



بهینه سازی چند هدفی مسیر نشست هواپیما بر اساس تحلیل پرتو

سید امین باقرزاده^۱، داود اسدی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف آباد - دانشکده فنی و مهندسی

۲- دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران - دانشکده مهندسی هوافضا

چکیده

این مقاله یک روش کارآمد برای تعیین وزن‌های توابع هزینه در مسئله بهینه‌سازی چند هدفی مسیر هواپیما با بال چپ آسیب دیده در حضور موانع ارائه می‌کند. برای طراحی مسیر بر اساس روش ارائه شده توابع هزینه مختلف شامل دوری از موانع، اندیس ارزش ایمنی و الزامات نشست ایمن مانند موقعیت و جهت باند، سرعت و زاویه گلاید تعریف می‌شود. برای طراحی مسیر از استراتژی میدان پتانسیل برای تولید مسیر نشست استفاده می‌شود. الگوریتم طراحی مسیر از پایه‌های حرکتی هواپیما آسیب‌دیده شامل شرایط تریم و مانور بین شرایط تریم برای طراحی مسیر استفاده می‌کند. در بهینه‌سازی چند هدفی (چندین تابع هزینه)، توابع هزینه معمولاً در تقابل و یا تضاد با یکدیگر هستند که مانع بهینه‌سازی همزمان از دیدگاه تمامی توابع هزینه می‌شود. با توجه به تعریف توابع هزینه مختلف برای طراحی مسیر در این مقاله، وزن‌های بهینه بر اساس آنالیز پرتو و مقایسه دو به دو توابع هزینه نرمالیزه شده استخراج می‌شود و تابع هزینه کل بر اساس روش جمع وزن‌دار تعریف می‌شود. نتایج شبیه‌سازی موثر بودن روش پیشنهادی در تعیین وزن‌های توابع هزینه در تولید مسیر نشست را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: چند هدفی، طراحی مسیر، نشست اضطراری، پایه‌های حرکتی

مقدمه

آسیب یا نقص در هواپیما می‌تواند منجر به افت شدید عملکرد هواپیما و از دست دادن کنترل هواپیما گردد. برای جلوگیری از اینگونه شرایط، محققان بر روی بهبود سیستم‌های خودکار جهت بازیابی هواپیما آسیب‌دیده متمرکز شده‌اند. سیستم‌های خودکار می‌توانند با شناخت آسیب یا نقص و تطبیق یافتن با آن به خلبان کمک نمایند. با شناسایی ویژگی‌های عملکردی پس از سانحه می‌توان یک مسیر جدید پروازی با توجه به محدودیت‌های مربوط به ویژگی‌های عملکردی کاهش یافته و ویژگی‌های پایداری جدید هواپیما ایجاد شود. نشست ایمن هواپیما پس از رویداد نقص یا آسیب با چالش‌های مختلفی روبه‌رو است. اولین چالش نیاز به شناخت پاکت پروازی جدید هواپیما و محدودیت‌های سینماتیک آن است که نیاز به شناسایی هواپیما آسیب‌دیده و تخمین پاکت پروازی بر اساس تأثیر نقص یا آسیب بر روی ویژگی‌های عملکردی و پایداری هواپیما دارد. چالش بعدی هدایت و کنترل ایمن هواپیما آسیب‌دیده جهت نشست ایمن است [۱].

روش‌های مختلف طرح‌ریزی مسیر شامل تجزیه سلولی گراف مشاهده‌پذیری، نقشه راه احتمالاتی (PRMs) و تکنیک‌های جستجوی محلی برای تولید مسیر نشست هواپیما آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. روش‌های طراحی مسیر مختلفی برای عملیات‌های خودکار ایجاد شده است. مطالعه کامل در مورد الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی مسیر پرواز در مرجع [۴] ارائه شده است. الگوریتم طرح‌ریزی مسیر تصادفی در یک محیط عاری از مانع در چارچوب نقشه راه تصادفی در مرجع [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۶] برای تخمین پاکت پروازی یک هواپیما با الویتور قفل شده و طراحی مسیر نشست ایمن به محل نشست مطلوب از آنالیز تریم استفاده کرده است.

استراتژی‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مسیر نشست ارائه شده است. در مرجع [۷] یک روش طراحی مسیر برای بازیابی هواپیما دچار نقص یا لحاظ کردن ماکزیمم ایمنی ارائه شده است. طرح‌ریزی مسیر نشست برای هواپیما آسیب‌دیده

با استفاده از روش‌های احتمالاتی با استفاده از مدل سینماتیک ساده هواپیما آسیب‌دیده در حضور مانع بررسی شده است [۸]. تولید مسیرهای مقاوم و بهینه‌سازی سه بعدی مسیرهای نشست برای یک هواپیما بال ثابت در حضور مانع در مرجع [۹] بررسی شده است. طراحی مسیر در این مقاله مبتنی بر ایده مانور خودکار (MA) است که برای اولین بار توسط فرزولی [۱۰] ارائه شد. MA ترکیبی از پایه‌های حرکتی شامل شرایط تریم و مانور است. مسیرهای مختلف با چسبیدن تکه مسیرهای مانورها و تکه مسیرهای تریم مناسب قابل ایجاد است.

در این مقاله برای طراحی مسیر از پاکت پروازی مانوری هواپیما آسیب‌دیده در آسیب‌های مختلف بال (از دست دادن درصدی از نوک بال)، مطابق مرجع [۱] استفاده می‌شود. پایداری محلی و کیفیت خودشدستی هر یک از شرایط تریم در داخل پاکت پروازی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت [۱۱]. مطابق مرجع [۲] یک معیار ایمنی (اندیس مقدار ایمنی) بر اساس ویژگی‌های پایداری و خودشدستی شرایط تریم تعریف می‌شود که به صورت یک تابع هزینه در طراحی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نزدیک‌شدن هواپیما آسیب‌دیده به باند علاوه بر معیار فوق به فاصله تا محل نشست، سرعت هواپیما، جهت باند، ارتفاع پروازی و محدودیت‌های زاویه گلاید و موانع موجود در مسیر بستگی دارد که برای داشتن یک مسیر ایمن همگی به صورت یک تابع هزینه در محاسبات مسیر وارد می‌شود. همچنین برای انجام طراحی مسیر با قابلیت پیاده‌سازی به هنگام، یک الگوریتم جستجوی محلی با الهام از روش میدان پتانسیل ارائه می‌شود که قادر است به سرعت مسیر نشست ایمن را از میان دسته شرایط تریم وزن‌دار از پیش محاسبه شده ایجاد نماید [۱۳]. بنابراین برای طراحی مسیر برای مقادیر معین از آسیب بال با توجه به استخراج شرایط تریم و تحلیل پایداری و خودشدستی و استخراج مانورهای بین شرایط تریم، یک کتابخانه از شرایط تریم و مانور وزن‌دار از پیش محاسبه شده، در اختیار است. وظیفه الگوریتم طراحی مسیر این است که یک مسیر نشست از میان نقاط تریم وزن‌دار که شرایط پروازی ممکن برای هواپیما آسیب‌دیده است، ایجاد کند به گونه‌ای که با موانع موجود در مسیر برخورد نکند [۱۲].

