۲ دلار به سودی برابر با ۲۸۷ دلار برای هر تن برسد و سهم بازاری «هلدینگ ۲» را تصاحب کند. نتیجه در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۱۰): سود سرانه تولید بازیکنان در هر یک از استراتژی‌های محتمل (دلار /تن)

		B بازیکن	
		C	D
A بازیکن	C	(۲۵۲،۲۸۷)	(۲۹۰،۰)
	D	(۰،۲۸۷)	(۸۴،۱۲۰)

ماخذ: محاسبات محقق

بر اساس جدول (۱۰)، تعادل نش بازی در انتخاب DD است در حالی که بهینه پارتو استراتژی «همکاری و تبانی» هلدینگ‌ها با یکدیگر، یعنی CC است. به عبارت دیگر، با وجود اینکه تبانی وضعیت بهتری برای واحدهای پتروشیمی (هلدینگ‌ها) رقم می‌زند، اما انتخاب آن‌ها به دلیل عدم اطلاعات کامل از رفتار رقبای داخلی، سود پایین‌تر وضعیت غیرتبانی را در پی خواهد داشت. اکنون می‌خواهیم با تعمیم این فضای استراتژی و با فرض اینکه استراتژی‌های بازیکنان درهم‌تنیده کوانتومی باشد، تعادل نش بازی را محاسبه کنیم.

همانند قبل، پیامدهای محتمل بازی از راهبردهای کلاسیکی تبانی (همکاری) و استقلال در فروش را به صورت بردارهای پایه $|D\rangle$ برای استراتژی «استقلال در فروش» و $|C\rangle$ برای استراتژی «تبانی» نشان داده و به شرح زیر مراحل کوانتومی کردن بازی را انجام می‌دهیم. در این مقاله به جای استفاده از تبدیل یکانی مورد استفاده در مقاله آیزرت و

دیگران (۱۹۹۹) از تبدیل معرفی شده در رابطه (۸)، یعنی $\hat{J} = \frac{1}{\sqrt{2}}(I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2})$ استفاده می‌کنیم که در آن I ماتریس واحد و معرف وضعیت موافقت و σ_x با تعاریف ارائه شده در معادله (۲) معرف وضعیت عدم موافقت با تبانی است.

۱- بازیکنان عبارتند از دو هلدینگ H1, H2

۲- فضای استراتژی برای هر هلدینگ به صورت $S_1 = S_2 = \{I, \sigma_x, \sigma_z\}$ تعریف می‌شود. این استراتژی‌ها شامل دو استراتژی کلاسیکی «تبانی» و «استقلال در فروش» (I, σ_x) و یک استراتژی کوانتومی σ_z است. استراتژی کوانتومی به این معنی است که دو بازیکن در همان حال که می‌توانند استراتژی تبانی را انتخاب کنند، بتوانند استراتژی استقلال در فروش را نیز انتخاب کنند. به عبارت دیگر، یک وضعیت برهم نهی از دو استراتژی تبانی و استقلال در فروش. ابتدا به نتیجه ممکن هر یک از استراتژی‌های کلاسیکی یک بردار پایه در فضای هیلبرت اختصاص می‌دهیم. وضعیت اولیه بازی با انتخاب بازیکنان و ترکیب آن‌ها تعیین می‌شود. وضعیت اولیه بازی با فرض انتخاب و ترکیب «همکاری و تبانی» از سوی هر دو بازیکن، یعنی $|CC\rangle$ با اعمال عملگر یکانی همانند معادله (۸) در فضای ۴ بعدی به صورت یک موقعیت درهم تنیده کوانتومی به صورت $\hat{J}|CC\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2})|CC\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|CC\rangle + i|DD\rangle)$ به دست می‌آید.

۳- پس از تعیین وضعیت اولیه بازی، بازیکنان حرکت‌ها یا انتخاب‌های خود از فضای استراتژی تعمیم یافته را انجام می‌دهند. به طور مثال، وضعیت بازی پس از انتخاب استراتژی‌های (σ_x, σ_z) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} (\sigma_x \otimes \sigma_z)\hat{J}|CC\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} (I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2})|CC\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ 0 \\ 0 \\ -i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -i\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|DC\rangle - i|CD\rangle) \end{aligned}$$

حاصل این مرحله در جدول (۱۱) آمده است.

۴- موقعیت نهایی بازی با اعمال عملگر یکانی $\hat{J}^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2}}(I^{\otimes 2} - i\sigma_x^{\otimes 2})$ در هر یک از درایه‌های جدول (۱۱) به دست می‌آید. نتیجه آن در جدول (۱۲) ارائه شده است.

