





بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای نیما زمانی میمیان پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان حل عددی جریان لزج حول ایرفویل نوسانی با روش المان های گردابه ای در تاریخ ۱۳۹۱/۳/۱۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - هوافضا پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر بهزاد قدیری دهکردی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر فتح اله امی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی جعفریان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر شهرام دلفانی	استادیار	
مدیر گروه (با نماینده گروه تخصصی)	دکتر فتح اله امی	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تأیید 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 پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

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

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

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

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های 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 پایان‌نامه / 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 ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ 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 می‌شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء


نمایندگی امضاء

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، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

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 **هوا و فضا** است که در سال **۱۳۹۱** در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر **بهراد قدیری دهکردی**، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر **مشاروه سرکار خانم/جناب آقای دکتر** و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند 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، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد 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.

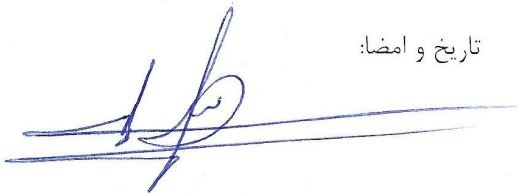
دانشجوی رشته **هوا و فضا**

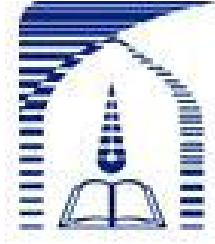
ماده ۶: اینجانب **نیما زانی میمان** مقطع **کارشناسی ارشد**

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **نیما زانی میمان**

تاریخ و امضا:





دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا – آیرودینامیک

حل عددی جریان لزج حول ایرفویل نوسانی با روش المان های گردابه ای

نیما زمانی میمان

استاد راهنما:

دکتر بهزاد قدیری دهکردی

خرداد ۱۳۹۱

تقدیم بہ عزیزانم،

پدر،

✦

مادر،

و خواہرم،

کہ تمامی موفقیت ہا و پیشرفت ہایم را بہ انان مدیونم.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می دانم، تشکر و قدردانی از زحمات و پیگیری های استاد راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر بهزاد قدیری، که با توصیه های ایشان، این پایان نامه در مسیر صحیح خود به انجام رسیده است.

از جناب آقای دکتر فتح ا... امی، به خاطر دلسوزی ها و همکاری صمیمانه شان در طول انجام این پایان نامه و زحمات بی دریغ ایشان، کمال تشکر را دارم.

همچنین از مدیر محترم گروه هوا و فضا، جناب آقای دکتر مجید میرزائی به خاطر هموار نمودن هر چه بیشتر مسیر به سرانجام رسیدن این پایان نامه، سپاسگزاری می کنم.

چکیده

نوسانات آزاد مقطع ایرفویل NACA 0012 در جریان آرام سیال لزج و تراکم ناپذیر با کمک طرح لاگرانژی المان های گردابه ای^۱ ارائه شده است. در کار حاضر، مناطقی از دامنه حل که در آن ها گردایان سرعت وجود دارد، توسط معادله ناویر- استوکس که به فرم چرخشی^۲ نوشته شده است، مدل سازی می شود. بر اساس روش Fractional Step معادله ناویر- استوکس به دو معادله مجزا تفکیک می شود که در هر گام زمانی به دنبال هم حل می شوند. یکی معادله غیر خطی جابجایی و دیگری معادله خطی نفوذ. میدان چرخش در دامنه حل، توسط گردابه های صفحه ای و حبابی گسسته سازی می شود که هر کدام از المان های گردابه ای در میدان حل، بر اساس قانون بیوساوار^۳ جابجا و بر اساس متد Random Walk نفوذ می کنند. جریان حول ایرفویل، با استفاده از نگاشت جوکوفسکی^۴ از حل جریان سیال حول دایره، به دست می آید. اعتبار سنجی کار حاضر با مقایسه نتایج ضرائب نیروی به دست آمده از روش المانهای گردابه ای و نتایج به دست آمده از نرم افزار *Xfoil* انجام گرفته است. نتایج ایرفویل نوسانی در دو حالت نوسانات استاتیکی و دینامیکی با یک درجه آزادی در جهت پیچشی ارائه شده و تغییرات دامنه نوسان و فرکانس نوسان ایرفویل و در رینولدز های ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰، با مقادیر متفاوت سفتی پیچشی ایرفویل و ضریب دمپینگ سازه بررسی شده است.

