



## تحلیل دو بعدی و سه بعدی جریان خروجی از شیبوره همگرا واگرا به همراه پلوم انتهایی آن در ورود به محیط لزج الاستیسیته بالا

محمود پسندیده فرد<sup>۱</sup>، مقداد ساعدی امیری<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه فردوسی مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

۲- دانشگاه صنعتی شریف تهران، بزرگراه شیخ فضل ا. طرشت، کوچه باغ کاج، خوابگاه طرشت 3، ۳/۳۰۱

### چکیده

در جریان های مافوق صوت خروجی از شیبوره همگرا واگرا به دلیل لزجت، امواج ضربه ای و انبساطی به مرور تحلیل رفته و از بین می روند. این امواج هنگامی که توسط یک سیال با الاستیسیته بالا محدود شده ولی تحت تاثیر لزجت یک سیال گازی واسط قرار گیرند، بسیار سریعتر از حالت قبل از بین میروند. در حالتی که جریان مافوق صوت گازی مستقیماً تحت تاثیر جریان سیال با الاستیسیته و لزجت بالا قرار گیرد، امواج ضربه ای و انبساطی انتشار نیافته و یک دیسک ماخ شکل می گیرد

واژه های کلیدی: دیسک ماخ - سوپرکاویتاسیون - مافوق صوت - لزجت - شیبوره همگرا واگرا

### مقدمه

کویتاتور (Cavitator) نسب شده در جلوی اژدر، در سرعت های بالای اژدر، سوپرکاویتاسیونی تولید می کند که تا انتهای اژدر ادامه می یابد و بر جریان گاز های خروجی از انتهای اژدر اثر می گذارد. وجود بخار آب ناشی از سوپرکاویتاسیون در فاصله بین آب و گازهای مافوق صوت خروجی از انتهای اژدر با برخورد مستقیم گازهای مافوق صوت با آب جلوگیری می کند. تاثیر وجود و عدم وجود سوپرکاویتاسیون بر جریان گاز های خروجی از اژدر مورد بررسی قرار گرفته است.

### تحلیل شیبوره همگرا واگرا در حالتی که جریان مافوق صوت از شیبوره وارد هوا شود :

در این حالت جریان گاز خروجی از شیبوره همگرا واگرا در حالت مافوق صوت بوده و چون فشار پشت شیبوره بسیار بیشتر از فشار محیط می باشد جریان همراه با امواج ضربه ای و انبساطی می باشد. این امواج در برخورد با محیط منعکس شده و به یکدیگر تبدیل می شوند در حالی که در برخورد با محور تقارن تنها منعکس می شوند.

شرایط مرزی

شکل (۱)

- pressure inlet = 25 bar
- pressure far field = 0 bar
- wall
- axis
- Inlet vent = 0 bar

در این حالت فشار پشت نازل بیش از فشار نقطه طرح بوده و بنابر این جریان گاز خروجی همراه با امواج ضربه ای و انبساطی می باشد. این امواج در هنگام نبود ویسکوزیته می بایست بدون تغییر شکل تا بی نهایت ادامه یابند اما به دلیل وجود نیروهای ویسکوزیته به مرور انرژی خود را از دست می دهند و از بین می روند تا در نهایت کل جریان به حالت مادون صوت تبدیل گردد. اشکال (۲-۴) بوسیله مرجع [1] تایید شده است. شکل (۵) حالت واقعی را نشان داده است.

<sup>1</sup> استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>2</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، ۰۹۱۱۲۱۱۹۷۶۲، [meghdad\\_saedi@yahoo.com](mailto:meghdad_saedi@yahoo.com) (نویسنده مخاطب)

## تحلیل جریان گاز در ورود به محیط آب در سرعت های

پایین به همراه نیروی گرانش :

شرایط مرزی

- gas velocity inlet = 50 m/s
- pressure outlet = 0 bar
- wall

در این حالت به دلیل سرعت پایین گاز ، از همان ابتدا از فصل مشترک گاز با آب مخلوط گاز و آب شکل گرفته و به سرعت توسعه پیدا کرده و کل جریان را در بر می گیرد ، به دلیل کمتر بودن چگالی مخلوط از آب و وجود شتاب ثقل نیروی شناوری به ذرات مخلوط سبب گشته که سیال به سمت بالا حرکت کند. اشکال (۶-۸) اعمال مدل mixture در اینجا به منظور بررسی اختلاط گاز و آب صورت گرفته است .

