

کاربرد ساختارهای متخلخل در کاهش شدت شوک ناشی از تراکم پذیری جریان سیال

مهدی یادگاری^۱، سید آرش سید شمس طالقانی^۲

۱ و ۲ پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه های فضاوردی

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۱۶

چکیده

تشکیل شوک ناشی از تراکم پذیری جریان بر روی سطح اجسام پرنده و تداخل این شوک با لایه مرزی باعث اثرات نامطلوبی مانند افزایش پسا و جدایش جریان می شود. در گذشته روش های مختلفی برای کاهش این اثرات از جمله، مولدهای گردابه، مکش سطح، دمش از سطح و.. پیشنهاد شده است. در این مقاله به بررسی عددی استفاده از روش ساختارهای متخلخل در کنترل و کاهش اثرات شوک پرداخته می شود. ساختارهای متخلخل با مکانیزم افزایش سطح عبور جریان و با ترکیب مکش و دمش باعث کاهش اثرات شوک می شوند. روش حل عددی در این مقاله روش حجم محدود، معادلات حل عددی معادلات ناویراستوکس و مدل هندسی ایرفویل NACA0012 می باشد. حل جریان به صورت آشفتنه و پایا در محدوده جریان گذر صوتی می باشد. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می دهد با کاهش اثرات شوک و کاهش پسا موجی، ضریب پسا کل با استفاده از سطح متخلخل حدود ۲۰ درصد و با استفاده از محیط متخلخل در حدود ۱۶ درصد کاهش می یابد. شوک تضعیف شده به نواحی بالادست ایرفویل و ابتدای سطح متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک با استفاده از سطح متخلخل از مقدار ۱/۳۹ به ۱/۲۴ کاهش پیدا کرده است. با کاهش اثرات تداخل شوک و لایه مرزی حباب جدایش نیز از ۰/۵۸ و تر ایرفویل به ۰/۷۸ تعویق پیدا می کند.

کلید واژه

ساختار متخلخل، کنترل جریان، کنترل شوک.

مقدمه

کاربرد وسیع و روزافزون محیط متخلخل در زمینه های مختلف از جمله تضعیف امواج آکوستیک در مواد متخلخل [۲]، اثرات محیط متخلخل در افزایش سرعت احتراق [۳]، کاهش آلاینده های سوختی در محیط متخلخل [۴]، استفاده از سازه های توده سنگی محیط متخلخل برای استحکام مصالح ساختمانی [۵]، استفاده گسترده از خاصیت محیط متخلخل در انتقال حرارت [۶] و کاربردهای گسترده در عایق سازی حرارتی، راکتورهای کاتالیزوری شیمیایی، فیلترهای صنعتی، واحدهای ذخیره انرژی، مبدل های حرارتی، مخازن نفتی و... قابل کتمان نیست. هدف عمده این مقاله بررسی استفاده از ساختار متخلخل در کاهش شوک ناشی از تراکم پذیری جریان سیال می باشد.

به طور کلی کنترل شوک و تقلیل اثرات نامطلوب ناشی از تداخل آن با لایه مرزی، یکی از زیر شاخه های مهم علم کنترل

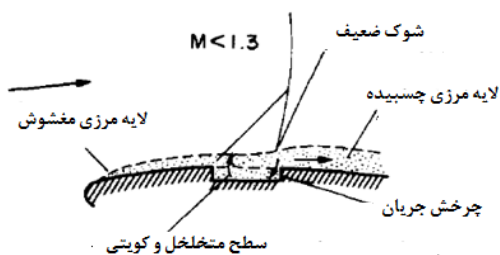
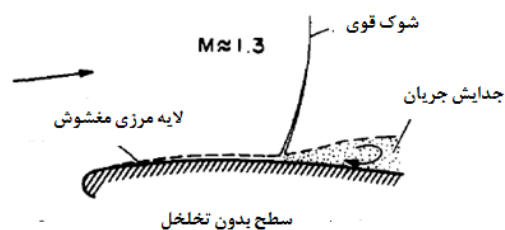
ماده متخلخل به ماده ای گفته می شود که شامل یک شبکه به هم پیوسته از خلل و فرج باشد که توسط هوا یا سیال دیگر پر شده باشد. بسیاری از مواد طبیعی مثل خاک یا بافت های بدن مثل غضروف، استخوان، ماهیچه مثال هایی از مواد متخلخل می باشند. خلل و فرج ها می توانند در اندازه بسیار بزرگ یا بسیار کوچک (اندازه مولکولی یا اتمی که میکروپور یا اولتراپورها نامیده می شوند) باشند. به طور کلی خلل و فرج ها در محیط متخلخل اشکال غیر متعارفی در اندازه و توزیع در سراسر شبکه متخلخل دارند. جریان سیال در درون محیط متخلخل یک مسئله بسیار چالش برانگیز است که به شکل هندسی پیچیده محیط بستگی دارد [۱].

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، mi.yadegari@gmail.com

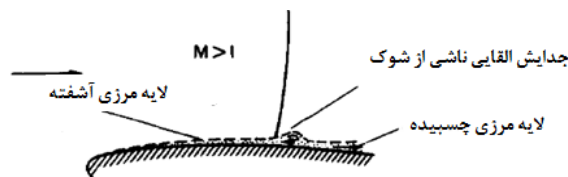
۲. استادیار، taleghani@ari.ac.ir (نویسنده مخاطب)

جریان می‌باشد. کنترل جریان کوششی است در جهت تغییر مشخصه یک سیال یا تغییر وضعیت میدان جریان به هر صورت دلخواهی که مد نظر باشد [۷]. یافتن راهکارهایی برای کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی را می‌توان به اوایل سال ۱۹۷۳ مربوط کرد. از این سال تاکنون تحقیقات و مطالعات گسترده با انواع روش‌های تجربی، تحلیلی و تئوری در این زمینه انجام شده است. این مطالعات بیشتر در محدوده جریان‌های گذر صوتی بوده است [۸].

شکل‌گیری شوک سبب ایجاد یک پسای فشاری اضافی به نام پسای موجی روی سطح ایرفویل می‌شود. همچنین شوک یک گرادیان فشار معکوس روی لایه مرزی تحمیل می‌کند. این پدیده منجر به جدایش جریان می‌شود. جدایش لایه مرزی مطابق شکل (۱) می‌تواند به شکل یک حباب باشد که با افزایش قدرت شوک گسترش می‌یابد. ناپایایی مربوط به جدایش شدید جریان نیز یکی دیگر از مشکلات ناشی از تداخل شوک و لایه مرزی می‌باشد که می‌تواند سطح بالایی از نوسانات نامنظم و جابجایی شوک را ایجاد کند که بسیار مخرب می‌باشد [۳].



