

شبیه‌سازی عددی نوسانات فرابحرانی با تغییر فشار خروجی در ورودی هوای تراکم ترکیبی

مهدی آماده^۱، محمد صالحی فر^۲، جواد سپاهی یونسی^{۳*}

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، Mahdi_amadeh@hotmail.com

۲- دانشجوی مقطع دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، Salehifar68@gmail.com

۳- استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، jsepahi@um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، طراحی یک ورودی مافوق صوت با تراکم ترکیبی با هندسه تقارن محوری را انجام می‌شود. پارامترهای داده‌شده طراحی این ورودی عددی ماک اولیه ۲ می‌باشد. ارتفاع ۷۰۰۰ متری به ما داده‌شده است. با توجه به الگوریتم‌های طراحی، ورودی به نحوی طراحی می‌شود تا شوک اولیه به لبه‌ی پوسته برخورد کند. برای تولید هندسه از نرم‌افزار گمبیت استفاده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار فلونت پایداری و پارامترهای عملکردی ورودی بررسی می‌شود. در این شبیه‌سازی حل گر روش چگالی مینا، ضمنی و ناپایاست. مدل توربولانسی Kw-sst است.

واژه‌های کلیدی: ورودی تراکم ترکیبی - ورودی تقارن محوری - جریان مافوق صوت - حالت فرابحرانی - جریان آشفته

۱- مقدمه

هر وسیله پرنده هوافضایی برای اجرای مأموریت پروازی نیازمند سامانه‌ی پیشران است که دهانه ورودی هوای یکی از مهم‌ترین اجزای آن است. دهانه ورودی، وظیفه‌ی تأمین هوای موردنیاز موتور در شرایط مختلف پروازی با کمترین اتلاف فشار کل و کمترین تولید پسا را دارد. دهانه‌های ورودی مافوق صوت براساس محل تراکم صورت گرفته، مطابق شکل ۱ به سه دسته‌ی تراکم داخلی، تراکم بیرونی و تراکم ترکیبی تقسیم می‌شوند. در دهانه‌ی ورودی با تراکم داخلی، تراکم به‌وسیله‌ی تعدادی موج ضربه‌ای مایل در داخل دهانه ورودی انجام می‌شود که در انتها به موج ضربه‌ای عمودی ضعیف ختم می‌شوند. در دهانه‌ی ورودی با تراکم بیرونی، تراکم به‌وسیله‌ی یک یا چند موج ضربه‌ای مایل در بیرون از دهانه‌ی ورودی روی سطح دوکوار ایجاد می‌شود که در انتها به موج ضربه‌ای عمودی ضعیف ختم می‌شود. همچنین در این نوع دهانه‌ی ورودی، تراکم می‌تواند به‌طور ساده به‌وسیله‌ی یک موج ضربه‌ای عمودی بیرونی نیز انجام شود. در دهانه‌ی ورودی با تراکم ترکیبی، بخشی از تراکم جریان در خارج از دهانه ورودی و مابقی در داخل آن صورت می‌گیرد. در این نوع دهانه‌ی ورودی، تراکم ابتدا به‌واسطه تشکیل مجموعه‌ای از امواج ضربه‌ای مایل در بیرون از دهانه ورودی ایجاد شده و سپس به‌واسطه تشکیل امواج ضربه‌ای مایل در داخل دهانه ورودی و در نهایت موج ضربه‌ای عمودی ضعیف، تراکم افزایش پیدا می‌کند.

