

## تحلیل ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی: کاربرد نظریه شبکه پیچیده

علی حسین صمدی

دانشیار اقتصاد، دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)

asamadi@rose.shirazu.ac.ir

ستاره زاهدی

کارشناس ارشد اقتصاد، دانشگاه شیراز

szahedi89@gmail.com

در این مطالعه با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌های توپولوژی و ثبات تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) در مقابل اختلال تجاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه تجاری گاز طبیعی به ساختار شبکه‌های مقیاس آزاد با ویژگی ناهمگنی نزدیک‌تر است. نتایج انعطاف‌پذیری بیشتر کشورها در برقراری ارتباط و تجارت با یکدیگر در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله را تأیید می‌کنند. امنیت عرضه و ثبات کشورهای واردکننده گاز طبیعی در برابر اختلال تجاری، نه تنها بستگی به متنوع‌سازی جغرافیایی منابع وارداتی دارد، بلکه بستگی به ایجاد رابطه تجاری با کشورهای صادرکننده دارای شرایط باثبات سیاسی نیز دارد. به علاوه، شبکه تجاری گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) در برابر اختلال تجاری تصادفی مقاوم، اما در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر است. آسیب‌پذیری شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله در برابر اختلال تجاری در شبکه بیشتر است.

**واژگان کلیدی:** الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی، ثبات تجاری، شبکه پیچیده، اختلال تجاری تصادفی، حمله هدف

## ۱. مقدمه

شبکه‌های تجاری با دو رویکرد متفاوت بررسی شده‌اند: الگوی جاذبه و الگوهای شبکه پیچیده. در مطالعات با چارچوب الگوی جاذبه (مانند گرینی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵؛ دواناس و فاگیولو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱؛ لی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲؛ و اسگریگنولی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) عوامل مؤثر بر جریان‌های تجاری در شبکه‌های تجاری بررسی شده است. در این مطالعات اثرات شبکه برافزایش تجارت، ویژگی‌های توپولوژی و آماری شبکه وزنی تجارت جهانی، ارتباط بین مهاجرت جهانی و شبکه‌های تجاری و همچنین همسایه‌های کشورهای با بیشترین شدت روابط در شبکه تجاری و به‌علاوه فرایند جهانی شدن و همگرایی اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعات بررسی ساختار تجارت جهانی با استفاده از شبکه‌های وزن‌دار بوده است.

مطالعات با چارچوب الگوهای شبکه پیچیده را می‌توان به مطالعات مربوط به شبکه تجارت کالاها و خدمات و شبکه تجارت انرژی (نفط و گاز) تقسیم کرد. در مطالعات مربوط به شبکه تجارت کالاها و خدمات (از جمله مطالعات اسمیت و وایت<sup>۵</sup>، ۱۹۹۲؛ سرانو و بگونا<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳؛ لی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛

گارلاسچلی و لفسردو<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵؛ کالی و ریز<sup>۹</sup>، ۲۰۰۶؛ فورو ساوا و کنیشی<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۷؛ باتاچاریا<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ فاگیولو<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ باسکران<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛

- 
1. Greaney
  2. Duenas and Fagiolo
  3. Lee
  4. Sgrignoli
  5. Smith and White
  6. Serrano and Boguna
  7. Li
  8. Garlaschelli and Loffredo
  9. Kali and Reyes
  10. Furusawa and Konishi
  11. Bhattacharya
  12. Fagiolo

ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ فن<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ و شیرازی و همکاران، ۱۳۹۴)، به تحلیل ساختار شبکه تجارت جهانی و روابط مبادله‌ای بین کشورها پرداخته شده است. نتایج این پژوهش‌ها حکایت از آن دارد که شبکه تجارت جهانی کالاها و خدمات ویژگی شبکه‌های مقیاس آزاد را دارد و بیشتر رئوس در آن دارای ضریب خوشه بالا هستند که بیان‌گر شدت روابط تجاری بالا است. همچنین ویژگی‌های توپولوژی شبکه تجارت جهانی به تولید ناخالص داخلی کشورهای جهان مرتبط است. این ویژگی می‌تواند از طریق فرایند توزیع ثروت بین کشورها با استفاده از جریان تجارت، مورد بررسی قرار گیرد.

مطالعات انجام‌شده در زمینه شبکه‌های تجارت نفت (مانند آن<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ جی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژنگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژونگ<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ دو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ دو و همکاران، ۲۰۱۷؛ سان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۷) و گاز (مانند شافر<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۲؛ گنگ<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ و ناگایاما و هوریتا<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۴) بر تجزیه و تحلیل ویژگی‌های این شبکه‌ها متمرکز شده است. در این پژوهش‌ها، عوامل مؤثر بر ثبات عرضه انرژی (نفت و گاز) شناسایی و این نتیجه حاصل شده است که اختلال تجاری بر ثبات شبکه تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه نتایج بیان‌گر این مطلب است که کشورها در شبکه مبتنی بر واردات نسبت به شبکه مبتنی بر صادرات، باثبات‌تر هستند. همچنین کشورهای اصلی واردکننده نقش مؤثرتری در شبکه تجاری ایفا می‌کنند.

1. Baskaran
2. Zhang
3. Fan
4. An
5. Ji
6. Zhang
7. Zhong
8. Due
9. Sun
10. Shaffer
11. Geng
12. Nagayama and Horita

پژوهش حاضر با توجه به مقاله جی و همکاران (۲۰۱۴) که در رابطه با شناسایی الگوی تجارت جهانی نفت و بررسی ثبات شبکه تجارت نفت است، به تجزیه و تحلیل و مقایسه ساختار شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی می‌پردازد. همچنین از برخی شاخص‌های اندازه‌گیری مربوط به شبکه تجاری با توجه به مقاله گنگ و همکاران (۲۰۱۴) که در رابطه با بررسی ساختار و ادغام بازارهای شبکه تجارت جهانی گاز است، استفاده شده است. دستاورد مقاله حاضر آن است که با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، موقعیت و ثبات کشورها و ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) را در مواجهه با اختلال عرضه در کشورهای مهم صادرکننده گاز طبیعی بررسی کرده است.

مقاله حاضر در چهار قسمت تنظیم شده است. در بخش دوم روش‌شناسی تحقیق ارائه شده است. در بخش سوم، نتایج تجربی این پژوهش ارائه شده است. مهم‌ترین بخش ساختار کلی شبکه با توجه به ویژگی توزیع‌های به دست آمده و اتصالات شبکه بررسی شده و با ساختار کلی شبکه‌های تصادفی و مقیاس آزاد مقایسه شده است. همچنین با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌های تکاملی الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده)، از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ تحلیل و مقایسه شده است. همچنین موقعیت و اهمیت کشورهای تجاری در شبکه و ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی (به هر دو شیوه انتقال) در مقابل حمله هدف و حمله تصادفی مورد بحث قرار گرفته است. در آخر به منظور تجسم بهتر شبکه، شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ ترسیم و دو شبکه مذکور، مورد بررسی قرار گرفته است. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

## ۲. روش شناسی

در حوزه گاز طبیعی، بخش عمده‌ای از مطالعات انجام شده به دنبال ارائه و تحلیل الگوی جامع و کلی برای بازارهای منطقه‌ای گاز طبیعی بوده‌اند. الگوی تجارت جهانی گاز ریس<sup>۱</sup>، الگوی سرمایه‌گذاری در تجهیزات انتقال گاز طبیعی به بازارهای هدف<sup>۲</sup> و الگوی جهانی گاز<sup>۳</sup> برخی از مهم‌ترین الگوهای بازار گاز طبیعی به شمار می‌روند. در این قسمت به طور خلاصه به ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی اشاره شده و برخی از شاخص‌های اندازه‌گیری ثبات تجاری مربوط به شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی ارائه می‌شود.<sup>۴</sup>

### ۲-۱. ویژگی‌های توپولوژی شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی

شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی، جریان تجاری میان کشورهای دارنده منابع گازی است. براساس نظریه شبکه پیچیده، شبکه تجارت جهانی گاز را می‌توان با مجموعه  $G = (V, E)$  نشان داد. در این مجموعه، کشورهای تجاری  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  به‌عنوان رئوس شبکه و جریان تجاری  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$  به‌عنوان اتصالات شبکه در نظر گرفته می‌شوند. ماتریس مجاورت  $A(G)$  برای گراف  $G$  یک ماتریس  $v \times v$  است و  $a_{ij}$  درایه موردنظر در این ماتریس است. زمانی که جریان تجاری از  $i$  به  $j$  وجود داشته باشد  $a_{ij}=1$  است و در غیر این صورت  $a_{ij}=0$  است؛ بنابراین درجه، تعداد اتصالاتی است که هر رأس در شبکه دارد و برای رأس  $i$  با  $k_i$  نشان داده می‌شود. در شبکه‌های جهت‌دار، دو سنججه درجه وجود دارد: درجه ورودی (تعداد اتصالاتی که از رئوس دیگر به یک رأس اشاره دارند) و درجه خروجی (تعداد اتصالاتی که از یک رأس

1. The Rice World Gas Trade Model (RWGTM)
2. Investments into Transmission Facilities of Natural Gas on the Market Outcome (InTraGas)
3. World Gas Model (WGM)
۴. برای مطالعه بیشتر جزئیات فرمول‌ها به جی و همکاران (۲۰۱۴) و گنگ و همکاران (۲۰۱۴) مراجعه کنید.

