



Experimental Investigation of Dust Influences on the Airplanes Sound Pressure Emission

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ramezanizadeh M.^{*1} PhD,
Faramarzi S.¹ MSc

How to cite this article

Ramezanizadeh M, Faramarzi S. Experimental Investigation of Dust Influences on the Airplanes Sound Pressure Emission. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):815-823.

ABSTRACT

The sound emission of airplanes has some applications such as localization, classification, and detecting fault. Therefore, investigation of issues, which affects the airplanes sounds, is important. In recent years, pollution of dust in all cities of the Iran shows an increasing trend. In the literature, all variables affecting the sound emission such as temperature, pressure, and relative humidity have been investigated, but there are not any researches about the influence of dust on the atmospheric attenuation coefficient. The experimental tests have been carried out with 3 sensitive microphones, 950m away from the takeoff area of Imam Khomeini international airport for 6 different airplanes, including Airbus 320, 319, 321, Boeing 747, 777, and Embraer 190 at different atmospheric conditions. The air temperature was in the range of 20-40°C and the relative humidity was in the range of 2-34%. At first, the experimental setup was validated by available data, considering different temperatures and relative humidities. In this research, a new variable, β , has been introduced to detect the dust effect, which is defined as: the difference between the calculated sound pressure level at no dust and the measured sound pressure level while the dust density is $1\mu\text{gr}/\text{m}^3$. Airbus 320 has the minimum dust atmospheric attenuation coefficient value ($0.01202\text{db}\cdot\text{m}^3/\mu\text{gr}$) and its maximum is related to the Embraer 190 ($0.0154\text{db}\cdot\text{m}^3/\mu\text{gr}$). Finally, the obtained results show that increasing in dust concentration (PM2.5 and PM10) leads to increase in atmospheric attenuation coefficient between airplane and microphones area, and the measured sound pressure level decreases.

Keywords Aeroacoustic; Atmospheric Attenuation Coefficient; Dust; Sound Pressure Level; Aircraft Sound

¹Aerial Propulsion Department, Aerospace Engineering Faculty, Shahid Sattari Aeronautical University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mehrabad Jonubi, Tehran, Iran, Postal Code: 1387831361
Phone: +98 (21) 60322270
Fax: +98 (21) 66693442
ramezanizadeh@ssau.ac.ir

Article History

Received: April 04, 2018
Accepted: November 11, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports [2] Measurement of aircraft noise in a high background noise environment using a microphone array [3] Directional monitoring terminal for aircraft noise [4] Aircraft flight parameter estimation using acoustical Lloyd's mirror effect [5] Airplane noise: A pervasive disturbance in Pennsylvania Parks, USA [6] Passive acoustic method for aircraft localization [7] Attenuation of sound during propagation outdoors-part 2: General method of calculation [8] Acoustics - Determination Of Sound Power Levels And Sound Energy Levels Of Noise Sources Using Sound Pressure - Survey Method Using An Enveloping Measurement Surface Over A Reflecting Plane (A Nationally Adopted International Standard) [9] Estimating the model-specific uncertainty of aircraft noise calculations [10] Objective quantification of perceived differences between measured and synthesized aircraft sounds [11] Aircraft tracking by means of the Acoustical Doppler Effect [12] Absorption of sound in air versus humidity and temperature [13] Airport take-off noise assessment aimed at identify responsible aircraft classes [14] Unattended acoustic events classification at the vicinity of airports [15] Describing the uncertainties in experimental results

مطالعه تجربی اثرات غلظت ریزگردها بر شدت صوت منتشرشده از هواپیماها

مهدی رضانی‌زاده* PhD

گروه پیش‌برنده‌های هوایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

سامان فرامرزی MSc

گروه پیش‌برنده‌های هوایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

صدای منتشرشده از هواپیماها، کاربردهای فراوانی همچون تعیین موقعیت، تعیین کلاس و عیب‌یابی آنها دارد. بنابراین بررسی عوامل تاثیرگذار بر صدای انواع هواپیماها دارای اهمیت قابل توجهی است. در سال‌های اخیر، آلودگی ناشی از ریزگردها در تمامی شهرهای ایران رو به افزایش است. در تحقیقات گذشته، تاثیر تمامی متغیرهای دما، فشار و درصد رطوبت بر انتشار صوت مورد بررسی قرار گرفته است اما تاکنون تاثیر وجود ریزگردها بر میرایی محیط بررسی نشده است. اندازه‌گیری‌های صوتی در فرودگاه بین‌المللی امام خمینی^(۱) برای شش نوع هواپیما شامل هواپیماهای ایرباس ۳۲۰، ۳۱۹ و ۳۲۱، بوئینگ ۷۴۷ و ۷۷۷ و امبرائر ۱۹۰ در شرایط مختلف جوی توسط ۳ میکروفون حساس در فاصله ۹۵۰متری باند پرواز انجام شده است. دما در محدوده ۴۰°C-۲۰ و درصد رطوبت نسبی ۲ الی ۳۴٪ بوده است. در مرحله اول، نتایج حاصل از تغییرات پارامترهای دما و رطوبت نسبی با نتایج معتبر مقایسه و اعتبارسنجی شده است. در این تحقیق، متغیر جدید β برای بررسی تاثیر وجود ریزگردها معرفی شده است که عبارت از اختلاف تراز شدت صوت محاسبه‌شده تئوری بدون وجود ریزگردها و تراز شدت صوت اندازه‌گیری‌شده به‌ازای یک میکروگرم بر متر مکعب افزایش غلظت ریزگردها در محیط است. کمترین مقدار ضریب میرایی محیط ناشی از وجود ریزگردها مربوط به هواپیمای ایرباس ۳۲۰ ($0.012 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{g}$) و بیشترین آن برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰ ($0.104 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{g}$) است. نهایتاً اینکه افزایش غلظت ریزگردها (PM_{۱۰} و PM_{۲.۵}) موجب افزایش میرایی محیط شده و شدت صوت اندازه‌گیری‌شده کاهش پیدا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: هوا صوت، ضریب میرایی جو، ریزگردها، سطح شدت صوت، صدای هواپیما

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰

* نویسنده مسئول: ramezanizadeh@ssau.ac.ir

۱- مقدمه

اندازه‌گیری صدای منتشرشده از هواپیماها برای مقاصد مختلفی از قبیل تعیین موقعیت، تعیین کلاس، عیب‌یابی انواع هواپیماها و بررسی میزان آلودگی صوتی آنها انجام می‌شود. عدم بررسی عوامل تاثیرگذار بر چگونگی انتشار صدای هواپیماها موجب ایجاد خطا در تحلیل نتایج می‌شود. در نتیجه، مطالعه تمامی متغیرهای تاثیرگذار بر انتقال صدای تولیدشده توسط هواپیماها در محیط، از اهمیت زیادی برخوردار است. با شایع شدن پدیده وجود ریزگردها در سال‌های اخیر، بررسی تاثیر این پدیده بر چگونگی انتقال صدای هواپیماها ضروری است.

در حال حاضر، از سامانه‌های نمایش‌دهنده صدای هواپیما برای کنترل و تحلیل صدای منتشرشده از هواپیماها استفاده می‌شود. صدای هواپیماهای تجاری به‌وسیله ایستگاه‌های شبکه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. تاثیر صدای مزاحم پیش‌زمینه، یکی از اصلی‌ترین مشکلات سامانه‌های اندازه‌گیری صدا است. استاندارد ایزو ۲۰۹۰۶^[۱]، فرآیند تشخیص و متمایزکردن صدای هواپیما نسبت به دیگر صداها را مشخص کرده است. برای حذف صداهای مزاحم با شدت پایین، در مرحله اول، سطح صدای آستانه برای ضبط صدای هواپیما مشخص می‌شود. در مرحله دوم، محدوده زمانی صدای هواپیما تعیین و در حداقل بازه زمانی ممکن، صدای

هواپیما ضبط می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده، صدای ضبط‌شده هواپیما با اطلاعات استاندارد ارایه‌شده مقایسه می‌شود^[۲].

