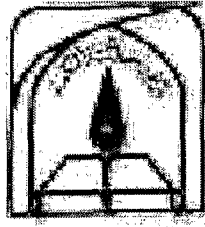


١٤٩٢٣

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

٩٢١١٦



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکترای تخصصی تبدیل انرژی

شبیه سازی عددی جریان در هندسه های  
پیچیده با روش گردابه تصادفی-المان مرزی

شهرام دلفانی

استاد راهنما:

دکتر قاسم حیدری نژاد

۱۳۸۷ / ۲ / ۲۵

تابستان ۱۳۸۴

۹۴۸۱۶



بسمه تعالی

## تاییدیه هیات داوران

آقای شهرام دلفانی ۲۴ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی عددی جریان در هندسه های پیچیده به روش گردابه تصادفی - المان مرزی در تاریخ ۱۳۸۴/۶/۲۸ ارائه کردند.  
اعضای هیات داوران نسخه نهایی این را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر قاسم حیدری نژاد	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر حسن خالقی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر بهزاد قدیری دهکردی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر - نورآذر		
استاد ناظر	دکتر - طیبی	دانشیار	
نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:



## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان نامه و رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها/ رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر میشود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در پنج ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۵/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد میشوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته  
سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار  
خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر  
مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب شهرام دلفانی دانشجوی رشته تبدیل انرژی مقطع دکتری تخصصی  
تعهد و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.  
نام و نام خانوادگی

تاریخ و امضاء

پیشکش به:

پدر، مادر و همسر، آینه‌های بی‌زنگار زندگی من

## تشکر و قدردانی

جناب آقای دکتر حیدری نژاد را از بن جان سپاس می‌گوییم. چرا که این پایان نامه بدون راهنمایی و پیشنهادهای ایشان به انجام و فرجام نمرسید. باشد که این پژوهش به همان سان که ایشان چشم می‌داشتند، ارزنده و برازنده باشد.

## چکیده

در این تحقیق ویرایش نوینی از روش تلفیقی موسوم به گردابه تصادفی-المان مرزی<sup>۱</sup> معرفی و بکار برده می‌شود که می‌تواند جریانهای لزج<sup>۲</sup> را در حالت گذرا<sup>۳</sup> و در اعداد رینولدز<sup>۴</sup> متوسط به بالا در اطراف یا درون هندسه‌های پیچیده شبیه سازی نماید. در این روش، میدان چرخشی<sup>۵</sup> به تعدادی گردابه<sup>۶</sup> عددی منفصل می‌شود و تغییرات این میدان چرخشی در هندسه مورد نظر، با تعقیب این ذرات در دیدگاه لاگرانژی<sup>۷</sup> تحت اثر دو مکانیزم جابجایی<sup>۸</sup> و نفوذ<sup>۹</sup> در هر گام زمانی<sup>۱۰</sup> قابل بیان می‌باشد. به منظور ارضاء شرط مرزی سرعت صفر روی جدار هندسه، بجای استفاده از روش تصاویر گردابه، از روش المان مرزی استفاده می‌شود. همچنین ارضاء شرط سرعت مماس بر مرز جسم از طریق خلق گردابه بر روی مرز جسم امکان پذیر می‌باشد.

از مزایای روش تلفیقی گردابه تصادفی-المان مرزی میتوان به حل لحظه‌ای در محدوده جریان متلاطم بدون استفاده از هیچگونه مدل کمکی اشاره نمود. با توجه به لاگرانژی بودن روش محاسباتی، سازگاری بسیار خوبی بین نتایج حاصل و مکانیزم واقعی حاکم بر جریان به چشم می‌خورد.

