

١٧١١١٥٦٧٦١  
١٧١٤٢٦

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٠١٩٤٢

۸۷/۱۱۰۹۷۹/۱  
۸۷-۱۲-۲۵



دانشگاه ارسک  
دانشکده فنی  
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش تبدیل انرژی

## بررسی نحوه‌ی عملکرد پلاسما اکچوئیتور در کنترل لایه

مرزی

دانشجو:

عباس عبدلی

اساتید راهنما:

دکتر ایرج میرزایی

دکتر نادر پورمحمود

بهمن ۸۶

۱۰۸۹۴۲

معاونت آموزشی  
دانشگاه ارسک

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۲۱

پایان نامه

به تاریخ ۱۱/۱۲/۸۶ شماره

مورد پذیرش هیات محترم

داوران با رتبه عالی و نمره ۱۸۱ - قرار گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران: ایرج بیضایی

۲- استاد مشاور: استاد ارشد (دوم) نادر نوری

۳- داور خارجی: تیرام حسن آبی

۴- داور داخلی: سید مهدی حسینی

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی: سید محمد طرنگ

م ر ن ض ی و آ پ ش ف ء م ن ے ہ ا ی ش د

## سپاسگزاری:

از اساتید راهنمای گرانقدر جناب آقای دکتر میرزایی و جناب آقای پورمحمود تقدیر و تشکر می‌نمایم. از استاد محترم جناب آقای دکتر انواری که در انجام این تحقیق مرا یاری نمودند کمال تشکر را دارم.

عباس عبدلی

بهمن ۱۳۸۶

## چکیده

پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی کنترل جریان، منجر به استفاده از روش‌های جدیدی در این زمینه شده است. در میان این روش‌ها، استفاده از پلاسما اکچوئیتورها کارآیی خود را در کاربردهای مختلف نشان داده است.

در این پروژه نشان داده شده که اثر پلاسما اکچوئیتور بر سیال را می‌توان با استفاده از مدل الکترواستاتیک، به شکل یک بردار نیروی بدنی به معادلات ناویر-استوکس اضافه کرد. این مدل بر پایه‌ی مقیاس‌های زمانی متفاوت، که نقش‌های متفاوتی در فیزیک پلاسما اکچوئیتور دارند، استوار است. این تفاوت در مقیاس‌های زمانی، اجازه می‌دهد که مسئله به دو بخش مجزای شکل‌گیری نیروی بدنی و پاسخ جریان سیال، تقسیم گردد. از این مدل برای شبیه‌سازی یک پلاسما اکچوئیتور با آرایش نامتقارن الکترودها در هوای ساکن، استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل الکترواستاتیک با نتایج تجربی مقایسه شده است. علی‌رغم اختلافاتی که بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی مشاهده شده، در کل این مدل قادر است که اثر پلاسما اکچوئیتور را به طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

در میان روش‌های فعال کنترل جریان، EHD، MHD و EMHD تنها روش‌هایی هستند که بر پایه‌ی القای نیروی بدنی استوار می‌باشند. در این تحقیق ابتدا به شبیه‌سازی اثرات نیروهای بدنی متفاوت، بر جریان روی ایرفویل NACA 0021، که در دامنه‌های مختلفی عمل می‌کنند، پرداخته شده و سپس، از نتایج حاصل از آن در بهینه کردن پلاسما اکچوئیتور استفاده شده است. در ادامه رابطه‌ی بین نیروهای الکتریکی با لزجت (عدد عدلی  $A_b$ ) و نیروی الکتریکی با اینرسی (عدد  $D_e$ )، به کمک آنالیز ابعادی به دست آمده است. نشان داده شده که عدد مغناطیسی عدلی ( $A_{bm}$ ) و عدد استوارت ( $Q$ ) در MHD، نقشی مشابه با اعداد  $A_b$  و  $D_e$  در EHD دارند. در انتها این اعداد برای پلاسما اکچوئیتورها تعریف شده است که به کمک آنها می‌توان کارایی پلاسما اکچوئیتور را در کنترل جریان نشان داد.

کلمات کلیدی: EHD، پلاسما اکچوئیتور، الکترواستاتیک، نیروی بدنی، کنترل جدائی، MHD

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
..... أ	فهرت مطالب
..... ج	فهرت نمودارها و اشكال
..... ر	فهرت جداول
..... ز	فهرت علائم اختصاری

## فصل اول

### ۱- مقدمه

..... ۱	۱-۱ روش های کنترل لایه مرزی
..... ۱	۱-۱-۱ حرکت دیواره
..... ۱	۱-۱-۲ تزریق یا برداشت سیال
..... ۲	۱-۱-۳ تصحیح توپولوژی سطح دیواره
..... ۲	۱-۱-۴ انرژی دادن به سیال یا دیواره
..... ۵	۱-۲ پلازما اکچوئیتور
..... ۱۶	۱-۳ ساختار پایان نامه

## فصل دوم

### ۲- مدل الکترواستاتیک

..... ۱۷	۱-۲ مقدمه
----------	-----------

۱۷.....	۲-۲ فرمول بندی.....
۱۸.....	۱-۲-۲ مدل الکترواستاتیک.....
۲۴.....	۲-۲-۲ معادلات حاکم بر سیال.....
۲۶.....	۳-۲ نتیجه و بحث و بررسی.....

### فصل سوم

#### ۳- تاثیر نیروی حجمی در کنترل جدائی

۴۹.....	۱-۳ مقدمه.....
۵۰.....	۲-۳ مدل کردن مسئله.....
۵۶.....	۳-۳ نتیجه و بحث و بررسی.....
۷۹.....	۴-۳ بهینه سازی پلازما اکچوئیتور.....
۸۴.....	۵-۳ آنالیز بی بعدی.....

### فصل چهارم

#### ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۱.....	۱-۴ نتیجه گیری.....
۹۱.....	۱-۱-۴ مدل الکترواستاتیک.....
۹۲.....	۲-۱-۴ تاثیر نیروی حجمی مجازی.....
۹۴.....	۲-۴ پیشنهادات.....

### پیوست الف

#### الف - روش های عددی

۹۶.....	الف-۱ مقدمه.....
---------	------------------



- الف-۲ بررسی شرایط حاکم بر جریان ..... ۹۷
- الف-۳ روش‌های حل معادلات حاکم بر جریان سیال ..... ۹۷
- الف-۳-۱ روش تفاضل محدود ..... ۹۸
- الف-۳-۲ روش المان محدود ..... ۹۸
- الف-۳-۳ روش حجم محدود ..... ۹۹
- الف-۴ روش‌های محاسبه ترم جابه‌جایی در معادلات حاکم ..... ۱۰۲
- الف-۴-۱ مجزاسازی معادلات ممتم ..... ۱۰۲
- الف-۴-۱-۱ روش بالا دست مرتبه اول ..... ۱۰۳
- الف-۴-۱-۲ روش بالا دست مرتبه دوم ..... ۱۰۴
- الف-۴-۱-۳ روش توانی ..... ۱۰۵
- الف-۴-۱-۴ روش مرتبه ۳ ..... ۱۰۷
- الف-۵ محاسبات مربوط به توزیع فشار ..... ۱۰۸
- الف-۵-۱ درونیابی فشار ..... ۱۰۸
- الف-۵-۲ وابستگی سرعت-فشار ..... ۱۰۹
- الف-۵-۲-۱ الگوریتم سیمپل ..... ۱۱۰
- الف-۵-۲-۲ الگوریتم سیمپلر ..... ۱۱۰
- الف-۵-۲-۳ الگوریتم سیمپل‌سی ..... ۱۱۱
- الف-۵-۲-۴ الگوریتم پیزو ..... ۱۱۱
- الف-۶ حل معادلات جبری ..... ۱۱۱
- الف-۷ فاکتورهای زیرتخفیف و فوق‌تخفیف ..... ۱۱۲
- الف-۸ همگرایی حل ..... ۱۱۳

پیوست ب

ب- مقدمه‌ای بر نرم‌افزار

- ب-۱ مقدمه ..... ۱۱۵
- ب-۲ نرم‌افزار پیش‌پردازنده ..... ۱۱۶
- ب-۲-۱ تولید هندسه ..... ۱۱۶
- ب-۲-۲ تولید کردن شبکه ..... ۱۱۶
- ب-۲-۲-۱ مدت زمان لازم برای تولید شبکه ..... ۱۱۷
- ب-۲-۲-۲ ملاحظات محاسباتی ..... ۱۱۷
- ب-۲-۲-۳ کیفیت شبکه ..... ۱۱۷
- ب-۲-۳-۱ پراکندگی و فشردگی گره‌ها ..... ۱۱۸
- ب-۲-۳-۲ یکنواختی و یکدستی شبکه ..... ۱۱۸
- ب-۲-۳-۳ کشیدگی المان‌ها ..... ۱۱۸
- ب-۲-۴-۱ انواع شبکه‌ها ..... ۱۱۹
- ب-۲-۴-۲ شبکه با سازمان ..... ۱۲۱
- ب-۲-۳-۳ شرایط مرزی ..... ۱۲۱
- ب-۲-۳-۱ شرط مرزی دیواره ..... ۱۲۲
- ب-۲-۳-۲ شرط مرزی تقارن محوری ..... ۱۲۲
- ب-۲-۳-۳ شرط مرزی فشار خروجی ..... ۱۲۲
- ب-۳ نرم‌افزار پس‌پردازنده یا حل‌گر ..... ۱۲۳
- ب-۳-۱ انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول‌بندی حل ..... ۱۲۵
- ب-۳-۲ انتخاب مدل محاسباتی ..... ۱۲۶

- ب-۳-۳ تعیین خواص ..... ۱۲۷
- ب-۳-۴ تعیین شرایط مرزی ..... ۱۲۸
- ب-۳-۵ تنظیم کردن پارامترهای کنترل کننده حل ..... ۱۲۸
- ب-۳-۱-۵ فاکتورهای زیر تخفیف ..... ۱۲۹
- ب-۳-۵-۲ حل کننده های تفکیکی ..... ۱۲۹
- ب-۳-۵-۲-۱ مجزاسازی معادلات ممتهم ..... ۱۲۹
- ب-۳-۵-۲-۲ میان یابی فشار ..... ۱۳۰
- ب-۳-۵-۳ وابستگی سرعت - فشار ..... ۱۳۰
- ب-۳-۶ مقداردهی اولیه به میدان جریان ..... ۱۳۱
- ب-۳-۷ شروع و همگرایی محاسبات ..... ۱۳۱
- مراجع ..... ۱۳۲

## فهرست نمودارها و اشکال

- شکل ۱-۱ ساختار شماتیک پلاسما اکچوئیتور..... ۶
- شکل ۲-۱ ساختار شماتیک پلاسما اکچوئیتور DBD (الف) وقتی ولتاژ ورودی منفی است، (ب) وقتی ولتاژ ورودی مثبت است ..... ۸
- شکل ۱-۲ میدان الکتریکی یک‌بعدی وارد بر بارها ..... ۲۰
- شکل ۲-۲ مقایسه پروفیل‌های سرعت حاصل از جت القایی پلاسما اکچوئیتور با پروفیل‌های سرعت تئوری جت دیواره..... ۲۶
- شکل ۳-۲ ناحیه‌ی حل مسئله ..... ۲۷
- شکل ۴-۲ شبکه بی‌سازمان مثلثی مورد استفاده (الف) کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۲۸
- شکل ۵-۲ کانتورهای پتانسیل الکتریکی (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۲۹
- شکل ۶-۲ کانتورهای میدان الکتریکی در راستای X (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۳۰
- شکل ۷-۲ کانتورهای میدان الکتریکی در راستای Y (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۳۱

شکل ۸-۲ کانتورهای  $-\varphi\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)$  (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف

فصل مشترک الکترودها ..... ۳۳

شکل ۹-۲ کانتورهای  $-\varphi\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)$  (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده شبکه در اطراف

فصل مشترک الکترودها ..... ۳۴

شکل ۱۰-۲ شبکه سازمان یافته مربعی مورد استفاده ..... ۳۵

شکل ۱۱-۲ (الف) کانتورهای خطوط جریان (ب) بردارهای خطوط جریان (ج) کانتورهای اندازه سرعت در اطراف

فصل مشترک الکترودها (د) نمای بزرگ شده کانتورهای اندازه سرعت در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۳۷

شکل ۱۲-۲ کانتورهای میدان الکتریکی در راستای X (الف) در کل ناحیه‌ی حل مسئله (ب) نمای بزرگ شده

شبکه در اطراف فصل مشترک الکترودها ..... ۳۸

شکل ۱۳-۲ پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف از سطح مشترک الکترودها (الف) نتایج حاصل از

شبیه‌سازی (ب) نتایج حاصل از شبیه‌سازی بدون نتایج زیر ۱ mm (ج) نتایج حاصل از آزمایشات ..... ۴۱

شکل ۱۴-۲ مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش (الف)  $X = 1 \text{ cm}$  (ب)  $X = 2 \text{ cm}$

(ج)  $X = 3 \text{ cm}$  ..... ۴۳

شکل ۱۵-۲ پروفیل‌های سرعت در  $x = 1.5 \text{ cm}$  به ازای ولتاژهای مختلف ۷-۴ kV (الف) نتایج حاصل از

شبیه‌سازی (ب) نتایج حاصل از آزمایشات ..... ۴۵

شکل ۲-۱۶ پروفیل‌های سرعت در  $x=1.5\text{ cm}$  به ازای ولتاژهای مختلف ۷-۴ kV (الف) نتایج حاصل

از شبیه‌سازی (ب) نتایج حاصل از آزمایشات ..... ۴۷

شکل ۳-۱ ناحیه‌ی حل مسئله ..... ۵۱

شکل ۳-۲ شبکه مورد استفاده برای حل مسئله الف) نمای کلی شبکه، ب) نمای بزرگ شده در اطراف ایرفویل ..... ۵۲

شکل ۳-۳ الف) کانتورهای خط جریان ب) توزیع ضریب فشار ..... ۵۷

شکل ۳-۴ شکل شماتیک دامنه‌های اعمال نیروی بدنی ..... ۵۸

شکل ۳-۵ کانتور خطوط جریان برای دامنه‌ی FBCEF الف)  $|\vec{f}_b| = 100\text{ N/m}^3$  ب)  $|\vec{f}_b| = 1000\text{ N/m}^3$

ج)  $|\vec{f}_b| = 5000\text{ N/m}^3$  د)  $|\vec{f}_b| = 6000\text{ N/m}^3$  ه)  $|\vec{f}_b| = 7000\text{ N/m}^3$  و)  $|\vec{f}_b| = 10000\text{ N/m}^3$  ..... ۶۱

شکل ۳-۶ توزیع ضریب فشار به ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۶۲

شکل ۳-۷ کانتور خطوط جریان برای دامنه‌ی FBCEF الف)  $|\vec{f}_b| = 100\text{ N/m}^3$  ب)  $|\vec{f}_b| = 1000\text{ N/m}^3$

ج)  $|\vec{f}_b| = 30000\text{ N/m}^3$  ..... ۶۴

شکل ۳-۸ توزیع ضریب فشار به ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۶۵

شکل ۳-۹ کانتور خطوط جریان برای دامنه‌ی FBCEF الف)  $|\vec{f}_b| = 100\text{ N/m}^3$  ب)  $|\vec{f}_b| = 1000\text{ N/m}^3$

ج)  $|\vec{f}_b| = 10000\text{ N/m}^3$  د)  $|\vec{f}_b| = 30000\text{ N/m}^3$  ..... ۶۷

شکل ۳-۱۰ توزیع ضریب فشار به ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۶۸

شکل ۱۱-۳ کانتور خطوط جریان برای دامنه‌ی AGHJA به ازای  $\beta = 5^\circ$  (الف)  $|\vec{f}_b| = 10000 \text{ N/m}^3$

(ب)  $\beta = 15^\circ$  (ج)  $\beta = 25^\circ$  (د)  $\beta = 35^\circ$  (ه)  $\beta = 45^\circ$  (و)  $\beta = 55^\circ$  (ز)  $\beta = 65^\circ$  (ح)  $\beta = 75^\circ$

ط)  $\beta = 85^\circ$  (ی)  $\beta = 90^\circ$  ..... ۷۳

شکل ۱۲-۳ توزیع ضریب فشار به ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۷۴

شکل ۱۳-۳ کانتور خطوط جریان برای دامنه‌ی AGHJA به ازای  $\beta = -30^\circ$  (الف)  $|\vec{f}_b| = 10000 \text{ N/m}^3$

(ب)  $\beta = -45^\circ$  (ج)  $\beta = -60^\circ$  (د)  $\beta = -90^\circ$  ..... ۷۷

شکل ۱۴-۳ توزیع ضریب فشار به ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۷۸

شکل ۱۵-۳ ناحیه‌ی حل مسئله ..... ۸۰

شکل ۱۶-۳ کانتورهای پتانسیل الکتریکی (الف) نمای کلی (ب) نمای بزرگ شده به همراه بردارهای

میدان الکتریکی ..... ۸۲

شکل ۱۷-۳ کانتورهای پتانسیل الکتریکی (الف) نمای کلی (ب) نمای بزرگ شده به همراه بردارهای

میدان الکتریکی ..... ۸۴

شکل ۱۸-۳ شکل شماتیک کمترین فاصله بین الکترودها برای شکل‌های مختلف الف) پلاسما اکچوئیتور

(ب) صفحات موازی ..... ۸۹

## فهرست جداول

جدول ۱-۳  $A_b$   $A_{bm}$  و  $D_c$  ( $Q$ ) به‌ازای نیروهای بدنی متفاوت ..... ۸۶



## فهرست علائم اختصاری

<b>CCD camera (Charge-Coupled Device camera)</b>	نوعی دوربین با سرعت عکس‌برداری بسیار بالا
<b>DBD (Dielectric Barrier Discharge)</b>	یک نوع دیسشارژ محافظ دی‌الکتریک
<b>DPIV (Digital Particle Image Velocimetry)</b>	اندازه‌گیری سرعت با استفاده از تصویر دیجیتالی ذرات
<b>EHD (Electro Hydro Dynamic)</b>	الکترو هیدرودینامیک
<b>EMHD (Electro Magneto Hydro Dynamic)</b>	الکترومگنتو هیدرودینامیک
<b>LDV (Laser Doppler Velocimetry)</b>	اندازه‌گیری سرعت با استفاده از تکنیک انحرافات لیزر
<b>MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)</b>	سیستم‌های الکترومکانیکی در مقیاس میکرو
<b>MHD (Magneto Hydro Dynamic)</b>	مگنتو هیدرودینامیک
<b>PBC (Printed Circuit Board)</b>	نوعی ماده دی‌الکتریک
<b>PIC-DSMC (Particle In Cell – Direct Simulation Monte Carlo)</b>	روش تک ذره‌ای مونت کارلو
<b>PZT (Piezoelectric Transducer)</b>	پیزوالکتریک که همان ویژگی کریستالی برخی مواد است که به هنگام اعمال ولتاژ تحت فشار قرار می‌گیرند و بالعکس
<b>RMS (Root Mean Square)</b>	ریشه میانگین مربعات
<b>SBD (Surface Barrier Discharge)</b>	یک نوع دیسشارژ محافظ سطحی
<b>SDBD (Single Dielectric Barrier Discharge)</b>	یک نوع تک دیسشارژ محافظ دی‌الکتریک
<b>SPCP (Surface Plasma Chemistry Process)</b>	فرآیند شیمیایی پلاسمای سطحی

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ روش‌های کنترل لایه مرزی

در سال ۱۹۰۴، Prantl [۱] چندین روش را برای کنترل لایه مرزی معرفی کرد. او برای نشان دادن صحت ایده‌هایش، آزمایشات مناسبی را انجام داد و نتایج قابل توجهی نیز به دست آورد. رفته رفته با گذشت زمان و پیشرفت بشر در علوم پایه و به‌کارگیری این علوم در زمینه‌های مهندسی، به بروز روش‌های جدیدی در این زمینه‌ها منجر شد. در زیر مرور مختصری بر روش‌های کنترل لایه مرزی می‌کنیم.

#### ۱-۱-۱ حرکت دیواره<sup>۱</sup>

ساده‌ترین روش در کنترل لایه مرزی تلاش برای جلوگیری از تشکیل آن است [۱]. علت تشکیل لایه مرزی اختلاف سرعت بین سیال و دیواره می‌باشد، می‌توان این اختلاف را با حرکت دادن دیواره از بین برد. یکی از کاربردهای آن تحت عنوان اثر مگنیوس<sup>۲</sup> شناخته شده است.

#### ۱-۱-۲ تزریق یا برداشت سیال<sup>۳</sup>

---

<sup>۱</sup> Motion of the solid wall

<sup>۲</sup> Magnus effect

<sup>۳</sup> Mass flow injection or removal

این روش با ایجاد سوراخ‌ها یا شکاف‌هایی بر روی سطح دیواره همراه است [۱]. این روش بیان می‌دارد که تزریق یا برداشت سیال (همان سیال یا سیالی دیگر متناسب با کاربرد مورد نظر) از منفذهای ایجاد شده؛ می‌تواند در کنترل جریان لایه مرزی موثر باشد.