شکل ۲. اثر کنترل غیرفعال محافظه و سطح متخلخل [۹]



شکل ۱. اثرات تداخل شوک و لایه مرزی [۹]

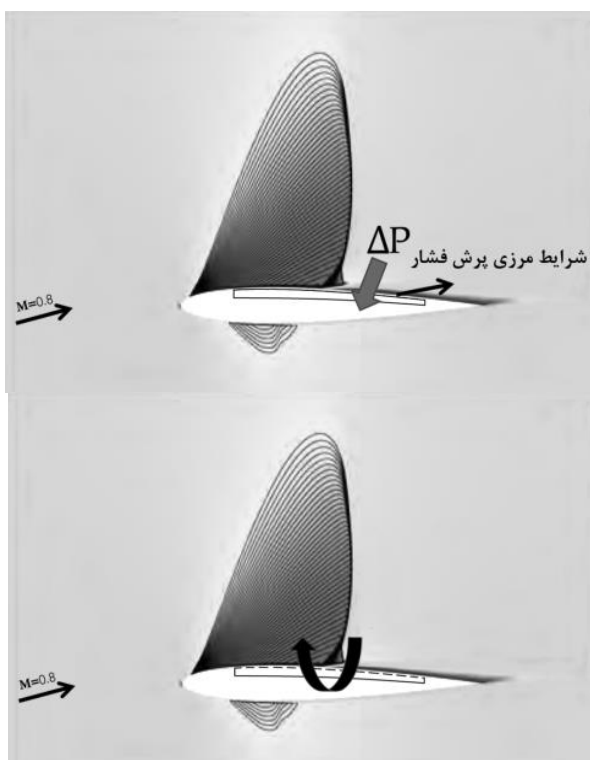
پس از ارائه اولین ایده توسط باشنل و وایتکامب، تحقیقات گسترده در زمینه استفاده از کنترل غیرفعال سطح متخلخل و بررسی آن در حالت‌ها و مدل‌های آزمایشی متعدد صورت گرفت، که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

بررسی تاثیر استفاده از سطح متخلخل روی پارامترهای آیرودینامیکی ایرفویل و بهبود این ضرایب [۱۱]، بررسی استفاده از سطح متخلخل روی ایرفویل در حوالی زاویه واماندگی و کاهش اثرات واماندگی [۱۲]، اثر کنترل غیرفعال بر نوسانات نامنظم ایرفویل و کاهش این نوسانات [۱۳]، حل عددی این روش کنترلی بر روی ایرفویل و تاثیر آن بر پارامترهای آیرودینامیکی و میدان جریان [۱۴]، بررسی عددی استفاده از این روش کنترلی بر روی ملخ هلیکوپتر به منظور کاهش صدای آن [۱۵]، بررسی تغییرات در ماهیت و محل شوک ضعیف شده در این روش کنترلی [۱۶]. با وجود مطالعات تجربی گسترده در زمینه استفاده از سطح متخلخل به عنوان کنترل غیرفعال در کاهش شدت شوک،

مطالعات تجربی نشان داده است که دمزش جریان از سطح، در زیر شوک، سبب افزایش در ضخامت لایه مرزی و کاهش در اصطکاک پوسته می‌شود. از طرف دیگر مکش تاثیر عکس دارد. اگر فقط دمزش در بالادست شوک انجام شود این کار نرخ رشد لایه مرزی نزدیک شوک را افزایش می‌دهد به نحوی که تعدادی شوک ضعیف‌تر به جای شوک اصلی تولید می‌کند؛ این پدیده منجر به کاهش پسا خواهد شد. از طرفی مکش لایه مرزی در پایین دست شوک سبب کاهش اندازه حباب جدایش می‌شود [۸].

اولین ایده برای کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی با استفاده از ساختارهای متخلخل توسط باشنل و وایتکامب^۱ در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شد. این ایده شامل یک سطح متخلخل و یک محافظه در زیر محل تداخل شوک و لایه مرزی بود (شکل (۲)). این روش نشان می‌دهد که تفاوت فشار استاتیکی در دو طرف

با توجه به اینکه قانون داری در محدوده جریان‌های مغشوش دقت کمتری دارد و همچنین این روش شبیه سازی عددی در مقابل مدل سازی هندسی ساختار متخلخل پدیده‌های فیزیک مسئله را به خوبی نشان نمی‌دهد، در مقاله حاضر مطابق شکل (۳) از مدل سازی هندسی ساختار متخلخل برای عبور جریان از سطح و محیط متخلخل به منظور کنترل پدیده شوک و تداخل آن با لایه مرزی استفاده می‌شود. در روش مدل‌سازی هندسی، سطح متخلخل در نرم افزار تولید هندسه، عیناً به صورت فضاها پر و خالی مدل می‌شود.



شکل ۳. مقایسه دو روش مدل سازی سطح متخلخل

روش و روند حل عددی

در این مسئله از نرم افزار فلوئنت که از روش حجم محدود استفاده می‌کند در حل عددی معادلات جریان بهره برده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویراستوکس می‌باشد. حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت ترکیبی^۳، گسسته سازی همه معادلات از مرتبه دو، رژیم جریان آشفته و از مدل اسپالارت آلماراس^۴ به عنوان مدل آشفتگی استفاده می‌شود. این مدل یک مدل تک معادله‌ای است که به منظور حل جریان‌های تراکم‌پذیر و مسائل هوافضایی توسعه داده شده است. مدل اسپالارت برای حل لایه مرزی شامل گرادیان فشار معکوس، جریان‌های گذر صوتی آشفته در مسائل پیچیده و همچنین جریان‌های جدا شده از سطح

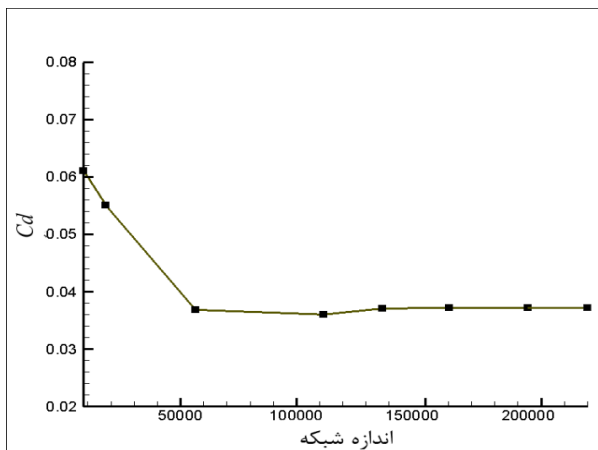
کمبود کارهای عددی در این حوزه احساس می‌شود، علاوه بر این استفاده از محیط متخلخل به جای سطح متخلخل می‌تواند ایده جدیدی در استفاده از ساختارهای متخلخل در کنترل جریان باشد. محیط متخلخل با مکانیزم افزایش سطح عبور جریان با حفظ ساختار و استحکام سازه‌ای (برخلاف سطح متخلخل) جسم پرنده، به کاهش اثرات شوک و جدایش ناشی از تداخل آن با لایه مرزی می‌پردازد.

به طور کلی جریان سیالات در محیط متخلخل یک پدیده بسیار پیچیده است و نمی‌توان آن را دقیقاً مشابه جریان‌های داخلی سیال در لوله‌ها یا کانال‌ها تعریف نمود. جریان سیالات در لوله‌ها یا کانال‌ها، به دلیل مشخص بودن مسیر جریان و طول آنها می‌تواند به سادگی به صورت تابعی از فشار بیان شود. در حالی که در محیط متخلخل غالباً به دلیل مبهم بودن مسیر جریان، اندازه‌گیری خواص جریان از پیچیدگی خاصی برخوردار است. علاوه بر این، مشکلات عدیده در همگرایی و شبکه‌سازی محیط متخلخل، سبب کمبود کارهای عددی در این حوزه شده است.