موقعیت قرارگیری میکروفون‌ها با توجه به نحوه حرکت هواپیماها متفاوت است. وقتی هواپیما با فاصله زیادی نسبت به میکروفون‌ها حرکت می‌کند، موج صدای منتشرشده به‌صورت صفحه‌ای خواهد بود و در نتیجه، میکروفون‌ها هم به‌صورت صفحه‌ای قرار داده می‌شوند^[۳]. استفاده از یک یا چند میکروفون برای بررسی شدت صوت ضبط‌شده از هواپیماها مورد بررسی قرار گرفته است. در اکثر مواردی که هواپیما در ارتفاع ثابت و سرعت ثابت حرکت می‌کند، استفاده از یک میکروفون نیز مناسب است^[۴].

شیخ و اوهل^[۵] آلودگی صوتی انواع هواپیماها را در ۱۸ نقطه از پارک‌های پنسیلوانیا بررسی کردند. آنها میکروفون‌ها را در سه موقعیت شامل نزدیک به یک فرودگاه، در نزدیکی چند فرودگاه کوچک و در نزدیکی بیش از یک فرودگاه قرار دادند. میکروفون‌ها در محیط‌هایی قرار داده شدند که تا شعاع ۱۵متری، هیچ درخت یا ساختمانی مانع انتقال صدا نباشد. دمای محیط هنگام انجام آزمایش‌ها بین ۱۰ تا ۲۱°C بود. لازم به ذکر است که در این محدوده دمایی، درجه حرارت هوا بر آلودگی صوتی تاثیرگذار نبوده است. بدین ترتیب، آنها میزان آلودگی صوتی در مناطق مختلف را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. بدین ترتیب، آنها پیشنهاد دادند که برای کاهش آلودگی صوتی در اطراف فرودگاه‌ها، ارتفاع حداقل برای پرواز هواپیماها مشخص شود و همچنین، مقررات محدودکننده تعداد پروازها در طول شب در هر فرودگاه تعیین شود.

مارتین‌رومن^[۶] روشی بر پایه صدای دریافت‌شده از هواپیما را برای تعیین موقعیت انواع هواپیماها ارایه کرد. تحقیق او به دو روش تجربی و عددی انجام شده است. او محیط مابین هواپیما و میکروفون‌ها را به‌صورت همگن در نظر گرفت و در نتیجه، از اثرات وجود باد صرف نظر نمود. با توجه به فاصله زیاد بین میکروفون‌ها و هواپیما، محیط همگن را در دو حالت شامل بدون اتلاف و همراه با اتلاف در نظر گرفت و مقدار جذب صدا توسط اتمسفر را نیز بررسی نمود. برای تایید مدل‌سازی عددی، ابتدا آزمایش‌ها را برای هواپیمای رادیوکنترلی کوچک انجام داد. در نهایت، با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، مدل ارایه‌شده خود را صحت‌سنجی کرد.

در استاندارد ایزو ۹۶۱۳^[۷]، روش محاسبه پارامتر جذب صدا در اتمسفر در شرایط مختلف جوی آورده شده است. لازم به ذکر است که تحقیقات مذکور به‌صورت عددی انجام شده‌اند. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، عواملی که بیشترین تاثیر را بر پارامتر جذب صدا در اتمسفر دارند شامل فرکانس منبع صدا، دمای هوا، فشار هوا و رطوبت نسبی محیط هستند. علاوه بر این، مقدار جذب صدای ناشی از شرایط مختلف جوی، به مقدار فرکانس منبع صدا وابستگی زیادی دارد.

در استاندارد موسسه ملی آمریکا^[۸] که در سال ۲۰۱۶ ارایه شده، اطلاعات کاملی راجع به نحوه ضبط صدا و ضوابط مربوط به آن برای منابع ایجاد صدا در محیط خارجی آورده شده است. دمای مناسب برای اندازه‌گیری صدا در فرودگاه‌ها ۱۰ تا ۵۰°C است^[۱]. کلیه محدودیت‌های مربوط به اندازه‌گیری صدای هواپیماها در استاندارد ایزو ۲۰۹۰۶^[۱] آورده شده است. سرعت باد، پارامتر تاثیرگذاری بر انتقال صدای هواپیما است که می‌تواند جهت انتقال صدا را منحرف کند^[۹]. بادی که به سمت منبع صدا می‌وزد، باعث افزایش میرایی و کاهش سطح صدا می‌شود. همچنین، اگر جهت وزش باد از طرف منبع صدا و به سمت میکروفون باشد، میرایی کاهش و

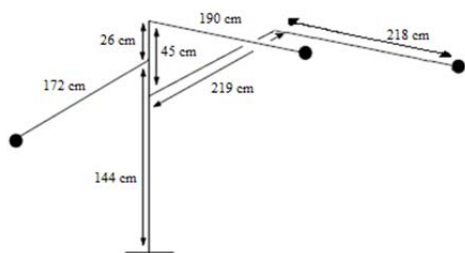
پشت بام ساختمانی نصب شده که ۳۱۰ سانتی‌متر از سطح زمین بالاتر است. به‌منظور کاهش خطای اندازه‌گیری، به‌جای یک میکروفون از سه میکروفون استفاده شده است. طول و عرض سطح پشت بام به‌ترتیب ۴۲۰ و ۳۹۵ سانتی‌متر است. در شکل ۳، موقعیت میکروفون‌ها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. با در نظر گرفتن استانداردهای نصب میکروفون‌های اندازه‌گیری صدای هواپیما، نحوه چیدمان میکروفون‌ها به‌صورت غیرخطی انتخاب شده است [4, 6]. انتخاب چیدمان غیرخطی و فواصل میکروفون‌ها براساس استاندارد ایزو ۲۰۹۰۶ [1] و تجربیات حاصل از پژوهش مارتین‌رومن [6] انجام شده است. مارتین‌رومن در پژوهش خود به این نتیجه رسید، در مواردی که موقعیت هواپیما مشخص باشد، استفاده از یک پایگاه و تعداد میکروفون‌های کمتر کافی بوده که بر این اساس، در تحقیق حاضر از یک پایگاه اندازه‌گیری دارای ۳ میکروفون استفاده شده است.



شکل ۱) موقعیت قرارگیری میکروفون‌ها و محدوده پرواز هواپیماها در فرودگاه بین‌المللی امام خمینی^(۹)



شکل ۲) محل قرارگیری میکروفون‌ها



شکل ۳) موقعیت نصب میکروفون‌ها نسبت به یکدیگر

لازم به ذکر است که با توجه به حرکت منبع صوتی (هواپیما)، اثر داپلر موجب تغییر نتایج و ایجاد خطا در نتایج می‌شود [6]. برای بررسی اثر داپلر و اثرات آن، صدای ضبط‌شده توسط میکروفون‌ها با توجه به موقعیت آنها مقایسه و بررسی می‌شود. اثر داپلر باعث ایجاد خطا در مقدار فرکانس اندازه‌گیری‌شده در محل نصب میکروفون‌ها می‌شود. برای کاهش اثر داپلر در نتایج، محدوده ضبط صدای هواپیما در میانه مسیر طی‌شده توسط منبع صوتی متحرک روی سطح باند انتخاب شده است [14].