چاپو و همکاران [۱] در سال ۱۹۸۷ به بررسی عددی جریان ناپایا در داخل و خارج دهانه ورودی تراکم ترکیبی به‌صورت سه بعدی پرداختند. در این کار از شیوه تفاضل محدود و گسسته سازی با روش صریح-ضمنی بیم-وارمینگ-استنجر/مککورمک و از مدل جبری بالدوین-لمکس برای شبیه‌سازی آشفتگی استفاده شده است. آن‌ها بسیاری از جنبه‌های فیزیکی

جریان در دهانه ورودی از جمله برخورد امواج ضربه‌ای، سرریزی جریان مادون‌صوت در نزدیکی لبه پوسته و شرایط راه‌اندازی و خاموش شدن را بررسی کردند. چان و لیانگ [۲] در سال ۱۹۹۲ با توسعه کد دوبعدی حجم محدود با گسسته سازی ضمنی مرتبه دوم بالادستی و مدل جبری آشفتگی بالدوین-لمکس، جریان درون دهانه ورودی تراکم ترکیبی با عدد ماک طراحی ۳۰ را مطالعه کردند. در این پژوهش اثر تغییر مساحت گلوگاه و اثر مکش جریان بر شرایط راه‌اندازی دهانه ورودی موردبررسی قرار گرفته است. کواک و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۱ به توسعه کدی عددی برای شبیه‌سازی و بررسی اثر مکش جریان درون دهانه‌های ورودی پرداخته و برای اعتبارسنجی کد، جریان درون دهانه ورودی تراکم ترکیبی با عدد ماک طراحی ۳۰ همراه با مکش جریان را حل کردند. در این کد، از روش رو و تقریب تفاضل مرکزی به ترتیب برای محاسبه شارهای غیرلزج و لزوج و همچنین برای مدل‌سازی آشفتگی دو مدل Kw-sst و q-w استفاده شده است. کتدا و میتال [۴] در سال ۲۰۱۱ جریان لزوج آرام درون دهانه ورودی تراکم ترکیبی را با حل معادلات ناویر-استوکس دوبعدی توسط روش المان محدود پایدار شده مدل‌سازی کردند. در این پژوهش اثر مکش جریان بر روی راه‌اندازی دهانه ورودی و کنترل پدیده باز به تفصیل موردبررسی عددی قرار گرفته است. آن‌ها در ادامه با توسعه این کار در سال ۲۰۱۵ به مطالعه جریان لزوج و آشفتگی با استفاده از مدل یک معادله‌ای اسپالارت-آلماراس، درون دهانه ورودی تراکم ترکیبی قبلی پرداخته و نتایج را با جریان آرام مورد مقایسه قراردادند [۵].

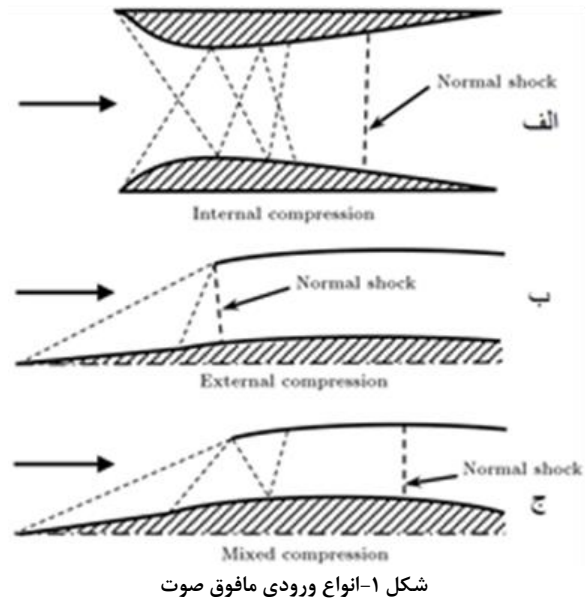
$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, \vec{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (P + \rho E)u \end{bmatrix}, \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ P + \rho u^2 \\ (P + \rho E)v \end{bmatrix}$$

$$\vec{V} = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ \rho v H \end{bmatrix}, \vec{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -u\tau_{xx} - v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix}$$

$$\vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xy} \\ -\tau_{yy} \\ -u\tau_{xy} - v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_v = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xy} \\ -\tau_{yy} + \tau_{\theta\theta} \\ -u\tau_{xy} - v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix}$$

(۴)



