

یک مدل تلفیقی مبتنی بر یادگیری تقویتی و استدلال مبتنی بر مورد برای افزایش کارایی سیستم‌های چندعامله

محمد رضا میبیدی^۲

بهروز معصومی^۱

سارا اسفندیاری^۱

^۱ دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران
^۲ دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، روشی با استفاده از استدلال مبتنی بر مورد، برای افزایش سرعت الگوریتم‌های یادگیری تقویتی در سیستم‌های چندعامله ارائه شده است. در روش پیشنهادی، مدل تلفیقی جدید با استفاده از سیستم‌های استدلال مبتنی بر مورد و یک تابع بهبودیافته‌ی جدید برای انتخاب عمل پیشنهاد شده است که، موجب تسریع در الگوریتم‌های مبتنی بر Q-Learning شده است. روش مذکور برای حل مسئله بازی‌های مارکوف همکارانه به عنوان یکی از مدل‌های سیستم‌های چندعامله مبتنی بر مارکوف استفاده شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، نشان می‌دهند که روش پیشنهادی ارائه شده نرخ همگرایی و سرعت یادگیری را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم Q-Learning، بازی‌های مارکوف، توزیع بولتزمن، سیستم‌های استدلال مبتنی بر مورد، سیستم‌های چندعامله.

۱- مقدمه

الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، در هر مرحله‌ی زمانی، به عامل اجازه می‌دهند که بر اساس مشاهدات خود از محیط، یک عمل را انجام دهد و به حالت جدیدی وارد شود، سپس یک سیگنال پاداش که نشان‌دهنده‌ی کیفیت عمل انتخاب شده است، به عامل داده می‌شود [۳]. تاکنون برای مدل‌سازی سیستم‌های چندعامله، مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است؛ مدل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف چند عامله^۲ (MMDP) یکی از این مدل‌ها است [۴]. این مدل، توسعه‌ای از فرآیندهای تصادفی مارکوف با چندین عامل بوده و در تحقیقات یادگیری تقویتی بسیاری به کار رفته‌اند. برای بدست آوردن راه‌حل بهینه در بازی‌های مارکوفی، الگوریتم‌های یادگیری تقویتی مختلفی به کار رفته است. هو و ولمن الگوریتمی برای حل بازی‌های مارکوف کلی ارائه دادند. آنها الگوریتمی به نام Nash-Q را پیشنهاد دادند که تحت شرایط خاص به سیاست تعادل نش همگرا می‌شود [۵]. معصومی و همکاران در سال ۲۰۱۲ الگوریتمی برای حل بازی‌های مارکوف همکارانه ارائه کردند که از اتوماتای یادگیر و مفهوم آنتروپی استفاده می‌کرد [۶]. در سال ۲۰۰۰ الگوریتم Distributed Q-Learning برای عامل‌های مستقل معرفی شده است.

استدلال مبتنی بر مورد^۱ (CBR) یک روش حل مساله مبتنی بر دانش است که بر پایه استفاده مجدد از تجربیات پیشین عمل می‌کند و از تحقیقات علوم شناختی پدیدار شده است [۱]. در این روش فرض بر این است مسائل مشابه می‌توانند راه‌حل‌های مشابهی داشته باشند. بنابراین، ممکن است مسائل جدید با روش‌های تجربه شده در مسائل قبلی قابل حل باشند. یک سیستم چندعامله^۲، شامل مجموعه‌ای از عامل‌های هوشمند و خودمختار است که هر یک به طور جداگانه با محیطی اشتراکی در ارتباط هستند، تا بتوانند به هدف مشخصی برسند. با توجه به این که عامل‌ها، در سیستم‌های چند عامله، با مسئله کمبود یا فقدان اطلاعات درباره محیط مواجه هستند و دانش کاملی درباره‌ی محیط وجود ندارد و معمولاً محیط نیز ناشناخته است، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

ثابت شده است که این الگوریتم به سمت تعادل نش همگرا می‌شود، با این حال در این الگوریتم از هیچ‌گونه مکانیزم هماهنگی بین عامل‌ها استفاده نشده است [۷]. در سال ۲۰۰۴، الگوریتمی به نام FMQ معرفی شده است که مقادیر هر عمل در استراتژی توزیع بولتزمن را توسط یک تابع ابتکاری، تغییر می‌دهد و بدین ترتیب باعث همگرایی زودتر به سمت پاسخ بهینه می‌شود [۸]. در [۹]، الگوریتمی به نام Hysteretic Q-Learning، معرفی شده است که با اضافه کردن پارامتر جدیدی به روش FMQ، باعث بهبود عملکرد این الگوریتم شده است. در [۱۰]، الگوریتمی به نام CAQL، که براساس الگوریتم Q-Learning عمل می‌کند، معرفی شده است. در [۱۱]، یک روش مبتنی بر الگوریتم Q-Learning مطرح شده است.

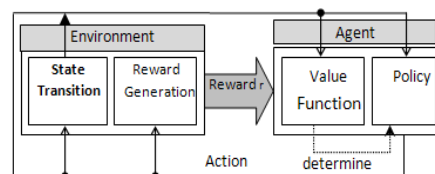
یکی از راه‌های افزایش سرعت الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، بهبود تابع انتخاب عمل است. در [۱۲، ۱۳] نمونه‌هایی از این توابع به صورت مکاشفه‌ای ارائه شده‌اند. این توابع برای انتخاب عمل در هر حالت به کار برده شده‌اند. با وجود اینکه این روش‌ها به صورت موفقیت‌آمیزی، برای حل بازی‌های مارکوف، مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ولی هنوز مسئله‌ی استفاده‌ی مجدد از تجربیات قبلی عامل‌ها در حل مسائل جدید، در این روش‌ها نادیده گرفته شده است. از آنجاییکه در سیستم‌های چندعامله، محیط ناشناخته است و عامل بایستی از طریق مشاهده، دانش خود را درباره‌ی محیط افزایش دهد، بنابراین مسئله‌ی حفظ و استفاده‌ی مجدد از دانش کسب شده‌ی قبلی، موجب افزایش سرعت یادگیری می‌شود.

