مجله علمی ـ پژوهشی «پدافند الکترونیکی و سایبری»
سال اول، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲، ص ۴۱-۳۳

ارائه الگوریتم‌های زیربهینه در تخصیص منابع اختلال راداری

حمزه علی‌محمدی[۱]، سید محمدرضا موسوی[۲*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی فناوری اطلاعات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت۹۱/۱۰/۹، پذیرش: ۹۲/۰۴/۰۹)

چکیده

فرماندهی و کنترل کارآمد صحنه‌های نبرد در جنگ الکترونیک، کلید اصلی در موفقیت نظامی به‌شمار می‌رود. مدیریت صحیحی که با اتخاذ تصمیم‌های بهینه و معقول خود، گره‌های کور در صحنه‌های نبرد بلادرنگ و غیربلادرنگ را می‌گشاید. در این مقاله سعی شده که با تمرکز بر روی برخی از مسائل ضروری در مدیریت صحنه‌های نبرد الکترونیکی، نتایج مفیدی در پشتیبانی از تصمیم این بخش مهم به‌دست آورده شود. در این زمینه توجه خود را به ارائه و ارتقاء الگوریتم‌هایی کارآمد در خصوص منابع اختلال راداری معطوف نموده و پاسخگوی این سؤال بوده که برای ایجاد حداکثر اختلال ممکن، چه الگویی در اختصاص اخلال‌گرهای خودی به رادارهای دشمن مناسب‌تر است؟ با مدل‌سازی و شبیه‌سازی الگوریتم‌های پیشنهاد شده در سازماندهی و در خصوص اخلال‌گرها، کارآمدی هر یک از آنها مورد نقد و بررسی قرار داده شده است.

واژه‌های کلیدی: پشتیبانی از تصمیم، جنگ الکترونیک، نظریه‌بازی، بهینه‌سازی الگوریتم، اختلال راداری، تخصیص منابع.

۱. مقدمه

مسئله تخصیص منابع می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت سیستم‌های چندعاملی به‌ویژه در حوزه‌های مرتبط با جنگ الکترونیک ایفا نماید. در این زمینه سعی شده تا با معرفی الگوریتم‌های مهمی در تخصیص منابع اختلال راداری در یک صحنه نبرد الکترونیکی، راه‌حل‌های به‌نسبت بهینه‌ای را پیش روی بخش فرماندهی و کنترل عملیات قرار داده شود. برای روشن‌تر شدن موضوع، فرض می‌شود که در یک صحنه نبرد الکترونیکی قرار گرفته‌ایم. از یک طرف اخلال‌گرهای خودی و از سوی دیگر رادارهای کنترل‌کننده تسلیحات هدایت شونده قرار گرفته‌اند. در این مقاله سعی بر این است به کمک الگوریتم‌های مورد نظر، به‌گونه‌ای تصمیم‌گیری شود که بتوان حداکثر اختلال ممکن توسط مجموعه اخلال‌گرهای خودی در مجموعه رادارهای دشمن به‌وجود آورده شود. بنابراین الگوریتم‌های پیشنهاد شده برای آنکه به‌خوبی بتوانند از عهده مسئله تخصیص منابع برآیند، باید ماتریس تصمیمی را ارائه دهند که به‌صورت نسبتاً بهینه مشخص نماید که کدام اخلال‌گر به کدام رادار باید اختصاص پیدا کند؟ باید اشاره شود که در تمام مباحث این مقاله فرض شده که هر یک از اخلال‌گرها توانایی ایجاد اختلال در تعداد خاصی از رادارها را دارند. به‌عنوان مثال اخلال‌گر x می‌تواند در k تعداد رادار، اختلال ایجاد نماید. به‌عنوان پیشینه تحقیق می‌توان از مراجع مختلفی نام برد که از جمله مهم‌ترین آنها تلاش آقای M. Lv به‌همراه همکارانش در ارائه یک الگوریتم مزایده‌ای به‌نسبت بهینه در تخصیص منابع اختلال راداری است [۱]. همچنین مقاله زانگ[۱] و همکارانش در راستای استفاده از نظریه‌بازی در مسئله کنترل توان در یک شبکه حسگر بی‌سیم، دید مناسبی از کاربرد نظریه بازی در مسائل مخابراتی به نگارنده داده است [۲]. در همین راستا نمی‌توان از ذکر مرجع [۳] که حاصل تلاش ارزنده M. Felegyhazi و J.Hubaux است، چشم‌پوشی نمود.

مقاله حاضر شامل ۵ بخش اصلی است. پس از مقدمه در بخش ۲، مبانی تحقیق را پی‌ریزی نموده و از سه الگوریتم تصادفی، مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی، در سه زیربخش، جداگانه پرداخته می‌شود. سپس در بخش ۳، در تلاشی مفید با معرفی الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور، سعی شده که خود نیز در ارتقاء الگوریتم‌های مطرح شده سهیم بوده و در بخش ۴، با انجام شبیه‌سازی‌های مرتبط با مبانی تحقیق، به ارائه نتایج و تفسیر آنها پرداخته شده است. سرانجام در بخش ۵، جمع‌بندی مباحث و ارائه پیشنهادها آورده شده است.

۲. معرفی الگوریتم‌های تصادفی، مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی در تخصیص منابع اختلال راداری

هدف از مطرح نمودن انواع الگوریتم‌ها در این مقاله، صرفاً تولید یک ماتریس تصمیم نمی‌باشد. بلکه با مطرح نمودن آنها به دنبال ماتریس تصمیمی بوده که با توجه به محدودیت‌های زمانی در یک صحنه نبرد بلادرنگ، بیشترین منفعت ممکن از حیث ایجاد اختلال در رادارهای دشمن در کوتاه‌ترین زمان ممکن به‌دست آید. پس با این حساب، ابتدا نیاز است که به تعریف یک رابطه مناسب برای محاسبه بهره بیشترین بهره پرداخته شود. نام این رابطه را تابع مزیت گذاشته و بر اساس مراجع [۱ و ۴] در قالب رابطه (۱) تعریف می‌شود:

* ایمیل نویسنده پاسخگو: m_mosavi@iust.ac.ir

[۱] Zhang

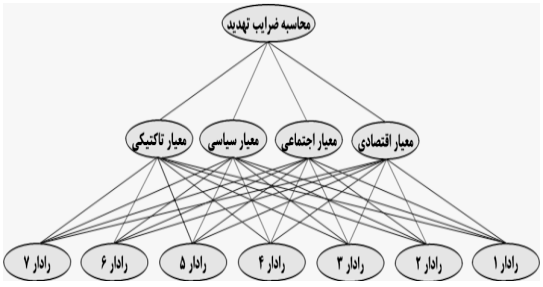
$$E = \sum_{j=1}^{N} \varpi_j \left(1 - \prod_{i=1}^{M} (1 - q_{ij})^{x_{ij}} \right) \quad (۱)$$

که در آن، M مبین تعداد اخلال‌گرها، N مبین تعداد رادارها، q_{ij} مبین درایه‌ای از ماتریس بهره که بیانگر احتمال سرکوب رادار jام توسط اخلال‌گر iام است، ϖ_j مبین ضریب تهدید رادار jام، x_{ij} مبین درایه‌ای از ماتریس تصمیم که با پذیرش دو مقدار ۱ یا ۰، بیانگر تخصیص یا عدم تخصیص اخلال‌گر iام به رادار jام است، می‌باشند. برای درک بهتری از عناصر اصلی رابطه (۱)، لازم است تعریف کامل‌تری از ضرایب تهدید، ماتریس منفعت و ماتریس تصمیم ارائه شود.