در طراحی مسیر برای هواپیما آسیب‌دیده ذاتا توابع هزینه مختلف همزمان در مسئله درگیر است که منجر به یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفی می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در این گونه مسائل تعیین وزن‌های توابع هزینه مختلف است. وزن نسبی توابع هزینه بر انتخاب شرایط تریم و شکل مسیر طراحی شده به شدت تأثیرگذار است. در بسیاری از پژوهش‌ها مانند مرجع [۲] طراح با سعی و خطا و شناختی که طراح از مسئله دارد وزن‌ها را تنظیم می‌کند. اما تعیین وزن‌ها نیاز به درک توازن بین توابع هزینه مختلف، بازه تغییرات آن‌ها و تأثیر متقابل تغییر آن‌ها دارد که امری بسیار دشوار است. در این زمینه تحقیقات و پژوهش‌های زیادی انجام شده است [۱۱]. مرجع [۱۲] مجموعه پرتو را برای حل مسئله طرح‌ریزی مسیر چند هدفه یک روبات پیشنهاد کرده است. برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، روش‌های دیگر از قبیل بهینه‌سازی مینیمم-ماکزیمم [۱۳]، برنامه‌ریزی چند هدفه [۱۴]، ماتریس تصمیم‌گیری و روش آنترابی [۱۵] و الگوریتم‌های تکاملی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مرجع [۱۶] یک مسئله چند هدفه با استفاده از الگوریتم PSO در طراحی مسیر یک روبات در محیط نامعین ارائه کرده است. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در پژوهش‌های

مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. مانند مرجع [۱۷] که در آن مسیر حرکت بهینه در حضور موانع و پنج تابع هزینه استخراج می‌شود. عمده نوع آوری این مقاله تعیین وزن‌های بهینه برای توابع هزینه مختلف و به کارگیری آن در مسئله طراحی مسیر نشست یک هواپیما با بال آسیب‌دیده است. نمونه تحقیقاتی که از تحلیل پرتو برای بهینه‌سازی چند هدفی استفاده کرده‌اند، در مراجع [۱۸] مشاهده می‌شود.

در این مقاله پس معرفی اجمالی استخراج پکت پروازی هواپیما با بال آسیب‌دیده مطابق مرجع [۲] توابع هزینه مختلف و الگوریتم طراحی مسیر معرفی می‌شود. سپس از تحلیل پرتو و مقایسه دو به دو توابع هزینه مختلف برای استخراج وزن‌ها استفاده می‌شود. کلیه توابع هزینه با استفاده از روش جمع وزن‌دار در طراحی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، عملکرد الگوریتم طراحی مسیر با وزن‌های بهینه استخراج شده با عملکرد الگوریتم A^* مقایسه و نتایج ارائه می‌شود.

پاکت پروازی

در این مقاله مطابق مرجع [۲]، شرایط ترمیم هواپیمای آسیب‌دیده با استفاده از معادلات غیرخطی و کوپله هواپیما با لحاظ تغییرات ضرایب آیرودینامیکی ناشی از آسیب استخراج می‌شود. پس از رویداد آسیب، هواپیما به منظور فرود در مکان مناسب نیاز به تغییر جهت و ارتفاع دارد. بر همین اساس، پاکت پروازی مانوری هواپیما شامل نرخ گردش (ψ) و زاویه مسیر برای تغییر ارتفاع (γ) در سرعت‌های مختلف (V) است. در واقع پاکت پروازی مانوری طیفی از پایه‌های حرکتی یا شرایط ترمیم هواپیما است که در هر ارتفاع منجر به پایگاه داده سه بعدی V, γ, ψ می‌شود. جزئیات کامل استخراج پاکت پروازی مانوری هواپیمای آسیب‌دیده در مرجع [۱۱] ارائه شده است. پایداری محلی هواپیما در هر یک از شرایط ترمیم در داخل پاکت پروازی مانوری استخراج می‌شود. ویژگی‌های پایداری ارائه شده بر اساس استخراج مدل خطی هواپیما در هر شرایط پروازی و مقادیر ویژه آن مطابق مرجع [۱۲] بدست در ادامه به منظور استفاده از پایه‌های حرکتی در طراحی مسیر، شرایط ترمیم بر اساس کیفیت خوددستی در تمامی مدهای حرکتی اولویت‌بندی می‌شوند. به همین منظور مطابق مرجع [۲۰۱] ابتدا در هر یک از شرایط ترمیم مطلوب، مدهای حرکتی استخراج می‌شود و سپس کیفیت پروازی هر مود بر اساس میزان میرایی و فرکانس طبیعی آن محاسبه می‌شود.

برای تخمین ویژگی کیفیت خوددستی متاثر از تمامی مدها در هر نقطه ترمیم و فراهم نمودن یک معیار اولویت‌بندی در انتخاب شرایط ترمیم در طراحی مسیر پس از آسیب، اندیس ارزش ایمنی ناشی از کیفیت خوددستی (SVI) به عنوان معیار اولویت‌بندی انتخاب شرایط ترمیم در طراحی مسیر تعریف می‌شود. جزئیات استخراج کیفیت خوددستی و مقادیر اندیس ایمنی بر شرایط ترمیم مختلف در پژوهش‌های قبلی (مراجع [۲۰۱]) ارائه شده است.