بمنظور بیان قابلیت و کارایی این روش، شبیه سازی جریان در هندسه‌های مختلف شامل انواع جریان‌های خارجی (نظیر جریان در اطراف یک استوانه با مقطع دایره، استوانه با مقطع بیضی، دو استوانه با مقطع دایره، استوانه با مقطع مستطیل با نسبت اضلاع مختلف و ...) و انواع جریان‌های داخلی (نظیر جریان داخل یک کانال با یک پله، جریان داخل یک

<sup>1</sup> Random vortex-Boundary element method

<sup>2</sup> Viscous

<sup>3</sup> Unsteady

<sup>4</sup> Reynolds number

<sup>5</sup> Vorticity

<sup>6</sup> Vortex

<sup>7</sup> Lagrangian concept

<sup>8</sup> Convection

<sup>9</sup> Diffusion

<sup>10</sup> Time step



کانال با انبساط ناگهانی، جریان در داخل یک کانال دارای دو استوانه با مقطع مربعی داخل آن و ... در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ارائه می‌گردد. در اینجا نتایج حاصل از شبیه سازی به صورت لحظه‌ای محاسبه می‌شود و مقادیر مشابه و قابل مقایسه‌ای تجربی بسیار اندکی در این خصوص در دست می‌باشد. لذا صحت محاسبه در این مرحله بیشتر بصورت کیفی است. به جهت مقایسه کمی نتایج، پس از برقراری پایداری نسبی جریان سیال، با استفاده از مقادیر متوسط گیری شده، شاخص هایی مانند ضرایب پسا و برآ<sup>۱</sup>، عدد استروهال<sup>۲</sup> و ... محاسبه می‌شود. نتایج حاصل با دقت بسیار خوب در محدوده اندازه گیری‌های آزمایشگاهی یا نتایج سایر محققان قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Drag and Lift coefficients

<sup>2</sup> Strouhal number

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول، مقدمه
۵	فصل دوم، پیشینه تحقیق
۱۰	فصل سوم، معادلات حاکم و روش حل عددی
۱۱	۳-۱- معادله سرعت و چرخش
۱۲	۳-۲- معادله انتقال چرخش
۱۴	۳-۳- روند منفصل کردن
۱۴	۳-۳-۱- انفصال میدان چرخشی
۱۷	۳-۳-۲- محاسبه میدان پتانسیلی جریان و روش المان مرزی
۲۰	۳-۳-۳- مکانیزم جابجایی و نفوذ
۲۲	۳-۴- عوامل موثر بر دقت روش گردابه تصادفی-المان مرزی
۲۹	۳-۵- محاسبه ضریب برآ و پسآ
۲۹	۳-۵-۱- بدست آوردن فشار روی مرز
۳۱	۳-۵-۲- ضرایب برآ و پسآ
۳۴	فصل چهارم، نتایج
۳۴	۴-۱- جریان داخلی
۳۴	۴-۱-۱- جریان در اطراف استوانه با مقطع دایره
۵۴	۴-۱-۲- جریان در اطراف استوانه با مقطع بیضی
۶۱	۴-۱-۳- جریان در اطراف دو استوانه دایره ای پشت سر هم

صفحه	عنوان
۸۸	۴-۱-۴- جریان در اطراف استوانه با مقاطع مستطیلی
۱۰۱	۴-۱-۵- جریان در اطراف ایرفویل
۱۰۹	۴-۲- جریان داخلی
۱۰۹	۴-۲-۱- جریان در یک کانال دارای پله
۱۱۶	۴-۲-۲- جریان در یک کانال دارای انبساط ناگهانی
۱۲۲	۴-۲-۳- جریان در یک کانال دارای دو استوانه با مقطع مربع
۱۲۷	۴-۳- جریان تراکم پذیر
۱۳۳	فصل پنجم، بحث و نتیجه گیری
۱۳۷	فصل ششم، مراجع

## فهرست علائم

مولفه طولی مرکز گردابه های اصلی در پشت استوانه	$a$
عرض مستطیل	$A$
نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ	$AR$
مولفه عرضی مرکز گردابه های اصلی در پشت استوانه	$b$
طول مستطیل	$B$
نسبت زاویه بین دو المان مجاور به زاویه ۳۶۰ درجه	$C$
ضریب پسا	$C_D$
ضریب پسای فشاری	$C_{Dp}$
ضریب پسای لزجی	$C_{Dv}$
ضریب برآ	$C_L$
ضریب برآی فشاری	$C_{Lp}$
ضریب برآی لزجی	$C_{Lv}$
مولفه طولی محل وقوع بیشترین سرعت منفی در پشت استوانه	$d$
تصویر مستطیل در جهت عمود بر جریان	$d$
طول مربع داخل کانال	$d$
قطر استوانه	$D$
فرکانس دفع گردابه ای	$f$
تابع میدان چرخشی القایی هسته گردابه حبابی	$f_\delta$
تابع میدان چرخشی القایی هسته گردابه صفحه ای	$f_A$
تابع گرین	$G$
فاصله دو مربع داخل کانال	$G$
تابع گرین در حل معادله نفوذ	$Gr$
طول المان های مرزی	$h$
تصویر مستطیل در جهت موازی جریان	$h$
ارتفاع پله	$h_s$
ارتفاع کانال	$H$
تابع وزنی	$H( )$
ژاکوبین	$J$
تابع تصحیح سرعت القایی هسته گردابه حبابی	$k_\delta$

## فهرست علائم

مشتق تابع گرین	$K$
تابع سرعت القایی هسته گردابه حبایی	$K_\delta$
طول بالادست مربع داخل کانال	$l$
مشخصه طول	$L$
طول گردابه ها در پشت استوانه	$L$
قطر استوانه	$L$
طول کانال دارای مربع	$L$
گردابه های اصلی در پشت استوانه	M1- M3
جهت عمود بر المان های مرزی	$\mathbf{n}$
تعداد گردابه صفحه ای روی هر المان	$n'$
تعداد گردابه های حبایی	$NV$
فشار	$P$
تابع چگالی احتمال	$P(\cdot)$
مولفه نرمال سرعت برمرز	$q$
مشتق تابع وزنی روی المان های مرزی	$q^*$
بردار مکان	$\mathbf{r}$
عدد رینولدز	Re
جهت مماس	$\mathbf{s}$
عدد استروهاال	St
زمان	$t$
زمان بدون بعد	$t^*$
گردابه های ثانویه در پشت استوانه	T1- T8
مولفه طولی سرعت در سیستم مختصات کارتیزین	$u$
بردار سرعت	$\mathbf{u}$
تابع وزنی روی المان های مرزی	$u^*$
بیشترین سرعت منفی در پشت استوانه	$-u_{\max}$
مولفه طولی سرعت غیر چرخشی	$u_p$

## فهرست علائم

سرعت القایبی ناشی از میدان غیر چرخشی	$u_p$
سرعت مماس برمرز	$u_t$
سرعت القایبی ناشی از میدان چرخشی	$u_\omega$
بیشترین سرعت در داخل کانال	$U_{max}$
سرعت بالادست جریان	$U_\infty$
مولفه عرضی سرعت در سیستم مختصات کارتیزین	$v$
مولفه عرضی سرعت غیر چرخشی	$v_p$
فضای دو بعدی میدان حل	$V$
ارتفاع کانال بعد از پله	$W$
ارتفاع کانال قبل از پله	$W_0$
مولفه طولی فاصله در سیستم مختصات کارتیزین	$x$
بردار مکان	$\mathbf{X}$
مولفه عرضی فاصله در سیستم مختصات کارتیزین	$y$
ساختار نوع اول جریان در زمان اولیه	$\alpha$
زاویه حمله	$\alpha$
ساختار نوع دوم جریان در زمان اولیه	$\beta$
قطر گردابه حبایی	$\delta$
تابع دلتای دیراک	$\delta(\ )$
لاپلاسین	$\Delta$
ضخامت ناحیه مرزی	$\Delta_s$
مولفه طولی نیروی فشاری در سیستم کارتیزین بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{xp}$
مولفه طولی نیروی لزجی در سیستم کارتیزین بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{xv}$
مولفه عرضی نیروی فشاری در سیستم کارتیزین بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{yp}$
مولفه عرضی نیروی لزجی در سیستم کارتیزین بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{yv}$
مولفه نرمال نیروی فشاری در سیستم منحنی الخط بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{\xi p}$
مولفه نرمال نیروی لزجی در سیستم منحنی الخط بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{\xi v}$
مولفه مماس نیروی فشاری در سیستم منحنی الخط بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{\eta p}$
مولفه مماس نیروی لزجی در سیستم منحنی الخط بر روی هر المان مرزی	$\Delta F_{\eta v}$

## فهرست علائم

تابع پتانسیل	$\phi$
قدرت گردابه صفحه ای	$\gamma$
قدرت گردابه حبابی	$\Gamma$
بیشترین قدرت گردابه	$\Gamma_{\max}$
بردار تغییر مکان تصادفی	$\eta$
تغییر مکان تصادفی طولی	$\eta_x$
تغییر مکان تصادفی عرضی	$\eta_y$
جهت مماس بر مرز در سیستم مختصات منحنی الخط	$\eta$
لزجت سینماتیکی	$\mu$
لزجت دینامیکی	$\nu$
زاویه بین دو المان مجاور	$\theta$
زاویه حمله	$\theta$
چگالی	$\rho$
انحراف معیار	$\sigma$
مشخصه چرخش	$\omega$
جهت نرمال بر مرز در سیستم مختصات منحنی الخط	$\xi$
تابع جریان	$\psi$
گرادیان	$\nabla$

## فهرست جداول

صفحه

۶۳

عنوان

جدول (۱-۴) انواع ساختارهای جریان در اطراف دو استوانه



## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۲۴	شکل (۱-۳) میزان تغییرات خطای محاسباتی ضریب درگ در $\Delta t m \gamma_{\max}$ مختلف
۲۴	شکل (۲-۳) توزیع فشار اطراف استوانه بازای $Re = 6.7 \times 10^5$ در $\gamma_{\max}$ های متفاوت
۲۵	شکل (۳-۳) توزیع فشار اطراف استوانه بازای $Re = 6.7 \times 10^5$ در $m$ های متفاوت
۲۵	شکل (۴-۳) توزیع فشار اطراف استوانه بازای $Re = 6.7 \times 10^5$ در $\Delta t$ های متفاوت
۲۷	شکل (۵-۳) تغییرات $N_{av}$ بازای $m \Delta t / \gamma_{\max}$ مختلف
۲۸	شکل (۶-۳) تغییرات $N$ بازای $m / \Delta t \gamma_{\max}$ مختلف
۲۹	شکل (۷-۳) تغییرات زمان محاسبه، $time$ ، بازای $N$ و $t^*$ مختلف
۳۶	شکل (۱-۴) تصویر ناحیه چرخشی در پشت استوانه
۳۶	شکل (۲-۴) طرح شماتیک ساختار های $\alpha$ و $\beta$
۳۸	شکل (۳-۴) موقعیت گردابه های عددی در جریان اطراف استوانه در $Re = 3000$ و $t^* \leq 3.0$
۳۸	شکل (۴-۴) طرح خطوط جریان اطراف استوانه در $Re = 3000$ و $t^* \leq 3.0$
۴۱	شکل (۵-۴) موقعیت گردابه های عددی در جریان اطراف استوانه در $Re = 9500$ و $t^* \leq 3.0$
۴۱	شکل (۶-۴) طرح خطوط جریان اطراف استوانه در $Re = 9500$ و $t^* \leq 3.0$
۴۳	شکل (۷-۴) تغییرات زمانی سرعت شعاعی روی محور ناحیه چرخشی در $Re = 3000$
۴۳	شکل (۸-۴) تغییرات زمانی سرعت شعاعی روی محور ناحیه چرخشی در $Re = 9500$
۴۴	شکل (۹-۴) تغییرات زمانی $d$ و $-U_{\max}$ در $Re = 3000$
۴۴	شکل (۱۰-۴) تغییرات زمانی $d$ و $-U_{\max}$ در $Re = 9500$
۴۵	شکل (۱۱-۴) تغییرات زمانی $L$ ، $a$ و $b$ در $Re = 3000$
۴۶	شکل (۱۲-۴) تغییرات زمانی $L$ ، $a$ و $b$ در $Re = 9500$
۴۶	شکل (۱۳-۴) تغییرات زمانی زاویه جدایش در $Re = 3000$
۴۸	شکل (۱۴-۴) طرح خطوط جریان اطراف استوانه در $Re = 3000$ و $t^* = 20 - 25$
۴۸	شکل (۱۵-۴) تغییرات زمانی و مقدار متوسط زمانی ضریب پسا در $Re = 3000$
۴۹	شکل (۱۶-۴) تغییرات زمانی و مقدار متوسط زمانی ضریب برآ در $Re = 3000$
۵۱	شکل (۱۷-۴) موقعیت و بردار سرعت گردابه های عددی در $t^* = 20 - 34$ بازاء $Re = 3000$
۵۲	شکل (۱۸-۴) طرح خطوط جریان اطراف استوانه در $Re = 9500$ و $t^* = 20 - 25$
۵۳	شکل (۱۹-۴) تغییرات زمانی و مقدار متوسط زمانی ضریب پسا در $Re = 9500$
۵۳	شکل (۲۰-۴) تغییرات زمانی و مقدار متوسط زمانی ضریب برآ در $Re = 9500$