## تحلیل جریان گاز در ورود به محیط آب در سرعت های

بالا و تغییرات چگالی ناچیز به همراه نیروی گرانش :

شرایط مرزی

شکل (۹)

- gas velocity inlet = 1000 m/s
- out flow
- wall
- water velocity inlet = 40 m/s

در سرعت های بالا به دلیل اینکه فشار گاز خروجی از دهانه بسیار بیشتر از فشار محیط است ، جریان ابتدا با افزایش در سطح مقطع ( انبساط یافتن ) و کاهش سرعت و فشار خود به سرعت و فشار محیط نزدیک می شود شکل (۱۰) . از طرفی با افزایش سطح مقطع ، سطح تماس گاز با آب افزایش یافته و اختلاط این دو سیال و تشکیل ذرات حباب بیشتر صورت می گیرد . و به مرور با پیشروی بیشتر گاز در آب تمامی ذرات گاز در آب ادغام شده و سرعتش در برخورد با محیط لزج الاستیسیته بالا کاهش می یابد و سطح مقطع جریان با اختلاط کامل گاز در آب کم می شود . در نهایت تمامی این ذرات به دلیل اختلاف چگالی آنها با آب و وجود شتاب گرانش به سمت بالا و سطح آزاد آب حرکت میکنند . این عوامل شکل پلوم انتهایی را شبیه به شعله شمع می کنند .

## جریان مافوق صوت گاز درون جریان آب به همراه جریان

واسط گاز مادون صوت :

شرایط مرزی

شکل (11)

- gas pressure inlet = 10 bar
- gas temperature inlet = 1000 k
- pressure outlet = 0 bar
- water velocity inlet = 40 m/s
- gas velocity inlet (medium) = 100 m/s

ابتدا بین دو جریان ( جت مافوق صوت و آب ) یک جریان مادون صوت (  $v = 100 \text{ m/s}$  ) گاز تزریق می کنیم . این جریان گاز در واقع بخار آب حاصل از کاویتاسیون میباشد که کل اژدر را فرا گرفته و تا انتهای آن آمده است [2] شکل (۱۲) ، این حالت ترکیبی از حالت های جریان گاز مافوق صوت در ورود به محیط گازی و جریان گاز تراکم ناپذیر در ورود به محیط آب می باشد با این تفاوت که طول جریان مافوق صوت آن کوتاه تر است اشکال (۱۳-۱۶) . به منظور حل مسئله در این حالت نمی توان از مدل mixture استفاده کرد و باید از مدل volume of fluid که در آن هیچ اختلاطی بین آب و گاز رخ نمی دهد استفاده کرد . در نظر گرفتن این مدل با توجه به سرعت بسیار بالای خروجی چندان دور از واقعیت نیست .

در این حالت جریان گاز خروجی از شیپوره همگرا و اگر در حالت مافوق صوت بوده و چون فشار پشت شیپوره بسیار بیشتر از فشار محیط می باشد جریان همراه با امواج ضربه ای و انبساطی می باشد . این امواج در برخورد با محیط منعکس شده و به یکدیگر تبدیل می شوند در حالی که در برخورد با محور تقارن تنها منعکس می شوند . در عمل به دلیل وجود نیروهای ویسکوز دامنه عمل این امواج کاهش یافته و گاز انرژی خود را از دست می دهد و در نهایت به طور کامل تبدیل به جریان مادون صوت می گردد ، [1] .

در ابتدا بدلیل کاهش دامنه امواج و کم بودن مقدار گاز مادون صوت اطراف این امواج تا جایی که کل جریان مادون صوت شود ، سطح مقطع جریان کاهش می یابد . اما بعد از آن بنا به دلیلی که قبلاً در مورد کاهش فشار سیال و خاصیت تراکم ناپذیری سیال در حالت مادون صوت ذکر شد ، سطح مقطع جریان افزایش یافته و بعد از رسیدن به حد بحرانی در اختلاط با آب و کاهش فشار سیال ، سطح مقطع ثابت شده و به مرور با اختلاط در آب سطح مقطع کاهش می یابد . شکل نهایی این فرایند چیزی شبیه به شعله شمع به همراه یک انقباض در ابتدای جریان گاز می باشد که در واقع همان پلوم انتهایی می باشد .

