نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران
تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۲۱- ۱۹ بهمن ماه ۱۳۸۸

بهینه‌سازی آف‌لاین و آن‌لاین مساله‌ی اجتناب آب‌وهوایی با استفاده از الگوریتم ACO

هادی نوبهاری[۱] و تورج سلیمانی[۲]
۱و۲- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

چکیده
مساله‌ی اجتناب آب‌وهوایی یکی از مسایل مطرح در مدیریت ترافیک هوایی می‌باشد. در این پروژه استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای تولید مسیر بهینه با اجتناب آب‌وهوایی در شرایط پرواز آزاد، بررسی شده‌است. این مساله می‌تواند دارای توابع هزینه‌ی متنوعی باشد که در اینجا گذر از شرایط آب‌وهوایی مساعد، کمینه‌کردن انحرافات مسیر و کمینه‌کردن طول مسیر پرواز مورد توجه قرار گرفته‌است. در نتیجه مساله به‌صورت یک مساله‌ی چندهزینه‌ای مدل شده که حل آن منجر به بدست‌آوردن مجموعه جواب‌های غیرغالب می‌شود. هدف از مدل‌کردن مساله به‌صورت چندهزینه‌ای دراختیارقراردادن درجات آزادی بیشتر برای تصمیم‌گیری به خلبان است. در ابتدا حل آفلاین مساله انجام شده و سپس با مدل‌کردن شرایط دینامیکی مساله، حل آنلاین آن نیز ارائه شده‌است.

واژه های کلیدی : *اجتناب آب‌وهوایی – الگوریتم کلونی مورچه‌ها – چندهزینه‌ای – جواب‌های غیرغالب*

مقدمه
با افزایش ترافیک هوایی در جهان، نیاز به راه‌حلی نو برای مدیریت ترافیک هوایی، که نسبت به حجم ترافیک و شرایط آب‌وهوایی انعطاف‌پذیر باشد، احساس می‌شود. پرواز آزاد به‌عنوان یکی از این راه‌حل‌ها به طور جدی توسط مجامع هواپیمایی درنظر گرفته شده‌است [۱]. در این طرح، مدیریت ترافیک هوایی محدود به مراکز کنترل ترافیک هوایی نبوده و بخش قابل توجهی از اختیارات به خدمه پروازی داخل کابین خلبان تفویض می‌شود. در پرواز آزاد خلبان هر هواپیما خود موظف به انتخاب مسیر برای اجتناب از برخورد با دیگر هواپیماها و اجتناب از موقعیت‌های بد آب‌وهوایی است .

از طرف دیگر در سالهای اخیر شاهد افزایش قابل توجه تعداد تاخیر در پروازها به‌علت شرایط بد آب‌وهوایی بوده‌ایم. تاخیرهای آب‌وهوایی تقریبا ۷۰٪ از کل تاخیرها را تشکیل می‌دهند [۲]. اغتشاشات آب‌وهوایی همچنین به‌شدت به بدنه‌ی هواپیما آسیب می‌رسانند و ممکن است در تجهیزات الکترونیکی و ناوبری هواپیما نیز اختلال ایجاد کنند که باعث می‌شود تا خلبان کنترل هواپیما را از دست بدهد. مهمترین خطرات آب‌وهوایی براساس گزارش‌های سوانح، بادهای شدید، دید کم و توربولانس ذکر شده‌اند. به‌دلیل اینکه فعالیت اتمسفر خارج از کنترل بشر است و با توجه به الزام در تامین ایمنی پرواز، پیش‌بینی آب‌وهوا و ارایه‌ی راه‌حل‌های ایمن بسیار حیاتی است.

بنابراین شرایط آب‌وهوایی یکی از اصلی‌ترین عوامل محدود کننده‌ی افزایش بازدهی پروازها در پرواز آزاد می‌باشد، زیرا در صورت مواجه‌شدن با شرایط بد آب‌وهوایی هواپیما مجبور به انحراف از مسیر بهینه‌ی خود می‌شود. این مساله نیازمند بهینه‌سازی برای تولید مسیر بهینه است. بنابراین به الگوریتمی برای تضمین ایمنی، بهینه‌سازی مصرف سوخت و تولید مسیر بهینه با اجتناب آب‌وهوایی در پرواز آزاد، نیاز است. در این پروژه از نوعی الگوریتم کلونی مورچه‌ها جهت تولید مسیر بهینه به‌صورت آف‌لاین و آن‌لاین استفاده شده‌است.

در اغلب کارهای پیشینِ بهینه‌سازی مسیر با اجتناب آب‌وهوایی [۳]، [۴]، [۵] تنها یک مسیر به‌عنوان مسیر بهینه معرفی می‌شد و به خلبان آزادی عملی برای انتخاب مسیر براساس شرایط پروازی داده نمی‌شد. در صورتی که خلبان در پرواز ممکن است با شرایط مختلفی روبرو شود که در هر صورت باید مصالحه‌ای بین نگذشتن از شرایط آب‌وهوایی نامساعد و زمان پرواز صورت گیرد. درنتیجه حل چندهزینه‌ای مساله مناسب‌تر به نظر می‌رسد؛ یعنی لازم است که الگوریتم بهینه‌سازی یک مجموعه جواب غیرغالب تولید کند. این جواب‌های غیرغالب مستقل از هرگونه وزن‌دهی اولیه می‌باشند و تصمیم‌گیری براساس آنها صورت می‌گیرد.