قدرت صدای ضبط‌شده افزایش می‌یابد [10, 11].

در فواصل بیش از ۳۵۰ متر، در نظر گرفتن تأثیر شرایط جوی بر انتقال صدا ضروری است. لذا در این تحقیق، برای این که بتوان تأثیر ریزگردها را که از عوامل جوی هستند، بر صدای منتشرشده از هواپیماها بررسی نمود، با توجه به موقعیت قرارگیری باند پرواز فرودگاه امام خمینی^(۹) و امکانات موجود، فاصله ۹۵۰ متری از باند برای انجام اندازه‌گیری‌ها انتخاب شده است. چگونگی انتقال صدا در هوا به دما، رطوبت نسبی و جهت باد وابسته است. به‌عنوان مثال، میزان میرایی صدا در هوای گرم و خشک، نسبت به هوای سرد و مرطوب بیشتر بوده و میزان جذب صدا در فرکانس‌های بالاتر بیشتر است. در شرایط واقعی، متغیرهای دما، رطوبت، سرعت و جهت وزش باد در نقاط مختلف محیط مقادیر ثابتی ندارند [12, 13]. پدیده برگشت صدا، نسبت به جذب آن در هوا تأثیرگذارتر است. با توجه به نزدیکی میکروفون به سطح زمین، نوع سطح زمین در صدای ضبط‌شده تأثیر می‌گذارد. اگر سطح زمین از نوع نرم باشد، برگشت صدا کاهش می‌یابد، ولی در جاهایی مانند سطح آب، برگشت صدا افزایش می‌یابد [11]. ضریب میرایی هوا، به دما و درصد رطوبت آن بستگی دارد [9]. نوع، تعداد و موقعیت قرارگیری میکروفون‌های به‌کاررفته در اندازه‌گیری صدای هواپیماها، با توجه به کاربرد مورد انتظار متفاوت است [6].

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده توسط نویسندگان مقاله حاضر، در کلیه مطالعات صورت‌گرفته توسط محققان در گذشته، تمامی موارد تأثیرگذار بر انتقال صدای هواپیما به‌جز وجود ریزگردها در محیط بررسی شده است. به عبارت دیگر، اثر متغیرهای جوی همچون دما، درصد رطوبت نسبی، فشار هوا و سرعت و جهت وزش باد قبلاً به‌طور کامل مطالعه شده، اما تاکنون، میزان تأثیرگذاری غلظت ریزگردها بر انتقال صدای هواپیماها بررسی نشده است. لذا در این تحقیق، تأثیر وجود ریزگردها بر میرایی محیط و انتقال صوت به‌صورت تجربی مطالعه شده است. لازم به ذکر است نتایج مربوط به آزمایش‌هایی که آلودگی هوا در آن بسیار کم بوده، با نتایج منابع معتبر مقایسه شده و پس از تأیید صحت روش اندازه‌گیری، تأثیر وجود ریزگردها در شرایط مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش انجام آزمایش

در بررسی اثر ریزگردها بر انتقال صدای هواپیما، به اطلاعات غلظت آلودگی هوا، سرعت و جهت باد، دمای هوا و رطوبت محیط نیاز است. برای بررسی متغیرهای مذکور، باید محل دقیق منبع صوتی مشخص شود. لازم به ذکر است که با استفاده از چند میکروفون، تحلیل نتایج و دانستن موقعیت دقیق هر میکروفون، می‌توان مکان هواپیما را مشخص کرد که البته دارای مقداری خطا نیز خواهد بود. اما در این تحقیق به‌منظور کاهش درصد خطا، موقعیت دقیق هواپیما در هر آزمایش بدون استفاده از تحلیل صوتی مشخص شده است. در شکل ۱، موقعیت دقیق قرارگیری میکروفون‌ها و محل پرواز هواپیماها در فرودگاه بین‌المللی امام خمینی^(۹) نشان داده شده است. با توجه به توضیحات مطرح‌شده در قسمت قبل، فاصله قرارگیری میکروفون‌ها از محل جاداشدن هواپیماها از سطح باند پرواز، ۹۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

۲-۱- وسایل اندازه‌گیری و موقعیت میکروفون‌ها

در این تحقیق، از سه میکروفون نوع خازنی استفاده شده است. صدای ضبط‌شده توسط میکروفون‌های مذکور به دستگاه مبدل صدا منتقل و از طریق آن به سامانه ضبط نتایج ارسال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، سامانه ضبط صدا، روی

جوی دچار تغییر می‌شود. در رابطه زیر، نحوه محاسبه A_{atm} ارایه شده است [7]:

$$A_{atm} = ad/1000 \quad (۳)$$

که در آن، d فاصله تا منبع صوتی و α ضریب میرایی در شرایط مختلف جوی بوده که مقادیر آنها در شرایط دمایی و رطوبت نسبی‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) ضریب میرایی هوا در دما و درصد رطوبت‌های مختلف [7]

دما (°C)	درصد رطوبت نسبی	ضریب میرایی α			
		فرکانس			
		۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰
۱۰	۷۰	۰/۴	۱/۰	۹/۷	۳/۷
۲۰	۲۰	۰/۳	۱/۱	۹/۰	۵/۰
۳۰	۷۰	۰/۳	۱/۰	۱۲/۷	۷/۴
۱۵	۲۰	۰/۶	۱/۲	۲۸/۲	۸/۲
۱۵	۵۰	۰/۵	۱/۲	۱۰/۸	۴/۲
۱۵	۸۰	۰/۳	۱/۱	۸/۳	۴/۱

۲-۳- غلظت ریزگردها در زمان‌های اندازه‌گیری صدای هواپیماها

ذرات معلق pm_{10} به آمیزه‌ای پیچیده از ذرات بسیار کوچک و قطره‌های مایع گفته می‌شود که باعث آلودگی هوا می‌شوند. ذرات معلق که به آنها آلاینده‌های ذره‌ای هم گفته می‌شود، از اجزایی از جمله اسیدها (مانند نیترات‌ها و سولفات‌ها)، مواد شیمیایی آلی، فلزات یا ذرات غبار یا خاک تشکیل می‌شوند. ذرات معلق آلاینده را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم کرد:

الف) ذرات درشت قابل استنشاق (PM_{10}) مانند ذرات معلق که قطرشان بزرگ‌تر از $2/5$ میکرون و کوچک‌تر از 10 میکرون است.

ب) ذرات ریز ($PM_{2/5}$) که قطرشان کمتر از $2/5$ میکرون است. این ذرات ناشی از طوفان‌های ریزگردها یا در بعضی موارد به دلیل آتش‌سوزی‌های عظیم به وجود می‌آیند.

در ادامه، تأثیر ریزگردها بر تراز شدت صوت با استفاده از بررسی مقدار غلظت آنها در هر متر مکعب هوا، مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مقدار پارامترهای $PM_{2/5}$ و PM_{10} بررسی شده در این پژوهش از ایستگاه هواشناسی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی^(۳) گرفته شده است که دقیقاً در زمان‌های اندازه‌گیری صدای هواپیما ثبت شده‌اند. به عبارت دیگر، دو متغیر ذرات با قطر کمتر از $2/5$ میکرون ($PM_{2/5}$) و ذرات با قطر بیشتر از $2/5$ میکرون و کمتر از 10 میکرون (PM_{10}) بررسی شده است که در زمان انجام آزمایش‌ها، مقدار دقیق آنها با استفاده از اطلاعات ارایه شده توسط ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی^(۳) ثبت شده‌اند.

