# مطالعه پارامتریک کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی یک ایرفویل با محیط متخلخل در جریان گذر صوتی

مهدی یادگاری و سید آرش سید شمس طالقانی

پژوهشگاه هوافضا وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۸)

#### چکیدہ

تشکیل شوک ناشی از تراکم پذیری جریان 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 و دمش استفاده شده است. در این مقاله، به بررسی عددی استفاده از محیط متخلخل در کنترل و کاهش اثرات شوک پرداخته می شود. محیط متخلخل با مکانیزم افزایش سطح عبور جریان و با ترکیب مکش و دمش باعث کاهش اثرات شوک می شود. روش عددی در این مقاله حجم محدود، معادلات ناویر – استوکس و مدل هندسی ایرفویل اثرکت معق، طول، شدت تخلخل و طریان به صورت آشفته و ایستگاهی در محدوده جریان گذرصوتی انجام گرفته است. در این کار عددی به بررسی اثرات عمق، طول، شدت تخلخل و قطر ریزدانه محیط متخلخل و همچنین اثر زاویه حمله بر این روش کنترلی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می دهد که با کاهش اثرات شوک وکاهش پسای موجی ضریب پسای کل با استفاده از محیط متخلخل حدود ۲۰ درصد کاهش می ابد. شوک تضعیف شده به نواحی بالادست ایرفویل و ابتدای محیط متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پست می فرد. در این کار عددی که می می اثرات تعرف کاهش اثرات شوک وکاهش محیط متخلخل منتقل شده و عدو مان براین روش کنترلی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده می این مقاله نشان می دهد که با کاهش اثرات شوک وکاهش پسای موجی ضریب پسای کل با استفاده از محیط متخلخل حدود ۲۰ درصد کاهش می اید. شوک تضعیف شده به نواحی بالادست ایرفویل و ابتدای محیط متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک حدود ۲۰ درصد کاهش می با کاهش اثرات تداخل شوک و لایه مرزی حباب جدایش نیز از ۵۸ درصد وتر ایرفویل به ۲۲ درصد منتقل می شود. کارایی این روش کنترلی به عوامل مختلفی از جمله پارامترهای هندسی بستگی دارد.

واژههای کلیدی: کنترل جریان- کنترل شوک -تداخل شوک و لایه مرزی

## A Parametric Study for Passive Control of Shock-Boundary Layer Interaction of an Airfoil with Porous Media in a Transonic Flow

M. Yadegari and S.A. Seyed Shams Taleghani

Aerospace Research Institute Ministry of Science, Research, and Technology (Received: 23/November/2015; Accepted: 8January/2016)

### ABSTRACT

Shock formation due to flow compressibility and its interaction with boundary layer has inappropriate effects, such as drag increase and flow separation. Many methods have been proposed for reduction of these effects, such as vortex generator, suction, and blowing. This paper numerically studies the problem of flow control for NACA0012 airfoil with porous media at transonic flow. Porous media, which combines blowing and suctionm reduces these inappropriate effects. The effects of porous media depth, length, porosity, cell diameter, and angle of attack are investigated in this study. The numerical method is finite volume and the equations are Navier-Stokes. The flow is assumed to be turbulent and stationary. The Results show that the normal shock intensity is weak and consequently the drag coefficient decreases 20 percent. The weakened shock is moved upstream and top of the porous surface region and the shock Mach number is decreased 10 percent. This passive method also postpones the separation point from 58 to 72 percent of the airfoil chord. The efficiency of this method depends on various factors, like geometric parameters.

Keywords: Flow Control, Shock Control, Shock-Boundary Layer Interaction

ni.yadegari@gmail.com - کارشناسی ارشد:

۲- استادیار ( نویسنده پاسخگو): taleghani@ari.ac.ir

#### ۱– مقدمه

ماده متخلخل، به مادهای گفته می شود که شامل یک شبکه بههم پیوسته از خلل و فرج باشد که توسط هوا یا سیال دیگر پر شده باشد. بسیاری از مواد طبیعی مثل خاک یا بافتهای بدن مثل غضروف، استخوان و ماهیچه مثالهایی از مواد متخلخل میباشند. خلل و فرجها می توانند در اندازه بسیار بزرگ یا بسیار کوچک (اندازه مولکولی یا اتمی که میکروپور یا اولتراپورها نامیده میشوند) باشند. به طور کلی خلل و فرجها در محیط متخلخل اشکال غیرمتعارفی 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].

کاربرد وسیع و روزافزون محیط متخلخل در زمینههای مختلف از جمله، تضعیف امواج آکوستیک در مواد متخلخل [1]، اثرات محیط متخلخل در افزایش سرعت احتراق [7]، کاهش آلایندههای سوختی در محیط متخلخل [۳]، استفاده از سازههای توده سنگی محیط متخلخل برای استحکام مصالح اساختمانی [۴]، استفاده گسترده از خاصیت محیط متخلخل در اساختمانی [۴]، استفاده گسترده از خاصیت محیط متخلخل در راکتورهای کاتالیزوری شیمیائی، فیلترهای صنعتی، واحدهای زخیره انرژی مبدلهای حرارتی، مخازن نفتی و غیره قابل کتمان نیست. در این مقاله به بررسی استفاده از ساختار متخلخل در کاهش اثرات و شدت شوک ناشی از تراکمپذیری جریان سیال پرداخته می شود.

بهطور کلی کنترل شوک و تقلیل اثرات نامطلوب ناشی از تداخل آن با لایه مرزی، یکی از زیر شاخههای مهم علم کنترل جریان میباشد. کنترل جریان کوششی است در جهت تغییر مشخصه یک سیال یا تغییر وضعیت میدان جریان به هر صورت دلخواهی که مد نظر ما باشد [۶]. 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 عددی در این زمینه انجام شده است. این مطالعات بیشتر در محدوده جریانهای گذرصوتی بوده است [۷].

شکل گیری شوک سبب ایجاد یک پسای فشاری اضافی بهنام پسای موجی روی سطح ایرفویل میشود. همچنین، شوک یک گرادیان فشار معکوس روی لایه مرزی تحمیل می کند. این پدیده منجر به جدایش جریان می شود. جدایش لایه مرزی

میتواند به شکل یک حباب باشد که با افزایش قدرت شوک گسترش مییابد. ناپایایی<sup>۱</sup> 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 جابهجایی شوک را ایجاد کند که بسیار مخرب میباشد [7].