منشأ می‌گیرند و به رئوس دیگر اشاره دارند). نحوه محاسبه این درجه‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

در شبکه اصلی تجارت گاز درجه رئوس تجاری، با تعداد شرکای تجاری با روابط مهم تجاری، اندازه‌گیری می‌شود. به علاوه، در شبکه‌ها تفاوت در حجم تجارت منجر به این می‌شود که هر اتصال تأثیر متناقص بر شبکه تجارت بگذارد. در اینجا حجم تجارت از رأس  $i$  به رأس  $j$  به‌عنوان وزن اتصالات در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. شاخص‌های مربوط به درجه شبکه

$K_i^{out} = \sum_{j=1}^{V_N} a_{ij}$	$i = v_1, v_2, \dots, v_N$	درجه خروجی کشورها ( $K_i^{out}$ )
$K_j^{in} = \sum_{i=1}^{V_N} a_{ji}$	$j = v_1, v_2, \dots, v_N$	درجه ورودی کشورها ( $K_j^{in}$ )

مأخذ: نتایج تحقیق

در یک شبکه با  $n$  رأس، توزیع درجه شبکه یعنی  $p(k)$  (احتمال این که یک رأس در شبکه دارای درجه  $k$  باشد)، ویژگی‌های توزیعی تعداد اتصالات رأس و همچنین ناهمگنی رأس را توصیف کرده و به صورت  $P(k) = \frac{n_k}{n}$  تعریف می‌شود؛ که در آن  $n_k$  تعداد رئوس با درجه  $k$  و  $n$  تعداد کل رئوس در شبکه است. اگر توزیع درجه از توزیع پواسن پیروی کند، نشان‌دهنده آن است که رئوس در شبکه دارای درجه یکسان و در نتیجه ویژگی‌های همگن هستند و به شبکه‌های تصادفی<sup>۱</sup> تعلق دارند. اما اگر توزیع درجه شبکه متناسب با توزیع قانون توان به صورت  $k^{-\gamma} \sim p(k)$  باشد ( $\gamma$  شاخص قانون توان و  $k$  درجه رأس متناظر)، به شبکه‌های ناهمگن تعلق دارند که

۱. بیشترین نمونه‌های بررسی شده این شبکه‌های نمایی، الگوی شبکه تصادفی اردوس-رینی و الگوی جهان-کوچک واتز و استروگاتز است و هر دو الگو شبکه‌های نسبتاً همگنی را به دست می‌دهند (آلبرت و همکاران، ۲۰۰۰: ۳۷۹).

شبکه‌های مقیاس آزاد<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. بدین صورت که تعدادی از رئوس مرکزی<sup>۲</sup>، درجه بالایی دارند اما بسیاری از رئوس شبکه درجه پایینی دارند.

## ۲-۲. شاخص‌های مربوط به الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی

در این قسمت برخی از شاخص‌های مربوط به شبکه معرفی می‌شوند. شاخص چگالی، متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر، ضریب خوشه و مرکزیت از آن جمله است.<sup>۳</sup>

شاخص چگالی ارتباط تنگاتنگ تجاری<sup>۴</sup> میان کشورهای صادر کننده و وارد کننده در شبکه تجارت گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه قدر این شاخص بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که ارتباط کشورها در کل تجارت بیشتر است. شاخص متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر بیانگر متوسط نزدیک‌ترین مسیری است که هر دو رأس در شبکه می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند. شاخص ضریب خوشه به منظور بررسی ارتباط تنگاتنگ تجاری بین همسایگان رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی مورداستفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بیان‌کننده تراکم یک شبکه است. مقادیر بزرگ‌تر این شاخص نشان‌دهنده این است که همسایه‌های رأس با یکدیگر ارتباط تنگاتنگ تجاری دارند.

شاخص مرکزیت درجه‌ای به بررسی این مطلب می‌پردازد که آیا شبکه محوری آشکار دارد یا خیر؟ و اینکه آیا چند کشور دارای توانایی کنترل در شبکه وجود دارد یا خیر؟

۱. در این شبکه‌ها، توزیع احتمال درجه‌ای  $p(k)$  از توزیع قانون توان پیروی می‌کند. شبکه‌های جهت‌دار را می‌توان توسط دو توزیع درجه‌ای توصیف کرد:  $p_{out}(k)$ ، توزیع درجه خروجی است که احتمال این است که یک رأس دارای درجه خروجی  $k$  باشد و  $p_{in}(k)$ ، توزیع درجه ورودی است که احتمال این است که یک رأس دارای درجه ورودی  $k$  باشد (آلبرت و باراباسی، ۲۰۰۲: ۵۰).

2. Hub Nodes

۳. این شاخص‌ها در جی و همکاران (۲۰۱۴) و گنگ و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است.

4. Trade Tightness

به دلیل جهت‌دار بودن شبکه تجاری گاز طبیعی، از مرکزیت درجه‌ای برای تجزیه و تحلیل درجه انحصاری در شبکه صادرات و درجه رقابتی در شبکه واردات گاز طبیعی استفاده می‌شود. این شاخص اهمیت و موقعیت کشورها در شبکه را نشان می‌دهد. این شاخص هر چقدر بزرگ‌تر باشد نشان می‌دهد که توانایی کنترل به‌طور فزاینده‌ای تنها در چند کشور متمرکز شده است. این امر دلالت بر ویژگی ناهمگن بودن کشورها در شبکه تجاری دارد.

## ۲-۳. ثبات تجاری

بررسی ثبات شبکه تجاری گاز باهدف قضاوت درباره کارایی نظام تجاری گاز طبیعی فعلی صورت می‌گیرد. عملکرد مطلوب یک شبکه به عکس‌العمل آن در برابر اختلال‌های داخلی و خارجی بستگی دارد. این اختلالات می‌تواند شامل خطاها، اختلال‌های تصادفی و حمله‌های هدف باشد که به دلیل معیارها و حمله‌های بدخواهانه و پایدار منجر به حذف رئوس می‌شوند. توانایی مقاومت یک شبکه در برابر این اختلالات یا به‌عبارت‌دیگر تحمل در برابر حمله‌ها، ثبات یا استحکام شبکه خوانده می‌شود (پیرونان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۸). هر چه ثبات رئوس بیشتر باشد، ثبات تجاری کشور وارد کننده گاز بیشتر خواهد شد. بنابراین بررسی ثبات تجاری در سطوح مختلف، یک رهنمود مهم برای تجزیه و تحلیل جامع از وضعیت الگوی تجارت گاز طبیعی است. در این پژوهش، دو شاخص ثبات رئوس و ثبات شبکه<sup>۲</sup> در مقابل حمله‌های تصادفی و هدف<sup>۳</sup> بررسی شده است.

### 1. Piraveenan

۲. این شاخص‌ها در جی و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است.

۳. در حمله تصادفی، رئوسی که به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، حذف می‌شوند. حذف تصادفی رئوس می‌تواند باعث اختلال اتصالات مربوط به برخی رئوس و بنابراین اختلال در شبکه شود. در حمله هدف، رئوسی که بیشترین اتصال را دارند، انتخاب می‌شوند. زیرا رئوس با تعداد اتصالات بالا، بیشترین آسیب را به یکپارچگی شبکه وارد می‌کنند. سپس در هر مرحله، رئوس انتخابی حذف می‌شوند. بنابراین انتظار این است که با افزایش



### ۳. نتایج تجربی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار نودایکس‌ال<sup>۱</sup> و متلب<sup>۲</sup> و با بهره‌گیری از داده‌های جدول جریان تجاری<sup>۳</sup>، ویژگی‌های تکاملی الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی (با خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ تجزیه و تحلیل و مقایسه می‌شود. همچنین با توجه به ویژگی توزیع‌های به‌دست آمده و اتصالات شبکه، ساختار کلی شبکه، موقعیت و اهمیت کشورهای تجاری و ثبات شبکه (از طریق دو شیوه انتقال) در مقابل اختلال تجاری مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

#### ۳-۱. روند حجم تجارت جهانی گاز طبیعی

بررسی روند حجم تجارت جهانی گاز طبیعی (شکل ۱) نشان می‌دهد که این حجم (به هر دو شیوه انتقال) یک روند صعودی دارند. همچنین میزان تجارت با خط لوله بسیار بیشتر از مایع شده است. بنابراین تجارت گاز طبیعی با خط لوله طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱، یک تجارت غالب بوده است. به بیان دیگر عمده تجارت جهانی گاز طبیعی، از طریق خط لوله انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۴، سهم تجارت گاز طبیعی با خط لوله به ۶۶٪ رسیده است.

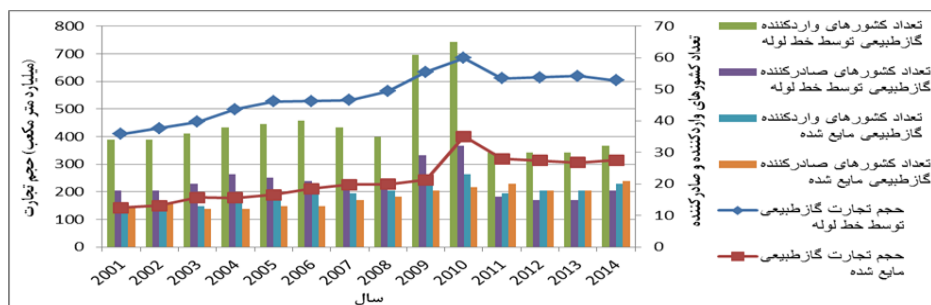
همچنین تعداد کشورهای واردکننده گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. علت این امر این است که قیمت‌های بالای جهانی نفت خام در سال ۲۰۰۸ باعث شده است تا بسیاری از کشورها به منظور جایگزینی مصرف نفت و اطمینان از امنیت عرضه انرژی، مصرف گاز طبیعی خود را افزایش دهند.