ضرایب تهدید رادارها: مشخص می‌نماید که مطابق رابطه (۲)، هر رادار دشمن با چه درجه‌ای از تهدید، منافع ما را در معرض خطر قرار می‌دهد:

$$\varpi = \{\varpi_1, \varpi_2, ..., \varpi_N\} \quad (۲)$$

در تعیین ضرایب تهدید رادارها می‌توان معیارهای دلخواهی را، بسته به شرایط و منافع خاص نظامی (اعم از اهمیت دارایی‌ها، اهمیت منطقه‌ای، مسائل سیاسی و ...) ملاک قرار داد. حال با در دست داشتن معیارهای دلخواه در تعیین ضرایب تهدید رادارها، برای محاسبه عناصر مجموعه (۲) می‌توان از میان مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره MCDM[1]، مدل MADM[2] را برگزیده و از میان زیرشاخه‌های آن روش AHP[3] را انتخاب نمود [۵]. در شکل **۱**، یک نمونه از انتخاب معیارهای دلخواه برای محاسبه ضرایب تهدید و رابطه آنها با هر یک از رادارها نشان داده شده است.



شکل ۱: تعریف معیارهای دلخواه و نسبت آنها با رادارها در روش AHP برای محاسبه ضرایب تهدید

ماتریس بهره: بیانگر احتمال سرکوب هر رادار توسط هر اخلال‌گر است. در این مقاله با توجه به معادله رادار، احتمال سرکوب تابعی از فاصله اقلیدسی میان اخلال‌گر و رادار در نظر گرفته شده است. به این معنا که هر چه فاصله میان اخلال‌گر و رادار کمتر باشد، احتمال سرکوب آن بیشتر است و بر عکس (رابطه ۳):

$$q_{ij} = \frac{1}{r_{ij}^{\,2}} \quad (۳)$$

[1] Multiple Criteria Decision Making
[2] Multiple Attribute Decision Making
[3] Analytical Hierarchy Process

رابطه (۳) انعطاف‌پذیری مناسبی در خصوص افزودن سایر پارامترهای مؤثر در یک صحنه نبرد الکترونیکی همچون الزامات تخصصی راداری، فنون‌های ECM و ECCM را دارا می‌باشد.

ماتریس تصمیم: همان‌گونه که بیان شد، هدف اصلی از پیاده‌سازی الگوریتم، دست یافتن به یک تصمیم معقول و به‌نسبت بهینه است، بنابراین ماتریس تصمیم نشان داده شده با رابطه (۴) در واقع همان خروجی الگوریتم بوده و می‌خواهد به این سؤال پاسخ دهد که برای ایجاد یک اختلال گروهی نسبتاً بهینه، کدام اخلال‌گر به کدام رادار باید اختصاص یابد؟ در این ماتریس عدد صفر بیانگر عدم تخصیص و عدد ۱ بیانگر تخصیص اخلال‌گر iام به رادار jام است.

$$X_{M \times N} = \begin{bmatrix} 0/1 & \dots & 0/1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0/1 & \dots & 0/1 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

حال با شناخت اجزای اصلی تابع بهره، به معرفی هر یک از الگوریتم‌های مد نظر پرداخته می‌شود.

۲-۱. الگوریتم تصادفی

همان‌گونه که از نام این الگوریتم پیداست، روش تولید ماتریس تصمیم در آن کاملاً تصادفی می‌باشد. حال که این الگوریتم ماتریس تصمیم را بدون هیچ ساز و کار هدفمندی تولید می‌نماید، پس مطرح ساختن آن چه اهمیتی دارد؟ در پاسخ به این سؤال لازم است به دو نکته اساسی اشاره نمود: الف) هرچند که ماتریس تصمیم تولید شده در این الگوریتم به‌صورت تصادفی است، اما می‌توان با افزایش تعداد تکرار الگوریتم و انتخاب ماتریس تصمیمی به‌عنوان خروجی نهایی که متناسب با حداکثر مقدار تابع مزیت باشد ($\max E$)، به یک طرح تخصیص نسبتاً بهینه دست یافت و ب) معرفی و دقت در آن سبب می‌شود تا اهمیت الگوریتم‌های مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی به‌خوبی مشخص شود. در شکل **۲-الف** فلوچارت مربوط به الگوریتم تصادفی نشان داده شده است.

تبیین الگوریتم تصادفی: پس از محاسبه ورودی‌های اولیه (ضرایب تهدید و ماتریس مزیت) و تولید یک ماتریس تصمیم تصادفی، مزیت حاصل از ماتریس تصمیم ایجاد شده به‌کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود. حال بسته به شرایط صحنه نبرد و در صورت وجود امکان تکرار الگوریتم، به مرحله تولید ماتریس تصادفی برگشته و این چرخه را تا پایان زمان اختصاص‌یافته برای اجرای الگوریتم ادامه داده می‌شود. در پایان، ماتریس تصمیمی به‌عنوان خروجی انتخاب می‌شود که متناسب با حداکثر مقدار تابع بهره باشد.

۲-۲. الگوریتم مزایده‌ای

در تحقق این الگوریتم، علاوه بر عناصر سه‌گانه ضرایب تهدید، ماتریس بهره و ماتریس تصمیم اجزای دیگری نیز مورد نیاز است که عبارتند از:

مجموعه طرح‌های ممکن درهر اخلال‌گر: هر اخلال‌گر با توجه به توانایی‌اش در ایجاد اختلال در تعداد مشخصی رادار، تمام

طـــرح‌هـــای ممکـــن خـــود را مطـــابق رابطـــه (۵) مشـــخص می‌نماید. به‌عنوان مثال، یکی از طرح‌های اخلال‌گر i ام عبارتست از: $s_{il}=\{r_1,r_2,...,r_t\}$ کـه در آن $t\le N$ است. اعضـای مجموعـه S_i شامل رادارهایی می‌باشندکه با توجه به ظرفیت اخـلال‌گـر i، امکـان مختل کردن آنها توسط این اخلال‌گر وجود دارد. اما سـؤالی کـه در اینجا مطرح است، این است که اخلال‌گر i، توانـایی تولیـد چنـدطرح همچون s_{il} را دارد؟ رابطه (۶) به این سؤال پاسخ می‌دهد.

$$S_i=\{s_{i1},s_{i2},...,s_{iL}\} \quad (۵)$$

$$L=\sum_{j=1}^{k_i}C_j^N \quad (۶)$$

به‌عنوان مثال فرض کنید چنانچه اخلال‌گر i ظرفیت ایجـاد اخـتلال همزمان در ۳ رادار را داشته باشد و تعداد رادارهای دشمن در صحنه نبرد ۵ عدد باشد، در این صورت تمام طرح‌های ممکن این اخلال‌گـر عبارتست از:

طرح‌های یک راداری:

$$s_{i1}=\{r_1\},s_{i2}=\{r_2\},s_{i3}=\{r_3\},s_{i4}=\{r_4\},s_{i5}=\{r_5\}$$

طرح‌های دو راداری:

$$s_{i6}=\{r_1,r_2\},s_{i7}=\{r_1,r_3\},s_{i8}=\{r_1,r_4\},s_{i9}=\{r_1,r_5\},s_{i10}=\{r_2,r_3\},$$
$$s_{i11}=\{r_2,r_4\},s_{i12}=\{r_2,r_5\}$$
$$s_{i13}=\{r_3,r_4\},s_{i14}=\{r_3,r_5\},s_{i15}=\{r_4,r_5\}$$

طرح‌های سه راداری:

$$s_{i16}=\{r_1,r_2,r_3\},s_{i17}=\{r_1,r_2,r_4\},s_{i18}=\{r_1,r_2,r_5\},$$
$$s_{i19}=\{r_1,r_3,r_4\},s_{i20}=\{r_1,r_3,r_5\}$$
$$s_{i21}=\{r_1,r_4,r_5\},s_{i22}=\{r_2,r_3,r_4\},s_{i23}=\{r_2,r_3,r_5\},$$
$$s_{i24}=\{r_2,r_4,r_5\},s_{i25}=\{r_3,r_4,r_5\}$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود جمر i در مجموع ۲۵ طـرح ممکـن دارد که رابطه (۶) نیز این مطلب را تأیید می‌نماید:

$$L=C_1^5+C_2^5+C_3^5=5+10+10=25$$

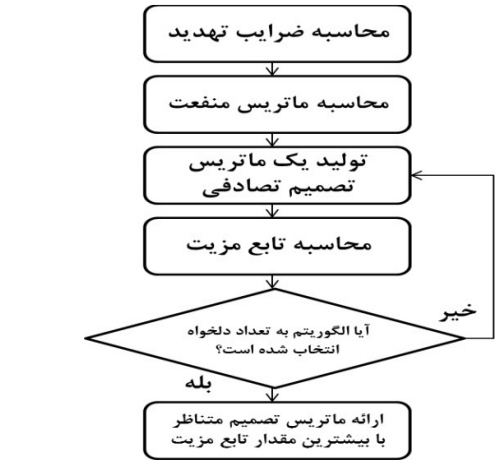
بهره هر طرح اخلال‌گر: حال کـه هـر اخـلال‌گـر تمـام طـرح‌هـای ممکن‌اش را شناسایی کرده است، وقت آن رسیده که بهره هر طرح را به‌کمک رابطـه (۷) محاسـبه نمایـد و سـپس بـا در اختیـار داشـتن مجموعه بهره‌هـای $V_i=\{v_{i1},v_{i2},...,v_{iL}\}$، در هـر دور مزایـده[1] طرحی را پیشنهاد دهد کـه متناسـب بـا حـداکثر بهـره موجـود در مجموعه V_i باشد.

$$v_{il}(s_{il})=\sum_{l=1}^{q}q_{il}.\varpi_l \quad (۷)$$

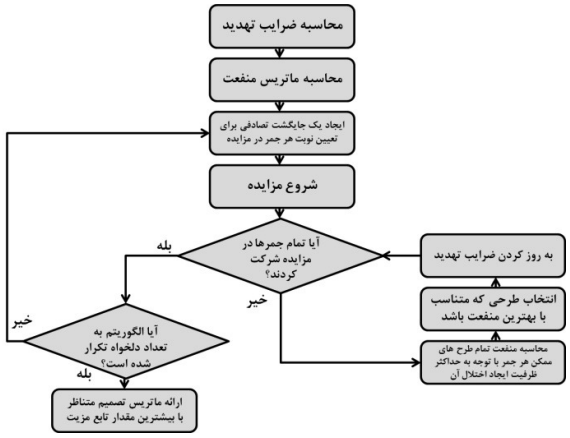
ضرایب تهدید به‌روز شده: در هر چرخه از مزایده، هنگامی‌که هـر اخلال‌گر طرح مطلوب خود را اختیار می‌کند، باید ضرایب تهدیـد بـر حسب تاکتیک‌های جنـگ الکترونیـک (p_{ij} در رابطـه (۸))، بـه‌روز شود. با نو شدن ضرایب تهدید، احتمـال انتخـاب رادارهـای از پـیش انتخاب شده کـاهش یافتـه و از انتخـاب تکـراری یـک رادار توسـط چنداخلال‌گر تا حد ممکن جلوگیری به‌عمل می‌آید.

$$\varpi_{j,new}=(1-p_{ij}).\varpi_{j,old} \quad (۸)$$

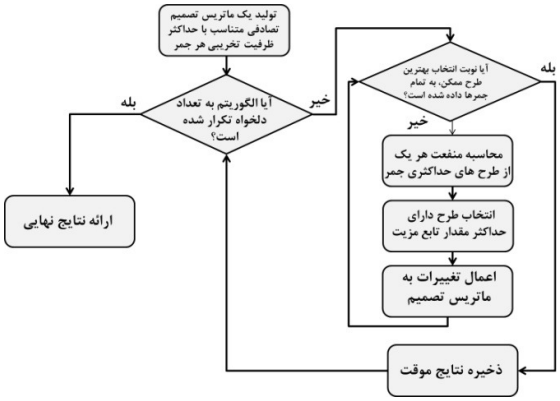
مراحل اجرای الگوریتم مزایده‌ای در فلوچارت شکل **۲- ب** نشان داده شده است.



الف



ب



ج

شکل ۲: فلوچارت الگوریتم‌های تخصیص منابع اختلال راداری:
الف) الگوریتم تصادفی، ب) الگوریتم مزایده‌ای و
ج) الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی

[1] Bid Round

تبیین الگوریتم مزایده‌ای: از آنجا که در یک صحنه پیچیده جنگ الکترونیک، بیشتر اوقات با تعداد زیادی رادار و اخلال‌گر سر و کار داشته و حالت‌های بسیار زیادی (نزدیک به بی‌نهایت) در تخصیص اخلال‌گرها به رادارها قابل فرض است، مسئله "تخصیص منابع" جزء مسائل بغرنج[1] به‌حساب می‌آید. بنابراین هیچکدام ازالگوریتم‌های ارائه شده در این مقاله به نتیجه صددرصد بهینه[2] منجر نخواهد شد، بلکه درجه‌ای از بهینگی[3] را به‌دست می‌دهد که موجبات خشنودی نسبی متخصصان را فراهم سازد. اساس الگوریتم بر پایه ایجاد یک مزایده بین تمام اخلال‌گرهای موجود در صحنه است. قدم نخست برای انجام مزایده تعیین اولویت بین اخلال‌گرهاست تا معلوم باشد که کدام اخلال‌گر زودتر بهترین طرح خود را از میان مجموعه طرح‌های ممکن‌اش انتخاب نماید. ترتیب مزایده بین اخلال‌گرها، با تولید یک جایگشت تصادفی بین اخلال‌گرها مشخص می‌شود (این انتخاب تصادفی را می‌توان با انجام کارهای تجربی و آماری به‌نحوی مناسب وزن دهی نموده تا نتیجه مطلوب در زمان کوتاه‌تری به‌دست آید). پس از تعیین اولویت اخلال‌گرها در انجام مزایده، ابتدا اخلال‌گر اول با توجه به ظرفیت اختلالی خود (هر اخلال‌گرمی‌تواند تعداد معینی رادار را با توجه به قابلیت‌های راداری‌اش مختل کند)، تمام طرح‌های ممکن خود را در نظر گرفته و برای هر کدام بهره جداگانه‌ای را با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌نماید. سپس از میان تمام طرح‌های ممکن خود، آن یکی که حداکثر بهره را داشته باشد انتخاب می‌کند. آنگاه ضرایب تهدید رادارهایی که به اخلال‌گر قبلی اختصاص دارند، کاهش یافته و اخلال‌گرهای بعدی با توجه به ضرایب جدید، بهره طرح‌های خود را محاسبه می‌نمایند و این روند تا پایان یک چرخه مزایده کامل ادامه می‌یابد. با توجه به زمانی که EWC[4] بر حسب تاکتیک‌های EW تعیین می‌نماید، الگوریتم مورد نظر، t بار تکرار می‌شود و در نهایت ماتریس تصمیمی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته خواهد شد که با بیشترین مقدار موجود در مجموعه $E=\{E_1,E_2,...,E_t\}$ متناسب باشد.

