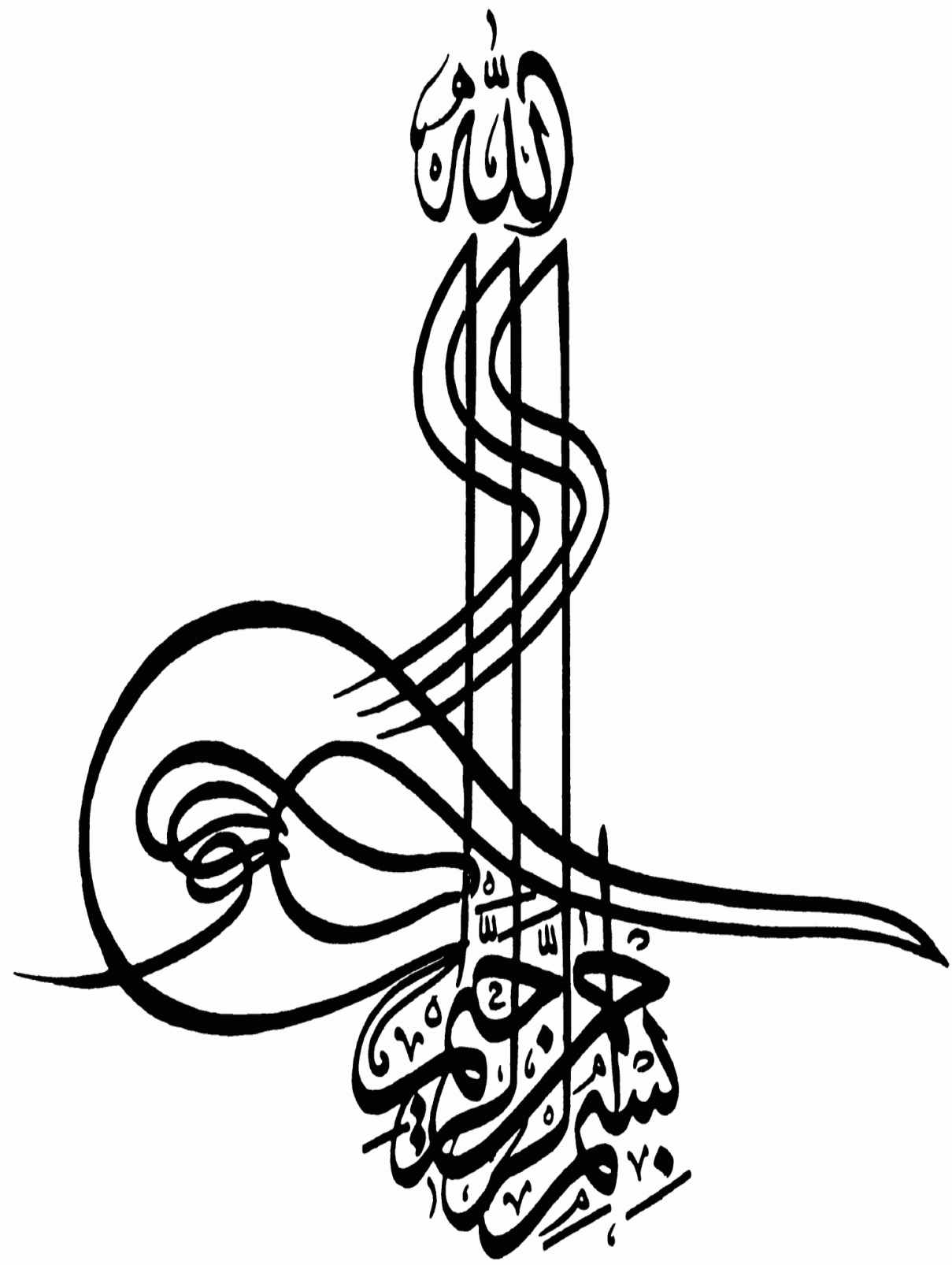
الله
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب

بررسی آزمایشگاهی حرکت ذره رسوبی در نزدیکی بستر با استفاده از دستگاه PIV

سید سجاد مهدیزاده

استاد راهنما:

دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری

استاد مشاور:

دکتر مسعود قدسیان

زمستان ۱۳۸۷

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: سید سجاد مهدی زاده

را با عنوان:
بررسی آزمایشگاهی حرکت ذره رسوبی در نزدیکی بستر با استفاده از دستگاه PIV