جدول (۱۱): وضعیت بازی پس از انجام هر یک از انتخاب‌های بازیکنان

		بازیکن H2		
		I	σ_x	σ_z
بازیکن H1	I	$(I \otimes I)\hat{J} CC\rangle$	$(I \otimes \sigma_x)\hat{J} CC\rangle$	$(I \otimes \sigma_z)\hat{J} CC\rangle$
	σ_x	$(\sigma_x \otimes I)\hat{J} CC\rangle$	$(\sigma_x \otimes \sigma_x)\hat{J} CC\rangle$	$(\sigma_x \otimes \sigma_z)\hat{J} CC\rangle$
	σ_z	$(\sigma_z \otimes I)\hat{J} CC\rangle$	$(\sigma_z \otimes \sigma_x)\hat{J} CC\rangle$	$(\sigma_z \otimes \sigma_z)\hat{J} CC\rangle$

ماخذ: محاسبات محقق

جدول (۱۲): موقعیت نهایی بازی

		بازیکن H2		
		I	σ_x	σ_z
بازیکن H1	I	$ CC\rangle$	$ CD\rangle$	$-i DD\rangle$
	σ_x	$ DC\rangle$	$ DD\rangle$	$-i CD\rangle$
	σ_z	$-i DC\rangle$	$-i DC\rangle$	$ CC\rangle$

ماخذ: محاسبات محقق

۵- در مرحله پایانی باید برد انتظاری بازی را محاسبه کرد. به عنوان مثال، برد انتظاری

هلدینگ H1 برای هر یک از موقعیت‌های نهایی بازی از رابطه

$$\bar{\pi}_{H1} = 252|\langle\psi_f|CC\rangle|^2 + 290|\langle\psi_f|CD\rangle|^2 + 84|\langle\psi_f|DD\rangle|^2$$

با محاسبه برد انتظاری هر هلدینگ براساس این رابطه، جدول نهایی برد بازیکنان به

صورت جدول (۱۳) به دست می‌آید.

جدول (۱۳): سود سرانه تولید بازیکنان در هر یک از استراتژی‌های محتمل (دلار /تن)

		بازیکن H2		
		I	σ_x	σ_z
بازیکن H1	I	(۲۸۷ ، ۲۵۲)	(۰ ، ۲۹۰)	(۸۴ ، ۱۲۰)
	σ_x	(۲۸۷ ، ۰)	(۱۲۰ ، ۸۴)	(۰ ، ۲۹۰)
	σ_z	(۸۴ ، ۱۲۰)	(۲۸۷ ، ۰)	(۲۸۷ ، ۲۵۲)

ماخذ: محاسبات محقق

ارزیابی یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی کشور ... ۳۷

براساس جدول (۱۳)، در صورت اتخاذ استراتژی‌های کوانتومی از سوی دو بازیکن، بازی فروش محصولات پتروشیمی، دارای یک تعادل نش (σ_z, σ_z) خواهد بود که مشابه برد در وضعیت تبانی است و بهینه پارتو نیز هست.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ایران با حدود ۶۰ مجتمع و شرکت تولیدی پتروشیمی با توان اسمی تولید ۶۴/۱ میلیون تن در سال از نظر ظرفیت اسمی تولید محصولات پتروشیمی در رتبه ۴۴ جهان قرار دارد و براساس برنامه شرکت ملی صنایع پتروشیمی کشور، مقرر است تا سال ۲۰۲۵ با توان اسمی ۱۲۶ میلیون تن در سال، سهم کشور در تولید محصولات پتروشیمی جهان از حدود ۴ درصد کنونی به بالغ بر ۶/۳ درصد افزایش یابد. ساختار بازار صنعت پتروشیمی کشور براساس شاخص «نسبت تمرکز چهار بنگاه» در طبقه‌بندی بازار انحصار چندجانبه بسته قرار می‌گیرد.

به دنبال حرکت‌های جهانی در زمینه خصوصی‌سازی صنایع پتروشیمی در ایران نیز با هدف افزایش توان رقابت در بازارهای بین‌المللی، ایجاد فرصت‌های شغلی، رشد اقتصادی و همچنین جذب سرمایه‌گذاری خارجی و واگذاری شرکت‌های تولیدی پتروشیمی کشور به بخش خصوصی از سال ۱۳۸۶ و به تدریج تحت موضوع سیاست‌های اجرایی اصل ۴۴ قانون اساسی، آغاز شد و هم اکنون تقریباً تمام شرکت‌های تولیدی دارای سهامداران عمده یا خرد از بخش خصوصی هستند. به دنبال خصوصی‌سازی و استقلال عمل شرکت‌های پتروشیمی، موضوع یکپارچگی فروش محصولات صنعت پتروشیمی نیز که از سال ۱۳۶۹ و با تاسیس شرکت بازرگانی پتروشیمی که یک شرکت دولتی بود به تدریج از میان رفت و هر یک از مجتمع‌های تولیدی یا هلدینگ‌های آنها را سا اقدام به بازاریابی، قیمت‌گذاری و فروش محصولات در بازارهای خارجی کردند. این کار در کنار افزایش سرعت دستیابی به منابع فروش و استقلال شرکت‌های تولیدی در عمل مشکلاتی نیز به دنبال داشته است؛ از جمله: افزایش هزینه‌های عمومی مربوط به ایجاد واحدهای بازرگانی در شرکت‌ها، رقابت قیمتی مخرب با واحدهای تولیدی داخلی در بازارهای هدف و در نتیجه کاهش درآمدهای ارزی، اعمال تعرفه آنتی دامپینگ بر صادرات محصولات پتروشیمی ایران از سوی برخی