شکل ۱- انواع ورودی مافوق صوت

۱- فرمول‌ها و روابط

پارامترهای عملکردی مهم برای دهانه ورودی مافوق صوت عبارت از نسبت دبی جرمی، بازیافت فشار، ضریب پسا و اعوجاج هستند. نسبت دبی جرمی مهم‌ترین مشخصه دهانه ورودی است زیرا بقیه پارامترهای عملکردی به آن وابسته‌اند و با فرض ثابت بودن سرعت در هر مقطع به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$MFR = \frac{\rho AV}{\rho A_c V_c} \quad (1)$$

بازیافت فشار کل دهانه ورودی نیز مشخصه بسیار مهمی در عملکرد ورودی است زیرا هر تغییری در آن به طور مستقیم روی نیروی جلوبرندگی موتور تأثیر می‌گذارد که برای جریان مافوق صوت به صورت نسبت فشار کل انتهای دهانه ورودی به فشار کل جریان آزاد، به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$TPR = \frac{P_{02}}{P_{01}} \quad (2)$$

با توجه به نوع جریان مورد بررسی در این پژوهش، شکل کامل معادلات ناویر-استوکس تراکم‌پذیر در حالت دوبعدی (صفحه‌ای و تقارن محوری) مورد استفاده قرار گرفته است که شکل بقایی آن با فرض عدم وجود نیروهای حجمی و انتقال حرارت ناشی از منابع خارجی به صورت رابطه (۳) است.

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}_v}{\partial y} + \alpha \vec{V} + \alpha \vec{V}_v = 0 \quad (3)$$

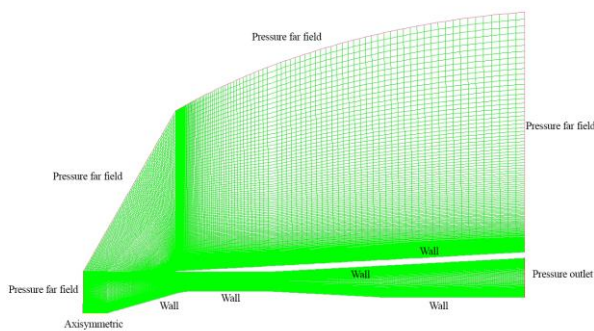
جزئیات جملات موجود در معادلات حاکم در مرجع [۱۵] به تفصیل بیان شده است.

۲- شبیه‌سازی

برای حل این پروژه، از نرم‌افزارهای گمبیت و فلونت استفاده می‌کنیم.

۲-۱- استقلال از شبکه

در این پژوهش جزئیات و شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور بالا بردن کیفیت حل، از چندین بلوک محاسباتی در سرتاسر دامنه حل استفاده شده است. این بلوک‌ها به دلیل کنترل بهتر Aspect ratio و توزیع یکنواخت آن‌ها در دامنه محاسباتی می‌شود.



شکل ۲- شرایط مرزی هندسه

سه شبکه با تعداد متفاوت سلول (۲۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰) مورد مطالعه قرار گرفت.

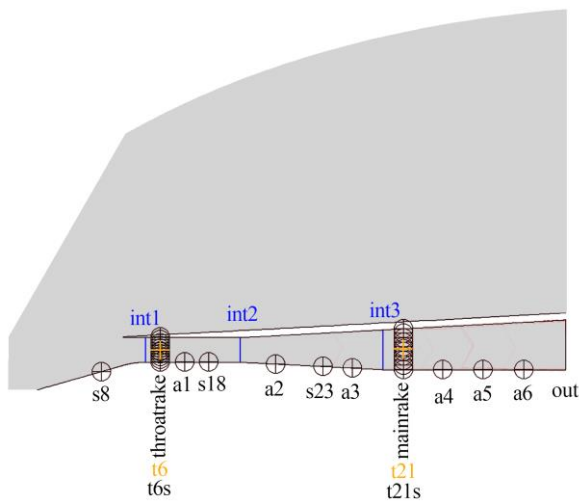
شرط مرزی Pressure far field باعث می‌شود دامنه حل کوچک‌تر و تعداد شبکه کمتر داشته باشیم و در نتیجه سرعت همگرایی و سرعت حل تسریع می‌شود. در هندسه‌های بررسی شده، هندسه به صورت نصف شبیه‌سازی شده است. صفحه پایینی هندسه دارای شرط Axisymmetric