در این مقاله، به منظور افزایش سرعت یادگیری سیاست بهینه برای بازی‌های مارکوف در حالت عامل‌های مستقل، یک روش تلفیقی جدید به نام CB-BHAQL پیشنهاد می‌شود. که در آن، از یک تابع بهبود یافته برای انتخاب عمل و تکنیک استدلال مبتنی بر مورد به عنوان ابزاری برای افزایش سرعت یادگیری، استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی محیط Grid World نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی، نسبت به روش‌های موجود کارایی بهتری از نظر سرعت دارد. در ادامه مقاله، ابتدا در بخش ۲ مفاهیم اولیه و در بخش ۳ روش پیشنهادی شرح داده می‌شود و در بخش ۴ ارزیابی الگوریتم ارائه شده و در بخش ۵ بررسی رفتار الگوریتم و تحلیل آن و بخش ۶ نتیجه‌گیری است.

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- یادگیری تقویتی

یک عامل یادگیر تقویتی، رفتارش را از طریق تعامل با یک محیط ناشناخته و مشاهده‌ی نتایج اعمالش، تعیین می‌کند [۵]. ایده‌ی یادگیری تقویتی در شکل ۱ آمده است. در شکل ۱، ابتدا عامل، حالت فعلی سیستم (S) را دریافت می‌کند. با استفاده از یک تابع تصمیم ساز (Policy) عمل a مشخص می‌شود و عامل پس از اعمال عمل a بر روی محیط، پاداش r را دریافت می‌کند. سپس با استفاده از مقادیر a و s و مقدار تابع یادگیر تقویتی توسط تابع ارزیابی به روزسانی می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، سعی می‌کنند که سیاست‌هایی را برای نگاشت حالت‌ها به عمل‌هایی که هر عامل باید در آن حالت انجام دهد، پیدا کنند.



شکل ۱- مدل یادگیری تقویتی

$$Q(S, a) = (1 - \alpha)Q(S, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(S', a')) \quad (1)$$

معمولاً برای انتخاب عمل در هر حالت (قسمت Policy)، از روش توزیع بولتزمن (رابطه‌ی ۲) استفاده می‌شود.

$$\pi(S) = \arg \max \left(\frac{e^{\frac{Q(S,a)}{\tau}}}{\sum_{i=1}^m e^{\frac{Q(S,i)}{\tau}}} \right) \quad (2)$$

که در آن، m تعداد اعمال مجاز برای حالت S و τ ثابت است و مقدار تابع ارزیابی حالت S را هنگامی که عمل a انجام می‌گیرد، نشان می‌دهد. در کاربردهای واقعی، تعیین مقدار دقیق τ برای همگرا شدن به سیاست بهینه، کار مشکلی است، از این رو در این مقاله، برای انتخاب عمل در هر حالت، رابطه‌ی ۳ پیشنهاد شده است. در رابطه‌ی ۳، m تعداد اعمال مجاز برای حالت S و $n(S,a)$ تعداد دفعاتی است که تاکنون عمل a انتخاب شده است و مقدار تابع ارزیابی حالت S را هنگامی که عمل a انجام می‌گیرد، نشان می‌دهد.

$$\pi(S) = \arg \max \left(\frac{e^{n(S,a)Q(S,a)}}{\sum_{i=1}^m e^{n(S,i)Q(S,i)}} \right) \quad (3)$$

Initialize $Q_t(S, a)$ arbitrarily
 Repeat (for each episode)
 Initialize S randomly
 Repeat (for each step)
 Select an action a_t using EQ (2)
 Execute the action a, observe $r(s, a)$, new state S'
 Update the Value of $Q_t(S, a)$ according to EQ (1)
 $S \leftarrow S'$
 Until S is the Terminal state
 Until Some Stopping Criterion Criteria is reached.

شکل ۲- الگوریتم Q-Learning

۲-۲- بازی‌های مارکوف

بازی مارکوف، تعمیم یافته مسئله تصمیم‌گیری مارکوف (MDP) به حالت

Q به کاررفته در آن است و همیشه مسئله‌ی استفاده مجدد از یادگیری های قبلی عامل‌ها نادیده گرفته شده است. به نظر می آید اگر در هر بار تکرار الگوریتم، دانش یادگرفته شده‌ی عامل از محیط (مقدار Q)، در جایی حفظ شود و از آن برای ادامه فرآیند یادگیری استفاده شود، سرعت یادگیری الگوریتم نیز افزایش پیدا می کند از اینرو در این مقاله الگوریتم یادگیری Q با مدل استدلال مبتنی بر مورد تلفیق شده است. حل یک مسئله با استدلال مبتنی بر مورد شامل مراحل: ایجاد توصیفی از مسئله، اندازه‌گیری میزان شباهت مسئله کنونی با مسائل قبلی حل شده ذخیره شده در پایگاه موارد، بازیابی یک یا چندین مسئله مشابه از داخل پایگاه موارد، سعی برای استفاده مجدد از راه‌حل ارائه شده توسط موارد بازیابی شده برای حل مسئله کنونی، می‌باشد.

