فصلنامه پژوهشنامه اقتصادی
سال هجدهم، شماره ٦٩، تابستان ١٣٩٧، صفحات ٤١-١

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

اکبر احمدی*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱

چکیده

بازی‌های کوانتومی یکی از زمینه‌های تحقیقاتی به نسبت جدید در حوزه مطالعات بین رشته‌ای فیزیک نظری و نظریه بازی‌ها است که تلاش می کند با استفاده ازقوانین 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. دراین 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 می کنیم. 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.*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

---

* عضو هیات علمی پژوهشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، a.ahmadi@atu.ac.ir

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 راهنمایی های ارزنده آقایان دکتر «احمد مهدوی» دبیر محترم انجمن صنفی کارفرمایی 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 می نماید.

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 تشکیل‌دهنده عالم، توسط افرادی چون ماکس پلانک[1]، نیلز بور[2]، ورنر هایزنبرگ[3]، اروین شرودینگر[4]، لویی دوبروی[5] و پل دیراک[6] توسعه یافت. یکی از کشفیات مهم این رشته، دوگانگی «موج- ذره» پدیده‌های زیر اتمی[7] 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 زیراتمی 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 موجبیت در مکتب فکری کلاسیک؛، خردگرایی، منظم دیدن دنیا و سیستم‌های خطی نیز جای خود را به عدم قطعیت، طرد موجبیت، کل گرایی، آشوبی دیدن دنیا و سیستم‌های غیرخطی 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.

عکس‌العمل‌های افراد، گروه‌ها یا سیستم هایی 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»[1] توسط فون نیومن[2] و مورگنشترن[3] در سال ۱۹۴۴ برای حل مسائل اقتصادی برمی‌گردد و از این منظر، پیوندی محکم با مباحث اقتصادی دارد. اما سال‌ها بعد، تلاش‌های جان نش[4] از دانشگاه پرینستون و دستاوردهای چشمگیر وی در فرموله کردن یک ساختار ریاضی رسمی برای این نظریه در به جامعیت رسیدن آن کمک شایانی کرد (کوتینهو[5]، 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 به‌کارگرفته شده و زمینه‌های متنوعی نیز در این خصوص معرفی شده‌اند؛ نظیر بازی‌های با اطلاعات کامل یا اطلاعات ناقص، بازی‌ها بیزی، 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 به‌کار 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 اصولا آیا استفاده از قوانین و روابط فیزیکی در مسائل اقتصادی و اجتماعی قابل توجیه هستند؟

یافته‌های اخیر آزمایشگاهی در زمینه «درهم‌تنیدگی کوانتومی»[1] 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 مفاهمه جدیدی از پردازش اطلاعات، رمزنگاری و روش‌ها و تکنیک‌های ارتباطات منجر شده که جملگی برمبنای 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 وو یو و ژیائو[2]، 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[3]، 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، اندازه گیری ویژگی های یکی از ذرات، مستقیما و به صورت آنی بر روی ذره دیگر اثر خواهد گذاشت.

2- Ruiwu Yu and R.Xiao

3- Orlin Grabbe

استراتژی‌های جدیدی که در وضعیت «برهم نهی»[1] (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 «درهم‌تنیده» شوند؟ و پیامد کوانتیزه کردن استراتژی‌ها در یک بازی کلاسیکی مانند معمای زندانی‌ها چیست؟ در پاسخ به این سوال‌ها که سر منشا پیدایش نظریه بازی‌های کوانتومی هستند به طور خلاصه باید گفت براساس مطالعات انجام شده، انتخاب یک استراتژی کوانتومی توسط یک بازیکن، متناسب با درجه درهم‌تنیدگی 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 به‌خصوص کارهای مرتبط با مفاهیم اقتصادی، خواهیم داشت. از معدود 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» می پردازد. 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 می شود که دو موج با یکدیگر تداخل کرده و در نتیجه آن یا 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[1] (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[2] (۱۹۹۹) با کوانتومی کردن بازی معروف «معمای زندانی» نشان دادند مشکل معمای این بازی از بین می‌رود. ماریناتو و وبر[3] (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 به‌وجود می‌آید. پیوتروفسکی و اسلادکوفسکی[4] (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[5] (۲۰۰۲) با بررسی نقش «درهم‌تنیدگی»[6] 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[7] (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- Entangelement
7- Iqbal, A.H. Toor

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 دومرحله‌ای کلاسیک، بازیکنان تصمیم می‌گیرند که در مرحله اول با پلیس همکاری و در مرحله دوم موضوع را انکار کنند.

کلیو و دیگران[1] (۲۰۰۴) با بررسی پیامدها و محدودیت‌های استراتژی‌های غیرمحلی در چارچوب یک بازی همکارانه سه نفره، نشان دادند اعمال شرایط روی موقعیت‌های اولیه می‌تواند مانع از شکل‌گیری ائتلاف شود. کارلوس پدرو گونچالوز وکارلوس گونچالوز[2] (۲۰۰۷) با بررسی نوسانات و پویایی بازارهای مالی براساس یافته‌های اخیر در زمینه نظریه‌های «اقتصاد عصبی»[3] و «زیست‌شناسی عصبی»[4] 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[5] (۲۰۰۵) به بررسی بازارهای انحصار چندجانبه با محصولات متمایز و دانش غیردقیق از عملکرد قیمت‌ها به بررسی و تحلیل پایداری حدی در حالت خطی بودن بازار پرداختند. جیانگ فنگ دو و همکاران[6] (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 انحصارچندجانبه 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.