۲-۴- شرط عدم قطعیت

عدم قطعیت نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده در این پژوهش، با استفاده از روش ارایه شده توسط موقات^[15] انجام شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش از سه میکروفون نوع خازنی استفاده شده است که دارای خطای بایاس ± 2 db هستند. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در طول زمان‌های ثبت صدای پرواز هواپیماها و بررسی انحراف معیار داده‌های حاصل، عدم قطعیت تکرارپذیری شدت صوت ضبط شده $\pm 0/1$ db به دست می‌آید. ضمناً، عدم قطعیت کلی شدت صوت اندازه‌گیری شده $\pm 2/0$ db است. دمای اندازه‌گیری شده دارای خطای بایاس $\pm 0/1$ °C است و با توجه به تعداد اندازه‌گیری‌های دما در بازه زمانی ۳۰ ثانیه‌ای ضبط صدای هواپیماها، مقدار عدم قطعیت تکرارپذیری دما $\pm 0/127$ °C به دست می‌آید. همچنین، مقدار کلی عدم قطعیت

مکان نصب میکروفون‌ها به نحوی انتخاب می‌شود که سرعت وزش باد در آن محل کمتر از 36 کیلومتر بر ساعت و میانگین شدت صوت ناشی از وزش باد در مدت یک دقیقه، کمتر از 65 دسی‌بل باشد. لذا در این تحقیق، در مواردی که سرعت و شدت صدای ناشی از وزش باد بیش از موارد ذکر بوده، از بررسی نتایج به دست آمده صرف نظر شده است. در مواردی که صدای هواپیما غایب است، صداهای مزاحم، ضبط و حداکثر شدت صوت آنها مشخص می‌شود. صدای هواپیماها نیز در مواردی که صداهای مزاحم حداقل هستند، اندازه‌گیری و محدوده شدت صوت هواپیماها در محل نصب میکروفون‌ها مشخص شده است. مقدار حداکثر صدای مزاحم مجاز، نهایتاً تا 15 دسی‌بل کمتر از محدوده صدای هواپیما است [1].

در شرایطی که کمترین صدای مزاحم وجود دارد، صدای هواپیما ضبط می‌شود و نمودار شدت صوت بر حسب زمان به دست می‌آید. محدوده زمانی که شدت صوت در محدوده 10 دسی‌بل کمتر از مقدار حداکثر این نمودار بوده، مدت زمان مناسب و مشخصه بلندشدن هواپیما از روی باند است. صداهای مزاحم در نمودارهای شدت صوت بر حسب زمان قابل شناسایی بوده که دلیل آن، کوچک‌تر بودن محدوده زمانی صداهای مزاحم همچون صدای ماشین‌های عبوری نسبت به محدوده استاندارد ضبط صدای هواپیماها است. استفاده از روش فوق در شرایطی امکان‌پذیر است که میکروفون در نقطه روبه‌روی لحظه بلندشدن هواپیما نصب شده باشد [14]. در این تحقیق، محل نصب میکروفون‌ها در نقطه مقابل محل بلندشدن هواپیما از باند فرودگاه انتخاب شده است. در نتیجه برای تفکیک صدای هواپیما، از روش‌های متناسب با شرایط اندازه‌گیری در منابع [1, 14] استفاده شده است.

کمترین مقدار صدای هواپیماها 83 دسی‌بل بوده و حداکثر صدای مزاحم 67 دسی‌بل بوده که دارای اختلاف بیش از 15 دسی‌بل از صدای هواپیما است. در نتیجه، در محدوده مجاز قرار دارد. در شرایطی که صدای هواپیما 83 و دو صدای مزاحم 67 و 65 دسی‌بل وجود داشته باشد، صدای ضبط شده توسط میکروفون‌ها که برآیند این مقادیر است، برابر با $83/116$ دسی‌بل خواهد بود. با توجه به اختلاف حداکثری $116/10$ دسی‌بل بین صدای واقعی و صدای ضبط شده، مقدار حداکثر خطای اندازه‌گیری توسط میکروفون‌ها، مشخص و دارای مقدار قابل قبول خواهد بود.

۲-۲- شرایط مختلف جوی

در معادله ۱، کاهش تراز شدت صوت به دلایل مختلف شامل فاصله از منبع صوتی، اختلاف دما و درصد رطوبت نسبی ارایه شده است [7]:

$$D = D_{source} - A \quad (1)$$

که در آن، D تراز شدت صوت در محل گیرنده صدا، D_{source} تراز شدت صوت منبع صوتی و A کاهش تراز شدت صوت به دلایل مختلف است. در رابطه فوق، A به صورت زیر است:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} \quad (2)$$

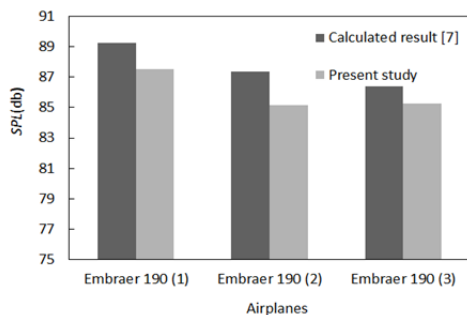
که در آن، افت‌های شدت صوت ناشی از A_{div} فاصله از منبع صوتی، A_{atm} وجود اتمسفر و شرایط جوی، A_{gr} اثر برگشت صدای ناشی از وجود سطح زمین مابین منبع صوتی و دریافت‌کننده صدا و A_{bar} اثر موانع صوتی است. با توجه به یکسان بودن محل ضبط صدا در تمامی حالات و مقایسه نتایج در شرایط مختلف، لذا تنها بررسی اثر کاهش تراز شدت صوت به دلیل تغییر شرایط جوی در نظر گرفته شده و از سایر عوامل، به دلیل یکسان بودن برای آزمایش‌های مختلف صرف نظر شده است. لازم به ذکر است که با توجه به انجام اندازه‌گیری‌ها در روزها و ساعات مختلف، شرایط

مطالعه تجربی اثرات غلظت ریزگردها بر شدت صوت منتشر شده از هواپیماها ۸۹
 جدول ۲) شرایط جوی آزمایش‌های مورد استفاده در اعتبارسنجی نتایج
 هواپیماهای ایرباس ۳۲۱ و بوئینگ ۷۷۷

شرایط	ایرباس ۳۲۱	بوئینگ ۷۷۷	بوئینگ ۷۷۷	بوئینگ ۷۷۷
روزهای مورد بررسی	۳ مهر ۱۳۹۶	۲ مهر ۱۳۹۶	۴ شهریور ۱۳۹۶	۲ مهر ۱۳۹۶
درصد رطوبت نسبی	۳۰/۴۸	۲۲/۳۹	۱۱	۲۳/۵
دما (°C)	۲۱/۰۱	۲۶/۰۸	۳۱/۵	۲۷/۱۱
PM _{۲/۵}	۹/۳	۳/۳	۳/۱	۳/۱
PM _{۱۰}	۹۱/۹۴	۱۴۵	۱۲۳	۱۲۳

در نمودار ۲، تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده در این تحقیق با داده‌های معتبر موجود برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰ و در جدول ۳ نیز شرایط اندازه‌گیری در شرایط مختلف جوی مورد استفاده در نمودار ۲ آورده شده است.

تطابق خوب نتایج تجربی به‌دست‌آمده از این تحقیق با داده‌های معتبر^[۷]، معتبر بودن و صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق را تایید می‌کند.



