مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 243-252

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی رفتار دینامیکی هواپیما در مواجهه قیچی‌باد با استفاده از روش بارگذاری چند نقطه‌ای

علی پورمرادی[1]، مهدی سبزه پرور[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی هوافضا ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، تهران
* تهران، صندوق پستی 1591634311، sabzeh@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 مهر 1396
پذیرش: 20 دی 1396
ارائه در سایت: 12 بهمن 1396

کلید واژگان:
مایکروبرست
قیچی‌باد
مدل چندنقطه
مدل تک‌نقطه

چکیده

پدیده‌ی قیچی‌باد برای هواپیما در پرواز ارتفاع پایین، بسیار خطرناک و تهدیدآمیز می‌باشد که موجب کنترل ناپذیری هواپیما می‌شود و همچنین پیش‌بینی پدیده و تشخیص آن کار دشواری است. تحقیق در این حوزه بدین منظور حائز اهمیت می‌باشد که هواپیما در مواجهه با این پدیده کنترل‌پذیر شود. اکثر تحقیقات، از مدل تک‌نقطه برای شبیه‌سازی رویارویی هواپیما با مایکروبرست استفاده کرده‌اند. این مدل موقعیت مایکروبرست را به مرکز جرم هواپیما اعمال می‌کند، در حالی که میدان مایکروبرست باید به سرتاسر بدنه، بال و دم هواپیما اعمال شود. برای شبیه‌سازی واقعی‌تر، باید از مدل جدیدی به نام مدل چندنقطه استفاده نمود. در این مدل اثرات باد متغیر علاوه بر مرکز جرم، به نقاط بیشتری از هواپیما وارد می‌شود. اعمال اثر گرادیان باد به هواپیما از مزیت‌های این مدل به شمار می‌رود. در این مقاله نتایج شبیه‌سازی برای هر دو مدل ارائه می‌گردد و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مقایسه مدل تک‌نقطه با روش های موجود در مراجع هم‌خوانی مناسبی را با تلرانس 10% ارائه نمود. نتایج شایان ملاحظه نظیر عملکرد مسیر حرکت، زاویه آزیموت و گشتاور طولی هواپیما به صورت مقایسه‌ای در دو مدل تک‌نقطه و چندنقطه در حضور مایکروبرست نشان داده می‌شود. مدل چندنقطه برتری مدل‌سازی را با حالت واقعی پرواز در حضور مایکروبرست به اثبات رساند.

Dynamic response of the aircraft to wind shear using multi-points loading approach

Ali Pourmoradi, Mehdi Sabzehparvar*

Aerospace Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B.1591634311, Tehran, Iran, sabzeh@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 October 2017
Accepted 10 January 2018
Available Online 01 February 2018

Keywords:
Microburst
Wind shear
Multi-points model
Single-point model

ABSTRACT

Microburst wind shear is very dangerous and threatening for aircraft in low altitude flight, which makes aircraft uncontrollable and also difficult in forecasting and detection. This is consequential research in order to make the aircraft controllable when encountering the phenomenon. Most studies have simulated aircraft encountering the microburst by applying single-point model. This model, consider location of microburst on the aircraft center of gravity, where microburst must be applied all through fuselage, wing and tail combination. For more realistic simulation, microburst should be applied to more points of aircraft body in addition to C.G., which is known as developed multi-points model. Applying the influence of wind gradients to aircraft body is the advantage of this model. In this paper, results of both single and multi- points was conducted and compared. In comparison of single-point model with existing methods in references, has provided a proper consistency with the tolerance of 10%. Considerable results have shown in comparison of single-point and multi-points model in accordance to flight trajectory response, heading angle and pitching moment to wind shear model and the ability of the multi-points model for modeling of aircraft realistic flight encountering microburst has been proved.

1- مقدمه

طبق آمار شبکه ایمنی هواپیمایی[1] ایالات متحده امریکا عامل قیچی‌باد[2]، موجب دو تصادف عمده طی سال های 1990 تا 2000 شده است. اولین تصادف در 21 دسامبر 1992 واقع در فرودگاه فارو[3] در کشور پرتغال، با سقوط یک فروند هواپیمای دی سی. 10[4] در حین فرود رخ داد. به دنبال آن 56 تن کشته شده و 20 تن مجروح شدند. دومین تصادف در 2 جولای 1994 در فرودگاه بین المللی شارلوت-داگلاس[5] واقع در شمال کارولینا[6] با رویارویی یک فروند هواپیمای دی سی. 9[7] با عامل قیچی باد در نزدیکی سطح زمین اتفاق افتاد. این حادثه نیز 37 تن کشته و 20 تن زخمی به همراه داشت [1]. سازمان‌های تحقیقاتی نظیر شرکت تحقیقات هواشناسی مشترک فرودگاهی[8]، اداره تحقیقات هواشناسی روی دانبرست شمال الینوی[9] و اداره هوانوردی

[1] Aviation Safety Network (ASN)
[2] Wind shear
[3] Faro Airport
[4] DC-10
[5] Charlotte Douglas International Airport
[6] Carolina
[7] DC-9
[8] Joint Airport Weather Studies (JAWS)
[9] Northern Illinois Meteorological Research on Downbursts (NIM-ROD)

Please cite this article using:
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Pourmoradi, M. Sabzehparvar, Dynamic response of the aircraft to wind shear using multi-points loading approach, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 243-252, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

فدرال[1] نشان دادند که حداکثر سرعت باد دانبرست[2] در 50 متری سطح زمین رخ می‌دهد، با این وجودکه این سازمان‌ها می‌توانند سرعت واقعی را محاسبه کنند، اما اعلان داشتند که غیر قابل پیش‌بینی بودن این پدیده در زمان و مکان مشخص چالش برانگیز است [2].

مایکروبرست[3]، یک داندرفت[4] شدید با ابعاد کوچک است که در ابتدا به صورت عمودی از پایه ابر[5] جریان پیدا می‌کند. این جریان عمودی به هنگام نزول از پایه‌ی ابر شتاب می‌گیرد و در طی چند ثانیه به صورت بادهای تند به نزدیکی زمین می‌رسد و در ادامه در نزدیکی سطح زمین به دلیل برخورد با هوای سرد به صورت چرخشی فوران می‌کند و یک جریان خروجی به صورت مخروطی ایجاد می‌شود، که محدوده شعاعی آن کمتر از 4 کیلومتر است و سرعت آن گاهی به 270 کیلومتر بر ساعت هم می‌رسد. میدان جریان یک مایکروبرست توسعه‌یافته تفاوت زیادی با یک باد مرسوم در اتمسفر دارد [3].

مایکروبرست از نظر نوع بارش مطابق شکل 1 به سه دسته تقسیم می‌شود [3]:

1- مایکروبرست مرطوب: اگر جریان مایکروبرست از پایه ابر همراه با بارش باشد.

2- مایکروبرست خشک: اگر جریان مایکروبرست از پایه ابر بدون بارش باشد.

3- مایکروبرست نیمه مرطوب: اگر جریان مایکروبرست از پایه ابر همراه با اندکی بارش باشد.

همان‌طور که از شکل 1 مشخص است مایکروبرست خشک از ارتفاعات بالاتری نسبت به مایکروبرست نیمه‌مرطوب و مرطوب شروع به توسعه‌پذیری می‌کند [4].

پدیده‌ی مایکروبرست تأثیر ناگواری روی هواپیما در فاز نشست و برخاست (ارتفاع پایین) دارد. شکل 2 یک مسیر پروازی دو بعدی هواپیما را حین عبور از مایکروبرست نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 2 ملاحظه می‌شود، هواپیما در مواجهه با پدیده مایکروبرست ابتدا به پیشانی باد برخورد می‌کند. در طی این برخورد نیروی لیفت وارد شده به آن افزایش پیدا می‌کند و آن را به بالای خط شیب پرواز[6] منتقل می‌کند و ممکن است که حتی خلبان فریفته شود و با استفاده از تراتل[7] نیروی تراست[8] را کاهش دهد. در حالی که هواپیما به زودی به قسمت

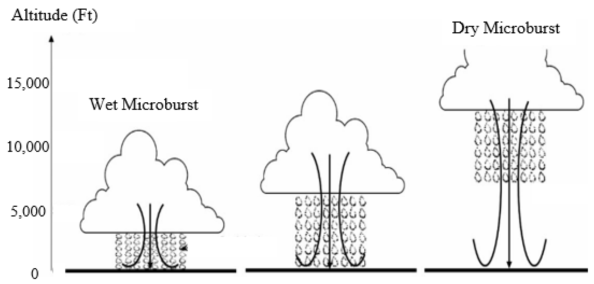

Fig. 1 Three type of the microburst precipitation

شکل 1 سه نوع مایکروبرست از نظر نوع بارش [4]

[1] Federal Aviation Administration (FAA)
[2] Downburst
[3] Microburst
[4] Downdraft
[5] Cloudy base
[6] Glide Slope
[7] Throttle
[8] Trust

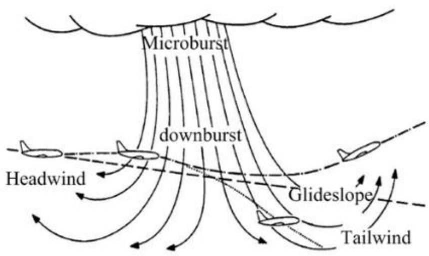

Fig. 2 Aircraft encountering with microburst and deviating from the flight path.

شکل 2 عبور هواپیما از پدیده مایکروبرست که منجر به خارج شدن هواپیما از مسیر حرکت خود می‌شود [5].

مرکزی و هسته‌ی قوی مایکروبرست خواهد رسید که جریان عمودی شدید به سمت پایین دارد که به دلیل تقلیل در تراست، هواپیما توان مقابله با آن را ندارد و سقوط خواهد کرد چنانچه از این قسمت هم عبور نماید به دم‌باد برخورد خواهد کرد و تعادل خود را از دست خواهد داد [5].

بر اساس علوم هوایی قیچی‌باد عبارت است از تغییرات جهت و سرعت بادی که یک هواپیما در طول فاصله‌ای مشخص یا بازه زمانی خاصی تجربه می‌کند و از دو مؤلفه تشکیل شده است. قیچی‌باد افقی؛ که تغییر باد در طول فاصله‌ای افقی است و قیچی‌باد عمودی؛ که تغییر باد در امتداد فاصله‌ای عمودی می‌باشد که هر دو مورد معمولاً در اتمسفر اتفاق می‌افتند. بر مبنای تعریف قیچی‌باد هم تغییرات سرعت روی بال و بدنه هواپیما و هم علاوه بر تغییرات سرعت، تغییرات جهت بردار روی بدنه و بال هواپیما می‌تواند باعث قیچی‌باد شود. اهمیت بررسی تغییرات جهت بردار از تغییرات سرعت در تحلیل این پدیده بالاتر است..

شکل 3 اطلاعات آماری پراکندگی پدیده مایکروبرست در سطح دنیا را که از سازمان ایکایو[9] به چاپ رسیده است، نشان می‌دهد [6].

خلبانان در این موارد اغلب توجیه شده و آمادگی مقابله با این پدیده وحشتناک را دارند. در واقع به آنان توصیه می‌شود که نباید به سرعت واماندگی[10] نزدیک شوند. در شرایط شدید اغتشاشات جوی، تکیه بر مهارت خلبان می‌تواند به هدایت هواپیما با دستگاه و انتخاب ارتفاع مورد نظر کمک نماید و هم‌اکنون در جهت کم کردن مخاطرات پدیده قیچی‌باد و تعیین روش‌هایی که اثرات آن را به حداقل برساند اقداماتی انجام شده است.

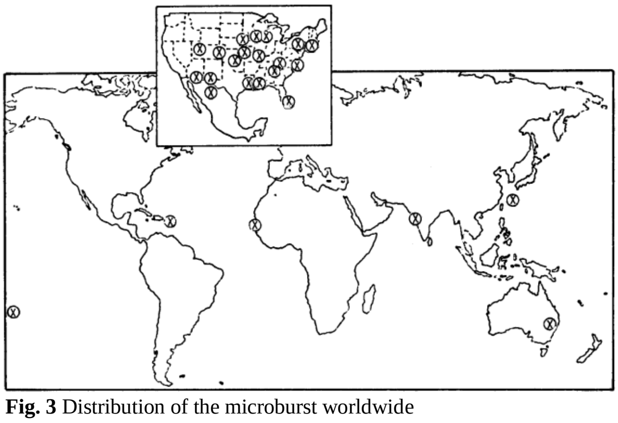

Fig. 3 Distribution of the microburst worldwide

شکل 3 پراکندگی پدیده مایکروبرست در سطح دنیا [6]

[9] ICAO
[10] Stall

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

راه‌های دستیابی اصولی که برای نقصان خطر روبرو شدن با پدیده قیچی‌باد وجود دارند عبارت‌اند از:

1- آموزش خاص خلبانان؛

2- سیستم شبکه هشداردهنده مستقر در زمین؛

3- نصب سیستم هشدار دهنده در کابین هواپیما و سیستم‌های هدایت هواپیما به حالت اولیه.

هر یک از راه‌های فوق مورد توجه بوده و نوید کمک مؤثر در جهت محفوظ ماندن از خطرات این پدیده را به وجود آورده‌اند. ولی نکته‌ای که حائز اهمیت می‌باشد این است که می‌توان گفت پیش‌بینی یک مدت کوتاه قبل از رویارویی هواپیما با اغتشاش چند دقیقه قبل از فرود می‌تواند یک پرواز امن‌تر برای مسافرین فراهم کند؛ لذا در این پروژه با تحلیل مستقیم بر روی پارامترهای پروازی هواپیما در حضور مایکروبرست، و بدست آوردن رفتار پروازی هواپیما حین رویارویی با این پدیده می‌توان به پیشرفت در تولید سیستم‌های هشدار دهنده داخل کابین هواپیما در صنعت هواپیمایی نقش به سزایی داشت.

اکنون تحقیقات پیشین در این زمینه بررسی می‌گردد. حوزه مدل‌سازی هواپیما به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول، آن دسته از تحقیقاتی هستند که اثر مایکروبرست تنها به مرکز جرم هواپیما اعمال می‌گردد و بخش دوم، آن دسته هستند که میدان باد علاوه بر مرکز جرم به نقاط دیگر هواپیما اعمال می‌شود که تعداد تحقیقات در این زمینه انگشت شمار بوده و تاکنون مقالات اندکی از آن به چاپ رسیده است.

چای و همکاران روی یک مدل سه بعدی مایکروبرست تحت عنوان روش حلقه گرداب[1] کار کردند و یک مدل تک‌نقطه از هواپیمای بویینگ 737 برای شبیه‌سازی عملکرد هواپیما در حضور مایکروبرست انتخاب کردند. در نهایت با توجه به اهمیت مایکروبرست در پیشامدهای پروازی، شبیه‌سازی خود را در نرم‌افزار فلایت‌گیر[2] تست گرفتند تا رفتار هواپیما را تحت اثر مایکروبرست بررسی کنند [7]. وانگ و همکاران معادلات غیر خطی برای مدل تک‌نقطه هواپیما تحت اثر شرایط باد متغیر استفاده کردند و از چهار پارامتر برای گرادیان باد در محاسبه ضرایب آیرودینامیکی برای شبیه‌سازی واقعی‌تر استفاده کردند [8].

اتکین اولین ایده شبیه‌سازی چندنقطه هواپیما در حضور مایکروبرست را در کتاب خود به چاپ رسانید، برای این منظور او یک مدل چهار- نقطه برای هواپیما درنظر گرفت که دو نقطه آن روی بال هواپیما تعبیه شده است و روی گشتاور عرضی اثرگذار است و در راستای طولی هواپیما علاوه بر مرکز جرم، یک نقطه بر روی دم هواپیما وجود دارد که اثرات باد متغیر در راستای طولی به این نقطه نیز وارد می‌شود [9]. ژنزینگ و همکاران از مدل ارائه شده اتکین برای شبیه‌سازی در زمان واقعی[3] یک هواپیمای بزرگ در میان مایکروبرست استفاده کردند [10].

آثاری و همکاران نیز مدل اتکین را بکار گرفتند با این تفاوت که در راستای طولی سه - نقطه فرض نمودند (مرکز جرم، دماغه و دم). به دلیل کم بودن تراست هواپیما و اینکه هواپیما در ارتفاع پایین با پدیده مایکروبرست مواجه می‌شود؛ در نگاه اول به نظر می‌رسد که با افزایش تراست می‌توان اینرسی هواپیما را بالا برد و قبل از برخورد آن به زمین به آن اوج داد. آنها ابتدا با در نظر گرفتن مدل جرم نقطه[4] شبیه‌سازی خود را انجام دادند و مشاهده کردند که هواپیما قبل از برخورد به زمین دوباره اوج گرفت، بعد از آن از مدل جسم صلب (تک‌نقطه[5]) و در نهایت از مدل چندنقطه[6] مذکور کمک گرفتند. درنهایت با اتفاقی کردن پارامترهای مشخصه مایکروبرست، سانحه بر مبنای وضعیت نهایی هواپیما تعریف شد. آنها با آزمایش روی مدل دوگان[7] نشان دادند که با استفاده از کنترل و تراست با هم احتمال سانحه از بازه % 70-60 به %40-30 کاهش یافت ولی با آزمایش روی مدل ازگورا-بولز[8] احتمال سانحه را در بازه %90-80 تعیین کردند که این احتمال با استفاده از تراست و کنترل تغییری نمی‌کند [11].

2- مدل‌سازی

در این بخش، در ابتدا معادلات سه درجه آزادی غیرخطی در حالت بدون باد درنظر گرفته می‌شود؛ از آن جا که رفتار هواپیما کاملاً غیرخطی و تحت تأثیر شرایط محیطی و فیزیکی‌اش قرار دارد لذا این ساختار در حضور مشتقات غیرخطی پایداری می‌تواند توانایی و عملکرد وسیله را با تقریب بسیار خوبی نمایش دهد. سپس یک مدل از مایکروبرست ارائه گردد، بعد از آن باید برای اتفاقی کردن عامل قیچی‌باد یک توربولانس مناسب مدل‌سازی شود. در نهایت باید توربولانس به مدل مایکروبرست آغشته شود و اثر آن وارد معادلات حرکت غیرخطی هواپیما شود.

لازم به ذکر است که ضرایب و مشتقات پایداری ارائه شده در این فصل در جهت به دست آوردن نیروها و ممان‌های وارده به هواپیما استفاده گردیده است و حاصل اثر این نیروها و ممان‌ها بر مرکز جرم هواپیما است اما در این پروژه هواپیما در مواجهه با یک باد متغیر قرار می‌گیرد که بردار آن در سراسر بدنه و بال هواپیما متغیر است و نمی‌توان اعمال آن را منحصر به یک نقطه دانست بلکه باید اثر آن را به نقاط دیگر بدنه و بال اعمال نمود تا گشتاور حاصل از آن نیز به معادلات دینامیکی هواپیما وارد شود که در اینجا بحث مدل جسم صلب چندنقطه به وجود می‌آید که در پایان این بخش به طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2-1- مدل مایکروبرست

در این پروژه از مدل باد ویکروی استفاده می‌شود. این مدل تقریب بسیار خوبی از شرایط واقعی و سه بعدی اثر باد ارائه می‌دهد زیرا در آن توزیع سرعت‌های افقی به ارتفاع وابسته است، اثرات لایه مرزی سرعت در نزدیکی سطح زمین در نظر گرفته می‌شود و معادلات بقای جرم ارضاء می‌شود.

این مدل پیرامون چهار پارامتر تعریف می‌شود: شعاع و ارتفاع بیشترین مقدار سرعت افقی، مقیاس باد و توابع شکل داده شده که در راستای شعاعی و ارتفاع‌های پایین تلفیقی از مدل تحلیلی و داده‌های اندازه‌گیری شده است. در صورتی که در ارتفاع‌های بالاتر، تمایل دارد مقدار باد را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده ارزیابی کند. همچنین گرادیان‌های سرعت باد بر حسب تغییرات موقعیت و زمان را به خوبی می‌توان از مشتق گرفتن از رابطه تحلیلی حاصل محاسبه و اثر این تغییرات را نیز در معادلات حرکتی لحاظ نمود. معادلات مولفه‌های مدل باد مطابق روابط (1) تا (3) است [12]:

$$W_{\mathrm{x}} = \frac{\lambda x}{2}\left[\mathrm{e}^{\mathrm{c}_1(z/\mathrm{z}_{\max})} - \mathrm{e}^{\mathrm{c}_2(z/\mathrm{z}_{\max})}\right]\mathrm{e}^{\left[\frac{2-(x^2+y^2)^{\mathrm{a}}/\mathrm{r}_{\mathrm{p}}^{2\mathrm{a}}}{2\mathrm{a}}\right]} \quad (1)$$

$$W_{\mathrm{y}} = \frac{\lambda y}{2}\left[\mathrm{e}^{\mathrm{c}_1(z/\mathrm{z}_{\max})} - \mathrm{e}^{\mathrm{c}_2(z/\mathrm{z}_{\max})}\right]\mathrm{e}^{\left[\frac{2-(x^2+y^2)^{\mathrm{a}}/\mathrm{r}_{\mathrm{p}}^{2\mathrm{a}}}{2\mathrm{a}}\right]} \quad (2)$$

---

[1] Vortex ring method
[2] Flight Gear
[3] Real-Time
[4] Point mass
[5] Single-point
[6] Multi-points
[7] Dogan
[8] Oseguera - Bowles

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

$$W_z = -\lambda\{\frac{z_{max}}{c_1}[e^{c_1(z/z_{max})} - 1] - \frac{z_{max}}{c_2}[e^{c_2(z/z_{max})} - 1]\} \times [1 - \frac{(x^2+y^2)^a}{2r_p^{2a}}]\, e^{[\frac{2-(x^2+y^2)^a/r_p^{2a}}{2a}]} \quad (3)$$

که در معادلات بالا، r_p و z_{max} به ترتیب شعاع و ارتفاع در بیشترین مقدار سرعت افقی، a مقدار متغیر تابع شکل داده شده و λ فاکتور مقیاس مایکروبرست می‌باشد و مقدار آن از رابطه (4) بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{2u_{max}}{r_p(e^{c_1} - e^{c_2})e^{(1/2a)}} \quad (4)$$

که u_{max} در بیشترین مقدار سرعت افقی باد می‌باشد و با دو پارامتر r_p و u_{max} می‌توان مقیاس مایکروبرست را تغییر داد.

2-2- توربولانس درایدن

در جهت بروز اثر قیچی‌باد در مایکروبرست‌ها جدا از تغییرات محلی و اندازه سرعت، نیاز به مدل‌سازی و شناسایی رفتار اتفاقی این پدیده نیز می‌باشد. از آنجا که مدل توربولانس و اغتشاشات دقیقی از این پدیده در دسترس نیست؛ به سبب رفتار اتفاقی و اغتشاش گونه توربولانس درایدن می‌توان با تقریب خوبی اغتشاشات حاصل را با این نمونه مدل کرد که مقدار آن به وضعیت هواپیما (تغییرات سرعت، شتاب و همچنین ارتفاع هواپیما) و تأثیرات جوی اتمسفر (سرعت تندباد) وابسته است این توربولانس شامل چهار حالت ضعیف[1]، متعادل[2]، شدید[3] و خیلی شدید[4] می‌باشد [13] و برای اعمال آن به معادلات حرکت کافیست بردار درایدن با بردار مایکروبرست جمع شود [14].

2-3- معادلات حرکت سه درجه آزادی مدل جسم صلب هواپیما تحت اثر باد

معادلات حرکت هواپیما از چهار قسمت دینامیک انتقالی[5]، سینماتیک انتقالی[6]، دینامیک دورانی[7] و سینماتیک دورانی[8] تشکیل شده است. اگر اثر باد به معادلات در دستگاه سرعت وارد شود، دستگاه جدید، دستگاه سرعت نسبی نامیده می‌شود که در آن معادلات سینماتیک و دینامیک دورانی مشابه حالت بدون باد است ولی اثر باد و نرخ آن در معادلات سینماتیک و دینامیک انتقالی وارد می‌شود؛ (توجه شود که کلیه پارامترها استفاده شده در این مقاله نسبی می‌باشد با این وجود که از قید نمودن پایین‌نویس آن صرفنظر شده است.) نسبی دستگاه مختصات در شکل 4 نشان داده شده است که مولفه‌های مایکروبرست در دستگاه زمین ثابت[9] تعریف شده‌اند. لیفت[10] و درگ[11] نیروهای آیرودینامیکی هستند. T نیروی تراست[12] است که در راستای محور x_b دستگاه بدنی به هواپیما وارد می‌شود. g نیروی وزن هواپیماست که در راستای z دستگاه زمین ثابت به هواپیما وارد می‌شود.

معادلات سه درجه آزادی حرکت مطابق روابط (5) تا (10) می‌باشد [15]:

$$\dot{x} = V\cos\gamma + W_x + U_{gw} \quad (5)$$

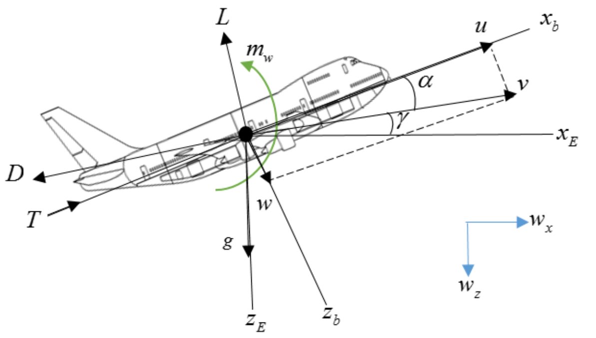

Fig. 4 Coordinate system and reference frames in the microburst presence

شکل 4 دیاگرام آزاد هواپیما در حضور مایکروبرست

$$\dot{z} = V\sin\gamma - W_z - W_{gw} \quad (6)$$

$$\dot{V} = \frac{T}{m}\cos\alpha - \frac{D}{m} - g\sin\gamma - \dot{W}_x\cos\gamma + \dot{W}_z\sin\gamma \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{mV}[L + T\sin\alpha] - \frac{g\cos\gamma}{V} + \frac{1}{V}[\dot{W}_x\sin\gamma + \dot{W}_z\cos\gamma] \quad (8)$$

$$\dot{\alpha} = q - \dot{\gamma} \quad (9)$$

$$\dot{q} = \frac{M}{I_{yy}} \quad (10)$$

معادلات نیروها و گشتاور آیرودینامیکی مطابق روابط (11) تا (14) می‌باشد:

$$L = \bar{q}SC_L \quad (11)$$

$$D = \bar{q}SC_D \quad (12)$$

$$M = \bar{q}S\bar{c}C_m \quad (13)$$

$$\bar{q} = 0.5\rho V^2 \quad (14)$$

L و D به ترتیب نیروی لیفت و درگ، M گشتاور طولی و $\bar{q}$ فشار دینامیکی می‌باشد. مشتقات پایداری از روابط (15) تا (17) پیروی می‌کنند [16]:

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha}\alpha + C_{L_{\dot{\alpha}}}\frac{\bar{c}}{2V}\dot{\alpha} + \frac{\bar{c}}{2V}C_{D_q}q + C_{D_{\partial_e}}\partial_e \quad (15)$$

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_\alpha}\alpha + C_{D_{\dot{\alpha}}}\frac{\bar{c}}{2V}\dot{\alpha} + \frac{\bar{c}}{2V}C_{D_q}q + C_{D_{\partial_e}}\partial_e \quad (16)$$

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha + C_{m_{\dot{\alpha}}}\frac{\bar{c}}{2V}\dot{\alpha} + \frac{\bar{c}}{2V}C_{m_q}q + C_{m_{\partial_e}}\partial_e \quad (17)$$

C_L و C_D به ترتیب ضریب لیفت و درگ و C_m ضریب گشتاور طولی می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر باد به معادلات دینامیک و سینماتیک دورانی اعمال نشده‌است. اثر مایکروبرست تنها به معادلات دینامیک و سینماتیک انتقالی وارد می‌شود. در این مدل هواپیما جسم صلب فرض شده است و اثر مایکروبرست همانند نیروهای آیرودینامیکی و گرانش تنها به یک نقطه (مرکز جرم) وارد می‌شود. این مدل در شبیه‌سازی دقیق و واقعی پرواز مناسب نمی‌باشد زیرا باد متغیر است و پروفیل باد در مرکز جرم با مقدار آن که به نقاط دیگر هواپیما وارد می‌شود متفاوت است.

2-4- مدل تراست

وقتی که خلبان متوجه حضور تنش شود، مقدار تراست را تا مقدار ماکزیمم افزایش می‌دهد. از لحظه‌ای که خلبان متوجه شود تا لحظه‌ای که شروع به افزایش تراست می‌کند معمولاً مدت زمانی طول می‌کشد که تأخیر خلبان گفته می‌شود و با t_p نشان داده می‌شود که در طول این مدت تراست ثابت است. از لحظه شروع افزایش تراست تا وقتی که تراست به ماکزیمم خود

[1] Light
[2] Moderate
[3] Severe
[4] Extreme
[5] Transitional Dynamic
[6] Transitional Kinematics
[7] Rotational Dynamic
[8] Dynamic kinematics
[9] Earth-Fixed coordinate
[10] Lift
[11] Drag
[12] Thrust

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

برسد t_f ثانیه طول می‌کشد که به آن تأخیر موتور گفته می‌شود [17].

2-5- مدل جسم صلب چندنقطه‌ای

اگر معادلات حرکت هواپیما همراه با اثر میدان باد در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود، مدل جسم صلب می‌باشد که در واقع اثر باد فقط بـه مرکـز جـرم هواپیما وارد می‌شود. با ورود هواپیما به مایکروبرست، دماغـه در یـک بـازه‌ی زمانی جلوتری نسبت به مرکز جرم تحت اثر باد قرار می‌گیرد و این خود باعث به وجود آمدن یک گشتاور اضافی به هواپیما می‌شود کـه در مـدل تـک‌نقطـه نادیده گرفته می‌شود. در مقابل دم نیز با یک تـأخیر زمـانی نسـبت بـه مرکـز جرم وارد باد می‌شود که باید اثر گشتاوری آن در نظر گرفته شود. بر این مبنـا باید درجستجوی ارائه مدلی بود که این گشتاورها درنظـر گرفتـه شـود. بـرای این کار می‌توان بدنه بال و دم هواپیما را مقطع بندی کرد و اثـر مایکروبرسـت را به این مقاطع اعمال نمود و گشتاور اضافی اعمال شده به هواپیما را بدسـت آورد.

در این پروژه، هواپیما در راستای طولی به 8 قسمت تقسیم می‌شود و سپس میدان مایکروبرست به همه این مقاطع در حین عبور هواپیما از مایکروبرست وارد می‌شود، با این کار گشتاور اضافی ناشی از باد که معادلات حرکت در مدل تک‌نقطه، از نشان دادن آن عاجز هستند به دست آورده می‌شود. با زیاد کردن نقاط در نظر گرفته شده، درواقع شبیه‌سازی دقیق تر شده است.

همان‌طور که در معادلات حرکت هواپیما مشهود است، اثر مایکروبرست تنها به معادلات دینامیک و سینماتیک انتقالی وارد می‌شود اما مطابق شماتیک شکل 5 در مدل چندنقطه اثر مایکروبرست علاوه بر معادلات انتقالی به معادلات دینامیک دورانی نیز اعمال می‌شود.

2-5-1- شبکه‌بندی هواپیما در راستای طولی

شکل 6 شبکه‌بندی هواپیما را در راستای طولی نشان می‌دهد.

ابتدا نیروی لیفت وارد بر هر مقطع از رابطه (18) به دست آورده می‌شود:

$$F_w=\frac{1}{2}\rho\sum_{i=1}^{18}W_z^{B^2}(t+\Delta t_i)C_{L_i}S_i \tag{18}$$

سپس گشتاور وارد به هواپیما از رابطه (19) به دست می‌آید:

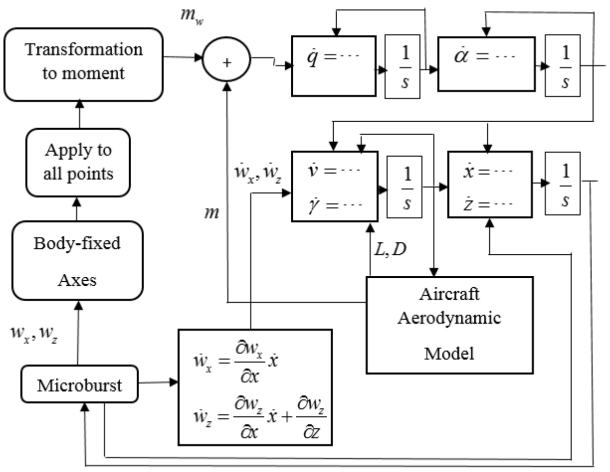

Fig. 5 Schematics of the aircraft multi-points model equations under the microburst influence

شکل 5 شماتیکی از معادلات حرکت هواپیما تحت اثر مایکروبرست در مدل چندنقطه

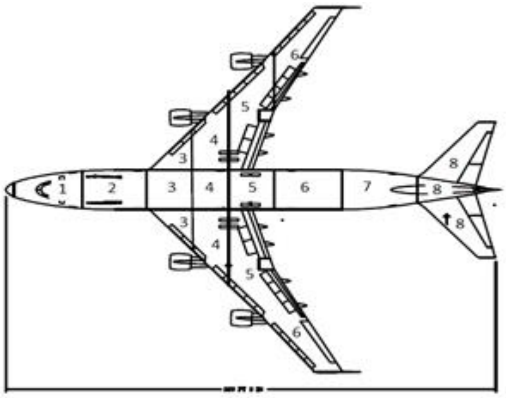

Fig. 6 Discretizing in the longitudinal direction

شکل 6 شبکه‌بندی هواپیما در راستای طولی [18]

$$M_w=\frac{1}{2}\rho\sum_{i=1}^{18}W_z^{B^2}(t+\Delta t_i)C_{L_i}S_i d_i \tag{19}$$

F_w نیروی ناشی از مایکروبرست وارد شده به هر نقطه و M_w گشتاور پیچ[1] ناشی از مایکروبرست می‌باشد، ρ چگالی هوا، $W_z^B(t+\Delta t_i)$ مؤلفه‌ای از باد که در راستای عمودی به هواپیما وارد می‌شود، Δt_i زمان تأخیر وزش باد به نقاط و C_{L_i} ضریب لیفت وارد بر نقاط مشخص شده در هواپیما می‌باشد. S_i و d_i به ترتیب مساحت هر مقطع و فاصله میانگین آن از مرکز جرم هواپیما می‌باشد که این مقادیر برای هواپیمای بوئینگ 747 با نرم‌افزار اتوکد به دست آمده است. در جدول 1 مقادیر مساحت مقاطع تفکیک شده آمده است.

2-5-2- محاسبه گشتاور کل

برای محاسبه گشتاور کل باید مقدار گشتاور هواپیما در معادلات حرکت با گشتاور ناشی از مایکروبرست جمع شود:

$$M_{total}=M+M_w \tag{20}$$

3- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

در مبحث رویارویی هواپیما با پدیده مایکروبرست، مقالات پیشین از مدل تک‌نقطه‌ای هواپیما برای شبیه‌سازی استفاده نموده‌اند. در این پروژه علاوه بر این مدل، یک مدل جدید به نام مدل چندنقطه‌ای معرفی می‌شود که با بهره‌گیری از آن شبیه‌سازی دقیق‌تری قابل ارائه است. در این فصل ابتدا توزیع گشتاور در راستای طولی هواپیما برای هر دو مدل بررسی و مقایسه می‌شود سپس به شبیه‌سازی معادلات حرکت سه درجه آزادی پرداخته می‌شود و پارامترهای پروازی برای هر دو مدل ارائه می‌گردد؛ در نهایت اثر سرعت هواپیما با کم و زیاد کردن تراست هنگام عبور از مایکروبرست بررسی می‌گردد.

جدول 1 مشخصات مایکروبرست نمونه

Table 2 Characteristics of the sample microburst

شماره مساحت	مقدار مساحت	واحد
S_1	509.3371	Ft^2
S_2	635.6966	Ft^2
S_3	883.0186	Ft^2
S_4	1427.5049	Ft^2
S_5	2325.4915	Ft^2
S_6	2034.1319	Ft^2
S_7	650.2196	Ft^2
S_8	1458.2699	Ft^2

[1] Pitching moment

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

3-1- تحلیل توزیع گشتاور در راستای طولی هواپیما

در این بخش یک مدل سه درجه آزادی هواپیما در فاز فرود در نظر گرفته می‌شود سپس از یک مایکروبرست مطابق با مشخصات جدول 2 عبور خواهد کرد.

لازم به ذکر است که مایکروبرست مورد نظر به مود توربولانسی شدید از توربولانس درایدن آغشته شده است. شکل‌های 7 و 8 به ترتیب نمودار توربولانسی مؤلفه‌های افقی و عمودی مایکروبرست را نشان می‌دهند.

در حالت کلی در حین مواجهه هواپیما با پدیده مایکروبرست، هواپیما در مرحله اول وارد پیشانی باد می‌شود و گشتاور اعمالی در راستای طولی به آن افزایش می‌یابد و سپس وارد جریان عمودی رو به پایین قوی می‌شود و گشتاور اعمالی کاهش می‌یابد و در پایان وارد دم باد می‌شود و مقدار گشتاور دوباره افزایش می‌یابد.

در این قسمت با استفاده از هر دو روش تک‌نقطه و چندنقطه، توزیع گشتاور در راستای طولی هواپیما تحلیل می‌شود. (نمودار خط‌چین مربوط به مدل تک‌نقطه و نمودار ممتد مربوط به مدل چندنقطه می‌باشد). در مدل چند نقطه با استفاده از روش جمع آثار[1]، ابتدا میدان مایکروبرست به طور

جدول 2 مشخصات مایکروبرست نمونه

Table 2 Characteristics of the sample microburst

حالت	مقدار	واحد
r_p	500	Ft
u_{max}	20	Ft/s
a	2	–
z_{max}	680	Ft

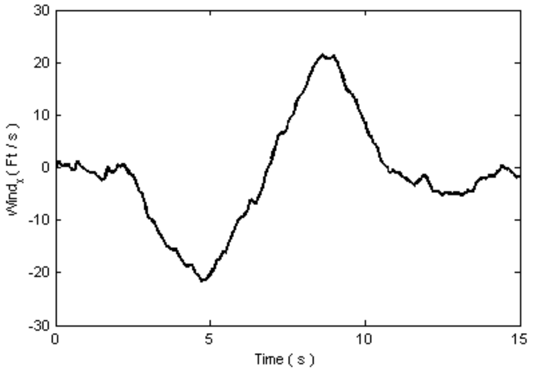

Fig. 7 The microburst horizontal component with Turbulence

شکل 7 نمودار توربولانسی مؤلفه افقی مایکروبرست

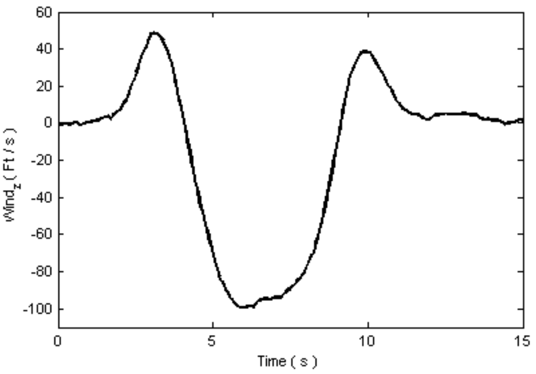

Fig. 8 The microburst vertical component with Turbulence

شکل 8 نمودار توربولانسی مؤلفه عمودی مایکروبرست

[1] Super position

جداگانه روی مقاطع هواپیما اعمال می‌شود تا دیده شود اثر باد متغیر روی کدام قسمت از هواپیما تأثیرگذاری بیشتری دارد. در نهایت همه مقاطع هم-زمان تحت اثر باد قرار می‌گیرند و در نتیجه گشتاور طولی برای مدل 8 - نقطه بدست می‌آید.

شکل 9 نمودار گشتاور طولی ناشی از اعمال اثر باد به هر مقطع را به طور مجزا بر حسب موقعیت مایکروبرست نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 9 می‌توان قسمت‌های مختلف مایکروبرست را با تقریب قابل‌قبولی تفکیک کرد تا روشن گردد که توزیع گشتاور در هر محدوده به طور مجزا به چه شکل است. جدول 3 تفکیک قسمت‌های مختلف مایکروبرست را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است، گشتاور طولی در ناحیه حد فاصل بین دماغه و مرکز جرم (مقاطع 1 تا 4)، در محدوده مکانی پیشانی و دم‌باد دارای مقدار مثبت و در هسته مایکروبرست دارای مقدار منفی است که این مورد در رابطه با ناحیه حد فاصل مرکز جرم و دم (مقاطع 5 تا 8) برعکس است. شایان ذکر است که اثر گذاری مایکروبرست بر ناحیه حد فاصل بین دم و مرکز جرم به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است؛ بدین منظور برای کنترل و پایداری هواپیما باید تعادل گشتاوری بین هر دو ناحیه ایجاد شود. در مرحله بعد، جمع جبری گشتاور اعمالی به همه مقاطع، به گشتاور هواپیما اضافه می‌شود که مدل 8 – نقطه حاصل می‌گردد. شکل 10 نمودار گشتاور طولی کل را برای هر دو مدل 8 – نقطه و جسم صلب (تک‌نقطه) نشان می‌دهد.

در مدل چندنقطه گشتاور طولی بیشتری نسبت به مدل تک‌نقطه به هواپیما وارد می‌شود (حدود 29 درصد در پیک منحنی) و به دلیل این که اثر باد به بخش انتهایی هواپیما از بخش ابتدای آن بیشتر است. (اثر دم به دماغه غلبه می‌کند.) گشتاور طولی با تأخیر و در زمان واقعی‌تری به هواپیما وارد می‌شود.

طبق نتایج حاصل شده از مقالات پیشین، گشتاور طولی مطابق نمودار تک‌نقطه مشخص شده از شکل 11 می‌باشد. همچنین در این شکل گشتاور

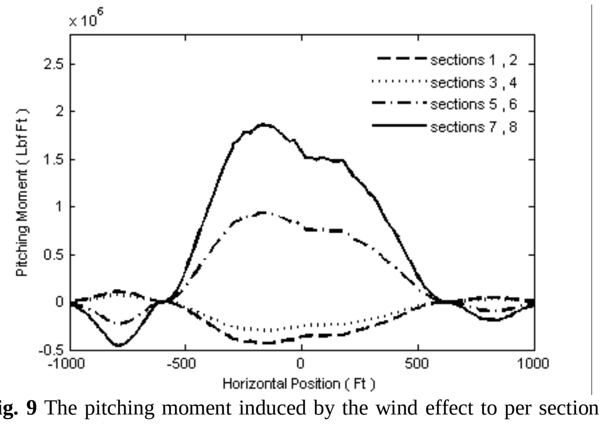

Fig. 9 The pitching moment induced by the wind effect to per section vs. location of microburst.

شکل 9 گشتاور طولی ناشی از اعمال اثر باد به هر مقطع (به طور مجزا) بر حسب موقعیت مایکروبرست.

جدول 3 تفکیک قسمت‌های مختلف مایکروبرست.

Table 3 The separation of microburst to several components.

اجزای مایکروبرست	محدوده مکانی	واحد
پیشانی باد	$-1000 < x < -500$	فوت
هسته مرکزی باد	$-500 < x < 500$	فوت
دم‌باد	$500 < x < 1000$	فوت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

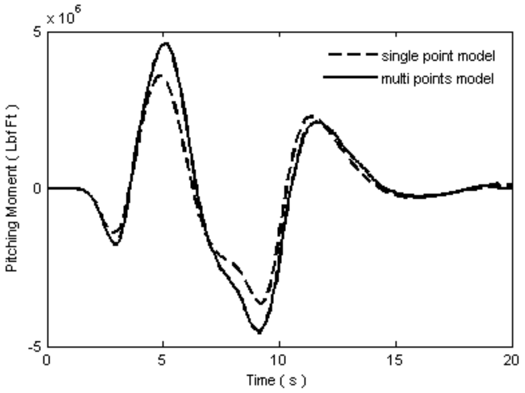

Fig. 10 Continuous lines: Pitching moment induced by microburst to the all sections for the multi-points model. Discontinuous lines: Pitching moment induced by microburst for the rigid body models (single-point model).

شکل 10 خطوط ممتد: گشتاور طولی ناشی از اعمال مایکروبرست به همه مقاطع برای مدل چندنقطه. خطوط خط‌چین: گشتاور طولی ناشی از اعمال مایکروبرست در مدل جسم صلب (تک‌نقطه).

طولی برای مدل 8-نقطه، 6-نقطه و 4-نقطه آورده شده‌است. هدف از این شکل اثبات اعتبارسنجی مدل چندنقطه می‌باشد بدین صورت که با کاهش دادن تعداد نقاط در مدل‌سازی از 8- نقطه به تک‌نقطه، نمودار گشتاور طولی مرحله به مرحله به سمت مدل تک‌نقطه نزدیک می‌شود.

3-2- شبیه‌سازی سه درجه آزادی و تحلیل پارامترها

در این بخش به شبیه‌سازی معادلات حرکت پرداخته می‌شود. شرایط اولیه حرکت مطابق جدول 4 می‌باشد. همان‌طور که مشخص است هواپیما در ارتفاع 800 فوتی تحت زاویه مسیر 3- درجه در حال نشستن می‌باشد که در شبیه‌سازی در مواجهه با مایکروبرست قرار می‌گیرد.

نتایج مربوط به تک‌نقطه در این بخش، با نتایج مقالات [10,11] با تلورانس مناسبی تطابق دارد و اعتبارسنجی آن انجام پذیرفت. نتایج مربوط به مدل چندنقطه نیز با توجه به توجیهات علمی با مدل تک‌نقطه از نظر کمیت تفاوت دارد و مقادیر آن بحرانی‌تر است.

شکل 12 مسیر حرکت[1] دو بعدی هواپیما در حین فرود را نشان می‌دهد، در این بخش هواپیما از مایکروبرست عبور داده می‌شود، این کار یک بار برای

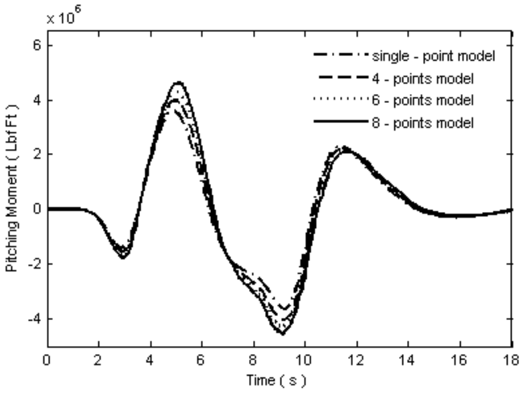

Fig. 11 The pitching moment for the 8-points, 6-points, 4-points and the rigid body models (single-point model)

شکل 11 گشتاور طولی برای مدل 8- نقطه، 6- نقطه، 4- نقطه و مدل جسم صلب (مدل تک‌نقطه)

[1] Trajectory

جدول 4 شرایط اولیه هواپیما

Table 4 Initial conditions of aircraft

حالت	مقدار	واحد
$x(0)$	-1500	Ft
$h(0)$	800	Ft
$v(0)$	230.23	Ft/s
$\alpha(0)$	7	deg
$\gamma(0)$	-3	deg

مدل تک‌نقطه و بار دیگر برای مدل چندنقطه انجام می‌شود و هر دو حالت در یک شکل باهم مقایسه می‌گردد؛ ضمن آنکه مسیر پروازی بدون رخداد مایکروبرست نیز در شکل ترسیم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با عبور هواپیما از مایکروبرست ابتدا به هواپیما نیروی لیفت زیادی وارد می‌شود و آن را از خط شیب پرواز بالاتر می‌برد، سپس وارد جریان شدید رو به پایین می‌شود و افت ارتفاع زیادی پیدا می‌کند؛ در نهایت هواپیما مجددا وارد جریان رو به بالا (دم‌باد) می‌گردد. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، بین دو مدل در دم‌باد مایکروبرست اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود دارد (حدود 16 درصد اختلاف ارتفاع). در مدل چند نقطه‌ای (8-نقطه) اثر نیرویی مایکروبرست در دم‌باد بیشتر از مدل تک‌نقطه است.

شکل 13 نمودار سرعت هواپیما بر حسب زمان را نشان می‌دهد.

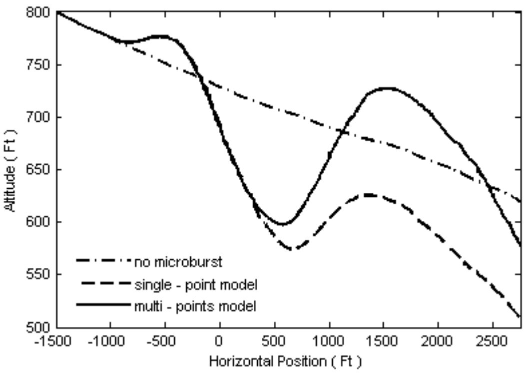

Fig. 12 The aircraft’s flight path for the both models under the microburst influence and no microburst condition.

شکل 12 مسیر حرکت هواپیما برای دو مدل تحت اثر مایکروبرست و حالت بدون مایکروبرست

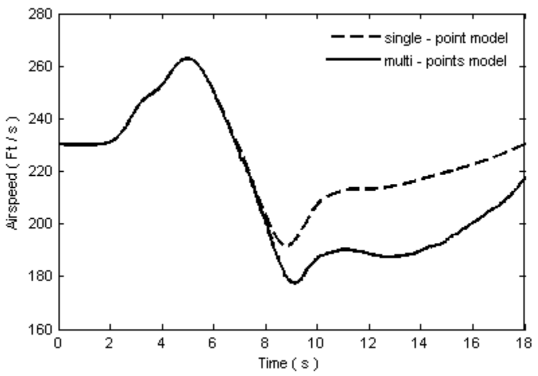

Fig. 13 The airspeed graph for the both models

شکل 13 نمودار سرعت هواپیما برای هر دو مدل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا سرعت رو به جلو هواپیما به صورت فزاینده افزایش می‌یابد سپس در مسیر حرکت خود، با کاهش سرعت شدیدی مواجه می‌شود. کاهش سرعت در مدل چندنقطه به مقدار قابل توجهی (حدود 8 درصد) از مدل تک‌نقطه بیشتر است.

نمودار سرعت زاویه‌ای طولی و زاویه حمله به ترتیب در شکل‌های 14 و 15 آمده است.

مقادیر پارامترهای پرواز در مدل چندنقطه بحرانی‌تر از مدل تک‌نقطه می‌باشد. اختلاف سرعت زاویه‌ای و زاویه حمله در زمان پیک در دو روش به ترتیب حدود 39 و 22 درصد می‌باشد.

نمودار زاویه مسیر در شکل 16 آمده است.

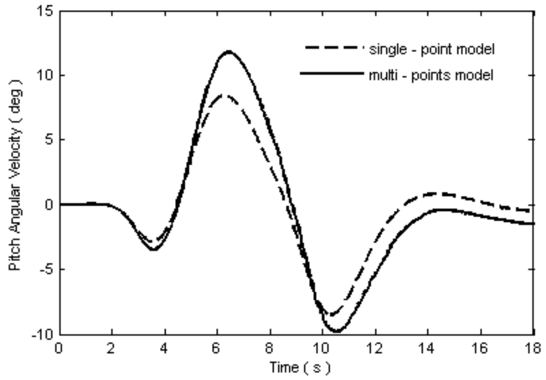

Fig. 14 The angular velocity (q) graph for the both models

شکل 14 نمودار سرعت زاویه‌ای q برای هر دو مدل

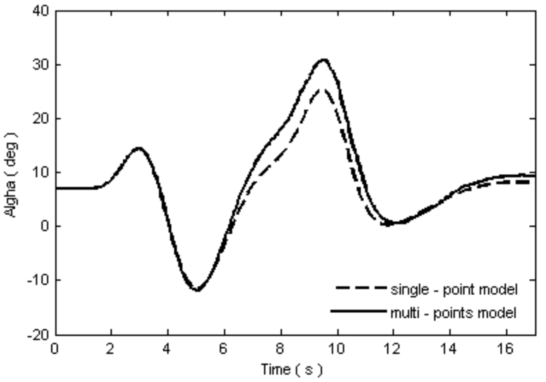

Fig. 15 The angle of attack graph for the both models

شکل 15 نمودار زاویه حمله برای هر دو مدل

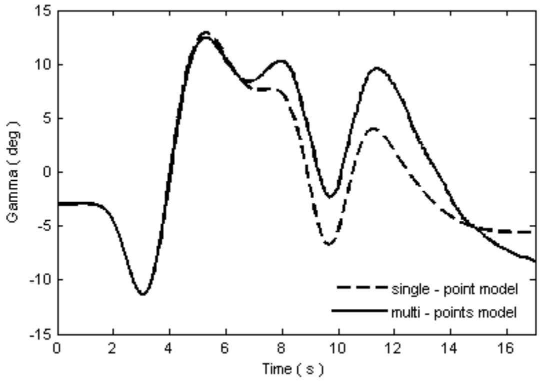

Fig. 16 The heading angle graph for the both models

شکل 16 نمودار زاویه مسیر برای هر دو مدل

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف زاویه مسیر در دو مدل، از ثانیه ششم به‌بعد در حال افزایش است تا جایی که حتی در حدود ثانیه 11 این اختلاف در مدل چندنقطه به بیشتر از دو برابر مقدار آن در مدل تک‌نقطه می‌رسد.

3-3- تأثیر سرعت هواپیما با تغییرات نیروی تراست در حضور مایکروبرست

اولین عاملی که در رویارویی هواپیما با مایکروبرست به فکر محققان می‌رسد افزایش نیروی تراست هواپیما است؛ لذا در این بخش افزایش قدرت موتور هواپیما تحت شرایط مختلف بررسی خواهد شد. برای مشاهده تأثیر سرعت هواپیما هنگام عبور از مایکروبرست چند حالت بررسی می‌گردد. شکل 17 شکل نمودار نیروی تراست بر حسب زمان را نشان می‌دهد. شروع شیب تراست به عکس‌العمل خلبان مربوط می‌شود.

اساس این نمودار بر مبنای دو تأخیر است، مورد اول تأخیر خلبان می‌باشد که به فاصله زمانی آگاهی خلبان از حضور مایکروبرست تا زمان انجام عکس العمل، گفته می‌شود؛ مورد دوم تأخیر موتور است که به فاصله زمانی بین عکس‌العمل خلبان تا رسیدن نیروی تراست به حداکثر مقدار، گفته می‌شود. زمان هر یک از این دو تأخیر برابر ۵ ثانیه می‌باشد.

شکل 18 نمودار مسیر حرکت هواپیما نسبت به موقعیت افقی را در عکس‌العمل‌های مختلف خلبان نشان می‌دهد. تشریح شکل بدین صورت است که چهار نمودار برای حالت‌های مختلف تراست ترسیم گشته که در دو مورد خلبان بعد از گذشت 2 و 10 ثانیه از شبیه‌سازی تراست را افزایش داده است؛ مورد بعدی عدم عکس‌العمل خلبان نسبت به پدیده را نشان می‌دهد و در

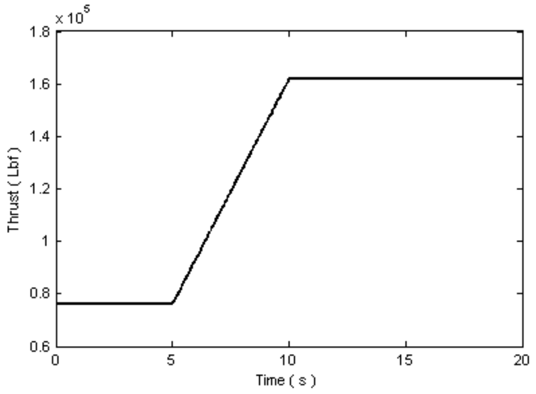

Fig. 17 The thrust vs. time graph

شکل 17 نمودار تراست بر حسب زمان

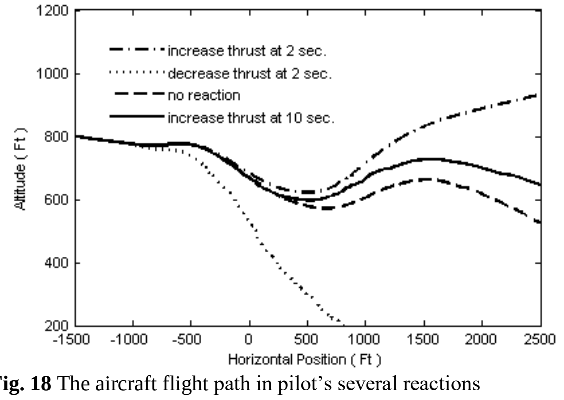

Fig. 18 The aircraft flight path in pilot’s several reactions

شکل 18 مسیر حرکت هواپیما در عکس العمل‌های مختلف خلبان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

مورد آخر خلبان مایکروبرست را به درستی تشخیص نداده است (افزایش ناگهانی سرعت رو به جلو هواپیما او را فریب داده است) و سرانجام اقدام به کاهش تراست بعد از گذشت 2 ثانیه از شبیه‌سازی می‌کند.

افزایش نیروی تراست می‌تواند عاملی برای کاهش افت ارتفاع هواپیما و حتی نجات آن از دامان باد در نزدیکی سطح زمین باشد و برعکس کاهش تراست مستقیماً منجر به سقوط خواهد شد. بنابراین به خلبانان توصیه می‌شود که به محض تشخیص این پدیده از حداکثر قدرت موتورها بهره بگیرند.

4- نتیجه‌گیری

این مقاله رویارویی هواپیما با عامل قیچی‌باد را بر پایه مدل چندنقطه در راستای طولی هواپیما ارائه می‌دهد، سپس آن را با مدل تک‌نقطه مورد مقایسه قرار می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که با اعمال میدان باد متغیر به بدنه، دم و بال هواپیما، در یک بازه زمانی کوتاه، گشتاور طولی به هواپیما وارد می‌شود، بنابراین عملکرد پروازی هواپیما تغییر می‌کند و پارامترهای پروازی (سرعت هواپیما، زاویه گام، زاویه حمله، زاویه مسیر و غیره) بحرانی‌تر می‌شوند. امروزه در صنعت هوایی به سیملاتورهای پرواز توجه فراوانی شده است و شرکت‌های هواپیمایی تلاش فراوانی دارند که سیملاتورهای با کیفیت بالاتری برای هواپیماهای خود طراحی کنند. یکی از قابلیت‌های مهم در سیملاتورها مبحث قیچی‌باد است؛ بر این مبنا اگر از مدل پایه چندنقطه‌ای پیاده‌سازی شده‌ی این مقاله در سیملاتورهای پرواز بهره‌گیری شود، خلبانان با مایکربرست دقیق‌تر و واقعی‌تری در پرواز مجازی مواجه خواهند شد و تدابیر پروازی خود را بر مبنای آن اعمال خواهند کرد. تاکنون مقالات فراوانی در زمینه کنترل هواپیما در تقابل با این سانحه هوایی به چاپ رسیده‌اند؛ در این مقالات روش‌های کنترلی گوناگونی به کار گرفته شده تا هواپیما در این سانحه کنترل شود. نکته مورد توجه این است که این قوانین کنترلی بر روی مدل تک‌نقطه‌ای پیاده سازی شده‌اند در حالی که مناسب‌تر است این پیاده سازی بر روی مدل چندنقطه‌ای انجام گردد. نمی‌توان ادعا کرد که این قوانین کنترلی، در به‌کارگیری از مدل چندنقطه نیز مقاوم هستند؛ زیرا هرچقدر هم که یک روش کنترلی مقاوم باشد نهایتاً توانایی افزایش بحران 5 الی 10 درصدی را دارا باشد؛ در حالی که در روش جدید پارامترهای پروازی قبل از کنترل تا 30 الی 40 درصد بحرانی‌تر از پارامترهای موجود در مدل سابق هستند.

5- فهرست علایم

a	متغیر تابع شکل داده شده
$\bar{c}$	وتر متوسط آیرودینامیکی
C_D	ضریب درگ
C_{D_0}	ضریب درگ در حالت زاویه حمله صفر
C_{D_α}	نرخ تغییرات ضریب درگ نسبت به زاویه حمله
$C_{D_{\dot\alpha}}$	نرخ تغییرات ضریب درگ نسبت به نرخ زاویه حمله
C_{D_q}	نرخ تغییرات ضریب درگ نسبت به سرعت زاویه‌ای طولی
$C_{D_{\partial_e}}$	نرخ تغییرات ضریب درگ نسبت به تغییرات زاویه الویتور
C_L	ضریب لیفت
C_{L_0}	ضریب لیفت در حالت زاویه حمله صفر
C_{L_α}	نرخ تغییرات ضریب لیفت نسبت به زاویه حمله
$C_{L_{\dot\alpha}}$	نرخ تغییرات ضریب لیفت نسبت به نرخ زاویه حمله
C_{L_q}	نرخ تغییرات ضریب لیفت نسبت به سرعت زاویه‌ای طولی
$C_{L_{\partial_e}}$	نرخ تغییرات ضریب لیفت نسبت به تغییرات زاویه الویتور
C_{L_i}	ضریب لیفت وارد بر هر مقطع
C_m	ضریب گشتاور طولی
C_{m_0}	ضریب گشتاور طولی در حالت زاویه حمله صفر
C_{m_α}	نرخ تغییرات ضریب گشتاور طولی نسبت به زاویه حمله
$C_{m_{\dot\alpha}}$	نرخ تغییرات ضریب گشتاور طولی نسبت به نرخ زاویه حمله
C_{m_q}	نرخ تغییرات ضریب گشتاور طولی نسبت به سرعت زاویه‌ای طولی
$C_{m_{\partial_e}}$	نرخ تغییرات ضریب گشتاور طولی نسبت به تغییرات زاویه الویتور
D	نیروی درگ
d_i	فاصله میانگین هر مقطع از مرکز جرم هواپیما
F_w	نیروی ناشی از مایکروبرست وارد شده به هر مقطع
g	نیروی وزن (Ft/s^2)
h	ارتفاع هواپیما (Ft)
I_{yy}	ممان اینرسی حول محور y
L	نیروی لیفت (Lbf)
M	گشتاور طولی هواپیما (LbfFt)
M_w	گشتاور پیچ ناشی از مایکروبرست (LbfFt)
M_{total}	گشتاور پیچ کل (LbfFt)
m	جرم هواپیما (Lbf)
q	سرعت زاویه‌ای طولی (deg)
$\bar{q}$	فشار دینامیکی
r_p	شعاع در بیشترین مقدار سرعت افقی (Ft)
S	مساحت بال (Ft^2)
S_i	مساحت هر مقطع (Ft^2)
T	نیروی تراست (Lbf)
u_{max}	ماکزیمم سرعت افقی (Ft/s)
U_{gw}	توربولانس درایدن در راستای محور x (Ft/s)
v	سرعت هواپیما (Ft/s)
W_{gw}	توربولانس درایدن در راستای محور z (Ft/s)
W_x	مؤلفه افقی مایکروبرست در راستای محور x (Ft/s)
W_y	مؤلفه افقی مایکروبرست در راستای محور y (Ft/s)
W_z	مؤلفه عمودی مایکروبرست در راستای محور z (Ft/s)
$W_z^B(t+\Delta t_i)$	مؤلفه باد واردشده به هواپیما در راستای عمودی (Ft/s)
z_{max}	ارتفاع در بیشترین مقدار سرعت افقی (Ft/s)
علایم یونانی	
Δt_i	زمان تأخیر وزش باد به هر یک از مقاطع (s)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
γ	زاویه مسیر (deg)
α	زاویه حمله (deg)
∂_e	تغییرات زاویه الویتور (deg)
بالانویس‌ها	
B	دستگاه بدنی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]

زیرنویس‌ها

e	الویتور
gw	توربولانس درایدن
i	شماره هر مقطع
max	مقدار حداکثر
total	کل
w	باد (مایکروبرست)

6- مراجع

[1] W. L. Guan, K. Yong, Review of aviation accidents caused by wind shear and identification methods, *Journal-Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. 23, No. 2, pp. 99-110, 2002.
[2] H. Aboshosha, G. Bitsuamlak, A. E. Damatty, Turbulence characterization of downbursts using LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 136, No. 31, pp. 44-61, 2015.
[3] Y. Zhang, H. Hu, P. P. Sarkar, Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 133, No. 31, pp. 181-90, 2014.
[4] A. Hassanpour, S. H. Pourtakdoust, Three-dimensional model predictive controller design for approach to landing with microburst encounter, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 10, pp. 0954410017707545, 2017.
[5] G. Zhenxing, L. Zhengqiang, Predictive controller for aircraft landing under wind shear, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 587, No. 589, pp. 2030-2035, 2014.
[6] Anon, *Manual on Low-level Wind Shear*, ICAO, Chapter 3, page 34.
[7] W. T. Cui, W. H. Liu, X. Y. Lei, Modeling and simulation of microburst wind shear in the flight simulator, *Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, IEEE Chinese, pp. 1095-1100, Aug 8, 2014.
[8] J. Wang, X. Song, Y. Wang, Modeling and simulation of china c series large aircraft with microburst, *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016, Article ID 2371594, 10 pages, 2016.
[9] B. Etkin, L. D. Reid, *Dynamics of Flight: Stability and Control*, Third Edittion, Vol. 3, pp. 18-57, New York: Wiley, 1996.
[10] G. Zhenxing, G. Hongbin, L. Hui, Real-time simulation of large aircraft flying through microburst wind field, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 22, No. 5, pp. 459-466, 2008.
[11] M. Sabzeh Parvar, H. Asari, *Analysis of microburst effect on an aircraft landing approach*, *Proceedings of the 6th International Conference on Iranian Aerospace Society*, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Feb, 2007.
[12] D. D. Vicroy, A simple, analytical, axisymmetric microburst model for downdraft estimation, *NASA Technical Memorandum 104053*, Hampton, Va: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1991.
[13] Military Specification, *Flying Qualities of Piloted Airplanes*, pp. 21-42, United States: Department of Defense, 1980.
[14] S. H. Pourtakdoust, M. Kiani, A. Hassanpour, Optimal trajectory planning for flight through microburst wind shears, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 15, No. 7, pp. 567-76, 2011.
[15] Q. Luo, H. Duan, Symbolic control approach to aircraft taking off in wind shear, *An International Journal*, Vol. 87, No. 1, pp. 45-51, 2014.
[16] A. Dogan, P. T. Kabamba, Modified guidance laws to escape microbursts with turbulence, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 43-67, 2002.
[17] M. S. Lewis, P. A. Robinson, D. A. Hinton, R. L. Bowles, The relationship of an integral wind shear hazard to aircraft performance limitations, *NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States*, RTOP 505-64-12-01,1994.
[18] *CAD 3-View Drawings for Airport Planning Purposes, 747-100/200*, Internet Website, Accessed on 7 october 2016; http://*www.boeing.com/commercial/airports*/3_view.page.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.7.6]