سلمان‌خان و دیگران[1] (۲۰۱۰) به ارائه الگوی کوانتومی انحصار دوجانبه برتراند و بررسی رفتار درهم‌تنیده بر سود بنگاه‌های تولیدی پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که با افزایش میزان درهم‌تنیدگی 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[2] (۲۰۱۵) با تعدیل جزیی 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 به‌دنبال 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 به‌دنبال 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

موقعیت‌هایی را که در آن قرار دارند یا در نتیجه انتخاب تمام بازیکنان در آن قرار خواهند گرفت، بیشینه 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» قراردارند نیز معرفی می‌شوند. به این ترتیب، امکان به‌دست 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 کدام‌یک از استراتژی‌های کلاسیکی خالص بازی شود، درنظر 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 حالته ثبت 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 معمولا به صورت $|۱\rangle$و $|۰\rangle$ 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. معمولا کیوبیت را به صورت $|۱\rangle = \begin{pmatrix} ۰ \\ ۱ \end{pmatrix}$ و $|۰\rangle = \begin{pmatrix} ۱ \\ ۰ \end{pmatrix}$نشان می‌دهند (تصویر (۱)).

علامت $|.\rangle$(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 بروضعیت های $|۱\rangle$و $|۰\rangle$ در همان حال در یک وضعیت برهم نهی از دو وضعیت اصلی مانند معادله (۱) نیز قرار بگیرند.

$$|\psi\rangle = \alpha|۰\rangle + \beta|۱\rangle \qquad (۱)$$

اعداد β و α 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 ازویژگی‌های اطلاعات کوانتومی این است که با فرض وجود یک کیوبیت، مشاهده‌گر نمی‌تواند وضعیت آن را به طور دقیق تعیین کند، بلکه می‌تواند با انجام عمل «اندازه‌گیری» اطلاعاتی در مورد آن به‌دست 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 $|۱\rangle$ یا $|۰\rangle$ تنزل می‌یابد و مشاهده‌گر می‌تواند تشخیص دهد که کدام‌یک از این دو حالت رخ داده است. براساس قوانین مکانیک کوانتوم، $|\alpha|^۲$ را احتمال فروپاشی معادله (۱) به وضعیت $|۰\rangle$ (یعنی احتمال پیدا کردن سیستم در وضعیت $|۰\rangle$) و $|\beta|^۲$ را احتمال فروپاشی به وضعیت $|۱\rangle$ 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 معمولا روی بردارهای واحد دو بعدی تعریف می‌شوند و می‌توانند به شکل ماتریس‌های ۲×۲ 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.

$$I=\sigma_۰=\begin{pmatrix}۱ & ۰\\ ۰ & ۱\end{pmatrix};\ \sigma_x=\begin{pmatrix}۰ & ۱\\ ۱ & ۰\end{pmatrix};\ \sigma_y=\begin{pmatrix}۰ & -i\\ i & ۰\end{pmatrix};\ \sigma_z=\begin{pmatrix}۱ & ۰\\ ۰ & -۱\end{pmatrix} \qquad (۲)$$

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.

$$\hat{J}(\theta,\varphi)=\begin{pmatrix}e^{i\varphi}\cos\theta/۲ & \sin\theta/۲\\ -\sin\theta/۲ & e^{-i\varphi}\cos\theta/۲\end{pmatrix};۰\le\theta\le\pi,۰\le\varphi\le\pi/۲ \qquad (۳)$$

1- Unitary Transformation
2- Unitary Operator
3- Pauli Matrices

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

$$\hat{J}^{\dagger}(\theta,\varphi)=\begin{pmatrix} e^{-i\varphi}\cos\theta/۲ & -\sin\theta/۲ \\ \sin\theta/۲ & e^{i\varphi}\cos\theta/۲ \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

می‌دانیم که حاصل‌ضرب 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، ۲^n وضعیت خالص برای آن‌ها قابل محاسبه است. به عنوان مثال، برای «دو کیوبیت»، چهار حالت محاسباتی پایه به شکل $|۱۱\rangle$، $|۱۰\rangle$، $|۰۱\rangle$ و $|۰۰\rangle$ خواهیم داشت که به صورت بردارهای چهاربعدی پایه $|۰۰\rangle=\begin{pmatrix}۱\\۰\\۰\\۰\end{pmatrix}$، $|۰۱\rangle=\begin{pmatrix}۰\\۱\\۰\\۰\end{pmatrix}$، $|۱۰\rangle=\begin{pmatrix}۰\\۰\\۱\\۰\end{pmatrix}$ و $|۱۱\rangle=\begin{pmatrix}۰\\۰\\۰\\۱\end{pmatrix}$ نمایش داده می‌شوند.