نمودار ۲) اعتبارسنجی تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰

جدول ۳) شرایط جوی آزمایش‌های مورد استفاده در اعتبارسنجی نتایج هواپیمای امبرائر ۱۹۰

شرایط	امبرائر ۱۹۰ آزمایش شماره ۱	امبرائر ۱۹۰ آزمایش شماره ۲	امبرائر ۱۹۰ آزمایش شماره ۳
روزهای مورد بررسی	۲۸ مرداد ۱۳۹۶	۲۸ مرداد ۱۳۹۶	۲ مهر ۱۳۹۶
درصد رطوبت نسبی	۵/۷۱	۵/۶۷	۲۳/۵
دما (°C)	۳۸/۶۷	۴۰/۰۱	۲۸/۶۶
PM _{۲/۵}	۳/۳	۳/۶	۳/۶
PM _{۱۰}	۱۳۷	۱۴۵	۹۳

۲-۳ نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت، نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایشات در شرایط مختلف جوی ارایه شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر میزان اثرگذاری ریزگردها بر انتقال صوت، اندازه‌گیری‌های تجربی در شرایط محیطی مختلف انجام شده است. در اندازه‌گیری‌ها، سه عامل درصد رطوبت نسبی، دما و مجموع غلظت ریزگردها موجود در هوا (عامل pm_t که برابر با مجموع $PM_{۱۰}$ و $PM_{۲/۵}$ است) برای هواپیماهای مختلف اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شده است. دلیل تعریف عامل pm_t ، تاثیرگذاری مشابه $PM_{۱۰}$ و $PM_{۲/۵}$ بر انتقال صوت است. میزان تاثیرگذاری این دو عامل، بستگی به مقدار غلظت آنها بر حسب میلی‌گرم بر متر مکعب دارد. در نتیجه برای بررسی تاثیر آنها بر مقدار شدت صوت، مجموع آنها در نظر گرفته شده است

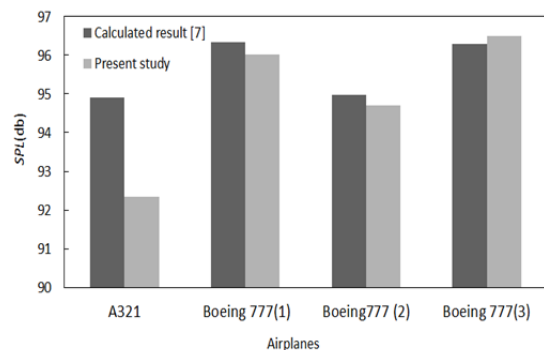
در اندازه‌گیری دما $\pm 0.1274^{\circ}C$ است. با توجه به محاسبات انجام شده، خطای بایاس درصد رطوبت نسبی ± 0.1 درصد به دست می‌آید. ضمناً، درصد رطوبت در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت شده که با توجه به تغییرات مقدار درصد رطوبت در این بازه‌ها، عدم قطعیت تکرارپذیری آن ۱/۰۷٪ است. علاوه بر این، عدم قطعیت کلی درصد رطوبت نسبی نیز مقدار ۱/۰۷٪ به دست می‌آید.

۳-نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌ها

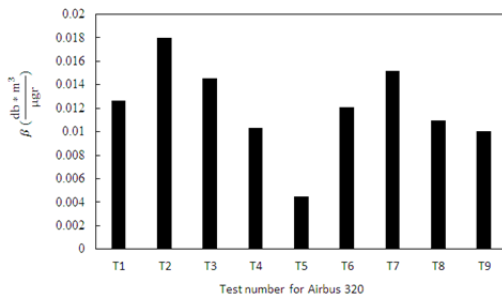
در این بخش، به‌منظور اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌ها، تراز شدت صوت هواپیماهای بوئینگ ۷۷۷، ایرباس ۳۲۱ و امبرائر ۱۹۰ توسط سامانه طراحی شده، ضبط و با داده‌های معتبر مقایسه شده است. در نمودار ۱، تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده در این تحقیق با داده‌های معتبر موجود^[۷] برای هواپیماهای بوئینگ ۷۷۷ و ایرباس ۳۲۱ ارایه شده است. در جدول ۲، شرایط مختلف جوی اندازه‌گیری‌های مرتبط با نمودار ۱ آورده شده است.

یک مورد از آزمایش‌ها برای هر هواپیما به‌عنوان شاخص در نظر گرفته شده و موارد دیگر که دارای مقادیر دما و رطوبت نسبی متفاوتی هستند، با استفاده از نتایج معتبر یک منبع^[۷] و نسبت به مورد شاخص محاسبه شده است. به عبارت دیگر، برای اعتبارسنجی، اختلاف بین نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روابط و نمودارها، محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. با توجه به این نکته که در کلیه آزمایش‌های قبلی، تاثیر وجود ریزگردها بررسی نشده، لذا در آنها تراز شدت صوت با فرض عدم تاثیرگذاری آلودگی هوا بر انتقال صوت محاسبه شده است. در نمودارهای ۱ و ۲ مواردی که دارای تغییرات آلودگی اندکی بودند، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند تا تاثیر وجود ریزگردها در نتایج به حداقل برسد و امکان اعتبارسنجی نتایج وجود داشته باشد. به نظر می‌رسد که علت اختلاف در نتایج ناشی از خطاهای اندازه‌گیری باشد. این خطاها شامل وجود خطا در محاسبه درصد رطوبت، درصد ذرات $PM_{۲/۵}$ و درصد ذرات $PM_{۱۰}$ است. به عبارت دیگر، مقدار درصد رطوبت مورد استفاده در تحلیل‌ها، مقدار میانگینی بوده که در بازه‌های زمانی حداقل نیم‌ساعته محاسبه شده است. در حالی که هر آزمایش ضبط صدای هواپیما در بازه‌های زمانی حداکثر ۳۰ ثانیه‌ای انجام شده و در آن بازه زمانی طولانی میانگین رطوبت، این امکان بسیار زیاد است که متغیرهای جوی دقیقاً مقدار مورد استفاده نباشند، لذا امکان ایجاد خطا وجود دارد. لازم به ذکر است که ثبت متغیر دما دقیق‌تر بوده و در لحظه انجام آزمایش‌ها، مقدار ثبت و مورد استفاده قرار گرفته است.



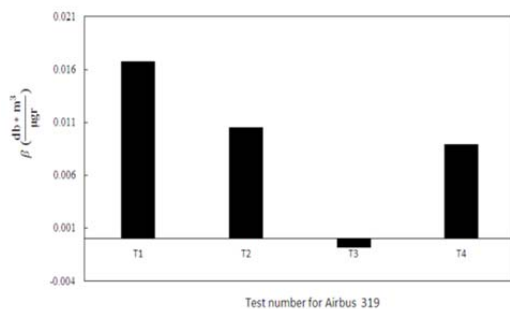
نمودار ۱) اعتبارسنجی تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده برای هواپیمای ایرباس ۳۲۱ و بوئینگ ۷۷۷

رطوبت باشد. اما تغییرات β مربوط به وجود خطاهای مختلف از جمله خطای اندازه‌گیری و دخالت متغیرهای دیگر در تغییر تراز شدت صوت است.



نمودار ۳) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای هواپیمای ایرباس ۳۲۰

در نمودار ۴، نتایج مربوط به اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته برای هواپیمای ایرباس ۳۱۹ آورده شده است. در این نمودار، چهار اندازه‌گیری مختلف مربوط به صدای هواپیمای ایرباس ۳۱۹ آورده شده است. در اندازه‌گیری شماره ۳، β مقدار منفی $\text{db} * \text{m}^3$ را دارد. علامت منفی، نشان از تاثیر مستقیم ریزگردها بر شدت صوت اندازه‌گیری شده دارد، اما مقدار آن، بسیار کم و نزدیک به صفر است.