زیرا این مدل به خوبی قادر به پیش بینی جدایش در حضور گرادیان فشار معکوس است و به همین دلیل گزینه مناسبی است. هوا گاز ایده آل فرض شده است و از مدل ضریب لزجت ساترلند استفاده شده است. برای ورودی هوا شرط مرزی فشار دوردست در نظر گرفته شده است. از استراتژی های وصل کننده پوسته به اسپایک و ریک های اندازه گیری فشار کل در شبیه سازی عددی صرف نظر شده است. با اعمال این فرضیات با حل معادلات ناویر استوکس توسط نرم افزار انسیس فلونت ۱۹/۲ شبیه سازی صورت گرفته است.

از آنجایی که قرار است اغتشاشی به صورت متناوب در خروجی اعمال کنیم باید از اکسپرشن فلونت استفاده کنیم. اغتشاش را به صورت زیر اعمال می کنیم.

$$P = K \cdot \sin(2\pi Ft) + J \quad (\Delta)$$

که در این فرمول K ضریب، F فرکانس تحریک و J اختلاف فاز می باشد، که این سه پارامتر را مطابق جدول ۱ اعمال می کنیم. یکی از کارهای دیگری که باید در فلونت انجام بدهیم، تعریف سنسور در مکان های مختلف و حساس ورودی می باشد تا بتوانیم هر مقطع یا نقطه را به طور ویژه مورد مطالعه قرار بدهیم. مکان نمای سنسور ها مطابق با شکل ۵ می باشد.



شکل ۵- مکان نما سنسور های تعریف شده بر روی ورودی

۳- جدول ها

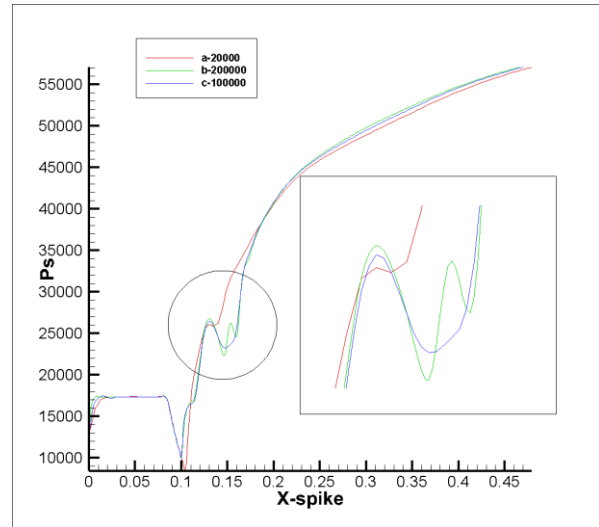
جدول ۱- ضریب های اغتشاش

K	J	F
۵۰۰۰	۹۰۰۰	۱۰-۱۰۰-۱۰۰۰
۱۰۰۰۰	۱۸۰۰۰	۱۰-۱۰۰-۱۰۰۰
۲۰۰۰۰	۳۶۰۰۰	۱۰-۱۰۰-۱۰۰۰

۴- شکل ها و نمودارها

بعد از اعمال اغتشاش بر ورودی، ابتدا گسترش اغتشاش به سمت بالادست را مورد بررسی قرار می دهیم.

است تا با هم سلول ها کاهش یابد و هزینه محاسبات کاهش محسوسی داشته باشد.