پایگاه داده‌های پروازی و طرح‌ریزی مسیر

وظیفه الگوریتم طراحی مسیر شناسایی صحیح و مناسب توالی شرایط ترمیم از نقطه شروع، جایی که آسیب رخ می‌دهد تا محل نشست با سمت مطلوب می‌باشد. بر اساس پاکت پروازی استخراج شده، یک مجموعه همسایگی برای هر یک از شرایط ترمیم (T) تعریف می‌شود و بر اساس آن مانورها (M) برای شرایط ترمیم تعریف می‌شود. مطابق شکل ۱، هر T دارای ۲۶ همسایگی است. تکه مسیرهایی با زمان انتقال ثابت ۵ ثانیه بین شرایط ترمیم برای هر یک از شرایط ترمیم با توجه به شرایط ترمیم همسایگی با استفاده از یک کنترلر (LQR) تولید می‌شود و تغییرات ایجاد شده در حالت‌ها $(\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z, \Delta \psi, \Delta \gamma)$ در پایگاه داده به صورت

ساختار یافته ذخیره می‌شود تا قابلیت استفاده به صورت به‌هنگام را داشته باشد.

بنابراین برای هر شرایط ترمیم ۲۷ تکه مسیر شامل ۲۶ مانور به شرایط ترمیم همسایگی و یک مسیر ترمیم ۵ ثانیه (حفظ نقطه ترمیم مطلوب) وجود دارد. بر اساس شرایط همسایگی برای هر نقطه ترمیم، مقادیر تغییرات در ماتریس $D = [\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z, \Delta \psi, \Delta \gamma, \Delta s, SVI_T]$ ذخیره می‌شود تا در طراحی مسیر مورد استفاده قرار گیرند. در این ماتریس SVI به ترتیب طول و مقدار اندیس ایمنی کل برای تکه مسیره‌ها است. $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ تغییرات موقعیت در دستگاه اینرسی و $\Delta \psi, \Delta \gamma$ تغییر زاویه مسیر و سمت هر تکه مسیر می‌باشد.

الگوریتم بر اساس توابع هزینه معرفی شده در هر گام بهترین تکه مسیر را از میان پایگاه تکه مسیرهای از پیش محاسبه شده با لحاظ محدودیت عدم برخورد با موانع را انتخاب می‌کند. حالت نهایی شامل موقعیت، زاویه سمت و زاویه گلاید در محل نشست می‌باشد که به ترتیب با $p_x, p_y, p_z, \psi, \gamma$ نشان داده می‌شود.

در این مقاله برای طراحی مسیر به هنگام از روش میدان پتانسیل مصنوعی (APF) که یک الگوریتم محلی است، استفاده شده است. برای مقایسه نتایج نیز از الگوریتم A^* که یک الگوریتم کامل و بهینه است، استفاده شده است [۳].

الگوریتم A^* منجر به ایجاد فضای جستجوی نسبتاً بزرگی می‌شود، تا حدی بزرگ که قابل پیاده‌سازی به‌هنگام بر روی کامپیوتر نصب بر روی هواپیما نیست. روش‌های مختلف مبتنی بر A^* برای کاهش تلاش محاسباتی در فرایند جستجو توسعه یافته است. در روش A^* وزن‌دار (WA^*) تابع هزینه کل با $f(n) = g(n) + W^*$ تخمین زده می‌شود که در آن W فاکتور وزنی تابع هیوریستیک است [۳].

در این مقاله، توابع هزینه استفاده شده برای هر دو الگوریتم A^* و الگوریتم مبتنی بر روش میدان پتانسیل از توابع هزینه $f(n) = g(n) + W^*h(n)$ استفاده می‌شود. با استفاده از این فرایند می‌توان هزینه کل پاسخ‌های استخراج شده را با هم مقایسه نمود. در ادامه توابع هزینه $g(n)$ و $h(n)$ معرفی می‌شوند. برای سادگی، تابع هزینه $g(n)$ به عنوان جمع طول کل تکه مسیره‌ها، Δs ، از ابتدا تا حالت کنونی است. توابع هیوریستیک $h(n)$ در قسمت بعد معرفی شده است. در هر گام الگوریتم طراحی مسیر، از میان ۲۷ انتخاب ممکن با توجه به مقدار هزینه کل بهترین، یک حالت ترمیم را به عنوان حالت ترمیم بعدی انتخاب می‌کند. هر دو الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم A^* هنگامی که به تلورانس قابل قبولی از هدف برسند، متوقف می‌شوند.

تعریف توابع هزینه

توابع هزینه هیوریستیک کل به شکل جمع وزن‌دار مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$h(n) = \sum_{k \in \Omega} J_k \quad (۱)$$

که در آن $\Omega = \{SVI_T, P_L, altitude, time, \psi_L, \gamma_L, V_L, terrain\}$ نشان‌دهنده مجموع توابع معیاری است که قبلاً تعریف شده است. برای هر یک از ترم‌های توابع یک وزن اختصاص داده می‌شود تا ارتباط نسبی تأثیر هر یک از توابع با تابع هزینه کل استخراج گردد. روابط (۲) تا (۸) یک از ترم‌های تابع هزینه را معرفی می‌کند [۲]:

$$J_{SVI} = w_{SVI}(1 - SVI_T) \quad (۲)$$

بر اساس آنالیز SVI_T ، در یک هواپیما با بال چپ آسیب‌دیده، افزایش وزن تابع هزینه فوق (w_{SVI}) منجر به ایجاد مسیرهایی با مقادیر بالاتر SVI_T می‌شود.

موقعیت نهایی هواپیما باید با موقعیت ابتدای باند برابر باشد بنابراین تابع هزینه P_L به عنوان فاصله هواپیما تا موقعیت مطلوب باند به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$J_{P_L} = w_{P_L} \sqrt{\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2 + \Delta p_z^2} \quad (۳)$$

در رابطه فوق مقادیر $(\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z)$ به ترتیب نشان‌دهنده فاصله هواپیما تا محل نشست در جهت X, Y, Z است. از آنجا که تکه مسیره‌های زمان-ثابت در طراحی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزایش وزن تابع هزینه "مسافت باقی مانده" (w_{P_L}) منجر به تولید مسیرهایی با سرعت‌های بالاتر می‌شود که در نهایت باعث کاهش زمان پرواز کل و همچنین کاهش مانور بین شرایط ترمیم می‌شود. قابل ذکر است که مقادیر وزن‌های توابع هزینه مانند (w_{P_L}) در قسمت بعد بر اساس تحلیل پرتو استخراج می‌شود.