ساختار موارد استفاده شده در الگوریتم پیشنهادی، یک دو تایی به صورت $\langle \text{Prob}, \text{Sol} \rangle$ است که Prob توصیف کننده مسئله و Sol راه‌حل ارائه شده برای مسئله است. توصیف کننده مسئله (Prob) حاوی مشخصات هر حالت است که به صورت $\text{Prob}(S) = \{m, \langle \text{Up}, \text{Down}, \text{Right}, \text{Left} \rangle, \text{index}\}$ تعریف می شود M تعداد اعمال هر حالت و مجموعه‌ی $\langle \text{Up}, \text{Down}, \text{Right}, \text{Left} \rangle$ اعمال مجاز برای هر حالت و index اندیس هر حالت است. راه‌حل ارائه شده برای مسئله $S = \langle \bar{E}, V \rangle$ است که در آن بردار \bar{E} به صورت $\bar{E} = (\bar{E}[1], \bar{E}[2], \dots, \bar{E}[m])$ لیستی از تجربیات جمع‌آوری شده از محیط توسط عامل برای حالت S بوده و هر بردار \bar{E} شامل یک چهارتایی $\langle a_i, n_i, Q_i, \pi_i \rangle$ است که a_i عمل مجاز برای حالت S و n_i تعداد دفعاتی که عمل a_i روزرسانی شده است و Q_i مقدار تخمین زده شده توسط رابطه‌ی ۱ و π_i احتمال وقوع عمل a_i که توسط رابطه‌ی ۳ تخمین زده می‌شود. V مجوز استفاده از راه‌حل ارائه شده توسط مورد بازیابی شده است و اگر هر یک از اعمال حالت S حداقل یک بار انتخاب شده باشند، است. در این صورت از راه‌حل مورد بازیابی شده برای حل مسئله جدید می‌توان استفاده کرد.

در الگوریتم پیشنهادی هر بار که عامل وارد حالت جدیدی می‌شود، مشابه‌ترین مورد به حالت جدید را از درون پایگاه موارد استخراج می‌کند و در صورت دارا بودن مجوز ($V=\text{True}$)، از مورد بازیابی شده، برای تعیین حالت بعدی استفاده می‌کند. برای بازیابی موارد مشابه حالت فعلی، از الگوریتم نزدیکترین همسایه^۱ استفاده شده است. فاصله اقلیدسی مورد جدید، با هر یک از موارد موجود در داخل پایگاه موارد (CB) طبق رابطه‌ی ۴ محاسبه شده و مشابه‌ترین مورد (c) بازیابی می‌شود و در صورت دارا بودن مجوز ($V=\text{True}$)، از راه‌حل مورد بازیابی شده برای حل مسئله جدید استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ آمده است.

$$\begin{aligned} \pi_{NN}(S) &= \operatorname{argmax}_{c \in \text{CB}} \text{Sim}(C, \text{Prob}, S, \text{Sol}) \\ &= \operatorname{argmax}_{c \in \text{CB}} \text{dist}(C, \text{Prob}, S, \text{Sol}) \end{aligned} \quad (4)$$

۴- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

برای ارزیابی کارایی الگوریتم CB-BHAQL از یک بازی Grid World مطابق شکل ۳ با ۳۰ حالت و دو عامل مستقل A_1 و A_2 که دارای هدف‌های جداگانه‌ای هستند، استفاده شده است. هدف ما این است که نشان دهیم آیا الگوریتم CB-BHAQL که تلفیقی از CBR و QL است و در آن از تابع بهبودیافته‌ی جدیدی برای انتخاب عمل استفاده شده است، عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم QL و CBR دارد؟ به همین منظور، الگوریتم CB-BHAQL را با دو الگوریتم (۱) الگوریتم Q-Learning (۲) الگوریتم Boltzmann-CBR که شبه کد آن شبیه شکل ۴ است و تنها تفاوت آن در ردیف ۵ از شکل ۴ است که برای انتخاب عمل به جای استفاده از تابع بهبودیافته‌ی جدید (رابطه‌ی ۳) از توزیع

چندعامله است. یکی از محیط‌های استفاده شده برای بازی‌های مارکوف چندعامله، بازی Grid World است که در [۵] معرفی شده است. در این بازی، دو عامل مستقل از مراحل ردیف پایین شروع به بازی می‌کنند و سعی می‌کنند که سلول هدفشان را در مراحل بالایی، پیدا کنند. یک عامل فقط می‌تواند در یک لحظه، به داخل یک سلول، حرکت کند. چهار عمل ممکن برای هر عامل وجود دارد: بالا، پایین، چپ، راست. اگر دو عامل سعی کنند که به خانه‌های یکسانی وارد شوند، بجز حالت هدف، به سلول قبلی خود بازگشت خورده و هر دو عامل، ۱- واحد جریمه می‌شوند. به محض اینکه یکی از عامل‌ها به حالت هدف رسید، بازی به پایان می‌رسد و عاملی که به حالت هدف رسیده است ۱۰۰+ واحد پاداش دریافت می‌کند.

هدف یک عامل این است که با مینیمم تعداد حرکات بتواند به حالت هدف برسد. یک سیاست (استراتژی)، دنباله‌ی اعمال انجام گرفته از حالت شروع به حالت پایان است. کوتاه‌ترین مسیری که اجازه دهد تا یک عامل بتواند هر چه زودتر به هدف برسد، یک استراتژی بهینه است. شکل ۳ نمونه‌ای از این بازی است. استراتژی بهینه در شکل ۳ شامل ۹ حرکت است.