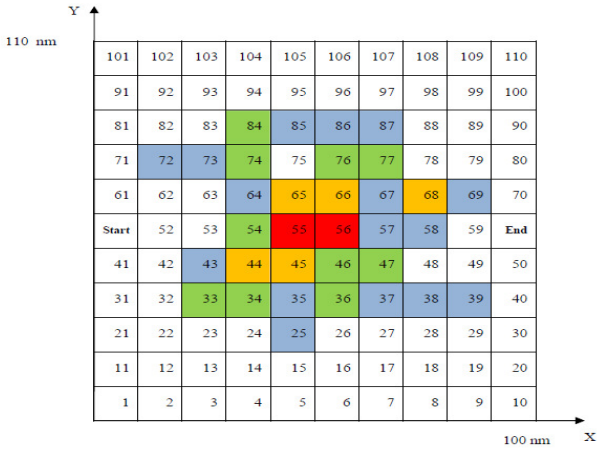
در [۶] و [۷] این مساله به‌وسیله‌ی الگوریتم‌های کلونی مورچه‌ها و ژنتیک چندهزینه‌ای بررسی شده‌است، ولی اساس آنها استفاده از وزن‌دهی‌های مختلف می‌باشد. به این صورت که مجموعه‌ی پرتو با اجرای‌های متوالی بدست‌آمده است. همچنین سناریوهای درنظرگرفته‌شده در این مقالات بسیار ساده می‌باشد. ضمناً در این مقالات حل آنلاین دقیقا بررسی نشده و فقط اشاره شده که الگوریتم بر روی یک شبیه‌ساز نصب شده و توضیحی در مورد چگونگی پیاده‌سازی آنلاین ارائه نشده‌است. اما در این تحقیق از الگوریتم کلونی مورچه‌ها چندهزینه‌ای متکامل‌تر، بدون وزن‌دهی و اجرای‌های مکرر، بلکه با تعریف چند تابع فرمن، استفاده شده‌است. به عبارت دیگر الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله ذاتا چندهزینه‌ای است. در این مقاله از الگوریتم m-ACO4 مطرح شده در [۸] استفاده شده‌است. همچنین با استفاده از این الگوریتم سناریوهای به‌مراتب پیچیده‌تری تولید و حل شده‌اند و مهمتر از همه اینکه یک راه‌حل آنلاین نیز برای این مسئله مطرح و نتایج آن ارائه شده‌است.

مدلسازی مساله به‌صورت گسسته و معرفی معیارهای بهینه‌سازی
فرض می‌شود هدف، یافتن مسیر بهینه روی فضایی دوبعدی باشد. برای تبدیل مساله‌ی پیوسته به گسسته، یک شبکه‌ی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود. ابعاد این شبکه ۱۱۰ nm x ۱۰۰ nm و تعداد سلول‌های آن در جهت محورهای X و Y به‌ترتیب ۱۱ x ۱۰ می‌باشد. علت اینکه در جهت Y، ۱۱ سلول درنظر گرفته شد، متقارن‌شدن شبکه در این جهت می‌باشد. این شبکه‌بندی در شکل ۱ دیده می‌شود. برای مشخص‌شدن هر سلول، سلول‌ها شماره گذاری شده‌اند.

مساله‌ی بهینه‌سازی مسیر با اجتناب آب‌وهوایی در پرواز آزاد می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود: نقطه‌ی شروع و نقطه‌ی پایانی هواپیما مشخص است. این نقاط روی ابتدا و انتهای شبکه در جهت X قرار دارند. هدف یافتن مجموعه جواب‌های غیرغالب به‌صورت مسیرهایی روی این شبکه است. معیارها یا توابع هزینه‌ی مساله را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

۱. گذر از شرایط آب‌وهوایی مساعدتر
۲. کمینه‌کردن انحرافات
۳. کمینه‌کردن مسافت طی شده

۱- استادیار، ۶۶۱۶۴۶۳۶، nobahari@sharif.ir
۲- کارشناس ارشد



شکل ۱- مدل گسسته‌ی مساله و نمایش مدل آب‌وهوایی

در ادامه برای مدل‌کردن هر کدام از این توابع هزینه به زبان ریاضی، ضرایبی را تعریف می‌کنیم. از این ضرایب در پیاده‌سازی الگوریتم استفاده خواهد شد.

مدل آب‌وهوایی و ضریب آب‌وهوا[1]

فرض می‌کنیم هواپیما مجهز به حسگری است که می‌تواند شرایط آب‌وهوایی جلوی خود را تا ۱۰۰ nm اسکن کند. بعد از تولید شبکه و تبدیل مساله‌ی پیوسته به مساله‌ی گسسته، فضای گسسته به سلول‌هایی تقسیم می‌شود و به هرسلول از لحاظ شرایط آب‌وهوایی وضعیتی را نسبت می‌دهیم. شرایط آب‌وهوایی هر سلول تصادفی و متغیر با زمان می‌باشد.