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 هستند. به عنوان مثال: $|۰۱\rangle=|۰\rangle\otimes|۱\rangle=\begin{pmatrix}۱\\۰\end{pmatrix}\otimes\begin{pmatrix}۰\\۱\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}۰\\۱\\۰\\۰\end{pmatrix}$ که در حالت کلی به صورت معادله (۵) می‌تواند بازنویسی شود.

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

$$|\psi_1\psi_2\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = \begin{pmatrix}\alpha\\ \beta\end{pmatrix}\otimes\begin{pmatrix}\gamma\\ \delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\alpha\gamma\\ \alpha\delta\\ \beta\gamma\\ \beta\delta\end{pmatrix} \qquad (۵)$$

در این صورت، وضعیت سیستم کوانتومی را می‌توان به صورت معادله (۶) نشان داد که در آن بردار $\begin{pmatrix}\alpha_{00}\\ \alpha_{01}\\ \alpha_{10}\\ \alpha_{11}\end{pmatrix}$ یک بردار واحد است؛ یعنی: $\sum_{i,j=0}^{1}|\alpha_{ij}|^2 = 1$.

$$|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle = \sum_{i,j=0}^{1}\alpha_{ij}|ij\rangle \qquad (۶)$$

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»[1] وضعیتی مانند $|0\rangle$ را به یک وضعیت «برهم نهی» با احتمالات برابر برای هر وضعیت می برد؛ یعنی (معادله (۷)):

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{bmatrix}\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ 1\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \qquad (۷)$$

در اینجا احتمال مشاهده هر یک از وضعیت‌های $|0\rangle$ و $|1\rangle$ برابر $\left(\left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right|^2 = \frac{1}{2}\right)$ 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: $H = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{bmatrix}$

$$\hat{J}=\frac{۱}{\sqrt{۲}}\left(I^{\otimes ۲}+i\sigma_x^{\otimes ۲}\right) \qquad (۸)$$

که در آن I یک ماتریس ۲×۲واحد و σ_x ماتریس پائولی در معادله (۲) است. علامت $\otimes$۲ به معنی حاصل‌ضرب تانسوری ماتریس در خودش است. واضح است که $\hat{J}\hat{J}^{\dagger}=I_{۴}$.

حاصل عملگر یکانی معادله (۸) در وضعیت $|۰۰\rangle$ یک وضعیت برهم‌نهی با احتمالات مساوی از سیستم دو کیوبیتی به‌دست خواهد داد (معادله (۹)).

$$\hat{J}|۰۰\rangle=\frac{۱}{\sqrt{۲}}\left(I^{\otimes ۲}+i\sigma_x^{\otimes ۲}\right)|۰۰\rangle=\frac{۱}{\sqrt{۲}}\left(|۰۰\rangle+i|۱۱\rangle\right) \qquad (۹)$$

معادله (۹) با مفهوم درهم‌تنیدگی کوانتومی که پیشتر معرفی شد، مرتبط است. وضعیت حاصل در این معادله را «وضعیت بل[۱]» 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 $|۰\rangle$ و $|۱\rangle$ 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، شدیدا همبسته کوانتومی و تفکیک‌ناپذیرند و نمی‌توانند به شکل حاصل‌ضرب تانسوری سیستم‌های جزئی نوشته شوند. به عنوان مثال، وضعیت $|\psi_۱\rangle=a|۰۰\rangle+b|۰۱\rangle$ را می‌توان به یک حاصل‌ضرب تانسوری از دو کیوبیت به شکل $|\psi_۱\rangle=a|۰۰\rangle+b|۰۱\rangle=|۰\rangle\otimes(a|۰\rangle+b|۱\rangle)$ تجزیه کرد؛ زیرا:

$$a|۰۰\rangle+b|۰۱\rangle=a\begin{pmatrix}۱\\۰\\۰\\۰\end{pmatrix}+b\begin{pmatrix}۰\\۱\\۰\\۰\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a\\b\\۰\\۰\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}۱\\۰\end{pmatrix}\otimes\left[\begin{pmatrix}a\\۰\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}۰\\b\end{pmatrix}\right]$$

بنابراین، وضعیت $|\psi_۱\rangle=a|۰۰\rangle+b|۰۱\rangle$ درهم‌تنیده نیست اما وضعیت $|\psi_۲\rangle=a|۰۰\rangle+b|۱۱\rangle$ را نمی‌توان به صورت حاصل‌ضرب تانسوری دو بردار تجزیه کرد. از این رو، این وضعیت را درهم‌تنیده می‌گویند.

۱- Bell State بر گرفته از نامساوی معروف بل، برای توصیف ساده ترین نمونه های در هم تنیدگی است .

2- Einstein, Podolsky and Rosen

اثرات درهم‌تنیدگی 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 درهم‌تنیدگی 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 درنظر 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 حاصل‌ضرب 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.

