بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست
گروه مهندسی آب

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پلکانی

نگارش

افشار مینایی گیگلو

استاد راهنما

دکتر مسعود قدسیان

استاد مشاور

دکتر مجتبی مهرآیین

دی ۱۳۹۲

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای افشار مینایی گیگلو پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پله ای** در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۲۸ 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 عمران - مهندسی آب پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مسعود قدسیان	استاد	
استاد مشاور	دکتر مجتبی مهرآیین	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا جلیلی قاضی زاده	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی

دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

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 با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها 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 معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **افشار مینایی گیگلو** دانشجوی رشته **مهندسی عمران- آب** ورودی سال تحصیلی **۱۳۹۰** مقطع **کارشناسی ارشد** دانشکده **مهندسی عمران و محیط زیست** متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آیین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آیین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله براساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هرگونه اعتراض را از خود سلب نمودم ».

امضا

تاریخ

آئین‌نامه پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (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 می‌شوند:

ماده ۱ : در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به‌طور کتبی به دفتر "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 **پایان‌نامه کارشناسی ارشد** نگارنده در رشته **مهندسی عمران-آب** است که در سال **۱۳۹۲** در دانشکده علوم پزشکی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی **دکتر مسعود قدسیان** ، مشاوره **دکتر مجتبی مهرآیین** 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 اهداء 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 را به‌عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵ : دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت‌های بهای خسارت، دانشگاه 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 **افشار مینایی گیگلو** دانشجوی رشته **مهندسی عمران- آب** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی

تاریخ و امضا

این مجموعه را به

پدر و مادر بزرگوارم، برادر و خواهران عزیزم، همسر

مهربانم و نور چشمانمان،

Elşan & Elin

تقدیم می کنم.

با تشکر فراوان از:

استاد راهنما، جناب آقای دکتر مسعود قدسیان و استاد مشاور جناب آقای دکتر مهرآیین که در طول این پروژه همواره از راهنمایی ها و مشاوره های ایشان بهره مند بودم.

جناب آقای دکتر زراتی و دکتر صالحی نیشابوری در طول انجام این پروژه هیچ گاه همکاری‌ها و راهنمایی‌های خود را از اینجانب دریغ ننمودند.

مسئول محترم آزمایشگاه جناب آقای مهندس مهدی‌لو و دوستان عزیزم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس که بنده را در آماده سازی فلوم آزمایشگاهی یاری نمودند.

چکیده

پرش هیدرولیکی جریان متغیر سریعی است که طی آن جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی تبدیل می‌شود. حوضچه‌های آرامش معمولاً در پایین دست شوتها، دریچه‌ها و ... برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. بلوکهای میانی، پله های مثبت و منفی و آستانه انتهایی تجهیزاتی هستند که معمولاً برای استقرار پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش استفاده می‌شوند. در تحقیق حاضر تشکیل پرش هیدرولیکی درون نوع جدیدی از حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پلکانی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشات گسترده درون فلومی با عرض ۶۰ سانتی متر، ارتفاع ۱ متر و طول ۱۲ متر انجام شده است. در این آزمایشات تاثیر آستانه انتهایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر پارمترهای مهمی چون عدد فرود اولیه[۱] عمق پایاب، هندسه آستانه و موقعیت قرار گیری آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در آزمایشات سری اول به بررسی اثر پارامترهای موثر (شرایط جریان در بالادست وپایین دست حوضچه و همچنین هندسه حوضچه شامل ارتفاع، تعداد پله و محل قرارگیری آستانه) بر خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداخته شد. نتایج آزمایشات سری اول نشان داد، می‌توان پرش‌های تشکیل شده در این نوع حوضچه را به ۵ نوع اصلی پرش نوع A، B، B مینیمم، C و C مینیمم تقسیم بندی کرد. پرش‌ها در تبدیل از نوع A به B و.... C مینیمم به تدریج درصد خروجشان از حوضچه افزایش می‌یابد طوری که در نوع min C پرش هیدرولیکی در آستانه خروج کامل از حوضچه قرار دارد و در پرش نوع A پرش به صورت کامل در حوضچه تشکیل می‌شود. افزایش عمق پایاب باعث افزایش ماندگاری پرش می‌گردد. افزایش ارتفاع آستانه اثر مثبت بر ماندگاری پرش، افزایش طول پرش، کاهش عمق پایاب و نتیجتاً افزایش نرخ استهلاک انرژی را به همراه دارد. افزایش تعداد پله آستانه اثر منفی بر ماندگاری پرش دارد. محل قرار گیری آستانه نسبت به دریچه