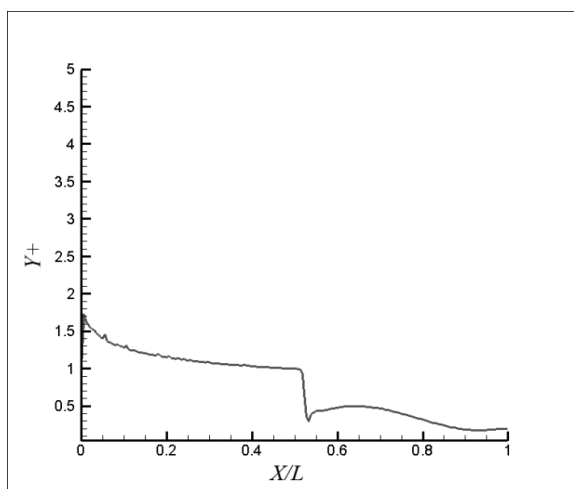
بسیاری از قوانین اصلی بر پایه مشاهدات تجربی پایه گذاری شده‌اند. در محیط‌های متخلخل قانون داری از معادلات اساسی است و اصول حرکت سیال در محیط‌های متخلخل بر پایه همین قانون استوار است. اساس قانون داری، یک آزمایش ساده است که در قرن نوزدهم توسط یک مهندس فرانسوی به نام هنری داری^۲ بر مبنای مشاهدات تجربی از حرکت آب در ماسه انجام گرفت. نتایج آزمایش داری به صورت یک مقاله در سال ۱۸۵۶ منتشر و بعدها به قانون داری معروف شد [۱۷]. هانسبو در سال ۱۹۶۰ [۱۸] و در ادامه میشل [۱۹] در سال ۱۹۷۶ نیز به انجام مطالعات تجربی بر روی انواع محیط متخلخل پرداختند که میشل با جزییات کامل و با در نظر گرفتن تمام جوانب، اعتبار قانون داری را مورد تایید قرار داد. قانون و در واقع فرمول داری مطابق رابطه (۱) شامل ضرایبی از مقاومت اینرسی و ویسکوز جریان در عبور از سطح متخلخل (K_1 و K_2) می‌باشد. در این فرمول تغییرات فشار و در واقع جهش فشار در عبور از سطح متخلخل با استفاده از ترم-های ویسکوز و اینرسی محاسبه و به شبیه سازی عبور جریان از سطح متخلخل پرداخته می‌شود. در استفاده از این روش برای شبیه سازی محیط متخلخل، معادلات حاکم بر مسئله (پیوستگی، مومنتوم و انرژی) از روش متوسط‌گیری حجمی به دست می‌آیند [۲۰].

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu u}{K_1} + \frac{\rho u^2}{K_2} \quad (1)$$

پس از بررسی استقلال حل عددی از شبکه مطابق شکل (۵) به بررسی تغییرات Y^+ به عنوان پارامتر معیار مدل سازی درست آشفتگی جریان مطابق شکل (۶) پرداخته می شود. همان طور که مشخص است Y^+ ، مخصوصاً "در نزدیکی شوک و جدایش جریان، در محدوده مناسب برای مدل آشفتگی اسپالارت آلماراس قرار دارد.



شکل ۵. بررسی استقلال از شبکه با بررسی ضریب پسا



شکل ۶. بررسی تغییرات Y^+ روی سطح بالایی ایرفویل

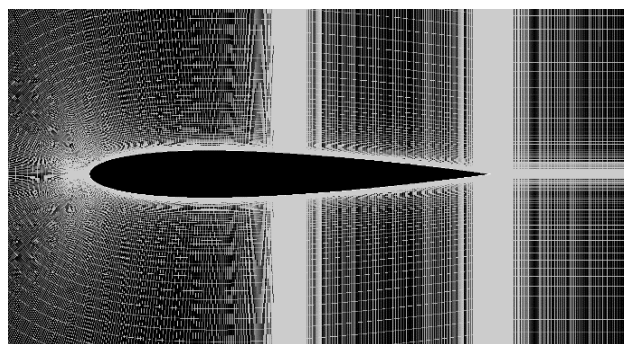
مقایسه نتایج حل عددی با حل تجربی مطابق جدول (۱) می باشد. یکی از علل اختلاف بین نتایج این تحقیق و نتایج تجربی خطا حل عددی می باشد. از جمله خطاهای عددی می توان به مواردی چون استفاده از مدل سازی آشفتگی، تاحدودی افزایش کجی^۶ و ضریب منظری^۷ شبکه در نواحی بالادست ایرفویل، خطای دیفیوژن عددی (که در هر حل عددی موجود است)، خطای گرد کردن کامپیوتر و خطای پراکندگی^۸ (که مختص گسسته سازی مرتبه ۲ است) اشاره کرد. علاوه بر این موارد در کار تجربی و ابزار آلات تجربی نیز خطاهایی مانند خطای سیستماتیک،

جواب های خوب و قابل قبولی ارائه می دهد [۲۱]. با توجه به هندسه ایرفویل و زاویه حمله کم آن، پدیده های پیچیده آشفتگی مانند ریزش گردابه^۵ در آن مشاهده نمی شود. بنابراین با در نظر گرفتن هزینه زمانی و محاسباتی کمتر این مدل به عنوان مدل آشفتگی انتخاب می شود. در این تحقیق ابتدا به اعتباردهی روش حل عددی برای مدل آزمایشی ایرفویل بدون کنترل پرداخته می شود؛ پس از آن به اعتباردهی روش حل عددی برای مدل آزمایشی سطح متخلخل و محیط متخلخل قرار گرفته در مسیر جریان با مقایسه با نمونه های تجربی موجود پرداخته می شود. پس از اطمینان از روش حل عددی، کنترل تداخل شوک و لایه مرزی با سطح متخلخل و محیط متخلخل مورد بررسی قرار می گیرد.

نتایج اعتباربخشی عددی

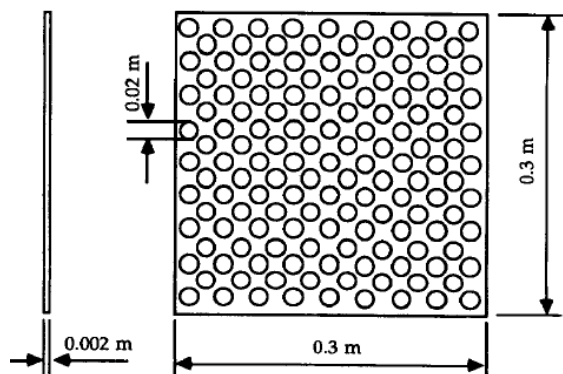
ایرفویل NACA0012 یکی از پر کاربردترین مدل های ایرفویل در آزمایش های تجربی است و آزمایش های متعددی با اعداد ماخ و شرایط جریان متفاوت بر روی آن انجام شده است و اطلاعات آن موجود است. از جمله این آزمایش های تجربی می توان به نتایج هریس [۲۲] در محدوده جریان گذر صوتی اشاره کرد. در این قسمت از مقاله به منظور اعتبار بخشی به روش حل عددی به مقایسه نتایج با آزمایش های تجربی انجام شده توسط هریس با عدد ماخ ۰/۸ و زاویه حمله ۲/۲۶ پرداخته می شود. علت انتخاب این عدد ماخ و زاویه حمله، به دست آمدن شوک عمود روی سطح مکش ایرفویل می باشد.

در این حل عددی با توجه به آزمایش تجربی هریس، پارامترهای جریان به نحوی تنظیم می شود که عدد رینولدزی معادل ۹ میلیون به دست آید. شبکه استفاده شده برای این حل عددی شبکه با سازمان با ریز شدن شبکه در محل شوک و ریز شدن شبکه در نزدیکی دیواره و تعداد سلول ۲۰۰/۰۰۰ مطابق شکل (۴) می باشد.

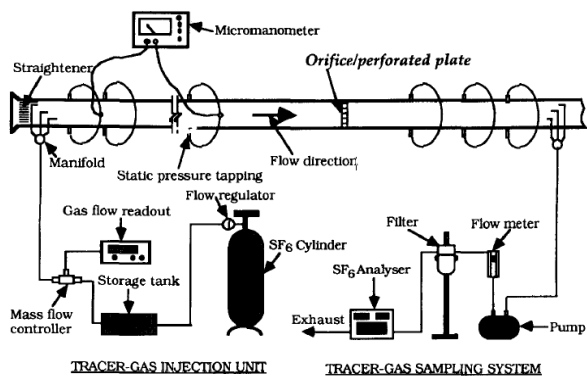


شکل ۴. شبکه استفاده شده حول ایرفویل

در این بخش به بررسی عددی تغییر و پرش فشار در عبور جریان از سطح متخلخل و مقایسه آن با نتایج آزمایش‌های تجربی گواهی‌گان مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) پرداخته می‌شود [۲۳]. شدت تخلخل سطح در این آزمایش ۵۰ درصد، در نظر گرفته شده است.

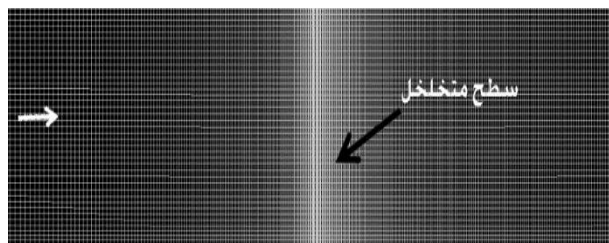


شکل ۹. مقطع استفاده شده برای نمونه تجربی سطح متخلخل [۱۸]



شکل ۱۰. آزمایش تجربی سطح متخلخل در مسیر جریان [۱۸]

شبهه سازی سطح متخلخل به روش مدل سازی هندسی صورت گرفته و شبکه مورد بررسی به صورت باسازمان با تعداد ۳۵/۰۰۰ سلول به صورت دوبعدی مطابق شکل (۱۱) می‌باشد.



شکل ۱۱. شبکه حل عددی سطح متخلخل در مسیر جریان

پارامترهای جریان به منظور انطباق با آزمایش تجربی به صورتی تنظیم می‌شود که مقدار رینولدز جریان ۳۲۰/۰۰۰ به دست

اثر دیواره تونل و... وجود دارد که مجموع این عوامل باعث اختلاف بین نتایج عددی و تجربی می‌شود.

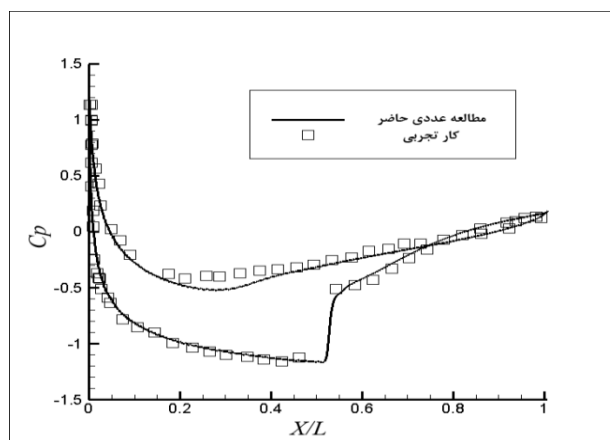
جدول ۱. مقایسه ضرایب آیرودینامیکی (ماخ ۰/۸، زاویه حمله ۲/۲۶)

	C d	C n
نتایج تجربی هریس [۲۴]	۰/۰۳۳۱	۰/۳۹
گزارش حل عددی حاضر	۰/۰۳۷	۰/۳۴۷
درصد خطای حل عددی	٪۱۰	٪۱۲

کانتور عدد ماخ برای این حل عددی مطابق شکل (۷) و مقایسه ضریب فشار با نمونه تجربی مطابق شکل (۸) می‌باشد. نتایج این بخش تشکیل شوک نرمال قوی، روی مرکز ایرفویل را به خوبی نشان می‌دهد.

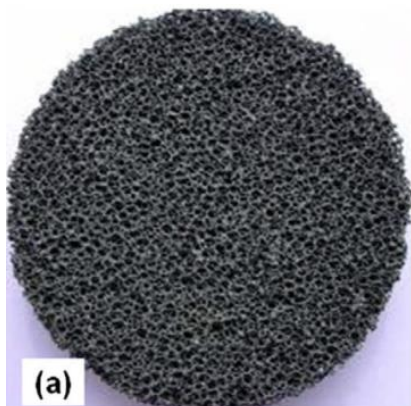


شکل ۷. کانتور عدد ماخ (ماخ ۰/۸، زاویه حمله ۲/۲۶)

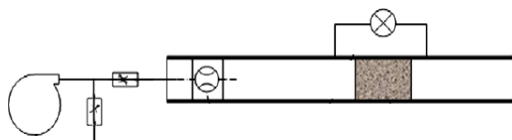


شکل ۸. مقایسه ضریب فشار با نتایج تجربی (ماخ ۰/۸، زاویه حمله ۲/۲۶)

حرارت و افت فشار در عبور جریان از فوم سرامیکی به عنوان محیط متخلخل مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵) پرداختند.



شکل ۱۴. فوم کریستالی استفاده شده در آزمایش تجربی [۶]



شکل ۱۵. آزمایش تجربی محیط متخلخل در مسیر جریان [۶]

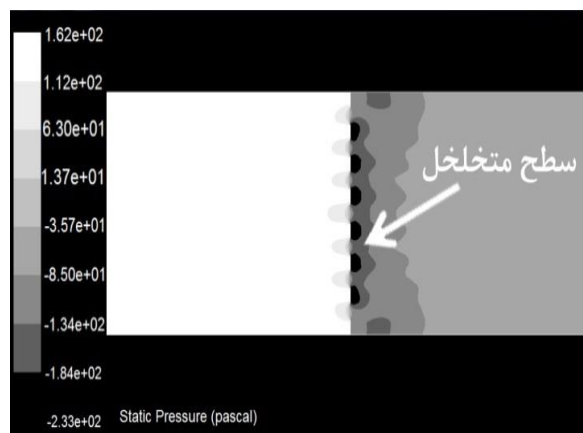
مشکلی که در این بخش در مدل سازی برای حل عددی محیط متخلخل وجود دارد، معادل سازی دو بعدی محیط متخلخل سه بعدی است. بهترین راه برای این معادل سازی استفاده از ریزدانه‌هایی با قطری معادل با سلول‌های تشکیل دهنده محیط متخلخل سه بعدی می‌باشد. ناکامایا [۲۴] در پژوهشی به بررسی قطر معادل ساختارهای مختلف محیط متخلخل به منظور استفاده در محاسبه عدد رینولدز در محیط متخلخل پرداخته و فرمولی برای آن به صورت رابطه (۲) ارائه کرده است:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{32k_1}{\varepsilon}} \quad (2)$$

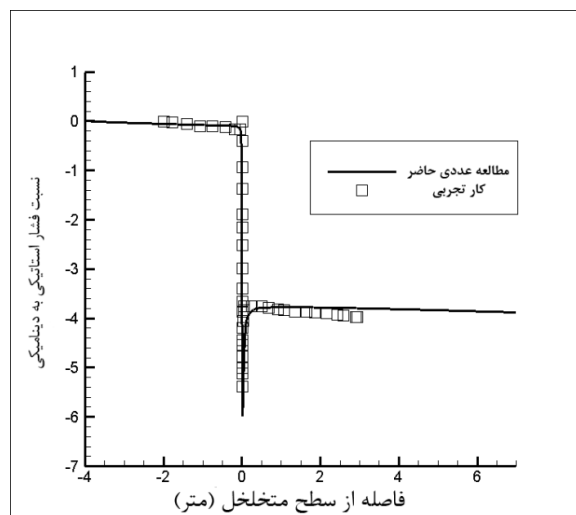
در این فرمول K_1 ضریب ویسکوز در عبور سیال از محیط متخلخل و ε ضریبی معادل برای ساختار محیط متخلخل است، که ناکامایا از آن استفاده کرده است. قطر به دست آمده از این فرمول برای محیط متخلخل مورد نظر، به عنوان قطر معادل برای ریزدانه‌های دوبعدی لحاظ می‌شود.

با توجه به نتایج تجربی، مقادیر K_1 و K_2 مطابق رابطه (۱) برای محیط متخلخل مورد بررسی، به ترتیب $5/52 \times 10^{-5}$ و $4/23 \times 10^{-4}$ می‌باشد. مدل سازی دوبعدی محیط متخلخل با استفاده از آرایش ریزدانه‌ها با قطر $1/55$ میلیمتر و با شدت تخلخل $0/7$ مطابق آزمایش تجربی صورت گرفته است. شبکه مورد بررسی به

آید. پس از حل عددی و انطباق و مقایسه نتایج عددی و تجربی، کانتور فشار مطابق شکل (۱۲) و نمودار تغییرات نسبی فشار مطابق شکل (۱۳) به دست می‌آید.



شکل ۱۲. کانتور فشار حل عددی سطح متخلخل در مسیر جریان



شکل ۱۳. مقایسه نتایج عددی و تجربی سطح متخلخل در مسیر جریان

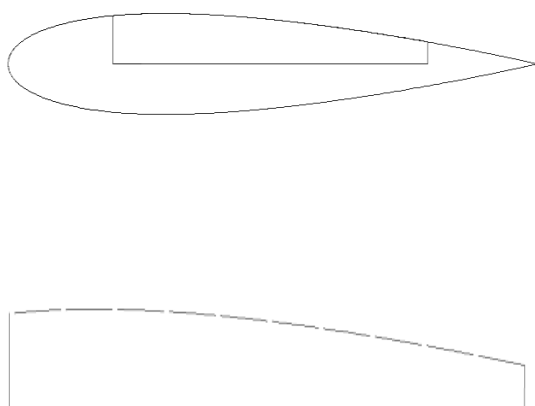
نتایج به دست آمده در این بخش انطباق خوبی بین نتایج تجربی و حل عددی دارد و اختلاف کم بین نتایج، به دلیل مدل سازی دو بعدی در شبیه سازی عددی می‌باشد. به طور کلی در مدل سازی دو بعدی پدیده‌های سه بعدی اثر رهایی جریان وجود دارد که بر خلاف جریان دوبعدی، به جریان سه بعدی اجازه حرکت در راستای سوم را نیز می‌دهد. بنابراین این مقدار اختلاف در مدل سازی دوبعدی جریان سه بعدی قابل انتظار است.

به منظور اعتبار بخشی به مدل سازی عددی عبور جریان از محیط متخلخل، از آزمایش‌های تجربی ژیونگ و همکارانش [۶] استفاده می‌شود. ژیونگ و همکارانش در این کار عددی به محاسبه ضرایب مقاومت اینرسی و ویسکوز و بررسی انتقال

نتایج به دست آمده در این بخش انطباق بسیار خوب و با خطای کم نتایج تجربی و حل عددی را نشان می دهد. با اطمینان از روش حل عددی که تا این قسمت به دست آمد به بررسی عددی کنترل تداخل شوک و لایه مرزی با استفاده از سطح متخلخل و محیط متخلخل پرداخته می شود

کنترل شوک با استفاده از سطح متخلخل

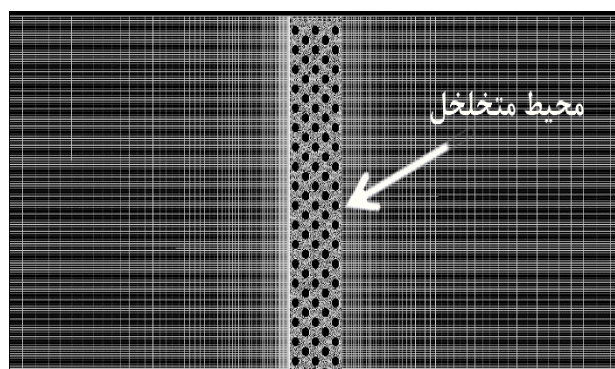
شرایط جریان و نمونه هندسی ایرفویل NACA0012 قرار گرفته در جریان با عدد ماخ 0.8 و رینولدز 9 میلیون و با زاویه حمله $2/26$ می باشد. محل قرارگیری محافظه و سطح متخلخل مطابق شکل (۱۹) حد فاصل نرمال شده بین 0.2 تا 0.8 طول واحد وتر ایرفویل، عمق محافظه به اندازه نصف ضخامت محلی ایرفویل و میزان تخلخل سطح $2/5$ درصد لحاظ شده است. سطح متخلخل دارای 10 حفره با قطر تقریبی 0.006 و با فاصله 0.054 طول واحد وتر ایرفویل مطابق شکل (۱۹) می باشد.



شکل ۱۹. محل قرارگیری محافظه و شکل سطح متخلخل

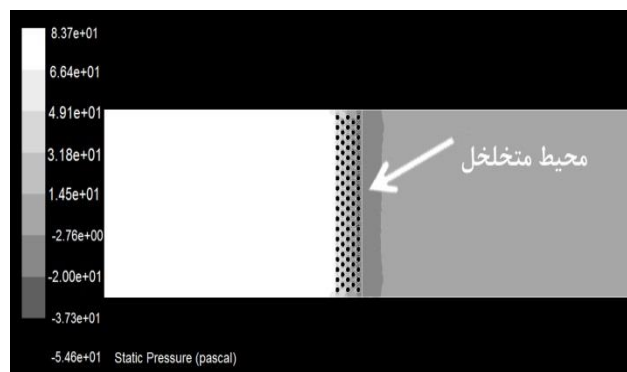
کانتور عدد ماخ به دست آمده در این بخش شکل (۲۰) و نمودارهای ضریب فشار و ضریب اصطکاک شکل (۲۱) و شکل (۲۲) نشان دهنده برهم خوردن و از بین رفتن اثرات شوک اولیه شکل (۷) و کاهش قدرت آن با استفاده از این روش کنترلی می باشد. شوک تضعیف شده در این بخش به نواحی بالادست ایرفویل و ابتدای سطح متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک از مقدار $1/39$ به $1/24$ کاهش پیدا کرده است.

صورت بلوک بندی شده با شبکه بی سازمان بسیار ریز در اطراف ریزدانه های متخلخل و شبکه با سازمان در مابقی دامنه حل با مجموع تعداد 34648 سلول مطابق شکل (۱۶) می باشد.

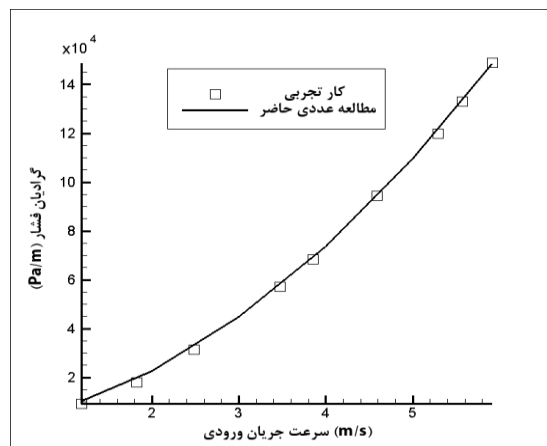


شکل ۱۶. شبکه حل عددی محیط متخلخل در مسیر جریان

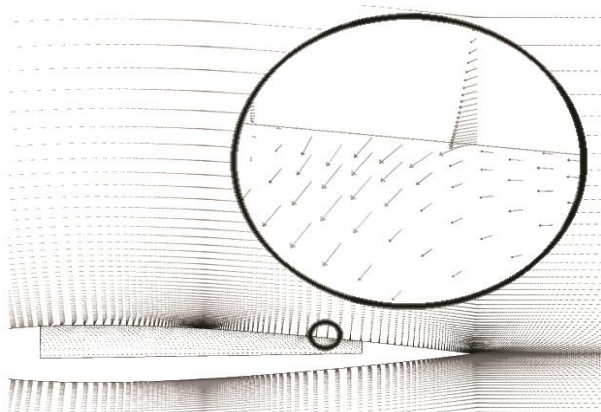
کانتور فشار برای این حل عددی در حالت سرعت ورودی 4 متر بر ثانیه مطابق شکل (۱۷) و مقایسه نتایج تجربی و عددی با بررسی نمودار تغییرات گرادیان فشار در برابر سرعت ورودی مطابق شکل (۱۸) می باشد.



شکل ۱۷. کانتور فشار حل عددی محیط متخلخل در مسیر جریان



شکل ۱۸. مقایسه نتایج عددی و تجربی محیط متخلخل در مسیر جریان



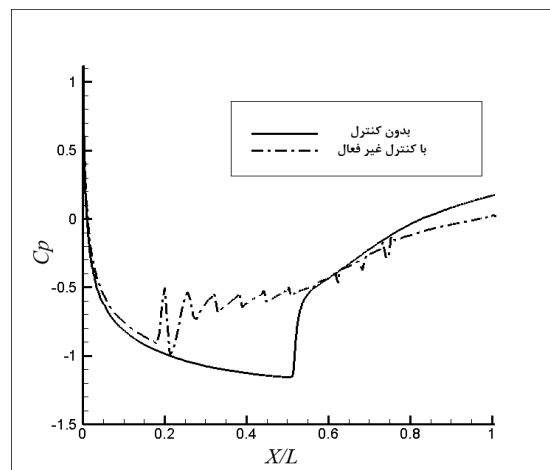
شکل ۲۳. بردارهای سرعت و چرخش جریان داخل محفظه

به منظور بررسی اثر این روش کنترلی بر حباب ناشی از تداخل شوک و لایه مرزی در پایین دست شوک، خطوط جریان در نواحی اطراف ایرفویل و نواحی جدایش رسم می‌شود. تشکیل حباب در پایین دست شوک شکل (۲۴) نشان دهنده چرخش جریان در این ناحیه می‌باشد. ترکیب این حباب با گرادیان فشار نامطلوب سطح می‌تواند منجر به جدایش شدید جریان شده و اثرات نامطلوب کاهش شدید ضریب برآ، افزایش ضریب پسا، تحمیل ناپایایی به جریان، ایجاد نوسانات نامنظم و اثرات نامطلوب سازه‌ای ایجاد کند. این حباب تقریباً از ناحیه 0.58 طول واحد وتر ایرفویل شروع می‌شود. حرکت این حباب به نواحی بالادست، اثرات نامطلوب آن را بیشتر می‌کند. در حالت ایرفویل همراه با کنترل، مکش جریان در پایین دست شوک، بازگشت جریان و ناحیه حباب را از بین برده و باعث تعویق آن به نواحی پایین دست (تقریباً 0.78 طول واحد وتر ایرفویل) مطابق شکل (۲۴) می‌شود. در واقع این روش کنترلی حباب را به پایین‌ترین ناحیه سطح متخلخل منتقل می‌کند. شکل (۲۴) همچنین ضخیم شدن لایه مرزی ناشی از مکش و دمش را که منجر به تغییر هندسه می‌شود نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد این تغییر هندسه در ناحیه شوک، باعث تشکیل تعدادی شوک ضعیف‌تر به جای شوک قوی اولیه در این ناحیه می‌شود.

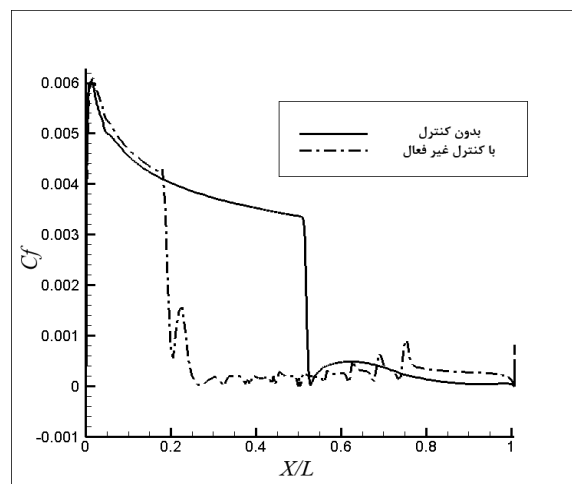
مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در حالت ایرفویل با کنترل سطح متخلخل و بدون کنترل مطابق جدول (۲)، نشان دهنده کاهش ضریب پسا در حدود ۱۹ درصد می‌باشد. این کاهش ضریب پسا به دلیل کاهش اثرات و شدت شوک، در نتیجه کاهش پسا موجی اتفاق می‌افتد. البته اثر از بین رفتن شوک و کاهش پسا، کاهش ضریب برآ می‌باشد که با مطالعه پارامتریک هندسه سطح متخلخل (مانند شدت تخلخل، محل قرارگیری سطح متخلخل، طول و عرض سطح متخلخل و ...) می‌توان آن را بهبود بخشید، همچنین



شکل ۲۰. کانتور عدد ماخ بعد از کنترل غیرفعال



شکل ۲۱. تغییرات ضریب فشار با استفاده از کنترل غیرفعال سطح متخلخل

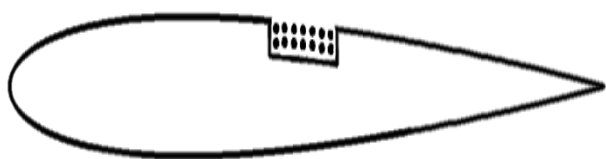


شکل ۲۲. تغییرات ضریب اصطکاک با استفاده از کنترل غیرفعال سطح متخلخل

بردارهای سرعت در داخل محفظه شکل (۲۳) چرخش جریان و پدیده مکش و دمش را که نقش اصلی در کنترل شوک و تقلیل اثرات ناشی از آن در این روش کنترلی را دارد، به خوبی نشان می‌دهد.