---

تعداد رؤس حذف شده از شبکه، اندازه بزرگ‌ترین خوشه کاهش و متوسط طول مسیر افزایش یابد (آلبرت و باراباسی، ۲۰۰۲: ۸۶-۸۷).

1. NodeXL
2. Matlab

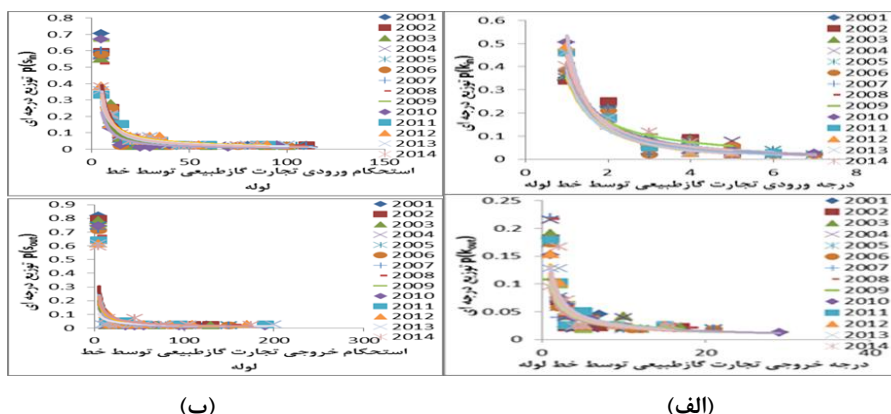
۳. جدول جریان تجارت جهانی گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱، در پایگاه داده World BP Statistical Review of Energy موجود است.



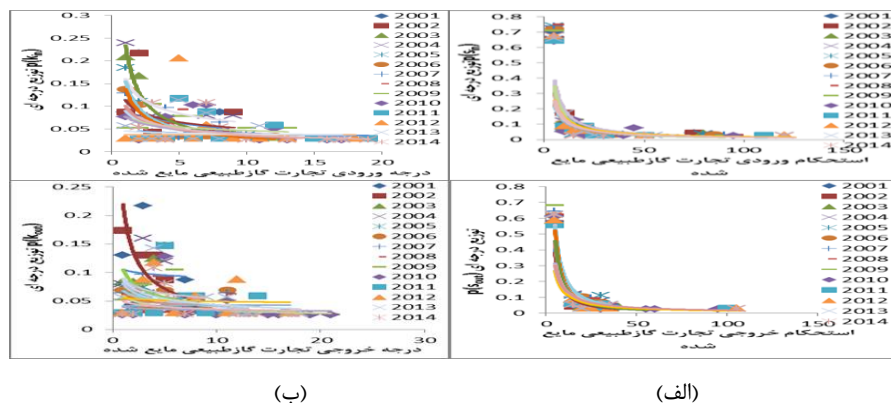
شکل ۱. روند حجم تجارت و تعداد کشورها در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی

### ۲-۳. توزیع درجه‌ای شبکه وزنی و بدون وزن

شکل‌های (۲) و (۳)، توزیع درجه‌ای شبکه تجاری وزنی و بدون وزن گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ را نشان می‌دهند. براساس این شکل‌ها، در هر دو شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده در بیشتر سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ مقادیر  $R^2$  (که نشان‌دهنده این است که تا چه اندازه منحنی برازش مربوط به توزیع درجه‌ای در شبکه واردات و صادرات، داده‌ها را به خوبی برازش کرده است)، بیشتر از ۰/۶ است. این نتیجه بیانگر آن است که توزیع درجه‌ای شبکه تجارت گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال از توزیع قانون توان پیروی کرده و به توزیع درجه‌ای شبکه‌های مقیاس آزاد نزدیک است. به بیان دیگر، نقشی که کشورهای تجاری در شبکه تجاری گاز طبیعی بازی می‌کنند، به‌طور آشکار ناهمگن است؛ یعنی تعداد اندکی از کشورها درجه بالایی دارند. این ویژگی با پیوست ترجیحی که یکی از عوامل مهم در شبکه‌های مقیاس آزاد است، مطابقت می‌کند. این نتیجه به معنای آن است که بیشتر کشورهای واردکننده برای تضمین واردات خود ترجیح می‌دهند با کشورهایی رابطه تجاری برقرار کنند که منابع غنی داشته و حجم بالایی از صادرات را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین ثبات عرضه گاز طبیعی در چند کشور اندک بزرگ صادرکننده، تأثیر به‌سزایی بر عملکرد و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی خواهد داشت.



شکل ۲. توزیع درجه‌های شبکه بدون وزن (الف) و وزنی (ب): گاز طبیعی با خط لوله



شکل ۳. توزیع درجه‌های شبکه بدون وزن (الف) و وزنی (ب): گاز طبیعی مایع شده

همچنین نتایج تجزیه و تحلیل پارامترهای به دست آمده ( $V_{in}$  و  $V_{out}$  به ترتیب نشان دهنده شاخص قانون توان مربوط به منحنی‌های توزیع درجه‌ای در شبکه واردات و صادرات است) برای شبکه‌های وزنی و بدون وزن صادرات خط لوله و شبکه بدون وزن صادرات گاز طبیعی مایع شده بیانگر آن است که درجه انحصاری شبکه صادرات بالاتر است. بنابراین، توزیع درجه‌ای شبکه‌های صادراتی در مقایسه با شبکه‌های وارداتی، بهتر می‌تواند ویژگی ناهمگنی و توزیع قانون توان را نمایش دهد. اما برآورد پارامترها در شبکه وزنی تجارت گاز طبیعی مایع شده،

نشان‌دهنده آن است که احتمال وجود کشورها با استحکام خروجی بالا، بیشتر است. دلیل این امر این است که اگرچه تعداد کشورهای صادرکننده که دارای امکانات بیشتری در افزایش ظرفیت مایع‌سازی گاز طبیعی هستند، بیشتر است، اما تعداد کشورهای واردکننده‌ای که دارای امکاناتی باشند که گاز طبیعی مایع‌شده را به گاز تبدیل کنند و همچنین عملیات ذخیره‌سازی را انجام دهند، کمتر است.

### ۳-۳. وضعیت شاخص‌های مربوط به شبکه و تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها و ساختار آنها

در این بخش با استفاده از نظریه شبکه پیچیده و شاخص‌های محاسبه‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۱۱، به تجزیه و تحلیل ویژگی‌های کلی و ارتباط تنگاتنگ کشورها در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده می‌پردازیم. سپس دو شبکه مذکور را از لحاظ موقعیت و ارتباط کشورها با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد.

همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، چگالی شبکه به هر دو شیوه انتقال به نسبت پایین است. این مطلب بدین معنی است که به‌طور عمده کشورهای صادرکننده و واردکننده به‌طور مستقیم به تجارت با یکدیگر می‌پردازند.

روند صعودی چگالی شبکه مایع‌شده و روند نزولی شبکه خط لوله، نیز نشان می‌دهد که تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده انعطاف‌پذیرتر است. زیرا تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده نمی‌تواند توسط شرایط جغرافیایی محدود شود. بنابراین روابط تجاری بین کشورها (به عبارتی اتصالات در شبکه) را به‌سرعت افزایش می‌دهد. همچنین چگالی شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده بیشتر از چگالی شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله است. این امر نشان می‌دهد که ارتباط تنگاتنگ تجاری بین کشورهای تجاری گاز طبیعی مایع‌شده به نسبت بیشتر است. این امر به احتمال بسیار زیاد به دلیل کوچک‌تر بودن مقیاس تجارت توسط گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به گاز طبیعی با خط لوله است. تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده از طریق کشتی انجام می‌شود. همین شیوه انتقال باعث انعطاف‌پذیرتر بودن تجارت می‌شود.

در حالی که تجارت گاز طبیعی با خط لوله به زیرساخت‌های خط لوله بستگی دارد که باعث ایجاد محدودیت تجاری بین کشورها می‌شود.

جدول ۲. چگالی، متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر و متوسط ضریب خوشه شبکه

شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده			شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله			سال
متوسط ضریب خوشه	متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر	چگالی	متوسط ضریب خوشه	متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر	چگالی	
۰/۰۴۸	۲/۳۵۹۱	۰/۰۸۶۹	۰/۰۹۶	۲/۴۸۰۱	۰/۰۳۵۹	۲۰۰۱
۰/۰۸۶	۲/۲۵۷۰	۰/۰۹۴۸	۰/۰۸۸	۲/۴۸۸۰	۰/۰۳۵۴	۲۰۰۲
۰/۰۱۹	۲/۳۴۰۲	۰/۰۷۷۸	۰/۱۱۳	۲/۴۷۲۵	۰/۰۳۴۶	۲۰۰۳
۰/۰۲۰	۲/۳۷۱۲	۰/۰۸	۰/۱۱۸	۲/۳۹۱۸	۰/۰۳۲۹	۲۰۰۴
۰/۰۱۰	۲/۳۵۱۱	۰/۰۷۹۷	۰/۱۳۶	۲/۳۲۳۳	۰/۰۳۲۴	۲۰۰۵
۰/۰۰۹	۲/۲۲۳۵	۰/۰۸۸۶	۰/۱۳۲	۲/۳۰۴۶	۰/۰۳۲	۲۰۰۶
۰/۰۱۳	۲/۱۸۳۱	۰/۰۹۰۳	۰/۱۰۴	۲/۳۷۸۳	۰/۰۳۱۸	۲۰۰۷
۰/۰۲۱	۲/۰۸۰۰	۰/۰۹۸۷	۰/۱۰۱	۲/۴۱	۰/۰۳۳۸	۲۰۰۸
۰/۰۱۵	۲/۰۷۴۷	۰/۰۹۵۳	۰/۱۴۴	۲/۴۲۰۸	۰/۰۲۱۶	۲۰۰۹
۰/۰۴۴	۱/۹۸۸۱	۰/۱۱۲	۰/۱۲۳	۲/۴۵۶۶	۰/۰۱۹۱	۲۰۱۰
۰/۰۶۴	۱/۸۸۹۲	۰/۱۳۰۱	۰/۰۵۱	۲/۱۹۶۹	۰/۰۳۵	۲۰۱۱
۰/۰۲۶	۲/۰۰۵۱	۰/۱۰۳۳	۰/۰۴۶	۲/۲۱۹۴	۰/۰۳۳	۲۰۱۲
۰/۰۰۸	۲/۰۴۵۷	۰/۱۰۱۶	۰/۰۴۶	۲/۲۱۳۷	۰/۰۳۳۷	۲۰۱۳
۰/۰۹۰	۱/۹۶۹۳	۰/۱۱۲۶	۰/۰۹۲	۲/۴۶۱۵	۰/۰۳۵۴	۲۰۱۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق

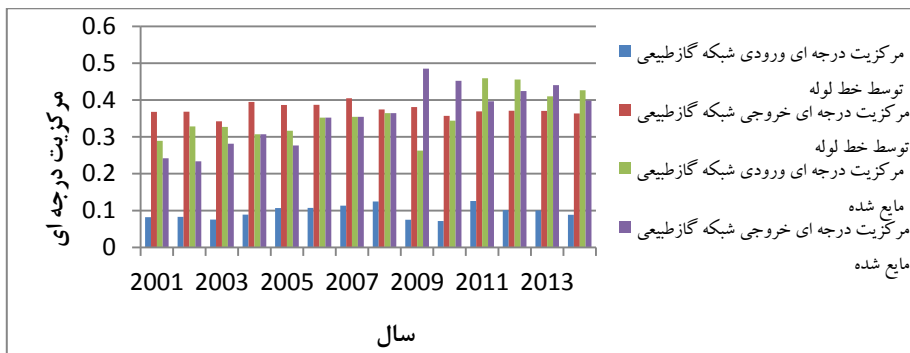
همچنین متوسط کوتاه‌ترین مسیر در شبکه مایع شده کمتر از شبکه با خط لوله است. این مطلب نشان‌دهنده آن است که رئوس بیشتری در شبکه به‌طور مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند. به عبارتی کشورها در شبکه تجارت مایع شده ارتباط بیشتری با یکدیگر دارند.

متوسط ضریب خوشه شبکه به هر دو شیوه انتقال، به نسبت پایین است. این نتیجه نشان‌دهنده تراکم پایین هر دو شبکه است. با این حال ملاحظه می‌شود که تراکم شبکه خط لوله بیشتر از شبکه مایع شده است. به عبارت دیگر، میزان ارتباط تجاری کشورها با یکدیگر از طریق خط لوله بیشتر است که حکایت از عدم قابلیت و توانایی بسیاری از کشورها در رابطه با تجارت گاز

طبیعی مایع شده دارد. همچنین متوسط ضریب خوشه گاز طبیعی مایع شده در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ نسبت به سال‌های قبل افزایش یافته است. این نتیجه نشان‌دهنده افزایش تجارت گاز طبیعی مایع شده در این دو سال است. بنابراین می‌توان بیان داشت که تجارت گاز طبیعی مایع شده به دلیل پیشرفت‌های فناوری در زیرساخت‌های تولید، حمل‌ونقل و صادرات آن، در سال‌های اخیر گسترش یافته است.

در ادامه به تحلیل شاخص‌های متفاوت مرکزیت از جمله مرکزیت درجه‌ای، مرکزیت نزدیکی، مرکزیت میانگی و مرکزیت بردار ویژه می‌پردازیم. این شاخص‌ها اهمیت و موقعیت کشورهای تجاری در شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع شده را از جنبه‌های مختلفی بررسی می‌کنند.

همان‌طور که از شکل (۴) ملاحظه می‌شود، مرکزیت درجه‌ای گاز طبیعی با خط لوله طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ یک‌روند به نسبت ثابتی، و گاز طبیعی مایع شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ یک‌روند به نسبت صعودی دارد. این نتیجه حکایت از آن دارد که درجه انحصاری بازار صادرات گاز طبیعی مایع شده طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ افزایش یافته است. دلیل این امر این بوده است که نسبت حجم صادرات کشورهای بزرگ صادرکننده گاز طبیعی مایع شده از کل حجم صادرات جهانی بسیار افزایش یافته است.



شکل ۴. مرکزیت درجه‌ای شبکه

به عبارت دیگر، تنها تعداد اندکی از کشورهای بزرگ صادر کننده توانایی کنترل بازار گاز طبیعی مایع شده را دارند. این شرایط می تواند منجر به افزایش رقابت شدید کشورها برای به دست آوردن منابع جهانی گاز طبیعی و ایجاد یک چالش بزرگ در جهت تضمین گاز طبیعی کشورهای وارد کننده شود.

درجه رقابتی گاز طبیعی مایع شده، به ویژه در سال های اخیر بیشتر از خط لوله است. این نتیجه نشان می دهد که تعداد اندکی از کشورهای وارد کننده با موقعیت تجاری مهم در شبکه مایع شده وجود دارد. اما کشورهای وارد کننده با خط لوله، موقعیت تجاری نسبتاً برابری دارند. به عبارتی در سال های اخیر آسیب پذیری شبکه مایع شده در برابر اختلال های تجاری افزایش یافته است. به علاوه، تعداد اندک کشورهای بزرگ وارد کننده در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده، حکایت از این دارد که فناوری در زیرساخت های لازم برای واردات گاز طبیعی مایع شده پیشرفت چندانی نداشته است.

متوسط مرکزیت میانگی<sup>۱</sup> همان طور که از جدول ۳ مشاهده می شود، در بیشتر سال ها متوسط مرکزیت میانگی گاز طبیعی مایع شده از خط لوله بیشتر است. این امر نشان دهنده آن است که ارتباط تجاری کشورها در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده در جهت انتقال گاز طبیعی میان سایر کشورها بیشتر است. همچنین این امر دلالت بر کارایی و ثبات کمتر شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده دارد. زیرا با حذف هر اتصال، آسیب پذیری شبکه افزایش می یابد.

---

۱. این شاخص بررسی می کند که به طور متوسط رئوس شبکه تا چه حدی می توانند سایر جفت رئوس موجود در شبکه تجاری را به هم مرتبط کنند. اگر مقدار این شاخص در شبکه بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که رئوس در شبکه توانایی بیشتری در کنترل جریان منابع بین رئوس شبکه دارند. این ویژگی ساختاری، میزان کارایی و ثبات شبکه تجاری را نشان می دهد.

متوسط مرکزیت نزدیکی<sup>۱</sup> شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱، از یک‌روند ثابت پیروی می‌کند (جدول ۳). اما در شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله یک‌روند نوسانی وجود دارد. افزایش این شاخص نشان‌دهنده آن است که در آن سال‌ها جریان تجاری میان هر کشور تجاری در شبکه با سایر کشورها زیاد است.

مقدار این شاخص در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله بسیار کمتر است. این مطلب بدین معنی است که در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده، انتقال گاز طبیعی میان هر کشور با بیشتر کشورها بسیار کم است. این موضوع می‌تواند به دلیل نبود پیشرفت فناوری در زیرساخت‌های گاز طبیعی مایع شده در بسیاری از کشورها باشد.

---

۱. این شاخص، بیان می‌کند که به‌طور متوسط کوتاه‌ترین مسیر برای دسترسی هر رأس به سایر رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی به چه اندازه است.



جدول ۳. متوسط مرکزیت میانگی، نزدیکی و بردار ویژه شبکه

سال	شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله			شبکه تجارت گاز طبیعی مابعد شده		
	متوسط مرکزیت میانگی	متوسط مرکزیت نزدیکی	متوسط مرکزیت بردار ویژه	متوسط مرکزیت میانگی	متوسط مرکزیت نزدیکی	متوسط مرکزیت بردار ویژه
۲۰۰۱	۳۴/۹۰۹	۰/۱۲۴	۰/۰۲۳	۳۲/۲۶۱	۰/۰۱۹	۰/۰۴۳
۲۰۰۲	۳۵/۰۹۱	۰/۱۲۴	۰/۰۲۳	۲۹/۹۱۳	۰/۰۲۰	۰/۰۴۳
۲۰۰۳	۳۴/۶۸۱	۰/۱۵۹	۰/۰۲۱	۳۳/۱۶۷	۰/۰۱۸	۰/۰۴۲
۲۰۰۴	۳۵/۶۸۶	۰/۱۸۸	۰/۰۲	۳۵/۲۸۰	۰/۰۱۸	۰/۰۴۰
۲۰۰۵	۳۵/۱۵۴	۰/۱۸۹	۰/۰۱۹	۳۷/۴۸۱	۰/۰۱۶	۰/۰۳۷
۲۰۰۶	۳۳/۱۱۵	۰/۱۸۵	۰/۰۱۹	۳۶/۴۸۳	۰/۰۱۶	۰/۰۳۴
۲۰۰۷	۳۴/۰۸	۰/۱۸۲	۰/۰۲	۳۷/۶۷۷	۰/۰۱۵	۰/۰۳۲
۲۰۰۸	۳۱/۶۵۲	۰/۲۱۶	۰/۰۲۲	۳۵/۵۶۲	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱
۲۰۰۹	۴۸/۸۱۱	۰/۱۵۹	۰/۰۱۴	۴۱/۸۴۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶
۲۰۱۰	۴۸/۸۸۶	۰/۲	۰/۰۱۳	۳۹/۵۳۸	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶
۲۰۱۱	۲۲/۸۲۱	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۱/۲۳۵	۰/۰۱۶	۰/۰۲۹
۲۰۱۲	۲۳/۲۳۱	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۵/۱۷۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۹
۲۰۱۳	۲۳/۱۲۸	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۷/۶۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۹
۲۰۱۴	۳۳/۵۷۱	۰/۱۲۱	۰/۰۲۴	۳۶/۸۶۵	۰/۰۱۴	۰/۰۲۷

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با مقایسه مقدار متوسط شاخص مرکزیت بردار ویژه<sup>۱</sup> با متوسط مرکزیت میانگی می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه در سال‌های مذکور تعداد رئوس شبکه (دارای توانایی بسیار بالایی در کنترل جریان منابع میان سایر رئوس) افزایش یافته‌اند، اما تعداد رئوس دارای ارزش مرکزیت بردار ویژه بالا، کاهش یافته است. پس لزوماً رئوس دارای ارزش مرکزیت میانگی بالا، دارای ارزش مرکزیت بردار ویژه بالا نمی‌باشند.