مطابق شکل (۱۷) این جریان شبیه به ترکیبی از جریان مافوق صوت گاز درون هوا و سپس جریان گاز مادون صوت درون آب می باشد .

در ابتدای راه اندازی و شلیک ، گاز کاویتاسیون وجود نداشته و یا تا انتهای اژدر امتداد نیافته است . در ابتدای کار چند نازل کوچک که بدور نازل اصلی قرار دارند روشن شده و وظیفه تولید نیروی تراست اولیه و تولید گاز واسط برای نازل اصلی را به عهده دارند . شکل (18) در این حالت گاز حاصل از احتراق دور جریان اصلی خروجی از نازل را گرفته و مانع تماس مستقیم جریان مافوق صوت با سیل لزج الاستیسیته بالا می شود .

## جریان مافوق صوت گاز درون جریان آب :

شرایط مرزی

- pressure inlet = 10 bar
- temperature inlet = 1000 k

$$\frac{A}{A_*} \approx 1.65$$

تحلیل یک بعدی در ماخ = ۲ :

$$\frac{A}{A_*} \approx 1.69$$

نتایج با وجود تقریب یک بعدی به یدیگر نزدیکند .

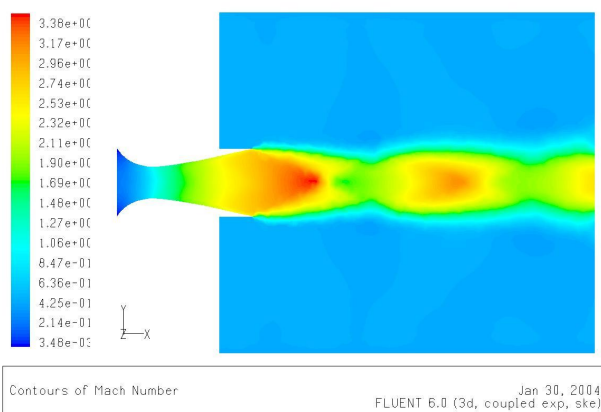
درمورد جریان مافوق صوت گاز درون جریان آب به همراه جریان واسط گاز مادون صوت ، کارهای عددی توسط دیگران صورت گرفته است ، شکل (16) که در آن نتایج بدست آمده مشابه با نتیجه عددی بدست آمده در اینجا می باشد .

### نتیجه گیری :

بر اساس تحلیل های نرم افزاری و حل عددی پدیده مشاهده می شود که فشار پشت شیپوره برای جلوگیری از وقوع شوک در درون شیپوره کافی می باشد . ولی برای افزایش طول پلوم می بایست یک جریان مادون صوت گاز به دور جریان مافوق صوت تزریق کنیم ( در اینجا همان گاز حاصل از کاویتاسیون می باشد ) .

### مراجع

- [1]. John James E. A., *Gas Dynamics* , 1984  
 [2]. E. A. Euteneuer , *Further Studies into the Dynamics of a Supercavitating Torpedo*, 2003  
 [3]. Kuethe Arnold M. , Chuen-Yen C., *Foundations of Aerodynamics*, 1997



شکل ۱- امواج انبساطی و تراکمی خروجی در حالت تخلیه درون هوا

- pressure outlet = 0 bar
- wall
- velocity inlet = 40 m/s

اما در حالتی که جت گاز در برخورد مستقیم با محیط لزج الاستیسیته بالا قرار می گیرد امواج توانایی انعکاس ساده یافتن را به دلیل لزجت بالا از دست می دهند و تنها یک انعکاس پیچیده می تواند رخ دهد، که همان پدیده ماخ انعکاسی به همراه دیسک شوک ماخ است اشکال (۱۹-۲۰) . اگر  $M_2$  به اندازه کافی کوچک باشد ، ممکن است یک انعکاس ساده موج میسر نباشد . یعنی به ازاء هر مقدار معین  $M_2$  ممکن است زاویه انحراف لازم به قدری بزرگ باشد که از شکلهای ( نمودار های موج ضربه ای مایل ) هیچ جوابی به دست نیاید ، [3] . در این حالت یک انعکاس ماخ خواهیم داشت شکل (۲۱) و شکل (۲۲) . در این صورت یک موج ضربه ای مایل قوی در جریان تشکیل می شود و از نقطه O تا نقطه W روی دیوار امتداد می یابد شکل (۲۳) . در نقطه W ، موج باید عمود بر دیوار باشد تا انحراف در جریان امکان نداشته باشد و شرایط مرزی در این نقطه ارضا شود . جریان بعد از موج ضربه ای خمیده OW زیر صوت است و جریان به آرامی خود را با دیوار تطبیق می دهد . همچنین یک موج ضربه ای مایل ضعیف OR به وجود می آید و جریان بعد از آن فرا صوت است . ترکیب جریان های زیر صوت و فرا صوت بعد از امواج باعث می شود که تحلیل ماخ بسیار مشکل شود .