کنترل شوک با استفاده از محیط متخلخل

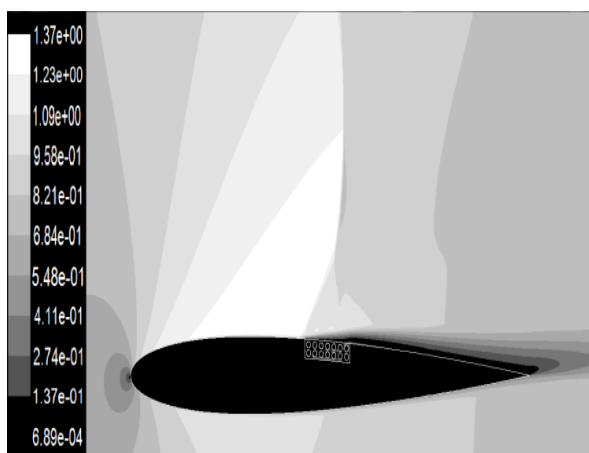
در این بخش نیز شرایط جریان و نمونه هندسی ایرفویل NACA0012 قرار گرفته در جریان با عدد ماخ 0.8 و رینولدز 9 میلیون و با زاویه حمله $2/26$ می باشد. محل قرارگیری محیط متخلخل مطابق شکل (25) حد فاصل نرمال شده بین 0.45 تا 0.55 طول وتر ایرفویل، عمق محیط متخلخل 0.25 ضخامت محلی ایرفویل، میزان تخلخل 68 درصد با ریزدانه های به قطر 10 میلی متر لحاظ شده است.



شکل 25. محل قرارگیری محیط متخلخل در زیر ایرفویل

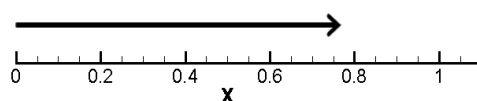
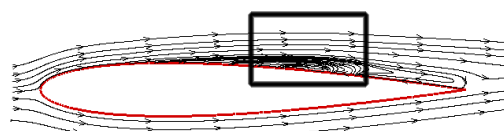
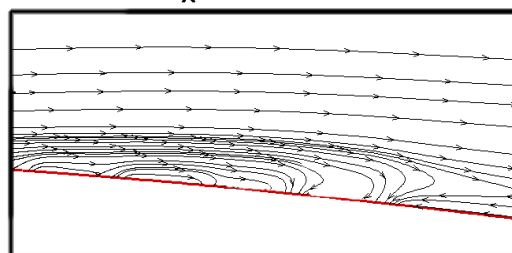
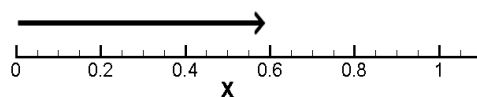
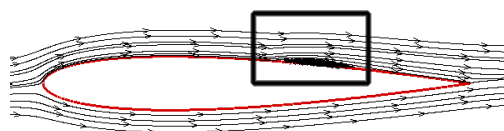
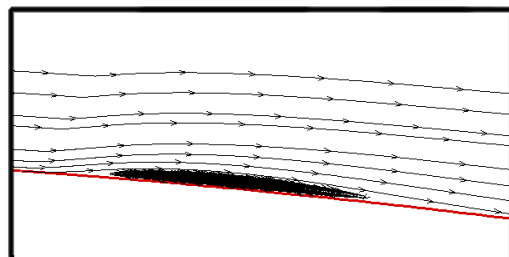
کانتور عدد ماخ به دست آمده در این بخش شکل (26) و نمودارهای ضریب فشار و ضریب اصطکاک شکل های (27) و (28) نشان دهنده برهم خوردن و از بین رفتن اثرات شوک اولیه شکل (7) و کاهش قدرت آن با استفاده از این روش کنترلی می باشد. شوک تضعیف شده در این بخش نیز به نواحی بالادست و ابتدای سطح متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک از مقدار $1/39$ به $1/37$ کاهش پیدا کرده است.

بردارهای سرعت و خطوط جریان در داخل محیط متخلخل نیز مطابق شکل (29) چرخش جریان و حرکت نامنظم جریان در داخل محیط متخلخل را به خوبی نشان می دهد.



شکل 26. کانتور عدد ماخ بعد از کنترل غیرفعال

در استفاده از این روش بر روی نمونه های دیگر (مانند ایرفویل سوپرکریٹیکال) می توان حتی ضریب برآ را تا حدود 20 درصد افزایش داد [12]. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده در این بخش تطابق خوبی با نتایج پژوهش های قبلی که به مدل سازی کنترل جریان توسط سطح متخلخل پرداخته اند، داشته است [25].



شکل 24. اثر روش کنترلی بر جدایش (شکل های بالا بدون کنترل جریان و شکلهای پایین با کنترل)

جدول 2. نتایج حل عددی با کنترل غیرفعال سطح متخلخل

	Cd	Cn
ضرایب با کنترل غیرفعال سطح متخلخل	0.030	0.161
ضرایب بدون کنترل غیرفعال	0.037	0.147

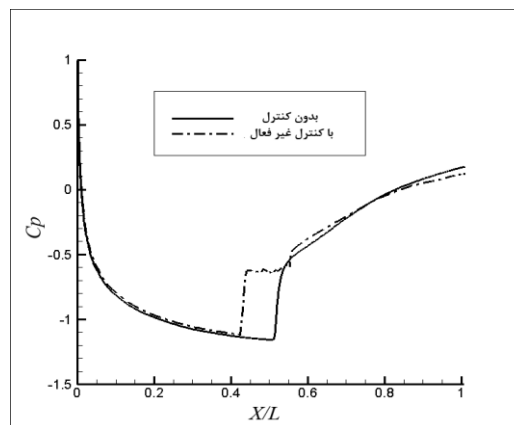
مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در حالت ایرفویل با کنترل غیرفعال محیط متخلخل و بدون کنترل غیرفعال مطابق جدول (۳) نشان دهنده کاهش ضریب پسا در حدود ۱۶ درصد می‌باشد. در این بخش نیز این کاهش ضریب پسا به دلیل کاهش اثرات و شدت شوک و در نتیجه آن کاهش پسا موجی حادث می‌شود. در اینجا نیز توان این از بین رفتن اثرات شوک کاهش ضریب برآ می‌باشد.

جدول ۳. نتایج حل عددی با کنترل غیرفعال محیط متخلخل

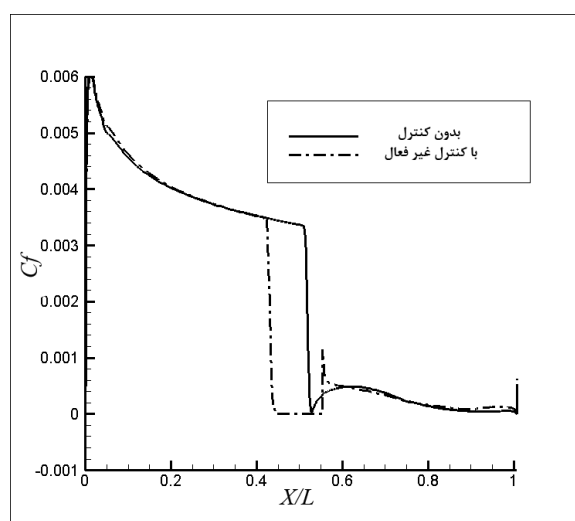
	Cd	Cn
ضرایب با کنترل غیرفعال سطح متخلخل	۰/۰۳۲	۰/۲۵۳
ضرایب بدون کنترل غیرفعال	۰/۰۳۷	۰/۳۴۷