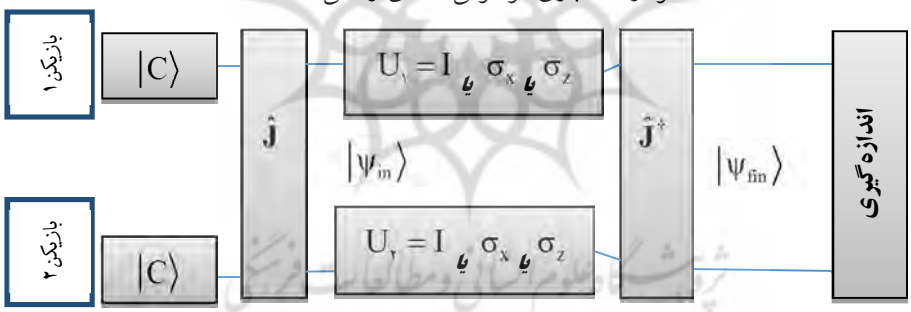
آیزرت و همکارانش از عملگر $\hat{J} = \exp\{i\gamma\hat{D}\otimes\hat{D}/۲\}$ استفاده کرده‌اند که در آن پارامتر $\gamma \in \left[۰, \frac{\pi}{۲}\right]$ به عنوان درجه درهم‌تنیدگی کوانتومی استفاده شده و میزان آن نتیجه بازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

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 ۲×۲ یکانی دو پارامتری به صورت $U(\theta,\varphi) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi}\cos\theta/۲ & \sin\theta/۲ \\ -\sin\theta/۲ & e^{-i\varphi}\cos\theta/۲ \end{pmatrix}; ۰ \le \theta \le \pi, ۰ \le \varphi \le \pi/۲$ درنظر گرفته می‌شود. بر این اساس، استراتژی همکاری به شکل $C = U(۰,۰) = \begin{pmatrix} ۱ & ۰ \\ ۰ & ۱ \end{pmatrix}$ 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[1] $[\hat{J}, \hat{D}\otimes\hat{D}] = \hat{J}(\hat{D}\otimes\hat{D}) - (\hat{D}\otimes\hat{D})\hat{J} = 0$، $[\hat{J}, \hat{D}\otimes\hat{C}] = 0$ 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

---

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

$\hat{J}^{\dagger} = \exp\left\{-i\gamma \hat{D} \otimes \hat{D} / ۲\right\}$ 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:

$$\left|\psi_f\right\rangle = \hat{J}^{\dagger}\left(U_A \otimes U_B\right)\hat{J}\left|CC\right\rangle \qquad (۱۰)$$

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 $\left|CC\right\rangle$، $\left|CD\right\rangle$، $\left|DC\right\rangle$ و $\left|DD\right\rangle$ با احتمالات متناظر هر یک از آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به ارقام جدول (۱) برد انتظاری بازیکنان به صورت معادله (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \$_A &= ۳\left|\left\langle CC\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۰\left|\left\langle CD\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۵\left|\left\langle DC\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۱\left|\left\langle DD\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} \\ \$_B &= ۳\left|\left\langle CC\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۵\left|\left\langle CD\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۰\left|\left\langle DC\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} + ۱\left|\left\langle DD\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲} \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

که در آن $\left|\left\langle CC\middle|\psi_f\right\rangle\right|^{۲}$ توان دوم قدر مطلق حاصل‌ضرب داخلی بردار وضعیت نهایی (به صورت مزدوج هرمیتی) در بردار پایه $\left|CC\right\rangle$ است که معادل احتمال اندازه‌گیری بازی در وضعیت CC است. برای حالتی که دو استراتژی معمولی باشند، مقدار $\gamma = ۰$ است و نتیجه بازی همان، حالت قبلی است؛ یعنی نقطه تعادل (D,D) است. برای حالتی که دو استراتژی کاملا درهم‌تنیده باشند، $\gamma = \pi / ۲$ خواهد بود و در نتیجه تعادل نش جدیدی به صورت (Q,Q) شکل می‌گیرد که برد هر یک از بازیکنان برابر $\$_A(Q,Q) = \$_B(Q,Q) = ۳$ به‌دست خواهد آمد. از آنجایی که

$$\$_A\left[U(\theta,\varphi),Q\right] = \cos^{۲}\left(\frac{\theta}{۲}\right)\left(۳\sin^{۲}\varphi + \cos^{۲}\varphi\right) \le ۳;\ \forall\theta \in [۰,\pi],\ \varphi \in \left[۰,\frac{\pi}{۲}\right]$$

و به همین ترتیب $\$_B\left[Q,U_B\right] \le \$_B\left[Q,Q\right]$، 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.

٤- 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 اولین‌بار در سال ۱۹۴۲ توسط عده‌ای از سازندگان مواد شیمیایی در تبلیغات محصولاتشان به‌کار 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 به‌کار می روند. 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 (منومر) تشکیل‌شده‌اند که با توجه به نوع و تعداد منومرها 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 C6H6 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 گلایکول، 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، به‌عنوان خوراک در صنایع پتروشیمی نیز مورداستفاده قرار می‌گیرند.
۵- کودها: شامل اوره، دی‌آمونیوم فسفات، نیترات 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 معمولا یک واحد اصلی در بالادست، ماده اولیه واحدهای دیگر را تولید می‌کند. به عنوان مثال، واحد «الفین»[1] 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» استحصالی 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 «دی کلرواتیلن» 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

1- Olefin

اقتصادی ازجمله 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.