کلید واژه: روش المان های گردابه ای - ایرفویل - نوسان آزاد - جریان لزج - جریان تراکم ناپذیر

¹ Vortex Element Method

² Vorticity

³ Bio-Savart

⁴ Joukowski

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
أ	فهرست مطالب
ج	فهرست علائم و نشانه ها
و	فهرست شکل ها
۱	فصل ۱- مقدمه
۳	۱-۱- روش های عددی
۵	۲-۱- ارتعاشات ناشی از جریان سیال
۵	۳-۱- ناپایداری های ارتعاشی ناشی از جریان سیال پایا
۷	۴-۱- اهداف رساله
۸	فصل ۲- پیشینه پژوهش
۱۳	فصل ۳- روش المان های گردابه ای
۱۴	۱-۳- چرخش و گردش
۱۵	۲-۳- رشته گردابه، قانون بیوساوار و قضیه هلمهولتز
۱۷	۳-۳- اهمیت فیزیکی مدل سطح چرخشی
۱۹	۴-۳- تولید و جابجایی چرخش در لایه برشی
۲۲	۵-۳- گردابه منفرد
۲۴	۶-۳- مدل المان های گردابه ای
۲۵	۳-۶-۱- جابجایی
۲۷	۳-۶-۲- نفوذ
۳۱	۳-۶-۳- شرایط مرزی
۳۵	۳-۶-۴- ضرائب نیرو
۳۷	۷-۳- جریان حول ایرفویل
۳۹	۸-۳- معادلات حرکت سازه
۴۲	فصل ۴- تحلیل نتایج
۴۳	۱-۴- دقت محاسبات
۴۴	۲-۴- ایرفویل ساکن
۴۴	۴-۲-۱- رینولدز ۵۰۰

۴۷	..... رینولدز ۳۰۰۰	۲-۲-۴
۵۰	..... ایرفویل نوسانی	۳-۴
۵۰	..... حالت استاتیک	۱-۳-۴
۵۱	..... حالت دینامیک ..	۲-۳-۴

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۵۳

۲-۵- نتیجه گیری ۵۴

۲-۵- پیشنهادات ۵۵

فصل ۶- شکل ها ۵۶

منابع ۱۰۲

فهرست علائم و نشانه ها

علامت	شرح
b	نصف طول کورد ایرفویل
c	ثابت جوکوفسکی
C	طول کورد ایرفویل
C_D	ضریب پسا
C_θ	ضریب دمپینگ سازه
C_{DP}	ضریب پسای فشاری
C_{DV}	ضریب پسای لزجی
C_L	ضریب برا
C_{LP}	ضریب برای فشاری
C_{LV}	ضریب برای لزجی
dA	المان سطح
dl	المان محیطی
ds	المان محیطی
dt	گام زمانی
f	فرکانس
f_δ	تابع هسته
$F(z)$	پتانسیل مختلط
G	تابع گرین
h	طول گردابه های صفحه ای
I	ممان اینرسی پیچشی
K	قدرت گردابه
K_δ	تابع هسته
K_θ	سفتی پیچشی سازه
m	فاصله مرکز دایره تا مبدا مختصات در صفحه مختلط
\vec{n}	بردار یکه عمود بر سطح
P	فشار
P_i	عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱
Q_i	عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱
Q_θ	ممان پیچشی

Q	مختصات تعمیم یافته
\vec{r}	برداری شعاع
r_i	فاصله از مبدا
r_m	فاصله شعاعی حداکثر سرعت مماسی گردابه از مرکز گردابه
r_{ij}	فاصله گردابه i ام از گردابه j ام
r_{ij}^*	فاصله تصویر گردابه i ام از گردابه j ام
R	شعاع گردابه منفرد
Re	عدد رینولدز
R_c	شعاع هسته گردابه
St	عدد استروهل
t	حداکثر ضخامت ایرفویل
T	انرژی پتانسیل
u_p	سرعت پتانسیلی در جهت X
u_ω	سرعت القایی گردابه در جهت X
$u_{\omega i1}$	سرعت القایی تصویر گردابه واقع در $\frac{a^2}{r}$ در جهت X
$u_{\omega i2}$	سرعت القایی گردابه واقع در مرکز دایره در جهت X
u_∞	سرعت جریان در بالادست
v_i	سرعت در جهت Y
v_n	سرعت در جهت عمود بر سطح
v_p	سرعت پتانسیلی در جهت Y
v_r	سرعت در جهت شعاعی
v_θ	سرعت در جهت مماسی
v_{si}	سرعت زیر ورقه گردابه موازی سطح
v_{so}	سرعت بالای ورقه گردابه موازی سطح
v_ω	سرعت القایی گردابه در جهت Y
$v_{\omega i1}$	سرعت القایی تصویر گردابه واقع در $\frac{a^2}{r}$ در جهت Y
$v_{\omega i2}$	سرعت القایی گردابه واقع در مرکز دایره در جهت X
\vec{V}	برداری سرعت
V	انرژی جنبشی
$w(z)$	سرعت مختلط
W_n	فرکانس طبیعی سازه
x_α	فاصله محور الاستیک تا مرکز جرم در ایرفویل

Z	.....مختصات در صفحه مختلط
δ	.....شعاع هسته گردابه
Δ_s	.....فاصله لازم برای تبدیل گردابه های صفحه ای به حبابی
φ	.....تابع پتانسیل
ψ	.....تابع جریان
Γ	.....گردش، قدرت گردابه های حبابی
η_x	.....عدد تصادفی در جهت X
η_y	.....عدد تصادفی در جهت Y
$\gamma(s)$	.....چرخش بر واحد طول
ζ	.....مختصات در صفحه واقعی
θ	.....زاویه
ϑ	.....لزجت سینماتیکی
λ	.....مقدار ویژه ماتریس
μ	.....لزجت دینامیکی
ω	.....چرخش
τ	.....تنش برشی
ρ	.....چگالی

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ طبقه بندی ارتعاش القا شده توسط جریان پایا [6].....	۵۷
شکل ۲-۱ طبقه بندی ارتعاش القا شده توسط جریان ناپایا [6].....	۵۷
شکل ۳-۱ محدوده قفل شدن برای تولید گردابه و ارتعاش سیلندر [7].....	۵۷
شکل ۱-۳ رشته گردابه و نموداری از قانون بیوساوار [48].....	۵۸
شکل ۲-۳ سرعت به وجود آمده در نقطه P توسط رشته گردابه بینهایت [48].....	۵۸
شکل ۳-۳ لایه مرزی و تشکیل چرخش روی مرز در جریان پتانسیل [36].....	۵۸
شکل ۴-۳ نفوذ جریان به داخل مرز جسم جهت بررسی کافی بودن شرط مرزی دیریکله [36].....	۵۹
شکل ۵-۳ مدل سطح چرخشی جریان یکنواخت عبوری از روی دیواره [36].....	۵۹
شکل ۶-۳ خطوط جریان (خط پر) و خطوط هم پتانسیل (نقطه چین) برای گردابه با جهت چرخش مثبت [47].....	۵۹
شکل ۷-۳ توزیع سرعت در گردابه رانکین [53].....	۵۹
شکل ۸-۳ پخش چرخش در طول زمان در جهت شعاعی در یک گردابه منفرد [36].....	۶۰
شکل ۹-۳ پخش تصادفی ۵۰ المان گردابه ای در طول ۴ گام زمانی [36].....	۶۰
شکل ۱۰-۳ محل قرار گرفتن تصاویر گردابه برای ارضا کردن شرط سرعت عمودی صفر روی مرز [57].....	۶۰
شکل ۱۱-۳ نیروهای وارد بر ایرفویل و جهت آنها [48].....	۶۰
شکل ۱۲-۳ نقطه سکون لبه حمله [36].....	۶۱
شکل ۱۳-۳ فضای فیزیکی.....	۶۱
شکل ۱۴-۳ فضای محاسباتی.....	۶۱
شکل ۱۵-۳ مشخصات ایرفویل نوسانی.....	۶۱
شکل ۱-۴ موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=0$ و رینولدز ۵۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه.....	۶۲
شکل ۲-۴ تغییرات ضریب برا، $\alpha=0$ ، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳
شکل ۳-۴ تغییرات ضریب پسا، $\alpha=0$ ، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳
شکل ۴-۴ کانتور سرعت، $\alpha=0$ ، $t=10$ s، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳
شکل ۵-۴ بردار های سرعت، $\alpha=0$ ، $t=10$ s، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳
شکل ۶-۴ خطوط جریان، $\alpha=0$ ، $t=0$ s، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳
شکل ۷-۴ خطوط جریان، $\alpha=0$ ، $t=20$ s، رینولدز ۵۰۰.....	۶۳