۲-۳. الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی

الگوریتم نشان داده شده در شکل **۲- ج** دو ویژگی اساسی دارد: الف) به‌دلیل انتخاب مرحله‌ای و گام به گام استراتژی مناسب توسط بازیگران (اخلال‌گرها) جزء بازی‌های دینامیکی محسوب می‌شود و ب) در صورت تکرار الگوریتم به تعداد دلخواه، می‌توان آن را به‌صورت یک بازی دینامیکی تکراری در نظر گرفت. تبیین الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی به شرح زیر می‌باشد:

۱- این الگوریتم نیز مانند الگوریتم‌های قبلی نیازمند روابط مطرح شده به جز رابطه (۸) است.

۲- در نخستین مرحله اجرا، یک ماتریس تصمیم تصادفی به شرطی تولید می‌شود که هر اخلال‌گر با حداکثر ظرفیت اختلالی‌اش در تولید تصادفی ماتریس تصمیم مشارکت داشته باشد. توضیح اینکه به‌عنوان مثال چنانچه اخلال‌گر شماره ۱ بتواند تعداد ۴ رادار را به‌طور همزمان مختل کند، در ماتریس تصمیم تصادفی تولید شده نباید به این اخلال‌گر کمتر از ۴ رادار نسبت داده شود. علت تأکید ما بر استفاده از بیشترین ظرفیت هر اخلال‌گر در تولید ماتریس تصمیم، واضح است، چرا که با توجه شبیه‌سازی‌های انجام شده و مشاهده نتایج الگوریتم مزایده‌ای، دریافته که بهترین طرح‌های هر اخلال‌گر (از لحاظ بیشینه شدن بهره آن طرح) هنگامی به‌وجود می‌آید که هر اخلال‌گر با بیشترین ظرفیت خود، در ایجاد اختلال شرکت نماید. این نکته اولین تفاوت بارز الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی با الگوریتم مزایده‌ای است. در الگوریتم مزایده‌ای همان‌گونه که اشاره شد، به‌دلیل آنکه هر اخلال‌گر تمام طرح‌های ممکن‌اش، اعم ازطرح‌های یک تایی، دوتایی و غیره را در روند اجرای الگوریتم دخالت می‌داد، زمان زیادی تلف می‌شد و این در حالی است که مسئله مدیریت زمان در صحنه نبرد از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۳- ردپای نظریه بازی در این الگوریتم آن زمان معلوم می‌شود که کاملاً متوجه شویم در هر مرحله اجرای کامل الگوریتم چه اتفاقی می‌افتد و اجزای اصلی نظریه بازی در اینجا کدام است؟ اجزای اصلی نظریه بازی برای این الگوریتم عبارت است از: الف) بازیگران در این بازی همان اخلال‌گرها هستند، ب) مجموعه عمل‌های ممکن برای هر اخلال‌گر عبارت است از انواع طرح‌های حداکثری‌اش ممکن برای ایجاد اختلال در رادارها و ج) ترجیحات برای هر اخلال‌گر، یک‌بار تابع معرفی شده در رابطه (۱) و بار دیگر به صورت رابطه (۹) در نظر گرفته شده است.

$$u_{il}(s_{il})=\sum_{l=1}^{q}\varpi_l.q_{i.l}-\sum_{r=1}^{p}\varpi_r.q_{i,r}\Rightarrow if:p\neq 0 \qquad (۹)$$

در جمله دوم در رابطه (۹) تلاش بر این است که نشان داده شود که با توجه به طرح‌های حداکثری هر اخلال‌گر و با توجه به‌طرح‌های از پیش انتخاب شده برای سایر اخلال‌گرها چنان‌چه به یک رادار هیچ اخلال‌گری اختصاص نیابد، آن رادار در صحنه نبرد آزاد گذاشته شده و می‌تواند خطرساز باشد. بنابراین اثر سوء رادارهای آزاد را با ضریب منفی در رابطه دخالت داده شده است. در نظر گرفتن رادارهای آزاد در رابطه (۹) علاوه بر مسئله‌ای که به آن اشاره شد، باعث می‌شود ماتریس تصمیمی به‌عنوان خروجی انتخاب گردد که پراکندگی وسیع‌تری بر روی رادارهای دشمن داشته باشد و از اجتماع اخلال‌گرها بر روی چند رادار خاص و به‌تبع آن آزاد ماندن سایر رادارها جلوگیری به‌عمل آید.

۴- حال با دانستن اجزای نظریه بازی در پیاده‌سازی این الگوریتم، روند اجرای یک مرحله کامل الگوریتم بیان می‌شود. الگوریتم پس از تولید یک ماتریس تصمیم تصادفی اولیه آغاز می‌شود. اولین اخلال‌گر به‌عنوان بازیگر اول، تمام طرح‌های حداکثری خود را ایجاد نموده و بعد از آن با توجه به رابطه‌های (۱) یا (۹) به‌ازای هر طرح خود و با

[1] Np Complete Or Np Hard
[2] Optimal
[3] Suboptimal
[4] Electronic Warfare Commander

فرض ثابت بودن طرح‌های سایر اخلال‌گرها، طرحی که متناسب با مقدار بیشینه تابع بهره به‌دست آمده از روابط مذکور می‌باشد، را بر می‌گزینند. اکنون کار اخلال‌گر اول به پایان رسیده است. حال باید بسته به انتخاب استراتژی اخلال‌گر اول، ماتریس تصمیم را در ستونی که مربوط به اخلال‌گر اول است، به‌روز نمود. روند مطرح شده تا زمانی‌که تمام اخلال‌گرها به‌همین شیوه استراتژی بهینه خود را برگزینند، ادامه می‌یابد. در صورت نیاز به تکرار الگوریتم، باید مکانیزمی برای بررسی کردن شرط تکرار وجود داشته باشد که در فلوچارت شکل **۲-ج** این مسئله در نظر گرفته شده است.