٤-١- 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، امادستیابی به سهم ۳۴ درصدی از کل ارزش تولید محصول‌های پتروشیمی در خاورمیانه (ظرفیت تولیدی معادل۱۲۶میلیون 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 خلیج‌فارس»، «موقعیت جغرافیایی مناسب به لحاظ نزدیکی به بازارهای آسیا ازجمله چین و هند و همچنین اروپا»، «فراوانی جمعیت کشور به لحاظ ظرفیت‌های تقاضای داخل با توجه به سرانه اندک مصرف مواد پلیمری نسبت به استانداردهای بین‌المللی»، «برخورداری 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.

تقریبا 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 تجمیع و فروش محصولات پتروشیمی در داخل و خارج از کشور بود. بعد از انجام واگذاری‌ها به بخش خصوصی، هلدینگ‌های پتروشیمی به عنوان 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 تولید کنندگان داخلی و افزایش هزینه‌ها را دربر داشته است. ضمن اینکه فروش محصولات به صورت یکپارچه نیز به‌دلیل 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

کشورهای خارجی در قالب بیشترین ارزآوری و کسب درآمد ارزی برای شرکت‌های تولیدی و به‌تبع آن کشور دوچندان 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 به‌خوبی 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 ۱۳۹٤

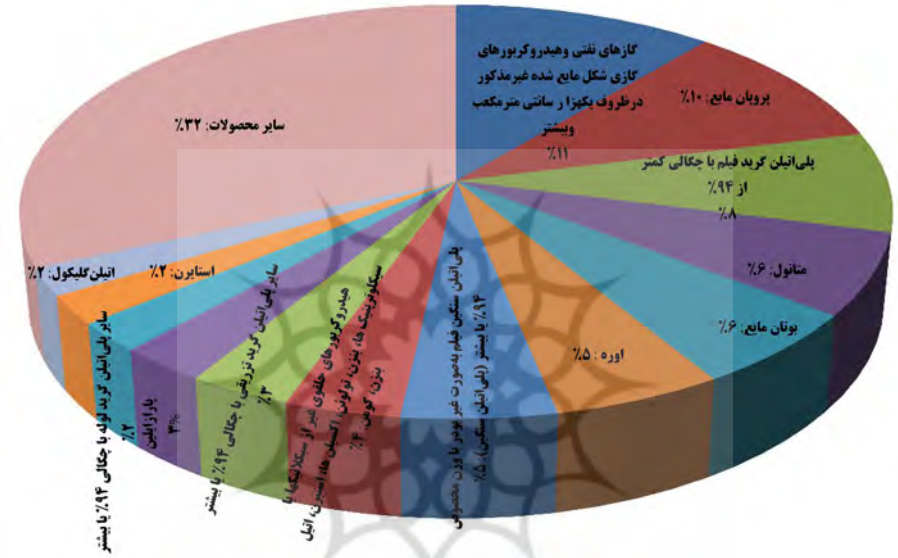
سال	صادرات پتروشیمی (هزار دلار)	میزان صادرات قطعی کالاهای غیرنفتی (بدون احتساب میعانات گازی) (هزار دلار)	درصد صادرات محصولات پتروشیمی از کل صادرات غیرنفتی
۱۳۸۷	۷،۸٤۳،٤۰۰	۱۸،۳۳۳،٥۷۷	٤۲/۸
۱۳۸۸	۹،۱۲٤،٦۰۰	۲۱،۸۹۱،٤٦۱	٤۱/۷
۱۳۸۹	۱۱،٥٥۹،۰۰۰	۲٦،٥٥۱،۸۳٤	٤۳/٥
۱۳۹۰	۱٤،٦٦۲،۰۰۰	۳۳،۸۱۸،٦٤۱	٤۳/٤
۱۳۹۱	۱۲،۰٦۱،۳٥۳	۳۲،٥٦۷،۲٤٤	۳۷
۱۳۹۲	۹،۸٦۹،۰۷٥	۳۱،٥٥۲،۳۹۹	۳۱/۳
۱۳۹۳	۱۰،۲۷۲،۹٦۰	۳٦،٥٥٥،۱۹۷	۲۸/۱
۱۳۹٤	۹،٥۸٦،۳٤۹	۳٥،۷٥۰،۰۰۲	۲٦/۸

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

مایع‌شده (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 پلی‌اتیلن 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 ۱۳۹٤



ماخذ: مستخرج از گزارش آمار صادرات سال ۱۳۹٤ 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.