کشورهای واردکننده و کم شدن احتمال برندسازی و در نتیجه کاهش توان رقابتی در بازارهای جهانی.

به تازگی موضوع تجمیع و یکپارچه سازی فروش محصولات پتروشیمی کشور از سوی شرکت ملی صنایع پتروشیمی مطرح شده است. در این مقاله، ارزیابی بازگشت به حالت گذشته یا ادامه روند کنونی از طریق بررسی رفتار هلدینگ‌های پتروشیمی کشور در قالب یک بازی دو نفره انجام شده است. دو هلدینگ اصلی این صنعت، هلدینگ پتروشیمی خلیج فارس و هلدینگ سازمان تامین اجتماعی نیروهای مسلح که تقریباً ۵۰ درصد سهم صادراتی محصولات کشور را در اختیار دارند به عنوان دو بازیکن این بازی معرفی و پیامدهای حاصل از «انجام توافق و تبانی آن‌ها با یکدیگر» برای فروش یکپارچه محصولات یا «عدم توافق و ادامه روند کنونی» با استخراج میزان تولید بیشینه ساز سود آن‌ها در یک بازار انحصار چندجانبه بررسی شده است. مشاهده شده است سود سرانه هر تن تولید هلدینگ‌ها و نیز سود کل صنعت در حالت تبانی بیشتر است، اما عدم اطلاع از رفتار هلدینگ دیگر، وضعیتی ایجاد کرده که آن‌ها موضع استقلال در فروش را در پیش بگیرند که متضمن سود کمتری هم برای آن‌ها و هم برای کل صنعت است. در چارچوب نظریه بازی‌ها، این رفتارها یک بازی معمای زندانیان را شکل داده که تعادل نش آن در عدم همکاری و استقلال فروش هلدینگ‌ها است، اما بهینه پارتو جایی است که دو هلدینگ با یکدیگر تبانی کنند.

بازی مزبور را با تغییر فضای استراتژی‌ها و تعمیم آن به یک فضای هیلبرتی در قالب یک بازی کوانتومی، مجدد فرموله کرده و تعادل نش بازی را محاسبه کرده‌ایم. مشاهده شده است که با تعمیم فضای استراتژیک بازی، تعادل نش بازی به انتخاب استراتژی‌های کوانتومی از سوی دو بازیکن تغییر می‌کند به طوری که این تعادل هم منحصربه‌فرد و هم بهینه پارتو است. به عبارت دیگر، «تبانی» هلدینگ‌های پتروشیمی با یکدیگر و «اتخاذ یک رویه فروش یکپارچه در صدور محصولات پتروشیمی» هم متضمن سود بیشتر برای هر هلدینگ و هم تضمین‌کننده سود بیشتر برای کل صنعت و کشور است.

منابع

الف - فارسی

- «آشنایی با صنعت پتروشیمی» (۱۳۹۱)، دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.
- جعفرزاده، امیر و همکاران (۱۳۹۳)، «همکاری بین صادرکنندگان گاز منطقه خزر در صادرات گاز به اروپا با نگاه بر ملاحظات محیط زیستی در چارچوب نظریه بازی»، فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی، سال چهاردهم، شماره ۵۵، صص ۱-۴۰.
- زتیلی، نورالدین (۱۳۹۰)، مکانیک کوانتومی، اصول و کاربردها، ترجمه محمد صبائیان و لاله موسوی، جلد اول، تهران: نشر آوند اندیشه، ۴۴۸ صفحه.
- سوری، علی (۱۳۹۱)، نظریه بازی‌ها و کاربردهای اقتصادی، تهران: نشر دانشگاه علوم اقتصادی، ۳۷۴ صفحه.
- صمدی، عباس (۱۳۸۰)، «تاثیر مبانی فکری و فلسفی مکانیک کوانتوم بر تئوری‌های سازمان و مدیریت»، دانش مدیریت، شماره ۵۳، صص ۴۱-۵۶.
- صورت وضعیت پرتفوی ۱ ماهه صنایع پتروشیمی خلیج فارس منتهی به ۱۳۹۵/۰۴/۳۱، کدال، سامانه جامع اطلاع‌رسانی ناشران، سازمان بورس و اوراق بهادار، ww.Codal.ir
- صورت وضعیت پرتفوی ۱ ماهه گروه گسترش نفت و گاز پارسیان منتهی به ۱۳۹۵/۰۴/۳۱، کدال، سامانه جامع اطلاع‌رسانی ناشران، سازمان بورس و اوراق بهادار، ww.Codal.ir
- گزارش عملکرد سال ۱۳۹۴ صنعت پتروشیمی کشور، شرکت ملی صنایع پتروشیمی، مدیریت برنامه‌ریزی و توسعه، امور برنامه‌ریزی تلفیقی، ۱۳۹۴
- گودرزی، هادی و سمیرا بیرامی (۱۳۹۱) «بررسی تعادل نش با افزایش پارامترهای سیستم سه ذره‌ای در بازی کوانتومی»، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۲ شماره ۴.