### بررسی صحت حل عددی :

### تحلیل شیپوره همگرا واگرا در حالتی که شوک در درون

### نازل رخ می دهد :

شرایط مرزی

شکل (۲۴)

- pressure inlet = 2 bar
- temperature inlet = 300 k
- pressure outlet = 1 bar
- wall
- axis

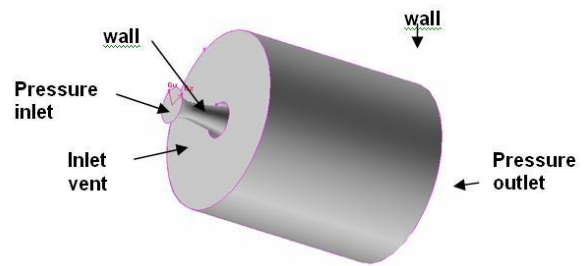
چون در این حالت فشار پشت نازل به اندازه کافی نبوده به دلیل کاهش شدید فشار در درون شیپوره ( در قسمت واگرای آن ) فشار از حد فشار محیط کمتر شده و سیال برای رسیدن به حالت محیط مجبور به ایجاد شوک و تغییر ناگهانی در شرایط خود شده است . شکل (۲۵)

به منظور تایید نتایج حاصل از نرم افزار ، مقادیر بدست آمده را با تئوری یک بعدی موجود در مرجع (۳) مقایسه شده است . با وجود اینکه تحلیل نرم افزار دو بعدی بوده اما با تئوری یک بعدی مطابقت زیادی دارد :

از روی حل نرم افزار در ماخ = ۱.۹۹ :



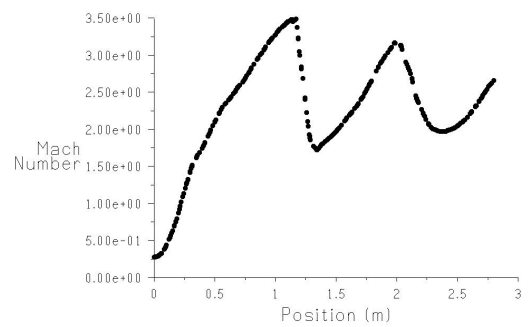
شکل ۵- نمایش امواج انبساطی و تراکمی در خروجی نازل



شکل ۲- هندسه و شرایط مرزی مساله سه بعدی خروج گازها به داخل محیط



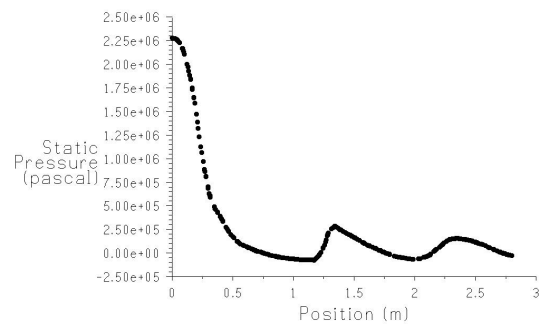
شکل ۶- اثر گرانش بر روی پلوم انتهایی شکل گرفته در خروجی اژدر



شکل ۳- عدد ماخ در امتداد محور مرکزی نازل ، از قبل از نازل تا فاصله چند برابر نازل در محیط