جدول (٤): رتبه‌بندی شرکت‌های تولیدی براساس ارزش صادراتی آن‌ها در سال ۹٤

رتبه	شرکت	مقدار تولید (هزار تن)	مقدار صادراتی هزار تن	ارزش صادراتی هزار دلار
۱	شرکت پتروشیمی نوری (برزویه)	٤،۰۸۰	۲،۳٦۱	۱،۰٦۷،۸۰٥
۲	شرکت فراورش بندر امام	٥،۲۰۷	۱،۸۹٥	۸۱٦،۱۸۳
۳	شرکت پتروشیمی پارس	۳،۷۰٦	۱،٦۳۲	۷۷۷،٤۸۲
٤	شرکت پتروشیمی زاگرس	۲،۸۹۹	۲،۷٦۰	۷۱۸،۸۳٦
٥	شرکت پتروشیمی جم	۲،٦۱۳	٥۲۳	٥۸٥،۸۰۳
٦	شرکت پتروشیمی مارون	٤،۳۱۰	٦۷٥	٥٦٥،۱۳۱
۷	شرکت پلیمر آریا ساسول	۱،٦٦۳	٤۳٥	٥٥۰،۳۰۹
۸	تبریز	۷٤۰	۱٦۰	٤۹۷،۹۰۹
۹	شرکت پتروشیمی پردیس	۳،۲۸۱	۱،٦۹۲	٤٥۰،۰٤٤
۱۰	شرکت پتروشیمی شازند (اراک)	۱،٤٥۷	٥٥٦	۳٥۳،۰۳۳
۱۱	لاله	۳٥۰	۲۷٦	۳۳۷،٤۷۸
۱۲	مهر	۳۲۷	۲۸۲	۲۹٥،٦۳۷
۱۳	شرکت پتروشیمی خارک	۱،۰۹۹	۱،۰٥۸	۲۹٤،۰۰۰
۱٤	شرکت پتروشیمی رازی	۱،٦۰٤	۸٦۸	۲۸۰،۹۰۰
۱٥	شرکت پتروشیمی بوعلی سینا	۱،۳۳٦	٤٦٤	۲٤۹،۹۸۹
۱٦	پلیمر کرمانشاه	۳۰۳	۱۷٤	۲۳٥،۳۹۰
۱۷	شرکت پتروشیمی امیرکبیر	۱،۰۰٥	۱۸٦	۲۲٥،٦۸۲
۱۸	فرسا شیمی	۳۲۰	۳٥۹	۲۱۲،۱۲٤
۱۹	شرکت پتروشیمی اروند	۱،٥۱۰	۳۲۳	۱۷٥،٦۳۲
۲۰	خراسان	۸٥۰	۲۲۹	۱۲۸،۰٦۷
جمع		۳۸،٦٥۹	۱٦،۹۰۸	۸،۸۱۷،٤۳٤

ماخذ: مستخرج از گزارش عملکردسال ۱۳۹٤ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران

سهام مالکیت این ۲۰ شرکت به‌صورت عام در بازار بورس تهران عرضه‌شده و به‌صورت سهامی اداره می‌شوند. بخشی از سهامداران این شرکت‌ها از بین گروه‌ها و شرکت‌های سرمایه‌گذاری یا افراد حقیقی دارای خرده سهم و بخش قابل‌توجهی 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

که سهام آن‌ها در بین مردم توزیع‌شده 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 خلیج‌فارس 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 خلیج‌فارس را با H1 و هلدینگ ساتا را با H2 نشان می‌دهیم.

جدول (۵): سهم هلدینگ‌های اصلی پتروشیمی کشور از کل تولیدات پتروشیمی در سال ۱۳۹٤

هلدینگ	سهم هلدینگ از تولید سال ۱۳۹٤ (هزار تن)	نسبت سهم هلدینگ از تولید به کل تولید در سال ۱۳۹٤ (درصد)
H1	۱٤،۲۱۱	۳۰/٦
H2	۸،۹۵۹	۱۹/۵
جمع	۲۳،۱۷۰	۵۰/۱

ماخذ: محاسبات محقق براساس گزارش عملکردسال ۱۳۹٤ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران

هلدینگ خلیج‌فارس متشکل از سهام شرکت‌های صنایع پتروشیمی خلیج‌فارس، 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.

جدول (٦): درصد مالکیت و گروه‌های تشکیل‌دهنده هلدینگ خلیج‌فارس در سال ۱۳۹٤

گروه سرمایه‌گذاری	مجتمع تولیدی	میزان تولید ۱۳۹٤ (هزار تن)	میزان صادرات ۱۳۹٤ (هزار تن)	درصد مالکیت
شرکت صنایع پتروشیمی خلیج‌فارس	پتروشیمی بندر امام	٥،۲۰۷	۱،۸۹٥	٦۹/۲۷
	پتروشیمی برزویه	٤،۰۷۹	۲،۳٦۰	۷٦/٥٥
	پتروشیمی پارس	۳،۷۰٥	۱،٦۳۲	٦۰
	پتروشیمی اروند	۱،٥۱۰	۳۲۳	۷۹
	پتروشیمی بوعلی سینا	۱،۳۳٦	٤٦۳	۷۰
	شهید تندگویان	۸۳۳	۷۸	۷٥
	پتروشیمی مهر	۳۲٦	۲۸۲	٤۰
	پتروشیمی کاویان	٥٥۸	۰	۲۰
	پتروشیمی خوزستان	۲۱	۲	۷۰
	پتروشیمی مبین	۰	۰	۸۷/۱۱
	پتروشیمی فجر	۰	۰	٦۰/٥٦
پتروشیمی پارس	پلیمر آریاساسول	۱،٦٦۳	٤۳٥	٥۰
پتروشیمی بندر امام	پتروشیمی کارون	۱۱۷	٥	٤۰/۸
	پتروشیمی غدیر	۲۲٦	۲٦	۱۰
مدیریت توسعه صنایع پتروشیمی	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳	۳۷۳	۳/٥٥
پترول	پتروشیمی زاگرس	۲،۸۹۹	۲،۷٥۹	۳/۱۸
	پتروشیمی جم	۲،٦۱۳	٥۲۳	۱۲/۱۱
	پتروشیمی ارومیه	٤۹	۰	٥٥/٥
	پتروشیمی ایلام	۱٤۰	۰	٤۹
	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳	۳۷۳	۲۰/٦۷
بازرگانی مدیران اقتصاد	پتروشیمی شیراز	۱،۹٤۷	۳۷۰	۳۰/٤٦
	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳	۳۷٤	۱/۰۱