مطالعات تجربی نشان داده است که دمش جریان از سطح، در زیر شوک، سبب افزایش در ضخامت لایه مرزی و کاهش در اصطکاک پوسته میشود. از طرف دیگر مکش تاثیری عکس دارد. اگر فقط دمش در بالادست شوک انجام شود این کار نرخ رشد لایه مرزی نزدیک شوک را افزایش میدهد بهنحوی که هندسه تغییر کند و تعدادی شوک ضعیفتر بهجای شوک اصلی تولید کند؛ این پدیده منجر به کاهش پسا خواهد شد. از طرفی مکش لایه مرزی در پاییندست شوک سبب کاهش اندازه حباب جدایش میشود [۷].

اولین ایده برای کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی با استفاده از ساختارهای متخلخل توسط باشنل و وایتکامب در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد شد [۸]؛ این ایده شامل یک سطح متخلخل و یک محفظه در زیر محل تداخل شوک و لایه مرزی بود (شكل 1). این روش نشان میدهد كه تفاوت فشار استاتیكی در دو طرف شوک، منجر به ایجاد جریان در داخل محفظه از پاییندست شوک به بالادست آن می شود. در واقع این روش در حکم یک ترکیب از مکش در پاییندست و دمش در بالادست شوک است. محفظه در واقع ارتباط بین دو طرف شوک را افزایش خواهد داد. دمش جریان به داخل لایه مرزی منجر به ضخیم شدن سریع لایه مرزی در نزدیک شوک خواهد شد، این تغییر الگوی جریان ایجاد شده در زیر شوک، با تغییر مجازی هندسه، شوکهای ضعیفتر تولید میکند که درنتیجه آن، پسای موجی کاهش مییابد. مکش در پاییندست شوک همچنین می تواند جدایش و ناپایایی مربوط به آن را کاهش دهد [۸].

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 تغییرات ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل با استفاده از سطح متخلخل [۱۰]، بررسی اثر استفاده از سطح متخلخل در

<sup>1-</sup> Unsteadiness

<sup>2-</sup> Bushnell And Whitcomb

متخلخل بر پایه همین قانون استوار است. اساس قانون دارسی- فورچیمر، یک آزمایش ساده بود که در قرن نوزدهم توسط یک مهندس فرانسوی بهنام دارسی بر مبنای مشاهدات تجربی از حرکت آب در ماسه انجام گرفت. نتایج آزمایش دارسی بهصورت یک مقاله در سال ۱۸۵۶ منتشر و بعدها به قانون دارسی معروف شد [18]. هانسبو<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۰ [۱۷] و در ادامه میشل<sup>۳</sup> [۱۸] در سال ۱۹۷۶ نیز به انجام مطالعات تجربی برروی انواع محیط متخلخل پرداختند که میشل با جزییات کامل و با درنظرگرفتن تمام جوانب، اعتبار قانون دارسی را مورد تایید قرار داد. قانون و در واقع رابطه دارسی- فورچیمر مطابق رابطه (۱) شامل ضرایبی از مقاومت اینرسی و ویسکوز جریان در عبور از سطح متخلخل (K2 و K1) می باشد. در این رابطه تغییرات فشار و در واقع جهش فشار در عبور از سطح متخلخل با استفاده از جملات ويسكوز و اينرسى محاسبه و به شبیهسازی عبور جریان از سطح متخلخل پرداخته می شود. در استفاده از این روش برای شبیه سازی محیط متخلخل، معادلات حاكم بر مسئله (پيوستگي، مومنتوم و انرژی) از روش متوسط گیری حجمی بهدست می آیند [۱۹].

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\mu u}{k_1} + \frac{\rho u^2}{k_2} \tag{1}$$

باتوجه به این که قانون دارسی-فورچیمر در محدوده جریانهای مغشوش دقت کمتری دارد [۲۰] و باتوجه به این که این روش شبیه سازی عددی در مقابل مدل سازی هندسی ساختار متخلخل پدیده های فیزیک مسئله را به خوبی نشان نمی دهد، در مقاله حاضر از مدل سازی هندسی ساختار متخلخل برای عبور جریان از محیط متخلخل به منظور کنترل پدیده شوک و تداخل آن با لایه مرزی استفاده می شود. در روش مدل سازی هندسی، سطح متخلخل در نرمافزار تولید هندسه، عیناً به صورت فضاهای پر و خالی مدل می شود.

#### ۲- روش و روند حل عددی

در این مسئله از نرمافزار فلوئنت که از روش حجم محدود استفاده می کند؛ در حل عددی معادلات جریان بهره برده می شود. در این رویکرد، حوزه حل به تعداد محدودی از حجمهای کنترل هم مرز تقسیم می شود و معادلات بقا به صورت انتگرالی به حجم کنترل اعمال می شود. معادلات حاکم بر مطالعه پارامتریک کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی یک ایرفویل ...

کاهش اثرات واماندگی ایرفویل [۱۱]، اثر سطح متخلخل در کاهش نوسانات نامنظم ایرفویل [۱۲]، بررسی تغییرات ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل با استفاده از سطح متخلخل بهروش حل عددی [۱۳]، بررسی استفاده از این روش کنترلی برروی بالگرد بهمنظور کاهش صدای ملخ [۱۴] و بررسی تغییرات در ماهیت و محل شوک ضعیفشده با استفاده از این روش کنترلی [۱۵].



**شکل (۱):** اثر کنترل غیرفعال محفظه و سطح متخلخل [۹].

تاکنون مطالعات گستردهای در زمینه استفاده از سطح متخلخل بهمنظور کاهش اثرات شوک انجام شده است؛ در این بین استفاده از محیط متخلخل بهجای سطح متخلخل می تواند ایده جدیدی در استفاده از ساختارهای متخلخل در کنترل جریان باشد. محیط متخلخل، برخلاف سطح متخلخل و کویتی، با حفظ ساختار سازه به کاهش اثرات شوک کمک می کند.