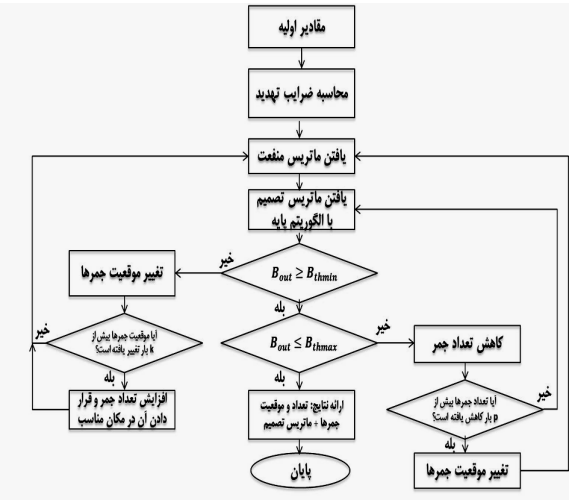
در بخش بعد با معرفی الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور، تلاش شده تا الگوریتم‌های مطرح شده ارتقاء داده شود.

۳. ارتقاء الگوریتم‌های مطرح شده با معرفی الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور

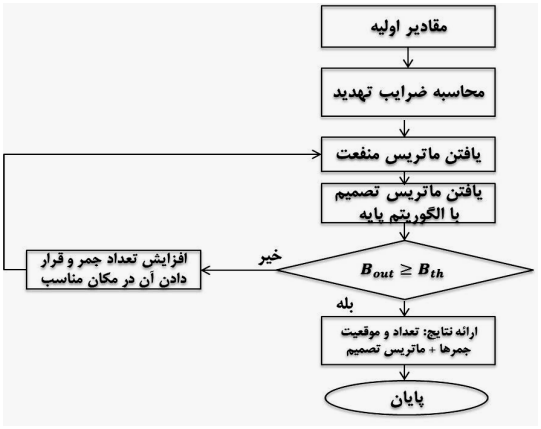
با توجه به واقعیات موجود در صحنه‌های نبرد بلادرنگ و غیربلادرنگ، الگوریتم‌های مطرح شده در بخش قبل با هدف دست‌یابی به نتایج عملیاتی توسعه داده می‌شود. اما منظور از واقعیات موجود در صحنه‌های نبرد بلادرنگ و غیربلادرنگ چیست؟ در صحنه نبرد بلادرنگ هرچند محدودیت زمانی، ابتکار عمل را در ایجاد یک تصمیم بهینه تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما بر خلاف آن قابلیت تحرک اخلال‌گرها (قرار گرفتن آنها بر روی کشتی، هلی کوپتر، هواپیما، خودرو و ...) ما را امیدوار می‌سازد که تصمیمات اتخاذ شده را به سمت حالت ایده‌آل‌تری سوق داده و این در حالی است که در صحنه نبرد غیربلادرنگ زمان کافی برای تعیین تعداد اخلال‌گرها و موقعیت‌یابی آنها وجود دارد.

اهمیت موضوع تعیین تعداد اخلال‌گرها زمانی مشخص می‌شود که بدانیم با قرار دادن حتی یک اخلال‌گر اضافی در صحنه نبرد، هرچند ممکن است احتمال موفقیت در ازکار انداختن رادارهای دشمن بیشتر شود، اما در عمل به دلایل محدودیت در تعداد تجهیزات، افزایش احتمال اصابت موشک‌های دشمن به اخلال‌گرها و همچنین تحمیل شدن هزینه‌های سربار دیگر، تجهیزات خود را به هدر داده‌ایم. بنابراین برای جلوگیری از اتلاف منابع، با درنظر گرفتن همه ابعاد و شرایط نظامی متقاعد خواهیم شد که باید بین سودها وهزینه‌ها، مصالحه دقیق انجام دهیم.

شکل‌های **۳- الف** و **۳- ب** فلوچارت دو الگوریتم مورد بحث را که یکی از آنها با رویکرد کاهش هزینه (به‌ویژه در یک محیط غیربلادرنگ یا هر محیطی که زمان کافی برای اجرای الگوریتم وجود دارد) و دیگری با رویکرد کاهش زمان اجرای الگوریتم (در محیط بلادرنگ) ارائه شده‌اند، نمایش می‌دهد. در فلوچارت‌ها $B_{th\min}$ ، $B_{th\max}$ ، p و k اعداد ثابتی بوده و بر اساس تاکتیک‌های EW تعیین می‌شوند.



الف



ب

شکل ۳: فلوچارت الگوریتم‌های ارتقاء یافته: الف) الگوریتم هزینه محور و ب) الگوریتم زمان محور

تبیین الگورتیم هزینه محور به شرح زیر است:

۱- در الگوریتم هزینه محور، چنان‌چه خروجی تابع بهره یا B_{out}، از حد آستانه پایین یا از $B_{th\min}$ کمتر باشد، پیش از آنکه برای افزایش B_{out}، یک اخلال‌گر به سیستم اضافه شود، با تغییر موقعیت اخلال‌گرها، سعی خواهد شد که مقدار تابع بهره خروجی با تغییر موقعیت اخلال‌گرها بیشتر شود. اما اگر با k بار تغییر، در موقعیت اخلال‌گرها باز هم B_{out} نتواند شرایط مورد نظر را برآورده سازد، آنگاه یک اخلال‌گر به سیستم اضافه می‌شود.

۲- در الگوریتم هزینه محور چنان‌چه خروجی تابع بهره یا B_{out} خیلی بزرگ باشد، برای جلوگیری از اتلاف منابع ایجادکننده اختلال، پیش از تغییر موقعیت اخلال‌گرها، ابتدا از تعداد اخلال‌گرها کاسته خواهد شد.

۳- تغییر موقعیت اخلال‌گرها را در دو سناریوی متفاوت می‌توان مطرح نمود. سناریوی اول هنگامی است که در یک صحنه نبرد

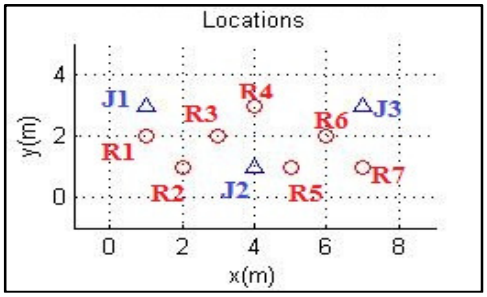
بلادرنگ قرار گرفته که در این حالت با فرض آنکه اخلال‌گرها بر روی پلت فرم‌های متحرکی قرار گرفته‌اند، تغییر موقعیت اخلال‌گرها اینگونه معنا می‌یابد که برای هر اخلال‌گر خط سیری را مشخص نماییم که سبب شود تصمیمات اتخاذ شده در خصوص تخصیص منابع، بهینه‌تر و مطمئن‌تر باشند. بنابراین در هر مرحله از اجرای مجدد، الگوریتم می‌توان خط سیر اخلال‌گرها را از روی تابعی که اخلال‌گر را به‌سوی متوسط مکانی رادارهای تخصیص یافته در مرحله قبل سوق می‌دهد، نتیجه گرفت. بدیهی است که سرعت حرکت پلت فرم حامل اخلال‌گر نیز باید در معادلات دخالت داده شود. سناریوی دوم زمانی تعریف می‌شود که در یک محیط نبرد غیر بلادرنگ قرار داریم. در این حالت تغییر موقعیت اخلال‌گرها به معنای داشتن یک سوئیچینگ مناسب از اخلال‌گرهای موجود است. بنابراین با توجه به آنکه در یک صحنه نبرد غیر بلادرنگ زمان کافی برای تصمیم‌گیری وجود دارد، در این سناریو انواع سوئیچینگ‌های مختلف را پیاده‌سازی نموده و نمونه‌ای را که متناسب با بالاترین مقدار تابع بهره باشد، به‌عنوان تعداد و موقعیت مناسب اخلال‌گرها انتخاب می‌شود. در شبیه‌سازی‌های مرتبط با این قسمت که در بخش۴ نتایج آن آمده است، اخلال‌گرها بر روی یک دایره محیطی پیرامون مجموعه رادارها فرض شده است. در حالت دیگر می‌توان مکان اخلال‌گرها را به صورت یک فرآیند تصادفی یا هر الگوی دیگری انتخاب نمود.