ماخذ: مستخرج از گزارش انجمن صنفی کارفرمایی صنعت پتروشیمی و گزارش عملکرد سال ۱۳۹٤ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران در پاییز سال ۱۳۹٥

جدول (۷): درصد مالکیت و گروه‌های تشکیل دهنده هلدینگ خلیج‌فارس در سال ۱۳۹٤

هلدینگ ساتا				
گروه سرمایه‌گذاری	مجتمع تولیدی	میزان تولید ۱۳۹٤ (هزار تن)	میزان صادرات ۱۳۹٤ (هزار تن)	درصد مالکیت
شرکت گروه گسترش نفت و گاز پارسیان	پتروشیمی شیراز	۱،۹٤۷,۲	۳۷۰,٤	٥۱/٦۷
	پتروشیمی پردیس	۳،۲۸۱,۱	۱،٦۹۱,۹	٦٦/۹۹
	صنایع پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,٥	۳۷۳,۷	٤۲/۲۲
	پتروشیمی زاگرس	۲،۸۹۹,۲	۲،۷٥۸,۹	۳٦/۱۳
	پتروشیمی خراسان	۸٥۰,٥	۲۲۸,۹	۱۸/۰۰
	پتروشیمی مارون	٤،۳۱۰,۱	٦۷٤,٥	٦/٦۸
	پتروشیمی پارس	۳،۷۰٥,۷	۱،٦۳۲,۰	۱۹/۷۸
	پتروشیمی اروند	۱،٥۰۹,٥	۳۲۲,۷	۱
	پتروشیمی ایلام	۱۳۹,۹	۰	۲
	پتروشیمی مروارید	۳۳٤,۱	۰	۱
سرمایه گذاری هامون سپاهان	پتروشیمی فن‌آوران	۱،۲۱۷,۱	۷۸۳,۰	۱/۰۷
	پتروشیمی پردیس	۳،۲۸۱,۱	۱،٦۹۱,۹	۲/٥۱
	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,٥	۳۷۳,۷	۲/٦۸
شرکت گسترش تجارت هامون	شرکت کربن ایران	۲۸,۱	٤,۳	۱/۷
پارس تامین مجد	پلیمر آریاساسول	۱،٦٦۳,۳	٤۳٤,۸	٥۰
خدمات مدیریت هامون سپاهان	پتروشیمی کرمانشاه	۹۸۳,٥	۳۷۳,۷	۰/٥
شرکت سرمایه‌گذاری غدیر	پتروشیمی پارس	۳،۷۰٥,۷	۱،٦۳۲,۰	۱۹/۷۸
ساتا	پتروشیمی مارون	٤،۳۱۰,۱	٦۷٤,٥	۲۳/٥۳
	پتروشیمی تبریز	۷۳۹,۸	۱٥۹,٦	٤
پالایش نفت تبریز	پتروشیمی تبریز	۷۳۹,۸	۱٥۹,٦	٤۸/٥۸٦

ماخذ: مستخرج از گزارش انجمن صنفی کارفرمایی صنعت پتروشیمی و گزارش عملکرد سال ۱۳۹٤ شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران در پاییز سال ۱۳۹٥

۵- چارچوب مدل بازی

براساس شاخص تمرکز n بنگاه که معمولا برای۲، ۴ و یا ۸ بنگاه به صورت $C_n = \sum_{i=1}^{n} s_i$ تعریف می شود (دراین رابطهs_iسهم بازاری بنگاه iام و C_n نسبت تمرکز بنگاه‌ها یعنی سهم n بنگاه از بازار است که به‌صورت درصد بیان می‌شود) 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 می‌دهد ایران در اثرگذاری روی قیمت محصولات در این صنعت قدرت چندانی ندارد.

چنانچه اتحادیه اروپا را به‌عنوان یک نظام واحد تولید و عرضه در نظر بگیریم براساس شاخص تمرکز ۴ بنگاه می‌توان گفت که بازار جهانی صنعت پتروشیمی به‌صورت انحصار چندجانبه بسته است: C_4=۷۷/۷

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 شبه‌رقابتی 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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
ایالات‌متحده	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
هنگ‌کنگ	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

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 q_i مقدار صادرات شرکتهای تولیدی و p قیمت واحد هر تن از محصول بر حسب هزار دلار است.

$$p = F(q_1 + q_2) = \alpha - \beta \sum_i^2 q_i \qquad (11)$$

$$\hat{p} = F\left(\sum_i q_i\right) = ۶۶۱.۵ - ۰.۱۵۷\left(\sum_i q_i\right) + \{AR(۳),\ MA(۳)\} \qquad (12)$$

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

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

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 گرفته‌شده است. (نرخ تسعیر ارز برای هر دلار معادل ۲۸,۵۰۰ ریال لحاظ شده است.)