### ۱-۱-۳ تصحیح توپولوژی سطح دیواره<sup>۱</sup>

تعدادی از روش‌های کنترل لایه مرزی بر پایه مشاهده حرکت حیوانات مانند کوسه‌ها و دلفین‌ها به وجود آمده‌اند. ایده-ی ریبلت<sup>۲</sup> در دهه‌ی ۷۰ میلادی بر اساس همین مشاهدات می‌باشد. ریبلت‌ها به صورت شیارهایی در شکل‌های مختلف L, U و V در روی دیواره برای بهینه کردن الگوی جریان در نزدیکی دیواره و کاهش درگ به کار می‌روند. اولین استفاده عملی از ریبلت در قایق‌های امریکایی برای مسابقات قایق‌رانی المپیک ۱۹۸۴ در لس‌آنجلس بوده، در المپیک ۲۰۰۰ سیدنی نیز شناگرها برای افزایش سرعت خود از لباس‌های ریبلت‌دار استفاده کردند [۲].

نشان داده شده است که استفاده از پروفیل‌های ناهموار<sup>۳</sup> برای ایرفیل‌ها می‌تواند نقطه‌ی جدایی را در رینولدزهای پایین به عقب بیاندازد [۳].

با استفاده از شکاف‌ها در ناحیه‌های مشخصی بر روی سطح ایرفویل می‌توان نواحی کم فشار و پر فشار را به هم متصل کرده و به لایه مرزی شتاب داد<sup>۴</sup> [۱]. استفاده از Slat در Leading Edge و Flapper در Trailing Edge بر همین اساس می‌باشند. روش‌ها و وسایل دیگری در بهینه کردن توپولوژی سطح دیواره وجود دارند که متناسب با کاربرد مورد نظر به کار گرفته می‌شوند.

### ۱-۱-۴ انرژی دادن به سیال یا دیواره<sup>۵</sup>

در زیر به شرح مختصری درباره‌ی روش‌های مختلف انرژی دادن به سیال یا دیواره می‌پردازیم:

<sup>۱</sup> Modifying surface topology

<sup>۲</sup> Riblet

<sup>۳</sup> Bumpy surface

<sup>۴</sup> Blowing

<sup>۵</sup> Energizing the flow or surface

## ● سرد کردن دیواره<sup>۱</sup>

در بازه‌های مشخصی برای ماخ‌های فراصوت می‌توان لایه مرزی را با سرد کردن دیواره به‌طور کامل پایدار کرد [۱]. با سرد کردن دیواره در جریان تراکم پذیر می‌توان ضخامت لایه مرزی را نیز کاهش داد.

## ● MEMS

در این روش از پیشرفت‌های MEMS برای تصحیح لایه مرزی استفاده شده است [۴،۵]. در این روش‌ها از میکروسنسورهای تنش برشی و اکچوئیتورهایی بر روی سطح استفاده می‌شود که توسط یک شبکه‌ی عصبی به هم مرتبط هستند. شبکه عصبی جریان سیال روی سطح را حس کرده، اکچوئیتورها را فعال کرده و باعث تغییر در لایه مرزی می‌شود.

## ● نوسانات<sup>۲</sup>

این روش با به‌کارگیری دیواره‌ی متحرک، جریان متقاطع و یا نیروی متقاطع همراه است که در زمینه‌ی کاهش درگ موفق به کاهش ۴۰٪ آن شده است و بر روی ایرفویل‌ها نیز (برای شرایط مشخص) باعث به‌عقب انداختن نقطه جدائی می‌شود [۲]. این روش را به نوعی می‌توان جزء روش MEMS به‌شمار آورد در صورتی که برای ایجاد نوسانات از اکچوئیتورهای MEMS مانند اکچوئیتور PZT استفاده شود.

## ● امواج رونده یا تحریک صوتی<sup>۳</sup>

با ایجاد امواج رونده یا تحریک صوتی در زیر لایه‌ی لزج می‌توان نیروی درگ را تا ۳۰٪ کاهش داد [۲].

## ● شتاب دادن سیال به‌روش مگنتوهیدرودینامیک

---

<sup>1</sup> Cooling the wall

<sup>2</sup> Oscillations

<sup>3</sup> Traveling wave or Acoustic excitation