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری	استاد	
۲- استاد مشاور	دکتر مسعود قدسیان	استاد	
۳- استاد ناظر	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	
۴- استاد ناظر	دکتر عباس یگانه بختیاری	استادیار	
۵- نماینده گروه	دکتر مهدی شفیعی فر	دانشیار	

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

به پاس مهربانی‌ها و فداکاری‌هایشان

بر خود لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر سید علی اکبر صالحی نیشابوری که استاد راهنمای اینجانب در انجام این پایان نامه بوده‌اند تقدیر و تشکر نمایم. از زحمات استاد محترم جناب آقای دکتر مسعود قدسیان به پاس مشاوره در انجام پایان نامه و علم آموزی در دوره کارشناسی ارشد تشکر نموده و جا دارد از اساتید محترم جناب آقای دکتر عباس یگانه بختیاری و جناب آقای دکتر مهدی شفیعی فر که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند، سپاسگزاری نمایم. مساعدت‌ها و راهنمایی‌های استاد محترم دکتر قزل ایاق از دانشگاه صنعتی مالک اشتر را اجر نهاده و از همه دوستان و عزیزان بویژه آقای مهندس آرمین یزدانیان، خانم مهندس سحر خطیبی که همواره از همفکری‌هایشان در این دوره برخوردار بوده‌ام کمال تشکر و امتنان. لعل می‌آید.

چکیده

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تکنیک تصویربرداری از ذرات (PIV[1]) به اندازه‌گیری سرعت جریان آشفته بر روی بستر زبر در یک کانال باز پرداخته‌شده و سپس با شبیه‌سازی این شرایط در نرم‌افزار فلوئنت و مقایسه آن با نتایج سرعت بدست‌آمده از سیستم PIV، مشخصه‌های جریان شامل شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز برای چهار شرایط هیدرولیکی مختلف جریان اندازه‌گیری و با معادلات تجربی ارائه‌شده توسط نزو و دیگر محققین مقایسه شده‌است.

در ادامه برای بررسی خصوصیات جهش[2] ذره رسوبی در یک جریان آشفته با مشخص بودن مقدار تنش برشی بستر، از سیستم تصویربرداری با سرعت بالا استفاده شده و مشخصه‌های جهش شامل طول، ارتفاع، سرعت، چرخش و زوایای برخورد به بستر و بلندشدگی برای شرایط هیدرولیکی مختلف با سرعت ۲۵۰ فریم بر ثانیه اندازه‌گیری‌شده و درباره ارتباط آنها با خصوصیات جریان به طور کیفی بحث‌شده‌است. نتایج این تحقیق نشان‌می‌دهد که با افزایش آشفتگی بر طول، ارتفاع و سرعت ذره افزوده و برعکس از زوایای برخورد به بستر و بلندشدگی مجدد آن کاسته می‌گردد. چرخش تک ذره نیز در طول یک گام جهش روند نزولی را طی‌خواهد نمود. نتایج آزمایشات همچنین حاکی از این امر است که با افزایش قطر متوسط ذرات بستر، تمامی خصوصیات جهش تمایل به افزایش دارند. برای حل عددی معادلات حاکم بر ذره و بدست آوردن مسیر حرکت آن در یک گام جهش، سرعت‌های اولیه جهش در هر دو جهت افقی و قائم محاسبه شده است که از آنها می‌توان به عنوان شرایط اولیه در حل عددی استفاده نمود. مولفه افقی سرعت ذره رسوبی در دامنه ۳ تا ۸ برابر سرعت برشی و مولفه قائم آن در دامنه ۱/۵ تا ۳/۵ برابر سرعت برشی قرار داشته است که این مقادیر با مقادیر فرض شده توسط فن‌راین ($2u_*$) متفاوت می‌باشد. در خاتمه، بحث احتمالاتی بودن خصوصیات جهش بیان شده و با انجام چندین آزمایش نشان داده‌شده‌است

[1] Particle Image Velocimetry
[2] Saltation

که برای قطر و چگالی یکسان ذره رسوبی، طول و ارتفاع جهش از توزیع پیرسون نوع سه و سرعت ذره از توزیع نرمال پیروی خواهند نمود.

کلید واژه: سیستم PIV، آشفتگی، تنش بستر، جهش ذره و بار بستر.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ح
فهرست شکل‌ها ..... ط

فصل ۱- کلیات ۲
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- تاریخچه مباحث مربوط به انتقال رسوب ۳

فصل ۲- بررسی مطالعات و تحقیقات صورت گرفته ۸
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- مطالعات فن بیک و فرناندز لوک ۸
۲-۳- مطالعات فن راین ۸
۲-۴- مطالعات سکین و کیکاوا ۹
۲-۵- مطالعات لی و اچسو ۱۰
۲-۶- مطالعات هو و هویی ۱۱
۲-۷- مطالعات نینو و گارسیا ۱۴
۲-۸- مطالعات لی و همکاران ۱۶
۲-۹- مطالعات انسی و همکاران ۱۷
۲-۱۰- بیان لزوم انجام تحقیق اخیر ۱۸

فصل ۳- بیان معادلات و روابط حاکم بر جریان و رسوب ۲۱
۳-۱- مقدمه ۲۱
۳-۲- خصوصیات ذره رسوبی ۲۱
۳-۲-۱- اندازه ذرات ۲۲
۳-۲-۲- شکل ذرات ۲۳
۳-۲-۳- زاویه ایستایی (قرار گیری) ۲۳
۳-۲-۴- سرعت سقوط ذرات ۲۳
۳-۳- تنش برشی ۲۴
۳-۴- جریان آشفته ۲۵
۳-۴-۱- ضریب زبری هم ارز ماسه(k_s) ۲۶
۳-۴-۲- توزیع سرعت در جریان آشفته ۲۸
۳-۴-۳- تابع استهلاک ۳۰

۳-۵- محاسبه سرعت برشی ۳۱
۳-۶- نیروهای وارد بر ذره رسوبی ۳۲
۳-۶-۱- نیروی وزن غوطه‌وری ۳۲
۳-۶-۲- نیروی دراگ (F_D) ۳۲
۳-۶-۳- نیروی لیفت (F_L) ۳۴
۳-۶-۳-۱- لیفت برشی ۳۴
۳-۶-۳-۲- لیفت چرخشی ۳۴
۳-۶-۴- نیرو به خاطر اضافه وزن اعمال شده (جرم مجازی) ۳۶
۳-۶-۵- نیروی بست (پیشینه) ۳۶
۳-۶-۶- نیروی برخورد ۳۷
۳-۶-۷- اعمال قانون حرکت نیوتن ۳۷
۳-۷- آستانه حرکت ذرات رسوبی ۳۸
۳-۷-۱- آستانه حرکت بلند شدگی برای ذرات کروی ۴۱

فصل ۴- امکانات و روش‌های استفاده شده در آزمایشات ۴۵

۴-۱- مقدمه ۴۵
۴-۲- مشخصات کانال ۴۵
۴-۲-۱- مخزن بالا دست ۴۶
۴-۲-۲- کانال مستقیم ۴۶
۴-۲-۳- مخزن پایین دست ۴۷
۴-۳- برداشت میدان جریان با استفاه از سیستم PIV ۴۸
۴-۳-۱- منابع لیزر و بازوی هدایت کننده آن ۴۹
۴-۳-۲- دوربین ۵۱
۴-۳-۳- نرم‌افزار مورد استفاده در پردازش تصاویر میدان سرعت ۵۲
۴-۳-۳-۱- روش های صحت سنجی ۵۳
۴-۳-۳-۲- روش فیلتر کردن ۵۴
۴-۳-۳-۳- روش های مشتق گیری ۵۴
۴-۳-۴- دانه های مخصوص ۵۴
۴-۳-۵- انواع خطاها ۵۶
۴-۳-۶- تنظیم دستگاه PIV و جمع آوری اطلاعات ۵۷
۴-۴- شبیه‌سازی عددی میدان جریان حاکم در کانال ۵۸
۴-۴-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال ۵۸
۴-۴-۲- مراحل شبیه‌سازی میدان جریان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ۶۰
۴-۴-۲-۱- انتخاب نرم‌افزار تولید کننده هندسه و شبکه مساله ۶۱
۴-۴-۲-۲- انتخاب نرم‌افزار محاسبه‌گر و انتقال شبکه از پیش‌پردازنده به آن ۶۱
۴-۴-۲-۳- انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل ۶۲
۴-۴-۲-۴- انتخاب معادلات اساسی ۶۲