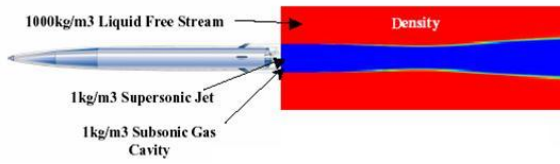


شکل ۷- اثر گرانش بر روی جریان گاز در خروجی از لوله

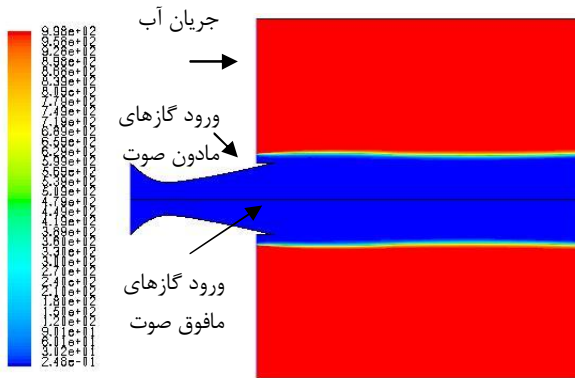


شکل ۴- فشار استاتیکی در امتداد محور مرکزی نازل ، از قبل از نازل تا فاصله چند برابر نازل در محیط

شکل ۱۱- نمایش شماتیک موقعیت سوپرکاویتاسیون نسبت به اژدر و امتداد آن تا انتهای اژدر [2]

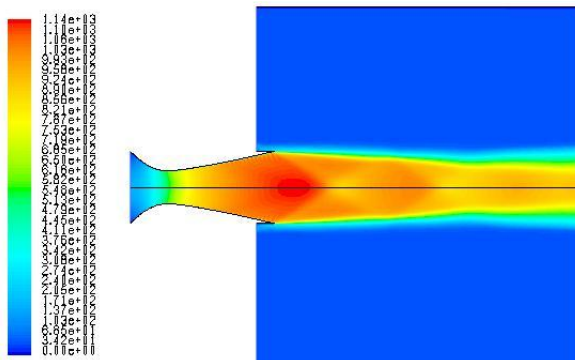


شکل ۱۲- اژدر همراه با کویتاتور



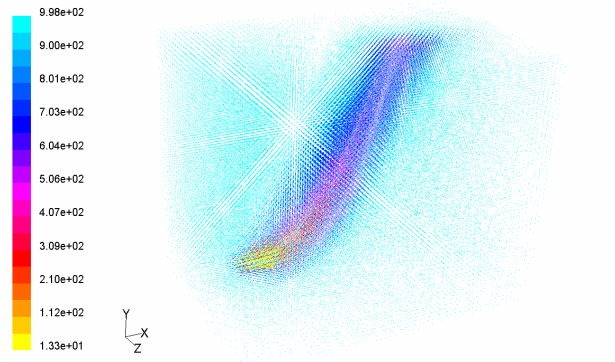
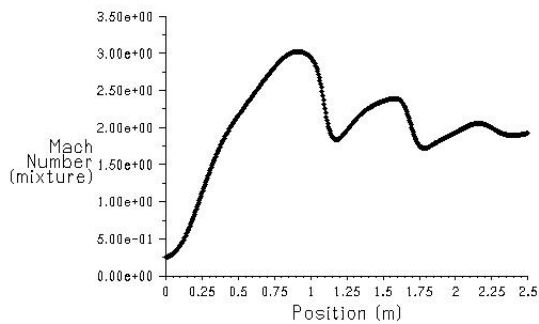
Contours of Density (mixture) (kg/m³) Sep 08, 2005 FLUENT 6.1 (axi, swirl, segregated, vol, ske)

شکل ۱۳- جریان در حالت وجود سیال واسط مادون صوت

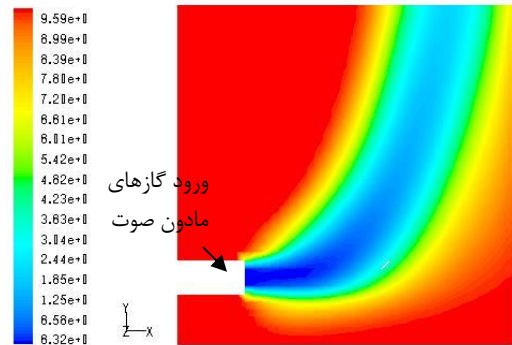


Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s) Sep 08, 2005 FLUENT 6.1 (axi, swirl, segregated, vol, ske)

شکل ۱۴- امواج انبساطی و تراکمی خروجی و تحلیل رفتن آنها در حالت وجود سیال واسط مادون صوت