در الگوریتم زمان محور برای صرفه جویی در زمان (به دلیل قرار داشتن در یک صحنه نبرد بلادرنگ)، چنانچه شرط مورد نظر فراهم نشود، بلافاصله الگوریتم یک اخلال‌گر به سیستم اضافه خواهد کرد.

۴. شبیه‌سازی یک نمونه سناریوی فرضی

در اینجا با هدف عینیت بخشیدن به الگوریتم‌های مطرح شده در دو بخش قبل، اقدام به شبیه‌سازی یک نمونه سناریوی فرضی در مورد مسئله تخصیص منابع اختلال راداری در یک صحنه نبرد الکترونیکی شده است. برای ایجاد امکان مقایسه بین انواع الگوریتم‌های معرفی شده، تقریباً تمام داده‌های ورودی و فرضیات را در شبیه‌سازی آنها یکسان درنظرگرفته که داده‌های ورودی و فرضیات مشترک به شرح ذیل می‌باشند:

۱- تعداد و موقعیت اخلال‌گرها و رادارها مطابق با شکل ۴ فرض شده است:



شکل ۴: نام‌گذاری و موقعیت مکانی اخلال‌گرها و رادارها

۲- ظرفیت اخلال‌گرها برای ایجاد اختلال گروهی در رادارها به صورت: اخلال‌گر ۱: سه رادار، اخلال‌گر ۲: سه رادار و اخلال‌گر ۳: دو رادار می‌باشد.

۳- ضرایب تهدید فرض شده برای رادارها عبارتست از: رادار ۱: ۰/۶، رادار ۲ : ۰/۵، رادار ۳: ۰/۶۵، رادار ۴: ۰/۴۷، رادار ۵: ۰/۳۸، رادار ۶ :۰/۸۵ و رادار ۷: ۰/۷۶.

۴- ماتریس بهره که هر درایه آن بیانگر احتمال سرکوب هر رادار توسط هر اخلال‌گر می‌باشد، به کمک رابطه (۳) محاسبه شده است. با توجه به موقعیت‌های مشخص شده در شکل ۴ و استفاده از رابطه (۳) ماتریس بهره عبارتست از:

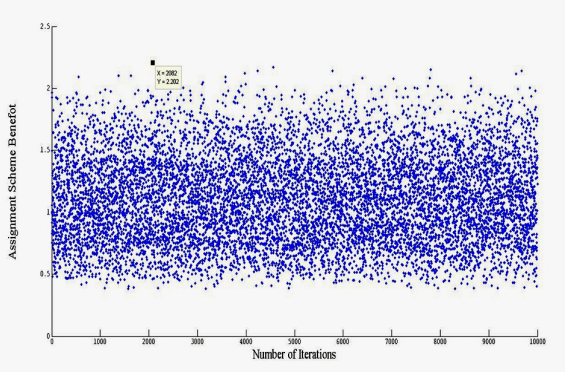
$$Q_{3\times7}=\begin{bmatrix}0.9999 & 0.2000 & 0.2000 & 0.1111 & 0.0500 & 0.0385 & 0.0250\\ 0.1000 & 0.2500 & 0.5000 & 0.2500 & 0.9999 & 0.2000 & 0.1111\\ 0.0270 & 0.0345 & 0.0588 & 0.1111 & 0.1250 & 0.5000 & 0.2500\end{bmatrix}$$

۵- تعداد تکرار الگوریتم، بسته به‌نوع الگوریتم در نظر گرفته شده است.

۶- با توجه به ورودی‌های فرض شده، سقف مقادیری که تابع بهره می‌تواند به‌خود بگیرد، مقدار ۲/۲۰۲۴ است.

۴-۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه نوع الگوریتم تصادفی، مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی

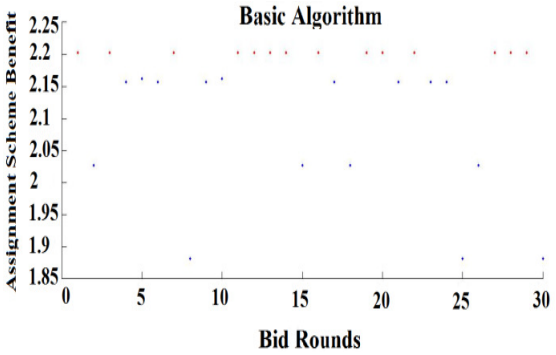
به کمک فلوچارت شکل **۲- الف**، الگوریتم تصادفی را شبیه‌سازی نموده و خروجی آن در شکل **۵** به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۵: بهره حاصل شده از پیاده‌سازی الگوریتم تصادفی

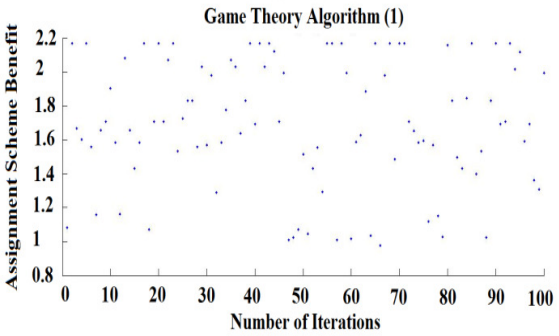
با استفاده از داده‌های ورودی و فرضیات مطرح شده، الگوریتم مزایده‌ای را مطابق فلوچارت شکل **۲- ب** پیاده‌سازی نموده و شکل **۶** به‌دست آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل **۶** ملاحظه می‌شود، تعداد تکرار در این الگوریتم ۳۰ بار در نظر گرفته شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که از ۳۰ بار تکرار الگوریتم، ۱۴ بار حداکثر مقدار بهره ممکن حاصل شده است (نقاط فوقانی شکل **۶**).



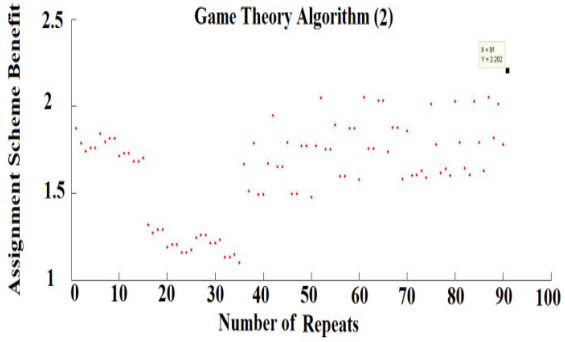
شکل ۶: بهره حاصل شده از پیاده‌سازی الگوریتم مزایده‌ای

با اجرای الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی مطابق فلوچارت شکل **۲-ج** و به‌کمک رابطه (۹)، شکل **۷** حاصل شده است. لازم به ذکر است که در شکل **۷** منظور از عنوان "Game Theory Algorithm (1)" استفاده از رابطه (۹) به‌عنوان تابع ترجیحات است.