همراستا شدن هواپیما با سمت نهایی با تابع هزینه زیر بدست می‌آید [۲]:

$$J_{\psi_L} = w_{\psi_L} |\psi_a - \psi_L| \quad (۴)$$

وزن تابع فوق هنگامی که هواپیما بر اساس تابع تعریف شده توسط کاربر "نزدیک" سایت محل نشست است مقدار غیر صفر است و در جاهای دیگر صفر در نظر گرفته می‌شود.

از جمله تجهیزات ناوبری کمک‌کننده به هواپیما هنگام نشست لوکالایزاسیون است که هواپیما را به خط مرکزی باند هدایت می‌کند. شیب‌گلاپدینز چگونگی نزول نهایی هواپیما را تنظیم می‌کند. پارامترهای ایده‌آل تقرب می‌تواند به صورت تابع هزینه در طراحی مسیر مورد استفاده قرار گیرد؛ اگرچه هواپیمای آسیب‌دیده نتواند مقادیر ایده‌آل را دنبال کند ولی در فاز نهایی از شرایط تریم با مقادیر نزدیک به شرایط ایده‌آل استفاده می‌شود. در ابتدا، زاویه γ مطابق شکل ۲ به گونه‌ای تعریف می‌شود که هواپیما را به سمت مرکز باند نزدیک نماید (وظیفه لوکالایزاسیون).

ترم هزینه بر اساس زاویه مسیر هواپیما به گونه‌ای تعریف می‌شود که هواپیما با زاویه گلاپدینز مطلوب به باند محل نشست تقرب نماید [۲]:

$$J_\gamma = w_\gamma |\gamma_a - \gamma_L| \quad (5)$$

که در آن γ_a زاویه مسیر پرواز هواپیما و γ_L زاویه گلاپدینز مطلوب است. مقدار وزن در هنگام تقرب به باند غیر صفر است و در جاهای دیگر صفر در نظر گرفته می‌شود. افزایش وزن w_γ به همراه وزن مربوط به زاویه سمت در الگوریتم طراحی مسیر باعث کشاندن مسیر به سمت خط مرکزی و سمت باند مطلوب می‌شود. در واقع، بر اساس یک فاصله تعریف شده از باند، مقدار وزن از صفر به یک مقدار بزرگ تغییر می‌کند.

نشست هواپیما معمولاً با سرعت پایین و بدون زاویه رول انجام می‌شود. تابع هزینه سرعت برای جریمه سرعت‌های بالاتر از سرعت مطلوب نشست، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_{V_L} = w_{V_L} |V_a - V_L| \quad (6)$$

وزن سرعت w_{V_L} هنگام قرار گرفتن هواپیما در فاز تقرب یک مقدار قابل ملاحظه غیر صفر دارد و از مقدار صفر در فاصله‌های دور به یک مقدار بزرگ تغییر می‌کند. در انتخاب شرایط تریم باد یا اغتشاشات اتمسفر در نظر گرفته نشده است. در صورت وجود باد از جانب در هنگام نشست نیاز به شرایط تریم با زوایای سرش‌جانبی و زاویه رول غیر صفر است. بنابراین می‌توان کتابخانه شرایط تریم را برای شرایط تریم بدون قید زاویه سرش‌جانبی صفر درجه استخراج نمود.

هنگام طراحی مسیر فرض بر این است که کلیه موانع اطراف بر روی کامپوتر پرواز بارگذاری شده است و تمامی موانع و عوارض در محدوده اطراف محل نشست معلوم هستند. در الگوریتم طراحی مسیر پیشنهادی، موانع نزدیک توسط یک تابع نمایی به شرح زیر جریمه می‌شوند تا ریسک ناشی از برخورد را کاهش دهند [۲]:

$$J_{Terrain} = w_{Terrain} \exp\left(\frac{1}{d_T}\right) \quad (7)$$

در تابع هزینه فوق d_T مسافت هواپیما تا عوارض است و به صورت $d_T = \sqrt{(p_x - x_T)^2 + (p_y - y_T)^2 + (p_z - z_T)^2}$ که در آن (p_x, p_y, p_z) و (x_T, y_T, z_T) به ترتیب موقعیت هواپیما و عوارض در دستگاه اینرسی است. بر اساس آنالیز پاکت پروازی، هواپیما دارای محدودیت در ماکزیمم مقدار منفی زاویه مسیر (γ_{min}) است. زاویه Γ مطابق شکل ۲ برای اعمال این محدودیت به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$\Gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta p_z}{\sqrt{\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2}}\right) \quad (8)$$

مطابق شکل ۲ زاویه Γ نشان‌دهنده زاویه نسی بردار موقعیت هواپیما به محل نشست نسبت به افق می‌باشد. فرض می‌شود، γ_{min} مینیمم زاویه مسیر قابل دستیابی در پاکت پروازی هواپیمای آسیب‌دیده باشد. بنابراین تابع هزینه ارتفاع بر اساس زاویه Γ به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$J_{Alt.} = \begin{cases} w_{Alt} (\Gamma - |\gamma_{min}|) & w_{Alt} (\Gamma + \gamma_{min}), \Gamma > |\gamma_{min}| \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

استفاده از این ترم به عنوان تابع هزینه در الگوریتم طراحی مسیر باعث کاهش ارتفاع هواپیما در یک مسیر دایره‌ای حول محل نشست می‌شود تا هواپیما قابلیت کاهش ارتفاع و نزول مستقیم به سمت محل نشست را داشته باشد.

استخراج وزن توابع هزینه

برای اعمال توابع هزینه در طراحی ابتدا وزن‌ها توسط یک تابع فازی خطی نرمالیزه می‌شوند. از آنجا که محدوده تغییرات هر یک از توابع هزینه متفاوت است با انجام این فرایند همگی در یک بازه یکسان قابل مقایسه قرار می‌گیرند. تابع خطی فازی استفاده شده در فرایند نرمالیزه به شرح زیر است:

$$J_\beta = \frac{J_\beta - J_{\beta, \min}}{J_{\beta, \max} - J_{\beta, \min}}, \quad \beta = \text{Cost function} \quad (10)$$

که در رابطه فوق $J_{\beta, \min}$ و $J_{\beta, \max}$ به ترتیب ماکزیمم و مینیمم مقدار تابع هزینه در هر گام از بهینه‌سازی در میان ۲۷ انتخاب تکه مسیرهای موجود در همسایگی است. برای مثال، فاصله تا مانع یا عوارض زمینی با استفاده از تابع فازی خطی، به صورت زیر نرمالیزه می‌شود:

$$J_{T,i} = \frac{J_T^i - J_{T, \min}^i}{J_{T, \max}^i - J_{T, \min}^i} \quad (11)$$

که در رابطه فوق $J_{T, \min}^i$ و $J_{T, \max}^i$ بیشترین و کمترین تابع هزینه مانع موجود در میان کل تکه مسیرها تا ۱-امین مانع است و J_T^i تابع هزینه مانع تا ۱-امین مانع است. در صورتی که تعداد موانع بیشتر از یک مانع باشد، تابع هزینه موانع با استفاده از یک عملگر فازی برای کل موانع محاسبه می‌شود. برای مثال، هنگامی که تعداد موانع در محدوده هواپیما ۲ عدد باشد، تابع هزینه کل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J_T = J_{T,1} + J_{T,2} = J_{T,1} + J_{T,2} - J_{T,1} J_{T,2} \quad (12)$$

بهینه‌سازی چند هدفی

فرایند بهینه‌سازی همزمان و سیستماتیک مجموعه‌ای از توابع هدف، بهینه‌سازی چند هدفی یا بهینه‌سازی برداری نامیده می‌شود. مسئله بهینه‌سازی اهداف چندگانه معمولاً به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } J(x) &= [J_1(x), J_2(x), \dots, J_k(x)]^T \\ g_j(x) &\leq 0, \quad j=1, 2, \dots, m \\ h_l(x) &= 0, \quad l=1, 2, \dots, e \end{aligned} \quad (13)$$

که در رابطه فوق تعداد توابع هدف، m تعداد قیدهای نامساوی و e تعداد قیدهای مساوی است. $x \in E^n$ بردار متغیرهای طراحی (یا متغیرهای تصمیم‌گیری) است که در آن n تعداد متغیرهای مستقل است.

$J(x) \in E^k$ بردار توابع هدف است که توابع هزینه یا تابع ارزش‌نیز نامیده می‌شود. برای اعمال اثر تمامی توابع هزینه در مسئله طراحی مسیر از روش جمع وزن‌دار مطابق زیر استفاده می‌شود:

$$J_{Total} = \sum_{k=1}^k g_k + w_k J_k, \quad k: \text{cost functions} \quad (14)$$

این روش علی‌رغم سادگی دراری چالش بزرگی است که آن تعیین وزن توابع مختلف است. در تعیین وزن‌ها بازه تغییرات توابع هزینه و مصالحه و تاثیر متقابل بین توابع هزینه مختلف باید در نظر گرفته شود. یکی از روش‌های تعیین وزن‌های توابع استفاده از تحلیل پرتو و مقایسه دوه دو آن‌ها می‌باشد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

استخراج جبهه پرتو

انتخاب صحیح وزن هر یک از توابع تبدیل و رسیدن به بهترین جواب از دید طراح، نیاز به بررسی دقیق ارتباط بین توابع هزینه و محدوده و میزان تأثیر آن‌ها بر یکدیگر دارد. به منظور بررسی ارتباط و ارزیابی تأثیر توابع بر یکدیگر، از آنالیز پرتو استفاده می‌شود. بررسی جبهه پرتو برای ترکیب توابع هزینه مختلف به طراح کمک می‌کند تا ارتباط بین توابع را درک نماید [۲۰]. تعیین جبهه پرتو بر اساس تغییر پله‌ای نسبی وزن توابع هزینه به صورت دو به دو انجام می‌شود. در حقیقت،

۰/۰۹۶	$W_{Terrain}$
۰/۰۰۹	W_T
۰/۱۱۴	W_{Alt}

عملکرد هر الگوریتم بر اساس هزینه حل، تعداد گره‌های توسعه یافته، عمق جستجو، مقدار میانگین معیار ایمنی در کل مسیر (SVI) پرواز و تعداد تغییرات زاویه سمت مشخص می‌شود. برای الگوریتم WA^* دو مقدار وزنی ۱.۵ و ۳ استفاده شده است. مقادیر میانگین معیارهای عملکرد در سناریوهای مختلف معرفی شده در بالا، در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی برای یافتن جواب تعداد گره‌های بسیار کمتری نسبت به A^* و WA^* را توسعه می‌دهد.

مقایسه زمان اجرای مورد نیاز توسط الگوریتم‌های مختلف در نرم‌افزار متلب با استفاده از یک کامپیوتر استاندارد نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با توابع هزینه و وزن‌های استخراج شده قابلیت استفاده به‌هنگام را دارد و قادر است جواب‌ها را در کمتر از یک ثانیه ارائه دهد. البته اجرای برنامه فوق در یک نرم‌افزار کامپیاب و سطح پایین و یا استفاده از پردازنده‌های قوی‌تر می‌تواند زمان اجرا (بر حسب ثانیه) را تا حد قابل ملاحظه‌ای نسبت به مقادیر ارائه شده کاهش دهد. تعداد گره‌های توسعه یافته به نحوی نشان دهنده پیچیدگی فضای الگوریتم و زمان اجرا نشان دهنده پیچیدگی زمانی الگوریتم می‌باشد. تابع $g(n)$ نیز طبق تعریف نشان دهنده طول مسیر طراحی شده است.

بیان این نکته حائز اهمیت است که موارد بررسی و ارائه شده در این مقاله در یک فضای کوچک مورد بررسی قرار گرفته‌اند و می‌تواند در واقعیت شامل مسافت‌های بزرگتر و موانع پیچیده‌تری شود. توانایی تولید سریع یک راه‌حل به‌هنگام برای مواقع اضطراری بسیار ضروری است. در واقع بهینگی در طراحی مسیر نشست ایمن برای هواپیمای سانحه دیده شامل استخراج سریع یک مسیر ایمن و امکان‌پذیر می‌شود. معیارهای عملکردی دیگر (هزینه، SVI، تغییر زاویه سمت) نشان‌دهنده هزینه کمتر (بهینگی) استخراج شده در الگوریتم A^* است.

جدول ۳ مقایسه معیارها در مسیرهای استخراجی از الگوریتم‌ها

الگوریتم	زمان اجرا	گره‌ها	SVI	$g(n)$
A^*	۳/۱۷	۱۴۳۵۸	۰/۷۲	۴۹۲۱۴
$WA^*, W = 1/5$	۷/۹	۴۸۶۹	۰/۷۲	۴۹۵۸۲
$WA^*, W = 3$	۲/۶	۲۸۷۴	۰/۷۲	۵۰۰۹۶
الگوریتم پیشنهادی	۰/۱۲	۲۱۸	۰/۶۸	۵۰۴۶۰

همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش فاکتور وزن در الگوریتم WA^* الگوریتم را به سمت الگوریتم حریصانه می‌کشد و در ازای ارائه حل‌ها با هزینه بالاتر تعداد گره‌های کمتری برای رسیدن به جواب توسعه می‌یابد. نمونه‌ای از مسیرهای اجرا شده توسط این سه الگوریتم در شکل ۱۲ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک استراتژی جستجوی بهینه محلی گسسته برای تولید مسیر در حضور موانع ارائه شد که هواپیما را قادر به طرح‌ریزی مسیر نشست ایمن می‌کند. یک پایگاه داده از تکه مسیرهای تریم و مانور با استفاده از کنترلر ایجاد شد. هر تکه مسیر دارای یک مقدار مشخص اندیس ایمنی است که بر اساس ویژگی‌های پایداری و خوشدستی هواپیما در داخل پاکت پروازی هواپیما استخراج شده است. یک الگوریتم جستجو مبتنی بر میدان پتانسیل برای استخراج مسیر از کتابخانه تکه مسیر بر اساس معیارهای نشست ایمن معرفی شد. علاوه بر این ایمنی برای مسیر نشست بر مبنای سرعت نشست، زاویه سمت، زاویه رول و گلااید تعریف می‌شود. در هر گام از جستجو، تکه مسیر با کمترین هزینه انتخاب می‌شود. شکل مسیر استخراج شده تا حد زیادی به مقادیر وزنی توابع هزینه وابسته است. مقادیر وزن‌ها برای توابع هزینه مختلف پس از نرمالیزه کردن توابع هزینه، بر اساس آنالیز پرتو و مقایسه دو به دو توابع هزینه استخراج می‌شود و تابع هزینه کل به صورت جمع وزن‌دار تمام توابع هزینه تعریف می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با وزن‌های بهینه قادر است در زمان کم مسیر ایمن نشست را در حضور موانع ایجاد کند به گونه‌ای که مسیر استخراجی یک

در مسئله بهینه‌سازی با چند تابع هزینه، توابع هزینه دو به دو انتخاب می‌شوند و جبهه پرتو با تغییر نسبی اوزان توابع هزینه استخراج می‌شود. بازه تغییرات وزن‌ها بین صفر و یک می‌باشد.

آنالیز پرتو، درک صحیحی از چگونگی تغییر ویژگی‌های معیارهای مختلف برای طراحی یا تصمیم‌گیرنده فراهم می‌کند [۲۰]. علاوه بر این می‌تواند در مرحله بالاتر استنباط صحیحی از تعریف مقادیر ماکزیم و مینیمم برای هر تابع هزینه فراهم نماید [۱۸]. اشکال ۳-۶ جبهه پرتو برخی توابع هزینه را نشان می‌دهد که تعیین کننده تعامل وزن‌ها و محدوده ماکزیم و مینیمم توابع هزینه است.

اشکال ۳-۶ جبهه پرتو برخی توابع هزینه را به ازای وزن‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۳ تابع هزینه نرخ تغییرات سمت با SVI و شکل ۴ تابع هزینه ارتفاع بر حسب SVI رابه ازای مقادیر وزن مختلف نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز تغییرات تابع هزینه مانع بر حسب SVI و شکل ۶ نیز جبهه پرتو تابع هزینه مانع و هدف را نشان می‌دهد. در شکل ۷ مسیر نشست برای مقادیر مختلف تابع هزینه مانع و هدف ارائه شده است. هنگامی که وزن تابع هزینه مانع بزرگ است، مسیر تولید شده از موانع بسیار دور می‌شود. اختلاف بین دو مسیر ایجاد شده اهمیت انتخاب وزن‌ها را نشان می‌دهد. در واقع هدف از تحلیل پرتو مقایسه توابع هزینه مختلف نسبت به یکدیگر و انتخاب وزن‌های مناسب برای توابع هزینه مختلف است به گونه‌ای که بین توابع مصالحه برقرار باشد.

تحلیل مجموعه پرتو و استخراج وزن‌ها

چالش بعدی پس از استخراج مجموعه پرتو برای توابع هزینه، استخراج حل بهینه در جبهه پرتو است به گونه‌ای که بین وزن‌های مختلف توازن برقرار شود. در این مقاله برای استخراج جواب بهینه مطابق مرجع [۱۸] از رابطه زیر که بر اساس ارتباط هندسی تعریف شده است استفاده می‌شود. این روش معمول از نرم L_2 به گونه‌ای استفاده می‌کند که جواب استخراج شده مطابق شکل ۸ عبارت زیر را کمینه کند:

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^2 [J_i(X) - J_i^*]^2 \right\}^{0.5} \quad (20)$$

با داشتن مجموعه پرتو، روش فوق با مقایسه وزن‌های مختلف بهترین جواب را محاسبه می‌کند. برای مثال مطابق شکل ۸، جواب بهینه (مصالحه) بر اساس رابطه فوق استخراج شده است:

جبهه پرتو تابع هزینه SVI و سرعت در شکل ۹ نشان داده شده است. مسیرهای استخراج شده به ازای وزن‌های مختلف و وزن بهینه نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. متغیرهای پروازی متناظر با سه مسیر استخراج شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مسیر با وزن سرعت بالاتر سریع‌تر به مقصد می‌رسد. برای مقایسه بهتر این سه مسیر برخی معیارهای عملکردی آن‌ها مطابق جدول ۱ مقایسه می‌شوند.

جدول ۱ مقایسه معیارهای سه مسیر به ازای وزن‌های مختلف

وزن‌ها	تعداد گره‌ها	SVI	زمان
$(W_v, W_{SVI}) = (0, 1)$	۴۸۶۱	۰/۶۹	۱۱۶۵
$(W_v, W_{SVI}) = (0.45, 0.55)$	۴۷۹۸	۰/۷۳	۱۰۴۲
$(W_v, W_{SVI}) = (1, 0)$	۴۷۵۶	۰/۷۸	۹۴۸

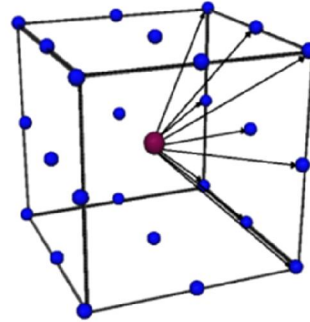
بر اساس معادله ۲۰ جواب بهینه بر اساس تحلیل پرتو مقایسه دو به دو توابع استخراج می‌شود. مقادیر نرمالیزه شده مقادیر عددی وزن‌های توابع هزینه مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مقادیر وزن‌های توابع هزینه استخراج شده از تحلیل پرتو

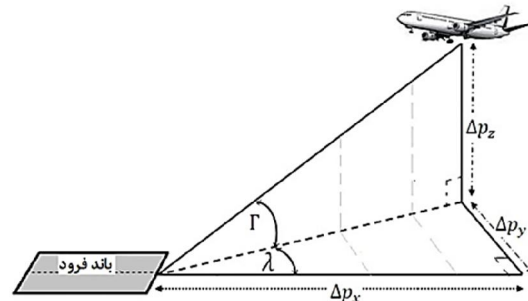
وزن‌ها	مقدار
W_{SVI}	۰/۱۱
W_V	۰/۱۳
W_{glide}	۰/۱۰۴
W_{Loc}	۰/۱۱۷
W_{VL}	۰/۱۱۲
W_ψ	۰/۱

مسیر مصالحه با در نظر گرفتن کلیه توابع هزینه است. همچنین در مقایسه با الگوریتم‌های A* (یک الگوریتم بهینه) و WA* زمان محاسباتی بسیار کمتری نیاز دارد و عملکرد مناسبی در مقایسه با آن‌ها دارد.

شکل‌ها و نمودارها

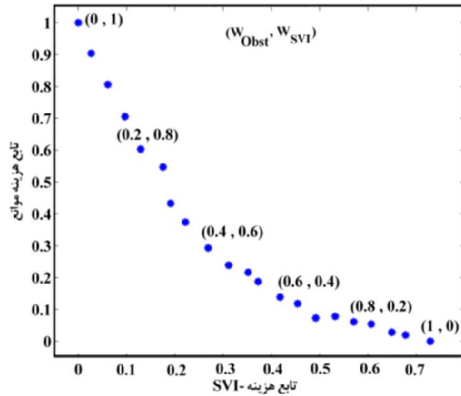


شکل ۱ شرایط تریم در همسایگی هر نقطه تریم

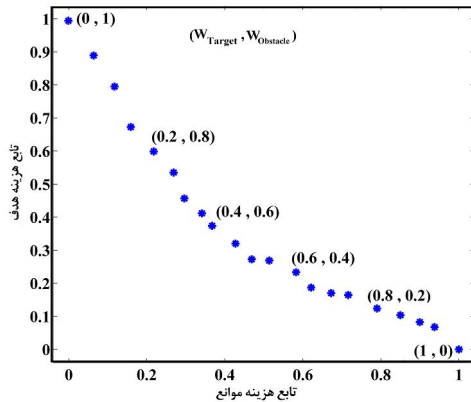


شکل ۲ موقعیت هواپیما نسبت به باند

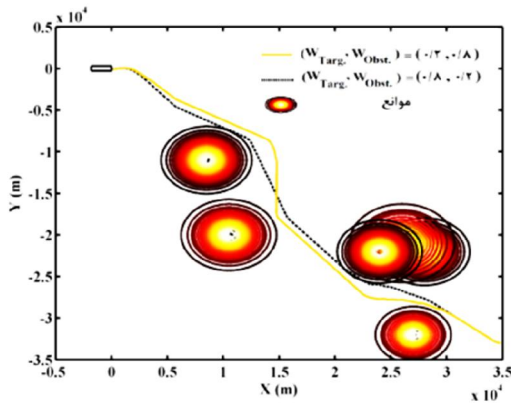
شکل ۴ جبهه پرتو تابع هزینه ارتفاع بر حسب SVI



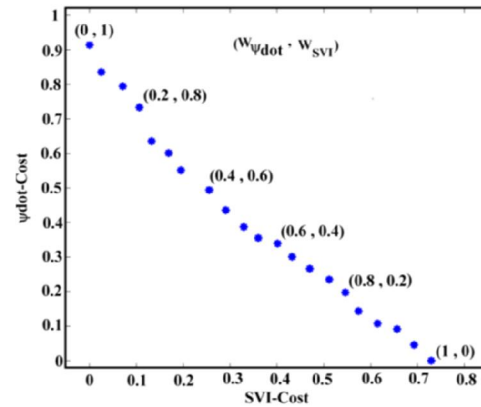
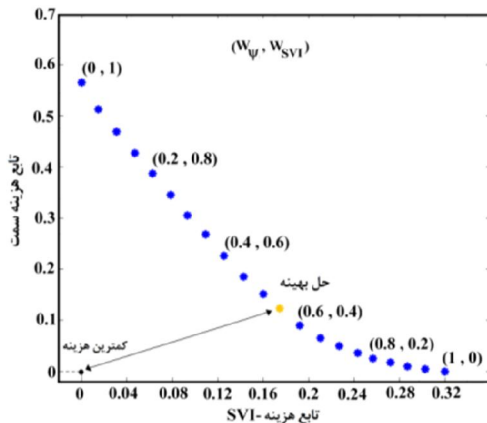
شکل ۵ جبهه پرتو تابع هزینه ارتفاع بر حسب SVI



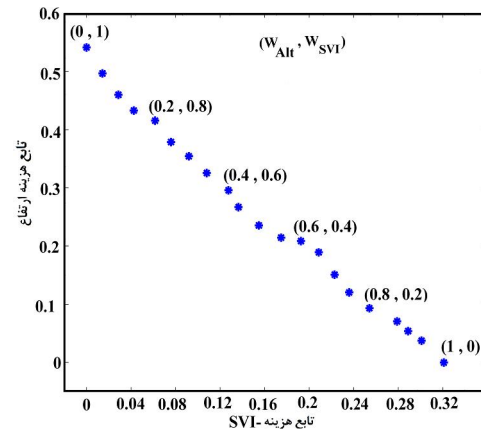
شکل ۶ جبهه پرتو تابع هزینه مانع بر حسب هدف



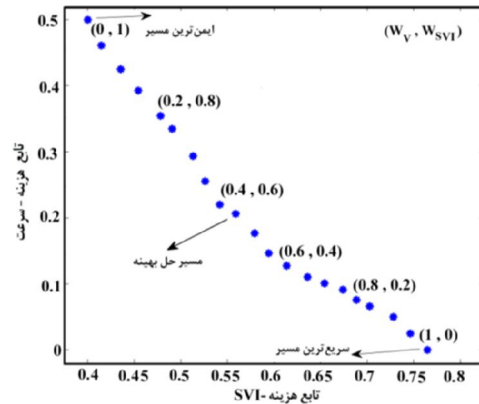
شکل ۷ مسیر نشست با وزن‌های مانع و هدف مختلف



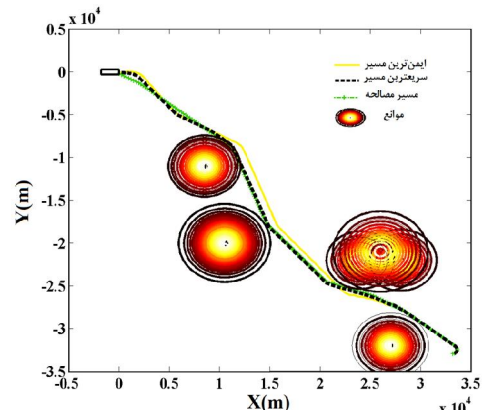
شکل ۳ جبهه پرتو تابع هزینه نرخ سمت بر حسب SVI



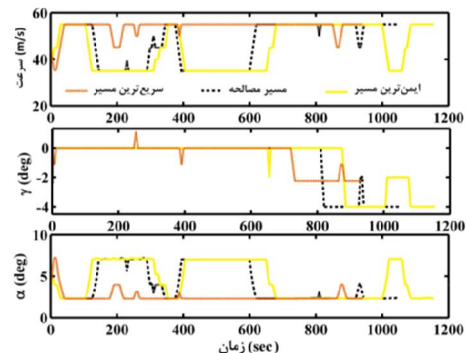
شکل ۸ استخراج نقطه بهینه (حل مصالحه‌ای)



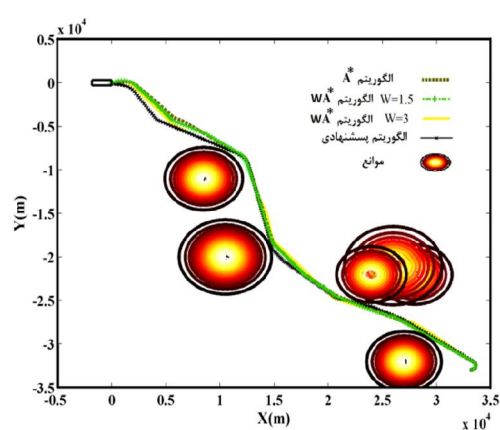
شکل ۹ جبهه پرتو تابع هزینه سرعت بر حسب SVI



شکل ۱۰ مسیر نشست با وزن‌های مانع و هدف مختلف



شکل ۱۱ مسیر نشست با وزن‌های مانع و هدف مختلف



شکل ۱۲ مقایسه مسیرهای نشست در حضور موانع (نمای از بالا)

مراجع

1. D. Asadi, M. Sabzehparvar, H. A. Talebi, Damaged airplane flight envelope and stability evaluation, *Aircraft Eng. and Aerospace Tech.*, Vol. 85, No. 3, pp. 186-198, 2013.
2. Asadi, D., Sabzehparvar, M., Atkins, E. M., and Talebi, H. A., "Damaged Airplane Trajectory Planning based on Flight Envelope and Stability of Motion Primitives," *AIAA Journal of Aircraft*, Vol. 51, No. 6, 2014, pp. 1740-1757. doi: 10.2514/1.C032422.
3. N. Meuleau, C. Plaunt, D. E. Smith, T. Smith, A Comparison of Risk Sensitive Path Planning Methods for Aircraft Emergency Landing, ICAPS-09 Workshop on Bridging the Gap Between Task and Motion Planning, 2009.
4. J. T. Betts, Survey of Numerical Methods for Trajectory Optimization, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 21, 1998.
5. S. LaValle, Planning Algorithms, Cambridge University Press, England, U.K., Chap.5, 2006.
6. M. Strube, Post-failure Trajectory Planning from Feasible Trim State Sequences, Master's Thesis, Aerospace Engineering, University of Maryland, 2005.
7. N. S. Klijn, R. Rapetti, A. Jordan, I. Lopez, P. Nespeca, Intelligent Flight Trajectory Generation to Maximize Safe Outcome Probability after a Distress Event, *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 1, pp. 255-267, 2010.
8. I. Lopez, N. S. Klijn, *Aggregating imprecise information in distressed aircraft path planning*, AIAA Infotech@Aerospace, No. 3379, 20-22 April, 2010.
9. Y. Zhao, *Efficient and robust aircraft landing trajectory optimization*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2012.
10. E. Frazzoli, M.A. Dahleh, Real-time motion planning for agile autonomous vehicles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 1, pp. 116-129, 2002.
11. R. T. Marler, J. S. Arora, *Survey of multi-objective optimization methods for Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 26, pp. 369 - 395, 2004.
12. A. Guigue, M. Ahmadi, R. Langlois, J. D. Hayes, Pareto Optimality and Multi-objective Trajectory Planning, *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 1094-1099, 2011.
13. Osyczka, A., "An approach to multicriterion optimization problems for eng. design," *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, Vol. 15, No. 3, 1978, pp. 309-333.
14. Charnes, A. and Cooper, W., W., "Management models and industrial applications of linear programming," *Management Science*, Vol. 4, No. 1, 1957, pp. 81-87.
15. [25] Bekker, J., Aldrich, C., The cross-entropy method in multi-objective optimizations, *European Journal of Operational Research*, Vol. 211, 2011, pp. 112-121.
16. Zhang, Y., Gong, D., Zhang, J., "Robot path planning in uncertain environment using multi-objective particle swarm optimization," *Neurocomputing*, Vol. 103, 2013, pp. 172-185.
17. Pires, E., J., S., Machado, J., A., T. and Oliveira, P., B., M., "Manipulator trajectory planning Using a MOEA," *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 7, No. 3, 2007, pp. 659-667.
18. S. Russell, P. Norvig, *Artificial Intelligence*, A modern Approach, 3rd ed., Prentice Hall, Chapter 3, 2009.
19. H. A. Taboada, F. Baهرانwala, D. W. Coit, Practical solutions for multi-objective optimization: *An application to system reliability design problem*, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 314-322, 2007.
20. J. G. Lin, Multiple-objective problems Pareto-optimal solutions by method of proper equality constraints, *IEEE Transaction on Automatic Control*, pp. 641-651, 1976.