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۵۴	شکل (۲۱-۴) تغییرات زمانی ضریب پسا در اعداد رینولدز مختلف
۵۵	شکل (۲۲-۴) خطوط جریان اطراف بیضی بازای $AR = 0.2, Re = 3000$ و $\theta = 0.0$ و $t^* \leq 3.0$
۵۶	شکل (۲۳-۴) خطوط جریان اطراف بیضی بازای $AR = 0.2, Re = 3000$ و $\theta = 30.0$ و $t^* \leq 3.0$
۵۶	شکل (۲۴-۴) خطوط جریان اطراف بیضی بازای $AR = 0.2, Re = 3000$ و $\theta = 90.0$ و $t^* \leq 3.0$
۵۷	شکل (۲۵-۴) خطوط جریان اطراف بیضی بازای $AR = 0.5, Re = 3000$ و $\theta = 0.0$ و $t^* \leq 3.0$
۵۸	شکل (۲۶-۴) خطوط جریان اطراف بیضی بازای $AR = 0.2, Re = 3000$ و $\theta = 0.0$ و $t^* = 20.0 - 25.0$
۵۹	شکل (۲۷-۴) تغییرات زمانی و مقدار متوسط ضریب پسا بازای $AR = 0.2, Re = 3000$ و $\theta = 0.0$
۶۰	شکل (۲۸-۴) موقعیت و بردار سرعت گردابه های عددی در اطراف بیضی $AR = 0.2$ و $\theta = 30$ در بازه زمانی $t^* = 20.5 - 30$ و عدد رینولدز $Re = 3000$
۶۲	شکل (۲۹-۴) a: طرح هندسی در مقابل جریان b: طرح لایه برشی در پشت استوانه ها
۶۲	شکل (۳۰-۴) انواع ساختار های جریان در اطراف دو استوانه بر اساس $P/D$ و $\alpha$ های متفاوت
۶۵	شکل (۳۱-۴) ساختار جریان جسم منفرد گرد، نوع یک بازای $P/D = 1.0, \alpha = 10^\circ$ و $Re = 900$ در زمانهای مختلف و مقایسه آن با عکسبرداری تجربی
۶۶	شکل (۳۲-۴) ساختار جریان جسم منفرد گرد، نوع دو بازای $P/D = 1.0, \alpha = 50^\circ$ و $Re = 1270$ در زمانهای مختلف و مقایسه آن با عکسبرداری تجربی
۶۷	شکل (۳۳-۴) جریان تراوشی بازای $P/D = 1.125, \alpha = 60^\circ$ و $Re = 1900$ در زمانهای مختلف
۶۹	شکل (۳۴-۴) ساختار جریان اتصال لایه برشی بازای $P/D = 1.5, \alpha = 10^\circ$ و $Re = 1300$ در زمانهای مختلف و مقایسه عکسبرداری تجربی
۷۰	شکل (۳۵-۴) ساختار جریان جدایش القایی بازای $P/D = 1.5, \alpha = 20^\circ$ و $Re = 1320$ در زمانهای مختلف و مقایسه بانتهای حاصل از عکسبرداری تجربی
۷۱	شکل (۳۶-۴) طرح شماتیک ساختار جریان از نوع برخورد گردابه (VI)
۷۲	شکل (۳۷-۴) ساختار جریان برخورد گردابه بازای $P/D = 3.5, \alpha = 10^\circ$ و $Re = 1900$ بصورت زمانی