شکل ۷: بهره حاصل شده از پیاده‌سازی الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی با رابطه (۹)

در تلاشی دیگر فلوچارت شکل **۲-ج** را به کمک رابطه (۱) پیاده‌سازی نموده و خروجی آن در شکل **۸** نشان داده شده است.



شکل ۸: بهره حاصل شده از پیاده‌سازی الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی با رابطه (۱)

لازم به ذکر است که در مورد شکل **۸**:

۱- منظور از عنوان "Game Theory Algorithm (2)" استفاده از رابطه (۱) به عنوان تابع ترجیحات است.

۲- مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از رابطه (۱) در پیاده‌سازی الگوریتم، نتایج سنگین‌تری به‌دست خواهد آمد. این امر نقش حیاتی و اساسی تابع ترجیحات در نظریه بازی را به‌خوبی نشان می‌دهد. در تلاش‌های آینده سعی خواهد شد که از توابعی در الگوریتم استفاده شود که سرعت و بهینگی بالاتری را به بار نشانند.

۳- شکل **۸** ماحصل پیاده‌سازی الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی، فقط به تعداد یکبار می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به ورودی‌های فرض شده، در هر بار اجرای کامل الگوریتم ۹۱ طرح بررسی می‌شود.

۴- مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از تابع (۱) به‌عنوان تابع ترجیحات، به سرعت به طرح تخصیصی که متضمن حداکثر مقدار تابع بهره باشد، دست خواهیم یافت. این ادعا با پیاده‌سازی مکرر الگوریتم، به‌راحتی قابل اثبات است.

۴-۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور

در این زیربخش برای هر یک از الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور یک سناریوی دلخواه را فرض نموده و نتایج شبیه‌سازی آن به شرح زیر آورده شده است .همان‌گونه که می‌دانیم هر یک از سه الگوریتم پایه‌ای (تصادفی، مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی) می‌تواند به‌عنوان قلب الگوریتم‌های هزینه محور و زمان محور مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان نمونه، در شبیه‌سازی‌های این قسمت، از الگوریتم مزایده‌ای استفاده شده است. نکات مربوط به سناریوی اول به‌شرح زیر است:

۱- در یک صحنه نبرد بلادرنگ قرار گرفته‌ایم.

۲- با توجه به اینکه اخلال‌گرها بر روی پلت فرم‌های مختلفی قرار دارند (کشتی، هلی‌کوپتر و ...)، امکان جابه‌جایی و تحرک آنها وجود دارد.

۳- الگوریتم تخصیص منابع اختلال راداری را با موضوع جابه‌جایی اخلال‌گرها ادغام نموده و علاوه بر تولید یک ماتریس تصمیم مناسب، با فرض ثابت بودن مکان رادارهای دشمن، خط سیر بهینه اخلال‌گرها ترسیم شده است.

۴- الگوریتم صد بار تکرار شده است (t=100)،

۵- در ابتدای الگوریتم، اخلال‌گری در نقطه (۴و۳) وجود نداشته، اما مطابق شکل **۹- ب** در اثنای اجرای الگوریتم به‌دلیل در زیرآستانه قرار داشتن B_{out} ، اخلال گر مذکور به محیط اضافه شده است.

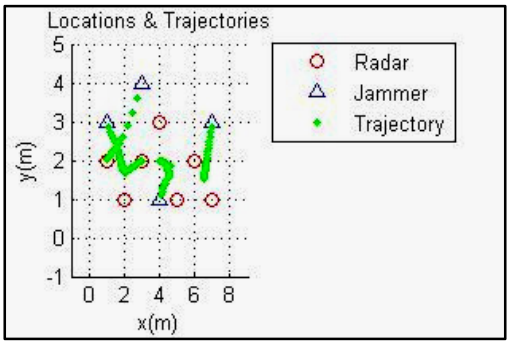
۶- خط‌های سبز رنگ، مسیری را نشان می‌دهد که در صورت حرکت اخلال‌گرها بر روی آنها، نتایج بهتری از دید ایجاد اختلال راداری حاصل خواهد شد.

۷- با توجه به اینکه برخی از خط سیرهای حاصل به‌صورت زیگزاگی هستند، باید اعتراف کرد که جا دارد در آینده بر روی بهینه‌سازی الگوریتم‌ها تأمل بیشتری شود.

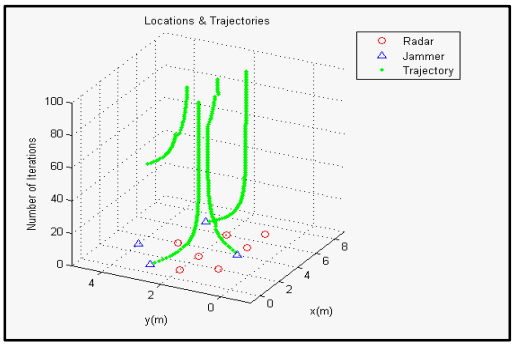
۸- در این سناریو فرض بر آن بوده که اخلال‌گرهای واقع در نقاط (۳و۱) و (۱و۴) توانایی مختل نمودن سه رادار و اخلال گر واقع در

نقطه (۳و۷) نیز امکان مختل نمودن دو رادار را به صورت همزمان دارد. اخلال‌گر واقع در نقطه (۴و۳) که بر حسب نیاز به سیستم اضافه شده است، کافی است که بتواند یک رادار را مختل نماید .

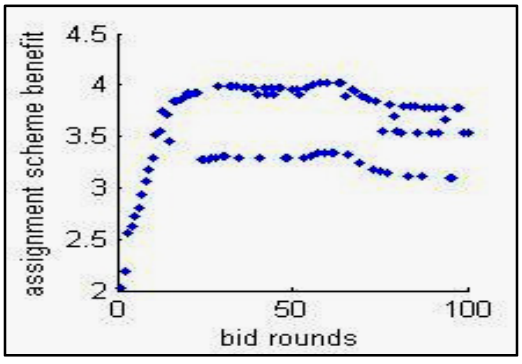
۹- چنان‌چه رادارها و اخلال‌گرهای نشان داده شده در شکل **۹- الف** را بر اساس شکل **۴** شماره گذاری نماییم، طرح تخصیص منابع اختلال راداری عبارتست از: اخلال‌گر ۱: رادارهای ۲، ۳ و ۴؛ اخلال‌گر ۲: رادار ۱؛ اخلال‌گر ۳: رادارهای ۴، ۵ و ۶؛ اخلال‌گر ۴: رادارهای ۶ و ۷. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی اول در شکل **۹** قابل مشاهده است.