G2					G1
A1					A2

شکل ۳- نمونه‌ای از بازی Grid World

۲-۳- استدلال مبتنی بر مورد

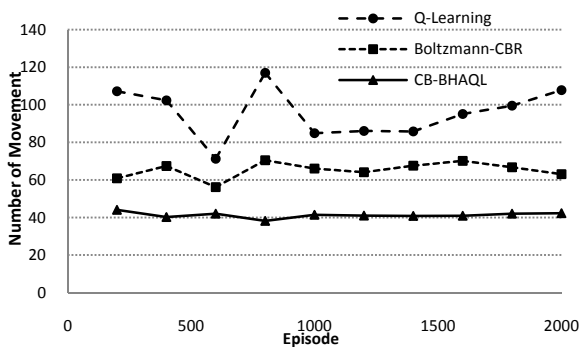
تکنیک استدلال مبتنی بر مورد (CBR) از تجربیات بدست آمده‌ی قبلی (Case) برای حل مسائل جدید استفاده می‌کند. در سیستم‌های استدلال مبتنی بر مورد، تجربیات بدست آمده از حل مسائل، درون پایگاه موارد^۲ (CB) ذخیره می‌شود. در این سیستم‌ها، برای حل مسئله جدید (C_{new})، شبیه‌ترین موارد به C_{new} از درون پایگاه موارد (CB)، استخراج می‌شود و از راه‌حل‌های ارائه شده توسط موارد استخراجی، برای حل مسئله جدید C_{new} استفاده می‌شود. اگر مورد مشابهی یافت نشد، C_{new} به عنوان مورد جدید وارد پایگاه موارد می‌شود [۱]. برخلاف تکنیک‌های سنتی مبتنی بر دانش، CBR بر روی تجربه حل مساله خاصی تمرکز می‌کند که برگرفته از موارد جمع‌آوری شده در پایگاه مورد است. این موارد، تجربه خاصی را در یک دامنه حل مساله نشان می‌دهند. باید توجه داشت که CBR یک راه‌حل قطعی را پیشنهاد نمی‌کند بلکه فرضیات و نظراتی را برای عبور از فضای راه‌حل، ارائه می‌کند.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش، یک روش جدید (الگوریتم) به منظور افزایش سرعت همگرایی در بازی‌های مارکوف، موسوم به CB-BHAQL ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی از استدلال مبتنی بر مورد و نیز تابع جدیدی برای انتخاب عمل در هر حالت به منظور افزایش سرعت همگرایی به سمت سیاست بهینه، استفاده شده است. در اکثر الگوریتم‌های ارائه شده برای یادگیری تقویتی که از روش یادگیری Q استفاده کرده‌اند، فرآیند یادگیری و سرعت آن فقط بستگی به رابطه یادگیری

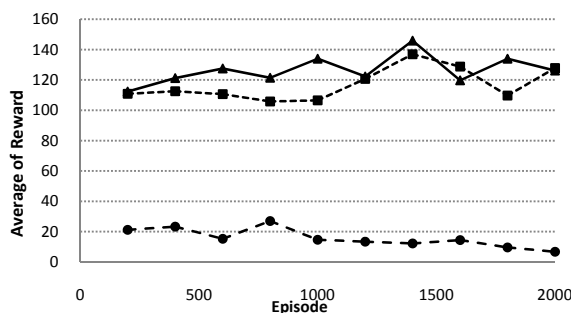
بولتزمن (رابطه‌ی ۲) استفاده شده است.

انتخاب مقدار نادرست برای آن در اکثر مسائل عملی مشکل است و در صورت انتخاب نادرست مقدار آن، موجب عدم همگرایی الگوریتم یادگیری می‌شود. علاوه بر آن در محیط‌های پویا و ناشناخته، عملی که به تعداد بیشتری انتخاب شده است و به تعداد بیشتری، درستی یا نادرستی آن مورد آزمایش قرار گرفته است، گزینه مناسبی برای انتخاب است. این در حالی است که نباید شانس انتخاب اعمال دیگر را نیز از آنها گرفت و بایستی به طریقی بین آنها تعادل ایجاد کرد. از اینرو ماهیت تابع پیشنهادی ما (رابطه‌ی ۳) این است که احتمال انتخاب عملی که دارای بیشترین سابقه‌ی بروزرسانی است، بیشتر است و در عین حال شانس انتخاب اعمال دیگر نیز از دست نرفته است و هر عملی به نسبت تعداد بروز رسانی‌اش و مفید بودنش، دارای شانس انتخاب جداگانه‌ای است. همه‌ی این عوامل موجب شده است که الگوریتم پیشنهادی CB-BHAQL نسبت به الگوریتم‌های دیگر به تعداد حرکات خیلی کمتری برای همگرایی نیاز داشته باشند.



شکل ۵- مقایسه سه الگوریتم از لحاظ تعداد حرکات لازم برای رسیدن به هدف در ۱۰۰۰ بار اجرای الگوریتم‌ها