برای مدل‌کردن انواع شرایط آب‌وهوایی از مدل ارایه‌شده توسط سیستم آب‌وهوای ملی امریکا[2] که شدت بازتاب راداری را براساس پردازش تصویری به پنج دسته تقسیم می‌کند، استفاده می‌کنیم. این تقسیم‌بندی در جدول ۱ آمده‌است.

جدول ۱- تقسیم‌بندی شرایط آب‌وهوایی براساس شدت بازتاب راداری

کد	شرایط بد آب‌وهوا	شدت بازتاب راداری (dBZ)	رنگ
۱	عاری	I<5	بی‌رنگ
۲	کم	5<I<20	آبی
۳	متوسط	20<I<30	سبز
۴	زیاد	30<I<40	زرد
۵	شدید	I>40	قرمز

هر سلول شماره‌ای از ۱ تا ۵ به خود اختصاص می‌دهد که بیانگر شرایط آب‌وهوایی آن است. برای تولید این مدل از یک تولیدگر اعداد تصادفی استفاده می‌کنیم. برای نمونه این مدل آب‌وهوایی در شکل ۱ دیده می‌شود. در این شکل به هر سلول با توجه به شرایط آب‌وهوایی آن رنگی اختصاص داده شده‌است.

ضریب انحرافات[3]

برای رفتن به سلول بعد در هر مرحله فرض می‌کنیم که سه انتخاب وجود داشته باشد. این سه انتخاب عبارتند از: رفتن به سلول سمت راست، رفتن به سلول بالا سمت راست، رفتن به سلول پایین سمت راست. برای ارایه یک مدل ریاضی از انحرافات در هدینگ[4] هواپیما از ضریب ۱ برای رفتن به سلول سمت راست و از ضریب ۲ برای رفتن به سلول‌های بالا یا پایین سمت راست استفاده شده‌است.

ضریب مسافت طی شده[5]

با توجه به اینکه تمام مسیرها در جهت محور X از ۱۰ سلول گذر می‌کنند پس اختلاف در طول مسیرها متناسب با فاصله‌ای است که در هر مرحله با مسیر مطلوب گذرنده از سلول‌های شروع و پایان ایجاد می‌شود. در صورت حرکت روی مسیر مطلوب در هر مرحله ضریب یک به‌عنوان ضریب مسافت در نظر گرفته می‌شود و به ازای هر سلول یک واحد به فاصله از مسیر مطلوب افزوده می‌شود.

ضریب زمان طی شده[6]

ضریب انحرافات و ضریب مسافت طی شده هر دو به نوعی بیانگر زمان طی‌شده هستند. در نتیجه ضریب زمان را به‌عنوان ترکیبی از ضریب انحرافات و ضریب مسافت طی شده تعریف می‌کنیم:

$$TimeFactor = DeviationFactor + DistanceFactor \qquad (۷.۱)$$

بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

ایده‌ی اصلی بهینه‌سازی مورچه‌ها مدل‌کردن مساله به‌صورت گراف برای بدست‌آوردن مسیری با کمترین هزینه و استفاده از مورچه‌های مصنوعی برای جستجوی بهترین مسیرها می‌باشد. رفتار مورچه‌های مصنوعی برگرفته از رفتار مورچه‌های واقعی است. آنها روی المان‌های مسیر (نقطه یا خط) فرمن از خود به‌جای می‌گذارند و مسیر خود را براساس احتمالی که به توزیع فرمن روی مسیر بستگی دارد، انتخاب می‌کنند. توزیع فرمن همانند الگوی واقعی خود همواره درحال تبخیرشدن است. در واقع این ارتباط غیرمستقیم با محیط[7] هدفش انتقال اطلاعات پیرامون کیفیت مسیر، برای جذب دیگر مورچه‌ها در تلاش‌های بعدی آنها در انتخاب مسیر است.

علاوه‌براین مورچه‌های مصنوعی می‌توانند دارای ویژگی‌هایی باشند که مورچه‌های واقعی فاقد آنها هستند، به‌عنوان مثال آنها معمولا دارای یک حافظه‌ی اطلاعاتی می‌باشند که اطلاعات مربوط به فعالیت‌های قبلی آنها را در خود نگهداری می‌کند.

در بسیاری از موارد فرمن تنها زمانی بروزرسانی می‌شود که تمام مسیرها توسط همه‌ی مورچه‌ها ساخته شده باشد (قانون بروزرسانی کلان[8]) و معمولا مقدار فرمن بروز شده تابعی از کیفیت مسیر کامل است. بروزرسانی فرمن دیگری نیز وجود دارد؛ به‌این‌صورت که بعد از هر گام از ساخت مسیر فرمن بروزرسانی می‌شود (قانون بروزرسانی محلی[9]).

تصمیم‌گیری مورچه‌ها در انتخاب مسیر تنها براساس توزیع فرمن نیست؛ بلکه از یک تابع هیوریستیک[10] که در خود اطلاعاتی مستقیم در مورد کیفیت مسیر دارد، نیز در این تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود.