ب - انگلیسی

- Carlos Pedro Gonçalves and Carlos Gonçalves (2007), "An Evolutionary Quantum Game Model of Financial Market Dynamics ;Theory and Evidence", at: <http://ssrn.com/abstract=982086>

- Chiarella and Szidarovszky,(2005), “Cournot Oligopolies With Product Differentiation Under Uncertainty”, *Computers and Mathematics with Applications*, No.50, pp. 413-424.
- Cleve, R., P. Høyer, B. Toner, and J. Watrous (2010), Consequences and limits of nonlocal strategies. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0404076>
- Coutinho, A.M.(2012), Quantum Game Theory: Within the Realm of Quantum Strategies, Mestrado Integrado em Engenharia Fisica Tecnologica, Instituto Superior Tecnico. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779579353391/quantum_game_theory.pdf
- Eisert,J. Martin Wilkens, and Maciej Lewenstein (1999), “Quantum Games and Quantum Strategies”, *Physical Review Letters*, Vol. 83, No. 15.
- Fuwa,M. et. al (2015), *Experimental Proof of Nonlocal Wavefunction Collapse for a Single Particle Using Homodyne Measurements*, Nature Communications, 6669.
- Grabbe Orlin (2005), “An Introduction to quantum Game Theory”, arXiv:quant-ph/0506219 v1.
- Henderson,J. and Richard Quandt (1980), *Microeconomic Theory, A Mathematical Approach*, 3rd ed. MacGraw Hill , 420 pages.
- Hui Li, Jiangfeng Du ,Serge Massar(2002), “Continuous-variable Quantum Games”, *Physics Letters A* ,No.306 pp. 73–78.
- Iqbal, A. ames M. Chappell and Derek Abbott (2016), “On the Equivalence between non-factorizable Mixed-strategy Classical Games and Quantum Games”, *Royal Society Open Science*3:150477.
- Iqbal, A. and H. Toor (2002a), “Quantum Cooperative Games”, *Physics Letters A*, 293 (2002) 103–108.
- Iqbal, A. and H. Toor (2002b), “Quantum Repeated Games”, *Physics Letters A*, 300 (2002) 541–546.
- Jiangfeng Du, Chenyong Ju and Hui Li (2005), “Quantum Entanglement Helps in Improving Economic Efficiency”, *Journal of Physic A: Mathematical and General*, No.38 pp.1559–1565.
- Kaye, P. R., R. Laflamme and M. Mosca (2007), *An Introduction to Quantum computing*, Oxford University Press, NewYork, 272 pages.
- Marinatto, L and Tullio Weber (2000), “A Quantum Approach to Static Games of Complete Information”, *Physics Letters A*, 272pp. 291–303.
- Meyer, D.A. (1999), “Quantum strategies”, *Physical Review Letters* 82 (5) 1052–1055.

- Namit Anand _ Colin Benjamin (2015), Do quantum strategies always win?, manuscript, <https://arxiv.org/pdf/1412.7399.pdf>
- Nielsen, M.A. and I.L.Chuang(2010), *Quantum computation and quantum Information*, Cambridge University press,676 pages
- Proceedings: 19th IEEE Annual Conference on Computational Complexity, , pp. 236–249.
- Ruiwu Yu and Renbin Xiao(2012), “Quantum Stackelberg Duopoly with Isoelastic Demand Function”, *Journal of Computational Information Systems* 8: 9pp.3643-3650
- Salman Khan_, M. Ramzan , M. K. Khan,(2018), Quantum Model of Bertrand Duopoly, <http://arxiv.org/abs/1001.2831v3>
- World Trade Organization, International Trade Statistics 2015, Special Fucus: World and The WTO: 1995-2014, www.wto.org/statistics.