شکل ۴-۸	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=7$ و رینولدز ۵۰۰ از بالا به پائین در
۶۴	زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه
شکل ۴-۹	تغییرات ضریب برا، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۵	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۱۱	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۵	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۱۳	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۵	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۱۵	کانتور سرعت، $t=0$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۶	کانتور سرعت، $t=2.5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۶	کانتور سرعت، $t=5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۶	کانتور سرعت، $t=10$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۶	کانتور سرعت، $t=15$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۶	کانتور سرعت، $t=20$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۲۱	خطوط جریان، $t=0$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۷	خطوط جریان، $t=2.5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۷	خطوط جریان، $t=5$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۷	خطوط جریان، $t=10$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۷	خطوط جریان، $t=15$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۷	خطوط جریان، $t=20$ s، $\alpha=7$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۲۷	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=14$ و رینولدز ۵۰۰ از بالا به پائین در
۶۸	زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه
شکل ۴-۲۸	تغییرات ضریب برا، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۹	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۳۰	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۹	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۳۲	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۶۹	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
شکل ۴-۳۳	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۷۰	کانتور سرعت، $t=0$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۷۰	کانتور سرعت، $t=2.5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰
۷۰	کانتور سرعت، $t=5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰

شکل ۳۷-۴	کانتور سرعت، $t=10$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۰
شکل ۳۸-۴	کانتور سرعت، $t=15$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۰
شکل ۳۹-۴	کانتور سرعت، $t=20$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۰
شکل ۴۰-۴	خطوط جریان، $t=0$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۱-۴	خطوط جریان، $t=2.5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۲-۴	خطوط جریان، $t=5$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۳-۴	خطوط جریان، $t=10$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۴-۴	خطوط جریان، $t=15$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۵-۴	خطوط جریان، $t=20$ s، $\alpha=14$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۱
شکل ۴۶-۴	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=20$ و رینولدز ۵۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه	۷۲
شکل ۴۷-۴	تغییرات ضریب برا، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۴۸-۴	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۴۹-۴	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۵۰-۴	بردارهای سرعت، $t=5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۵۱-۴	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۵۲-۴	بردارهای سرعت، $t=15$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۳
شکل ۵۳-۴	کانتور سرعت، $t=0$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۴-۴	کانتور سرعت، $t=2.5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۵-۴	کانتور سرعت، $t=5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۶-۴	کانتور سرعت، $t=10$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۷-۴	کانتور سرعت، $t=15$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۸-۴	کانتور سرعت، $t=20$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۴
شکل ۵۹-۴	خطوط جریان، $t=0$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۰-۴	خطوط جریان، $t=2.5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۱-۴	خطوط جریان، $t=5$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۲-۴	خطوط جریان، $t=10$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۳-۴	خطوط جریان، $t=15$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۴-۴	خطوط جریان، $t=20$ s، $\alpha=20$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۵
شکل ۶۵-۴	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=45$ و رینولدز ۵۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه	۷۶