الف



ب



ج

شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی سناریوی اول: الف) خط سیر بهینه اخلال‌گرها در صفحه xy، ب) خط سیر بهینه اخلال‌گرها با نمایش تعداد تکرار الگوریتم و ج) مقدار تابع بهره خروجی به ازای t=100

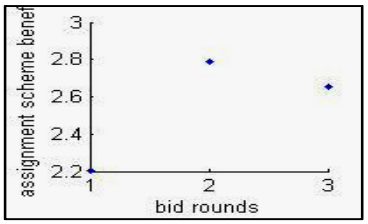
نکات مربوط به سناریوی دوم به شرح زیر است:

۱- در یک صحنه نبرد غیربلادرنگ قرار گرفته بنابراین، به‌اندازه کافی زمان برای تعیین تعداد و موقعیت اخلال‌گرها وجود دارد.

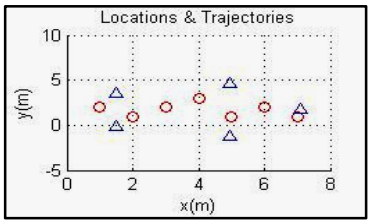
۲- فرض شده که اخلال‌گرها بر روی یک دایره محیطی پیرامون مجموعه رادارها قرار گرفته‌اند. تلاش بر این است که سوئیچینگ مناسبی از اخلال‌گرها به‌نحوی شکل گیرد که مقدار تابع بهره خروجی بین دو آستانه بالا و پایین محدود شود.

۳- تعداد تکرار الگوریتم t=3 بوده است. با توجه به تعداد تکرار الگوریتم سه استراتژی از لحاظ تعداد و موقعیت مکانی اخلال‌گرها به‌ترتیب مطابق شکل‌های **۱۰- الف** تا **۱۰- ج** حاصل شده است.

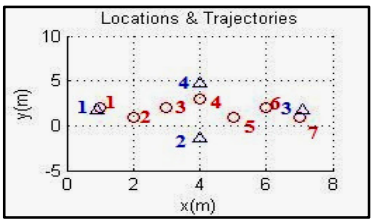
۴- با توجه به شکل **۱۰- د** الگوی شکل **۱۰- ب**، به‌عنوان الگوی نهایی انتخاب می‌شود.



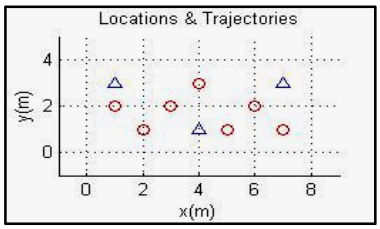
الف



ب



ج



د

شکل ۱۰: یافتن تعداد و موقعیت مناسب اخلال گرها: الف) الگوی پایه، ب) الگوی چهار اخلال گر، ج) الگوی پنج اخلال‌گر و د) مقدار منفعت هر سه الگو

۵- طرح تخصیص الگوی نهایی: اخلال‌گر۱: رادارهای۵، ۶ و ۷؛ اخلال گر۲: رادارهای۳، ۴ و ۶؛ اخلال‌گر ۳: رادارهای ۱ و ۲؛ اخلال‌گر ۴: رادارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ (ظرفیت اخلال‌گرها به‌ترتیب ۳، ۳، ۲ و ۶ می‌باشد).

۵. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که ملاحظه شد در این مقاله پنج الگوریتم متفاوت را مطرح نموده که از میان آنها سه الگوریتم نخست (تصادفی، مزایده‌ای و مبتنی بر نظریه بازی)، نقش زیربنایی و پایه‌ای در تخصیص منابع اختلال راداری داشته و دو الگوریتم دیگر (هزینه محور و زمان محور) در جهت ارتقاء الگوریتم‌های پایه‌ای پیشنهاد شده‌اند. در یک جمع‌بندی منصفانه باید اذعان نمود که تمام الگوریتم‌های مطرح شده می‌توانند به‌صورت نسبتاً بهینه‌ای (و نه کاملاً بهینه) در مدیریت صحنه نبرد الکترونیکی از حیث سازماندهی و تخصیص منابع اختلال راداری ایفای نقش نمایند. بنابراین جا دارد که در جهت تکامل و ارتقاء الگوریتم‌های مطرح شده با افزودن مسائل تخصصی رادار و اخلال‌گر و همچنین تکنیک‌های ECM و ECCM تلاش‌های بهتری صورت پذیرد. تلاش‌هایی که باید بر پایه امکانات و اولویت‌های بومی هر کشوری بنا شود تا بتواند پاسخگوی مناسبی برای نیازها و مسائل اساسی آنها باشد.

در کارهای آینده سعی خواهد شد تا برای عمق بخشیدن به تحلیل مسائل و بدست‌آوردن نتایجی دقیق‌تر در حوزه تخصیص منابع اختلال راداری از نظریه بازی‌های تعاونی استفاده مفیدی گردد.

۶. مراجع

[1] M. Lv et al., “Radar Jamming Resources Assignment Algorithm for EW Real-time Decision Support System of Multi-Platforms”; in Int. Conf. on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), China, pp. 83-87, 2010.

[2] L. Zhang et al., “Game Theoretical Algorithm for Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks”; in Proc. World Congress on Engineering (WCE), U.K., 2008.

[3] M. Felegyhazi and J. Hubaux, “Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial”; EPFL, Switzerland, Rep. LCA-REPORT-2006-002, Feb. 2006.

[4] P. A. Hosein, “A Class of Dynamic Nonlinear Resource Allocation Problems”; Ph.D. Dissertation, Lab. for Inform.and Decision Syst., Cambridge, MA, 1992.

[5] R. Ramanathan, “Data Envelopment Analysis for Weight Derivation and Aggregation in the Analytic Hierarchy Process”; in Computer and Operations Research, vol.33, no.5, pp.1289-1307, 2006.

[6] D. G. Galati, “Game Theoretic Target Assignment Strategies in Competitive Multi-Team Systems”; Ph.D. Dissertation, School of Eng., Pittsburgh Univ., Pittsburgh, PA, 2004.

[7] S. Bhattacharya and T. Basar, “Game-Theoretic Analysis of an Aerial Jamming Attack on a UAV Communication Network”; In American Control Conference, Baltimore, MD., pp.818–823, 2010.

[8] S. Bhattacharya and T. Basar, “Differential Game-Theoretic Approach to a Spatial Jamming Problem”; In Proc. of 14th International Symposium on Dynamic Games and Applications, Canada, 2010.

[9] S. Bhattacharya and T. Basar, “Optimal Strategies to Evade Jamming in Heterogeneous Mobile Networks”; in Proc. of the Workshop on Search and Pursuit-Evasion, Anchorage, AK, 2010.

[10] J. S. Jang and C. J. Tomlin, “Control Strategies in Multi-Player Pursuit and Evasion Game”; AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, CA, 2005.

[11] D. Slater et al., “A Game-Theoretic Framework for Jamming Attacks and Mitigation in Commercial Aircraft Wireless Networks”; in AIAA Infotech@Aerospace Conference, Seattle, WA, 2009.

[12] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 2nd ed., NY: McGraw-Hill, 1980.

[13] Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook, NAVAL Air Warfare Center Weapons Div., Point Mugu, CA, 1999.

[14] Electronic Warfare Fundamentals, Nellis AFB, Las Vegas, NV, 2000.

[15] D. K. Barton and S. A. Leonov, Radar Technology Encyclopedia, Electronic ed., Norwood, MA: Artech House, 1997.

[16] B. R. Mahafza and A. Z. Elsherbeni, MATLAB Simulations for Radar Systems Design, Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC CRC Press LLC, 2004.