اولین الگوریتم مورچه‌ها با کاربرد حل مساله‌ی بهینه‌سازی گسسته توسط Dorigo [۱۰] مورد استفاده قرار گرفت. اولین مساله‌ای که با این الگوریتم مورد آزمایش قرار گرفت، مساله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد[11] بود.

---

[1] Weather Factor
[2] US National Weather System (NWS)
[3] Deviation Factor
[4] Heading
[5] Distance Factor
[6] Time Factor
[7] Stigmergy
[8] Global Updating Rule
[9] Local Updating Rule
[10] Heuristic Function

الگوریتم‌های چندهزینه‌ای کلونی مورچه‌ها

به تازگی در مقالات مختلفی الگوریتم‌های چندهزینه‌ای کلونی مورچه‌ها برای حل مسایل چندهزینه‌ای معرفی شده‌اند. این الگوریتم‌ها غالبا در سه جنبه‌ی زیر با هم تفاوت دارند:

۱. به‌جای‌گذاری فرمن
۲. پاداش جواب‌ها
۳. تعریف تابع هیوریستیک

در ادامه به بیان این تفاوت‌ها پرداخته می‌شود.

به‌جای‌گذاری فرمن: مقدار فرمنی که بر روی یک المان مسیر به‌جای می‌ماند، نمایانگر تجربه قبلی کلونی نسبت به انتخاب آن مسیر است. وقتی فقط یک تابع هزینه وجود داشته باشد، این تجربه نسبت به این تابع هزینه تعریف می‌شود. اما زمانی که چند تابع هزینه وجود داشته باشد دو استراتژی متفاوت می‌تواند به کار گرفته می‌شود: اولین استراتژی استفاده از یک توزیع فرمن است. در این حالت مقدار فرمنی که توسط مورچه‌ها به‌جای می‌ماند براساس ترکیبی از تمام توابع هزینه می‌باشد. دومین استراتژی درنظرگرفتن چند توزیع فرمن است. در این حالت معمولا برای هر تابع هزینه یک کلونی درنظر می‌گیریم که هر کدام از این کلونی‌ها دارای تابع هزینه‌ی مختص به خود است.

پاداش جواب‌ها: وقتی که می‌خواهیم توزیع فرمن را بروزرسانی کنیم، باید تصمیم‌گیری شود که به چه جواب‌هایی فرمن تعلق بگیرد. دو روش برای این کار معرفی شده‌است: اولین حالت این است که به جواب‌هایی که بهترین مقدار را برای هر تابع هزینه در هر مرحله بدست می‌آورند، پاداش داده شود. دومین حالت پاداش‌دادن تنها به جواب‌های غیرغالب است که این خود به دو روش متفاوت قابل انجام است: یک روش پاداش‌دادن به تمام جواب‌های غیرغالبی است که تاکنون بدست آمده‌اند و روش دیگر پاداش‌دادن فقط به جواب‌های غیرغالبی است که در مرحله‌ی فعلی حاصل شده‌اند.

تعریف تابع هیوریستیک: وقتی در حال ساختن جواب‌ها هستیم در هر مرحله المان بعدی جواب براساس یک قانون انتقال[12] که به دو عامل توزیع فرمن و تابع هیورستیک بستگی دارد، انتخاب می‌شود. انواع تعریف توزیع فرمن در بالا شرح داده شد. تعریف تابع هیوریستیک براساس دو استراتژی متفاوت امکان پذیر است: اولین استراتژی استفاده از ترکیبی از تمام توابع هزینه به‌عنوان یک تابع هیوریستیک است. دومین استراتژی در نظرگرفتن هر تابع هزینه به‌صورت مجزا است. در این حالت معمولا برای هر تابع هزینه یک کلونی متفاوت در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم $m\text{-}ACO_4$

الگوریتم $m\text{-}ACO_4$ به‌عنوان گونه‌ای از الگوریتم m-ACO که در [۸] پیشنهاد شده، برای حل مسایل چندهزینه‌ای استفاده می‌شود. این الگوریتم اساسا برگرفته از الگوی سیستم مورچه‌های کمینه- بیشینه [13] [۱۰] است. در این الگوریتم ابتدا توزیع فرمن برابر با مقدار بیشینه‌ی خود τ_{max} مقداردهی اولیه می‌شود. سپس مورچه‌ها در هر تکرار براساس قانون انتقال جواب‌ها را می‌سازند و توزیع فرمن براساس یک قانون بروزرسانی، بروزرسانی می‌شود. برای جلوگیری از همگرایی زودرس، مقدار فرمن هر المان مسیر، همواره بین دو مقدار کمینه و بیشینه‌ی خود (τ_{max},τ_{min}) به‌صورتی که $0<\tau_{min}<\tau_{max}$ است، محدود می‌شود. الگوریتم بعد از انجام تعداد مشخصی تکرار متوقف می‌شود. این الگوریتم تنها دارای یک کلونی است ولی از n توزیع فرمن متفاوت استفاده می‌کند که n برابر با تعداد تابع هزینه‌ی درنظرگرفته‌شده است.