نمودار ۴) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای ایرباس ۳۱۹

در نمودار ۴، مشخص است که در سه اندازه‌گیری شماره ۱، ۲ و ۴، ضریب میرایی اندازه‌گیری شده دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر هستند، اما در اندازه‌گیری شماره ۳، مقداری منفی و نزدیک به صفر برای آن به دست آمده است. لذا β به دست آمده برای اندازه‌گیری شماره ۳ نسبت به دیگر نتایج اختلاف دارد. بدون در نظر گرفتن نتایج آزمایش شماره ۳، مقدار β_{ave} برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ و با در نظر گرفتن آن، مقدار β_{ave} برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ است. با توجه به نتایجی که برای هواپیماهای دیگر در ادامه بحث به دست می‌آید، مشخص خواهد شد که مقدار β_{ave} برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ برای β_{ave} است. به نتایج حاصل از اندازه‌گیری برای سایر هواپیماها نزدیک‌تر بوده و صرف نظر کردن از نتیجه شماره ۳ هواپیمای ایرباس ۳۱۹ صحیح است. لذا این نتیجه، ناشی از خطای آزمایش است و از آن صرف نظر می‌شود.

در نمودار ۵، پنج مورد اندازه‌گیری برای هواپیمای ایرباس ۳۲۱ آورده شده است. در تمامی موارد، مقدار β مثبت به دست آمده و β_{ave} برای هواپیمای ایرباس ۳۲۱، $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ محاسبه شده است. با توجه به مقادیر β ، مشخص است که افزایش pm_{t_1} برای هواپیمای ایرباس ۳۲۱ موجب افزایش ضریب میرایی محیط

(pm_{t_1}) .

با توجه به این که متغیرهای دما و رطوبت بر شدت صوت ضبط شده تاثیرگذار هستند، لذا تغییرات آنها با تعریف ضریب میرایی محیط در اثر ریزگردها (پارامتر β) در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، تاثیر دما و درصد رطوبت در مواردی که غلظت ریزگردها تقریباً ثابت بوده، در قسمت اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌ها بررسی و مشخص شده است. تاثیری که دما و درصد رطوبت بر مقدار شدت صوت ضبط شده دارند، مطابق با جدول‌ها و فرمول‌های ارائه شده در مرجع [7] است.

لازم به ذکر است، فراهم کردن شرایطی که در آن دما و رطوبت ثابت بماند، ولی غلظت ریزگردها تغییر کند و در همان زمان‌ها پرواز هواپیماها نیز انجام شود، بسیار مشکل است. لذا برای برطرف شدن این مشکل و ایجاد امکان بررسی اثر ریزگردها در این پژوهش، در زمان ثبت صدای هواپیماها، به‌طور همزمان، مقادیر دما، درصد رطوبت و غلظت ریزگردها یادداشت شده است. سپس با تعریف پارامتر زیر، اثر دما و رطوبت با توجه به اطلاعات مرجع [7] لحاظ شده و اثر ریزگردها استخراج شده است. به عبارت دیگر، برای راحتی مقایسه در شرایط مختلف دمایی و درصد رطوبت، ضریب میرایی محیط در اثر ریزگردها به شکل زیر تعریف شده است:

$$\beta = \frac{SPL_{cl} - SPL_{ex}}{pm_t} \quad (3)$$

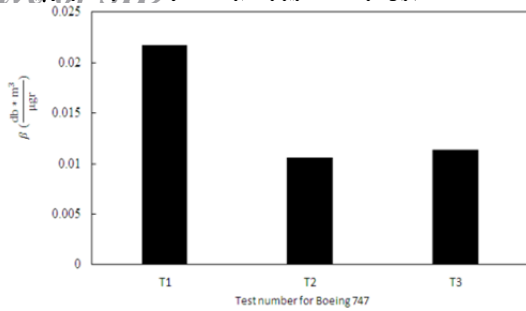
که در آن، SPL_{cl} مقدار شدت صوت محاسبه شده تئوری در دما و درصد رطوبت ثبت شده است که با استفاده از اطلاعات ذکر شده در مرجع [7] محاسبه می‌شود و ریزگردها در آن موثر نبوده‌اند. همچنین، SPL_{ex} شدت صوتی بوده که در دما و درصد رطوبت ثبت شده و با وجود ریزگردها در این پژوهش اندازه‌گیری شده است. با تقسیم تفاضل این دو عبارت بر مجموع غلظت ریزگردها، تاثیر تغییر در غلظت ریزگردها بر میرایی محیط مشخص می‌شود.

واحد پارامتر β برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ است. با استفاده از پارامتر تعریف شده β ، امکان تشخیص و مقایسه تاثیرگذاری ریزگردها بر میرایی محیط وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر، β اختلاف تراز شدت صوت ناشی از دو حالت عدم وجود و وجود ریزگردها در هوا است.

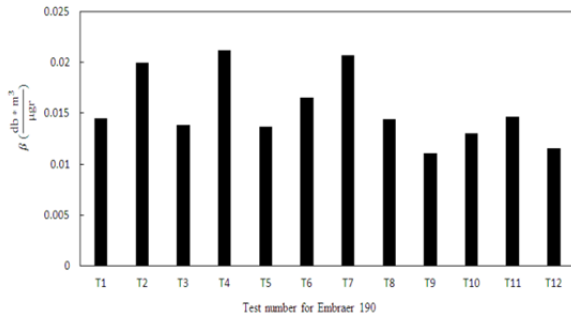
۳-۳- نتایج اندازه‌گیری‌های صوتی برای هواپیماهای ایرباس

با توجه به تعریف ارائه شده در رابطه ۳، هر چه مقدار β بیشتر باشد، تاثیرگذاری ریزگردها بر شدت صوت بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، مثبت بودن متغیر β نشان‌دهنده این بوده که افزایش غلظت ریزگردها در هوا موجب افزایش میرایی هوا و کاهش شدت صوت اندازه‌گیری شده است. از طرف دیگر، منفی بودن β نشان‌دهنده این بوده که افزایش غلظت ریزگردها موجب کاهش ضریب میرایی محیط بین منبع صوتی هواپیما و میکروفون‌ها شده است. در نمودار ۳، مقادیر مختلف β برای ۹ اندازه‌گیری صوتی مختلف برای هواپیمای ایرباس ۳۲۰ آورده شده است. کمترین مقدار β برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ و بیشترین مقدار β نیز برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ است. مقدار میانگین β برای اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هواپیمای ایرباس ۳۲۰ که در شرایط مختلف در نمودار ۳ نشان داده شده است، برابر با $\text{db} * \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ به دست می‌آید.