۴-۴-۲-۵- تعیین خواص فیزیکی ۶۲
۴-۴-۲-۶- تعیین شرایط مرزی ۶۳
۴-۴-۲-۷- تنظیم پارامترهای کنترل کننده حل ۶۷
۴-۴-۲-۸- اتخاذ حدس اولیه در کل میدان حل ۶۸
۴-۴-۲-۹- انجام محاسبات و مشاهده، کنترل و ذخیره نتایج ۶۸
۴-۵- امکانات و روش‌های استفاده شده در برداشت پدیده جهش ذرات ۶۹
۴-۵-۱- مشخصات دوربین سرعت بالا ۶۹
۴-۵-۲- شرایط هیدرولیکی مختلف حاکم بر جریان ۶۹
۴-۵-۳- استفاده از ذرات با جنس و هندسه‌های متفاوت ۷۰
۴-۵-۴- زبری بستر ۷۱
۴-۵-۵- تعداد آزمایشات ۷۱
۴-۵-۶- نحوه انجام آزمایشات ۷۲
۴-۵-۷- نحوه استخراج پارامترهای جهش ۷۶
فصل ۵- تحلیل داده‌های میدان جریان و جهش ذرات ۷۹
۵-۱- مشخصات آشفتگی جریان و محاسبه تنش برشی ۷۹
۵-۱-۱- سرعت متوسط قائم ۸۰
۵-۱-۲- شدت آشفتگی ۸۱
۵-۱-۳- تنش رینولدز ۸۳
۵-۲- بررسی مشخصات جهش تک ذره ۸۵
۵-۲-۱- طول و ارتفاع جهش ۸۵
۵-۲-۲- سرعت جهش ذره ۸۸
۵-۲-۳- زوایای برخورد و بلند شدگی ۹۱
۵-۲-۴- چرخش ذره در خلال جهش ۹۴
۵-۳- مشخصات احتمالاتی جهش ذرات ۹۸
۵-۳-۱- استخراج داده‌های آماری ۹۹
۵-۳-۲- توابع چگالی احتمال برای پارامترهای جهش ذره ۱۰۰
۵-۳-۳- استفاده از توابع توزیع در برآورد نرخ انتقال بار بستر ۱۰۲
فصل ۶- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۰۵
۶-۱- خلاصه نتایج بررسی آشفتگی جریان ۱۰۵
۶-۲- خلاصه نتایج بررسی خصوصیات جهش ذرات ۱۰۵
۶-۳- ارائه پیشنهادات ۱۰۷
فهرست مراجع ۱۰۹

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
جرم حجمی و چگالی سیال	γ, ρ
شتاب ثقل	g
شیب کانال	S_0
شیب خط انرژی	S_f
لزجت سینماتیکی و دینامیکی سیال	υ, μ
لزجت گردابه‌ای سیال	υ_t
ارتفاع جریان	h
سرعت و سرعت متوسط جریان	$u, \bar{u}$
قطر هیدرولیکی جریان	$L = D_H$
شعاع هیدرولیکی جریان	R_h
رینولدز جریان مربوط به قطر هیدرولیکی، $\frac{uD_H}{\upsilon}$	Re_{DH}
سرعت برشی جریان در بستر	u_*
تنش برشی جریان در بستر	τ_0
تنش برشی بحرانی جریان در بستر	τ_{0cr}
ضخامت لایه مرزی	δ
ضریب شزی	C
فاصله گره p نزدیک جداره تا سطح بستر	y_p
سرعت‌های نسبی سیال در بالا و پایین ذره	u_{top}, u_{bot}
سرعت برشی بدست‌آمده از نمودار لگاریتمی سرعت	$u_{*\log}$
سرعت بی‌بعد، $\frac{u}{u_*}$	u^+
عدد رینولدز جریان مربوط به عمق ، $\frac{yu}{\upsilon}$	Re
عدد رینولدز برشی جریان ، $\frac{hu_*}{\upsilon}$	Re_*
جرم حجمی و چگالی ذره رسوبی	γ_s, ρ_s
چگالی ویژه ذره رسوبی	S_g
ضریب شکل ذره رسوبی	sf
قطر متوسط ذره رسوبی	d_{50}
قطر دانه‌بندی ذرات که ۹۰ درصد مصالح از آن ریزتر باشند	d_{90}
قطر ذره رسوبی مورد آزمایش در خلال جهش	d_p