آزمایش ۲. مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها از نظر میانگین پاداش تجمعی بدست آمده در هر اپیزود. شکل ۶ الگوریتم‌ها را از لحاظ میانگین پاداش تجمعی بدست آمده در هر اپیزود، مقایسه می‌کند. هر چه میانگین پاداش تجمعی بدست آمده برای الگوریتمی بیشتر باشد، الگوریتم کارتری خواهیم داشت. بهترین حالت زمانی است که هر دو عامل، همزمان به حالت هدف رسیده و ۲۰۰+ پاداش دریافت کنند. بر طبق شکل ۶ الگوریتم یادگیری Q بدلیل استفاده کردن از تابع بولتزمن برای انتخاب عمل و نیز عدم استفاده از تجربیات قبلی عامل‌ها پاداش کمتری بدست آورده است این در حالی است که استفاده از تکنیک CBR به طرز چشمگیری موجب بهبود پاداش‌های تجمعی بدست آمده شده است و الگوریتم CB-BHAQL با تعداد حرکات کمتر و بدست آوردن پاداش بیشتر، به سمت یک راه‌حل بهینه همگرا می‌شود و برتری الگوریتم پیشنهادی را نسبت به دو الگوریتم دیگر نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقایسه سه الگوریتم از لحاظ میانگین پاداش‌های بدست آمده در ۱۰۰۰ بار اجرای الگوریتم‌ها

```

1. Let t be the global time, n be the number of agents,  $\gamma$  the discount factor,  $CB_i = \phi$  an empty case base for each Agent
Set  $S = S' \in \mathcal{S}$  to the initial state of the system.
2. Repeat
3. (a) Set  $S = S'$ 
4. (b) for all agent  $i \in [1 \dots n]$  do
    if  $CB_i = \phi$  or add case_criterion(s) is true
        $CB = CB \cup C$  with  $c.Prob = s$  and
        $c.Sol = \text{empty\_solution}(i)$ 
5. for each  $j = \text{Sol}(s).m$  do
    Compute  $Sol(s).E[j].\mathcal{P}_i$  according to Eq(3)
    Set index  $X_i$  the Maximum value of them.
6. Select elementary action  $Sol(s).E[x_i].a_i$ .
7. Observe Successor state  $s' \in \mathcal{S}$  and reward  $r \in R$ .
8. for all agents  $i \in [1 \dots n]$  do
    a. Retrieve nearest neighbor according to Eq (4) of state  $s'$ .
    b. Set Learning Rate  $\alpha_i = \frac{1}{1 + Sol(s).E[x_i].n_i}$ 
    c. Set  $Sol(s).E[x_i].Q_i$  according to Eq(1).
    d. Increment  $Sol(s).E[x_i].n_i$  by one.
    e. Resort detrimentally the experience list Q in  $Sol(s).E$ 
9. end for
10. end for
11. Until Stop_Criterion () becomes true.
    
```

شکل ۴- شبه کد الگوریتم پیشنهادی CB-BHAQL

در آزمایش‌های انجام گرفته فرض شده است که، ۱۰۰۰ بار الگوریتم‌ها اجرا شده و میانگین نتایج برای الگوریتم‌ها به دست آمده‌اند. پارامترهای $\tau = 0.05$ و $\gamma = 0.7$ در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۵ و ۶ و ۷ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

آزمایش ۱. مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها از نظر تعداد حرکات لازم برای رسیدن به هدف. برای این منظور، تعداد حرکات لازم برای همگرایی الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نمودار شکل ۵ سه الگوریتم را از لحاظ تعداد حرکات لازم برای همگرایی به سمت سیاست بهینه، مقایسه می‌کند. هر چه تعداد حرکات لازم برای رسیدن به سیاست بهینه، کمتر باشد، الگوریتم کارتری خواهیم داشت. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که الگوریتم یادگیری Q به تنهایی به بیشترین تعداد حرکات برای همگرایی نیازمند است. حال اگر الگوریتم یادگیری Q را با تکنیک CBR تلفیق نماییم (الگوریتم Boltzman CBR) که در آن از تابع بولتزمن (رابطه‌ی ۲) برای انتخاب عمل عامل‌ها در هر مرحله استفاده شده است، تعداد حرکات لازم برای همگرایی کاهش پیدا کرده است و این بدلیل استفاده مجدد عامل‌ها از دانش یادگرفته شده در مراحل قبل است. حال اگر در الگوریتم Boltzman CBR به جای تابع بولتزمن، از تابع پیشنهادی (رابطه‌ی ۳) استفاده کنیم (الگوریتم پیشنهادی CB-BHAQL)، تعداد حرکات لازم برای همگرایی به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد و این به دلیل ۱- تلفیق الگوریتم یادگیری Q با تکنیک CBR برای استفاده مجدد عامل‌ها از تجربیات بدست آمده از محیط و ۲- استفاده از تابع پیشنهادی برای انتخاب عمل عامل‌ها در هر حالت است. زیرا در تابع پیشنهادی از هیچ‌گونه پارامتر خارجی برای انتخاب عمل استفاده نشده است این در حالی است که در توزیع بولتزمن از پارامتر خارجی T شده است. استفاده از پارامتر خارجی و

$\pi_1(S)$ رشد می‌کند. با توجه به مطالب قبلی، نتیجه می‌شود که بایستی با افزایش مقدار $Q_1(S, a)$ تابع $\pi_2(S)$ سریعتر از تابع $\pi_1(S)$ رشد کند. نمودار شکل ۱۲ نتیجه بدست آمده را تایید می‌کند.

۵-۲- تحلیل ریاضی

برای سادگی محاسبات توابع $\pi_1(S)$ و $\pi_2(S)$ را به ترتیب به صورت رابطه‌ی ۵ و ۶ بازنویسی می‌کنیم.

$$\pi_1(S) = e^{\frac{Q}{\tau}} \quad (۵)$$

$$\pi_2(S) = e^{nQ} \quad (۶)$$

آهنگ تغییر $\pi_1(S)$ نسبت به Q با پارامتر $\tau = 0.05$ در رابطه‌ی ۷ آمده است.

$$\Delta\pi_1(S) / \Delta Q = \frac{1}{\tau} e^{\frac{Q}{\tau}} = \frac{1}{0.05} e^{0.05Q} = 20e^{20Q} \quad (۷)$$

آهنگ تغییر $\pi_2(S)$ نسبت به Q در رابطه‌ی ۸ آمده است.

$$\begin{aligned} \Delta\pi_2(S) / \Delta Q &= d\pi_2(S) / dn \times dn/dQ \\ \Delta\pi_2(S) / \Delta Q &= Qe^{nQ} \times dn/dQ \end{aligned} \quad (۸)$$

با مقایسه‌ی رابطه‌ی ۷ و ۸ نتایج زیر بدست می‌آید.

تابع $\Delta\pi_1(S) / \Delta Q$ همواره مثبت است.