[۱] Approach Froude number

ورودی اثر مثبت بر ماندگاری پرش در حوضچه دارد ولی در فواصل دورتر از طول پرش نوع A اثر بسیار کمی بر پرش هیدرولیکی دارد.

آزمایشات سری دوم نیز به منظور تخمین اولیه برای طراحی حوضچه با آستانه پلکانی انجام شد. با توجه به نتایج آزمایشات سری دوم می‌توان گفت؛ به رغم هندسه ساده این نوع حوضچه (تجهیزات کمتر در مقایسه با دیگر حوضچه‌ها)، طول پرش این نوع حوضچه تقریباً برابر با حوضچه نوع USBR ۲ می‌باشد. عمق پایاب نسبی برای این نوع حوضچه کمتر از عمق پایاب نسبی حوضچه نوع USBR ۲ می‌باشد همچنین نرخ استهلاک انرژی این نوع حوضچه نیز بیشتر از نرخ استهلاک انرژی حوضچه USBR ۲ می‌باشد.

کلید واژه: پرش هیدرولیکی، مطالعه آزمایشگاهی ، آستانه انتهایی پلکانی، حوضچه آرامش

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د

فهرست جدول‌ها ..... ه

فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- هدف و دامنه تحقیق ۲

۱-۲- ساختار پایان نامه ۳

فصل ۲- مروری بر منابع ۴

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- پرش هیدرولیکی ۴

۲-۲-۱- اعماق متناظر پرش ۵

۲-۲-۲- استهلاک انرژی بین مقاطع بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی ۶

۲-۲-۳- طول پرش ۸

۲-۲-۴- پروفیل سطح جریان ۱۰

۲-۲-۵- انواع پرش هیدرولیکی ۱۱

۲-۲-۵-۱- پرش هیدرولیکی کلاسیک بر روی کف ساده ۱۲

۲-۲-۵-۲- پرش هیدرولیکی بر روی پله مثبت و منفی ۱۳

۲-۲-۵-۳- پرش هیدرولیکی بر روی آستانه ۱۷

۲-۲-۶- توزیع سرعت ۲۳

۲-۲-۷- ساختار جریان درون پرش هیدرولیکی ۲۵

۲-۳- کنترل پرش هیدرولیکی ۲۷

۲-۳-۱- حوضچه آرامش ۲۸
۲-۳-۲- انواع حوضچه آرامش ۲۸
۲-۳-۳- کاویتاسیون ۳۶
۲-۴- حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پلکانی ۳۸
۲-۵- جمع بندی ۴۱
فصل ۳- تجهیزات و روش کار ۴۳
۳-۱- مقدمه ۴۳
۳-۲- آنالیز ابعادی ۴۳
۳-۳- فرضیه ها/ پیش فرض ها: ۴۵
۳-۴- وسایل آزمایشگاهی ۴۵
۳-۴-۱- فلوم آزمایشگاهی و سیستم تامین هد آن ۴۶
۳-۴-۲- وسایل اندازه گیری ۴۸
۳-۵- روش انجام آزمایشات ۵۱
فصل ۴- نتایج و بحث ۵۶
۴-۱- مقدمه ۵۶
۴-۲- سری اول آزمایشات ۵۶
۴-۲-۱- انواع پرش ۵۶
۴-۲-۲- اثر پارامترهای مختلف بر روی انواع پرش ۶۵
۴-۲-۲-۱- اثر محل قرار گیری آستانه ۶۹
۴-۲-۲-۲- اثر ارتفاع آستانه ۶۹
۴-۲-۲-۳- اثر تعداد پله های آستانه ۷۰
۴-۲-۲-۴- اثر شرایط جریان در بالادست (عدد فرود اولیه) و پایین دست (عمق پایاب) ۷۰
۴-۲-۲-۵- مقایسه پرش کلاسیک با پرش بر روی آستانه پلکانی ۷۲

۴-۲-۳- تحلیل کمی ۷۴
۴-۲-۳-۱- اثر محل قرار گیری آستانه ۷۸
۴-۲-۳-۲- اثر ارتفاع آستانه ۷۹
۴-۲-۳-۳- اثر شرایط جریان در بالادست وپایین دست ۸۰
۴-۲-۳-۴- اثر تعداد پله های آستانه ۸۱
۴-۲-۳-۵- استهلاک انرژی ۸۳
۴-۲-۳-۶- مقایسه پرش بر روی آستانه پلکانی با آستانه قایم ۸۴
۴-۳- آزمایشات سری دوم ۸۸
۴-۳-۱- طول حوضچه ۸۹
۴-۳-۲- عمق پایاب ۹۳
۴-۳-۳- استهلاک انرژی ۹۴
فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۷
۵-۱- مقدمه ۹۷
۵-۲- نتیجه گیری ۹۷
۵-۳- پیشنهادات ۹۹
فصل ۶- فهرست مراجع ۱۰۴

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
عمق اولیه پرش	y_1
عمق ثانویه پرش	y_2
عمق پایاب	y_t
عمق پایاب پرش کلاسیک	y_2^*
نسبت اعماق متناظر پرش اجباری	Y
نسبت اعماق متناظر کلاسیک	Y^*
انرژی جریان در بالادست پرش	E_1
انرژی جریان در پایین‌دست پرش	E_2
اختلاف انرژی بین مقطع بالادست و پایین دست پرش	ΔE
شیب سطح جریان	α
طول سطح غلطابی پرش	L_r
طول پرش	L_j
ارتفاع آستانه	s
ارتفاع نسبی آستانه	S
فاصله آستانه از دریچه	L_E
تعداد پله‌های آستانه	SN
عدد فرود اولیه پرش	Fr_1
عدد رینولدز	Re
زبری	ε
طول پاشنه	x

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱- شرح آزمایشات سری اول ۵۲
جدول ۳-۲- مقادیر پارامترها ۵۳
جدول ۳-۳- شرح آزمایشات سری دوم ۵۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- طرح اولیه و اصلاح شده حوضچه آرامش سد گتوند علیا ۳

شکل ۲-۱- پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف ۵

شکل ۲-۲- پروفیل پرش هیدرولیکی به همراه نمودار انرژی مخصوص ۷

شکل ۲-۳- نمودار میزان استهلاک انرژی در مقابل عدد فرود فوق بحرانی ۷

شکل ۲-۴- نمودار میزان اتلاف انرژی در مقابل عدد فرود فوق بحرانی ۸

شکل ۲-۵- نمودار طول پرش بر حسب فرود ورودی به حوضچه آرامش ۹

شکل ۲-۶- پروفیل سطح جریان برای اعداد فرود ۲ تا ۹ ..... ۱۰

شکل ۲-۷- پروفیل تقریبی سطح آب ۱۱

شکل ۲-۸- انواع پرش در حوضچه آرامش نوع ۱. ..... ۱۲

شکل ۲-۹- انواع پرش روی پله منفی. از بالا (1a-b) پرش نوع A؛ (2a-b) پرش نوع مواج؛ (3a-b) پرش نوع موج قطاری؛(4a-b) پرش نوع B؛ (5a-b) پرش نوع B مینیمم ۱۴

شکل ۲-۱۰- انواع رژیم جریان در $0.6 < s/y_1 < 1.1$ ۱۵

شکل ۲-۱۱- انواع پرش (به صورت شماتیک) بر روی پله مثبت. a) پرش نوع A، b) پرش نوع B، c) هوادهی شده، d) هوادهی نشده ۱۶

شکل ۲-۱۲- بر روی پله منفی؛ ۱) پرش نوع A ۲) پرش نوع B مینیمم ۱۷

شکل ۲-۱۳- انواع پرش بر روی آستانه ساده. ۱) پرش نوع A، ۲) پرش نوع B، ۳) پرش نوع B مینیمم، ۴) پرش نوع C، ۵) پرش نوع D ۱۸

شکل ۲-۱۴- a) پرش کلاسیک b) پرش بر روی آستانه ۱۹

شکل ۲-۱۵- کاهش عمق پایاب نسبی بر حسب فاصله پاشنه از آستانه و ارتفاع آستانه ۱۹

شکل ۲-۱۶- a) پرش نوع اول b) پرش نوع دوم c) شرایط اسپری ۲۰

شکل ۲-۱۷- تبدیل جریان از حالت پاششی به پرش هیدرولیکی اولیه؛ الف) با افزایش ارتفاع آستانه ب) با افزایش عمق پایاب ۲۱
شکل ۲-۱۸- دسته بندی شرایط جریان ۲۳
شکل ۲-۱۹- شرایط وقوع پرش اولیه؛ a) ارتفاع حدی آستانه تابع عدد فرود فوق بحرانی $\frac{S_C}{h_1} = f(F_1)$ b) عمق پایاب حدی تابع ارتفاع نسبی آستانه و عدد فرود فوق بحرانی $\frac{h_S}{h_1} = f\left(F_1, \frac{S}{h_1}\right)$ ۲۳
شکل ۲-۲۰- پروفیل سرعت پرش هیدرولیکی کلاسیک ۲۴
شکل ۲-۲۱- نمای شماتیک پرش آزاد و مستغرق، همراه با پروفیل توزیع سرعت ۲۴
شکل ۲-۲۲- نمای شماتیک جفت شدگی گردابه ها درون پرش هیدرولیکی ۲۷
شکل ۲-۲۳- فلومهای آزمایشگاهی USBR ۲۹
شکل ۲-۲۴- حوضچه آرامش نوع USBR I ۲۹
شکل ۲-۲۵- حوضچه آرامش نوع USBR II ۳۰
شکل ۲-۲۶- حوضچه آرامش نوع USBR III ۳۱
شکل ۲-۲۷- حوضچه آرامش نوع USBR IV ۳۱
شکل ۲-۲۸- معرفی پارامترها ۳۲
شکل ۲-۲۹- الگوی جریان a) رژیم DSJ b) رژیم RWJ ۳۳
شکل ۲-۳۰- حوضچه آرامش جدید ۳۴
شکل ۲-۳۱- پرش آزاد بر روی بستر موج دار ۳۵
شکل ۲-۳۲- الف؛ ماندگاری پرش در دبی ۲۸۵ متر مکعب بر ثانیه، ب؛ خروج پرش از حوضچه آرامش در دبی ۳۹۵ متر مکعب بر ثانیه ۳۹
شکل ۲-۳۳- حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پلکانی ۴۰
شکل ۲-۳۴- ماندگاری پرش در حوضچه آرامش در دبی ۵۱۷ متر مکعب بر ثانیه ۴۰
شکل ۲-۳۵- نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی ۴۰

شکل ۲-۳۶- طول نسبی پرش مستغرق در برابر عدد فرود اولیه برای ۵ شکل حوضچه آرامش ۴۱
شکل ۲-۳۷- شکل آستانه انتهایی در حوضچه های آرامش USBR ۴۲
شکل ۲-۳۸- اشکال آستانه پلکانی ۴۳
شکل ۳-۱- نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی ۴۳
شکل ۳-۲- مخزن تامین هد در ابتدای فلوم ۴۶
شکل ۳-۳- دریچه کشویی ۴۷
شکل ۳-۴- لبه دریچه از نمای داخل مخزن ۴۷
شکل ۳-۵- دریچه تنظیم عمق پایاب در انتهای فلوم ۴۸
شکل ۳-۶- دبی سنج و نحوه اتصال آن به لوله ۴۸
شکل ۳-۷- عمق سنج دیجیتالی ۴۹
شکل ۳-۸- نوسان پاشنه پرش در عدد فرود ۹/۵ ..... ۵۰
شکل ۳-۹- دریچه کشویی با لبه استریم لاین شده ۵۰
شکل ۳-۱۰- آستانه دو و سه پله ای با ارتفاع برابر (s=7.5 cm) ۵۱
شکل ۳-۱۱- نصب آستانه در حوضچه آرامش؛ الف) دید از پشت آستانه ب) دید از بالا ج) دید از روبرو۵۲
شکل ۳-۱۲- نتایج آزمایشات بر روی کف ساده بدون آستانه ۵۵
شکل ۴-۱- پرش نوع A (الف) جریان بر روی آستانه از نمای نزدیک، ب) سطح صاف جریان بر روی آستانه)، عمق پایاب برابر با ۲۸/۶ سانتیمتر ۵۸
شکل ۴-۲ -پرش نوع A، عمق پایاب برابر با ۲۸/۶ سانتیمتر ۵۸
شکل ۴-۳ -پرش نوع B، عمق پایاب برابر با ۲۷/۸ سانتیمتر ۵۹
شکل ۴-۴- پرش نوع B، عمق پایاب برابر با ۲۷/۸ سانتیمتر ۵۹
شکل ۴-۵- پرش نوع min B (جریان بر روی آستانه)، عمق پایاب برابر با ۲۷/۱ سانتیمتر ۶۰
شکل ۴-۶- پرش نوع min B، عمق پایاب برابر با ۲۷/۱ سانتیمتر ۶۰
شکل ۴-۷- پرش نوع C (جریان بر روی آستانه)، عمق پایاب برابر با ۲۶/۲۵ سانتیمتر ۶۱

شکل ۴-۸- پرش نوع C، عمق پایاب برابر با ۲۶/۲۵ سانتیمتر ۶۱
شکل ۴-۹- پرش نوع min C (جریان بر روی آستانه)، عمق پایاب برابر با ۲۵/۱ سانتیمتر ۶۲
شکل ۴-۱۰- پرش نوع min C، عمق پایاب برابر با ۲۵/۱ سانتیمتر ۶۲
شکل ۴-۱۱- پرش خارج شده از حوضچه (پاششی) از نمای داخل (شکل سمت چپ) و بیرون فلوم (شکل سمت راست) ۶۳
شکل ۴-۱۲- جریان پاششی ۶۳
شکل ۴-۱۳- عکسهای پانوراماییی و نمای شماتیک از انواع پرش ها ۶۴
شکل ۴-۱۴- تزریق رنگ درون جریان ۶۵
شکل ۴-۱۵- انواع پرش در $L_E / y_1 \approx 38$: آستانه دوپله ای (قسمت a تا c)، آستانه سه پله ای (قسمت d تا f) ۶۶
شکل ۴-۱۶- انواع پرش در $L_E / y_1 \approx 48$: آستانه دوپله ای (قسمت a تا c)، آستانه سه پله ای (قسمت d تا f) ۶۷
شکل ۴-۱۷- انواع پرش در $L_E / y_1 \approx 57$: آستانه دوپله ای (قسمت a تا c)، آستانه سه پله ای (قسمت d تا f) ۶۸
شکل ۴-۱۸- انواع پرشهای تشکیل شده بر حسب عمق پایاب نسبی و عدد فرود اولیه ۷۱
شکل ۴-۱۹- a) پرش کلاسیک b) پرش بر روی آستانه پلکانی ۷۲
شکل ۴-۲۰- کاهش عمق پایاب ناشی از اثر آستانه بر حسب فاصله پاشنه از آستانه ($1-\Lambda$) و ارتفاع نسبی آستانه ۷۲
شکل ۴-۲۱- کاهش عمق پایاب ناشی از اثر آستانه بر حسب فاصله پاشنه از آستانه ($1-\Lambda$) و نوع پرش ۷۳
شکل ۴-۲۲- پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش با آستانه انتهایی پلکانی ۷۴
شکل ۴-۲۳- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود اولیه در موقعیت نسبی آستانه 38y1 برای آستانه دوپله ای (چپ) و سه پله ای (راست) ۷۵