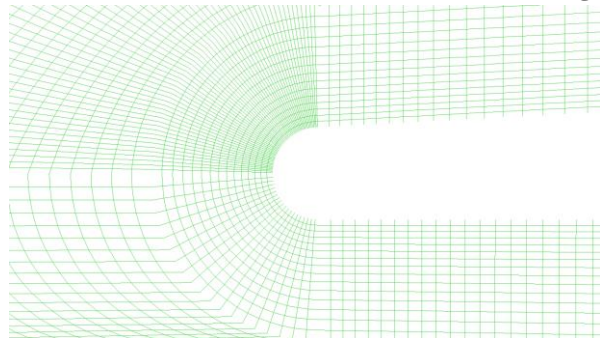
شکل ۳- تاثیر اندازه شبکه بر فشار استاتیک در راستای اسپایک

با توجه به شکل ۳، دو محور فشار استاتیک و طول اسپایک نمایش داده شده است.

در محدوده یک چهارم اسپایک نمودارها به هم نزدیک هستند. در محدوده یک چهارم تا نیمه اسپایک نمودارها از هم دیگر فاصله می گیرند اما بازهم نمودارهای b و c به هم نزدیک تر هستند.

از نیمه تا انتهای اسپایک نیز نمودارها تقریباً به هم نزدیک هستند اما b و c بیشتر نزدیک هستند.

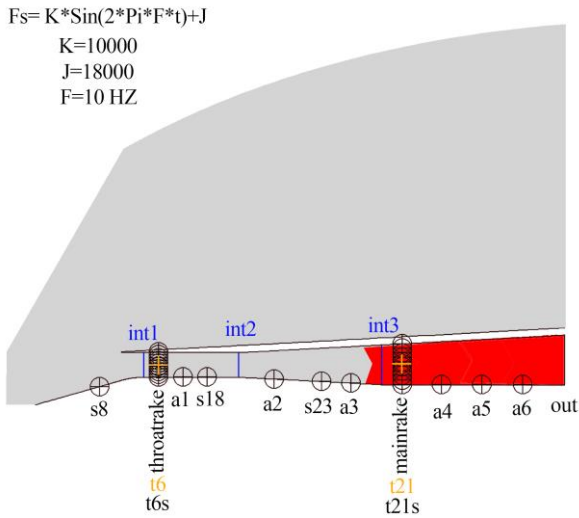
با توجه به نمودارها استفاده از شبکه b مناسب است زیرا به نمودار C بسیار نزدیک است و از طرفی با سلول های کمتر هزینه محاسبات را کاهش می دهد.



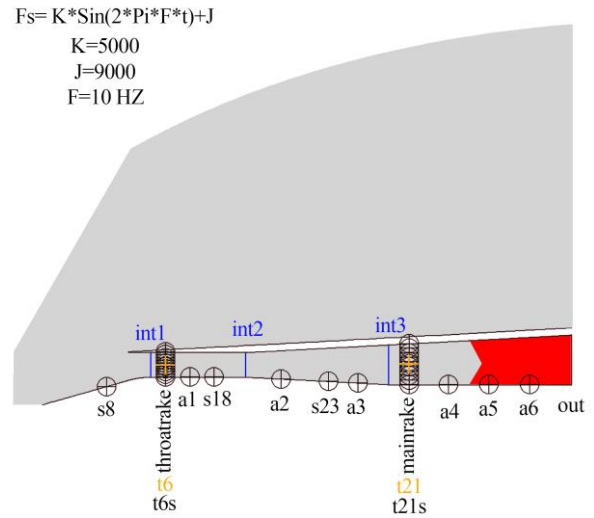
شکل ۴- نمایی زوم شده از شبکه محاسباتی بهینه

