

بررسی عوامل هوانوردی در سقوط هواپیمای تهران- یاسوج در ۱۹ بهمن ۱۳۹۶

مریم اسدی^۱، محمد حسین معماریان^{۲*} و فاطمه مرادیان^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳دکتری هواشناسی، کارشناس مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۸)

چکیده

در صنعت حمل و نقل هوایی همیشه حوادث ناگواری وجود داشته که ریشه بسیاری از آنها عوامل هواشناختی و هوانوردی است. بر اساس بسیاری از گزارش‌ها هواپیماهای زیادی حین پرواز به کوه برخورد کرده و دچار سانحه شده‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که وضع هوا به شدت بر عملیات هوانوردی نظامی و غیرنظامی تأثیر می‌گذارد. هدف از این پژوهش استفاده از مدل عددی انعطاف‌پذیر و شناخته‌شده در هواشناسی یعنی مدل میان‌مقیاس تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا (WRF) به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هوانوردی بر امنیت پرواز در یک مطالعه موردی است. این مطالعه عوامل تأثیرگذار بر سانحه سقوط هواپیمای مسافربری تهران به یاسوج را که در رشته‌کوه دنا در تاریخ ۱۹ بهمن ماه ۱۳۹۶ روی داد، شناسایی و تحلیل می‌کند. برای این منظور مقادیر ضریب بار، زاویه حمله، سرعت واماندگی و یخ‌زدگی برای هواپیمای مورد نظر محاسبه و تأثیر هر کدام از عوامل بررسی شده است. نتایج نشان داد کاهش ارتفاع پیش‌آمده برای هواپیما ناشی از کاهش زاویه حمله قبل از رسیدن به محدوده برخورد به کوه، کمتر بودن سرعت هواپیما از سرعت واماندگی و همچنین منفی بودن ضریب بار در منطقه مورد نظر بوده است. تغییرات دما در منطقه، دمای زیر صفر و عبور هواپیما از میان ابرها، شرایط ایجاد پدیده یخ‌زدگی را روی بدنه و بال هواپیما در صورت مجهز نبودن به سامانه یخ‌زا فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سقوط هواپیمای تهران- یاسوج، زاویه حمله، ضریب بار، سرعت واماندگی، یخ‌زدگی، مدل میان‌مقیاس WRF

۱ مقدمه

هم‌زمان با توسعه همه‌جانبه فناوری‌ها و روش‌های بهره‌برداری از خدمات صنعت هوانوردی، دائم خطرهای سلامت فعالیت‌های آن حوزه را تهدید می‌کند. در صنعت حمل‌ونقل هوایی نیز احتمال بروز حوادث ناگواری وجود دارد که ریشه در عوامل هواشناختی و هوانوردی دارد. با توجه به آمار کشته‌های سوانح و ضررهای اقتصادی کلان آن برای جامعه، اهمیت و ضرورت پژوهش با موضوع

عوامل مؤثر بر سوانح هوایی درک‌پذیر است.

بر اساس آمار شبکه ایمنی هوانوردی ایران (www.FlightSafety.org) از سال ۱۳۵۷ تا سال ۱۳۹۳ یک هزار و ۵۳۰ سانحه هوایی در میان هواپیماهای ایران رخ داده است که بین پنجاه تا هفتاد درصد آنها مرگبار بوده‌اند و بیش از ۱۴۰۰ نفر جان خود را در این سوانح هوایی ازدست‌داده‌اند. در جدول ۱ سوانح هوایی مهم ایران از سال ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸ آورده شده است.

جدول ۱. سوانح هوایی مهم ایران از سال ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸ جدول ۲. سوانح هوایی مهم ایران از سال ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸.

سال	نوع هواپیما	مکان سقوط	کشته‌ها	نام شرکت هواپیمایی
۱۳۵۸	بوئینگ-۷۲۷	حوالی تهران	۱۲۸	ایران ایر
۱۳۶۵	بوئینگ-۷۳۷	فرودگاه شیراز	۲۳	ایران ایر
۱۳۶۷	ایرباس آ-۳۰۰	خلیج فارس	۲۹۰	ایران ایر
۱۳۷۱	تویولف-۱۵۴	تهران	۱۳۴	ایران ایر تور
۱۳۷۳	فوکر ۲۸	کوه کرکس	۶۶	هواپیمایی آسمان
۱۳۷۵	بوئینگ-۷۲۷	فرودگاه رشت	۴	ایران ایر
۱۳۸۰	تویولف-۱۵۴	خرم‌آباد	۱۱۹	ایران ایر تور
۱۳۸۲	فوکر ۵۰	شارجه	۴۳	کیش ایر
۱۳۸۴	بوئینگ-۷۰۷	فرودگاه مهرآباد	۲	هواپیمایی ساها
۱۳۸۵	تویولف-۱۵۴	مشهد	۲۸	ایران ایر تور
۱۳۸۷	ایران-۱۴۰	شاهین شهر	۵	هواپیمایی هسا
۱۳۸۸	تویولف-۱۵۴	قزوین	۱۶۸	هواپیمایی کاسپین
۱۳۸۸	ایلیوشین-۶۲	فرودگاه مشهد	۱۷	هواپیمایی آریا قشم
۱۳۸۹	بوئینگ-۷۲۷	ارومیه	۷۸	ایران ایر
۱۳۹۳	ایران-۱۴۰	تهران	۳۹	هواپیمایی هسا
۱۳۹۶	ای تی آر-۷۲	سمیرم	۶۶	هواپیمایی آسمان
۱۳۹۷	بوئینگ-۷۰۷	کرج	۱۵	ارتش
۱۳۹۸	بوئینگ ۷۳۷-۸۰۰	تهران	۱۷۶	بین‌المللی اوکراین

سانحه هوایی مهم ایران که در تاریخ ۲۹ بهمن ۱۳۹۶ اتفاق افتاد، جهت مطالعه موردی برای پژوهش حاضر انتخاب شده است. در آن تاریخ یک فروند هواپیمای مسافربری از مبدأ تهران به سمت یاسوج حرکت و بعد از برخورد با قله پازن‌پیر کوه دنا در جنوب روستای کهنگان از توابع پادنا در ۱۲۰ کیلومتری سمیرم سقوط کرد که به کشته شدن تمام

۶۶ سرنشین این هواپیما منجر شد.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که وضع هوا به شدت بر عملیات هوانوردی نظامی و غیرنظامی تأثیر می‌گذارد. تأثیر فرایندهای جوّی بر هوانوردی از حدود سال ۱۹۰۰ به رسمیت شناخته شده است. در اوایل قرن بیستم، پژوهشگران متوجه تأثیرگذاری کوهستان‌ها بر حرکت

هواپیماهای بدون موتور هنگام عبور از آنها شدند و اولین مشاهدات از امواج پشت به باد کوه (امواج لی) صورت گرفت. در سال‌های ۱۹۴۰-۱۹۲۰، سه تن از خلبان‌های هواپیماهای بدون موتور به نام‌های سیمونز، فورچ توگت و کوتتر مشاهدات علمی خود را جمع‌آوری کردند. کوتتر و فورچ توگت آزمایش‌های زیادی را روی کوه‌های آلپ انجام دادند و اطلاعاتی درباره شارش هوا روی کوهستان به‌دست آوردند. بعد از سال ۱۹۶۰، به سبب پیشرفت رایانه و دستیابی به اطلاعات بیشتر در این زمینه، توسعه شهری در کنار کوهستان‌ها و پی بردن به اهمیت شناخت این امواج، تحقیقات وسیعی درباره این موضوع انجام و توجه هوانوردان به این تحقیقات جلب شد؛ چون خلبانان در هوای تمیز و صاف هنگام عبور از روی کوه‌ها با هوای تلاطمی ناشی از حرکت‌های قائم هوا مواجه می‌شدند که سفرهای پرخطرهای را می‌توانست برای آنان به‌وجودآورد و برای کنترل هواپیما به مهارت زیادی نیاز بود (لیلی، ۱۹۷۸). از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعه کلمپ و لیلی (۱۹۷۸) اشاره کرد که با استفاده از تقریب آب‌ایستایی (هیدروستاتیک)، امواج کوهستان را شبیه‌سازی و به‌صورت دوبعدی خطوط جریان و مؤلفه‌های سرعت را برای موانع زنگی‌شکل و همچنین برای کوه‌های راکی در منطقه کلرادوی آمریکا محاسبه کردند.

شکل‌گیری و شکست امواج کوهستان در ایجاد تلاطم برای هواپیما در مناطق کوهستانی نقش بسزایی دارد. برامبرگر (۲۰۱۹) برای اولین بار میزان تأثیر تلاطم و انتشار امواج کوهستان را بر هواپیماهای در حال پرواز تعیین کرد و با در نظر گرفتن دو مطالعه موردی، نتیجه گرفت سرعت باد افقی بر سرعت هواپیما و انتشار عمودی امواج کوهستان بر شرایط پرواز می‌تواند تأثیر بگذارد.

عوامل هوانوردی مؤثر بر ایمنی پرواز، برای پروازی ایمن خیلی مهم و حیاتی هستند. آگاهی و تسلط به این عوامل هواشناختی قبل و حین پرواز کمک زیادی به امنیت بیشتر پرواز می‌کند. سازمان رهبری مشترک هوانوردی عمومی (General Aviation Joint Steering Committee, GAJSC) که برای بهبود عملکرد ایمنی هوانوردی با کاهش خطر مبتنی بر داده تلاش می‌کند، مطالعه‌ایی را به پایان رسانده است که نشان می‌دهد ۵۰ درصد از حوادث مرگبار هوانوردی عمومی به دلیل ازدست‌دادن کنترل هواپیما بوده است. ازدست‌دادن کنترل به معنی حالت واماندگی است؛ جایی که جریان هوا در اطراف بال سبب کاهش سریع نیروی برآ (نیروی لیفت) می‌شود. اگر حالت واماندگی یک بال از دیگری بیشتر باشد، به ایجاد یک مسیر مارپیچ نزولی منجر می‌شود. این مسئله اهمیت ازدست‌دادن کنترل را مشخص می‌کند. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درباره شاخص زاویه حمله انجام شده است. زاویه حمله، به زاویه بین وتر یک ماهی‌واره (ایرفویل) و بردارهای سرعت حرکت نسبی هوا گفته می‌شود (شکل ۱). اگر زاویه حمله صفر باشد، فشار بالا و پایین ماهی‌واره برابر می‌شود و در نتیجه، هیچ نیروی برآیی برای بالا بردن هواپیما تولید نمی‌شود. افزایش زاویه حمله سبب اختلاف فشار در پایین و بالای ماهی‌واره و بالا رفتن هواپیما می‌شود؛ با این حال اگر زاویه حمله از آستانه مشخصی بیشتر شود، جداسازی جریان رخ می‌دهد که می‌تواند به واماندگی روی ماهی‌واره منجر شود (برامبرگر، ۲۰۱۹). این شاخص اطلاعات دقیق‌تری درباره میزان بالابری بال‌های هواپیما، قبل از رسیدن به زاویه حمله بحرانی و وقوع پدیده واماندگی در اختیار خلبان قرار می‌دهد. این شاخص‌ها بر اساس زاویه حمله هواپیما با اندازه‌گیری اختلاف فشار بین هوای جریان‌یافته در زیر بال و هوای ساکن در اطراف هواپیما کار می‌کنند. زاویه حمله در مراحل مختلف پرواز تغییر می‌کند (آبرامز، ۲۰۱۵).

ضریب برآ کاملاً به زاویه حمله وابسته است. افزایش زاویه حمله تا حد معینی باعث افزایش ضریب برآ می‌شود و از آن حد به بعد با افزایش زاویه حمله، این ضریب کاهش

ضریب برآ کاملاً به زاویه حمله وابسته است. افزایش زاویه حمله تا حد معینی باعث افزایش ضریب برآ می‌شود و از آن حد به بعد با افزایش زاویه حمله، این ضریب کاهش

ضریب برآ کاملاً به زاویه حمله وابسته است. افزایش زاویه حمله تا حد معینی باعث افزایش ضریب برآ می‌شود و از آن حد به بعد با افزایش زاویه حمله، این ضریب کاهش

ضریب برآ کاملاً به زاویه حمله وابسته است. افزایش زاویه حمله تا حد معینی باعث افزایش ضریب برآ می‌شود و از آن حد به بعد با افزایش زاویه حمله، این ضریب کاهش

زاویه حمله و نیروی برآ، همواره باید در نظر داشت که زاویه حمله به زاویه واماندگی نرسد. سرعت هواپیما در این حالت سرعت واماندگی (V_s) نامیده می‌شود. در صورت پرواز با سرعتی کمتر از این سرعت، نیروی برآ کمتر از نیروی وزن می‌شود و هواپیما ارتفاع خود را ازدست می‌دهد. سرعت واماندگی، حداقل سرعتی است که هواپیما باید با آن سرعت پرواز کند تا نیروی برآی کافی جهت حفظ ارتفاع تولید کند. سرعت واماندگی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$V_s = V_{min} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{Lmax} A}} \quad (2)$$

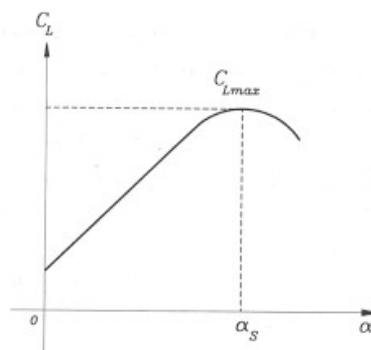
که C_{Lmax} بیشترین ضریب نیروی برآ، A سطح مقطع هواپیما، ρ چگالی هوا و W نیروی وزن هواپیما است. بیشینه زاویه حمله و بیشینه ضریب برآ تعیین کننده کمترین سرعت مجاز هواپیما هستند و چنانچه سرعت هواپیما از مقدار کمینه کمتر شود، خطر سقوط برای هواپیما وجود خواهد داشت (صدرایی، ۱۳۹۰).

ضریب بار یا اضافه باری پارامتری مهم در مهندسی هوافضاست و هنگام طراحی هواپیما یا هر وسیله پرنده دیگری، مهندسان باید به آن توجه کنند. ضریب بار را می‌توان میزان افزایش وزن هواپیما در نظر گرفت. افزایش وزن در هوا امکان پذیر نیست، اما نیروهایی غیر از گرانش بر هواپیمای در حال پرواز عمل می‌کنند. این نیروها گاهی اوقات افزایش می‌یابند. علت این اتفاق در نتیجه باری است که بر هواپیما وارد می‌شود و بیشتر از وزن هواپیما و محتویات آن است. هنگام پرواز در آسمان بار وارده گاهی چند برابر وزن هواپیماست. بی‌توجهی به این پارامتر می‌تواند حادثه‌ای بزرگ برای هواپیما به وجود بیاورد. ضریب افزایش بار وارد به سازه هواپیما را ضریب بار (n) می‌نامند. خلبانان باید مواظب باشند تا بار وارد شده به هواپیما از حد تحمل سازه فراتر نرود؛ زیرا در این صورت سازه

می‌یابد. به این حالت که ضریب برآ و به دنبال آن، نیروی برآ کاهش می‌یابد، حالت واماندگی (stall) گفته می‌شود. مقدار زاویه حمله با تانژانت گیری از مؤلفه‌های نیروهای وارد بر هواپیما در حین پرواز به صورت زیر به دست می‌آید (کوژونیکوف و پاولنکو، ۱۹۹۳؛ کوژونیکوف و معماریان، ۲۰۰۶ و برزگوا و بدانوکوف، ۲۰۱۸):

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{W}{v_c + u}\right) \quad (1)$$

که پارامترهای W و u به ترتیب مؤلفه‌های قائم و افقی سرعت باد و v_c سرعت هواپیما است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با زیاد شدن زاویه حمله هواپیما، ضریب برآ نیز افزایش می‌یابد تا اینکه در زاویه‌ای خاص (حدود ۱۵ درجه) ضریب برآی تولید شده به بیشترین مقدار خود (C_{Lmax}) می‌رسد و با افزایش زاویه حمله از این به بعد، مقدار ضریب برآ کاهش می‌یابد. به زاویه حمله متناظر با بیشینه ضریب برآ زاویه واماندگی (α_s) می‌گویند. زاویه حمله بحرانی یا زاویه واماندگی، زاویه‌ای است که در آن جریان هوا به اندازه کافی روی سطح بالایی ماهی‌واره امتداد پیدا نمی‌کند.



شکل ۱. ضریب برآ و زاویه حمله (صدرایی، ۱۳۹۰).

به دلیل ثابت بودن نیروی وزن، اگر خلبان سرعت هواپیما را هنگام پرواز کاهش دهد، نیروی برآ هم کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش نیروی برآ باید ضریب برآ افزایش داده شود، البته با توجه به وجود رابطه مستقیم بین

کوه در منطقه تیکسی و سوبارد مشاهده شده است. گفتنی است کروز حالتی از پرواز هواپیما است که در آن هواپیما در مسیر هوایی اصلی قرار دارد یا میان نقاط از پیش تعیین شده مسیر با سرعت و ارتفاع مناسب پرواز می‌کند. در این مطالعه، تلاطم هوانوردی ناشی از این طوفان‌ها و امواج گرانی مرتبط با دو شاخص زاویه حمله و ضریب بار مشخص شده است.

یخ‌زدگی از جمله پدیده‌های جوّی مخرب و تأثیرگذار بر هواپیما است و می‌تواند ایمنی و کارایی پرواز را به شدت به خطراندازد. این پدیده برای هواپیماهایی که به ابزارهای ضدیخ و یخ‌زدا مجهز نیستند، از مهم‌ترین خطرهای پرواز به حساب می‌آید. در سال ۱۹۵۴ سازمان هواشناسی جهانی مفاهیم هواشناختی یخ‌زدگی هواپیما را بیان کرد. یخ‌زدگی به هر نوع پوشش یخ روی هواپیما گفته می‌شود (لستر، ۲۰۰۱). در تحقیق پتی و فلوید (۲۰۰۴) در این خصوص مشخص شد که در دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۰ فقط کمتر از ۲ درصد هواپیماهای سنگین مسافربری در ایالات متحده در اثر یخ‌زدگی دچار سانحه شده‌اند. اثر یخ‌زدگی بر عملیات هواپیما از سال‌های دور به‌طور وسیعی تحقیق و بررسی شده است. رشد یخ روی بدنه هواپیما باعث افزایش جرم آن و بروز تغییراتی در راستای تعادل هواپیما می‌شود.

طبق تجزیه و تحلیل عوامل ایجاد سوانح هواپیمایی در سال‌های اخیر، یخ‌زدگی هواپیما یکی از عوامل اصلی است. تعداد سوانح پرواز و حوادث ناشی از یخ‌زدگی هواپیما تا سال ۱۹۸۸، به ۵۴۲ سانحه می‌رسد. طبق آمار سازمان هواپیمایی کشوری بین‌المللی (ICAO) در سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶، میزان مرگ‌ومیر مسافران در میان ۴۲ حادثه یخ‌زدگی هواپیما به ۳۹ درصد رسیده است (چانگ، ۲۰۱۰).

سند و همکاران (۱۹۸۴) با یک هواپیمای تحقیقاتی، شرایط هواشناختی را در مواجهه با یخ‌زدگی در پرواز مشخص کردند. هنسمن (۱۹۸۹) اثر فیزیکی تجمع یخ را بر

می‌شکند و هواپیما سقوط می‌کند. افزایش ضریب بار سرعت واماندگی را افزایش می‌دهد و حالت واماندگی را در پروازها به وجود می‌آورد (اداره هوانوردی فدرال، ۲۰۰۹). ضریب بار بیشتر از قدرمطلق ۰/۲ برای هواپیماها خطرناک و حادثه‌آفرین است (کوژونیکوف و معماریان، ۲۰۰۶). ضریب بار با رابطه زیر تعریف می‌شود (کوژونیکوف و پاولنکو، ۱۹۹۳ و برزگووا و بدانوکوف، ۲۰۱۸):

$$\Delta n = \sigma V_c w \quad (3)$$

که Δn تغییرات ضریب بار هواپیما، w مؤلفه قائم سرعت باد و V_c سرعت هواپیما است. σ ضریبی تجربی است که به مشخصات فنی بستگی دارد.

تلاطم هوانوردی یکی از دلایل اصلی صدمات در هواپیماهای تجاری است که گاهی موجب آسیب ساختاری می‌شود. علاوه بر این، آشفته‌گی هوانوردی هزینه‌های عملیاتی میلیون‌ها دلاری و همچنین تأخیرهای پروازی ایجاد می‌کند که سبب بروز مشکلاتی در مدیریت ترافیک هوایی می‌شود (گوک و ماچولسکایا، ۲۰۲۱).

شستاکوا (۲۰۲۱) خطرهای هوانوردی (تغییر سریع زاویه حمله و ضریب بار) در طوفان‌های پایین سو (downslope windstorms) را بررسی کرد. طوفان پایین سو باد بسیار شدیدی است که از دامنه رشته کوهی می‌وزد، اغلب در نزدیکی دامنه کوه‌ها به اوج قدرت خود می‌رسد و در دورتر از کوه‌ها به سرعت ضعیف می‌شود. این بررسی در پنج منطقه از شمال روسیه بر اساس داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی عددی میان‌مقیاس انجام شده است. طبق این مطالعه، طوفان‌های پایین سو برای تمام مناطق مدنظر با تلاطم شدید همراه بوده‌اند که در هوانوردی برای هواپیماهای سبک بسیار خطرناک است. این تلاطم در ارتفاع ۱ تا ۴ کیلومتری سطح زمین مشاهده شده است. تلاطم خطرناک برای جت‌هایی مانند بوئینگ ۷۳۷ در مسیر پرواز کروز در ۱۰ تا ۱۵ درصد موارد هنگام طوفان‌های باد پایین سو بعد از

وضع هوا (WRF) انجام شده است. برای این منظور برخورد هواپیمای تهران- یاسوج به کوه دنا در تاریخ ۲۹ بهمن ماه ۱۳۹۶ انتخاب و بررسی و تحلیل شده است. متداولترین مدل عددی میان‌مقیاس پیش‌بینی عددی (Numerical Weather Prediction) در زمینه هواشناسی، مدل WRF است که برای پیش‌بینی وضع هوا و تحقیقات جوئی طراحی شده است (اسکاماروک و کلمپ، ۲۰۰۸). WRF اولین مدل عددی پیش‌بینی جوئی است که هم برای تحقیقات جوئی و هم برای پیش‌بینی عملیاتی کاربرد دارد. مدل WRF برای کاربردهای مختلف از جمله پیش‌بینی طوفان (ایرجی و همکاران، ۲۰۲۱)، بارورسازی ابرها (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۲۲)، امواج کوهستان (دیاز-فرناندز و همکاران، ۲۰۲۱) و... استفاده شده است.

۲ داده‌ها و روش پژوهش

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از مدل سه‌بعدی میان‌مقیاس پیش‌بینی تحقیقاتی WRF، تأثیر پارامترهای هوانوردی بر هواپیما بررسی شود. برای این منظور از نسخه ۳.۹ مدل WRF استفاده شده است. برای اجرای مدل، به دریافت داده‌های کوهساری جهانی و همچنین داده‌های لازم جهت تأمین شرایط اولیه و مرزی نیاز است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع FNL شش‌ساعته برای تاریخ‌های ۲۰۱۸/۰۲/۱۷ تا ۲۰۱۸/۰۲/۱۸ است. برای اجرای مدل در این پژوهش سه آشیانه تودرتو در نظر گرفته شده است. آشیانه اول یا مادر با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر در محدوده‌ای به مرکز ۳۰/۹۷ درجه شمالی و ۵۱/۳۲ درجه شرقی واقع است. آشیانه دوم با تفکیک افقی ۹ کیلومتر و آشیانه سوم با تفکیک افقی ۳ کیلومتر، محدوده ۲۹/۶۳ تا ۳۱/۹۴ درجه شمالی و ۴۹/۹۷ تا ۵۲/۶۳ درجه شرقی را می‌پوشانند (شکل ۲). در جدول ۲ مشخصات پیکربندی آشیانه‌ها آمده است.

پیش‌بینی یخ‌زدگی بررسی کردند. برن استین و همکاران (۱۹۹۲) به مقایسه ۲۷۰۰ گزارش یخ‌زدگی از خلبان‌ها و الگوهای همدیدی در ۳۷ پرواز زمستانی پرداختند. کاری و لیو (۱۹۹۲) نیز شرایط یخ‌زدگی هواپیما را به کمک داده‌های ماهواره تحلیل و بررسی کردند.

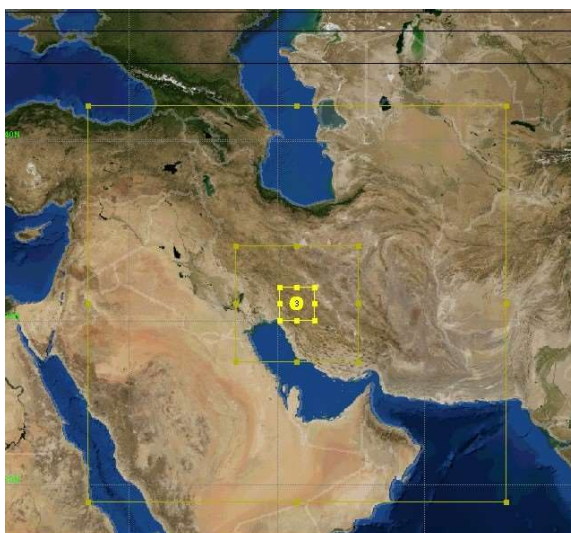
یخ‌زدگی هواپیما از بسیاری جهات بر ایمنی پرواز تأثیر می‌گذارد. در شرایط یخ‌زدگی، حداکثر ضریب برآی هواپیما و شیب منحنی برآ کاهش و در مقابل، نیروی پسا و سرعت واماندگی افزایش می‌یابند. در این مرحله اگر خلبان به تغییرات سرعت هوا و سرعت صعود توجه نکند، ممکن است هواپیما در نزدیکی مرز واماندگی باشد (کول و سند، ۱۹۹۱).

آزمایش‌های تونل باد و پرواز نشان داده است که تجمع سرماریزه (frost) و برف و یخ در لبه جلویی یا سطح بالایی بال هواپیما، که ضخیم‌تر و سخت‌تر از یک تکه کاغذ سنباده نیست، می‌تواند نیروی برآ را ۳۰ درصد کاهش و نیروی پسا را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. یخ‌نه تنها سطح بال، بلکه روی تمامی سطوح بدون حفاظ هواپیما از جمله ملخ، شیشه جلو، آنتن‌ها، ورودی هوا و پوسته موتور را هم می‌پوشاند. این یخ‌ها می‌توانند باعث ارتعاش شدید آنتن‌ها و حتی شکسته شدن آنها شوند. در حالت عادی، این شرایط می‌تواند به اندازه‌ای وخیم باشد که مانع از ادامه پرواز یک هواپیمای سبک شود. هواپیماهای مجهز به وسایل لازم برای پرواز در شرایط یخبندان به میزان شایان توجهی تحت تأثیر تجمع یخ در سطوح محافظت نشده قرار می‌گیرند. اگر خلبانان نتوانند بفهمند که احتمال یخ‌زدگی در کجا بیشتر است، می‌توانند قبل از ترک زمین، برنامه پرواز دوری از یخ را تنظیم کنند (هینریچ و همکاران، ۱۹۹۱).

پژوهش حاضر با هدف بررسی عوامل هوانوردی مؤثر بر سوانح هوایی از جمله ضریب بار، سرعت واماندگی و زاویه حمله با استفاده از مدل میان‌مقیاس تحقیقاتی و پیش‌بینی

جدول ۳. مشخصات آشیانه‌ها و پیکربندی مدل.

آشیانه بیرونی	آشیانه میانی	آشیانه درونی	
۷۶	۸۸	۱۰۰	تعداد نقاط شبکه در راستای شرقی- غربی
۷۶	۸۸	۱۰۰	تعداد نقاط شبکه در راستای شمالی- جنوبی
۲۷۰۰۰	۹۰۰۰	۳۰۰۰	فاصله بین نقاط شبکه (متر)



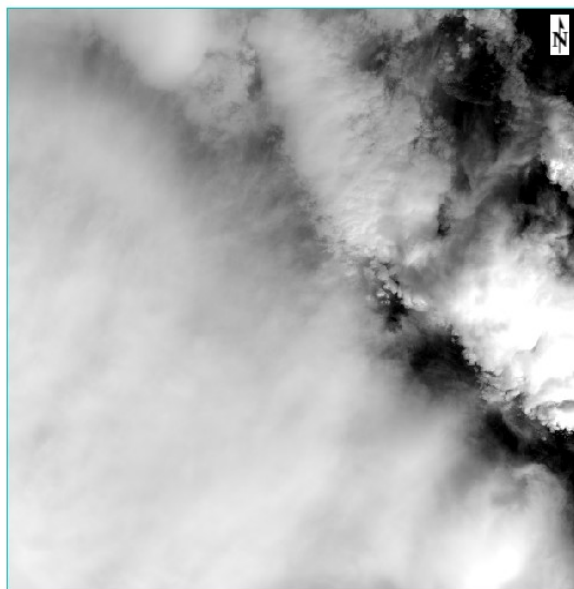
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی سه حوزه استفاده‌شده در شبیه‌سازی.

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها، پوشش ابر حاضر در محدوده شبیه‌سازی، رسم و نتایج با تصاویر دریافتی از سنجنده لندست (Landsat) بررسی و مقایسه شده است. با توجه به اینکه ایستگاه یاسوج ایستگاه سینوپتیک است، امکان اعتبارسنجی با داده‌های مشاهداتی وجود نداشت. ایرجی و همکاران (۲۰۲۱) برای پیش‌بینی طوفان در شهر یزد با استفاده از مدل WRF و داده‌های ماهواره مودیس از این نوع اعتبارسنجی استفاده کرده‌اند.

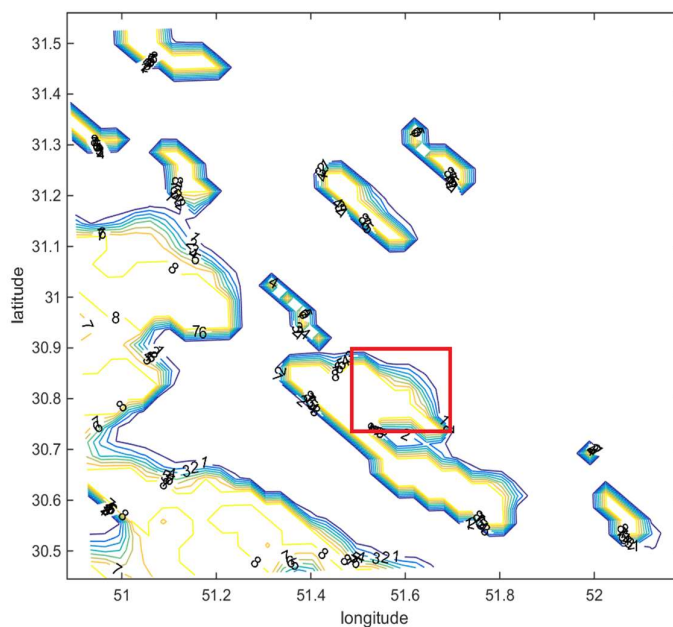
برای دریافت تصاویر پوشش ابر از تارنمای <https://earthexplorer.usgs.gov> استفاده شده است. این تصاویر سپس با استفاده از نرم‌افزار envi5.3 پردازش و بررسی شده‌اند. تصویر دریافت شده از پوشش ابر در شکل ۳ آورده شده است.

در مقالات مختلف، تفکیک افقی متفاوت است. در این مقاله تفکیک برابر ۳ کیلومتر فرض و در حد امکان و وجود داده ارزیابی شده است. پورقاسمی و همکاران (۲۰۲۲) برای بررسی بارورسازی ابرها از مدل WRF با تفکیک افقی ۳ کیلومتر استفاده کرده‌اند.

به علت دقت و تفکیک بیشتر، خروجی‌های آشیانه درونی (d03) بررسی خواهد شد. این آشیانه به‌نحوی تعیین می‌شود که محدوده هدف را به‌صورت کامل پوشش دهد و حتی برای جلوگیری از خطایی که در مرزهای آشیانه وجود دارد، این محدوده کمی بزرگ‌تر تعیین می‌شود. مدت زمان اجرای مدل برای هر شبیه‌سازی، از ساعت UTC ۱۸ روز ۱۷ فوریه ۲۰۱۸ تا ساعت UTC ۱۸ روز ۱۸ فوریه ۲۰۱۸ تعیین و شش ساعت اولیه برای تطبیق (spin up) مدل در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. تصویر پوشش ابر ماهواره لندست ۸ برای ساعت ۱۰ صبح روز ۲۹ بهمن ۱۳۹۶.



شکل ۴. پوشش ابر در ارتفاع ۴۴۰۰ متری در ساعت ۰۷ UTC.

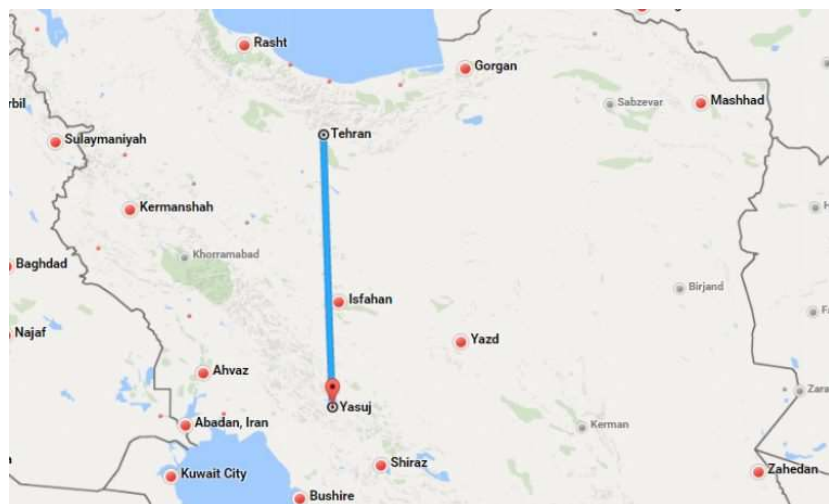
قرمز، همان محدوده شکل ۳ است. پوشش ابر در این محدوده تقریباً همخوانی دارد. اعتبارسنجی با داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیکی یاسوج برای پارامتر بیشینه و کمینه دمای هوا برای روز ۲۹ بهمن

ا توجه به تصویر شبیه‌سازی شده از خروجی مدل WRF (شکل ۴) و مقایسه آن با تصویر دریافتی از سنجنده لندست، می‌توان همخوانی مناسب شبیه‌سازی مدل WRF را به‌وضوح دید. در شکل ۴ محدوده مشخص شده با خط

بعد از اجرای مدل WRF و دریافت خروجی‌ها، برای محاسبه پارامترهای مورد نظر از جمله ضریب بار، زاویه حمله و سرعت واماندگی از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. با کدنویسی در متلب و استخراج متغیرهای مورد نیاز از خروجی مدل برای محاسبه پارامترهای اشاره شده در قسمت مقدمه، این پارامترها محاسبه و رسم شدند.

۳ نتایج

در تمامی شکل‌ها محور عمودی نشان‌دهنده عرض جغرافیایی و محور افقی نشان‌دهنده طول جغرافیایی است. شکل‌ها برای ساعت‌های ۰۴، ۰۵ و ۰۶ (UTC) رسم شده‌اند که به ترتیب معادل ۰۷:۳۰، ۰۸:۳۰ و ۰۹:۳۰ به وقت ایران است. هواپیما در ساعت ۰۹:۳۰ به وقت ایران و در عرض جغرافیایی ۳۰/۸۲ و طول جغرافیایی ۵۱/۶۱ در ارتفاع ۴۳۰۰ متر به قله پازن پیر کوه دنا برخورد کرده است. شکل ۵ مسیر پرواز هواپیمای تهران- یاسوج را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مسیر پرواز هواپیمای تهران- یاسوج.

بیشتر از نیروی موتور باشد، مقدار ضریب بار منفی می‌شود و ادامه مسیر هواپیما با حفظ ارتفاع غیرممکن خواهد بود. شکل ۶ ضریب بار را در ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت UTC ۰۶ نشان می‌دهد. سرعت هواپیما در این شکل

۱۳۹۶ نیز انجام شد. کمینه و بیشینه دمای آورده شده در جدول ۳ برای مدل WRF در محدوده جغرافیایی شهر یاسوج در اولین تراز قائم مدل است که ارتفاعی حدود ۲۰۹۲ متر دارد؛ در حالی که ایستگاه یاسوج در ارتفاع ۱۸۳۲ متری قرار گرفته است و مساحت خیلی کمتری نسبت به شهر یاسوج دارد که می‌تواند خطای ایجاد شده را توجیه کند.

جدول ۴. مقادیر کمینه و بیشینه دمای سطح زمین برای ۲۹ بهمن ۱۳۹۶.

بیشینه دما (°C)	کمینه دما (°C)	
۱۴/۸	۵/۶	ایستگاه یاسوج
۱۸/۵	۵/۲	مدل WRF

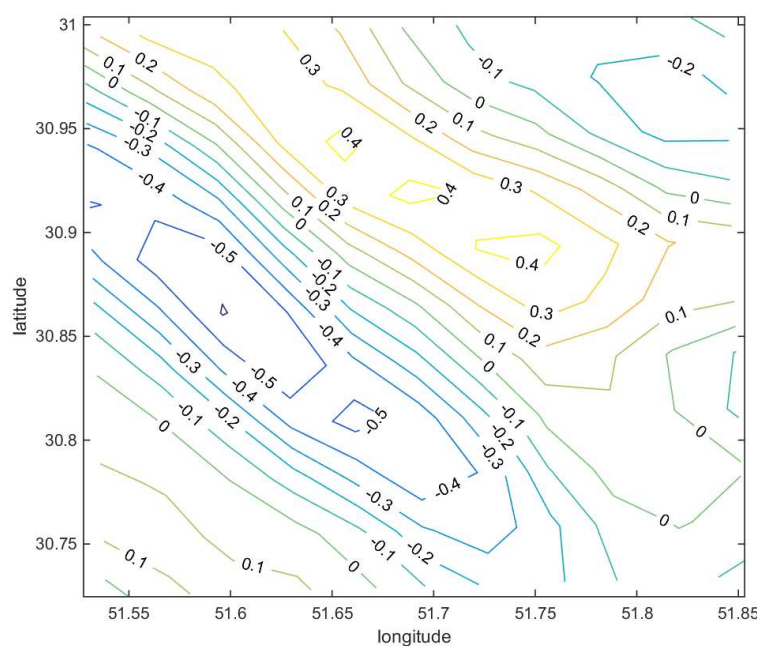
با مقایسه مقادیر بیشینه و کمینه دمای سطح زمین حاصله از ایستگاه و مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل و مقایسه پوشش ابر حاصل از سنجنده لندست و پوشش ابر شبیه‌سازی شده، می‌توان به پیش‌بینی به نسبت خوب مدل WRF پی برد.

۳-۱ ضریب بار

ضریب بار رابطه مستقیمی با سرعت هواپیما و ضریب برآ دارد. افزایش یا کاهش ضریب بار باعث افزایش یا کاهش نیروی برآ می‌شود. در صورتی که نیروی پسای تولید شده

بیشتر از قدرمطلق ۰/۲ برای هواپیما خطرآفرین است. با توجه به شکل ۷ در مسیر پرواز در عرض‌های بالاتر ضریب بار بیشتر از ۰/۲ است که با ادامه مسیر، ضریب بار به مقادیر کمتر از ۰/۲ می‌رسد. در نزدیکی محل برخورد هواپیما به کوه، مقدار قدرمطلق ضریب بار افزایش پیدا کرده و به مقدار ۰/۵ رسیده است. این مقدار ضریب بار برای هواپیماها بسیار خطرناک است.

۱۰۲/۸۹ متر بر ثانیه است. در مناطقی با ضریب بار منفی، کاهش ارتفاع می‌تواند رخ داده باشد. هواپیما در عرض‌های بالاتر با مقادیر مثبت ضریب بار (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴) روبه‌رو بوده است و با نزدیک شدن به محل برخورد، ضریب بار به مقدار ۰/۵- تغییر پیدا کرده است. با توجه به مطالب گفته‌شده، با کاهش ضریب بار احتمال کاهش ارتفاع هواپیما وجود داشته است. طبق مطالعه کوژونیکوف و معاریان (۲۰۰۶) ضریب بار



شکل ۶. ضریب بار در ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت UTC ۰۶.

ثانیه است. در تمامی شکل‌ها با نزدیک شدن به نقطه برخورد هواپیما به کوه مقدار ضریب بار هم افزایش می‌یابد.

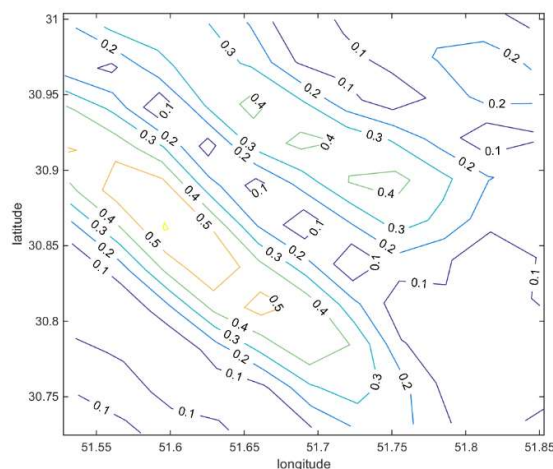
۳-۲ سرعت واماندگی

سرعت واماندگی یا سرعت کمینه، سرعتی است که اگر هواپیما با سرعتی کمتر از آن حرکت کند، با خطر سقوط مواجه می‌شود. در سرعت واماندگی که در زوایای حمله زیاد اتفاق می‌افتد، نیروی برآ کاهش و نیروی پسا افزایش

شکل ۸ نشان‌دهنده قدرمطلق ضریب بار برای سرعت‌های گزارش‌شده هواپیما از سازمان هواپیمایی کشوری (سازمان) (<https://www.cao.ir/aviation-safety>) هواپیمایی کشوری، ۲۰۲۰) در ارتفاع ۴۴۶۷ متری و در زمان UTC ۰۶ است. با توجه به شکل‌ها با کاهش سرعت هواپیما، ضریب بار هم کاهش می‌یابد. در سرعت ۱۰۲/۸۹ متر بر ثانیه مقادیر قدرمطلق ضریب بار در منطقه برخورد هواپیما به کوه بیشتر از ضریب بار در سرعت ۶۰/۱۷ متر بر

است و سبب آن دست‌دادن ارتفاع برای هواپیما می‌شود. شایان ذکر است که هواپیما در ارتفاع ۴۳۰۰ متری یعنی ۱۶۷ متر پایین‌تر از ارتفاعی که سرعت واماندگی محاسبه شده، به کوه برخورد کرده است؛ با وجود این پرواز با سرعتی کمتر از سرعت واماندگی، باعث ناتوانی در تولید نیروی برآی مورد نیاز جهت حفظ ارتفاع هواپیما شده است.

می‌یابد. در جدول ۴ مقدار بیشینه و کمینه سرعت واماندگی در دو ارتفاع ۴۰۰۰ و ۴۴۶۷ متری در ساعت UTC ۰۶ در محدوده پرواز هواپیمای مورد نظر آورده شده است. کمینه سرعت واماندگی در ارتفاع ۴۴۶۷ متری برابر ۶۰/۴۲ متر بر ثانیه است، در حالی که طبق گزارش‌های سازمان هواپیمایی، سرعت هواپیمای تهران- یاسوج تا مقدار ۶۰/۱۷ متر بر ثانیه هم کاهش پیدا کرده است. با توجه به اینکه این سرعت کمتر از حداقل سرعت پرواز است، سرعتی خطرآفرین



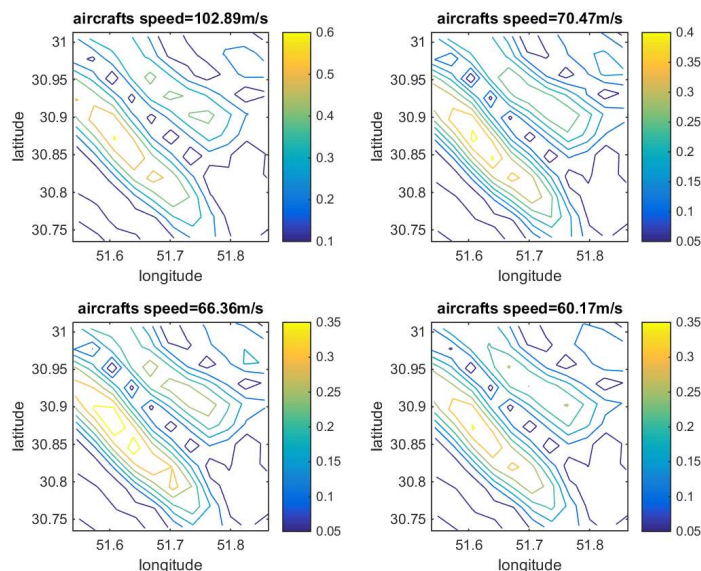
شکل ۷. قدرمطلق ضریب بار در ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت UTC ۰۶ با ضریب برآی ۰/۲.

درجه خطی برای هواپیما ایجاد نمی‌کند.

شکل ۹- الف نشان‌دهنده زاویه حمله در ارتفاع ۴۰۰۰ متری برای ساعت UTC ۰۵ است. بیشترین مقدار زاویه حمله در این شکل ۳ درجه در عرض‌های بالاتر از محدوده برخورد هواپیما به کوه است. هواپیما در مسیر حرکت خود ابتدا با افزایش زاویه حمله روبه‌رو می‌شود و در نزدیکی محل برخورد، زاویه حمله کاهش و دوباره در منطقه برخورد افزایش می‌یابد.

۳-۳ زاویه حمله

با توجه به متغیر بودن سرعت هواپیما قبل از سقوط، زاویه حمله برای چهار سرعت گزارش شده برای هواپیما در گزارش سازمان هواپیمایی کشوری محاسبه و رسم شد. به دلیل شباهت شکل‌ها برای همه سرعت‌ها و ارتفاع‌ها، در شکل‌ها زاویه حمله برای سرعت ۱۰۲/۸۹ متر بر ثانیه در دو ارتفاع آورده شده است. مقدار به دست آمده برای زاویه حمله در این منطقه برای سرعت‌های مختلف بین ۰/۵ تا ۴ درجه بوده است. از نظر هوانوردی، زاویه حمله بین ۰ تا ۱۵



شکل ۸. قدرمطلق ضریب بار در ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت ۰۶ UTC برای سرعت‌های مختلف هواپیما.

جدول ۵. بیشینه و کمینه سرعت واماندگی (m/s) در ساعت ۰۶ UTC.

ارتفاع (m)	بیشینه سرعت واماندگی (m/s)	کمینه سرعت واماندگی (m/s)
۴۰۰۰	۶۹/۴۳	۵۸/۷۴
۴۴۶۷	۷۱/۲۰	۶۰/۴۲

بالاتر از محل برخورد است.

شکل ۹- د نشان‌دهنده زاویه حمله در ارتفاع ۴۴۶۷ متری برای ساعت ۰۶ UTC یعنی لحظه برخورد است. بیشترین مقدار زاویه حمله در این شکل ۲/۵ درجه در عرض‌های بالاتر از محل برخورد است. افزایش زاویه حمله سبب اختلاف فشار در پایین و بالای ماهی‌واره و بالا رفتن هواپیما می‌شود. بیشترین نیروی برآ در سرعت زیاد و زاویه حمله کم و همچنین در سرعت کم و زاویه حمله زیاد است. زمانی که سرعت کاهش می‌یابد، برای حفظ نیروی برآ زاویه حمله باید افزایش یابد.

هواپیما در مسیر حرکت خود در نزدیکی منطقه برخورد ابتدا با افزایش زاویه حمله به مقدار ۲/۵ درجه می‌رسد که

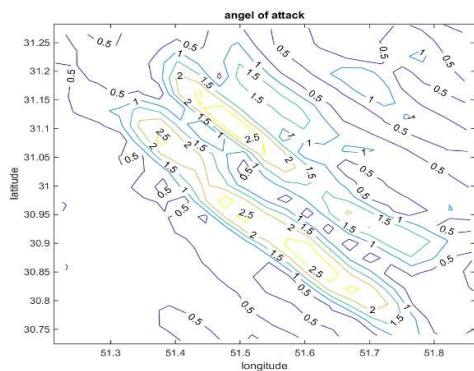
شکل ۹- ب نشان‌دهنده زاویه حمله در ارتفاع ۴۰۰۰ متری برای ساعت ۰۶ UTC یعنی زمان برخورد هواپیما به کوه است. بیشترین مقدار زاویه حمله در این شکل ۲/۵ درجه است که در محدوده برخورد هواپیما به کوه دیده می‌شود. هواپیما در مسیر حرکت خود در عرض‌های بالاتر ابتدا با افزایش زاویه حمله به مقدار بیشینه ۲/۵ درجه مواجه می‌شود و در ادامه مسیر در عرض‌های نزدیک به منطقه برخورد، زاویه حمله کاهش می‌یابد و تقریباً به ۰/۵ درجه می‌رسد. در ادامه مسیر و در محل برخورد با کوه، زاویه حمله به ۲/۵ درجه افزایش می‌یابد. شکل ۹- ج نشان‌دهنده زاویه حمله در ارتفاع ۴۴۶۷ متری برای ساعت ۰۵ UTC است. بیشترین مقدار زاویه حمله در این شکل ۳/۵ درجه در عرض‌های

نشان‌دهنده افزایش ارتفاع است. در ادامه مسیر، زاویه حمله کاهش و تقریباً به ۰/۵ درجه می‌رسد و در محل برخورد با کوه، به ۲/۵ درجه افزایش می‌یابد. هواپیما در مسیر پرواز و قبل از رسیدن به نقطه برخورد در ارتفاع پایین‌تری از محل

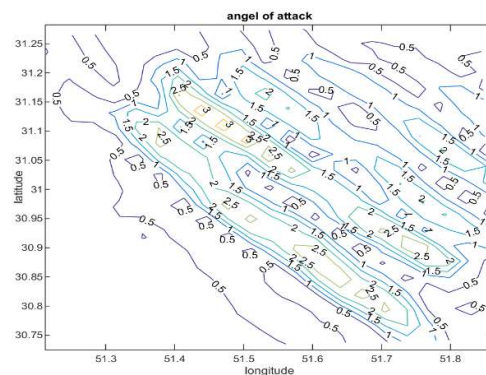
برخورد قرار داشته است. با افزایش زاویه حمله که به افزایش نیروی برآ منجر می‌شود، هواپیما سعی در افزایش ارتفاع داشته است که با برخورد به قله پازن‌پیر متوقف می‌شود.

جدول ۶. بیشینه زاویه حمله در ساعت ۰۶ UTC.

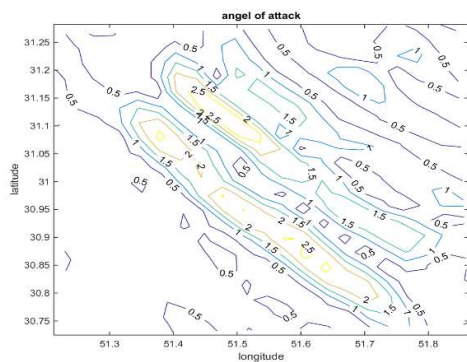
ارتفاع (m)	سرعت هواپیما (m/s)	بیشینه زاویه حمله (درجه)
۴۰۰۰	۱۰۲/۸۹	۲/۹۳
	۷۰/۴۷	۳/۹۸
	۶۶/۳۶	۴/۱۶
۴۴۶۷	۶۰/۱۷	۴/۴۸
	۱۰۲/۸۹	۲/۷۹
	۷۰/۴۷	۳/۸۴
	۶۶/۳۶	۴/۰۳
	۶۰/۱۷	۴/۳۶



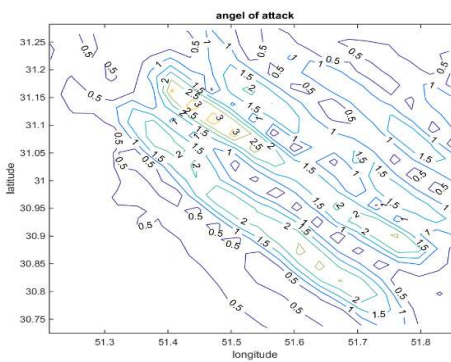
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹. زاویه حمله در (الف) ارتفاع ۴۰۰۰ متری و ساعت ۵ UTC (ب) ارتفاع ۴۰۰۰ متری و ساعت ۰۶ UTC (ج) ارتفاع ۴۴۶۷ متری و ساعت ۰۵ UTC (د) ارتفاع ۴۴۶۷ متری و ساعت ۰۶ UTC

جدول ۵ بیشینه زاویه حمله در دو ارتفاع ۴۰۰۰ و ۴۴۶۷ متری را در ساعت UTC ۰۶ برای کل محدوده دامنه سوم شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بیشینه زاویه حمله، سرعت قائم و افقی باد حاکم در آن منطقه و سرعت هواپیما مورد نظر، در هیچ مسیری زاویه حمله به مقدار بحرانی (۱۵ درجه) و بیشتر از آن نرسیده است. این زاویه بحرانی برای هواپیماها خطرناک است و حالت واماندگی ایجاد می‌کند.

۳-۴ یخ‌زدگی

یخ‌زدگی هواپیما به حالتی گفته می‌شود که ذرات ابر سرد آب روی بدنه، بال، موتورها و سایر قسمت‌های هواپیما یخ بزنند و باعث اختلال در جریان هوای عبوری شود. یکی از ملزومات ایمنی پرواز، کاهش اثر یخ‌زدگی هنگام روبه‌رو شدن هواپیما با این پدیده است.

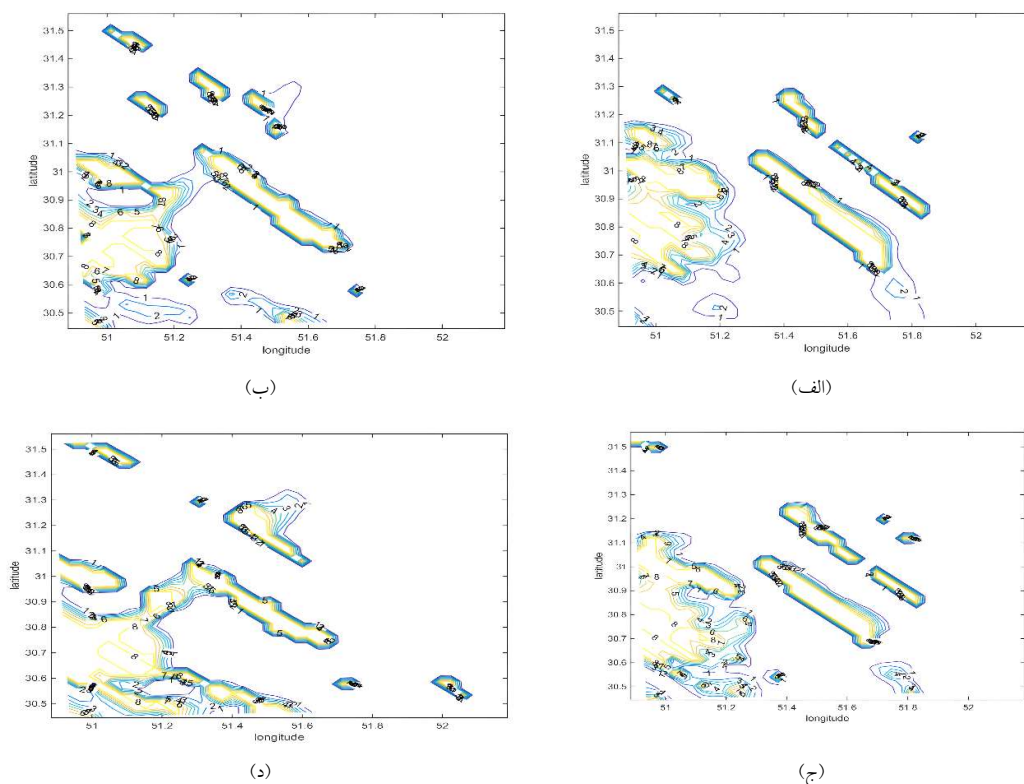
برای بررسی یخ‌زدگی در این پژوهش، پوشش ابر و پربندهای دما برحسب درجه در ارتفاع‌ها و زمان‌های مختلف رسم و بررسی شده است. شکل‌ها برای دو تراز با ارتفاع‌های ۴۰۰۰ و ۴۴۶۷ در سه ساعت UTC ۰۴، UTC ۰۵ و UTC ۰۶ رسم شده‌اند.

در گزارش‌های هواشناسی برای گزارش ابر، آسمان به هشت قسمت تقسیم و براساس مقدار ابر موجود در آسمان، گزارش‌ها به صورت کسری از ۸ بیان می‌شوند. در شکل ۱۰ هم تقسیم‌بندی وجود ابر از ۱ تا ۸ است. عدد ۸ بیانگر آسمانی کاملاً پوشیده از ابر است. با توجه به حرکت هواپیماهای تهران- یاسوج از عرض‌های بالاتر به سمت عرض‌های پایین‌تر، در مسیر ابتدا ابری وجود ندارد و بعد آسمان پوشیده از ابر می‌شود (شکل ۱۰).

شکل‌های ۱۰- الف و ۱۰- ب پوشش ابر را در ارتفاع ۴۰۰۰ متری در ساعت‌های ۰۵ و ۰۶ (UTC) نشان می‌دهند.

در تمامی ساعت‌ها محدوده برخورد هواپیما به کوه، به مقدار هشت‌هشتم پوشیده از ابر بوده است. در مسیر پرواز هواپیما که از عرض‌های بالا به عرض‌های پایین است، تقریباً هیچ ابری در مسیر برای این ارتفاع وجود ندارد و هواپیما در عرض‌های نزدیک به محل برخورد وارد پوشش ابر یک‌هشتم می‌شود. با ادامه مسیر به سمت عرض‌های پایین، پوشش ابر افزایش می‌یابد تا به مقدار هشت‌هشتم می‌رسد. شکل‌های ۱۰- ج و ۱۰- د نشان‌دهنده پوشش ابر در ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت‌های ۰۵ و ۰۶ (UTC) هستند. در محدوده برخورد هواپیما به کوه، هشت‌هشتم آسمان پوشیده از ابر بوده است. روند افزایش پوشش ابر در مسیر پرواز همانند شکل‌های مربوط به ارتفاع ۴۰۰۰ متری است.

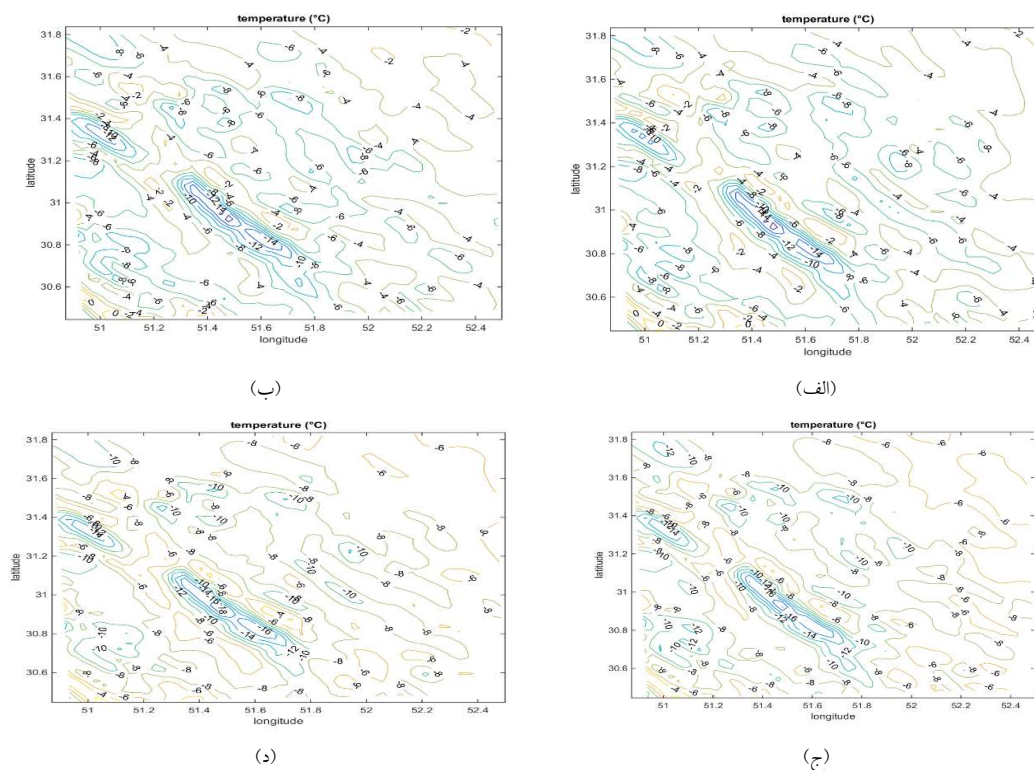
شکل ۱۱- الف مربوط به پربند دما برای ارتفاع ۴۰۰۰ متری و ساعت UTC ۰۵ است. مشاهده می‌شود که در مسیر پرواز هواپیما، دمای هوا از صفر تا ۱۲- درجه تغییر کرده است و در نزدیکی محل برخورد، حداقل دما (۱۲- درجه) وجود دارد. شکل ۱۱- ب مربوط به پربند دما برای ارتفاع ۴۰۰۰ متری و ساعت UTC ۰۶ یعنی لحظه برخورد هواپیما به کوه است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در مسیر پرواز هواپیما دمای هوا از ۲- تا ۱۴- درجه تغییر کرده است. هواپیما در دماهای پایین می‌تواند دچار یخ‌زدگی شود. با تشکیل یخ، سطح صاف برای جریان هوا از بین می‌رود و باعث افزایش نیروی پسا و کاهش نیروی برآمی‌شود. شکل ۱۱- ج مربوط به پربند دما برای ارتفاع ۴۴۶۷ متری و ساعت UTC ۰۵ است. همان‌طور که دیده می‌شود، در مسیر پرواز هواپیما برای ساعت UTC ۰۴ دمای هوا از ۴- تا ۱۶- درجه و برای ساعت UTC ۰۵ از ۴- تا ۱۸- تغییر کرده است و در نزدیکی محل برخورد، سردترین دما مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰. پوشش ابر در (الف) ارتفاع ۴۰۰۰ متری در ساعت ۰۵ UTC (ب) ارتفاع ۴۰۰۰ متری در ساعت ۰۶ UTC (ج) ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت ۰۵ UTC (د) ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت ۰۶ UTC

هوایما در صورت مجهز نبودن هوایما به سامانه یخزدایی مهیا بوده است. یخزدگی باعث از بین رفتن جریان هوا و افزایش نیروی پسا می‌شود و توانایی تولید نیروی برآ هم کاهش می‌یابد. با کاهش یافتن نیروی برآ، هوایما ارتفاع از دست می‌دهد. برای جبران ارتفاع از دست رفته خلبان زاویه حمله را افزایش می‌دهد که به یخزدگی بیشتر منجر می‌شود.

شکل ۱۱- د مربوط به پربند دما برای ارتفاع ۴۴۶۷ متری و ساعت ۰۶ UTC یعنی لحظه برخورد هوایما به کوه است. در مسیر پرواز هوایما، دمای هوا از ۶- تا ۱۶- درجه تغییر کرده و هوایما در نزدیکی محل برخورد، با حداقل دما (۱۶- درجه) مواجه شده است. با توجه به کافی بودن قطرات آب ابر سرد به دلیل پوشش ابر هشت‌هشتم آسمان و دمای ۱۶- درجه، شرایط ایجاد پدیده یخزدگی برای



شکل ۱۱. پربند دما در (الف) ارتفاع ۴۰۰۰ متری در ساعت ۰۵ UTC (ب) ارتفاع ۴۰۰۰ متری در ساعت ۰۶ UTC (ج) ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت ۰۵ UTC (د) ارتفاع ۴۴۶۷ متری در ساعت ۰۶ UTC.

۴ بحث و نتیجه‌گیری

با محاسبه و بررسی زاویه حمله در مسیر پرواز هواپیما و محل برخورد هواپیما به کوه، مشاهده شد که با نزدیک شدن به محل برخورد، زاویه حمله ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا کرده است. مقدار به‌دست‌آمده برای زاویه حمله در این منطقه برای سرعت‌های مختلف بین ۰/۵ تا ۴ درجه بوده است. از نظر هوانوردی، زاویه حمله بین ۰ تا ۱۵ درجه خطری برای هواپیما ایجاد نمی‌کند. زاویه حمله با ضریب برآ رابطه مستقیم دارد و با کاهش زاویه حمله، ضریب برآ و به دنبال آن، نیروی برآ نیز کاهش می‌یابد و هواپیما با کاهش ارتفاع روبه‌رو می‌شود. در نقطه برخورد، زاویه حمله افزایش می‌یابد و هواپیما در صدد افزایش ارتفاع برمی‌آید، ولی متأسفانه با کوه برخورد می‌کند.

سرعت واماندگی، حداقل سرعتی است که هواپیما برای حفظ ارتفاع مناسب پرواز باید با آن سرعت پرواز کند. با توجه به مقادیر کمینه سرعت واماندگی در مسیر پرواز و در ارتفاعات نزدیک به ارتفاع پرواز، هواپیما با سرعتی کمتر از کمینه سرعت واماندگی در ارتفاع ۴۴۶۷ متری پرواز کرده است که این موضوع باعث ازدست‌دادن ارتفاع در مسیر پرواز می‌شود.

با محاسبه و بررسی ضریب بار در محدوده پرواز برای ارتفاعات و زمان‌های مختلف، در محدوده برخورد هواپیما به کوه ضریب بار منفی به‌دست‌آمد که نشان‌دهنده کاهش ارتفاع برای هواپیما و افزایش نیروی پسا است. همچنین با دانستن اینکه ضریب بار بیشتر از قدرمطلق ۰/۲ برای هواپیما خطرناک است، با رسم پربندهای قدرمطلق ضریب بار در

- Flight Conditions of High-flying Aircraft: Doctoral dissertation, Ludwig-Maximilian-University of Munich.
- Chang, L. (2010). Aircraft icing and aviation safety. *Aeronaut. Sci. Technol*, 5, 12-14.
- Cole, J., and Sand, W., 1991, Statistical study of aircraft icing accidents: 29th Aerospace Sciences Meeting, 558.
- Curry, J. A., & Liu, G. (1992). Assessment of aircraft icing potential using satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31(6), 605-621.
- Díaz-Fernández, J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., et al., 2021, Comparison of the WRF and HARMONIE models ability for mountain wave warnings: *Atmospheric Research*, 105890.
- Federal Aviation Administration, 2009, *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*: Skyhorse Publishing Inc.
- Goecke, T., and Machulskaya, E., 2021, Aviation turbulence forecasting at DWD with ICON: methodology, case studies, and verification: *Monthly Weather Review*, 149(7), 2115-2130.
- Hansman Jr., R. J., 1989, The influence of ice accretion physics on the forecasting of aircraft icing conditions: NASA, Langley Research Center, Joint University Program for Air Transportation Research, 1988-1989.
- Heinrich, A., Ross, R., Zumwalt, G., Provorse, J., and Padmanabhan, V., 1991, *Aircraft Icing Handbook: Gates Learjet Corp Wichita KS*, 1.
- Iraji, F., Memarian, M. H., Joghataei, M., and Malamiri, H. R. G., 2021, Determining the source of dust storms with use of coupling WRF and HYSPLIT models: A case study of Yazd province in central desert of Iran: *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93, 101197.
- Klemp, J. B., and Lilly, D. K., 1978, Numerical simulation of hydrostatic mountain waves: *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(1), 78-107.
- Kozhevnikov, V. N., and Memarian, M. K., 2006, Orographic disturbances and the problem of flight safety over the Iranian mountains: *Problemy Analiza Riska*, 4, 3.
- Kozhevnikov, V. N., and Pavlenko, A. P., 1993, Atmospheric disturbances over mountains and air flight safety: *Izvestiâ Akademii nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 29(3), 302-314.
- Lester, P., 2001, *Aviation Weather*: Jeppesen Standard Inc.
- Lilly, D. K. (1978). A severe downslope مسیر پرواز و در محل برخورد هواپیما به کوه با مقادیر بیشتر از ۰/۲ روبرو شدیم که به کاهش ارتفاع هواپیما منجر می‌شود.
- با توجه به دمای زیر صفر درجه حاکم در منطقه که با بررسی پرنبد دما در ارتفاعات و زمان‌های مختلف برای مسیر پرواز به دست آمد، پدیده یخ‌زدگی در صورت مجهز نبودن هواپیما به سامانه یخ‌زدا می‌تواند روی بدنه و بال هواپیما ایجاد شود. با تشکیل یخ، سطح صاف لازم برای جریان هوا از بین می‌رود و نیروی پسا افزایش و توانایی تولید نیروی برآهم کاهش می‌یابد که سبب کاهش ارتفاع می‌شود. مقدار افزایش وزن ناشی از یخ‌ها در مقایسه با اختلافاتی که در جریان هوا ایجاد می‌کنند، بسیار ناچیز است؛ بنابراین برای جبران این پسای اضافی، نیروی پیشران هواپیما نیز باید افزایش یابد. دماغه هواپیما برای تولید نیروی برآی بیشتر و جلوگیری از کاهش ارتفاع باید بالاتر رود؛ یعنی زاویه حمله افزایش یابد، اما با افزایش زاویه حمله، میزان یخ روی بال‌ها و بدنه به‌طور ناخوشایندی افزایش می‌یابد.
- منابع**
- صدرایی، م. ه.، ۱۳۹۰، مکانیک پرواز: مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه امام حسین (ع).
- Abrams, J., 2015, *The Advantages of Angle of Attack Indicators in General Aviation Aircraft*: Doctoral dissertation, The Ohio State University.
- Bernstein, B. C., Baker, I., Wesley, D., Smart, J., Wharton, L., and Wirshborn, J., 1992, The utility of a high resolution volunteer snow observer network: *Proceeding of 11th International Conference on Clouds and Precipitation*, Montreal, PQ, Canada, American Meteorological Society, 991-994.
- Berzegova, R. B., and Bedanokov, M. K., 2018, Atmospheric perturbations during the flow around mountain groups: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 54(5), 456-461.
- Bramberger, M., 2019, *Mountain Wave Impact on*

- windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(1), 59-77.
- Petty, K. R., and Floyd, C. D., 2004, A statistical review of aviation airframe icing accidents in the US: Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Hyannis.
- Pourghasemi, M. A., Memarian, M. H., and Zare, A., 2022, Assessment of possible precipitation enhancement by glaciogenic cloud seeding using WRF: a case study: *Russian Meteorology and Hydrology*, 47(7), 553-560.
- Sand, W. R., Cooper, W. A., Politovich, M. K., and Veal, D. L., 1984, Icing conditions encountered by a research aircraft: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(10), 1427-1440.
- Shestakova, A. A., 2021, Assessing the risks of vessel icing and aviation hazards during downslope windstorms in the Russian Arctic: *Atmosphere*, 12(6), 760.
- Skamarock, W. C., and Klemp, J. B., 2008, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications: *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485.

Investigation of aviation factors in the Tehran-Yasuj plane crash on 18 February 2018

Maryam Asadi¹, Mohammad Hossein Memarian^{2*} and Fatemeh Moradian³

¹*M.Sc. of Meteorology, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran*

²*Associate Professor, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran*

³*Ph.D. Meteorology, National Research Center for Clouds Fertilization, Yazd, Iran*

(Received: 13 January 2023, Accepted: 23 June 2023)

Summary

Accidents in the aviation industry are mainly affected by meteorological and aviation factors. Research has indicated that weather conditions have a powerful impact on military and civilian aviation operations. The goal of this study is to investigate the impact of aviation parameters on flight safety using a well-known numerical model in meteorology, namely the mid-scale research and weather forecasting (WRF) model. This research identifies and analyzes the influential factors in the crash of the passenger plane from Tehran to Yasuj near the Dena mountain range. For this purpose, by calculating the load factor, angle of attack, and stall speed for the desired aircraft, the effect of each factor has been investigated. Considering the sub-zero temperature prevailing in the region, which was obtained by checking the temperature at different altitudes and times for the flight path, the phenomenon of freezing can occur on the body and wings of the plane if the plane is not equipped with a de-icing system. With the formation of ice, the smooth surface necessary for air flow is lost, the drag force increases and the ability to produce power decreases, which leads to a decrease in height. To compensate for this additional drag, the propulsion force of the aircraft must also be increased. The nose of the aircraft must be raised to produce more thrust and prevent altitude loss, which means the angle of attack must be increased. But as the angle of attack increases, the amount of ice on the wings and fuselage increases. By calculating and checking the angle of attack on the flight path of the plane and the place where the plane hit the mountain, it is shown that the angle of attack first decreases and then increases as it approaches the place of impact. The angle of attack has a direct relationship with the drag coefficient. With the decrease of the angle of attack, the drag coefficient decreases; as a result, the drag force also decreases and the plane faces a decrease in altitude. At the point of impact, the angle of attack increases, and the plane tries to increase the height, but unfortunately, it hits the mountain. Stall speed is the minimum speed at which the aircraft must fly to maintain proper flight altitude. According to the minimum values of stall speed along the flight path and at altitudes close to the flight height, the plane flies at a speed lower than the minimum stall speed at an altitude of 4467 meters. This causes a loss of height in the flight path. By calculating and checking the load factor in the flight range for different altitudes and times with different coefficients, we reached a negative load factor in the range of the plane hitting the mountain, which indicates a decrease in altitude for the plane and an increase in drag force.

Keywords: The Tehran-Yasuj plane crash, angle of attack, load factor, stall speed, icing, WRF meso-scale model

*Corresponding author:

memarian@yazd.ac.ir