بهطور کلی جریان سیالات در محیط متخلخل یک پدیده بسیار پیچیده است و نمی توان آن را دقیقاً مشابه جریانهای داخلی سیال در لولهها یا کانالها تعریف نمود. جریان سیالات در لولهها یا کانالها، بهدلیل مشخص بودن مسیر جریان و طول آنها می تواند به سادگی به صورت تابعی از فشار بیان شود. در حالی که در محیط متخلخل غالباً به دلیل مبهم بودن مسیر جریان، اندازه گیری خواص جریان از پیچیدگی خاصی بر خور دار است. علاوه بر این، مشکلات عدیده در هم گرایی و شبکه سازی محیط متخلخل، سبب کمبود کارهای عددی در این حوزه شده است.

بسیاری از قوانین اصلی بر پایه مشاهدات تجربی پایهگذاری شده اند. در محیط های متخلخل قانون دارسی- فورچیمر<sup>۱</sup> از معادلات اساسی است و اصول حرکت سیال در محیطهای

<sup>2-</sup> Hansbo

<sup>3-</sup> Mitchell

<sup>1-</sup> Darcy-Forchheimer

جريان، معادلات ناويراستوكس مىباشد. حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی بهصورت ترکیبی'، گسستهسازی همه معادلات از مرتبه دو، رژیم جریان آشفته و از مدل اسپالارت آلماراس<sup>۲</sup> بهعنوان مدل آشفتگی استفاده میشود. این مدل یک مدل تکمعادلهای است که بهمنظور حل جریانهای تراکم پذیر و مسائل هوافضایی توسعه داده شده است. مدل اسپالارت برای حل لایه مرزی شامل گرادیان فشار معکوس، جریان های گذرصوتی آشفته در مسائل پیچیده و همچنین، جریان های جداشده از سطح جواب های خوب و قابل قبولی ارائه مىدهد [11]. باتوجه به هندسه ايرفويل و زاويه حمله كم آن، پدیدههای پیچیده آشفتگی مانند ریزش گردابه ۳ در آن مشاهده نمی شود. بنابراین با درنظر گرفتن هزینه زمانی و محاسباتی کمتر این مدل بهعنوان مدل آشفتگی انتخاب می شود. در کنار روش گسستهسازی حجم محدود، بهطور کلی در نرمافزار فلوئنت دو الگوریتم حل کننده فشار مبنا و حل کننده چگالی مبنا برای حل معادلات وجود دارد. به طور کلی شیوه چگالی مبنا مزایای بیشتری نسبت به شیوه فشار مبنا در جریانهای قابل تراکم سرعت بالا دارد. این شیوه در مدلسازی ناپیوستگیها و گرادیانهای شدید جریان موثر است و میتواند موج ضربهای را بهتر شبیهسازی کند. بنابراین، در این حل عددی از روش چگالی مبنا استفاده می شود. در این الگوریتم، معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی بهصورت کوپل و همزمان حل می شوند.

در این مقاله ابتدا به اعتبارسنجی روش حل عددی برای مدل آزمایشی ایرفویل بدون کنترل پرداخته میشود؛ پس از آن به اعتبارسنجی روش حل عددی برای مدل محیط متخلخل قرار گرفته در مسیر جریان با مقایسه با نمونههای تجربی موجود پرداخته میشود. پس از اطمینان از روش حل عددی، کنترل تداخل شوک و لایه مرزی با محیط متخلخل مورد بررسی قرار می گیرد. در انتها مطالعه پارامتریک پدیده با بررسی طول و عمق محیط متخلخل، شدت تخلخل، قطر ریزدانه محیط متخلخل و اثر زاویه حمله، مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۳– نتایج اعتباربخشی عددی

ایرفویل NACA0012 یکی از پرکاربردترین مدلهای ایرفویل در آزمایشات تجربی است و تستهای متعددی با اعداد ماخ و

شرایط جریان متفاوت برروی آن انجام شده است و اطلاعات آن موجود است. از جمله این آزمایشات تجربی میتوان به نتایج هریس [۲۲] در محدوده جریان گذرصوتی اشاره کرد. در این قسمت از مقاله، بهمنظور اعتباربخشی به روش حل عددی به مقایسه نتایج با آزمایشات تجربی انجامشده توسط هریس با عدد ماخ ۸/۰ و زاویه حمله ۲/۲۶ پرداخته میشود. علت انتخاب این عدد ماخ و زاویه حمله، بهدست آمدن شوک عمود روی سطح مکش ایرفویل میباشد.

در این حل عددی باتوجه به آزمایش تجربی هریس، پارامترهای جریان بهنحوی تنظیم میشود که، عدد رینولدزی معادل ۹ میلیون بهدست آید. شبکه استفادهشده برای این حل عددی شبکه باسازمان با ریزشدن شبکه در محل شوک و ریزشدن شبکه در نزدیکی دیواره و تعداد سلول ۲۰۰٬۰۰۰ مطابق شکل ۲ میباشد.



**شکل (۲):** شبکه استفادهشده حول ایرفویل، فضای محاسباتی و شرایط مرزی.

پس از بررسی استقلال حل عددی از شبکه (مطابق شکل ۳) به بررسی تغییرات +۲ بهعنوان پارامتر معیار مدلسازی درست آشفتگی جریان مطابق شکل ۴ پرداخته میشود. همان طور که مشخص است، +۲ مخصوصا در نزدیکی

<sup>1-</sup> Couple

<sup>2-</sup> Spallart Allmaras

<sup>3-</sup> Vortex Shedding

شوک و جدایش جریان، در محدوده مناسب (مقدار یک و کم تر از یک [۲۱]) برای مدل آشفتگی اسپالارت آلماراس قرار دارد.



شکل (۳): بررسی تغییرات ۲+ روی سطح بالایی ایرفویل.