مهمترین خاصیت الگوریتم کلونی مورچه‌ها این است که در پیاده‌سازی آنلاین، در حین تغییرات تدریجی مساله، تمام تجربیات ناشی از محاسبات قبلی از بین نمی رود. بلکه در هر مرحله به‌دلیل اینکه تغییرات صورت گرفته کم می‌باشد، می‌توان از همان توزیع فرمن قبلی استفاده کرد.

قانون انتقال: در هر سلول که قرار داشته باشیم، برای ساختن جواب در هر مرحله امکان انتخاب سه سلول جلویی وجود دارد (البته زمانی که سلول فعلی ردیف‌های اول و یازدهم باشند تنها اجازه‌ی رفتن به دو سلول وجود خواهد داشت). این سه سلول درون مجموعه‌ای به نام مجموعه‌ی کاندیدای J قرار می‌گیرند. انتخاب سلول بعدی براساس احتمالی که به هر عضو در مجموعه‌ی کاندیدا اختصاص داده می‌شود، صورت می‌گیرد. این احتمال به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(s)=\frac{[\tau(v_s)]^{\alpha}.[\eta(v_s)]^{\beta}}{\sum_{v_j\in J}[\tau(v_j)]^{\alpha}.[\eta(v_j)]^{\beta}} \qquad (۱)$$

که $\tau(v_s)$ و $\eta(v_s)$ به‌ترتیب توزیع فرمن و تابع هیوریستیک مربوط به سلول کاندیدای v_s هستند. α و β نیز پارامترهایی هستند که که ارزش نسبی این دو را تعیین می‌کنند. تعریف توزیع فرمن و تابع هیوریستیک استفاده‌شده در این الگوریتم در زیر آورده شده‌است.

توزیع فرمن: در هر مرحله از ساختن جواب، مورچه‌ها به‌صورت تصادفی r امین تابع هزینه را انتخاب می‌کنند تا آن را بهینه کنند ($r \in \{1,\ldots,n\}$). τ_r توزیع فرمن مربوط به r امین تابع هزینه‌ی انتخاب شده می‌باشد.

تابع هیوریستیک: تابع هیوریستیک برای تمام مورچه‌های کلونی موجود، یکسان است و برابر است با جمع اطلاعات هیوریستیک مرتبط با همه‌ی توابع هزینه است.

$$\eta=\sum_{i=1}^{n}\eta_i \qquad (۲)$$

تابع هیوریستیک با توجه به توضیحات داده‌شده، برای این مساله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \text{Weather Factor} + \text{Deviation Factor} + \text{Distance Factor} \qquad (۳)$$

بروزرسانی فرمن: هنگامی که تمام جواب‌ها ساخته شدند، توزیع فرمن بروزرسانی می‌شود. ابتدا مقدار مشخصی از فرمن همه مسیرها تبخیر می‌شود و سپس مقداری فرمن به بهترین مسیرهای یافت‌شده اضافه می‌شود. τ_i که i امین المان از توزیع فرمن و متعلق به المان c ام مسیر است به‌صورت زیر بروزرسانی می‌شود:

$$\tau_i(c)\leftarrow(1-\rho)\,\tau_i(c)+\Delta\tau_i(c) \qquad (۴)$$

که ρ ضریب تبخیر می‌باشد به‌طوری که $0\le\rho\le1$ باشد و $\Delta\tau_i(c)$ مقدار فرمنی است که به المان c ام مسیر اضافه می‌شود.

پاداش فرمن: بعد از اینکه تمام جوابها ساخته شدند، بهترین جواب‌ها (n تا) از دیدگاه هر کدام از n تابع هزینه‌ی موجود برای بروزرسانی n تابع فرمن استفاده می‌شوند. فرض کنید S^i بهترین جواب بدست آمده در مرحله‌ی

[11] Traveling Salesman Problem (TSP)
[12] State Transition Rule
[13] Max-Min Ant System

فعلی باشد که i امین تابع هزینه (f_i) را کمینه می‌کند و S^i_{best} بهترین جوابی باشد که تا کنون با احتساب مرحله‌ی فعلی بدست آمده باشد، مقدار فرمنی که بروی المان‌های تشکیل دهنده‌ی جواب S^i باید قرار گیرد از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta\tau_i(c)=\begin{cases}\dfrac{1}{1+f_i(S^i)-f_i(S^i_{best})} & c\in S^i\\ 0 & c\notin S^i\end{cases} \quad (۵)$$

نتایج شبیه‌سازی

در این تحقیق شبیه‌سازی برای دو حالت آفلاین و آنلاین صورت گرفته‌است. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی مذکور رروی کامپیوتری با مشخصات: پردازشگر ۲ گیگاهرتز دو هسته‌ای و رم ۲ گیگابایت و سیستم عامل ۳۲ بیتی Windows Vista Business و توسط نرم‌افزار پیاده‌سازی شده‌است.