β_{ave} نشان‌دهنده مقدار کاهش تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده بر حسب دسی‌بل به‌ازای افزایش هر میکروگرم بر متر مکعب ریزگرد است. با توجه به تغییرات β در دما و درصد رطوبت‌های مختلف، شاید به نظر آید که میزان تاثیرگذاری β وابسته به دما و درصد



نمودار ۷) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای هواپیمای بوئینگ ۷۴۷

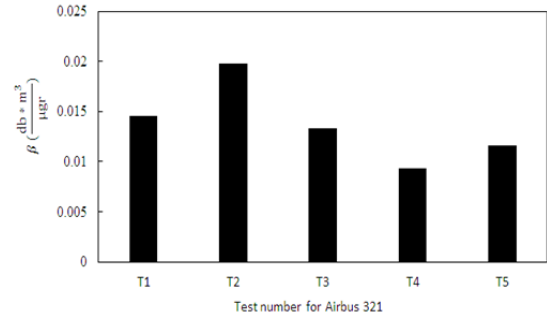


نمودار ۸) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰

با مقایسه داده‌های مربوط به نمودارهای ۸-۵، این نتیجه به دست می‌آید که در تمامی هواپیماها، مقادیر β تغییراتی دارند، اما گستره این تغییرات برای همه هواپیماها نزدیک به یکدیگر و در محدوده حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ است. البته، در مواردی نیز β اندازه‌گیری شده نسبت به سایر اندازه‌گیری‌ها اختلاف قابل توجهی داشت که با بررسی‌های انجام شده، این اختلاف ناشی از خطاهای اندازه‌گیری بوده است که بعضاً در آزمایشات تجربی رخ می‌دهد. خطای اعمال مقدار درصد رطوبت یا خطای ناشی از تغییرات غیرمعمول در دور موتور یک نوع هواپیما و تأثیر آن روی شدت صوت ضبط شده است. همان گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، این خطا با توجه به تعداد تکرار آزمایشات برای هواپیماهای مختلف، در نتیجه‌گیری کلی اثری نداشته و قابل صرف نظر است. از طرف دیگر، نحوه تغییرات β برای تمامی هواپیماها مشابه است و می‌توان از این نکته برای مقایسه β_{ave} مربوط به همه هواپیماهای مورد آزمایش استفاده کرد. نتایج ارایه شده در نمودارهای ۸-۵ و مشخصات محیطی در روزهای اندازه‌گیری، نشانگر عدم وابستگی متغیر β به دما و درصد رطوبت است. در نتیجه، تأثیر ریزگردها بر انتقال صدای هواپیما و میرایی محیط از درصد رطوبت و دمای محیط مستقل بوده و ارتباطی بین آنها وجود ندارد. همچنین، با توجه به تفاوت گستره فرکانسی صداهای ضبط شده از هواپیماهای مختلف و اختلاف در مقدار تراز شدت صوت هواپیماهای مذکور می‌توان نتیجه گرفت که در آزمایشات انجام شده، میزان تأثیرگذاری ریزگردها بر تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده، مستقل از نوع هواپیما است.

با مقایسه β های به دست آمده برای هر هواپیما، این نتیجه به دست می‌آید که اختلافاتی بین اندازه‌گیری‌های مختلف وجود دارد که همگی موارد، مربوط به اندازه‌گیری‌هایی بوده است که دارای کمترین مقادیر pm_{10} هستند. آزمایش پنجم از نمودار ۳ برای هواپیمای ایرباس ۳۲۰ و آزمایش سوم از نمودار ۴ برای هواپیمای ایرباس ۳۱۹ همگی دارای مقادیر β ای هستند که نسبت به β های

می‌شود. با توجه به نتایج ارایه شده در نمودار ۵، کمترین مقدار β برابر با $0.0093 db \cdot m^3 / mgr$ و بیشترین مقدار آن برابر با $0.0197 db \cdot m^3 / mgr$ است. با مقایسه نتایج ارایه شده در نمودار ۳ با نتایج ارایه شده در نمودار ۵، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر محاسبه شده β_{ave} برای دو هواپیمای ایرباس ۳۲۰ و ۳۲۱ حدود $0.0168 db \cdot m^3 / mgr$ با یکدیگر اختلاف دارند.



نمودار ۵) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای هواپیمای ایرباس ۳۲۱

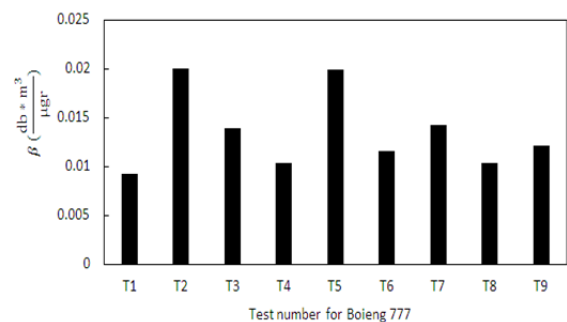
۳-۴- نتایج اندازه‌گیری‌ها برای هواپیماهای بوئینگ

در نمودار ۶، β مربوط به ۹ مورد اندازه‌گیری انجام شده برای هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ آورده شده است. کمترین مقدار β مربوط به اندازه‌گیری شماره ۱ است. کمترین مقدار β بیانگر تأثیرگذاری کمتر ریزگردها بر شدت صوت است. بیشترین مقدار β مربوط به آزمایش شماره ۵ با مقدار $0.01998 db \cdot m^3 / mgr$ است. با میانگین‌گیری نتایج، β_{ave} برای هواپیمای بوئینگ ۷۷۷ برابر با $0.01351 db \cdot m^3 / mgr$ به دست می‌آید.

در نمودار ۷، نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ آورده شده است. هر سه مورد اندازه‌گیری ثبت شده نشان می‌دهند که افزایش ریزگردها بر تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده اثر معکوس دارد. با میانگین‌گیری از مقادیر β مربوط به این مدل از هواپیما، مقدار β_{ave} برابر با $0.014568 db \cdot m^3 / mgr$ به دست می‌آید.

۳-۵- نتایج اندازه‌گیری‌ها برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰

در نمودار ۸، نتایج مربوط به ۱۲ اندازه‌گیری انجام شده برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰ نشان داده شده است. این نتایج، نشان از تأثیر وجود ریزگردها بر کاهش انتقال صوت و میرایی محیط مابین منبع صوتی و گیرنده دارند. در این اندازه‌گیری‌ها نیز همانند اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هواپیماهای قبلی در این تحقیق، مقادیر به دست آمده برای β مثبت بوده و نشانگر تأثیر معکوس افزایش ریزگردها بر شدت صوت اندازه‌گیری شده است.



نمودار ۶) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده محیط به دلیل وجود ریزگردها برای بوئینگ ۷۷۷

رطوبت بر میرایی محیط ندارد. افزایش درصد رطوبت در محدوده دمایی ۲۰ تا ۴۰°C، موجب افزایش شدت صوت اندازه‌گیری شده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، میزان تاثیرگذاری رطوبت نسبی بر میرایی محیط، به دمای محیط وابسته بوده و دلیل تغییر در میزان تاثیرگذاری درصد رطوبت، تغییر دما است.

ضریب میرایی متوسط به‌دست‌آمده برای هواپیماهای مختلف نسبت به یکدیگر اختلاف کمی داشته و کمترین مقدار، مربوط به هواپیمای ایرباس ۳۲۰ ($0.012 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$) و بیشترین تاثیرگذاری ریزگردها برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰ ($0.0154 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$) است. مقدار میانگین این ضریب برای هواپیماهای مختلف برابر با $0.0136 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ به دست آمده که برای محاسبه شدت افت صدا نسبت به مقدار ریزگردهای موجود در هوا (بر حسب میکروگرم در یک متر مکعب هوا) قابل استفاده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از مدیریت و مسئولان فرودگاه بین‌المللی امام خمینی^(س) تشکر نمایند.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: مهدی رضانی‌زاده (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سامان فرامرزی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: کلیه هزینه‌های انجام آزمایشات به‌صورت شخصی توسط پژوهشگران انجام شده است.