مقایسه نتایج حل عددی با حل تجربی مطابق جدول ۱ میباشد. یکی از علل اختلاف بین نتایج این مقاله و نتایج تجربی خطای حل عددی میباشد. از جمله خطاهای عددی میتوان به مواردی چون استفاده از مدلسازی آشفتگی، تاحدودی افزایش کجی<sup>۱</sup> و ضریب منظری<sup>۲</sup> شبکه در نواحی بالادست ایرفویل، خطای دیفیوژن عددی (که در هر حل عددی موجود است [۳۳])، خطای گردکردن کامپیوتر و خطای پراکندگی<sup>۳</sup> (که مختص گسستهسازی مرتبه ۲ است) اشاره

1- Skewness

بب آیرودینامیکی ( ماخ ۸/ ، زاویه	<b>جدول (۱):</b> مقايسه ضراي
مله ۲/۲۶).	ح

C d	C n	C m	
•/•٣٣١	۰/٣٩	-•/•18	نتایج تجربی هریس [۲۲]
•/•٣۴۵	۰/۳۲۶	-•/• ) )	نتایج حل عددی مشابه دافر [۱۳]
'/. <b>۴</b>	<u>7</u> .18	/۳۰	درصدخطای حل عددی مشابه دافر
•/•٣٧	•/٣۴٧	-•/•188	گزارش حل عددی حاضر
<u>//</u> ١٠	7.17	7.Δ	درصد خطای حل عددی حاضر

مقایسه ضریب فشار با نمونه تجربی مطابق شکل میباشد. گرادیان شدید ضریب فشار در این نمودار، تشکیل شوک نرمال قوی، روی مرکز ایرفویل را بهخوبی نشان میدهد.



**شکل (۴):** مقایسه ضریب فشار با نتایج تجربی ( ماخ ۰/۸، زاویه حمله ۲/۲۶).

در ادامه ضریب پسا در بازه تغییرات زاویه حمله بین ۰ تا ۵ درجه با نتایج هریس مقایسه و در شکل (۵ ارائه شده است. ضریب پسا کار عددی حاضر نیز اختلاف قابل قبولی با کار تجربی دارد و این اعتبارسنجی مدلسازی عددی را تایید میکند.

<sup>2-</sup> Aspect Ratio3- Dissipation

<sup>5-</sup> Dissipation



بهمنظور اعتباربخشی به مدلسازی عددی عبور جریان از محیط متخلخل، از آزمایشات تجربی ژیونگ و همکارانش [۵] استفاده میشود. ژیونک و همکارانش در این کار عددی به محاسبه ضرایب مقاومت اینرسی و ویسکوز و بررسی انتقال حرارت و افت فشار در عبور جریان از فوم سرامیکی بهعنوان محیط متخلخل پرداختند.

مشکلی که در این بخش در مدلسازی برای حل عددی محیط متخلخل وجود دارد، معادلسازی دوبعدی محیط متخلخل سهبعدی است. بهترین راه برای این معادلسازی استفاده از ریزدانههایی دوبعدی با قطری معادل با سلولهای تشکیلدهنده محیط متخلخل سهبعدی می باشد. ناکامایا<sup>۲</sup> [۲۴] در مقالهای به بررسی قطر معادل ساختارهای مختلف محیط متخلخل به منظور استفاده در محاسبه عدد رینولدز در محیط متخلخل پرداخته و رابطهای برای آن به صورت زیر ارائه کرده است:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{32k_1}{\varepsilon}}.$$
<sup>(Y)</sup>

در این رابطه،  $k_1$  ضریب ویسکوز در عبور سیال از محیط متخلخل و  $\overline{s}$  ضریبی معادل برای ساختار محیط متخلخل است، که ناکامایا [۲۴] از آن استفاده کرده است. قطر بهدستآمده از این رابطه برای محیط متخلخل موردنظر، بهعنوان قطر معادل برای ریزدانههای دوبعدی لحاظ می شود.

باتوجه به نتایج تجربی، مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  مطابق رابطه (۱) برای محیط متخلخل مورد بررسی، بهترتیب  $^{-6} \cdot 1 \times 10^{-8}$  و  $^{-7} \cdot 1 \times 10^{-8}$  و می باشد [۲۴].

مدل سازی دوبعدی محیط متخلخل با استفاده از آرایش ریزدانهها با قطر ۱/۵۵ میلیمتر و با شدت تخلخل ۲/۰ مطابق آزمایش تجربی صورت گرفته است. شبکه مورد بررسی بهصورت بلوکبندی شده با شبکه بی سازمان بسیار ریز در اطراف ریزدانههای متخلخل و شبکه باسازمان در مابقی دامنه حل با مجموع تعداد ۳۴,۶۴۸ سلول می باشد.

کانتور فشار برای این حل عددی در حالت سرعت ورودی ۴ متر بر ثانیه مطابق شکل ۷ و مقایسه نتایج تجربی و عددی با بررسی نمودار تغییرات گرادیان فشار در برابر سرعت ورودی مطابق شکل ۸ میباشد.





سرعت جریان ورودی (m/s)

<sup>1-</sup> Zhiyong

<sup>2-</sup> Nakayama





خطوط جریان در داخل محیط متخلخل نیز مطابق شکل ۱۴، چرخش جریان و حرکت نامنظم جریان در داخل محیط متخلخل را بهخوبی نشان میدهد.

مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در حالت ایرفویل با کنترل غیرفعال محیط متخلخل و بدون کنترل غیرفعال مطابق جدول ۲، نشاندهنده کاهش ضریب پسا در حدود ۱۶٪ می باشد. کاهش ضریب پسا به دلیل کاهش اثرات و شدت شوک و در

#### مطالعه پارامتریک کنترل غیرفعال تداخل شوک و لایه مرزی یک ایرفویل ...

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

#### ۴- کنترل شوک با استفاده از محیط متخلخل

در این بخش نمونه هندسی ایرفویل NACA0012 قرار گرفته در جریان با عدد ماخ ۸/۰و رینولدز ۹ میلیون و با زاویه حمله ۲/۲۶ میباشد. محل قرار گیری محیط متخلخل در محدوده بیبعدشده بین ۴۵/۰ تا ۵۵/۰ طول وتر ایرفویل، عمق محیط متخلخل ۲/۵۵ ضخامت محلی ایرفویل، میزان تخلخل ۶۸ درصد با ریزدانههای به قطر ۱/۰۱ بیبعدشده با وتر ایرفویل لحاظ شده است. شبکه در داخل ساختار متخلخل مطابق شکل **۹** میباشد.

کانتور عدد ماخ بهدست آمده در این بخش (مطابق شکل ۱۰) و نمودارهای ضریب فشار و ضریب اصطکاک (مطابق شکلهای ۱۹–۱۱) نشاندهنده برهم خوردن و از بین رفتن اثرات شوک اولیه و کاهش قدرت آن با استفاده از این روش کنترلی میباشد. شوک تضعیف شده به نواحی بالادست و ابتدای سطح متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک از مقدار ۱/۳۹ به ۱/۳۷ کاهش پیدا کرده است.