پیاده‌سازی آفلاین: برای انجام شبیه‌سازی ابتدا باید یک سناریو برای شرایط آب‌وهوایی تعریف کنیم. برای تولید این سناریو از یک تولیدگر تصادفی استفاده شده‌است. در اینجا یک سناریوی پیچیده تولید شده‌است تا عمکرد الگوریتم در مسایل پیچیده سنجیده شود. پارامترهای الگوریتم که در محاسبات و کیفیت جوابها موثر هسند، براساس تحلیلی که در مقاله‌ی [۸] صورت گرفته به شرح زیر می‌باشند:

α: ارزش نسبی توزیع فرمن را در قانون انتقال مشخص می‌کند.
β: ارزش نسبی تابع هیوریستیک را در قانون انتقال مشخص می‌کند.
ρ: ضریب تبخیر فرمن در قانون بروزرسانی فرمن
m: تعداد مورچه‌ها
n: تعداد توابع هزینه
i_t: تعداد تکرار الگوریتم

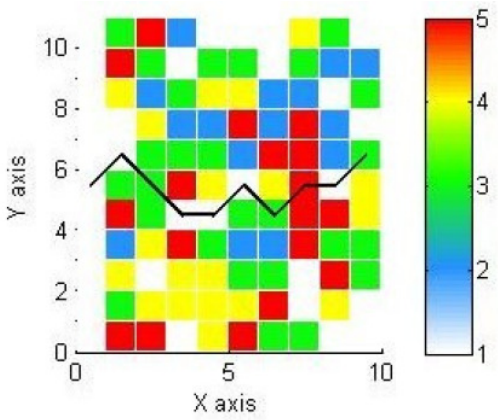
لازم به ذکر است که تعداد تکرار الگوریتم برابر با عددی مشخص قرار می‌گیرد یا توسط شرطی که عدم تغییر در جواب‌های بدست آماده را کنترل می‌کند، معین می‌شود. پارامترهای انتخاب شده در این شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده‌است:

جدول ۲- پارامترهای انتخاب شده‌ی الگوریتم

پارامترها	مقادیر
α	1
β	4
ρ	0.01
M	100
It	3000

نتیجه‌ی بدست آمده برای سناریوی آفلاین در شکل ۲ آورده شده‌است.

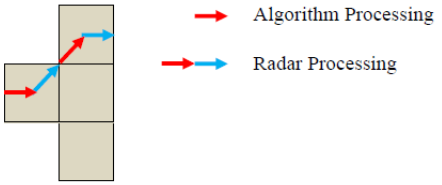
پیاده‌سازی آنلاین: در پیاده‌سازی آنلاین ابتدا مدل‌سازی مساله را در دو بخش تصمیم‌گیری در انتخاب مسیر و شبکه‌ی دینامیکی آب‌وهوا بیان می‌کنیم و سپس مساله را برای سناریویی تصادفی شبیه‌سازی می‌کنیم.



شکل ۲- مسیر بهینه برای حالت آفلاین

تصمیم‌گیری در انتخاب مسیر: برای حل همزمان مساله‌ی بهینه‌سازی مسیر با اجتناب آب‌وهوایی لازم است تا الگوریتم بهینه‌سازی با سیستم مدیریت پرواز هواپیما ترکیب شود. در این حالت هواپیما دایما درحال اسکن‌کردن شرایط آب‌وهوایی جلوی خود است و به‌محض اینکه شرایط بد آب‌وهوایی مشاهده شود، الگوریتم بهینه‌سازی اجرا شده و مسیر بهینه را مشخص می‌کند. تصمیم‌گیری هواپیما برای رفتن به سلول بعد، در مرکز هر سلول براساس جدیدترین شرایط آب‌وهوایی بدست آمده، صورت می‌گیرد.

در ابتدای هر سلول با توجه به اینکه ۱۰ سلول جلوتر اسکن شده‌اند، الگوریتم شروع به اجرا می‌شود و تا رسیدن هواپیما به مرکز سلول وقت دارد تا جواب بهینه را پیدا کند. از این پس هواپیما باید خود را به یکی از سه سلول انتخاب شده برساند. در حین حرکت هواپیما در داخل هر سلول رادار همواره در حال اسکن و پردازش اطلاعات مربوط به شرایط آب‌وهوایی است تا آنها را در ابتدای سلول جدید در اختیار الگوریتم بهینه‌سازی قرار دهد.



شکل ۳- مراحل پردازش مربوط به الگوریتم و رادار

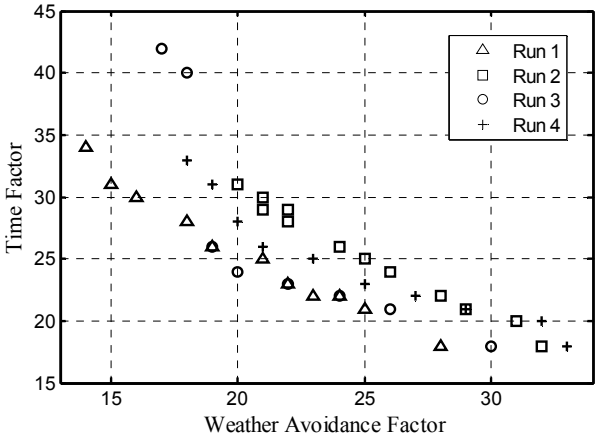
حال فرض کنید هواپیمایی در حال پرواز با ماخ حدودا ۰.۹ باشد، با توجه به اینکه طول هر سلول برابر با ۱۰ nm است، بنابراین زمان گذشتن از یک سلول حدودا برابر با ۶۰ ثانیه می‌شود. در نتیجه زمان موجود برای پردازش الگوریتم و تولید مسیر بهینه برابر با ۳۰ ثانیه است. همچنین اسکن راداری و تولید الگوی آب‌وهوای باید در ۶۰ ثانیه انجام شود تا در زمان رسیدن به سلول جدید، تمام اطلاعات آب‌وهوایی در مساحت nm x ۱۱ nm ۱۰ در اختیار الگوریتم قرار گیرد. در اینجا فرض می‌شود که ۲۰ ثانیه برای تصمیم‌گیری انتخاب مسیر روی نمودار پرتو و دیگر فرایندها صرف شود، در نتیجه الگوریتم تنها ۱۰ ثانیه برای تولید جواب بهینه زمان دارد.