شکل ۴-۶۶	تغییرات ضریب برا، $\alpha=45$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۶۷	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=45$ ، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۶۸	بردارهای سرعت، $\alpha=45$ ، $t=5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۶۹	بردارهای سرعت، $\alpha=45$ ، $t=5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۷۰	بردارهای سرعت، $\alpha=45$ ، $t=15$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۷۱	بردارهای سرعت، $\alpha=45$ ، $t=15$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۷
شکل ۴-۷۲	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=0$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۳	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۴	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۵	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=10$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۶	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=15$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۷	کانتور سرعت، $\alpha=45$ ، $t=20$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۸
شکل ۴-۷۸	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=0$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۷۹	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۸۰	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=5$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۸۱	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=10$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۸۲	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=15$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۸۳	خطوط جریان، $\alpha=45$ ، $t=20$ s، رینولدز ۵۰۰	۷۹
شکل ۴-۸۴	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=0$ و رینولدز ۳۰۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه	۸۰
شکل ۴-۸۵	تغییرات ضریب برا، $\alpha=0$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۸۶	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=0$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۸۷	کانتور سرعت، $\alpha=0$ ، $t=10$ s، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۸۸	بردارهای سرعت، $\alpha=0$ ، $t=10$ s، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۸۹	خطوط جریان، $\alpha=0$ ، $t=0$ s، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۹۰	خطوط جریان، $\alpha=0$ ، $t=20$ s، رینولدز ۳۰۰۰	۸۱
شکل ۴-۹۱	موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=7$ و رینولدز ۳۰۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه	۸۲
شکل ۴-۹۲	تغییرات ضریب برا، $\alpha=7$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۳
شکل ۴-۹۳	تغییرات ضریب پسا، $\alpha=7$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۳
شکل ۴-۹۴	بردارهای سرعت، $\alpha=7$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰	۸۳

- شکل ۹۵-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=7$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۳
- شکل ۹۶-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=7$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۳
- شکل ۹۷-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=7$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۳
- شکل ۹۸-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=0$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۹۹-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۱۰۰-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۱۰۱-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=10$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۱۰۲-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۱۰۳-۴ کانتور سرعت، $\alpha=7$ ، $t=20$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۴
- شکل ۱۰۴-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=0$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۰۵-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۰۶-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۰۷-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=10$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۰۸-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۰۹-۴ خطوط جریان، $\alpha=7$ ، $t=20$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۵
- شکل ۱۱۰-۴ موقعیت گردابه ها در جریان پائین دست در زاویه حمله $\alpha=14$ و رینولدز ۳۰۰۰ از بالا به پائین در زمان های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه ۸۶
- شکل ۱۱۱-۴ تغییرات ضریب برا، $\alpha=14$ ، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۲-۴ تغییرات ضریب پسا، $\alpha=14$ ، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۳-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=14$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۴-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=14$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۵-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=14$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۶-۴ بردارهای سرعت، $\alpha=14$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۷
- شکل ۱۱۷-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=0$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۱۸-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۱۹-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۲۰-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=10$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۲۱-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=15$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۲۲-۴ کانتور سرعت، $\alpha=14$ ، $t=20$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۸
- شکل ۱۲۳-۴ خطوط جریان، $\alpha=14$ ، $t=0$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۹
- شکل ۱۲۴-۴ خطوط جریان، $\alpha=14$ ، $t=2.5$ s، رینولدز ۳۰۰۰ ۸۹