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۷۴	شکل (۳۸-۴) ساختار جریان دفع گردابه ای همزمان بازای $P/D = 3.5$ ، $\alpha = 30^\circ$ و $Re = 830$ بصورت زمانی و مقایسه با نتایج تجربی
۷۵	شکل (۳۹-۴) ساختار جریان دفع گردابه ای همزمان بازای $P/D = 4.0$ ، $\alpha = 90^\circ$ و $Re = 1900$
۷۶	شکل (۴۰-۴) طرح شماتیک ساختار جریان تلفیق و احاطه گردابه a: (VPE) و b: (VPSE)
۷۷	شکل (۴۱-۴) ساختار جریان تلفیق و احاطه گردابه بازای $P/D = 1.5$ ، $\alpha = 30^\circ$ و $Re = 850$ بصورت زمانی میباشد و مقایسه با نتایج حاصل از عکسبرداری تجربی
۷۸	شکل (۴۲-۴) ساختار جریان تلفیق و احاطه و انشعاب گردابه بازا بازای $P/D = 2.0$ ، $\alpha = 40^\circ$ و $Re = 880$ بصورت زمانی میباشد و مقایسه با نتایج حاصل از عکسبرداری تجربی
۸۰	شکل (۴۳-۴) تغییرات عدد استروهل در در $P/D$ های مختلف بازاء زوایای برخورد مختلف
۸۲	شکل (۴۴-۴) تغییرات عدد استروهل در $\alpha$ های مختلف بازای فاصله های مختلف
۸۴	شکل (۴۵-۴) تغییرات ضرایب برآ و پسآ در زاویه برخورد مختلف استوانه های بالا و پایین دستی در $P/D = 1.125$ و $P/D = 1.25$ بازای $5 \times 10^4 - 2 \times 10^4$ $Re$
۸۵	شکل (۴۶-۴) تغییرات ضرایب برآ و پسآ بازای زاویه برخورد مختلف استوانه های بالا و پایین دستی در $P/D = 2.0$ بازای $5 \times 10^4 - 2 \times 10^4$ $Re$
۸۷	شکل (۴۷-۴) خطوط جریان در اطراف دو استوانه پشت سرهم در $Re = 20000$ و $t^* \leq 19$
۸۸	شکل (۴۸-۴) تغییرات زمانی ضرایب برآ و پسآی دو استوانه پشت سر هم بازای $Re = 20000$
۸۹	شکل (۴۹-۴) طرح شماتیک مقاطع مستطیلی در برابر جریان
۹۰	شکل (۵۰-۴) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ ، $\alpha = 0.0$ ، $0 \leq t^* \leq 12.0$ و $Re = 200$
۹۱	شکل (۵۱-۴) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ ، $\alpha = 22.5$ ، $0 \leq t^* \leq 12.0$ و $Re = 200$
۹۲	شکل (۵۲-۴) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ ، $\alpha = 45.0$ ، $0 \leq t^* \leq 12.0$ و $Re = 200$
۹۳	شکل (۵۳-۴) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ ، $\alpha = 0.0$ ، $17.0 \leq t^* \leq 24.0$ و $Re = 200$