۵- پی‌نوشت

d	فاصله از منبع صوتی (m)
D	تراز شدت صوت در محل اندازه‌گیری صدا (dB)
$PM_{2.5}$	غلظت ریزگرد با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر ($\mu\text{gr m}^{-3}$)
PM_{10}	غلظت ریزگرد با قطر بیش از ۲/۵ و کمتر از ۱۰ میکرومتر ($\mu\text{gr m}^{-3}$)
SPL	تراز شدت صوت (dB)
T	اندازه‌گیری
علایم یونانی	
α	ضریب میرایی محیط (dB m^{-1})
β	ضریب میرایی محیط به‌ازای افزایش یک میکروگرم ریزگرد در یک متر مکعب هوا ($\text{dB m}^3 \mu\text{gr}^{-3}$)
زیرنویس‌ها	
ave	میانگین
atm	میرایی محیط به‌دلیل شرایط جوی چون دما و درصد رطوبت
bar	کاهش شدت صوت به‌دلیل وجود موانع صوتی
cl	نتایج محاسبه‌شده با استفاده از منابع معتبر
div	وجود فاصله از منبع صوتی
ex	نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی
gr	تغییر شدت صوت اندازه‌گیری شده به‌دلیل پدیده برگشت صدا
source	منبع صوتی
t	تمامی موارد اندازه‌گیری شده

منابع

- International Organization for Standardization. Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports [Internet]. Geneva: ISO; 2009 [cited 2018 Mar 12]. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20906:ed-1:v1:en>
- Genescà M, Romeu J, Arcos R, Martín S. Measurement of aircraft noise in a high background noise environment

دیگر اختلاف زیادی دارند. لازم به ذکر است که هر دو مورد مذکور، دارای pm_{10} بسیار کمتری نسبت به دیگر موارد هستند.

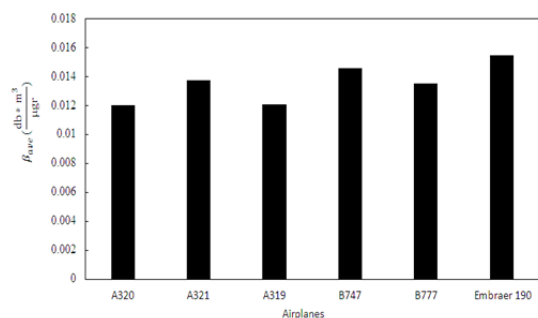
۳-۶- مقایسه میزان تاثیرگذاری ریزگردها بر صدای هواپیماهای مختلف

برای بررسی بهتر و نتیجه‌گیری کلی در مورد میزان تاثیرگذاری ریزگردها بر صدای هواپیماها، مقادیر β_{ave} هر شش هواپیما در نمودار ۹ آورده شده است.

با توجه به نمودار ۹، کمترین مقدار β_{ave} مربوط به هواپیمای ایرباس ۳۲۰ ($0.012 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$) و بیشترین تاثیرگذاری ریزگردها برای هواپیمای امبرائر ۱۹۰ ($0.0154 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$) است. بدین ترتیب، با میانگین‌گیری ضریب مذکور برای هواپیماهای مختلف، مقدار $\beta_{ave,t}$ برابر با $0.0136 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ به دست می‌آید.

با توجه به نمودارهای ۹-۵ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت ریزگردها، شدت انتشار صوت کاهش و میرایی محیط افزایش می‌یابد. محدوده دمای محیط ۲۰ تا ۴۰°C و درصد رطوبت در محدوده ۲ تا ۳۴٪ بوده است. با توجه به نزدیک‌بودن مقادیر β برای هواپیما و شرایط جوی مختلف نتیجه‌گیری می‌شود که متغیر غلظت ریزگردها، مستقل از دما و رطوبت نسبی است، اما دو متغیر دما و رطوبت نسبی مستقل از یکدیگر نیستند. در تمامی موارد، افزایش رطوبت نسبی موجب کاهش میرایی محیط شده است.

با توجه به نمودار ۹ که نتایج β_{ave} برای هواپیماهای مختلف را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست‌آمده برای این ضریب در محدوده ۰/۰۱۲ تا $0.0145 \text{ dB} \cdot \text{m}^3 / \mu\text{gr}$ است. با توجه به این که β مستقل از نوع هواپیما و مربوط به افت شدت صوت منتشرشده در محیط دارای ریزگرد است، لذا می‌توان استدلال کرد که دلیل وجود اختلاف کمی که در β_{ave} برای هواپیماهای مختلف مشاهده می‌شود، می‌تواند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری باشد.



نمودار ۹) ضریب میرایی اندازه‌گیری شده میانگین محیط به‌دلیل وجود ریزگردها برای تمامی هواپیماهای مورد بررسی

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان تاثیرگذاری غلظت ریزگردها بر انتقال صوت منتشرشده از هواپیماهای مختلف در محیط اطراف بوده که با توجه به اطلاعات نویسندگان این مقاله، تاکنون اندازه‌گیری نشده است. با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های متنوع انجام شده، با افزایش غلظت ریزگردها، میرایی محیط افزایش می‌یابد و تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، افزایش غلظت ریزگردها منجر به افزایش چگالی شده است، اما مقاومت در برابر اعمال نیروی محیط مربوطه بدون تغییر خواهد بود که نتیجه آن، افزایش میرایی محیط است. افزایش و کاهش متغیرهای دما و رطوبت موجب تغییر معنی‌دار β نمی‌شود. در نتیجه، تغییر مقدار ریزگردها اثری بر میزان تاثیرگذاری دما و

Standard: 2010 [cited 2018 Mar 3]. Available from: <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIASAS12562011ISO37462010-1630515>

9- Schäffer B, Plüss S, Thomann G. Estimating the model-specific uncertainty of aircraft noise calculations. *Applied Acoustics*. 2014;84:58-72.

10- Sahai A, Snellen M, Simons D. Objective quantification of perceived differences between measured and synthesized aircraft sounds. *Aerospace Science and Technology*. 2018;72:25-35.

11- Martín S, Genescà M, Romeu J, Pàmies T. Aircraft tracking by means of the Acoustical Doppler Effect. *Aerospace Science and Technology*. 2013;28(1):305-314.

12- Harris CM. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1966;40(1):148-159.

13- Sanchez-Perez LA, Sanchez-Fernandez LP, Shaout A, Suarez-Guerra S. Airport take-off noise assessment aimed at identify responsible aircraft classes. *Science of the Total Environment*. 2016;542(Part A):562-577.

14- Tarabini M, Moschioni G, Asensio C, Bianchi D, Saggin B. Unattended acoustic events classification at the vicinity of airports. *Applied Acoustics*. 2014;84:91-98.

15- Moffat RJ. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988;1(1):3-17.

using a microphone array. *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 2013;18:70-77.

3- Genescà M. Directional monitoring terminal for aircraft noise. *Journal of Sound and Vibration*. 2016;374:77-91.

4- Lo KW, Perry SW, Ferguson BG. Aircraft flight parameter estimation using acoustical Lloyd's mirror effect. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2002;38(1):137-151.

5- Sheikh PA, Uhl Ch. Airplane noise: A pervasive disturbance in Pennsylvania Parks, USA. *Journal of Sound and Vibration*. 2004;274(1-2):411-420.

6- Martín Román SR. Passive acoustic method for aircraft localization [Dissertation]. Barcelona: Polytechnic University of Catalonia; 2013.

7- International Organization for Standardization. Attenuation of sound during propagation outdoors-part 2: General method of calculation [Internet]. Geneva: ISO; 1996. Available from: <https://www.iso.org/standard/20649.html>

8- ANSI/ASA S12.56/ISO 3746. Acoustics - Determination Of Sound Power Levels And Sound Energy Levels Of Noise Sources Using Sound Pressure - Survey Method Using An Enveloping Measurement Surface Over A Reflecting Plane (A Nationally Adopted International Standard) [Internet]. New York: American National