با توجه به زمان محدودی که برای اجرای الگوریتم وجود دارد، باید پارامترهای الگویتم مورد بازنگری قرار بگیرند تا قید زمانی مطرح‌شده را ارضا کند. در اینجا با توجه به تحلیل پارامتری که صورت گرفت، نتایج زیر حاصل شد.

پارامترها	مقادیر
α	1
β	4
ρ	0.1
m	30
it	300

جدول ۳- پارامترهای انتخاب شده برای مساله‌ی آنلاین

در شکل ۴ نمودار منحنی پرتو بدست‌آمده در چهار اجرای مختلف پس از ۳۰۰ تکرار مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که طبق انتخاب تعداد تکرار ۳۰۰ برای مساله قابل قبول و مطمئن است.

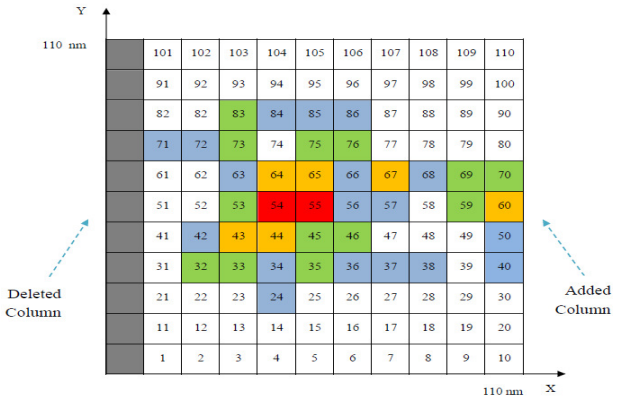


شکل ۴- تغییرات منحنی پرتو بر حسب تعداد ایتریشن

زمان اجرای الگوریتم با توجه به پارامترهای انتخاب‌شده برابر با ۱۰ ثانیه شد که ارضا کننده‌ی فرض انجام شده در بالا می‌باشد. بعد از اینکه الگوریتم بهینه‌سازی توانست منحنی پرتو را تشکیل دهد، تا رسیدن به مرکز سلول فرصت است تا تصمیم‌گیری روی این فضا انجام شود. اگر خلبان قادر به تصمیم‌گیری نبود، یک انتخاب‌گر مسیر خودکار[14] با توجه به وزن‌دهی پیش‌تعریف‌شده روی توابع، یک مسیر را انتخاب می‌کند و هواپیما را روی آن مسیر قرار می‌دهد.

شبکه‌ی دینامیکی آب‌وهوا: همانطور که گفته شد اسکن آب‌وهوا و پردازش راداری از مرکز هر سلول شروع شده و تا انتهای آن ادامه می‌یابد. وقتی که هواپیما به انتهای یک سلول رسید در حقیقت در شبکه‌ای که در نظر گرفتیم، ستون اول حذف شده و در انتهای آن یک ستون ایجاد می‌شود و شرایط آب‌وهوایی ستون‌های وسط بدون تغییر باقی می‌ماند. در نتیجه در شروع فرایند بهینه‌سازی، الگوریتم دوباره با مساله‌ای با شبکه بندی همانند سابق روبرو است که تنها موقعیت هواپیما در ستون اول با توجه به انتخاب قبلی آن تغییر کرده‌است. به عبارت دیگر می‌توان فرض کرد که هواپیما همواره در ستون اول قرار داشته و شبکه‌ای دینامیکی در جلوی آن تشکیل می‌شود که در هر اسکن تغییر می‌کند و هدف یافتن مسیر بهینه با توجه به آخرین شرایط شبکه برای تعیین انتخاب بعدی هواپیما است. نمایی از این شبکه‌ی دینامیکی در شکل ۵ نشان داده شده‌است.

همانند قبل برای تولید مدل آب‌وهوایی از یک تولیدگر تصادفی استفاده شده‌است. این تولیدگر باعث ایجاد سناریوی پیچیده‌ای خواهد شد که توانایی الگوریتم را در این سناریو باید سنجید.



شکل ۵- نحوه‌ی ایجاد شبکه‌ی دینامیکی آب‌وهوا

همچنین برای مدل کردن ناپایداری‌های جوی می‌توان از یک عمگر جهش آب‌وهوایی[15] استفاده کرد که باعث می شود سلول‌های اسکن شده در ستون‌های وسط در اسکن‌های بعدی دارای شرایط آب‌وهوایی متفاوتی باشند.