۲-۲- تنظیمات نرم افزار فلونت

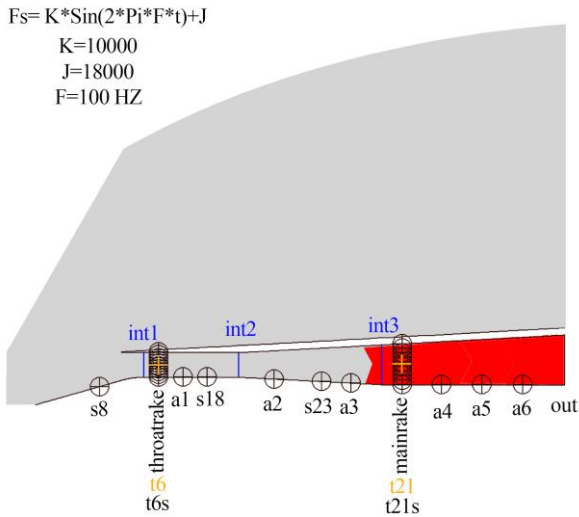
از آنجایی که عدد ماخ جریان آزاد در این پروژه ۲ است، بنابراین نشان دهنده تراکم پذیر بودن جریان درون ورودی فرضی است. به همین دلیل لازم است که معادله انرژی نیز حل شود. در این پژوهش از حل گر فشار مبنا برای حل عددی استفاده شده است که طبق گفته فلونت برای جریان های تراکم پذیر نیز قابل استفاده است. به منظور شبیه سازی عددی مدل به صورت دوبعدی با فرض تقارن محوری، دیوارها آدیاباتیک و جریان ناپایا در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در ورودی احتمال جدایش جریان بسیار زیاد است، از میان مدل های آشفتگی، مدل K-w-sst استفاده شده است



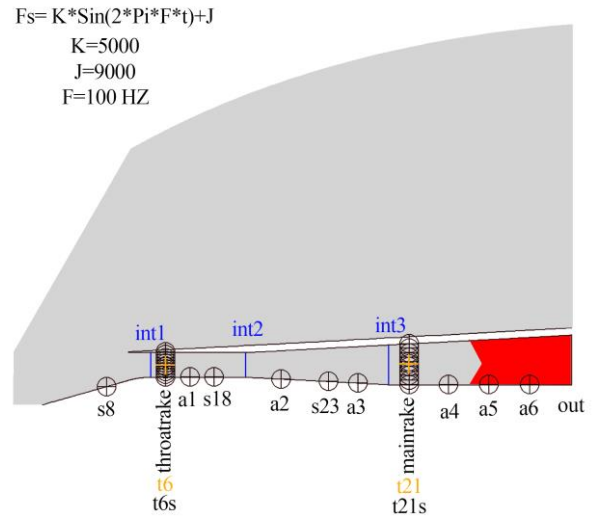
شکل ۹- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=10000, J=18000, F=10 \text{ Hz}$)



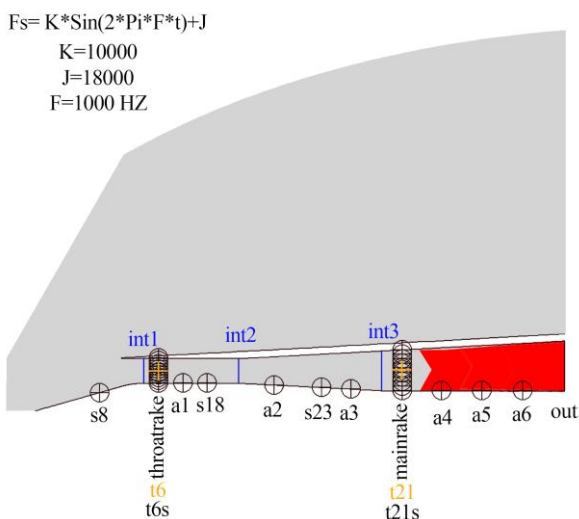
شکل ۶- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=5000, J=9000, F=10 \text{ Hz}$)