**شکل (۸):** مش در اطراف محیط متخلخل.



شکل (۹): کانتور عدد ماخ بعد از کنترل غیرفعال.

افزایش ضریب پسا، تحمیل ناپایایی به جریان، ایجاد نوسانات نامنظم و اثرات نامطلوب سازهای ایجاد کند. این حباب تقریبا از ناحیه ۸۸/۰ طول بیبعد وتر ایرفویل شروع میشود. حرکت این حباب به نواحی بالادست، اثرات نامطلوب آن را بیش تر میکند. در حالت ایرفویل همراه با کنترل، مکش جریان در پاییندست شوک، بازگشت جریان و ناحیه حباب را از بین برده و باعث تعویق آن به نواحی پاییندست (تقریبا ۲۷۴ طول واحد وتر ایرفویل) مطابق شکل ۱۵ میشود. همچنین، شکل ۱۵ ضخیم شدن لایه مرزی ناشی از مکش و دمش را که منجر به تغییر هندسه می شود؛ نشان می دهد. همان طور که گفته شد این تغییر هندسه در ناحیه شوک، باعث تشکیل تعدادی شوک ضعیفتر به جای شوک قوی اولیه در این ناحیه می شود.



شکل (۱۴): اثر روش کنترلی بر جدایش.

## ۵- مطالعه پارامتریک

در ادامه این مقاله به مطالعه پارامتریک پدیده با بررسی پارامترهای مربوط به محیط متخلخل پرداخته می شود. در این بخش به طور مثال اگر اثر تغییر شدت تخلخل را بر ضریب پسا





شکل (۱۳): بردارهای سرعت اطراف ریزدانهها.

جدول (۲): نتایج حل عددی با کنترل غیرفعال محیط محیط محیط. متخلخل.

	C d		C n	
ويسكوز	فشارى	کل	. / ۲ ۸ ۳	ضرايب با كنترل غيرفعال
•/••۴۵	•/•779	•/• ٣٢	•/101	محيط متخلخل
•/••۴٧	•/•٣٢٢	•/• ٣٧	•/٣۴٧	ضرایب بدون کنترل غیرفعال

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 می شود. تشکیل حباب در پایین دست شوک (مطابق شکل **۱۵**) نشان دهنده چرخش جریان در این ناحیه می باشد؛ ترکیب این حباب با گرادیان فشار نامطلوب سطح می تواند منجر به جدایش شدید جریان شده و اثرات نامطلوب کاهش شدید ضریب برآ،

مورد بررسی قرار دهیم، این تغییر باعث تغییر شدت دمش و مکش و درنتیجه تغییر توزیع فشار و تنش برشی میشود. تغییر توزیع فشار و تنش برشی باتوجه به هندسه سطح و زاویه حمله، روی ضرایب آیرودینامیکی تاثیر گذار خواهد بود.

بهطور کلی باتوجه به این که ضرایب آیرودینامیکی و تغییرات میدان جریان تحت تاثیر تغییرات پارامترهای کنترلی، از تعامل توزیع فشار و تنش برشی بهست میآید، این تعامل میتواند تغییرات چشم گیری در ضرایب آیرودینامیکی ایجاد کند. هدف در اینجا بررسی اثر پارامترهای کنترلی روی توزیع فشار روی یک هندسه نمونه است.

در این مطالعه پارامتریک، شرایط جریان، زاویه حمله و عدد ماخ بهنحوی تنظیم میشود که محل قرارگیری شوک دقیقا در وسط ایرفویل قرار گیرد. همچنین، در این مطالعه پارامتریک اثر عدد ماخ بررسی نمیشود. از میان دیگر پارامترهای تاثیرگذار مورد بررسی، با ثابت کردن تمام پارامترها و فقط تغییر یک پارامتر در بازه مشخص، اثر پارامتر موردنظر بررسی میشود. پارامتر در بازه مشخص، اثر پارامتر موردنظر بررسی میشود. قرارگیری شوک، مطابق شکل ۱۶ راستای میانگین بردارهای فشار در پاییندست (نسبت به خط عمود)، کمی زاویهدارتر از و بردارهای فشار در بالادست و پاییندست، بهعنوان مثال در این هندسه، اثر تغییرات فشار پاییندست، بهعنوان مثال در این هندسه، اثر تغییرات فشار پاییندست، نوی ضریب برآ کمتر از اثر تغییرات فشار بالادست است و همچنین، اثر تغییرات فشار بالادست روی ضریب پسا در مقابل اثر فشار پاییندست ناچیز است.



شکل (۱۵): اثرات هندسه بالادست و پاییندست شوک.

همان طور که مشخص است این روش کنترلی بر سطح بالایی ایرفویل (اصطلاحا سطح مکش ایرفویل) اعمال می شود. اما، اعمال این روش کنترلی با تغییر میدان جریان حول ایرفویل،

سطح زیرین ایرفویل (اصطلاحا سطح فشار ایرفویل) را نیز تحت تاثیر قرار میدهد. به طور کلی هر چقدر تغییرات جریان روی سطح بالایی بیشتر باشد، اثر سطح زیرین نمایان تر و تاثیر آن بر ضرایب آیرودینامیکی نیز بیشتر و قابل توجه می شود. در این مطالعه پارامتریک، با محدود کردن طول محیط متخلخل در محدوده کم تر از ۲/۳–۲/۲ طول وتر ایرفویل، اثرات سطح زیرین (سطح فشار) قابل صرفنظر می باشد.

برخی از پارامترهای تاثیرگذار در این روش کنترلی شامل طول محیط متخلخل، عمق محیط متخلخل، شدت تخلخل، قطر ریزدانه، زاویه حمله، شکل ساختار متخلخل، ساختارهای دوگانه و غیره میباشد.

باتوجه به مطالب گفتهشده به مطالعه پارامتریک چند عامل پرداخته میشود.

#### ۶- مطالعه پارامتریک طول محیط متخلخل

به منظور بررسی پارامتریک طول محیط متخلخل، عمق آن در مقدار ۲۰/۳ (بی بعدشده با وتر ایر فویل)، محل محیط متخلخل در حالت نیمی از آن در بالادست شوک، قطر ریزدانه در مقدار ۱۰/۰ (بی بعدشده با وتر ایر فویل) و میزان تخلخل محیط متخلخل ۶۸ درصد ثابت قرار داده می شود. پارامتر متغیر در این بخش طول محیط متخلخل می باشد که، از مقدار ۱/۰ این بخش طول محیط متخلخل می باشد که، از مقدار ۱/۰ (محدوده ۲/۵–۵۵/۰ بی بعدشده با وتر ایر فویل) تا ۲/۰ (محدوده ۳/۰–۷/۷ بی بعدشده با وتر ایر فویل) تغییر می یابد. هندسه های مربوط به مطالعه پارامتریک این بخش مطابق شکل ۱۷ می باشد.



ص (۱۲). هندسه های مربوط به مطالعه پارامتریک طور محیط متخلخل.

با افزایش طول محیط متخلخل، مطابق شکل (**۱۷** فشار روی سطح مکش ایرفویل با شدت زیادی افزایش مییابد، این

افزایش فشار باعث کاهش شدید ضریب برآ مطابق جدول ۳ می شود. باتوجه به این که افزایش فشار ایجادشده بسیار بیش تر از جهش فشار ناشی از شوک می باشد، اثرات افزایش فشار در این ناحیه و تاثیر نواحی میانی و بالادست ایرفویل بر ضریب پسا، بسیار بیش تر از کاهش فشار نواحی پایین دست می باشد و ضریب پسا افزایش پیدا می کند. بنابراین مطابق جدول ۳ با افزایش طول محیط متخلخل، ضریب پسا افزایش و ضریب برآ کاهش می یابد.



شکل (۱۷): مقایسه تغییرات ضریب فشار در طول ایرفویل.

تغييرات	ر برابر	نامیکی د	آيروديا	ضرايب	تغييرات	:(٣)	جدول
		لخل.	ط متخ	،ل محيد	طو		

Cd	Cl	L/D	طول محيط متخلخل
•/•٣•٢	•/7491	۸/۲۴	۰/۴۵-۰/۵۵
۰/۰۳۱۸	•/7•98	۶/۴۸	•/۴-•/۶
•/•٣٣	•/•٧۴٢	7/74	• /٣-• /٧

#### ۷- مطالعه پارامتریک عمق محیط متخلخل

به منظور بررسی پارامتریک عمق محیط متخلخل، طول آن در مقدار ۰/۱ ( محدوده ۰/۴۵ – ۵۵/۵ بی بعدشده با وتر ایرفویل)، محل محیط متخلخل در حالت نیمی از آن در بالادست شوک، قطر ریزدانه در مقدار ۰/۱۱ (بی بعدشده با وتر ایرفویل) و میزان تخلخل محیط متخلخل ۶۸ درصد ثابت قرار داده می شود. پارامتر متغیر در این بخش عمق محیط متخلخل می باشد که از مقدار ۰/۱۵ (بی بعدشده با وتر ایرفویل) تا ۰/۱۴۴ (بی بعدشده

با وتر ایرفویل) تغییر مییابد. هندسههای مربوط به مطالعه پارامتریک این بخش مطابق شکل **۱۹** میباشد.

عمق محيط متخلخل ١٥/٠١

عمق محبط متخلخل ۲۰/۰۳

عمق محيط متخلخل ٠/٠٤٣

**شکل (۱۸):** هندسه های مربوط به مطالعه پارامتریک عمق محیط متخلخل.

با افزایش عمق محیط متخلخل، مطابق شکل ۲۰، گرادیان فشار تغییر چندانی پیدا نمی کند. در واقع سطوح پایین ساختار متخلخل (در محدوده مورد بررسی در این مطالعه) تاثیر چندانی بر نواحی بالادست ساختار متخلخل نمی گذارد و گردابهها و حرکت جریان در نواحی پایین ساختار متخلخل با عمقهای متفاوت، نهایتا منجر به فشار مشخص در بالاترین سطح ساختار متخلخل می شود. لازم بهذکر است فشار در بالاترین سطح ساختار متخلخل است که منجر به تغییرات در ماهیت جریان و فشار بر سطح ایرفویل می شود.



باتوجه به میدان جریان بهدست آمده در قسمتهای قبل تغییرات ضرایب آیرودینامیکی مطابق جدول ۴ قابل پیش بینی

بوده و همانطورکه مشاهده می شود، تغییرات چشم گیری در این ضرایب ایجاد نشده و تغییرات بسیار اندک می باشد.

جدول (۴): تغییرات ضرایب آیرودینامیکی در برابر تغییرات عمق محیط متخلخل.

Cd	Cl	L/D	عمق محيط متخلخل
•/•٣١٨	•/2491	٧/٨٣	•/• \ ۵
•/•٣١٣	•/749	٧/٩۵	• / • ٣
•/•٣١٩	•/7491	٧/٨٠	•/•۴٣

۸- مطالعه پارامتریک شدت تخلخل محیط متخلخل بهمنظور بررسی پارامتریک شدت تخلخل محیط متخلخل، طول آن در مقدار ۲/۲ ( محدوده ۶/۶-۴/۴ بیبعدشده با وتر ایرفویل)، محل محیط متخلخل در حالت نیمی از آن در بالادست شوک، قطر ریزدانه در مقدار ۲/۱۱ (بیبعدشده با وتر ایرفویل)، عمق محیط متخلخل در مقدار ۲/۱۷ (بیبعدشده با وتر ایرفویل) ثابت قرار داده میشود. پارامتر متغیر در این بخش شدت تخلخل محیط متخلخل میباشد که از مقدار ۵۰ درصد تا ۲۲ درصد تغییر مییابد. هندسههای مربوط به مطالعه پارامتریک این بخش مطابق شکل ۲۱ میباشد.

<	شدت تخلخل ٪۵۰			>
<	شدت تخلخل ٪۶۸	8888888		>
<	شدت تخلخل ٪۷۲			>
	شرك ترا ارموالاه		A	ش کا

**شکل (۲۰):** هندسههای مربوط به مطالعه پارامتریک شدت تخلخل محیط متخلخل.

مطابق شکل ۲۱ افزایش شدت تخلخل محیط متخلخل باعث کاهش فشار در نواحی بالادست شوک و تا حدودی کاهش فشار در نواحی پاییندست شوک نیز می شود. در نواحی مادون صوت، افزایش سطح عبور، باعث کاهش سرعت و افزایش فشار می شود. نواحی داخل محفظه، در محدوده جریان

مادون صوت قرار دارد، بنابراین در این ناحیه با افزایش شدت تخلخل و کاهش سطح عبور جریان، فشار کاهش مییابد.