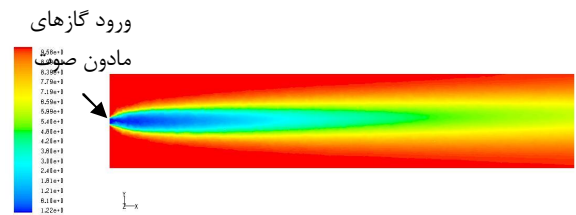


Velocity Vectors Colored By Density (kg/m3) FLUENT 6.0 (3d, segregated, mixture, ske)



Contours of Density (kg/m³) Feb 12, 2004 FLUENT 6.0 (3d, segregated, mixture, ske)

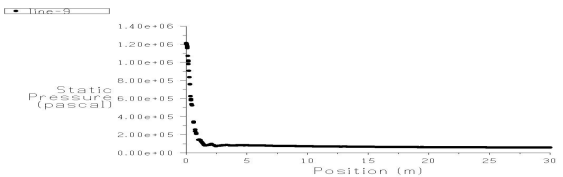
شکل ۸- اثر گرانش بر گازهای خروجی با سرعت کم در آب



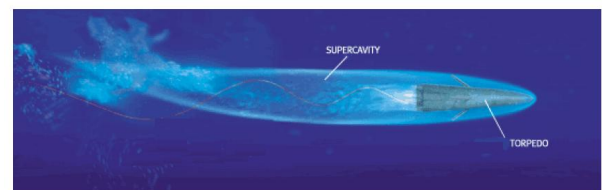
Contours of Density (kg/m³) FLUENT 6.0 (3d, segregated, mixture, ske)

شکل ۹- اثر گرانش بر جریان مادون صوت گاز با سرعت بالا درون

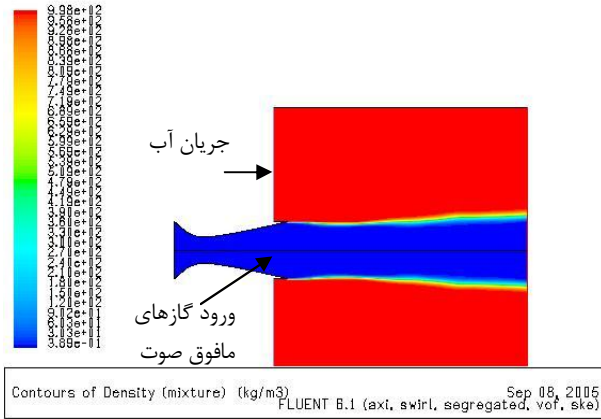
جریان آب



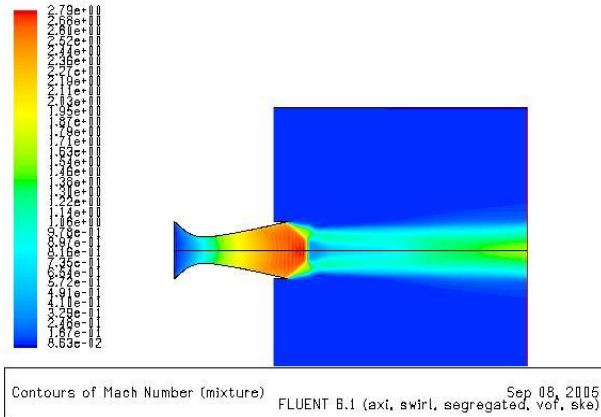
شکل ۱۰- فشار استاتیکی در امتداد محور مرکزی نازل در محیط برای جریان گاز تراکم ناپذیر درون آب



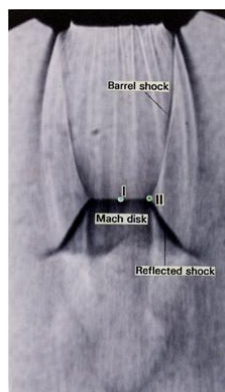
شکل ۱۵- عدد ماخ در امتداد محور مرکزی نازل ، در حالت وجود سیال واسط مادون صوت



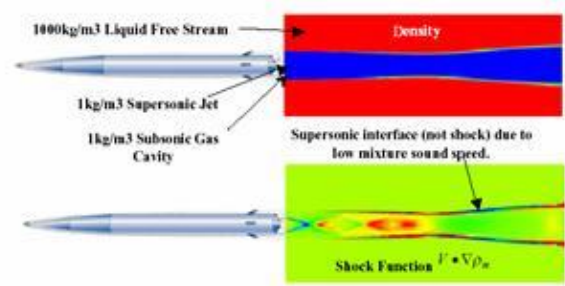
شکل ۱۹- حالت تماس مستقیم جریان مافوق صوت و آب