بحث و نتیجه‌گیری

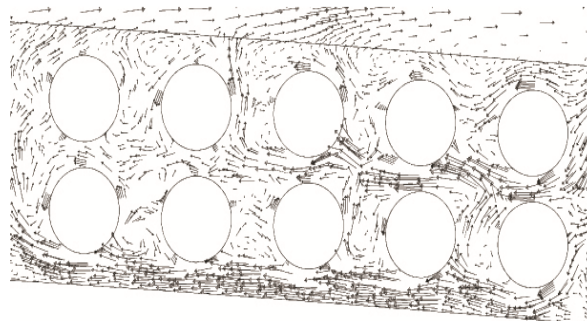
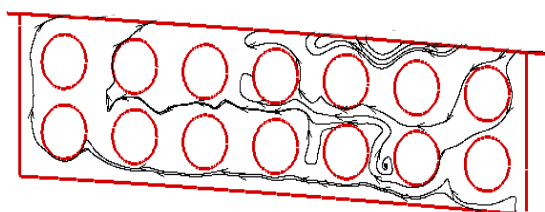
در این تحقیق به مدل‌سازی عددی استفاده از ساختارهای متخلخل در کاهش اثرات شوک و اثرات تداخل شوک و لایه مرزی پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد، ساختارهای متخلخل با مکانیزم افزایش سطح عبور و با ترکیب مکش و دمش که منجر به تغییر هندسه سطح می‌شود، اثرات شوک و گردایان شدید مشخصه‌های جریان ناشی از آن را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد با کاهش اثرات شوک، یکنواخت شدن توزیع فشار بر روی سطح و کاهش پسای موجی ضریب پسای کل با استفاده از سطح متخلخل حدود ۲۰ درصد و با استفاده از محیط متخلخل در حدود ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین شوک تضعیف شده به نواحی بالادست ایرفویل و ابتدای سطح متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک با استفاده از سطح متخلخل از مقدار ۱/۳۹ به ۱/۲۴ کاهش پیدا می‌کند. با کاهش اثرات تداخل شوک و لایه مرزی حباب جدایش از ۰/۵۸ و تر ایرفویل به ۰/۷۸ تعویق پیدا می‌کند. در این تحقیق همچنین به اعتباربخشی روش مدل‌سازی هندسی ساختار متخلخل پرداخته شد. مدل‌سازی هندسی ساختارهای متخلخل در مقابل استفاده از شرایط مرزی پرش فشار، در دادن دید فیزیکی بهتر از جریان در ساختار متخلخل در این روش کنترلی بسیار کمک می‌کند. همچنین نشان داده شد که توان این کاهش اثرات شوک، کاهش ضریب برآ می‌باشد که می‌توان با مطالعه پارامتریک پدیده این کاهش برآ را حداقل کرد.



شکل ۲۷. تغییرات ضریب فشار با استفاده از کنترل غیرفعال محیط متخلخل



شکل ۲۸. تغییرات ضریب اصطکاک با استفاده از کنترل غیرفعال محیط متخلخل



شکل ۲۹. بردارهای سرعت اطراف ریزدانه‌ها

علائم و اختصارات

C_L	ضریب برآ
C_D	ضریب پسا
C_f	ضریب اصطکاک سطح
C_p	ضریب فشار
L/D	نسبت نیروی برآ به پسا
X/L	طول بی بعد شده نسبت به وتر ایرفویل

پی نوشت

1. Bushnell & Whitecomb
2. Darcy
3. Couple
4. Spallart Allmaras
5. Vortex Shedding
6. Skewness
7. Aspect Ratio
8. Dissipation

مراجع

- 1155.
12. Krogmann, P., E. Stanewsky, and P. Theide. 1985. Effect of suction on shock/boundary layer interaction and shock induced separation. *J. Aircr* 22: 37-42.
13. Raghunathan, S. 1987. Pressure fluctuation measurements with passive shock/boundary layer control. *AIAA J.* 25 (4): 626-628.
14. Doerfeer, P., O. Szulc, 2006. Shock Wave Smearing By Wall Perforation. *Arch Mech* 58, 6.
15. Doerfeer, P., O. Szulc. 2010. Passive Control Of Shock Wave Applied To Helicopter Rotor High-Speed Impulsive Noise Reduction. *Institute of fluid-flow machinery Polish Academy Of Sciences* 3: 297-305.
16. Nagamatsu, H. T., R. Dyer, N. Troy, R.V. Ficarra .1985. Supercritical airfoil drag reduction by passive shock wave/boundary layer control in the Mach number range 0.754. *AIAA* 85-0207.
۱۷. ریاضی، محمدرضا و سایه وزیرنیا. ۱۳۸۸. آشنایی با مهندسی مخازن نفت و گاز. تهران: دانشگاه صنعتی شریف، نشر دانشگاه صنعتی شریف.
18. Hansbo .S ,1960. Consolidation of clay with special Reference to Influence of vertical Sand Drains. Swedish Geotechnical Institute ,Poc.
19. Mitchell J. K. 1976. Fundamentals of Soil Behavior. Wiley, New York.
۲۰. حیرانی نوبری، محمدرضا، و بهاره قانلی. ۱۳۸۴. شبیه سازی عددی جریان در حال توسعه در محیط متخلخل محصور بین دو صفحه موازی جامد با تخلخل ثابت و تخلخل متغیر. سیزدهمین کنفرانس بین المللی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
۲۱. شجاعی فرد، محمد حسن ، و مجتبی طحانی. ۱۳۹۱. مقدمه ای بر جریان های آشفته و مدل سازی های آن. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
22. Harris, C. D. 1981. Two-dimensional aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil. in the Langley 8-foot transonic pressure tunnel. NASA Technical Memorandum 81927.
23. Guohui, G, and Saffa B. 1997. Pressure Loss Characteristics Of Orifice And Perforated Plates. *Experimental Thermal and Fluid Science* 14 (2): 160–165.
24. Nakayama A, F. Kuwahara, Y. Sano. 2007. Concept of equivalent diameter for heat and fluid flow in porous media. *AICHE J* 53(3).
۲۵. یادگاری، مهدی، آرش شمس طالقانی و خدایار جوادی ۱۳۹۳. کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی با محفظه و سطح متخلخل. بیست و دومین کنفرانس بین المللی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱. طحان منش، محمدرضا، و سید محمود ابوالحسن علوی. ۱۳۹۰. شبیه سازی عددی جریان خطی سیال در محیط متخلخل ،اولین همایش ملی شبیه سازی سیستم های مکانیک، اهواز.
2. Biot M.A. 1956. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, a: Low-frequency Range & High-frequency Range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 168-191.
3. Yoshizawa, Y., K. Sasaki, and R. Echigo. 1988. Analytical Study the Structure of Radiation Controlled Flame. *Int. J. HeatMass Transfer* 31: 311-319.
4. Zhou, X. Y., and J. C. F. Pereira. 1997. Numerical Study of Combustion and Pollutions Formation in Inert Non Homogenous Porous Media. *Combustion Science Technology* 130: 335-364.
5. Tsinker, Gregory. P. 2004. Port Engineering; Planning Construction. *Maintenance and Security, John Wiley & Sons, Inc., N J.*
6. Zhiyong, W,b., C. Caliot, F. Bai, G. Flamant, Z. Wang, J. Zhang, C. Tian. 2009. Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications. *Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing, China*
7. Mohamed Gad. 1996. modern Developments In Flow Control. *Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Appeared in Applied Mechanics Reviews* 49: 365–379.
8. Inger, G. R. and S. Zee. 1978. Transonic shock wave/turbulent boundary layer interaction with suction or blowing. *J. Aircr.* 15 (11): 750-754.
9. Raghunathan, S. 1988. Passive Control of Shock-Boundary Layer Control. *Aerospace Sci* 25: 271-296.
10. Bahi, L. 1982. Passive shock wave/boundary layer control for transonic supercritical airfoil drag reduction. Ph.D. dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
11. Mabey, D. G. 1971. Flow unsteadiness and model vibration in wind tunnels at subsonic and transonic speeds. *ARC CP*