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۹۵	شکل (۴-۵۴) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 2\right)$ ، $\alpha = 30.0$ ، $17.0 \leq t^* \leq 24.0$ و $Re = 200$
۹۶	شکل (۴-۵۵) جریان در اطراف مستطیل در $\left(\frac{B}{A} = 4\right)$ ، $\alpha = 15.0$ ، $17.0 \leq t^* \leq 24.0$ و $Re = 200$
۹۷	شکل (۴-۵۶) تغییرات زمانی ضریب برآ در مستطیل $\left(\frac{B}{A} = 4\right)$ ، $\alpha = 15.0$ و $Re = 200$
۹۷	شکل (۴-۵۷) تغییرات زمانی ضریب پسآ در مستطیل $\left(\frac{B}{A} = 4\right)$ ، $\alpha = 15.0$ و $Re = 200$
۹۹	شکل (۴-۵۸) تغییرات ضریب پسآ بازای زوایای حمله و نسبت اضلاع مختلف بازاء $Re = 200$
۹۹	شکل (۴-۵۹) تغییرات ضریب برآ بازای زوایای حمله و نسبت اضلاع مختلف $Re = 200$
۱۰۰	شکل (۴-۶۰) تغییرات عدد استروهمال بازای زوایای حمله و نسبت اضلاع مختلف $Re = 200$
۱۰۱	شکل (۴-۶۱) تغییرات ضریب پسآ در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ و $\alpha = 0$ در رینولدز مختلف
۱۰۱	شکل (۴-۶۲) تغییرات استروهمال در $\left(\frac{B}{A} = 1\right)$ و $\alpha = 0$ در رینولدز مختلف
۱۰۳	شکل (۴-۶۳) جریان اطراف ایرفویل NACA0012 بازای $\alpha = 5^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در $t^* \leq 6.0$
۱۰۴	شکل (۴-۶۴) تغییرات زمانی ضرایب برآ و پسآ ایرفویل NACA0012 بازاء $\alpha = 5^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در
۱۰۵	شکل (۴-۶۵) جریان در ایرفویل NACA0012 بازای $\alpha = 30^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در $t^* \leq 6.0$
۱۰۶	شکل (۴-۶۶) جریان در ایرفویل NACA0012 بازای $\alpha = 45^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در $t^* \leq 6.0$
۱۰۷	شکل (۴-۶۷) جریان در ایرفویل NACA0012 بازای $\alpha = 60^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در $t^* \leq 6.0$
۱۰۸	شکل (۴-۶۸) جریان در ایرفویل NACA0012 بازای $\alpha = 90^\circ$ و $Re = 1 \times 10^6$ در $t^* \leq 6.0$
۱۰۸	شکل (۴-۶۹) تغییرات ضرایب برآ و پسآ متوسط ایرفویل NACA0012 در زوایای حمله مختلف در $Re = 1 \times 10^6$
۱۰۹	شکل (۴-۷۰) هندسه کانال دارای پله
۱۱۰	شکل (۴-۷۱) خطوط جریان داخل کانال دارای پله در $Re = 73$ و بازای $t^* \leq 30$
۱۱۱	شکل (۴-۷۲) خطوط جریان داخل کانال دارای پله در $Re = 125$ و بازای $t^* \leq 30$
۱۱۲	شکل (۴-۷۳) خطوط جریان داخل کانال دارای پله در $Re = 191$ و بازای $t^* \leq 30$
۱۱۳	شکل (۴-۷۴) خطوط جریان داخل کانال دارای پله در $Re = 229$ و بازای $t^* \leq 30$
۱۱۴	شکل (۴-۷۵) توزیع سرعت در جهت X در مقاطع مختلف کانال دارای پله در $Re = 73$
۱۱۴	شکل (۴-۷۶) توزیع سرعت در جهت X در مقاطع مختلف کانال دارای پله در $Re = 125$
۱۱۵	شکل (۴-۷۷) توزیع سرعت در جهت X در مقاطع مختلف کانال دارای پله در $Re = 191$
۱۱۵	شکل (۴-۷۸) توزیع سرعت در جهت X در مقاطع مختلف کانال دارای پله در $Re = 229$