قطر متوسط هندسی	d_g
انحراف معیار هندسی ذرات	σ_g
زاویه قرار گیری مصالح	φ
سرعت سقوط ذره رسوبی	w_f
شدت انتقال رسوب (پارامتر شیلدز)، $\frac{u_*^2}{(s_g-1)gd}$	τ_*
پارامتر شیلدز بحرانی، $\frac{u_{*cr}^2}{(s_g-1)gd}$	τ_{*cr}
عدد رینولدز ذره، $\frac{ud_p}{\upsilon}$	Re_p
عدد رینولدز برشی ذره، $\frac{u_* d_p}{\upsilon}$	Re_{*d}
ضریب ارتجاعی ذره	e
ارتفاع متوسط جهش ذره رسوبی	$\overline{h}_p$
طول متوسط جهش ذره رسوبی	$\overline{L}_p$
سرعت و سرعت متوسط طولی ذره در خلال جهش	$u_p, \overline{u}_p$
سرعت و سرعت متوسط قائم ذره در خلال جهش	$v_p, \overline{v}_p$
سرعت، سرعت طولی و قائم ذره در آغاز مرحله بلندشدگی	U_{po}, u_{po}, v_{po}
سرعت طولی و قائم ذره در لحظه برخورد	u_{pe}, v_{pe}
سرعت متوسط ذره نسبت به جریان، $\sqrt{(u-u_p)^2+v_p^2}$	u_r
شتاب ذره در راستای طولی و قائم	$\dot{u}_p, \dot{v}_p$
نرخ چرخش ذره در لحظه برخاستن از بستر	n_R
نرخ چرخش ذره در مرحله بلندشدگی	n_{RS}
نرخ چرخش ذره در لحظه رسیدن به ارتفاع بیشینه	n_{MH}
نرخ چرخش ذره در مرحله فرود	n_{DS}
نرخ چرخش ذره در لحظه برخورد به بستر	n_I
نرخ چرخش بی‌بعد، $\frac{(2\pi n_i)d_p}{u_*}$	S_i
فاصله زمانی بین توقف و جهش مجدد	t_r
زمان استراحت بی‌بعد	t_{*r}
ضریب اصطکاک و ضریب اصطکاک دینامیکی	f, μ_d
انرژی جنبشی بر واحد جرم	k
نرخ استهلاک انرژی	ε
فرکانس آشفتگی	ω
شدت آشفتگی در مدل $k-\varepsilon$	T_i

ضریب ثابت تجربی مدل $k-\varepsilon$	C_μ
طول اختلاط	l
پارامتر بی‌بعد عمود بر جداره ، $\frac{yu_*}{\upsilon}$	y^+
نوسانات سرعت به ترتیب در جهت جریان، عرضی و ارتفاعی	u', v', w'
انحراف معیار استاندارد سرعت در جهت جریان و عمود بر جداره	u_{rms}, v_{ms}
شدت آشفتگی بی‌بعد در جهت جریان، $\frac{u_{rms}}{u_*}$	u^+_{rms}
شدت آشفتگی بی‌بعد در جهت عمود بر جداره، $\frac{v_{rms}}{u_*}$	v^+_{rms}
تنش رینولدز بی‌بعد، $-\frac{\overline{u'v'}}{u_*^2}$	$-(u^+v^+)$
ضریب زبری هم‌ارز ماسه	K_s
عدد رینولدز مربوط به زبری، $\frac{u_*K_s}{\upsilon}$	K_s^+
ضریب اصطکاک پوسته‌ای	$\overline{C}_f$
نیروی برشی	F_s
نیروی دراگ	F_D
ضریب دراگ	C_D
نیروی لیفت	F_L
ضریب لیفت	C_L
نیروی وزن غوطه‌وری	F_G
نیروی جرم مجازی	F_a
نیروی برخورد ذره در راستای طولی و قائم	F_{imx}, F_{iny}
احتمال انتقال رسوب به صورت غلتش، معلق و جهش	$P_{roll}, P_{sus}, P_{sal}$
پارامتر بی‌بعد ظرفیت انتقال رسوب، $\frac{u_*^2-u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2}$	T_*
پارامتر بی‌بعد ذره، $d_p\left[(s_g-1)g/\upsilon^2\right]^{1/3}$	D_*
غلظت و غلظت متوسط بار بستر	$c_b, \bar{c}_b$
نرخ انتقال رسوب برحسب وزن مستغرق در عرض واحد	i_b
وزن مستغرق لایه بار بستر	w_b
نرخ حجمی بی‌بعد انتقال رسوب	q_*
نرخ انتقال رسوب در واحد عرض- در واحد زمان	q_b
مقدار میانگین داده‌ها	$\bar{x}$
انحراف معیار استاندارد داده‌ها	σ_x

ضریب چولگی داده‌ها	c_x
طول جهش بی‌بعد شده با مقدار میانگین، $\frac{L_p}{\overline{L_p}}$	L_p^+
ارتفاع جهش بی‌بعد شده با مقدار میانگین، $\frac{h_p}{\overline{h_p}}$	h_p^+
سرعت جهش بی‌بعد شده با مقدار میانگین، $\frac{u_p}{\overline{u_p}}$	u_p^+
نرخ انتقال بار بستر بی‌بعد شده با مقدار میانگین، $\frac{q_b}{\overline{q_b}}$	q_b^+
پارامتر کولز	Π
پارامترهای توزیع پیرسون نوع سه	$\alpha, \beta, \varepsilon_0$
ثابت فون کارمن	κ

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی طول ، ارتفاع و سرعت ذره [۱] ۹
جدول ۴-۱: مقادیر پارامترهای آشفتگی در مرز ورودی میدان ۶۴
جدول ۴-۲: مشخصات شرایط هیدرولیکی حاکم در آزمایشات ۷۰
جدول ۴-۳: قطر ذرات و چگالی‌های مورد استفاده در آزمایشات ۷۰
جدول ۵-۱: مقادیر سرعت برشی و تنش برشی بدست آمده از چهار آزمایش مختلف ۸۴
جدول ۵-۲: پارامتر های استخراج شده برای تحلیل مشخصات جهش ۸۶
جدول ۵-۳: مقادیر متوسط مشخصه‌های جهش در آزمایشات مختلف ۸۷
جدول ۵-۴: مقادیر بی‌بعد مولفه‌های سرعت اولیه جهش در آزمایشات مختلف ۹۱
جدول ۵-۵: مقادیر نرخ چرخش محاسبه شده برای چهار حالات جریان و جنس ذره ۹۷
جدول ۵-۶: پارامترهای توابع توزیع نرمال و پیرسون بدست آمده از داده‌های برداشتی ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱: دیاگرام شیلدز (۱۹۳۶) ۴

شکل۲-۱: نمودار ضریب زبری بی بعد ($\frac{k_s}{d}$) نسبت به شدت انتقال رسوب [۳] ۱۰

شکل۲-۲: تاثیر نیروی لیفت مگنس در یک گام جهش [۴] ۱۱

شکل۲-۳: رابطه میان احتمال حرکات ذرات نسبت به پارامترشدت انتقال [۶] ۱۲

شکل ۲-۴: نمودار چرخش بی بعد ذره نسبت به پارامتر شدت انتقال رسوب بی بعد[۸] ۱۴

شکل ۲-۵: برخورد ذره پرش کننده به کف و زوایای مورد بررسی [۸] ۱۵

شکل ۳-۱: زاویه قرار گیری مصالح در بستر افق [۱] ۲۵

شکل ۳-۲: زاویه قرار گیری مصالح در سطح شیب دار [۱] ۲۵

شکل ۳-۳: پروفیل مولفه طولی سرعت و نواحی مختلف جریان [۱۴] ۲۸

شکل ۳-۴: نمودار پارامتر کولز و سرعت ماکسیمم به عنوان تابعی از Re_*^h و $\mathrm{Re}_h = \frac{4h\bar{u}}{\upsilon}$ [۱۵] ۳۱