در رابطه‌ی ۶، بدلیل مثبت بودن Q مقدار تابع $\Delta\pi_1(S) / \Delta Q$ همواره مثبت است. و تابع $\Delta\pi_2(S) / \Delta Q$ همواره مثبت است.

طبق رابطه‌ی ۱ و نمودار شکل ۹ با افزایش n مقدار $Q(S, a)$ همواره افزایش می‌یابد. بنابراین $dn/dQ > 0$ و از طرفی $n > 0$ و $Q > 0$ است. در نتیجه،

$\Delta\pi_2(S) / \Delta Q$ همواره مثبت است. آهنگ رشد $\Delta\pi_1(S) / \Delta Q$ نسبت به $\Delta\pi_2(S) / \Delta Q$ کمتر است.

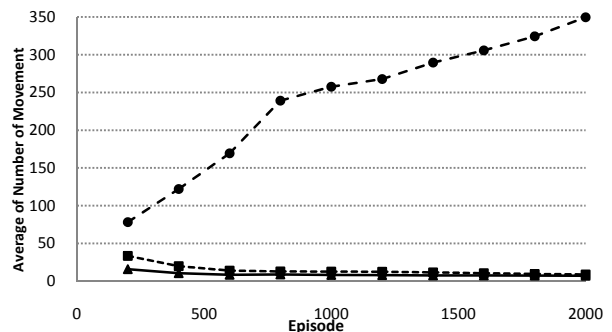
در رابطه‌ی ۶، e^{20Q} در مقدار ثابت ۲۰ ضرب شده است، این در حالی است که در رابطه‌ی ۷، e^{nQ} در متغیر Q ضرب شده است. با افزایش n مقدار Q افزایش می‌یابد. بنابراین، آهنگ رشد $\Delta\pi_1(S) / \Delta Q$ نسبت به $\Delta\pi_2(S) / \Delta Q$ کمتر است. نمودار شکل ۱۳ نیز نتیجه‌ی بدست آمده را تایید می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل تلفیقی جدیدی به نام CB-BHAQL برای حل بازی‌های مارکوفی بر اساس یادگیری تقویتی و سیستم‌های مبتنی بر مورد، که در آن از تابع جدیدی برای انتخاب عمل در هر حالت استفاده شده است، ارائه گردید. نتایج بدست آمده، با الگوریتم‌های موجود مقایسه شد. بر طبق نتایج بدست آمده، الگوریتم CB-BHAQL در مقایسه با الگوریتم‌های Q-Learning و Boltzmann CBR، بدلیل استفاده از تکنیک CBR و نیز تابع پیشنهادی جدید، هم از لحاظ سرعت همگرایی به پاسخ بهینه و هم از لحاظ میانگین پاداش تجمعی بدست آمده و نیز تعداد حرکات لازم برای همگرایی به سمت سیاست بهینه، از کارایی بسیار خوبی برخوردار است.

به‌طور کلی اگر در الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی Q برای انتخاب عمل عامل‌ها در هر حالت به جای توزیع بولتزمن از تابع پیشنهادی جدید استفاده شود سرعت یادگیری الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری Q بسیار افزایش خواهد

آزمایش ۳. مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها از نظر میانگین تعداد حرکات انجام شده، در ۱۰۰۰ بار اجرای الگوریتم‌ها. شکل ۷ نتایج را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که عامل‌ها هنگام استفاده از الگوریتم یادگیری Q به طور میانگین به تعداد حرکات بسیار زیادی برای همگرایی نیاز دارند این بدین دلیل است که در هر بار تکرار الگوریتم آموخته‌های قبلی عامل‌ها از محیط از بین می‌رود و عامل مجبور است دانش خود از محیط را از ابتدا کسب کند این در حالی است که اگر آموخته‌های قبلی عامل‌ها از محیط در هر بار تکرار الگوریتم در جایی ذخیره شود و از آن در تکرارهای بعدی نیز استفاده شود (الگوریتم CBR-Boltzmann) میانگین تعداد حرکات لازم برای همگرایی به طور بسیار چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و طبق شکل ۷ در الگوریتم پیشنهادی عامل CB-BHAQL برای یادگیری سیاست بهینه، به تعداد حرکات بسیار کمتری نسبت به دو الگوریتم قبلی نیاز دارد.



شکل ۷- مقایسه سه الگوریتم از لحاظ میانگین تعداد حرکات انجام شده در ۱۰۰۰ بار اجرای الگوریتم‌ها

۵- بررسی رفتار الگوریتم و تحلیل آن

در این بخش تحلیلی برای نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. که در آن برتری تابع $\pi_2(S)$ (رابطه‌ی ۳) نسبت به تابع $\pi_1(S)$ (رابطه‌ی ۲) به دو طریق ۱- آزمایش و ۲- تحلیل ریاضی ارائه گردیده است. می‌خواهیم نشان دهیم که در روش پیشنهادی تابع $\pi_2(S) = e^{nQ} / \sum_j e^{n_j Q_j}$ نسبت به تابع $\pi_1(S) = e^{(Q/\tau)}$ با سرعت بیشتری به سمت پاسخ بهینه همگرا می‌شود. به عبارت دیگر، آهنگ تغییر $\pi_2(S)$ نسبت به Q بیشتر از آهنگ تغییر $\pi_1(S)$ نسبت به Q است.

۵-۱- بررسی با استفاده از آزمایش‌های مختلف

برای نشان دادن برتری رفتار تابع انتخاب عمل پیشنهادی، الگوریتم CB-BHAQL برای حالت S_0 و عمل a_1 با توجه به مقادیر مختلف n مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر بدست آمده است.