۱. این شاخص به طور متوسط اهمیت رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی با توجه به اهمیت همسایگان را اندازه می‌گیرد.

از جدول شماره ۳ ملاحظه می‌شود که طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱، متوسط مرکزیت بردار ویژه شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده از خط لوله بیشتر بوده است. دلیل این امر این است که در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده، به دلیل اهمیت بالای همسایگان هر رأس در شبکه، رئوس شبکه از موقعیت و اهمیت بالاتری برخوردار هستند. بنابراین شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده به دلیل افزایش ارتباطات بین رئوس شبکه، در برابر اختلال‌های تجاری آسیب‌پذیرتر است.

### ۳-۴. تجزیه و تحلیل ثبات<sup>۱</sup> تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده)

در این بخش به بررسی شاخص‌های ثبات رئوس و ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) در سال ۲۰۱۴ می‌پردازیم.<sup>۲</sup>

#### - تجزیه و تحلیل ثبات کشورهای مهم وارد کننده در مناطق تجاری

با توجه به تأثیر قابل توجه ثبات تجاری کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی بر امنیت انرژی جهان، در این قسمت توانایی مقاومت کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی در برابر اختلال و قطع تجارت و همچنین ثبات نسبی کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی<sup>۳</sup> بررسی می‌شود. در این پژوهش آلمان، ایتالیا، فرانسه و بلژیک (که بیشترین استحکام ورودی را به خود اختصاص داده‌اند) در منطقه تجاری اروپا و کشورهای چین و ترکیه در منطقه تجاری

۱. ثبات به توانایی کشورهای وارد کننده گاز طبیعی برای این که بتوانند سریع‌تر از دیگر کشورها گاز طبیعی را وارد کنند، و اختلال تجاری به اختلال و قطع صادرات کشورهای صادر کننده گاز طبیعی اطلاق می‌شود.  
۲. این بررسی به دلیل کامل نبودن داده‌های مربوط به شاخص ریسک سیاسی در سال‌های قبل از ۲۰۱۴ تنها در سال ۲۰۱۴ انجام شده است.

۳. بایستی توجه داشت که اگرچه کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی که دارای منابع غنی هستند، دارای روابط وارداتی با دیگر کشورها می‌باشند؛ اما تحت تأثیر اختلال تجاری در شبکه قرار نخواهند گرفت. بنابراین در مقاله حاضر ثبات این کشورها در نظر گرفته نمی‌شود و تنها ثبات کشورهایی در نظر گرفته می‌شود که فقط به عنوان وارد کننده در شبکه تجاری گاز طبیعی هستند.

آسیا-اوراسیا به عنوان کشورهای اصلی وارد کننده در نظر گرفته شده است و ثبات آن‌ها در برابر حمله هدف که منجر به قطع صادرات کشورهای صادر کننده گاز طبیعی با خط لوله در منطقه تجاری آن‌ها می‌شود، محاسبه شده است. همچنین کشورهای صادر کننده گاز طبیعی با خط لوله به ترتیب از درجه خروجی بیشتر به درجه خروجی کمتر برای منطقه تجاری اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا (شامل کشورهای روسیه، نروژ، هلند، الجزایر، بریتانیا، لیبی و آذربایجان) و برای منطقه تجاری آسیا-اوراسیا (شامل کشورهای روسیه، ترکمنستان، میانمار، قزاقستان، ایران، ازبکستان و آذربایجان) انتخاب شده است و براساس درصدهای اختلال، اتصال‌های صادراتی آن‌ها حذف شده است. به عبارتی فرض شده است که به دلیل بی‌ثباتی سیاسی، اگر احتمال اختلال تجاری (قطع صادرات) در این کشورها افزایش یابد، ثبات کشورهای وارد کننده در منطقه تجاری تغییر خواهد یافت.

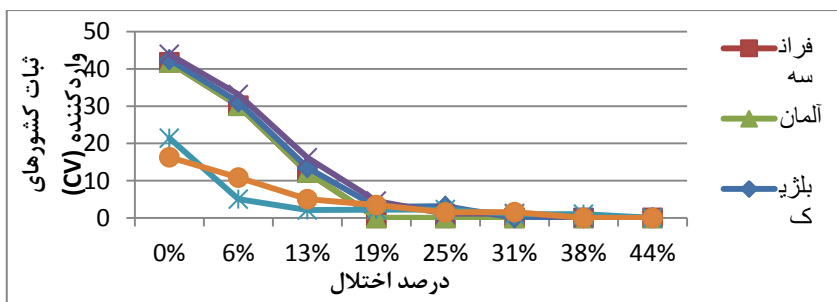
براساس داده‌های شاخص ثبات سیاسی<sup>۱</sup> کشورها، عمده کشورهای مواجهه شونده با حمله هدف در قاره آسیا-اوراسیا و آفریقا قرار دارند. زیرا این کشورها میزان ثبات سیاسی کمی دارند و احتمال افزایش اختلال تجاری در این کشورها زیاد است.

اثرات اختلال تجاری بر ثبات کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی با خط لوله در شکل (۵) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در منطقه اروپا، ثبات ایتالیا به ترتیب بیشتر از بلژیک، آلمان و فرانسه است. این امر دلالت بر آن دارد که ایتالیا دارای سیاست متنوع سازی جغرافیایی بالایی است. زیرا ایتالیا ارتباط وارداتی با ۵ کشور هلند، نروژ، روسیه، الجزایر و لیبی دارد که نسبت به کشورهای دیگر، دارای ارتباط تجاری بیشتری است و همچنین با دو کشور هلند و نروژ که از ثبات سیاسی بالایی برخوردارند، ارتباط تجاری دارد. این شرایط منجر به مقاومت بالای ایتالیا در برابر اختلال تجاری در منطقه می‌شود.

۱. این شاخص، ثبات سیاسی هر کشور را اندازه گیری می‌کند. مأخذ داده‌ها: <https://www.prsgroup.com>

همچنین ثبات تجاری هر چهار کشور زمانی که بیشتر از ۶٪ کشورهای اصلی صادر کننده با اختلال تجاری مواجه می‌شوند، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و آسیب‌پذیری بالای آن‌ها را در برابر افزایش اختلال تجاری نشان می‌دهد. زیرا هر چهار کشور با دو کشور نروژ و هلند ارتباط تجاری دارند و در سطوح ۱۳٪ و ۱۹٪ اتصالات صادراتی نروژ و هلند (که از ثبات سیاسی بالایی برخوردارند) حذف شده است. بنابراین با اختلال، اتصالات صادراتی نروژ و هلند، ثبات فرانسه، آلمان، ایتالیا و بلژیک بسیار کاهش می‌یابد.

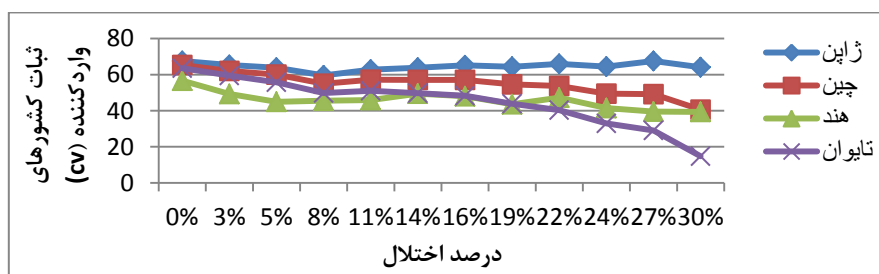
به علاوه ثبات دو کشور چین و ترکیه نیز با افزایش درصد اختلال، یک‌روند نزولی دارد. همان‌طور که از شکل (۵) ملاحظه می‌شود، در سطوح اولیه اختلال، ثبات کشور چین بیشتر از ترکیه است. این امر دلالت بر متنوع‌سازی جغرافیایی منابع وارداتی بیشتر کشور چین دارد. با توجه به اینکه ثبات چین و ترکیه در منطقه آسیا و اوراسیا در سطوح اولیه اختلال تجاری، کمتر از کشورهای منطقه اروپا است، می‌توان چنین استدلال کرد که چین و ترکیه نسبت به آلمان، فرانسه، ایتالیا و بلژیک با کشورهای دارای ثبات سیاسی پایین‌تر ارتباط وارداتی دارند.



شکل ۵. ثبات کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی با خط لوله در دو منطقه اروپا و آسیا

در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، کشورهای ژاپن، چین، هند و تایوان (که بیشترین استحکام ورودی در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده را به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای اصلی واردکننده در نظر گرفته شده است و ثبات آن‌ها در برابر حمله هدف

محاسبه شده است. در این مقاله، برای شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده، ۲۱ کشور صادرکننده انتخاب شده و براساس درصد اختلال، اتصالاتی آنها حذف شده است. اثرات اختلال تجاری بر کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی مایع شده (شکل ۶) متفاوت از خط لوله است. در این حالت ثبات هر ۴ کشور ژاپن، چین، هند و تایوان با افزایش درصد اختلال، کاهش یافته است.



شکل ۶. ثبات کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع شده

همچنین آسیب پذیری کشور تایوان نسبت به سه کشور دیگر با شدت بیشتری افزایش یافته است. دلیل این امر این است که تایوان دارای سیاست متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی پایین تری است. به علاوه ملاحظه می شود که از سطح اختلال ۳٪ تا سطح اختلال ۳۰٪، ثبات کشور ژاپن از سه کشور دیگر بیشتر است. این امر به این دلیل است که ژاپن گاز طبیعی مایع شده مورد نیاز خود را از ۱۹ کشور وارد می کند که نسبت به کشورهای دیگر از سیاست متنوع سازی جغرافیایی و امنیت منابع وارداتی بالاتری برخوردار است. ثبات کشور چین نیز در تمام سطوح اختلال تجاری، از ثبات کشورهای هند و تایوان در برابر اختلال اتصالاتی صادراتی کشورهای صادرکننده، بیشتر است که نشان دهنده متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی بالای این کشور نسبت به هند و تایوان است.

### - تجزیه و تحلیل اهمیت کشورهای مهم صادرکننده در مناطق تجاری

ویژگی مقیاس آزاد شبکه صادرات گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع شده، با اهمیت بودن کشورهای بزرگ صادرکننده را تأیید می‌کند. بنابراین ضروری است تا موقعیت و تأثیر کشورهای اصلی صادرکننده گاز طبیعی با هر دو شیوه انتقال بررسی شود. به علاوه، در این بخش تأثیر مستقیم و غیرمستقیم اختلال تجاری هر یک از کشورهای صادرکننده بر ثبات تجاری کشورهای واردکننده گاز طبیعی در هر دو شبکه تجارت گاز طبیعی بررسی شده است.<sup>۱</sup>

بر اساس شکل (۷) و (۸) با اهمیت‌ترین کشورهای صادرکننده گاز طبیعی با خط لوله شامل روسیه و ترکمنستان در منطقه تجاری آسیا-اوراسیا، و روسیه و نروژ و هلند در منطقه تجاری اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا است. قطر و مالزی و استرالیا نیز به عنوان با اهمیت‌ترین کشورهای صادرکننده گاز طبیعی مایع شده بوده و نقش به‌سزایی در حفظ ثبات تجاری دارند.

ایران به عنوان دومین دارنده منابع گاز دنیا پس از روسیه و قرار گرفتن در بین ۱۰ تولیدکننده بزرگ گاز طبیعی جهان، به دلایلی نتوانسته است در بین صادرکنندگان برتر جهان جایگاهی داشته باشد و تنها به صادرات گاز به ترکیه به صورت محدود بسنده کرده است. همچنین به دلیل نبود سرمایه‌گذاری کافی در زیرساخت‌های لازم برای تولید گاز طبیعی مایع شده، هیچ نقشی در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده ایفا نمی‌کند. به عبارتی ایران تنها کشور صادرکننده گاز طبیعی است که گاز خود را تنها از طریق خط لوله منتقل می‌کند.

۱. محاسبه درصد تأثیر مستقیم بر اساس این است که از میان تمام کشورهای واردکننده در شبکه، چه نسبتی از کشورهای واردکننده دارای ارتباط تجاری مستقیم با کشور صادرکننده هستند. اختلال تجاری کشور صادرکننده بر ثبات تجاری آن کشورها تأثیر داشته است. درصد تأثیر غیرمستقیم، سهم دیگر کشورهای تأثیر پذیرفته از میان تمام کشورهای واردکننده در شبکه تجاری گاز طبیعی است.



### - تجزیه و تحلیل ثبات مناطق تجاری

در این قسمت، ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی<sup>۱</sup> در دو حالت حمله هدف و حمله تصادفی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۴ تجزیه و تحلیل می‌شود.

بر اساس شکل ۹، نتایج به دست آمده از تغییرات ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله (منطقه اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا و آسیا-اوراسیا) نشان می‌دهد که هر دو منطقه در برابر حمله تصادفی، مقاوم هستند. زیرا با افزایش درصد اختلال، ثبات هر دو منطقه به تدریج کاهش می‌یابد. در حالی که در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر هستند. بنابراین می‌توان چنین استدلال کرد که هر دو منطقه تجاری توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی را دارند اما در برابر حمله هدف بسیار آسیب‌پذیر هستند.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که شبکه فعلی تجارت گاز طبیعی مایع شده، در برابر حمله تصادفی مقاوم است. دلیل این امر این است که با افزایش درصد اختلال، تغییرات ثبات شبکه بسیار کم است و دارای یک روند ثابتی است. همچنین ثبات این شبکه در برابر حمله هدف در بعضی سطوح اختلال افزایش یافته است که دلالت بر مقاومت

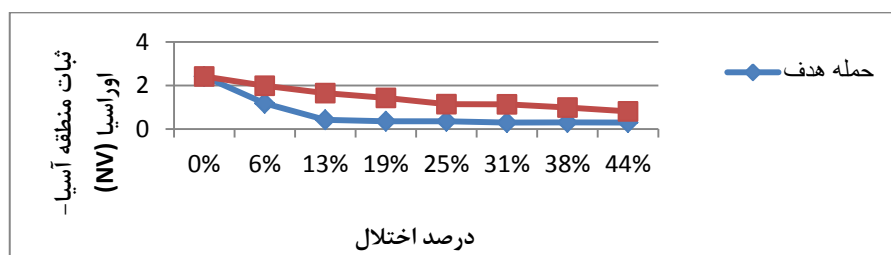
۱. این شاخص توانایی واکنش شبکه تجاری در برابر اختلال صادرات و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی را محاسبه می‌کند.

۲. حمله تصادفی به معنای آن است که کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به منظور حذف تمام اتصالات صادراتی آن‌ها، به طور تصادفی و با یک درصد معینی انتخاب شده‌اند. سپس فرآیند انتخاب تصادفی با درصد‌های مختلف اختلال، صد مرتبه تکرار و میانگین ثبات شبکه محاسبه شده است. این روش به روش مونت کارلو مرسوم است. حمله هدف نیز به معنای آن است که کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به منظور حذف اتصالات صادراتی‌شان، به ترتیب از درجه خروجی بیشتر به درجه خروجی کمتر، بر اساس درصد‌های اختلال انتخاب می‌شوند. درصد‌های اختلال، درصدی از کشورهای صادرکننده از کل کشورهای موجود در مناطق گاز طبیعی با خط لوله و شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده هستند که با حمله هدف مواجه شده‌اند.

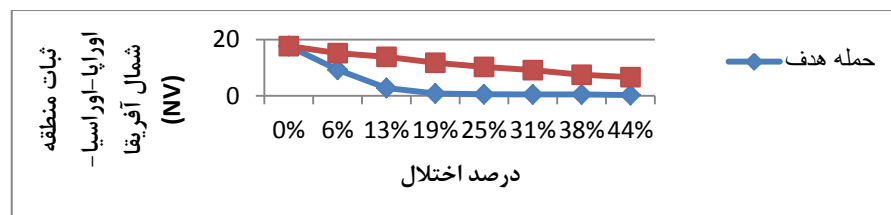


شبکه در آن سطح داشته است. اما در بیشتر سطوح اختلال، ثبات شبکه کاهش یافته است. این امر دلالت بر آسیب پذیری بیشتر شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده دارد.

نتیجه گیری کلی به دست آمده از شکل های (۹) و (۱۰) این است که ثبات هر دو شبکه تجاری گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) در حالت حمله تصادفی از حالت حمله هدف بیشتر است. بنابراین می توان چنین استدلال کرد که شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی را دارند. این در حالی است که اگر شبکه در برابر حمله هدف قرار گیرد، بسیار آسیب پذیر است و در سطوح بالای اختلال می تواند منجر به فروپاشی شبکه شود. این شرایط با دارا بودن ویژگی مقیاس آزاد شبکه تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) مطابقت می کند.

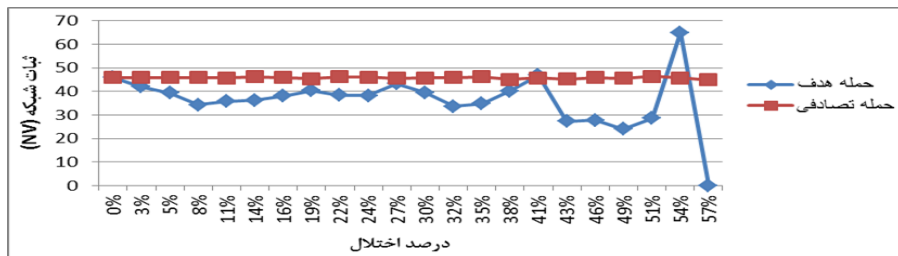


(الف)



(ب)

شکل ۹. ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله  
(الف) آسیا-اوراسیا (ب) اوراپا-اوراسیا-شمال آفریقا  
در برابر حمله هدف و حمله تصادفی



شکل ۱۰. ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع شده در برابر حمله هدف و حمله تصادفی

### ۳-۵. تجسم شبکه

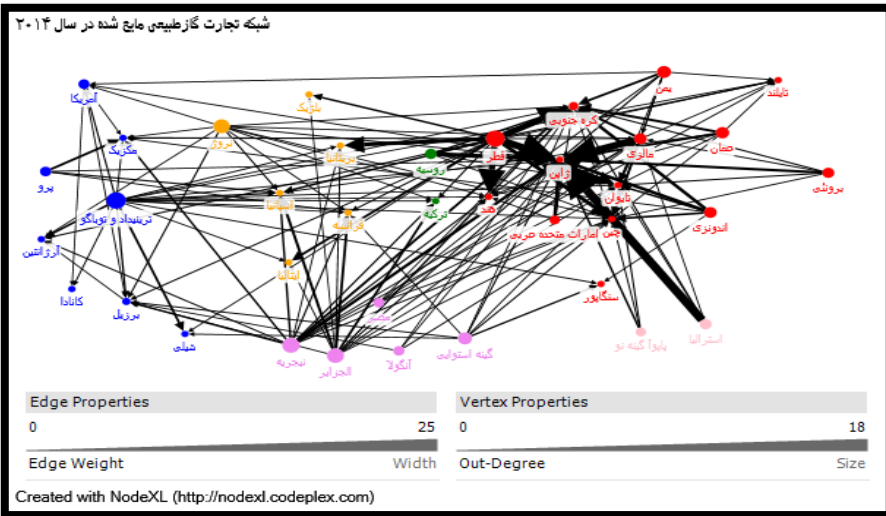
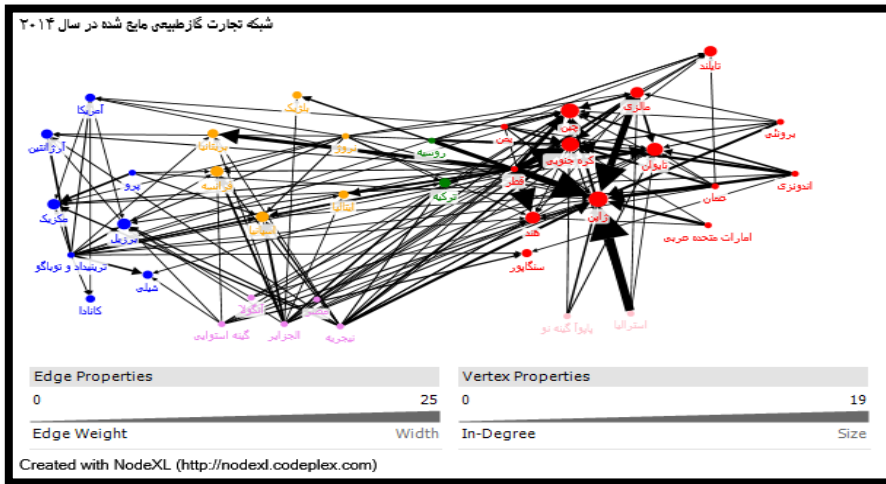
تجسم شبکه تجارت گاز طبیعی، در واقع به منظور مقایسه سریع تر دو شبکه مذکور و همچنین یافتن کشورهای تجاری مهم و اتصالات مهم میان کشورهای تجاری گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال، انجام می‌گیرد. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به منظور تجسم شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده و گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۱۴، یک شبکه با توجه به درجات ورودی و یک شبکه با توجه به درجات خروجی رئوس رسم شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمام رئوس در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع شده به هم متصل هستند. در حالی که، بسیاری از رئوس در شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله از هم جدا هستند. دلیل این امر این است که زیرساخت خط لوله، پیش‌نیاز تجارت گاز طبیعی با خط لوله است و همچنین زیرساخت خط لوله به عواملی نظیر محدودیت‌های جغرافیایی، روابط دیپلماتیک ملی و عوامل سیاسی بستگی دارد؛ در حالی که تجارت گاز طبیعی مایع شده، هیچ محدودیت جغرافیایی ندارد. بنابراین تجارت گاز طبیعی مایع شده، انعطاف‌پذیرتر است.

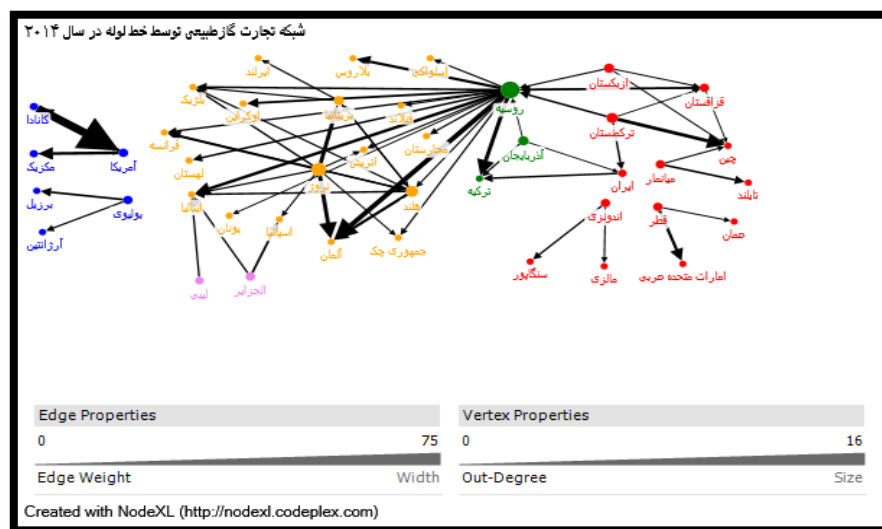
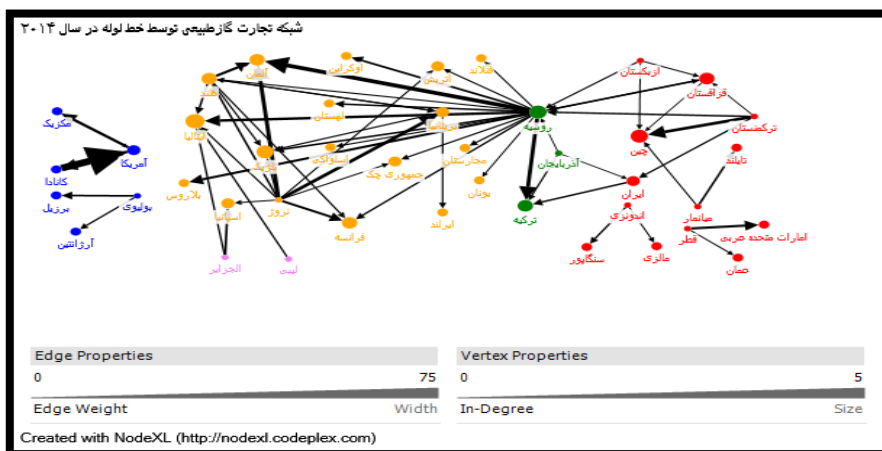
آسیا به‌عنوان مرکز واردات جهانی گاز طبیعی مایع شده است و تجارت گاز طبیعی مایع شده بیشتر در آسیا متمرکز شده است (شکل ۱۱). همچنین در شبکه گاز طبیعی مایع شده، قطر، مالزی، استرالیا، نیجریه، اندونزی، الجزایر و ترینیداد و توباگو (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه صادرات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان مهم‌ترین کشورهای صادرکننده هستند و

ژاپن، کره جنوبی، چین، هند و تایوان (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه واردات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان بزرگ‌ترین کشورهای وارد کننده هستند.

با توجه به شکل (۱۲)، در شبکه گاز طبیعی با خط لوله روسیه، نروژ، کانادا، هلند، آمریکا، ترکمنستان و قطر (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه صادرات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای بزرگ و مهم صادر کننده هستند و آلمان، آمریکا، ایتالیا، ترکیه، بریتانیا، چین و فرانسه (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه واردات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای بزرگ وارد کننده هستند. مناطق وارد کننده گاز طبیعی با خط لوله به‌طور عمده در شمال آمریکا و اروپا متمرکز شده است. تجارت گاز طبیعی از طریق خط لوله به‌عنوان تجارت اصلی گاز طبیعی در بازار آمریکای شمالی است و ایالات متحده آمریکا به‌طور عمده گاز طبیعی را از کانادا و مکزیک توسط خط لوله وارد می‌کند. در بازار گاز طبیعی اروپا، عمدتاً تجارت گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال انجام می‌شود و کشورهای اروپایی به‌طور عمده گاز طبیعی را از قطر، نروژ، روسیه و الجزایر وارد می‌کنند.



شکل ۱۱. نمایش شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع شده در سال ۲۰۱۴



شکل ۱۲. نمایش شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۱۴

#### ۴. نتیجه گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌ها و ساختار شبکه تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) شناسایی و بررسی شد. همچنین به منظور بررسی ثبات تجارت گاز طبیعی و اطمینان از امنیت انرژی هر کشور، ثبات و اهمیت کشورهای تجاری و ثبات کل

شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) در برابر اختلال تجاری، تجزیه و تحلیل شد. به طور خلاصه می‌توان نتایج حاصل از بررسی را به صورت زیر بیان کرد.

- توزیع درجه‌ای شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال)، به ساختار شبکه‌های مقیاس آزاد نزدیک‌تر است. زیرا هر دو شبکه تجاری گاز طبیعی از توزیع قانون توان پیروی کرده است و دارای ساختار به نسبت ناهمگنی هستند. به این معنا که تعداد اندکی از کشورهای صادرکننده دارای بیشترین منابع گاز طبیعی هستند و کشورهای واردکننده گاز طبیعی بیشتر متمایل هستند تا به ایجاد روابط تجاری با ثبات با این کشورها، اولویت دهند. لذا انتظار می‌رود که واکنش شبکه تجاری گاز طبیعی در برابر حمله تصادفی مقاوم و در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر باشد. در واقع کشورهای بزرگ صادرکننده گاز طبیعی، رئوس کلیدی برای حفظ روابط شبکه تجاری هستند و در نتیجه نیرومحرکه عملکرد و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی هستند. به این ترتیب به منظور ایجاد تلاش مشترک کشورها برای حفظ ثبات صادرات کشورهای بزرگ صادرکننده و ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی، می‌بایست نظام همکاری چندین کشور ایجاد شود.

- چگالی هر دو شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع شده) به نسبت پایین است. دلیل این امر این است که به طور عمده کشورهای تجاری، به طور مستقیم به تجارت با یکدیگر می‌پردازند. با این حال، به دلیل روند صعودی چگالی شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده و روند نزولی چگالی شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله، تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع شده انعطاف‌پذیرتر است. همچنین متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده کمتر از شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله است. این امر دلالت بر این دارد که رئوس بیشتری در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده، به طور مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند. در حالی که متوسط ضریب خوشه یا به عبارتی تراکم شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله بیشتر از شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده است. این امر نشان‌دهنده این است که به دلیل عدم قابلیت و توانایی بسیاری از کشورها در رابطه با تجارت از طریق

گاز طبیعی مایع شده، میزان ارتباط تجاری کشورها با یکدیگر از طریق تجارت گاز طبیعی با خط لوله بیشتر است.

- شاخص مرکزیت یکی از مهم ترین شاخص ها برای تعیین موقعیت و روابط کشورها در شبکه تجاری است. نتایج نشان می دهند که به جز شاخص متوسط مرکزیت نزدیکی، سه شاخص مرکزیت درجه ای، متوسط مرکزیت میانگی و متوسط مرکزیت بردار ویژه، آسیب پذیری بیشتر شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده را نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله در برابر اختلال های تجاری در شبکه تأیید می کند. این امر نشان دهنده این است که امکان دارد شبکه ای دارای رئوس با مرکزیت نزدیکی پایین باشد اما به دلیل ارتباطات زیاد رئوس با یکدیگر، دارای موقعیت و اهمیت تجاری بالا باشد.

- کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی، بر مناطق تجاری خاص خود تمرکز دارند. به طور خلاصه، روسیه و ترکمنستان در منطقه تجاری آسیا-اوراسیا و روسیه و نروژ و هلند در منطقه تجاری اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا به عنوان بااهمیت ترین کشورهای صادر کننده در شبکه گاز طبیعی با خط لوله هستند. قطر، مالزی و استرالیا نیز به عنوان بااهمیت ترین کشورهای صادر کننده گاز طبیعی مایع شده در شبکه تجاری مربوطه، نقش به سزایی در حفظ ثبات تجاری دارند. زیرا در صورت اختلال تجاری در صادرات هر یک از این کشورها، تهدید جدی برای ثبات کل شبکه تجاری ایجاد می شود و بر امنیت عرضه کشورهای وارد کننده گاز طبیعی تأثیر می گذارد. کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی نقش مهمی در ثبات تجارت جهانی گاز طبیعی ایفا می کنند و حفظ ثبات تجاری این کشورها، منافع تمام کشورهای جهان را تضمین می کند. بنابراین کشورها نیاز خواهند داشت تا همکاری های بین المللی خود را تقویت کنند. از طرف دیگر کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) به منظور توسعه راهبردهای خود برای اطمینان از عرضه دریافتی خود، می بایست در بهبود متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی خود و همچنین برقراری ارتباط با کشورهای صادر کننده که دارای شرایط باثبات سیاسی هستند، تلاش کنند.

- نتایج حاصل از بررسی ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله و شبکه تجاری گاز طبیعی مایع شده در برابر حمله تصادفی و حمله هدف در شبکه نشان‌دهنده آن است که هر دو شبکه توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی را دارند. این در حالی است که اگر شبکه در برابر حمله هدف قرار گیرد، بسیار آسیب‌پذیر است. در این حالت امنیت وارداتی کشورهای وارد کننده گاز طبیعی با تهدید جدی روبه‌رو خواهد شد. در واقع، این شرایط با دارا بودن ویژگی مقیاس آزاد شبکه تجارت گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) مطابقت می‌کند.

## منابع

- شیرازی، همایون؛ آذربایجانی، کریم و مرتضی سامتی (۱۳۹۴)، "بررسی جایگاه ایران در تجارت بین‌المللی: یک رهیافت شبکه"، *مجله تحقیقات اقتصادی*، شماره ۴، صص ۹۰۲-۸۸۱.
- Albert, R. and A.L. Barabasi** (2002). "Statistical Mechanics of Complex Networks", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 74, pp. 47-97.
- Albert R., Jeong H. and A.L. Barabasi** (2000). "Error and Attack Tolerance of Complex Networks", *Nature*, Vol. 406, pp. 378-382.
- An H., Zhong w., Chen Y., Li H. and X. Gao** (2014). "Features and Evolution of International Crude Oil Trade Relationships: A Trading-Based Network Analysis", *Energy*, Vol. 74, pp. 254-259.
- Baskaran T., Blochi F., Bruck T. and F.J. Theis** (2011). "The Heckscher-Ohlin Model and the Network Structure of International Trade", *International Review of Economics and Finance*, No. 20, pp. 135-145.
- Bhattacharya K., Mukherjee G., Sarämaki J., Kaski K. and S.S. Manna** (2008). "The International Trade Network: Weighted Network Analysis and Modeling", *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, No. 2, pp. 1-5.
- Du R., Dong G., Tian, L., Wang Y., Liu Y., Wang M. and G. Fang** (2016). "A Complex Network Perspective on Features and Evolution of World Crude Oil Trade", *Energy Procedia*, Vol. 104, pp. 221-226.
- Du R., Wang Y., Dong G., Tian L., Liu Y., Wang M. and G. Fang** (2017). "A Complex Network Perspective on Interrelations and Evolution Features of International Oil Trade, 2002-2013", *Applied Energy*, Vol. 196, pp. 142-151.
- Duenas M. and G. Fagiolo** (2011). "Modeling the International-Trade Network: A Gravity Approach", *Journal of Economic Interaction and Coordination*, No. 8, pp. 155-178.



- Fagioloa G., Reyesb J. and S. Schiavoc** (2008). "On the Topological Properties of the World Trade Web: A Weighted Network Analysis", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 387, pp. 3868-3873.
- Fan Y., Ren S., Cai H. and X. Cui** (2014). "The State's Role and Position in International Trade: A Complex Network Perspective", *Economic Modelling*, No.39, pp. 71-81.
- Furusawa, T. and H. Konishi** (2007). "Free Trade Networks", *Journal of International Economics*, Vol. 72, pp. 310-335.
- Garlaschelli D. and M.I. Loffredo** (2005). "Structure and Evolution of the World Trade Network", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 355, pp. 138-144.
- Geng J.B., Ji Q. and Y. Fan** (2014). "A Dynamic Analysis on Global Natural Gas Trade Network", *Applied Energy*, Vol. 132, pp. 23-33.
- Greaney T.M.** (2005). "Measuring Network Effects on Trade: Are Japanese Affiliates Distinctive?", *Journal of the Japanese and International Economies*, No.19, pp. 194-214.
- Ji Q., Zhang H.Y. and Y. Fan** (2014). "Identification of Global Oil Trade Patterns: An Empirical Research Based on Complex Network Theory", *Energy Conversion and Management Paper*, Vol. 85, pp. 856-865.
- Kali R. and J. Reyes** (2006). "The Architecture of Globalization: A Network Approach to International Economic Integration", *Journal of International Business Studies*, Vol. 38, pp. 595-620.
- Lee j.** (2012). "Network Effects on International Trade", *Economic Letters*, Vol.116, pp. 199-201.
- Li X., Jin Y.Y. and G. Chen** (2003). "Complexity and Synchronization of the World Trade Web", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 328, pp. 287-296.
- Nagayama D. and M. Horita** (2014). "A Network Game Analysis of Strategic Interactions in the International Trade of Russian Natural Gas Through Ukraine and Belarus", *Energy Economics*, No. 43, pp. 89-101.
- Piraveenan M., Uddin S., and K.S.K. Chung** (2012). "Measuring Topological Robustness of Networks Under Sustained Targeted Attacks". *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, Vol.1,pp. 38-45.
- Serrano M.A. and M. Boguna** (2003). "Topology of the World Trade Web" *Physical Review E*, No. 68, 015101(R).
- Sgrignoli P., Metulini R., Schiavo S. and M. Riccaboni** (2015). "The Relation Between Global Migration and Trade Networks", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 417, pp. 245-260.
- Shaffer B.** (2012). "Natural Gas Supply Stability and Foreign Policy", *Energy Policy*, Vol. 56, pp. 114-125.
- Smith D.A. and D.R. White** (1992). "Structure and Dynamics of the Global Economy: Network Analysis of International Trade 1965-1980", *Social Forces*, No. 70, pp. 857-893.

**Sun Q., Gao X., Zhong W. and N. Liu** (2017). "The Stability of the International Oil Trade Network from Short-Term and Long-Term Perspectives", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 482, pp. 345-356.

**Zhang H.Y., Ji Q. and Y. Fan** (2014). "Competition, Transmission and Pattern Evolution: A Network Analysis of Global Oil Trade", *Energy Policy*, Vol. 73, pp. 312-322.

**Zhang J., Cui Z. and L. Zu** (2013). "The Evolution of Free Trade Networks", *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 38, pp. 72-86.

**Zhong W., An H., Gao X. and X. Sun** (2014). "The Evolution of Communities in The International Oil Trade Network", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, No. 213, pp. 1-19.