تابع هزینه هلدینگ ۱: $C_1 = ۱۵۶/۴q_1 + ۰/۰۷۸۷q_1^2$

تابع هزینه هلدینگ۲: $C_2 = ۸۸q_2 + ۰/۱۱۸q_2^2$

با توجه به کوچک بودن سهم ایران در بازار جهانی، هلدینگ‌های ایرانی نمی‌توانند تعیین کننده قیمت باشند اما همانند یک بازار شبه رقابتی و در قالب پذیرنده قیمت ، هر یک خود می توانند 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 هلدینگ ها طبق معادله (۱۴) به‌دست می آید.(جدول ۸)

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \beta + ۲\gamma_1 & \beta \\ \beta & \beta + ۲\gamma_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \alpha - \theta_1 \\ \alpha - \theta_2 \end{pmatrix} \qquad (14)$$

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

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 به‌صورت 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،۱۱٦	۲۱٤،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 می یابد. با فرض اینکه بنگاه‌های تولیدی مفاد موردتوافق (سهمیه تولید و مقدار فروش) را به‌صورت 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.

$$\pi = \sum_i q_i \left(\alpha - \beta \sum_i q_i \right) - \sum_i \theta_i q_i - \sum_i \gamma_i q_i^2 \qquad (۱۵)$$

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

$$\begin{pmatrix} q_1^* \\ q_2^* \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2\beta + 2\gamma_1 & 2\beta \\ 2\beta & 2\beta + 2\gamma_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \alpha - \theta_1 \\ \alpha - \theta_2 \end{pmatrix} \qquad (۱۶)$$

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

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 ٤٥٦ دلار برای هر تن)

نام بنگاه	مقدار بهینه فروش (هزار تن)	سود (هزار دلار)	سود سرانه به ازای هر تن تولید (دلار)
هلدینگ H1	٦٠٦	١٥٢،٨٤١	٢٥٢
هلدینگ H2	٦٩٤	١٩٩،٠٠١	٢٨٧
جمع کل	١٣٠٠	٣٥١،٨٤٣	٢٧١

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 به‌دست 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 به‌دست 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)

		بازیکن B	
		C	D
بازیکن A	C	(۲۵۲،۲۸۷)	(۲۹۰،۰)
	D	(۰،۲۸۷)	(۸٤،۱۲۰)

ماخذ: محاسبات محقق

براساس 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 به‌دلیل 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 $\hat{J} = \frac{۱}{\sqrt{۲}}\left(I^{\otimes ۲} + i\sigma_x^{\otimes ۲}\right)$ 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 می دهیم. 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 درهم‌تنیده کوانتومی به صورت $\hat{J}|CC\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(I^{\otimes 2} + i\sigma_x^{\otimes 2}\right)|CC\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|CC\rangle + i|DD\rangle)$ به‌دست 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) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

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

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -1\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}i\\ 0\\ 0\\ -i\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\\ -i\frac{1}{\sqrt{2}}\\ 0\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|DC\rangle - i|CD\rangle)$$

حاصل این مرحله در جدول (۱۱) آمده است.

۴- موقعیت نهایی بازی با اعمال عملگر یکانی $\hat{J}^{\dagger} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(I^{\otimes 2} - i\sigma_x^{\otimes 2}\right)$ در هر یک از درایه‌های جدول (۱۱) به‌دست 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 $\bar{\pi}_{H1} = 252|\langle\psi_f|CC\rangle|^2 + 290|\langle\psi_f|CD\rangle|^2 + 84|\langle\psi_f|DD\rangle|^2$ به‌دست می آید.

با محاسبه برد انتظاری هر هلدینگ براساس این رابطه، جدول نهایی برد بازیکنان به صورت جدول (۱۳) به‌دست 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)	(۸٤ ، ۱۲۰)
	σ_x	(۲۸۷ ، ۰)	(۱۲۰ ، ۸٤)	(۰ ، ۲۹۰)
	σ_z	(۸٤ ، ۱۲۰)	(۲۸۷ ، ۰)	(۲۸۷ ، ۲۵۲)

ماخذ: محاسبات محقق

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.

٦- 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.

به‌دنبال 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 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 تقریبا 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 به‌تدریج از میان رفت و هر یک از مجتمع‌های تولیدی یا هلدینگ‌های آن‌ها راسا 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 خلیج‌فارس و هلدینگ سازمان تامین اجتماعی نیروهای مسلح که تقریبا 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 به‌طوری‌که 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: نشردانشگاه 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 خلیج‌فارس منتهی به ۱۳۹۵/۰۴/۳۱، کدال، سامانه جامع اطلاع‌رسانی ناشران، سازمان بورس و اوراق بهادار، ww.Codal.ir

صورت‌وضعیت 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 Gamesm", *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 Science3*: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", Jounal 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی