تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۹، آذر ۱۴۰۰ (ص ۲۴۵۵-۲۴۴۱)
(علمی - پژوهشی)
https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.326710.669016

Assessing the Effect of the Basket of Benefits on the Interaction between Transboundary River Countries: Application of Evolutionary Game Theory

FAHIMEH MIRZAEI-NODOUSHAN[1], OMID BOZORG-HADDAD[1*]
1. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran.
(Received: July. 6, 2021- Revised: Aug. 21, 2021- Accepted: Aug. 23, 2021)

ABSTRACT

Transboundary Rivers are important common water resources that could bring benefit set or basket of benefits in areas of social, environmental, commercial, and political, for all countries located in the shared basin. The basket of benefits gained from the cooperation between countries effectively achieves the desired stable point of interaction, which is not considered in many studies in this field. In this paper, a model was presented based on evolutionary game theory in which the strategies of countries in using water of a transboundary river were analyzed and evaluated. Evolutionary stable strategies (ESS) were examined and countries' behaviors were analyzed based on changes in their revenue interests. This model was applied to a basin shared with three countries and provided a framework for recognizing the behavior and management of countries' interests depending on whether they are upstream or downstream. Finally, numerical simulation was done to examine the evolutionary process of strategies and the effect of parameters on interactions between countries. The results of the simulation demonstrated the significant effect of the upstream country's basket of benefits (benefits other than water consumption benefits) on the interactions between countries and the final strategic stable point. Upstream country's basket of benefits obtained from choosing cooperation strategy was changed to -1, -2, 2, and 5 percent compared to its water benefit obtained from choosing non-cooperation strategy by upstream country. The speed of convergence of the possibility of cooperation or non-cooperation of the upstream country was examined. It was concluded that even a one percent increase in the basket of benefits related to the water benefit would be lead to tripartite cooperation between countries. These results can be a theoretical guide for countries living in a transboundary river basin to interact with each other considering the role of benefits other than water benefits.

Keywords: Transboundary River, Evolutionary Game Theory, Stable Strategy, Tripartite Game.

*Corresponding Author's Email: OBHaddad@ut.ac.ir.

بررسی اثر بسته سودها بر تعامل بین کشورهای حوضه رودخانه فرامرزی: کاربرد نظریه بازی تکاملی

فهیمه میرزائی ندوشن[1]، امید بزرگ‌حداد[1*]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۵- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۳۰- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۱)

چکیده

رودخانه‌های فرامرزی منابع آب مشترک با اهمیتی هستند که می‌توانند مجموعه منافع در زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاسی برای همه کشورهای ساکن در حوضه به همراه آورند. مجموعه سودهای به‌دست آمده از همکاری بین کشورها برای رسیدن به نقطه تعامل پایدار مطلوب بسیار موثر است که در بسیاری از تحقیقات پیرامون این زمینه مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در این تحقیق یک مدل بر پایه نظریه بازی تکاملی ارائه شد که در آن راهبردهای کشورها در بهره‌برداری از رودخانه فرامرزی تحلیل و ارزیابی شد. همچنین راهبردهای پایدار تکاملی (ESS) بررسی و رفتار کشورها براساس تغییرات سودهای دریافتی آن‌ها تحلیل شدند. این مدل برای یک حوضه دارای سه کشور ساکن به کار برده شد و چارچوبی برای شناخت رفتار و مدیریت منافع کشورها بسته به این که بالادست یا پایین‌دست هستند، فراهم کرد. در انتها شبیه‌سازی عددی برای بررسی فرآیند تکاملی راهبردها و تأثیر پارامترها بر تعاملات بین کشورها اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده اثر قابل ملاحظه بسته سودهای کشور بالادست (سودهای غیر از سود بهره برداری از آب رودخانه) بر تعاملات بین کشورها و نقطه پایدار راهبردی نهایی بود. بسته سودهای دریافتی کشور بالادست حاصل از همکاری با کشورهای پایین‌دست به مقدار ۱-، ۲-، ۲ و ۵ درصد نسبت به مقدار سود آبی حاصل از عدم همکاری کشور بالادست تغییر داده و سرعت همگرایی احتمال عدم همکاری یا همکاری کشور بالادست بررسی شد. نتیجه شد حتی افزایش یک درصدی در بسته سودها نسبت به مقدار سود آبی می‌تواند منجر به همکاری سه جانبه کشورها شود. از این رو می‌توان استدلال کرد که در مسئله تخصیص آب رودخانه‌های فرامرزی توجه به نقش سایر منافع کشورها به غیر از منافع آبی می‌تواند جواب مسئله تخصیص را تحت تأثیر قرار دهد. این نتایج می‌تواند راهنمایی نظری برای کشورهای ساکن در حوضه یک رودخانه فرامرزی برای تعامل و همکاری با یکدیگر باشد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه فرامرزی، نظریه بازی تکاملی، راهبرد پایدار، بازی سه طرفه.

مقدمه

آب در یک حوضه فرامرزی از نظر اجتماعی، اقتصادی و زیست-محیطی اهمیت فراوانی دارد. افزایش جمعیت، توسعه شهری، کشاورزی و صنعتی و تغییر اقلیم و در نتیجه افزایش نیاز آبی، موجب آسیب‌پذیری بیش‌تر منابع آبی به خصوص در شرایط استفاده مشترک کشورها خواهد بود. حل مسئله اشتراک آب بین ذی‌نفعان در منابع آب مشترک بسیار دشوار است و گاه اختلافاتی بین کشورها به وجود می‌آورد. در حوضه‌های آبی فرامرزی که با بحران آب مواجه شده‌اند، کشورهای ساکن برای مصرف بیش‌تر آب با یکدیگر رقابت می‌کنند و این باعث شدت گرفتن بحران آب و صدمه به کمّیت و کیفیت آب می‌شود (Ganoulis *et al.*, 2013). از این رو لازم است کشورهای با منبع آب مشترک تصمیم‌های راهبردی اتخاذ کنند تا هم به سود خود و هم به سود حوضه باشد و در این راستا هر کشور ممکن است با سایر کشورها راهبرد همکاری یا عدم همکاری را انتخاب کند.

حل مسئله اختلافات آب حوضه رودخانه فرامرزی ارتباط مستقیمی با مشخصات اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و زیست-محیطی دارد و در هر حوضه بخصوص راه حل ویژه خود را دارد. هم‌چنین هر چه تعداد کشورهای ساکن در یک حوضه افزایش یابند پیچیدگی مسئله افزایش خواهد یافت. بدیهی است که هر کشوری تمایل دارد که آب بیش‌تری از رودخانه مشترک مصرف کند، اما کشورها در مصرف آب رودخانه فرامرزی ناچارند منافع و مضرات بین‌المللی ناشی از مقدار مصرف خود از آب را نیز در نظر گیرند و همچنین کشورهای همسایه را از خود خشنود نگه دارند (Ganoulis *et al.*, 1996). اولین مورد مهم در حل اختلاف آبی در رودخانه‌های فرامرزی شناخت مشخصه‌های مسئله و تحلیل

* نویسنده مسئول: obhaddad@ut.ac.ir

آن‌هاست. در حل مسئله اختلاف آب، شناخت و تحلیل راهبرد-های کشورها برای رسیدن به یک نتیجه مطلوب و با منفعت مناسب برای همه کشورها ضرورت دارد.

در مسئله حل اختلاف در رودخانه‌های فرامرزی تمرکز تحقیقات بر روی تخصیص کمّی آب رودخانه به کمک مدل‌های بهینه‌سازی و روش‌های نظریه بازی بوده است، به طوری که هدف مشترک این دسته تحقیقات تخصیص منصفانه آب و منافع جانبی آن بین ذی‌نفعان بوده است. به طور مثال در تحقیقی برای حل مسائل آبی فرامرزی در حوضه سد گوانتینگ[1] بین دو شهر در شمال چین از روشی بر پایه نظریه بازی‌ها استفاده نمودند. برای رسیدن به منافع بیشینه از راه‌حل‌های نظریه بازی نش[2] و هسته[3] برای بازی‌های همکارانه استفاده شد و در صورت عدم همکاری جریمه‌ای برای بالادست یا پایین‌دست مشخص شد (Zeng *et al.*, 2019).

در تحقیقات بالا و بسیاری از تحقیقات مشابه آن‌ها، یکی از فرض‌های مسئله این است که ذی‌نفعان رفتارهای منطقی دارند و تصمیمات منطقی خواهند گرفت به صورتی که عدم قطعیت در انتخاب راهبرد را در نظر نگرفته‌اند. برای رسیدن به همکاری متقابل بین ذی‌نفعان در گام اول لازم است که راهبردهای هر ذی‌نفع بررسی شود، چرا که ممکن است ذی‌نفعان به نقطه تعادل همکاری نرسند که بخواهند در مرحله بعد آب رودخانه را تقسیم کنند.

یک بازی تکاملی یک مدل ریاضی از تعامل راهبردی بین ذی‌نفعان طی زمان است. در نظریه تکاملی فرض بر این است که هر کدام از بازیکنان راهبردهایی دارند و انتخاب راهبردها پیامد نهایی بازیکنان را مشخص می‌کند (Friedman, 1991). در یک بازی تکاملی راهبردهای پایدار هر بازیکن در بازی شناخته و شرایطی که راهبردهای بازیکنان به نقطه تعادل برسند تعیین می‌شود. این نوع از نظریه بازی در زمینه‌های مختلف مثل تعاملات بین نهادهای شهری (Yu, 2019; Zhao, 2020; Fan and Hui, 2020)، تعاملات مربوط به شبکه‌های اینترنتی (Yuan *et al.*, 2020a; Hammoud *et al.*, 2020) و هم‌چنین مسائل مربوط به محیط زیست و منابع آب (Li, 2017; Sheng *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2020b) به کار رفته‌اند. در این دسته از تحقیقات به رفتار بازیکنان و پویایی راهبردهای آن‌ها توجه شده است و حساسیت راهبردها نسبت به پارامترهای مسئله تحلیل شده است.

Li (2017) تکامل پویای اکوسیستم آبی را توسط نظریه بازی تکاملی شبیه‌سازی نمود. تحلیل‌ها نشان دادند که انتخاب-های راهبردی بازیکنان در شرایط بخصوص کیفی آب اتخاذ می-شوند، به‌طوری که تعادل پایداری بین کیفیت آب و رفتار بازیکنان وجود دارد. ایشان نتیجه گرفت که دولت می‌تواند مالیات‌ها و یارانه‌های مناسب براساس وضعیت‌های مختلف کیفیت آب اعمال کند تا اکولوژی حوضه رودخانه احیاء گردد.

Sheng *et al.* (2019) یک تحلیل نظری از راهبردهای پایدار تکاملی برای مسئله مقررات زیست‌محیطی با بازیکنان شامل دولت محلی، دولت ملی و شرکت‌ها در چین ارائه دادند. این تحقیق عامل‌های مؤثر بر راهبردهای ذی‌نفعان و سیاست‌های محرک رقابتی را با به کارگیری یک مدل بازی تکاملی سه جانبه آزمون کردند. نتایج نشان دادند که هزینه‌های نظارت دولت ملی می‌تواند بر راهبرد پایدار تکاملی نهایی تأثیرگذار باشد. تلفات شغلی ناشی از مقررات زیست‌محیطی بر روی پیامدهای دولت ملی که وابسته به هزینه‌ها و سودهای راهبرد خود است اثر می-گذارد. هم‌چنین افزایش جریمه‌های تخلف و محرّک‌های مطلوب می‌تواند مشوق دولت محلی برای اعمال مؤثرتر مقررات زیست-محیطی باشد.

Gao *et al.* (2019) عامل‌های مؤثر بر سامانه تصحیح اکولوژیکی آبریز[4] را که در چین برای حل مسئله آلودگی آب فرامرزی توسعه داده شده است، مورد ارزیابی قرار دادند. از این رو تعاملات بین دولت‌های پایین‌دست، دولت‌های بالادست و دولت مرکزی در پروژه انتقال آب جنوب به شمال کانال شرقی[5] به کمک نظریه بازی تکاملی تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که دولت‌های بالادست و پایین‌دست بدون حمایت دولت مرکزی نمی‌توانند سامانه تصحیح اکولوژیکی آبریز را پیاده‌سازی کنند، مجازات دولت‌های پایین‌دست می‌تواند بر رفتارشان تأثیر زیادی بگذارد و دولت‌های بالادست در نتیجه پیاده‌سازی این سامانه حدود ۷۸٪ از منافع اکولوژیکی را به‌دست می‌آورند.

Chen *et al.* (2020) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از ایستگاه-های برقابی آبشاری[6] در حوضه یک رودخانه و افزایش منافع کل سامانه رودخانه از نظریه بازی تکاملی استفاده کردند. بنابراین یک مدل بازی سه جانبه برای مسئله‌ای با دو ایستگاه برقابی بالادست و یک ایستگاه برقابی پایین‌دست توسعه دادند. نتایج نشان دادند

1 Guanting
2 Nash
3 Core
4 Watershed Ecological Compensation System
5 Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project
6 Cascade Hydropower Stations

که تکامل راهبرد یک ذی‌نفع به رفتار دیگران و منافع خالص رفتار خودش بستگی دارد. این مسئله چهار وضع پایدار در تعاملات سه جانبه دارد به طوری که جبران خسارت توسط ایستگاه پایین‌دست بیش‌تر از تلفات تولید برق بالادست است. هم‌چنین منافع پروژه پایین‌دست بیش‌تر از مجموع جبران خسارت و منافع ریسک است.

Yuan *et al.* (2020b) یک مسئله آب فرامرزی با یک کشور بالادست و یک کشور پایین‌دست را با به کارگیری نظریه بازی تکاملی تحلیل کردند. نتایج نشان دادند که نقطه تعادل مسئله همیشه همکاری و صلح بین دو کشور نیست و نابرابری در هزینه-ها و تلفات ناشی از عدم همکاری در تصمیم‌گیری‌های ذی‌نفعان اثر می‌گذارد. البته در این تحقیق مجموعه سودهایی که کشورها می‌توانند از همسایگان دریافت کنند مورد اعتنا نبود و اثرات آن بر تعامل کشورها بررسی نشد.

Zhao *et al.* (2020) یک بازی تکاملی سه جانبه برای بررسی راهبردهای دولت، بانک‌ها و شرکت‌ها در مشارکت نوآوری در فناوری شبکه کم‌کربن ایجاد کردند. نتایج مثال‌های عددی نشان دادند که اگر دولت یارانه مربوط به نوآوری در این فناوری را قطع کند، هم‌چنان بازی به سمت تعادل بهینه پرتو همگرا می‌شود، هر چه هزینه نوآوری کم شود، فقط سرعت تکامل را کاهش می‌دهد و هرچه هزینه تجاری اعتبار شرکت‌ها توسط بانک‌ها بیش‌تر و هزینه تشویقی کمتر شود، سرعت تکامل کاهش می‌یابد و جهت تکامل تغییر می‌دهد.

همکاری در سطح حوضه آبریز فرامرزی می‌تواند از هماهنگی (مثل اشتراک اطلاعات) شروع شود و تا به تشریک مساعی (مثل تهیه برنامه‌های ملی سازگار) و اقدامات مشترک (مثل مالکیت مشترک دارایی های زیرساختی) گسترش پیدا کند. در برخی موارد همکاری در سطح حوضه منجر به ایجاد ساختارهای نهادی پایدار و تعامل مطلوب کشورها شده است. یک راهکار همکاری مبادله بسته‌های سودها می‌باشد که مجموع رفاه همه کشورهای ساکن در حوضه مشترک را می‌افزاید. این راهکار از توافق بر تخصیص حجمی آب رودخانه فراتر است و سودهای چندگانه برای همه کشورها را شناسایی می‌کند. به‌طور مثال هند و نپال در مورد شاخه هایی از رودخانه گنگ معاهداتی دارند که شامل مقررات مربوط به انواع پروژه‌های آبی از جمله آبیاری، برقابی، ناوبری، ماهیگیری و حتی جنگل‌کاری (کاشت درخت در نپال با حمایت هند برای محدود کردن رسوب‌گذاری پایین‌دست) می‌باشند. مدیریت همکارانه نشان می‌دهد که پتانسیل ایجاد سودها بالاتر از خود رودخانه است. همکاری کشورها می‌تواند سودهایی مثل سود سرمایه‌گذاری در پروژه‌های آبی مشترک، تجارت در منابع انرژی (ایجاد بازارهای برقابی نافع برای واردکنندگان و صادرکنندگان) و پیوندهای سیاسی که منجر به صلح عمومی در منطقه می‌شود را به همراه بیاورد (UNDP, 2006).

این تحقیق در نظر دارد فرآیند تصمیم‌گیری‌های سه کشور ساکن در یک حوضه رودخانه فرامرزی را طی زمان بررسی کند، به صورتی که یک کشور در بالادست و دو کشور در پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. همه ترکیب‌های راهبردهای سه کشور و منافع هر کشور تحت آن راهبردها در نظر گرفته می‌شوند و احتمال همکاری یا عدم همکاری هر کشور با توجه به منافع و هزینه‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور از مفهوم نظریه بازی تکاملی برای رسیدن به شناخت مراحل تصمیم‌گیری و رفتار کشورها در تعامل با یکدیگر استفاده می‌شود، که این مدل برای شبیه‌سازی تعامل بین کشورهای واقع در یک حوضه فرامرزی بسیار کاربردی است. چرا که می‌توان اثر هر یک از مؤلفه‌های منافع و هزینه‌های مربوط به تعاملات بین‌المللی حوضه آبریز فرامرزی را بر نتیجه نهایی تعاملات و راهبردهای پایدار مسئله مشخص کرد و با توجه به مؤلفه‌های مؤثر در مسئله به مدیریت این نوع حوضه‌ها پرداخت.

مواد و روش‌ها

نظریه بازی تکاملی

نظریه بازی تکاملی به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی موقعیت-های تعاملی اجتماعی استفاده شده است. بازی تکاملی هر گونه مدل تعامل راهبردی در طول زمان است که در آن (الف) راهبردهای با پیامد بهتر به مرور زمان باعث تغییر راهبردهای با پیامد پایین‌تر می‌شوتد هر چند که ممکن است در بین بازیکنان اینرسی وجود داشته باشد. البته در این بازی‌ها تغییرات تکاملی به‌طور ناگهانی اتفاق نمی‌افتند و به مرور راهبردها تکامل می‌یابند. در بازی تکاملی هر فرد از بین اقدامات یا رفتارهای ممکن خود انتخاب می‌کند و پیامد آن به انتخاب سایر بازیکنان بستگی دارد. با گذشت زمان توزیع رفتار مشاهده شده در بازی تکامل می‌یابد و راهبردهای مناسب‌تر رایج می‌شوند (Friedman, 1988).

نظریه بازی سنتی به بازی‌هایی اشاره دارد که در آن بازیکنان یک بازی راهبردی تصمیمات خود را هم‌زمان انتخاب می‌کنند یا در آن بازیکنان در زمان‌های مختلف تصمیم می‌گیرند

و هیچ بازیکنی از تصمیمات سایر بازیکنان اطلاعی ندارد (Myerson, 1991). در حالی که در بازی مبتنی بر نظریه بازی تکاملی، هر بازیکن تصمیمات خود را در طول زمان انتخاب می‌کند و هم‌چنین تصمیمات قبلی سایر بازیکنان را می‌داند.

آنچه بین نظریه بازی سنتی و تکاملی تفاوت قابل توجهی ایجاد کرده است ماهیت "بازیگر" یک بازی می‌باشد. در نظریه بازی سنتی، بازیگران بازی همان بازیکنان هستند که رفتارهای ثابتی طی بازی دارند. اما بازیگر اصلی در بازی تکاملی یک تکرارکننده[1] است که همانندسازی می‌کند و این تکرارکننده می‌تواند یک راهبرد باشد که مدام در حال تغییر است. به عبارت دیگر محوریت نظریه بازی تکاملی ماهیت احتمالاتی تصمیم‌گیری است (Gintis, 2000).

نظریه بازی سنتی یک بازی ایستا است و فرض می‌کند که بازیکنان به طور عقلانی تصمیم می‌گیرند. بر اساس این فرض همه بازیکنان از راهبردهای غالب که منجر به تعادل نش می‌شود استفاده می‌کنند (Elsner, 2014). تعادل نش پاسخی است که در آن هیچ کدام از بازیکنان، اگر سایر بازیکنان راهبرد خود را ثابت نگه دارند، با تغییر راهبرد خود نمی‌توانند پیامد خود را افزایش دهند. در مقابل، نظریه بازی تکاملی بر محدودیت عقلانی بازیکنان در یک بازی توجه دارد و روند پویایی برای راهبردها در نظر می‌گیرد (Taylor and Jonker, 1978). پس راهبردهای بازیکنان ثابت نیست و با تکرار مکرر بازی تغییر خواهد کرد تا به یک مقدار پایدار نهایی تضمین شده برسد (مفهوم پایداری نقطه تعادل این است که بازیکنان راهبرد خود را تغییر نخواهند داد). در دنیای واقعی نیز فرض عقلانی بودن بازیکنان در مسائل مختلف همیشه درست نیست و تصمیم‌گیری انسان‌ها به ندرت به وسیله نظریه بازی‌ها به شکل سنتی قابل توصیف می‌باشند. از این رو نظریه بازی‌های تکاملی برای توصیف انتخاب‌ها در موضوعات طبیعی بشر که فرض عقلانی بودن رفتارها ضعیف‌تر است می‌تواند قابل استفاده باشد.

در نظریه بازی تکاملی، راهبرد بازیکنان به تعادل تکاملی منجر می‌شود. راهبرد پایدار تکاملی[2] (ESS) توسط Maynard Smith and Price (1978) به عنوان اصلاح تعادل نش برای به کارگیری بازی‌های تکاملی معرفی شد. ESS راهبردی است که نمی‌توان آن را با راهبردهای دیگر در یک بازی مکرر تغییر داد. در واقع نقطه ESS نقطه‌ای است که بر همه نقاط ممکن دیگر غلبه می‌کند، به این معنی که پیامد این نقطه از پیامدهای سایر نقاط بیش‌تر می‌باشد.

بازی تکاملی برای حوضه رودخانه فرامرزی

در این تحقیق به مسئله تعامل بین سه کشور همسایه ساکن در یک حوضه رودخانه فرامرزی پرداخته می‌شود. در این مسئله یک کشور بالادست رودخانه واقع شده است (کشور A) و دو کشور دیگر پایین‌دست رودخانه قرار دارند (B و C). کشور A می‌تواند حداکثر بهره را از رودخانه ببرد و سهمی برای کشورهای پایین‌دست در نظر نگیرد، از این رو مقدار بیش‌تری آب نصیبش می‌شود اما از جوانب سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و به ویژه زیست محیطی با کشورهای همسایه دچار مشکل خواهد شد و تبعات بعدی آن می‌تواند به طور مثال از دست دادن سودهای مربوط به مبادلات اقتصادی با کشورهای پایین‌دست یا اثرات منفی زیست محیطی ناشی از خشکسالی پایین دست چون ایجاد پدیده ریزگرد در منطقه باشد. همچنین فرض می‌شود کشورهای پایین‌دست B و C هر کدام مقدار مساوی از آبی که کشور بالادست از رودخانه رها کند، به دست می‌آورند و به طور قطع تمایل دارند که با کشور A از در دوستی وارد شوند و به منافع آبی دست یابند. کشورهای پایین‌دست نیز در صورت ایجاد تعارض بین کشورها می‌توانند از جنبه‌های دیگری به کشور بالادست زیان برسانند.

لازم به ذکر است پیامد کشورها شامل سودها و زیان‌ها به صورت مؤلفه‌های اقتصادی در نظر گرفته شده اند تا بتوان آن‌ها را به عنوان پارامترهای هم واحد در یک رابطه قرار داد و اثر آن‌ها را بر یکدیگر تحلیل نمود. از این رو اصطلاح سود و زیان در این پژوهش به معنای منافع و هزینه‌های اقتصادی وارد بر کشورها می‌باشد. منافع اقتصادی موجود در این مسئله دو دسته اند منافع حاصل از بهره برداری آب رودخانه که به اصطلاح به آن سود آبی گفته شده است و سایر منافع غیر از سود آبی شامل منافع سیاسی حاصل از پیوندهای سیاسی در منطقه، تجاری، زیست محیطی و اجتماعی که به صورت یک مؤلفه به نام بسته سودها معرفی شده است و در اثر همکاری یک کشور با سایر کشورها به آن کشور می‌رسد. زیان‌های اقتصادی این مسئله شامل هزینه‌های وارد آمده بر هر کشور در اثر عدم همکاری سایر کشورها می‌باشد که با نام زیان حاصل از عدم همکاری معرفی شدند. این هزینه‌ها نیز می‌تواند در اثر ناامنی به وجود آمده در منطقه، درگیری‌های سیاسی بین‌المللی و آسیب‌های معیشتی ساکنان منطقه باشد. بسته سودها حاصل از همکاری و زیان‌های حاصل از عدم همکاری به

1 Replicator

2 Evolutionary Stable Strategy

منظور نمایش اثر منافع و هزینه‌های مسئله تخصیص آب رودخانه فرامرزی به کار برده شده اند و ارزش گذاری اقتصادی آن‌ها در این مقاله انجام نشده است. در واقع هدف این تحقیق نمایش اثر این پارامترها بر پایداری تعاملات بین کشورها می‌باشد که در نتایج می‌توان اثر این پارامترها را در رسیدن به راهبردهای پایدار مشاهده نمود.

به‌منظور به کارگیری نظریه بازی تکاملی در مسئله تعاملات بین کشورها در حوضه فرامرزی، ابتدا فرضیات بازی تکاملی با توجه به بازیکنان و راهبردهای آنان تشریح می‌گردد. سپس ماتریس پیامد بازی که نشان دهنده ترکیب‌های مختلف راهبردهای بازیکنان است، ارائه و در بخش دیگری فرمول بندی پیامدها در هر وضعیت ماتریس پیامد، پیامدهای برازش[1] و متوسط پیامدهای برازش هر کشور تعیین می‌شوند. در مرحله بعد برای تعیین نقاط تعادل مسئله لازم است معادلات پویای تکرارکننده[2] کشورها محاسبه شوند. در نهایت به کمک تعیین مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی نقاط تعادل ESS و شرایط رسیدن به این نقاط تعادل مشخص می‌شوند.

فرضیات بازی تکاملی

برای حل مسئله به کمک نظریه بازی تکاملی ابتدا لازم است یک مدل بازی تکاملی از تعامل بین کشورهای ساکن در حوضه یک رودخانه فرامرزی تشکیل داد. به این منظور فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند (Li, 2017; Sheng *et al*., 2019; Gao *et al*., 2019; Chen *et al*., 2020; Yuan *et al*., 2020b):

فرض ۱: فرض می‌شود که سه بازیکن منطقی[3] شامل کشورهای A، B و C در بازی وجود دارند. هر بازیکن در بازی تکاملی سه جانبه لزوما عقلانی یا منطقی رفتار نمی‌کند. به این معنی که راهبردهای آن‌ها در طول بازی تغییر می‌کند و در مسئله به صورت احتمال انتخاب راهبرد برای هر کشور آورده می‌شود. هر سه بازیکن درصدد بیشینه کردن سودهای خود هستند، که به عبارت دیگر این بازی از نوع نظریه بازی غیرمشارکتی است و ائتلافی بین بازیکنان به وجود نمی‌آید.

فرض ۲: برای کشور A، دو راهبرد قابل انتخاب است: کشور A می‌تواند با کشورهای پایین‌دست سازش کند و بخشی از آب رودخانه را برای کشورهای B و C رها کند (راهبرد همکاری). در نتیجه هیچ سود آبی به دست نخواهد آورد زیرا از آب کم‌تری بهره‌مند می‌شود. در عوض از بسته سودهای حاصل از این همکاری یعنی B_{1j} بهره‌مند خواهد شد. در مقابل کشور A می‌تواند به اختلاف و درگیری با کشورهای پایین‌دست بپردازد و هیچ آبی برای آن‌ها رها نکند (راهبرد عدم همکاری). در این صورت سود آبی W_1 به دست می‌آورد و از سایر منافع ناشی از همکاری و دوستی با کشورهای همسایه بی‌نصیب می‌ماند. از طرفی با انتخاب راهبرد عدم همکاری به کشورهای پایین‌دست زیان C_{1j} را تحمیل می‌کند. احتمال انتخاب راهبرد همکاری برای کشور A برابر با $x \in [0,1]$ و احتمال انتخاب راهبرد عدم همکاری برای آن مقدار $1\text{-}x$ خواهد بود.

فرض ۳: برای کشور B، دو راهبرد قابل بیان است: کشور B می‌تواند در مقابل عملکرد کشور A صبر و تحمل داشته باشد (راهبرد همکاری) و بسته سودهای B_{2j} دریافت کند. می‌تواند با کشور A به اختلاف و درگیری بپردازد (راهبرد عدم همکاری) که در نتیجه بسته سود حذف خواهد شد و بعلاوه زیان‌های C_{2j} را به سایر کشورها تحمیل خواهد کرد. از طرفی در صورت انتخاب راهبرد همکاری توسط کشور A سود آبی W_2 نیز به کشور B خواهد رسید. احتمال اتخاذ راهبرد همکاری برای کشور B برابر با $y \in [0,1]$ و احتمال اتخاذ راهبرد عدم همکاری برای آن مقدار $1\text{-}y$ خواهد بود.

فرض ۴: برای کشور C، دو راهبرد مشابه کشور B وجود دارد: این کشور می‌تواند در مقابل عملکرد کشور A صبر و تحمل داشته باشد (راهبرد همکاری) و بسته سودهای B_{3j} را به دست آورد. می‌تواند با کشور A به اختلاف و درگیری بپردازد (راهبرد عدم همکاری) که در نتیجه بسته سودها حذف خواهد شد و بعلاوه زیان‌های C_{3j} را به سایر کشورها تحمیل خواهد کرد. از طرفی در صورت انتخاب راهبرد همکاری توسط کشور A سود آبی W_3 نیز به کشور C خواهد رسید. احتمال انتخاب راهبرد همکاری برای کشور C برابر با $z \in [0,1]$ و احتمال انتخاب راهبرد عدم همکاری برای آن مقدار $1\text{-}z$ خواهد بود. در جدول (۱) تمامی پارامترهای مسئله معرفی شده‌اند.

ماتریس پیامد این بازی که دارای تعداد 2^3 مجموعه پیامد است و شامل پیامدهای کشورها به ازای راهبردهای مختلف سه کشور است به‌صورت جدول (۲) آورده شده است (Chen *et al*., 2020; Zhao, 2020).

1 Fitness Payoff
2 Replicated Dynamic Equations
3 Rational

جدول ۱- پارامترهای بازی

بازیکن	پارامتر	تعریف
کشور A	x	احتمال همکاری کشور A با سایر کشورها
	W_1	سود آبی حاصل از عدم همکاری کشور A برای خود
	C_{12}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور A به کشور B
	C_{13}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور A به کشور C
	B_{11}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور A وقتی کشورهای B و C هر دو راهبرد همکاری دارند
	B_{12}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور A وقتی کشورهای B و C به ترتیب راهبرد همکاری و عدم همکاری دارند
	B_{13}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور A وقتی کشورهای B و C به ترتیب راهبرد عدم همکاری و همکاری دارند
	B_{14}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور A وقتی کشورهای B و C هر دو راهبرد عدم همکاری دارند
کشور B	y	احتمال همکاری کشور B با سایر کشورها
	W_2	سود آبی حاصل از همکاری کشور A برای کشور B
	C_{21}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور B به کشور A
	C_{23}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور B به کشور C
	B_{21}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور B وقتی کشورهای A و C هر دو راهبرد همکاری دارند
	B_{22}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور B وقتی کشورهای A و C به ترتیب راهبرد همکاری و عدم همکاری دارند
	B_{23}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور B وقتی کشورهای A و C به ترتیب راهبرد عدم همکاری و همکاری دارند
	B_{24}	بسته دریافتی سود حاصل از همکاری کشور B وقتی کشورهای A و C هر دو راهبرد عدم همکاری دارند
کشور C	z	احتمال همکاری کشور C با سایر کشورها
	W_3	سود آبی حاصل از همکاری کشور A برای کشور C
	C_{31}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور C به کشور A
	C_{32}	زیان حاصل از عدم همکاری کشور C به کشور B
	B_{31}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور C وقتی کشورهای A و B هر دو راهبرد همکاری دارند
	B_{32}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور C وقتی کشورهای A و B به ترتیب راهبرد همکاری و عدم همکاری دارند
	B_{33}	بسته سود دریافتی حاصل از همکاری کشور C وقتی کشورهای A و B به ترتیب راهبرد عدم همکاری و همکاری دارند
	B_{34}	بسته سود حاصل از همکاری کشور C وقتی کشورهای A و B هر دو راهبرد عدم همکاری دارند

جدول ۲- ماتریس پیامد بازیکنان در مدل بازی تکاملی

کشور A	کشور B	کشور C	
		همکاری (z)	عدم همکاری (1-z)
همکاری (x)	همکاری (y)	$(\prod_{A1},\prod_{B1},\prod_{C1})$	$(\prod_{A2},\prod_{B2},\prod_{C2})$
	عدم همکاری (1-y)	$(\prod_{A3},\prod_{B3},\prod_{C3})$	$(\prod_{A4},\prod_{B4},\prod_{C4})$
عدم همکاری (1-x)	همکاری (y)	$(\prod_{A5},\prod_{B5},\prod_{C5})$	$(\prod_{A6},\prod_{B6},\prod_{C6})$
	عدم همکاری (1-y)	$(\prod_{A7},\prod_{B7},\prod_{C7})$	$(\prod_{A8},\prod_{B8},\prod_{C8})$

فرمول‌بندی بازی تکاملی

براساس ماتریس پیامد آورده شده در جدول (۲) مجموعه‌ای کامل از ترکیب بین راهبردهای کشورها به‌صورت زیر قابل بیان است (Chen *et al*., 2020; Zhao, 2020):

(رابطه ۱)
$$(\prod_{A1},\prod_{B1},\prod_{C1})=(B_{11},B_{21}+W_2,B_{31}+W_3)$$

(رابطه ۲)
$$(\prod_{A2},\prod_{B2},\prod_{C2})=(B_{12}-C_{31},B_{22}+W_2-C_{31},W_3)$$

(رابطه ۳)
$$(\prod_{A3},\prod_{B3},\prod_{C3})=(B_{13}-C_{21},W_2,B_{32}+W_3-C_{23})$$

(رابطه ۴)
$$(\prod_{A4},\prod_{B4},\prod_{C4})=(B_{14}-C_{21}-C_{31},W_2-C_{32},W_3-C_{23})$$

(رابطه ۵)
$$(\prod_{A5},\prod_{B5},\prod_{C5})=(W_1,B_{23}-C_{12},B_{33}-C_{13})$$

(رابطه ۶)
$$(\prod_{A6},\prod_{B6},\prod_{C6})=(W_1-C_{31},B_{24}-C_{12}-C_{32},-C_{13})$$

(رابطه ۷)
$$(\prod_{A7},\prod_{B7},\prod_{C7})=(W_1-C_{21},-C_{12},B_{34}-C_{13}-C_{23})$$

(رابطه ۸)
$$(\prod_{A8},\prod_{B8},\prod_{C8})=(W_1-C_{21}-C_{31},-C_{12}-C_{32},-C_{13}-C_{23})$$

(رابطه ۹)

پیامدهای برازش برای کشور A با راهبرد همکاری و عدم همکاری به ترتیب برابر U_{11} و U_{12} می‌باشد که با توجه به جدول (۲) به قرار زیر هستند (Chen *et al*., 2020; Zhao, 2020):

(رابطه ۹)
$$\begin{aligned}U_{11}&=yz\prod_{A1}+y(1-z)\prod_{A2}+(1-y)z\prod_{A3}+(1-y)(1-z)\prod_{A4}\\&=yzB_{11}+y(1-z)(B_{12}-C_{31})+(1-y)z(B_{13}-C_{21})+(1-y)(1-z)(B_{14}-C_{21}-C_{31})\\&=y(B_{12}-B_{14}+C_{21})+z(B_{13}-B_{14}+C_{31})+yz(B_{11}-B_{12}-B_{13}+B_{14})+(B_{14}-C_{21}-C_{31})\end{aligned}$$

(رابطه ۱۰)
$$\begin{aligned}U_{12}&=yz\prod_{A5}+y(1-z)\prod_{A6}+(1-y)z\prod_{A7}+(1-y)(1-z)\prod_{A8}\\&=yzW_1+y(1-z)(W_1-C_{31})+(1-y)z(W_1-C_{21})+(1-y)(1-z)(W_1-C_{21}-C_{31})\\&=y(C_{21})+z(C_{31})+(W_1-C_{21}-C_{31})\end{aligned}$$

پیامدهای برازش برای کشور B با راهبرد همکاری و عدم همکاری (U_{21} و U_{22}) با توجه به جدول (۲) به‌صورت زیر قابل ارائه می‌باشند:

(رابطه ۱۱)
$$\begin{aligned}U_{21}&=xz\prod_{B1}+x(1-z)\prod_{B2}+(1-x)z\prod_{B5}+(1-x)(1-z)\prod_{B6}\\&=xz(W_2+B_{21})+x(1-z)(B_{22}+W_2-C_{32})+(1-x)z(B_{23}-C_{12})\\&+(1-x)(1-z)(B_{24}-C_{12}-C_{32})\\&=x(B_{22}+W_2-B_{24}+C_{12})+z(B_{23}-B_{24}+C_{32})+xz(B_{21}-B_{22}-B_{23}+B_{24})\\&+(B_{24}-C_{12}-C_{32})\end{aligned}$$

(رابطه ۱۲)
$$\begin{aligned}U_{22}&=xz\prod_{B3}+x(1-z)\prod_{B4}+(1-x)z\prod_{B7}+(1-x)(1-z)\prod_{B8}\\&=xz(W_2)+x(1-z)(W_2-C_{32})+(1-x)z(-C_{12})+(1-x)(1-z)(-C_{12}-C_{32})\\&=x(W_2+C_{12})+z(C_{32})+(-C_{12}-C_{32})\end{aligned}$$

پیامدهای برازش برای کشور C نیز با راهبرد همکاری و عدم همکاری به‌ترتیب با علامت U_{31} و U_{32} نشان داده می‌شوند و براساس جدول (۲) به قرار زیر هستند:

(رابطه ۱۳)

$$U_{31} = xy\prod_{C1} + x(1-y)\prod_{C3} + (1-x)y\prod_{C5} + (1-x)(1-y)\prod_{C7}$$
$$= xy(W_3 + B_{31}) + x(1-y)(W_3 + B_{32} - C_{23}) + (1-x)y(B_{33} - C_{13})$$
$$+ (1-x)(1-y)(B_{34} - C_{13} - C_{23})$$
$$= x(B_{32} + W_3 - B_{34} + C_{13}) + y(B_{33} - B_{34} + C_{23}) + xy(B_{31} - B_{32} - B_{33} + B_{34})$$
$$+ (B_{34} - C_{13} - C_{23})$$

(رابطه ۱۴)

$$U_{32} = xy\prod_{C2} + x(1-y)\prod_{C4} + (1-x)y\prod_{C6} + (1-x)(1-y)\prod_{C8}$$
$$= xy(W_3) + x(1-y)(W_3 - C_{23}) + (1-x)y(-C_{13}) + (1-x)(1-y)(-C_{13} - C_{23})$$
$$= x(W_3 + C_{13}) + y(C_{23}) + (-C_{13} - C_{23})$$

در نهایت متوسط درآمد کشورهای A، B و C که ترکیبی از مجموع پیامدهای برازش همکاری و عدم همکاری با راهبرد متناظرشان است، به ترتیب با $\overline{U}_1$، $\overline{U}_2$ و $\overline{U}_3$ نشان داده می‌شوند به‌طوری که:

$$\overline{U}_1 = xU_{11} + (1-x)U_{12}$$ (رابطه ۱۵)

$$\overline{U}_2 = yU_{21} + (1-y)U_{22}$$ (رابطه ۱۶)

$$\overline{U}_3 = zU_{31} + (1-z)U_{32}$$ (رابطه ۱۷)

راهبرد تعادل طبق معادله پویای تکرارکننده

رویکرد استاندارد برای مطالعه پویایی بازی‌های تکاملی معادله پویای تکرارکننده است (Hofbauer *et al*., 1979; Taylor and Jonker, 1978). این معادله بیان می‌کند که اگر در فرآیند بازی بازگشت یک راهبردِ واحد بالاتر از متوسط بازگشت راهبرد جمعیت باشد، آن راهبرد می‌تواند با فرآیند تکامل جمعیت سازگار شود و توانایی مقاومت کردن در برابر حمله به راهبرد جهش را دارد. بر همین اساس معادلات پویای تکرارکننده برای کشورهای A، B و C با نمایه‌های به‌ترتیب $G_1(x)$، $G_2(y)$ و $G_3(z)$ به قرار زیر می‌باشند:

$$G_1(x) = dx/dt = x(U_{11} - \overline{U}_1)$$
$$= x(1-x)\big(y(B_{12} - B_{14}) + z(B_{13} - B_{14}) + yz(B_{11} - B_{12} - B_{13} + B_{14}) + (B_{14} - W_1)\big)$$ (رابطه ۱۸)

$$G_2(y) = dy/dt = y(U_{21} - \overline{U}_2)$$
$$= y(1-y)\big(x(B_{22} - B_{24}) + z(B_{23} - B_{24}) + xz(B_{21} - B_{22} - B_{23} + B_{24}) + (B_{24})\big)$$ (رابطه ۱۹)

$$G_3(z) = dz/dt = z(U_{31} - \overline{U}_3)$$
$$= z(1-z)\big(x(B_{32} - B_{34}) + y(B_{33} - B_{34}) + xy(B_{31} - B_{32} - B_{33} + B_{34}) + (B_{34})\big)$$ (رابطه ۲۰)

تحلیل پایداری راهبرد تعادل

ترکیب همه راهبردهای ممکن در ماتریس پیامد (جدول ۱) آورده شده است که در این بخش پایداری راهبرد تعادل از ترکیب‌های موجود بررسی خواهد شد. در صورتی راهبردهای هر کشور به حالت پایدار قرار می‌گیرد که تمام معادلات پویای تکرارکننده برابر صفر شود. جواب‌های حاصل از مجموعه معادلات پویای تکرارکننده برابر صفر همان نقاط تعادل راهبردهای همه کشورها خواهد بود. برای مسئله مورد نظر این تحقیق یک سامانه پویای تکرارکننده ترکیبی از سه معادله ۱۸، ۱۹ و ۲۰ خواهیم داشت به طوری که $G_1(x) = 0$، $G_2(y) = 0$ و $G_3(z) = 0$. جواب این سامانه تعداد شانزده نقطه تعادل است که در بازی سه جانبه در یک لحظه رخ می‌دهد. بر اساس مطالعه Friedman (1991) جواب پایدار یک سامانه پویای تکرارکننده بازی تکاملی چند جانبه باید یک جواب تعادل نش باشد و فقط در نقاط تعادل (۰،۰،۰)، (۰،۰،۱)، (۰،۱،۰)، (۰،۱،۱)، (۱،۰،۰)، (۱،۰،۱)، (۱،۱،۰)، (۱،۱،۱) نقطه تعادل وجود دارد.

در بازی تکاملی لازم است تکنیک هایی مثل یافتن مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی یا تکنیک‌های پیشرفته‌تر مثل توابع لیاپانوف[1] برای یافتن ESS استفاده شود (Friedman, 1991). ماتریس ژاکوبی J برای سامانه پویای تکرارکننده در تعامل سه کشور به‌صورت زیر است (Chen *et al*., 2020; Zhao, 2020):

1 Lyapunov Functions

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial G_1(x)}{\partial x} & \frac{\partial G_1(x)}{\partial y} & \frac{\partial G_1(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial G_2(y)}{\partial x} & \frac{\partial G_2(y)}{\partial y} & \frac{\partial G_2(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial G_3(z)}{\partial x} & \frac{\partial G_3(z)}{\partial y} & \frac{\partial G_3(z)}{\partial z} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{bmatrix}$$

(رابطه ۲۱)

در نتیجه خواهیم داشت:

$$J_1=(1-2x)\big(y(B_{12}-B_{14})+z(B_{13}-B_{14})+yz(B_{11}-B_{12}-B_{13}+B_{14})+(B_{14}-W_1)\big)$$ (رابطه ۲۲)

$$J_2=x(1-x)\big((B_{12}+B_{14})+z(B_{11}-B_{12}-B_{13}+B_{14})\big)$$ (رابطه ۲۳)

$$J_3=x(1-x)\big((B_{13}-B_{14})+y(B_{11}-B_{12}-B_{13}+B_{14})\big)$$ (رابطه ۲۴)

$$J_4=y(1-y)\big((B_{22}-B_{24})+z(B_{21}-B_{22}-B_{23}+B_{24})\big)$$ (رابطه ۲۵)

$$J_5=(1-2y)\big(x(B_{22}-B_{24})+z(B_{23}-B_{24})+xz(B_{21}-B_{22}-B_{23}+B_{24})+(B_{24})\big)$$ (رابطه ۲۶)

$$J_6=y(1-y)\big((B_{23}-B_{24})+x(B_{21}-B_{22}-B_{23}+B_{24})\big)$$ (رابطه ۲۷)

$$J_7=z(1-z)\big((B_{32}-B_{34})+y(B_{31}-B_{32}-B_{33}+B_{34})\big)$$ (رابطه ۲۸)

$$J_8=z(1-z)\big((B_{33}-B_{34})+x(B_{31}-B_{32}-B_{33}+B_{34})\big)$$ (رابطه ۲۹)

$$J_9=(1-2z)\big(x(B_{32}-B_{34})+y(B_{33}-B_{34})+xy(B_{31}-B_{32}-B_{33}+B_{34})+(B_{34})\big)$$ (رابطه ۳۰)

زمانی یک نقطه تعادل سامانه پویای تکرارکننده نقطه ESS است که همه مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی J منفی باشند. مقادیر ویژه ماتریس J از حل معادله $|J-\lambda I|=0$ محاسبه شدند که $|...|$ همان دترمینان ماتریس است و نتایج علامت مقادیر ویژه به‌صورت جدول (۳) در هر نقطه تعادل آورده شده اند (Chen *et al.*, 2020; Zhao, 2020).

جدول ۳- علامت مقدار ویژه ماتریس ژاکوبی J برای نقاط تعادل

شماره نقطه	نقطه تعادل	علامت مقادیر ویژه	شرایط پایداری
۱	(۰،۰،۰)	$(N,+,+)$	نقطه ناپایدار
۲	(۱،۰،۰)	$(N,+,+)$	نقطه ناپایدار
۳	(۰،۱،۰)	$(N,-,+)$	نقطه ناپایدار
۴	(۰،۰،۱)	$(N,+,-)$	نقطه ناپایدار
۵	(۱،۱،۰)	$(N,-,+)$	نقطه ناپایدار
۶	(۱،۰،۱)	$(N,+,-)$	نقطه ناپایدار
۷	(۰،۱،۱)	$(N,-,-)$	نقطه با پایداری غیرقطعی
۸	(۱،۱،۱)	$(N,-,-)$	نقطه با پایداری غیرقطعی

+ به معنی مقدار مثبت مقدار ویژه ماتریس ژاکوبی، - به معنی مقدار منفی مقدار ویژه ماتریس ژاکوبی و N به معنی غیرقطعی بودن علامت مقدار ویژه ماتریس ژاکوبی

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، هیچ نقطه پایدار قطعی در این مسئله وجود ندارد. هرچند هر کدام از نقاط با پایداری غیرقطعی می‌توانند یک ESS باشند. وقتی دو کشور پایین‌دست همکاری کنند اما کشور بالادست عدم همکاری را پیش گیرد، در این صورت نقطه تعادل (۰،۱،۱) است به شرط آن که $B_{11}<W_1$ باشد. این یعنی سود آبی کشور بالادست بیشتر از بسته سودهای حاصل از همکاری سه کشور به کشور A باشد.

نقطه (۱،۱،۱) نیز می‌تواند یک نقطه ESS است، به عبارتی وقتی همه کشورها راهبرد همکاری را انتخاب کنند. نقطه (۱،۱،۱) یک نقطه پایدار خواهد بود اگر $B_{11}>W_1$ است. به این معنی که بسته سودهای کشور بالادست حاصل از همکاری با کشورهای همسایه بیش‌تر از سود آبی این کشور از رها نکردن آب برای سایرین باشد.

در نقاط (۰،۰،۰)، (۱،۰،۰)، (۰،۱،۰)، (۰،۰،۱)، (۱،۱،۰) و (۱،۰،۱) به‌علت وجود مقدار ویژه مثبت نقطه ناپایدار خواهد بود. در کل، دو سناریوی ممکن برای ایجاد تعادل در تعاملات سه کشور در یک حوضه رودخانه فرامرزی وجود دارد.

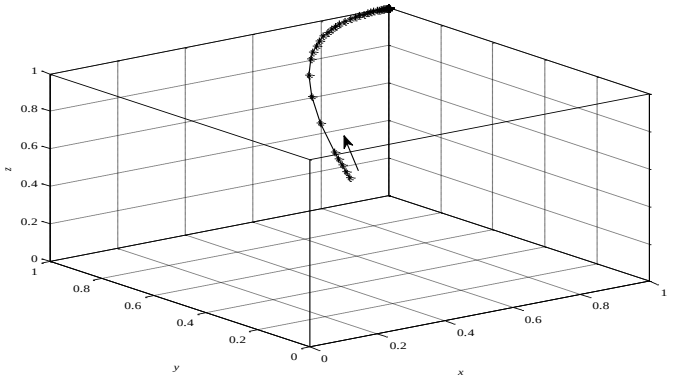
نتایج و بحث

در این قسمت فرآیند تکامل بازی سه جانبه حوضه رودخانه فرامرزی با توجه به پارامترهای مختلف شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. در واقع تصمیم‌گیری‌های کشورها و وضعیت‌های مختلف با تغییر مقادیر بسته‌های سود حاصل از همکاری کشورها بررسی می‌گردد. به این منظور از حل معادلات دیفرانسیل ۱۸، ۱۹ و ۲۰ که بیان کننده تغییرات احتمال راهبردهای کشورها نسبت به زمان است، در محیط متلب استفاده شد. به این ترتیب در هر دور بازی هر یک از کشورها در هر زمان راهبرد خود را بدون اطلاع از راهبرد سایر کشورها تعیین می‌کنند و بازده مربوط به آن زمان را دریافت می‌کنند. با هدف نمایش اثر بسته سودها و زیان‌ها بر تعامل بین کشورها و تعیین راهبردهای پایدار آن‌ها از اعداد فرضی

برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده شد. همان طور که در تعریف مسئله نیز تفسیر شد پارامترهای بسته سودها و زیان‌ها نماینده مجموعه‌ای از مؤلفه‌ها هستند و به صورت فرضی برای آن مقداری تعیین شده است. مقادیر پارامترها به‌صورت جدول (۴) فرض شده است و همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود نقطه ESS تحت این شرایط (۱،۱،۱) می‌باشد. در فرض اولیه مقدار پارامترها، کشور A دارای بیش‌ترین مقدار بسته سودهای دریافتی از سایر کشورها در صورت همکاری می‌باشد. مقدار سود آبی هم برای کشور A دو برابر کشورهای B و C خواهد بود چرا که در صورت همکاری کشور A تمام W_1 بین کشورهای B و C تقسیم می‌شود.

جدول ۴- مقادیر فرضی پارامترهای معادلات دیفرانسیل کشورها

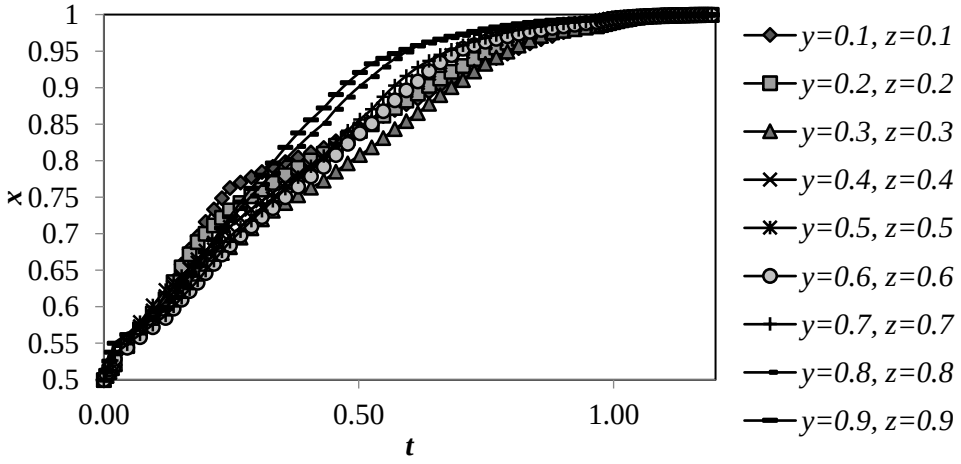
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
W_1	۱۰	B_{13}	۱۴	B_{24}	۱۲
W_2	۵	B_{14}	۱۳	B_{31}	۱۰
W_3	۵	B_{21}	۱۲/۹	B_{32}	۹/۸
B_{11}	۱۵	B_{22}	۱۲/۷	B_{33}	۹/۷
B_{12}	۱۴/۵	B_{23}	۱۲/۲	B_{34}	۹



شکل ۱- فرآیند تکاملی سه کشور با مقادیر فرضی اولیه

بررسی فرآیند تکامل راهبرد هر کشور

تحت شرایط آورده شده در جدول (۴) فرآیند تکاملی تعاملات کشورها شبیه‌سازی شد. احتمال اولیه x برای انتخاب راهبرد کشور A مقدار ۰/۵ در نظر گرفته شد و تأثیر تغییرات مقادیر اولیه احتمالات راهبرد کشورهای B و C یعنی y و z در طول زمان بررسی شد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقادیر اولیه سرعت همگرایی x را تغییر می‌دهند، به‌طوری که هر چه مقدار اولیه y و z بیشتر می‌شود x سریع‌تر شیب منحنی x افزایش می‌یابد. از مقایسه فرآیند تکامل احتمال x با فرآیند تکامل y و z نتیجه می‌شود که احتمال x دیرتر از y و z به نقطه نهایی پایدار می‌رسد.

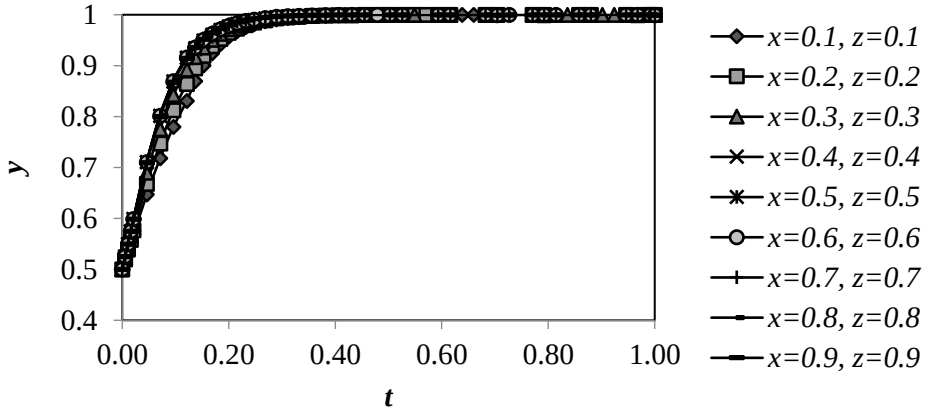


شکل ۲- فرآیند تکاملی مقدار x به طوری که y و z اولیه متغیرند

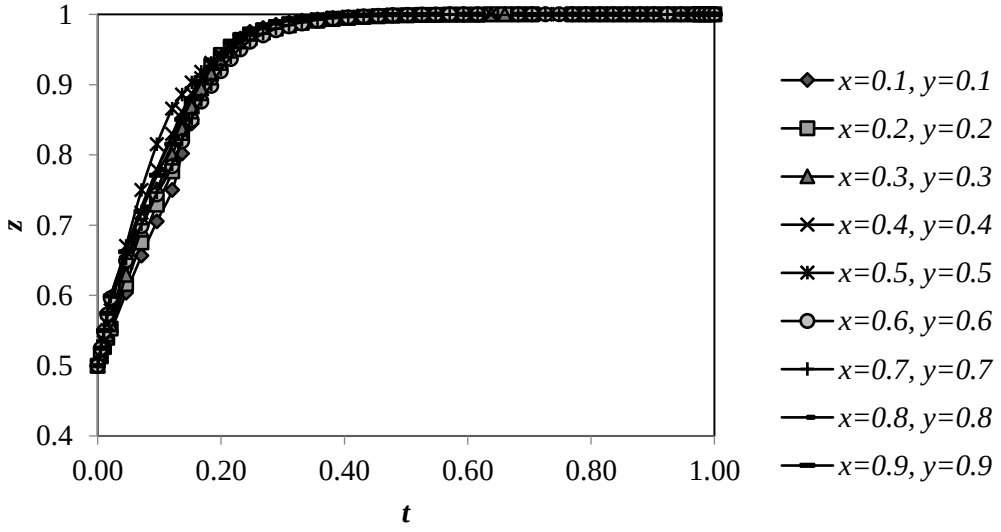
فرآیند تکامل y با مقدار اولیه ۰/۵ در طول زمان با توجه به تغییر مقادیر اولیه x و z به‌صورت شکل (۳) قابل رؤیت است. مقادیر اولیه مختلف x و z به تنهایی تقریبا تأثیری بر روی سرعت همگرایی y ندارند. مقدار احتمال همکاری کشور B سریع‌تر از

احتمال همکاری کشور A و C به یک همگرا می‌شود.

در بررسی فرآیند تکامل راهبرد کشور C مشابه کشور Bمشاهده می‌شود (شکل ۴) که با فرض مقدار اولیه ۰/۵ برای z و تغییر مقادیر اولیه x و y تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سرعت همگرایی مقدار نهایی z نخواهد داشت.



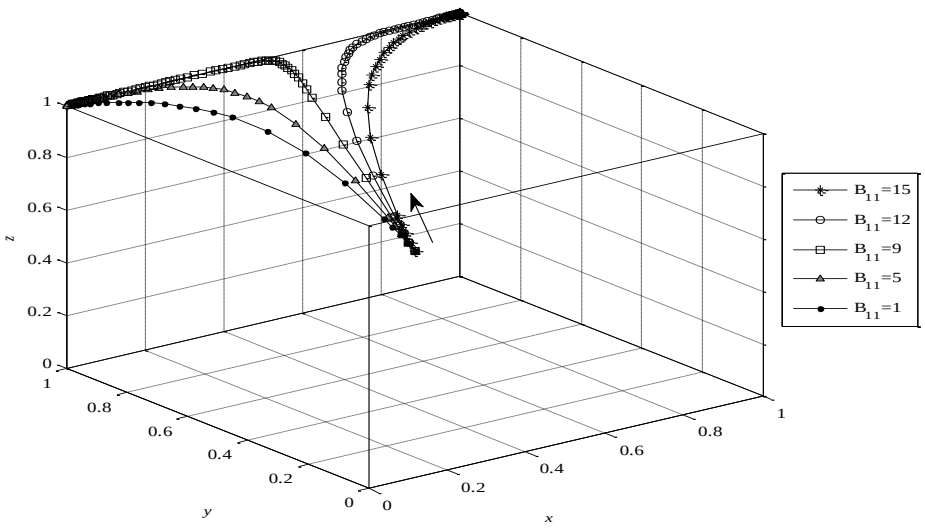
شکل ۳- فرآیند تکاملی مقدار y به طوری که x و z اولیه متغیرند



شکل ۴- فرآیند تکاملی مقدار z به طوری که x و y اولیه متغیرند

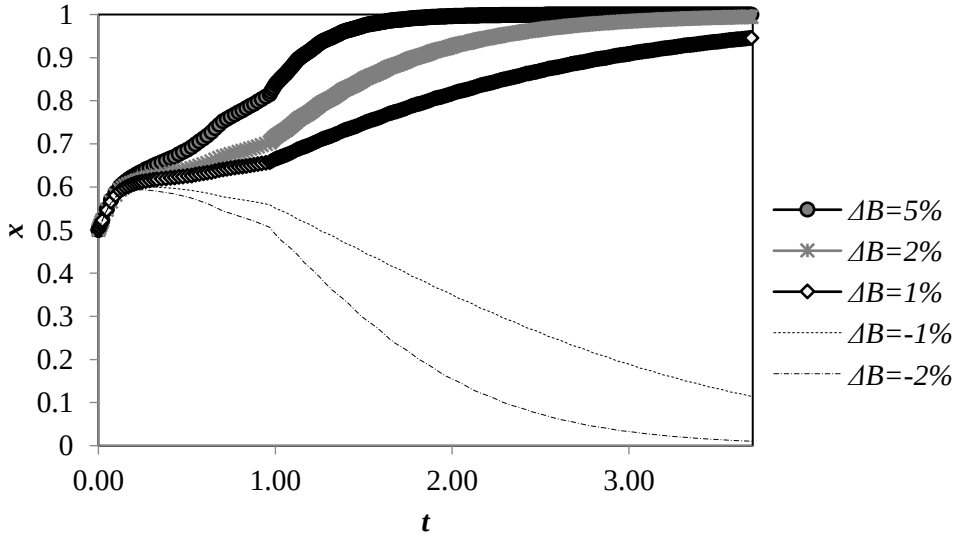
بررسی فرآیند تکاملی با تغییر بسته سودها

شبیه‌سازی فرآیند تکاملی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مسئله بر روی مشارکت کشورها در حوضه یک رودخانه فرامرزی انجام شد. مقادیر اولیه احتمالات راهبرد کشورها برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد و فرآیند تکامل با تغییر پارامتر بسته سودها مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که قبلا بیان شد بسته سودهای کشورها حاصل همکاری شان با سایر کشورها قابل تغییر است و هر کشور با توجه به شرایط همه کشورها و مقدار سود قابل دریافت از سایر کشورها می‌تواند با انتخاب سیاست‌هایی به سود بیش‌تر برسد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که نقطه پایدار سامانه در شبیه‌سازی اول (۱،۱،۱) است که با تغییر B_{11} منحنی احتمالات کشورها تغییرات متفاوتی دارد. تا زمانی که B_{11} (مقدار ۱۵ و ۱۲) از W_1 (مقدار ۱۰) بزرگ‌تر است، احتمال همکاری همه کشورها به حالت پایدار (۱،۱،۱) سوق پیدا می‌کند. اما وقتی مقدار B_{11} کم‌تر از W_1 می‌شود جهت منحنی به سمت عدم همکاری کشور A تغییر می‌کند چرا که سود آبی حاصل از عدم همکاری از بسته سودهای حاصل از همکاری با کشورهای پایین‌دست بیش‌تر است.



شکل ۵- اثر تغییر بسته سودها (B_{11}) بر فرآیند تکاملی و تغییر جهت راهبردها به سمت راهبردهای (0, 1, 1)

در مثالی دیگر مقدار B_{11} یا همان بسته سودهای کشور A در حالت همکاری سه جانبه به مقدار ۱-، ۲-، ۲ و ۵ درصد نسبت به مقدار سود آبی تغییر داده شد تا سرعت همگرایی کشور A به احتمال عدم همکاری یا همکاری مشاهده شود (شکل ۶). تا وقتی اختلاف مقدار بسته سودها از مقدار سود آبی منفی است تمایل کشور A به عدم همکاری (x=0) می‌باشد و با مثبت شدن این اختلاف (بیشتر شدن بسته سودها از سود آبی) راهبرد پایدار کشور A همکاری (x=1) می‌شود و هر چه بسته سودها بیشتر شود سرعت همگرایی کشور A به همکاری بیش‌تر می‌شود. قابل مشاهده است که چطور هر درصد افزایش بسته سود حاصل از همکاری کشور A احتمال همکاری نهایی را افزایش می‌دهد. کافی است کشورهای پایین‌دست مجموعا پتانسیل بسته سودهای کشور بالادست را در برابر همکاری این کشور به گونه‌ای افزایش دهند که حتی ۱ درصد از سود آبی این کشور از مصرف حداکثری آب رودخانه فرامرزی بیش‌تر باشد. در نتیجه هر کشور بالادستی قطعا ترجیح می‌دهد آب رودخانه را به اشتراک بگذارد و از سودهای ناشی از این اشتراک بهره‌مند گردد.



شکل ۶- اثر تغییر بسته سودهای کشور بالادست (B_{11}) بر سرعت همگرایی این کشور به نقطه پایدار همکاری یا عدم همکاری

نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل بازی تکاملی برای مطالعه فرآیند تکاملی تعاملات بین کشورهای ساکن در حوضه یک رودخانه فرامرزی ارائه می‌دهد. این مدل برای یک حوضه رودخانه فرامرزی که یک

کشور بالادست و دو کشور پایین‌دست در آن واقع هستند اعمال شد. راهبردهای پایدار تکاملی مسئله (ESS) بررسی و شرایط لازم برای هر نقطه پایدار تعیین شدند. در ادامه برای داشتن یک چشم انداز مشخص‌تر از فرایند تکاملی در یک حوضه رودخانه فرامرزی مثال‌های عددی آورده شد تا فرایند تکاملی هر راهبرد و اثرات بسته سودها بر فرایند تکاملی قابل مشاهده باشد.

در این مسئله دو نقطه تعادل برای سامانه پویای تکرارکننده به دست آمد که شامل نقاط (۱،۱،۰) و (۱،۱،۱) می‌باشد. براساس مثال‌های عددی و فرضیاتی که برای سه کشور در نظر گرفته شد، فرآیند تکامل راهبرد کشور B سریع‌تر از دو کشور دیگر همگرا می‌شود و فرآیند تکامل راهبرد کشور A دیرتر به نقطه پایدار همگرا می‌شود. هم‌چنین فرایند تکاملی با تغییر پارامترهای معادلات دیفرانسیل تکرارکننده مطالعه شد. بدیهی است که بهترین نقطه پایدار که به سود همه کشورهای ساکن در حوضه رودخانه باشد همکاری همه کشورها یعنی (۱،۱،۱) است. برای رسیدن به این نقطه ESS لازم است که بسته سودهای کشور بالادست از سود آبی این کشور بیش‌تر باشد. در نتیجه، کشورهای پایین‌دست برای رسیدن به سهم آب خود به ناچار از رودخانه فرامرزی باید سودهایی چون سود اقتصادی، اجتماعی و زیست-محیطی به کشور بالادست برسانند تا کشور بالادست ترغیب به رها کردن آب به پایین‌دست شود.

در این جا می‌توان اهمیت مذاکرات پیرامون حوضه‌های فرامرزی و سیاست‌های منتخب کشورها در قبال سایر کشورها را مشاهده نمود. وقتی کشورها در مورد یک حوضه فرامرزی بخصوص با یکدیگر پای میز مذاکره حاضر می‌شوند یعنی تمایل به مشارکت در این زمینه و حل اختلاف دارند. در این مواقع هر کشور بسته به آن که بالادست یا پایین دست باشد باید به شناسایی مجموعه منافع و هزینه‌های موجود در مسئله تخصیص آب رودخانه بپردازد و رفتار خود و طرف‌های مقابل را تحلیل کند. به طور مثال مؤلف اصلی مسئله در یک حوضه می‌تواند معیشت ساکنان، جنگل‌کاری پایین‌دست، احیای یک دریاچه مشترک یا ناوبری کشتی‌ها باشد که با گنجاندن آن در پیامدهای مسئله اشتراک آب رودخانه فرامرزی می‌توان به درک درستی از مسئله و یافتن جواب بهینه رسید. سپس هر کشور با توجه به شرایط و جواب‌های مسئله به سیاست‌گذاری و ارائه پیشنهادهای خود در مذاکرات اقدام می‌کند. در این صورت ضرورت کاربرد نظریه بازی تکاملی در این موارد قابل ملاحظه خواهد بود.

در این مقاله مدلی به شکل یک کشور بالادست و دو کشور پایین‌دست فراهم شد و فرایند تکاملی آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به جز این مدل، مدل‌های مختلفی را می‌توان بسته به منطقه مطالعاتی مورد نظر تعریف نمود که ترتیب کشورها متفاوت باشد. به طور مثال وقتی سه کشور به طور متوالی روی یک رودخانه فرامرزی واقع شوند یا وقتی دو کشور بالادست و یک کشور پایین‌دست باشند ماتریس پیامد تغییر می‌کند و شرایط متفاوتی برای نقاط ESS به‌دست خواهد آمد. اگر چه وضعیت متفاوتی در این مسائل به وجود می‌آید اما این مقاله می‌تواند راهنمایی کاربردی برای فراهم نمودن سایر مدل‌ها باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Chen, Y., Hu, Z., Liu, Q., and Chen, S. (2020). Evolutionary game analysis of tripartite cooperation strategy under mixed development environment of cascade hydropower stations. *Water Resources Management*, *34*, 1951–1970.

Elsner, W., Heinrich, T., and Schwardt, H. (2014). The microeconomics of complex economies: Evolutionary, institutional, neoclassical, and complexity perspectives. *Academic Press*.

Fan, K. and Hui, E.C.M. (2020). Evolutionary game theory analysis for understanding the decision-making mechanisms of governments and developers on green building incentives. *Building and Environment*, *179*.

Friedman, D. (1991). Evolutionary games in economics. *Econometrica*, *59* (3), 637–666, DOI: 10.2307/2938222.

Friedman, D. (1988). On economic applications of evolutionary game theory. *Journal of evolutionary economics*, *8* (1), 15-43.

Ganoulis, J., Duckstein, L., and Literathy, P. (1996). Transboundary water resources management: institutional and engineering approaches (Vol. 7). *Springer Science and Business Media*.

Ganoulis, J., Aureli, A., and Fried, J. (2013). Transboundary water resources management: a multidisciplinary approach. *John Wiley and Sons*.

Gao, X., Juqin, S., Weijun, H., Fuhua, S., Zhang, Z., Guo, W., Xin, Z., and Kong, Y. (2019). An evolutionary game analysis of governments' decision-making behaviors and factors influencing watershed ecological compensation in China. *Journal of Environmental Management*, *251*.

Gintis, H. (2000). Classical versus evolutionary game theory. *Journal of Consciousness Studies*, *7* (1-2), 300-304.

Hammoud, A., Mourad, A., Otrok, H., Abdel Wahab, O., and Harmanani, H. (2020). Cloud federation formation using genetic and evolutionary game theoretical models. *Future Generation Computer Systems*, *104*, 92–104.

Hofbauer, J., Schuster, P., and Sigmund, K. (1979), "A

note on evolutionary stable strategies and game dynamics." Journal of Theoretical Biology, 81 (3), 609–612, DOI: 10.1016/0022-5193(79)90058-4.

Li, X. (2017), "Evolutionary game simulation: A case in water resources management.' 2017 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2017), Atlantis Press.

Maynard Smith, J. M., and Price, G. R. (1973). The logic of animal conflict. *Nature*, *246* (5427), 15-18.

Myerson, R.B. (1991). Game theory: Analysis of conflict. *Harvard University Press*, London, England, DOI: 10.2307/j.ctvjsf522.

Sheng, J., Zhou, W., and Zhu, B. (2019). The coordination of stakeholder interests in environmental regulation: Lessons from China's environmental regulation policies from the perspective of the evolutionary game theory. *Journal of Cleaner Production*, *249*.

Taylor, P.D. and Jonker, L.B. (1978), "Evolutionarily stable strategies and game dynamics." Mathematical Biosciences, 40 (1–2), 145–156. https://doi.org/10.1016/0025-5564(78)90077-9.

Yu, H., Wang, W., Yang, B., and Li, C. (2019). Evolutionary game analysis of the stress effect of cross-regional transfer of resource-exhausted enterprises. *Complexity*, Article ID 7652430.

Yuan, H., Bi, Y., Fu, H.C., and Lam, A. (2020a). Stability analysis of supply chain in evolutionary game based on stability theory of nonlinear differential equation. *Alexandria Engineering Journal*, *59* (4), 2331–2337.

Yuan, L., He, W., Degefu, D.M., Liao, Z., Wu, X., An, M., Zhang, Z., Ramsey, T.S., (2020b), "Transboundary water sharing problem; a theoretical analysis using evolutionary game and system dynamics." Journal of Hydrology, *582*.

Zeng, Y., Li, J., Cai, Y., Tan, Q., and Dai, C. (2019). A hybrid game theory and mathematical programming model for solving trans-boundary water conflicts. *Journal of Hydrology*, *570* (1), 666-681.

Zhao, X., Bai, Y., Ding, L., and Wang, L. (2020). Tripartite evolutionary game theory approach for low-carbon power grid technology cooperation with government intervention. *IEEE Access*, *8*, 47357–47369.