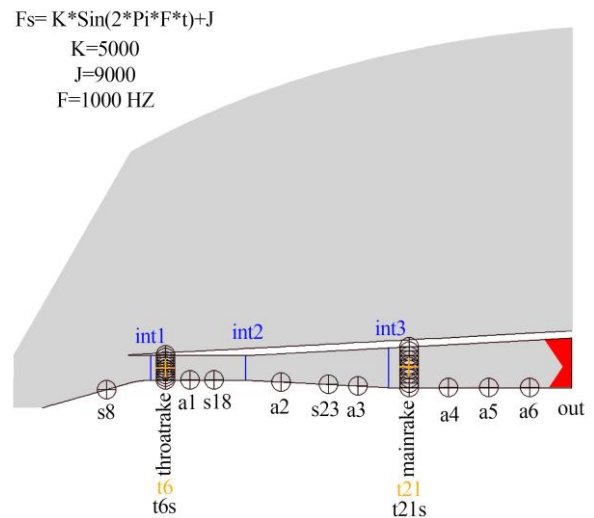
شکل ۱۰- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=10000, J=18000, F=100 \text{ Hz}$)



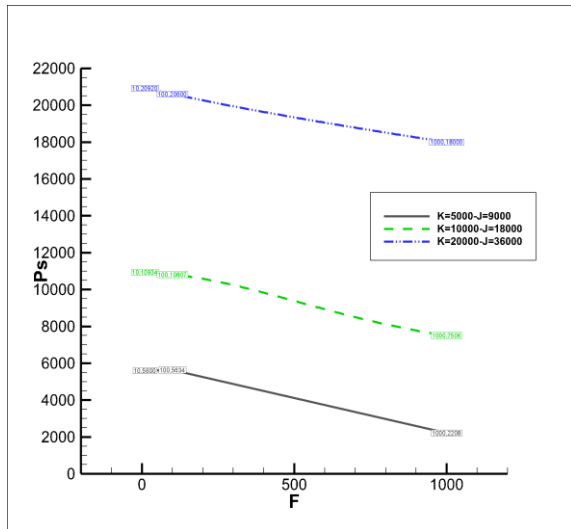
شکل ۷- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=5000, J=9000, F=100 \text{ Hz}$)



شکل ۱۱- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=10000, J=18000, F=1000 \text{ Hz}$)



شکل ۸- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=5000, J=9000, F=1000 \text{ Hz}$)



شکل ۱۵- نمودار دامنه فشاری برحسب فرکانس در خروجی

اشکال ۶ الی ۱۴ گسترش اغتشاشات به سمت بالادست، بعد از اعمال اغتشاش تحریک در خروجی را نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، هرچه ضریب‌های K و J بیشتر می‌شود، اغتشاشات و نوسانات به سمت بالادست حرکت می‌کند. همچنین در یک ضریب K و J ثابت، در فرکانس ۱۰۰ هرتز بیشترین انتقال نوسانات به سمت بالادست و در ۱۰۰۰ هرتز کمترین انتقال را داریم.

در ادامه به توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌کنیم که با افزایش ضریب‌های K و J دامنه نوسانات نیز بیشتر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نمودار دامنه فشاری برحسب فرکانس و همچنین با توجه به شکل‌های انتشار اغتشاش به سمت بالادست، در فرکانس ۱۰۰ بیشترین انتشار اغتشاش را به سمت بالادست خواهیم داشت. بیشترین تاثیر ضرایب K و J به ترتیب، ضریب K در انتها ضریب J را خواهد داشت. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان محفظه احتراق را به صورتی طراحی کرد تا انتشار اغتشاشات، کمترین مقدار باشد.