شکل (۲۱): مقایسه تغییرات ضریب فشار در طول ایرفویل.

باتوجه به اثرات سطح، کاهش فشار در نواحی بالادست شوک، ضریب برآ را نسبت به شدت تخلخل کمتر افزایش داده و کاهش فشار در نواحی پاییندست شوک ضریب پسا را نسبت به شدت تخلخل کمتر افزایش میدهد. بنابراین مطابق جدول ۸ بیشترین ضریب برآ و پسا در شدت تخلخل ۵۰ درصد بهدست میآید.

جدول (۵): تغییرات ضرایب آیرودینامیکی در برابر تغییرات شدت تخلخل محیط متخلخل.

Cd	Cl	L/D	شدت تخلخل محيط متخلخل
۰/۰۳۰۸	•/٣٣٧۵	٧/٧٠	۵۰
۰/۰۳۱۸	•/2491	٧/٨٣	۶۸
•/•٣٢٢	•/2049	٧/٩١	۷۲

#### ۹- مطالعه پارامتریک قطر ریزدانه محیط متخلخل

به منظور بررسی پارامتریک قطر ریزدانه محیط متخلخل، طول آن در مقدار ۲/۲ (محدوده ۶/۲–۴/۲ بی بعدشده با وتر ایرفویل)، محل محیط متخلخل در حالت نیمی از آن در بالادست شوک، عمق محیط متخلخل در مقدار ۲/۰۳ (بی بعدشده با وتر ایرفویل) و میزان تخلخل محیط متخلخل ۶۸ درصد ثابت قرار

داده می شود. پارامتر متغیر در این بخش قطر ریزدانه محیط متخلخل می باشد که از مقدار ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۲ (بی بعد شده با وتر ایرفویل)، تغییر می یابد. هندسه های مربوط به مطالعه پارامتریک این بخش مطابق شکل ۲۲ می باشد.



شکل (۲۳): مقایسه تغییرات ضریب فشار در طول ایرفویل.

باتوجه به اثرات سطح، کاهش فشار در نواحی بالادست شوک، ضریب برآ را نسبت به قطر ریزدانه کمتر، افزایش داده و کاهش فشار در نواحی پاییندست شوک ضریب پسا را نسبت به قطر ریزدانه کمتر، افزایش میدهد. بنابراین مطابق جدول ۶ بیشترین ضریب برآ و پسا در قطر ریزدانه ۰/۰۲ بهدست میآید.

**جدول (۶):** تغییرات ضرایب آیرودینامیکی در برابر تغییرات قطر ریزدانه محیط متخلخل.

Cd	Cl	L/D	قطر ريزدانه محيط متخلخل
•/•۲۹۲	•/\AY\	۶/۴۰	•/••۵
۰/۰۳۰۵	•/7•97	۶/۷۶	•/• )
۰/۰۳۰۸	•/7707	۷/۳۲	•/•٢

#### ۱۰- بررسی اثر زاویه حمله

در نهایت اثر زاویه حمله بر این روش کنترلی، مورد بررسی قرار می گیرد. عمق محفظه در ۲۰/۳ (بی بعدشده با وتر ایرفویل)، محل محیط متخلخل در حالت نیمی از محفظه در بالادست شوک، طول محیط متخلخل در مقدار ۲/۱ (محدوده محفظه شوک، طول محیط متخلخل در مقدار ۲/۱ (محدوده محفظه متخلخل ۲۲ بی بعدشده با وتر ایرفویل)، میزان تخلخل محیط متخلخل ۲۲ درصد، با قطر ریزدانه ۲/۱۱ (بی بعدشده با وتر ایرفویل) ثابت شده و زاویه حمله از مقدار ۱/۵ تا ۵ درجه تغییر می یابد.

به طور کلی اعمال روش کنترلی مطابق شکل **۲۴** باعث کاهش ضریب پسا در تمام بازه زوایای حمله می شود. با افزایش زاویه حمله، محل شوک به سمت خارج از محیط متخلخل منتقل می شود. بنابراین با افزایش زاویه حمله کاهش ضریب پسا نسبت به زوایای حمله کم تر کاهش می یابد و در واقع اثر این روش کنترلی کم تر می شود.



www.SID.ir



## ۱۱- نتیجه گیری

در این مقاله به مدلسازی عددی استفاده از ساختارهای متخلخل در کاهش اثرات شوک و اثرات تداخل شوک و لایه مرزی پرداخته شد. نتایج بهدستآمده در این مقاله نشان داد ساختارهای متخلخل با مکانیزم افزایش سطح عبور و با ترکیب مکش و دمش که منجر به تغییر الگوی جریان نزدیک سطح می شود، اثرات شوک و جهش مشخصه های جریان ناشی از آن را كاهش مىدهد. نتايج نشان داد با كاهش اثرات شوك، یکنواخت شدن توزیع فشار برروی سطح و کاهش پسای موجی ضریب پسای کل با استفاده از محیط متخلخل در حدود ۲۰ درصد كاهش مي يابد. همچنين، شوك تضعيف شده به نواحي بالادست ایرفویل و ابتدای محیط متخلخل منتقل شده و عدد ماخ پشت شوک در حدود ۱۰ درصد کاهش پیدا میکند. با کاهش اثرات تداخل شوک و لایه مرزی حباب جدایش از ۰/۵۸ وتر ايرفويل به ٠/٧٣ تعويق پيدا ميكند. كارايي اين روش کنترلی به عوامل مختلفی از جمله پارامترهای هندسی بستگی دارد. بدینمنظور در این کار عددی به بررسی اثر عمق، طول، شدت تخلخل و قطر ریزدانه محیط متخلخل و همچنین، اثر زاویه حمله بر این روش کنترلی پرداخته شد. در این مقاله همچنین، به اعتباربخشی روش مدلسازی هندسی ساختار متخلخل پرداخته شد. اعتباربخشی 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. در این مقاله