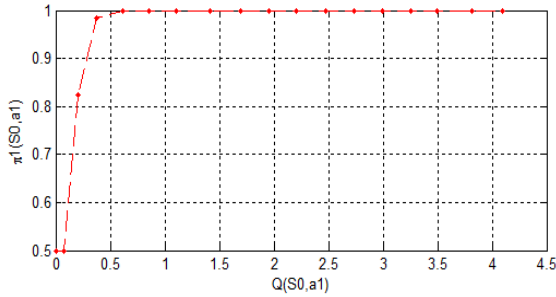
نتیجه‌ی ۱: با توجه به نمودار شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ می‌بینیم که با افزایش n رشد $\pi_2(S)$ خیلی سریعتر از رشد $\pi_1(S)$ است.

نتیجه‌ی ۲: نمودار شکل ۹ و ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش n مقدار تابع $Q(S, a)$ در رابطه‌ی ۱، افزایش می‌یابد.

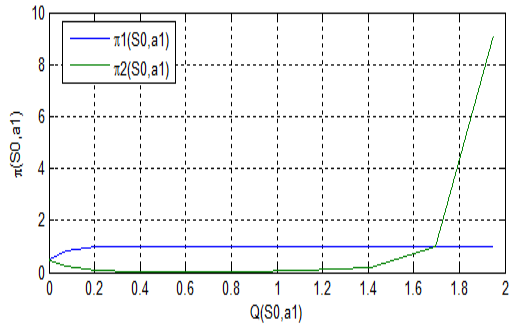
نتیجه‌ی ۳: نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار $Q(S, a)$ مقدار تابع $\pi_1(S)$ افزایش می‌یابد.

از آنجایی که همواره $\lim_{t \rightarrow \infty} n_t(S, a) = \infty$ است، طبق نتیجه‌ی ۲، مقدار $Q_t(S, a)$ افزایش می‌یابد و طبق نتیجه‌ی ۱، با افزایش n ، تابع $\pi_2(S)$ سریعتر از

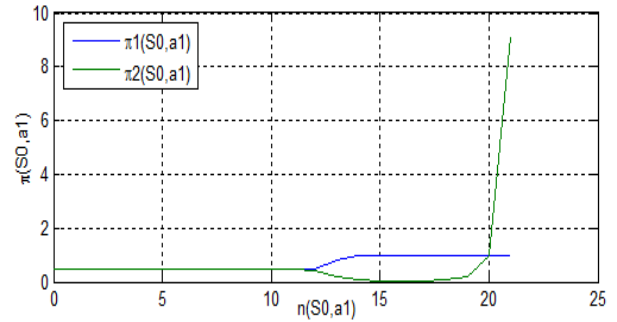
یافت. با اینحال به نظر می‌رسد که تابع پیشنهادی جدید، عمل خود را فقط بر اساس حالت فعلی عامل انتخاب می‌کند و اگر بتوان این تابع را طوری گسترش داد که برای انتخاب عمل عامل‌ها بجز حالت فعلی، حالت‌های همسایه‌ی حالت فعلی را هم در نظر بگیرد نتایج بهتری بدست می‌آید.



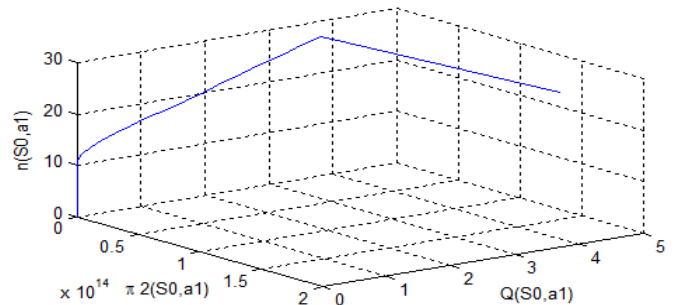
شکل ۱۲- بررسی رشد $\pi_1(S)$ بر حسب مقادیر مختلف $Q(S,a)$



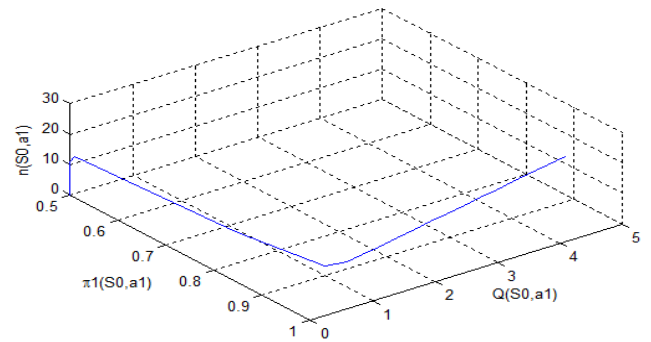
شکل ۱۳- بررسی رشد $\pi_1(S)$ و $\pi_2(S)$ بر حسب مقادیر مختلف $Q(S,a)$



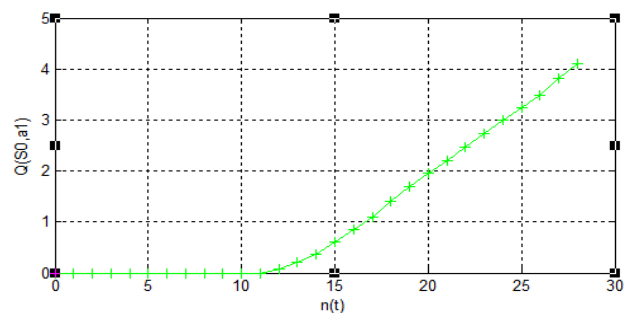
شکل ۸- بررسی رشد $\pi_1(S)$ و $\pi_2(S)$ بر حسب مقادیر مختلف n



شکل ۹- بررسی رشد $\pi_2(S)$ بر حسب مقادیر مختلف n



شکل ۱۰- بررسی رشد $\pi_1(S)$ بر حسب مقادیر مختلف n



شکل ۱۱- بررسی رشد $Q(S,a)$ بر حسب مقادیر مختلف n

مراجع

[1] R. A. C. Branchi, R. Raquel, and R. L. D. Mantaras, "Improving Reinforcement Learning by using Case Based Heuristics," *Proc, Int'l Conf. Case Based Learning (ICCBR)*, pp. 75-89, 2009.

[2] Y. Shoham, and K. Leyton-Brown, "Multiagent Systems: Algorithmic, Game theoretic and Logical Foundation," Cambridge University Press, 2009.

[3] C. Boutilier, "Sequential optimality and coordination in multi-agent systems," *Proc, Int'l Conf. Artificial intelligence*, vol. 99, no. 1, pp. 478-485, 1999.

[4] B. Masoumi, and M. R. Meybodi, "Learning Automata based Multi-agent System Algorithms for Finding Optimal Policies in Markov Games," *Asian Journal of Control*, vol. 14, no. 4, pp. 1-16, 2012.

[5] J. Hu, and M. Wellman, "Nash Q-Learning for General-Sum Stochastic Games," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 4, no. 2, pp. 1039-1069, 2003.

[6] B. Masoumi, M. R. Meybodi, and F. Abtahi, "Learning Automata based Algorithms for Finding Optimal Policies in Fully Cooperative Markov Games," *Proc, Conf. Przeglad Elektrotechniczny*, pp. 280-289, 2012.

[7] M. Laur, and M. Reidmiller, "An Algorithm for Distributed Reinforcement Learning in Cooperative Multi-agent Systems," *Proc, Int'l Conf. Machine Learning*, pp. 535-542, 2000.



محمد رضا میبودی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد اقتصاد به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۲ و ۱۳۵۶ از دانشگاه شهید بهشتی و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری علوم کامپیوتر به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۹ و ۱۳۶۲ از دانشگاه اوکلاهما آمریکا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. نامبرده قبل از پیوستنش به دانشگاه صنعتی امیرکبیر در سال‌های ۱۳۶۲ الی ۱۳۶۴ استادیار دانشگاه میثیگان غربی و در سال‌های ۱۳۶۴ الی ۱۳۷۰ دانشیار دانشگاه اوهایو در ایالات متحده آمریکا بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الگوریتم‌های موازی، پردازش موازی، محاسبات نرم و کاربردهای آن، شبکه‌های کامپیوتری و مهندسی نرم‌افزار. آدرس پست‌الکترونیکی ایشان عبارت است از:

mmeybodi@aut.ac.ir

اطلاعات بررسی مقاله:

تاریخ ارسال: ۹۰/۴/۱

تاریخ اصلاح: ۹۲/۵/۳

تاریخ قبول شدن: ۹۲/۵/۲۶

نویسنده مرتبط: دکتر بهروز معصومی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، قزوین، ایران.

[8] S. Kapetanakis, and D. Kudenko, "Reinforcement Learning of Coordination in Heterogenous Cooperative Multi-agent Systems," *Proc, IEEE Int'l Conf. Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pp. 1258-1259, 2004.

[9] L. Matignon, G. J. Laurent, and N. L. Front-Piat, "Hysteretic Q-Learning: An Algorithm for Decentralized Reinforcement Learning in Cooperative Multi-agent Teams," *Proc, IEEE Int'l Conf. Intelligence Robots and Systems (IROS)*, pp. 64-69, 2007.

[10] F. S. Melo, and M. I. Ribeiro, "Reinforcement Learning with Function Approximation for Cooperative Navigation Tasks," *Proc, IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation*, pp. 3321-2237, 2008.

[11] M. Lauer, and M. Riedmiller, "Reinforcement Learning for Stochastic cooperative Multi-agent Systems," *Proc, IEEE Int'l Conf. Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pp. 1514-1515, 2004.

[12] R. A. C. Bianchi, C. H. C. Ribeiro, and C. Costa, "Accelerating autonomous learning by using heuristic selection of actions," *Journal of Heuristics*, vol. 2, no. 2, pp. 135-168, 2008.

[13] R. A. C. Bianchi, C. H. C. Ribeiro, and C. Costa, "Heuristic selection of actions in Multiagent Reinforcement Learning," *Proc, IEEE Int'l Conf. Artificial Intelligence*, pp. 690-695, 2007.



سارا اسفندیاری در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر - نرم‌افزار خود را از دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکزی و در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین دریافت کرد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های چند عامله، یادگیری در سیستم‌های چند عامله داده کاوی و الگوریتم‌های موازی. آدرس پست‌الکترونیکی ایشان عبارت است از:

sara.esfandiari@gmail.com



بهروز معصومی در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر - نرم‌افزار خود را از دانشگاه شهید بهشتی تهران و در سال ۱۳۷۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب دریافت کرد. ایشان در سال ۱۳۸۹ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی کامپیوتر - نرم‌افزار از دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران گردید. نامبرده از سال ۱۳۷۷ تاکنون، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات دانشگاه آزاد اسلامی قزوین می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های چند عامله، یادگیری در سیستم‌های چند عامله، طراحی سیستم‌های پایگاه داده و محاسبات نرم. آدرس پست‌الکترونیکی ایشان عبارت است از:

masoumi@qiau.ac.ir

¹ Case Base Reasoning

² Multiagent System

³ Multi Agent Markov Decision Process

⁴ Case Base _ Best Heuristically Accelerated Q-Learning

⁵ Markov Decision Process

⁶ Evaluation Function

⁷ Case Base

⁸ Nearest Neighbour

⁹ Q-Learning