۶- مراجع

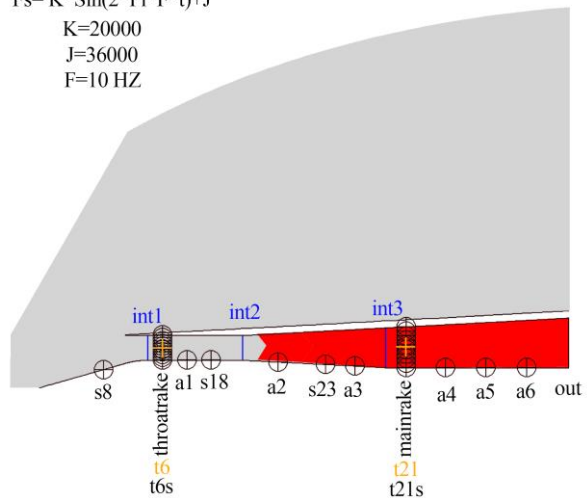
- [۱] T. K. D. B. W.J. Chyu, "Calculation of external-internal flow fields for mixed-compression inlets," Elsevier BV, vol. ۶۴, no. ۱-۲, ۱۹۸۷.
- [۲] T. K. D. B. W.J. Chyu, "Calculation of external-internal flow fields for mixed-compression inlets," Elsevier BV, vol. ۶۴, no. ۳-۱, ۱۹۸۷.
- [۳] H. L. S. L. Einkeun Kwak, "Numerical simulation of flows around axisymmetric inlet with bleed regions," Springer Science and Business Media LLC, vol. ۲۴, no. ۱۲, ۲۰۱۰.
- [۴] S. M. V. M. Krushnarao Kotteda, "Viscous flow in a mixed compression intake," Wiley, vol. ۶۷, no. ۱۱, ۲۰۱۱.
- [۵] S. M. V. M. Krushnarao Kotteda, "Computation of turbulent flow in a mixed compression intake," Springer Science and Business Media LLC, vol. ۶, no. ۳-۴, ۲۰۱۴.
- [۶] P. Jayakumar, "Modeling and identification in structural dynamics," Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California, ۱۹۸۷.

$$F_s = K \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) + J$$

$$K = 20000$$

$$J = 36000$$

$$F = 10 \text{ Hz}$$



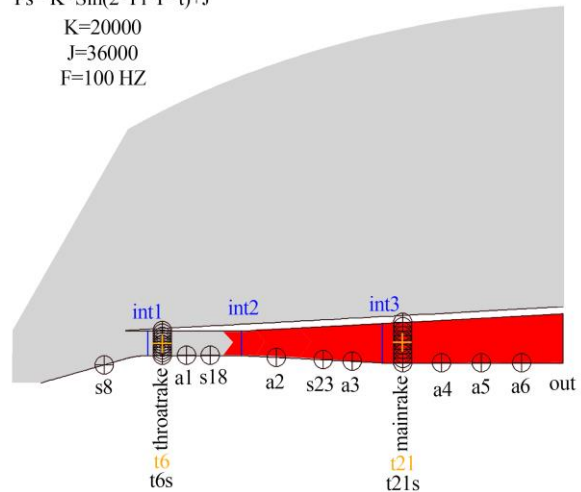
شکل ۱۲- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=20000$ - $J=36000$)
 $F=10 \text{ Hz}$

$$F_s = K \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) + J$$

$$K = 20000$$

$$J = 36000$$

$$F = 100 \text{ Hz}$$



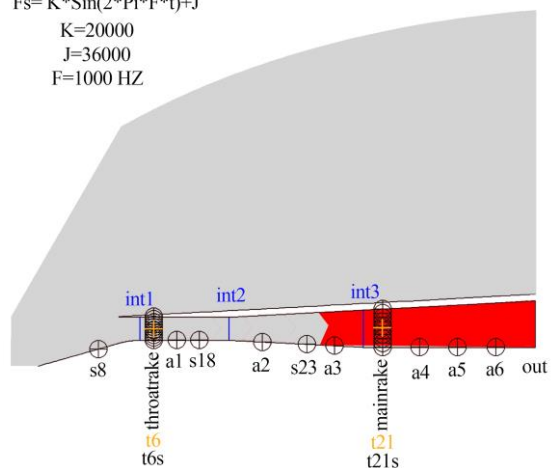
شکل ۱۳- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=20000$ - $J=36000$)
 $F=100 \text{ Hz}$

$$F_s = K \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) + J$$

$$K = 20000$$

$$J = 36000$$

$$F = 1000 \text{ Hz}$$



شکل ۱۴- انتشار اغتشاش به سمت بالادست ($K=20000$ - $J=36000$)
 $F=1000 \text{ Hz}$



[۷] Suzen, Numerical computation of compressible, turbulent high-speed flows, Wichita State University,