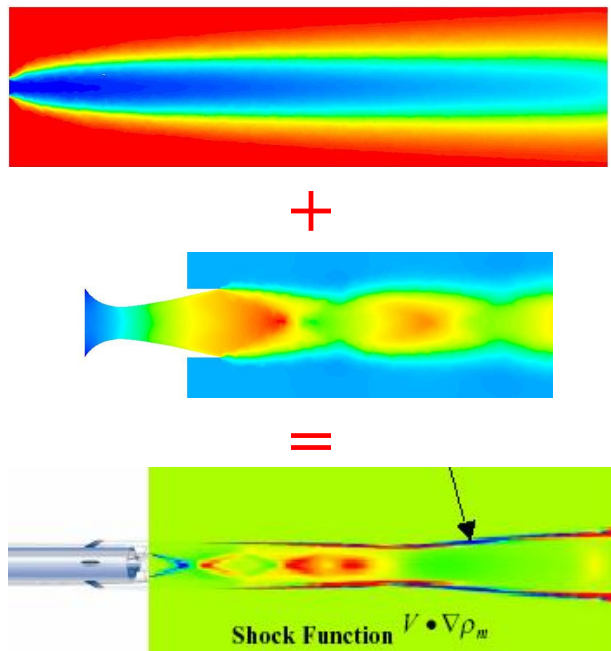
شکل ۲۰- تشکیل دیسک ماخ در پلوم در حالت تماس مستقیم جریان مافوق صوت و آب



شکل ۲۱- دیسک ماخ



شکل ۱۶- کارهای عددی صورت گرفته توسط دیگران بر روی تاثیر سیال واسط بر پلوم انتهایی

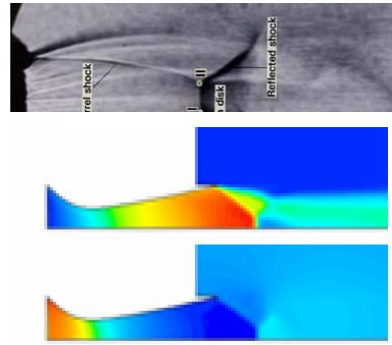


شکل ۱۷- جریان در حالت وجود سیال واسط مادون صوت ، شبیه به ترکیبی از جریان مافوق صوت خروجی در هوا و جریان تراکم ناپذیر گاز درون آب است .

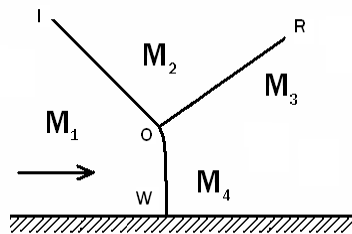


شکل ۱۸- اژدر SHKVAL





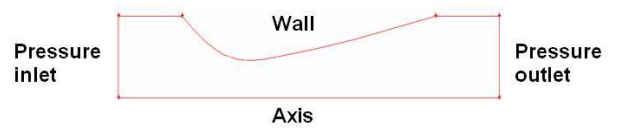
شکل ۲۲-مقایسه کیفی دیسک ماخ تجربی با دیسک ماخ بدست آمده از حل عددی



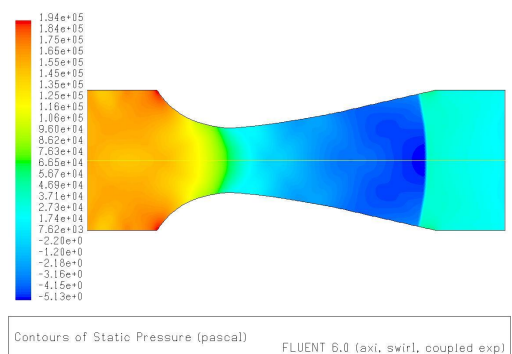
$$M_1, M_2, M_3 > 1$$

$$M_4 < 1$$

شکل ۲۳- رفتار جریان در عبور از دیسک ماخ



شکل ۲۴-هندسه و شرایط مرزی مساله وقوع شوک درون نازل



شکل ۲۵- نمایش شوک بوجود آمده در داخل نازل