شکل ۱۲۵-۴	خطوط جریان، $t = 5 \text{ s}$ ، $\alpha = 14$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۹
شکل ۱۲۶-۴	خطوط جریان، $t = 10 \text{ s}$ ، $\alpha = 14$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۹
شکل ۱۲۷-۴	خطوط جریان، $t = 15 \text{ s}$ ، $\alpha = 14$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۹
شکل ۱۲۸-۴	خطوط جریان، $t = 20 \text{ s}$ ، $\alpha = 14$ ، رینولدز ۳۰۰۰	۸۹
شکل ۱۲۹-۴	فرکانس غالب دفع گردابه های تشکیل شده روی سطح ایرفویل، رینولدز ۵۰۰، زاویه حمله ۵ درجه	۹۰
شکل ۱۳۰-۴	تغییر عدد استروهال با عدد رینولدز، زاویه حمله ۵ درجه	۹۰
شکل ۱۳۱-۴	تغییرات ضریب برا با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰	۹۱
شکل ۱۳۲-۴	تغییرات ضریب برا با زاویه حمله، رینولدز ۳۰۰۰	۹۱
شکل ۱۳۳-۴	تغییرات ضریب برا با زاویه حمله، رینولدز ۵۰۰۰	۹۱
شکل ۱۳۴-۴	تغییرات ضریب برا با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۱
شکل ۱۳۵-۴	تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰	۹۲
شکل ۱۳۶-۴	تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله، رینولدز ۳۰۰۰	۹۲
شکل ۱۳۷-۴	تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله، رینولدز ۵۰۰۰	۹۲
شکل ۱۳۸-۴	تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۲
شکل ۱۳۹-۴	تغییرات ضریب ممان با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰	۹۳
شکل ۱۴۰-۴	تغییرات ضریب ممان با زاویه حمله، رینولدز ۳۰۰۰	۹۳
شکل ۱۴۱-۴	تغییرات ضریب ممان با زاویه حمله، رینولدز ۵۰۰۰	۹۳
شکل ۱۴۲-۴	تغییرات ضریب ممان با زاویه حمله، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۳
شکل ۱۴۳-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 5$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۴-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 5$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۵-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 10$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۶-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 10$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۷-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 15$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۸-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 15$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۴
شکل ۱۴۹-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 5$ ، $k = 50$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۵
شکل ۱۵۰-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 5$ ، $k = 50$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۵
شکل ۱۵۱-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 10$ ، $k = 50$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۵
شکل ۱۵۲-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 50$ ، $k = 10$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۵
شکل ۱۵۳-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 15$ ، $k = 50$ ، رینولدز ۱۰۰۰	۹۵
شکل ۱۵۴-۴	نوسان استاتیک پیچشی ایرفویل، $\alpha_0 = 15$ ، $k = 50$ ، رینولدز ۱۰۰۰۰	۹۵

- شکل ۴-۱۵۵ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=1000, C=0.5, k=5, \alpha_0=10$ ۹۶
- شکل ۴-۱۵۶ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=3000, C=0.5, k=5, \alpha_0=10$ ۹۶
- شکل ۴-۱۵۷ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=10$ ۹۶
- شکل ۴-۱۵۸ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=10000, C=0.5, k=5, \alpha_0=10$ ۹۶
- شکل ۴-۱۵۹ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=3, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۰ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=10, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۱ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=15, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۲ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=20, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۳ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=30, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۴ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=50, \alpha_0=10$ ۹۷
- شکل ۴-۱۶۵ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۶۶ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.1, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۶۷ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.2, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۶۸ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.3, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۶۹ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.4, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۷۰ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.6, k=5, \alpha_0=10$ ۹۸
- شکل ۴-۱۷۱ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.7, k=5, \alpha_0=10$ ۹۹
- شکل ۴-۱۷۲ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.8, k=5, \alpha_0=10$ ۹۹
- شکل ۴-۱۷۳ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.9, k=5, \alpha_0=10$ ۹۹
- شکل ۴-۱۷۴ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=1, k=5, \alpha_0=10$ ۹۹
- شکل ۴-۱۷۵ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=0$ ۱۰۰
- شکل ۴-۱۷۶ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=2$ ۱۰۰
- شکل ۴-۱۷۷ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=4$ ۱۰۰
- شکل ۴-۱۷۸ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=6$ ۱۰۰
- شکل ۴-۱۷۹ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=8$ ۱۰۱
- شکل ۴-۱۸۰ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=12$ ۱۰۱
- شکل ۴-۱۸۱ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=14$ ۱۰۱
- شکل ۴-۱۸۲ نوسان دینامیک پیچشی، $Re=5000, C=0.5, k=5, \alpha_0=16$ ۱۰۱