شکل ۴-۲۴- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود اولیه در موقعیت نسبی آستانه 48y1 برای آستانه دوپله ای (چپ) و سه پله ای (راست) ۷۶
شکل ۴-۲۵- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود اولیه در موقعیت نسبی آستانه 58y1 برای آستانه دوپله ای (چپ) و سه پله ای (راست) ۷۷
شکل ۴-۲۶- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل موقعیت نسبی آستانه برای فرودهای مختلف: a) آستانه دوپله ای b) آستانه سه پله ای ۷۸
شکل ۴-۲۷- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل ارتفاع نسبی آستانه برای فرودهای مختلف: a) آستانه ۸۰
شکل ۴-۲۸- تغییرات طول نسبی پاشنه در مقابل عمق پایاب نسبی برای اعداد فرود مختلف: a) آستانه دوپله ای b) آستانه سه پله ای ۸۱
شکل ۴-۲۹- مقایسه طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود اولیه بین آستانه دو و سه پله ای در موقعیت نسبی آستانه 48y1 ..... ۸۲
شکل ۴-۳۰- نرخ استهلاک انرژی در مقابل فرود اولیه ۸۳
شکل ۴-۳۱- نرخ استهلاک انرژی در مقابل عمق پایاب نسبی ۸۳
شکل ۴-۳۲- نمودار انرژی مخصوص پرش هیدرولیکی کلاسیک ۸۴
شکل ۴-۳۳- میزان خروج پرش در مقابل کاهش عمق پایاب ۸۶
شکل ۴-۳۴- مقایسه بین خط اثر آستانه دو و سه پله ای با آستانه شیب دار ۸۸
شکل ۴-۳۵- پرش نوع A (آزمایشات سری دوم) ۸۹
شکل ۴-۳۶- طول نسبی پرش بر حسب عمق پایاب در مقابل عدد فرود اولیه ؛ a) $S/y_1 = 2$ b) $S/y_1 = 2.4$ c) $S/y_1 = 2.9$ ۹۰
شکل ۴-۳۷- طول نسبی پرش بر حسب عمق پایاب در مقابل عدد فرود اولیه (ارتفاع آستانه مختلف). ۹۱
شکل ۴-۳۸- طول نسبی پرش بر حسب عمق اولیه در مقابل عدد فرود اولیه ۹۲
شکل ۴-۳۹- عمق نسبی پایاب بر حسب عمق اولیه در مقابل عدد فرود ۹۳

شکل ۴-۴۰- عمق پایاب نسبی بر حسب عمق اولیه برای سه نوع ارتفاع آستانه ۹۴
شکل ۴-۴۱- نرخ استهلاک انرژی در مقابل عدد فرود اولیه به ازای سه ارتفاع آستانه ۹۵
شکل ۴-۴۲- نرخ استهلاک انرژی در مقابل عدد فرود اولیه ۹۵