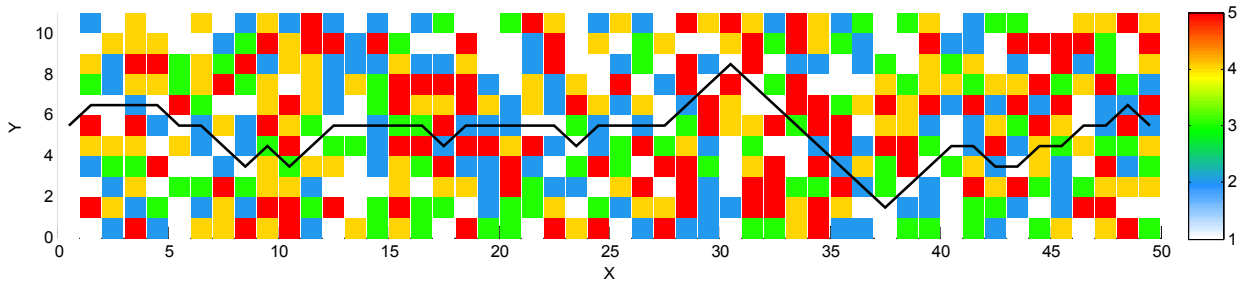
سناریوی آنلاینی که در اینجا بررسی می‌شود پیمودن ۵۰ سلول در شرایط آب‌وهوایی بد می‌باشد. شرایط آب‌وهوایی به‌صورت تصادفی و متغیر با زمان ایجاد شده‌اند. فرض می‌شود که هواپیما شرایط آب‌وهوایی را تا ۱۰ سلول جلوتر خود تشخیص می‌دهد و اینکه در این مسیر هواپیما از باندی به عرض ۱۱ سلول خارج نمی‌شود. تصمیم‌گیری‌های صورت گرفته در این سناریو به‌صورت خودکار انجام شده‌است و پیش‌فرضی که برای وزن‌دهی توابع هزینه از آن استفاده شده‌است، برای تابع هزینه‌ی آب‌وهوا ۰.۸ و برای تابع هزینه‌ی زمان ۰.۲ می‌باشد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در این شکل شرایط آب‌وهوایی براساس مدل شرایط آب‌وهوا رنگ‌بندی شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود به‌دلیل اعمال وزن بیشتر برروی شرایط آب‌وهوایی، مسیر پرواز بهینه‌ی پیشنهاد شده از سلول آب‌وهوایی قرمز رنگ اصلا عبور نکرده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدیریت ترافیک پرواز آزاد به‌عنوان راه‌حلی برای جایگزینی سیستم کنترل ترافیک فعلی مورد بررسی قرار گرفت. براساس این طرح تمام تصمیم‌گیری‌ها در انتخاب مسیر به‌عهده‌ی خلبان هواپیما قرار می‌گیرد. پیداکردن مسیر بهینه‌ی پرواز با اجتناب از شرایط بد آب‌وهوایی یکی از مشکلاتی است که در پرواز آزاد با آن مواجه هستیم. در اینجا الگوریتم چندهزینه‌ای کلونی مورچه‌ها برای بهینه‌سازی مسیر ارایه شد. با حل مساله توسط این الگوریتم مجموعه جواب‌های غیرغالب بدست آمد. این جواب‌ها فضایی را برای تصمیم‌گیری خلبان براساس توابع هزینه‌ی مطرح شده، قرار می‌دهد تا طبق آن بتواند با توجه به شرایط پروازی که در آن قرار دارد مسیر بهینه‌ای را انتخاب کند.

[14] Automatic Route Selection

[15] Weather Mutation Operator



شکل ۶- مسیر بهینه طی‌شده در حالت آنلاین

مراجع

1. RTCA. Report of the rtca board of director’s select committee on free flight. Technical report, RTCA Inc., Washington, DC, 1995.
2. ICAO. The ICAO Global air Navigation Plan for CNS/ATM systems, 2002.
3. C.Lee J. Krozel and J.S.B Mitchell, Estimating time of arrival in heavy weather conditions. In Proc AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf, 1999.
4. S. Bokadia and J. Valasek, Severe weather avoidance using informed heuristic search. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2001.
5. J. Prete and J.S.B. Mitchell, Safe routing of multiple aircraft flows in the presence of time-varying weather data. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004.
6. Sameer A., Lam T.B., Hussein A.A. and Michael B., Pareto Meta-Heuristics for Generating Safe Flight Trajectories Under Weather Hazards. Real-World Applications of Evolutionary Computation Techniques, 2006.
7. Sameer A., Hussein A.A. and M. Barlow, Pareto Meta-heuristics for Generating Safe Flight Trajectories Under Weather Hazards, Springer, Real-World Applications of Evolutionary Computation Techniques, 2006.
8. Alaya I., Solnon, C., Ghedira K., Ant Colony Optimization for Multi-objective Optimization Problems. Tools with Artificial Intelligence, IEEE International Conference on, 2007.
9. M. Dorigo, Optimization, Learning, Natural Algorithms (in Italian), PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1992.
10. T. Stutzle, H. Hoos, Max−Min Ant System, Journal of Future Generation Computer Systems, 2000.