اعمال این روش کنترلی مطابق شکل ۲۵، ضریب ممان پیچشی را از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت سوق می دهد. اگر افزایش زاویه حمله بهعنوان یک اغتشاش درنظر گرفته شود، ایرفویل، بهعنوان یک جسم پرنده درصورتی پایدار است که در برابر اغتشاش اعمال شده ممان پیچشی در خلاف جهت وارد نماید. تشکیل شوک برروی ایرفویل و تشکیل ناحیه کم-فشار در نواحی بالادست سطح مکش ایرفویل و ناحیه پرفشار در نواحی پایین دست سطح مکش ایرفویل ممانی در خلاف بعت پایداری بر ایرفویل وارد می کند. اعمال روش کنترلی باعث اعمال ممان پایدارتر (با مقدار منفی کمتر) بر روی پیچشی در برابر تغییرات زاویه حمله ایرفویل کمتر باشد، نوسانات و اغتشاشات وارد بر ایرفویل کمتر است. مطابق شکل نوسانات و اغتشاشات وارد بر ایرفویل کمتر است. مطابق شکل



**شکل (۲۵):** تغییرات ضریب ممان پیچشی در برابر زاویه حمله با کنترل غیرفعال.

همانطورکه در بخشهای قبلی توضیح داده شد این روش کنترلی باعث کاهش ضریب برآ می شود. که این تغییرات مطابق شکل ۲۶، با تغییرات زاویه حمله همچنان برقرار است. با افزایش زاویه حمله و حرکت نقطه جدایش به نواحی بالادست ایرفویل، این روش کنترلی با کاهش اثرات جدایش، عملکرد موثر خود را به خوبی نشان می دهد.

- 14. Doerfeer, P. and Szulc, O. "Passive Control of Shock Wave Applied To Helicopter Rotor High-Speed Impulsive Noise Reduction", Institute of Fluid-Flow Machinery Polish Academy Of Sciences, Vol. No. 3, pp. 297-305, 2010.
- 15. Nagamatsu, H.T., Dyer, R., Troy, N. and Ficarra, R.V. "Supercritical Airfoil Drag Reduction by Passive Shock Wave/Boundary Layer Control in the Mach Number Range 0.754", AIAA, Vol's. 85-0207, 1985.
- Riazi, M. and Vazirnia, S. "Introduction to Oil and Gas Reservoir Engineering", Sharif University, First Edition, 2009 (In Persian).
- 17. Hansbo, S. "Consolidation of Clay with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains", Proceedings, Swedish Geotechnical Institute, 18, 1960.
- Mitchell, J.K. "Fundamentals of Soil Behavior", Wiley, New York, 1976.
- 19. Heirani Nobari, M. and Ghaedi, B. "Numerical Simulation of Flow in Porous Media Confined between Two Parallel Plates with Constant and Variable Porosities", The 13<sup>th</sup> Int. Mech. Eng. Isfahan University, 2005 (In Persian).
- Bell, F.G. "Some Petrographic Factors Relating to Porosity and Permeability in the Fell Sandstone of Norththumberland", Quarterly J. Eng. Geology, Vol. 11, pp. 113-126, 1978.
- 21. Shojaii Fard, M. and Tahani, M. "Introduction to Turbulent Flow and Its Modeling", Iran University of Science and Technology, First Ed., 2011 (In Persian).
- 22. Harris, C.D. "Two-dimensional Aerodynamic Characteristics of the NACA 0012 Airfoil. in the Langley 8-Foot Transonic Pressure Tunnel", NASA Technical Memorandum, 81927,1981.
- 23. Carey, C., Scanlon T.J., and Fraser. S.M. "SUCCA-An Alternative Scheme to Reduce the Effects of Multidimensional False Diffusion", Appl. Math Modelling, Vol. 17, 263–270, 1993.
- 24. Nakayama, A., Kuwahara, F., and Sano, Y. "Concept of Equivalent Diameter for Heat and Fluid Flow in Porous Media", AIChE J., Vol. 53, No. 3, pp. 732-736, 2007.

همچنین، نشان داده شد که تاوان این کاهش اثرات شوک، کاهش ضریب برآ میباشد.

11- مراجع

- Biot, M.A. "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, a: Low-Frequency Range & High-Frequency Range", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 168-191, 1956.
- Yoshizawa, Y., Sasaki, K., and Echigo, R. "Analytical Study the Structure of Radiation Controlled Flame", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 311-319, 1988.
- Zhou, X.Y. and Pereira, J.C.F "Numerical Study of Combustion and Pollutions Formation in Inert Nonhomogenous Porous Media", Combustion Science & Technology, Vol. 130, No's. 1-6, pp. 335-364,1997.
- Tsinker, G.P. "Port Engineering; Planning Construction", Maintenance and Security, John Wiley & Sons, N. J., 2004.
- 5. Zhiyong, W., Cyril, B,C., Fengwu, B., Flamant, G., Wang A.Z., Zhang, C.J., and Tian, C.C. "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, 2009.
- Gad, M. "Modern Developments In Flow Control", Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Applied Mechanics Reviews, Vol. 49, No. 7, pp. 365–379, 1996.
- Inger, G.R. and ZEE, S. "Transonic Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interaction with Suction or Blowing", J. Aircr., Vol. 15, No. 11, pp. 750-754, 1978.
- Bahi, L. "Passive Shock Wave/Boundary Layer Control for Transonic Supercritical Airfoil Drag Reduction", PhD. Thesis, Mechanical & Aerospace Department Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1982.
- Raghunathan, S. "Passive Control of Shock-Boundary Layer Control", Aerospace Sci., Vol. 25, No. 3, pp. 271-296, 1988.
- Mabey, D.G. "Flow Unsteadiness and Model Vibration in Wind Tunnels at Subsonic and Transonic Speeds", ARC CP 1155, 1971.
- Krogmann, P., Stanewsky, E., and Theide, P. "Effect of Suction on Shock/Boundary Layer Interaction and Shock Induced Separation", J. Aircr. Vol. 22, No. 1, pp. 37-42, 1985.
- Raghunathan, S. "Pressure Fluctuation Measurements with Passive Shock/Boundary Layer Control", AIAA J., Vol. 25, No. 4, pp. 626-628, 1987.
- Doerfeer, P. and Szulc, O. "Shock Wave Smearing By Wall Perforation", Arch. Mech, Vol. 58, No. 6, pp. 543-573, 2006.