شکل ۳-۵: موقعیت سطح بستر و قرار گیری ذره بر روی آن [۱] ۳۸

شکل ۳-۶: نیروهای وارد بر ذره رسوبی (بستر افقی)[۱] ۴۰

شکل ۳-۷: آستانه بلندشدگی ذره رسوبی کروی [۱۸] ۴۲

شکل ۴-۱: الف- نمای مخزن بالادست، ب- پلان کانال مستقیم، ج- نمای مخزن پایین‌دست ۴۷

شکل ۴-۲: نمای کلی سیتم PIV [۱۶] ۴۹

شکل ۴-۳: نمایی از پردازشگر، کنترل کننده خارجی و منابع تبدیل کننده PIV ۵۰

شکل ۴-۴: ضبط و انتقال اطلاعات درون دوربین ۵۱

شکل ۴-۵: نمایی از بازتابش مناسب نور لیزر و برداشت تصویر توسط دوربین سیستم PIV ۵۶

شکل ۴-۶: توزیع سرعت در نزدیکی بستر [۲۱] ۶۵

شکل ۴-۷: الف-شرایط مرزی اعمالی بر روی کانال، ب- شبکه‌بندی ورودی کانال ۶۷

شکل ۴-۸: زبری‌های مورد استفاده قرار گرفته در بستر کانال ۷۱

شکل ۴-۹: دانه بندی ذره سیلیسی درشت دانه مورد استفاده در بستر کانال برای ایجاد زبری ۷۲

شکل ۴-۱۰: دانه بندی ذره سیلیسی ریز دانه مورد استفاده در بستر کانال برای ایجاد زبری ۷۳

شکل ۴-۱۱: تجهیزات دوربین مورد استفاده در آزمایش به همراه نحوه تصویربرداری از ذرات ۷۴

شکل ۴-۱۲: الف- جزئیات کانال شش متری مورد استفاده در آزمایشات، ب- یک جهش کامل از ذره در منطقه برداشت با کنار هم قرار دادن تصاویر متوالی ۱

شکل ۴-۱۳: مقیاس عرض کانال برای تبدیل پیکسل به میلی‌متر ۷۷

شکل ۴-۱۴: تعیین تعداد پیکسل معادل ۱۰ میلی‌متر در دوجداره کانال ۷۷

شکل ۵-۱: پروفیل سرعت قائم در فاصله ۵ متری از بالادست به ازای $Q = 30.3 m^3 / \sec, h = 12.08 cm$ ۸۰
شکل ۵-۲: توزیع سرعت متوسط بدون بعد برای چهار آزمایش مختلف (مطابق جدول ۵-۱)..... ۸۱
شکل ۵-۳: توزیع قائم شدت آشفتگی در طول جریان به عنوان تابعی از y/h و y^+ ۸۲
شکل ۵-۴: توزیع قائم شدت آشفتگی عمود بر بستر به عنوان تابعی از y/h و y^+ ۸۳
شکل ۵-۵: توزیع قائم تنش رینولدز به عنوان تابعی از y/h ۸۴
شکل ۵-۶: نمودار تنش برشی بی‌بعد نسبت به رینولدز برشی ذره..... ۸۷
شکل ۵-۷: مشخصات جهش برداشت شده در آزمایشات..... ۸۷
شکل ۵-۸: نمودار طول بی‌بعد شده جهش در مقابل شدت انتقال رسوب..... ۸۸
شکل ۵-۹: نمودار ارتفاع بی‌بعد شده جهش در مقابل شدت انتقال رسوب..... ۸۹
شکل ۵-۱۰: نمودار ارتفاع و طول بی‌بعد شده جهش در مقابل قطر متوسط ذرات بستر..... ۸۹
شکل ۵-۱۱: نمودار سرعت متوسط بی بعد ذره در خلال جهش نسبت به شدت انتقال بی‌بعد..... ۹۰
شکل ۵-۱۲: نحوه محاسبه زوایای برخورد و بلندشدگی از بستر..... ۹۲
شکل ۵-۱۳: مقادیر زاویه برخورد به بستر و بلندشدگی متناظر آن..... ۹۲
شکل ۵-۱۴: نمودار زاویه برخورد ذرات به بستر در مقابل شدت انتقال رسوب بی‌بعد..... ۹۳
شکل ۵-۱۵: نمودار زاویه بلندشدگی ذرات از بستر در مقابل شدت انتقال رسوب بی‌یعد..... ۹۳
شکل ۵-۱۶: نمودار مولفه افقی ضریب ارتجاعی نسبت به تنش برشی بی‌بعد..... ۹۴
شکل ۵-۱۷: نمودار مولفه قائم ضریب ارتجاعی نسبت به تنش برشی بی‌بعد..... ۹۴
شکل ۵-۱۸: اندازه‌گیری زوایا برای محاسبه نرخ چرخش ذره در هنگام برخاستن از بستر.....۹۶
شکل ۵-۱۹: نمودار سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ذره در طول یک جهش کامل..... ۹۷
شکل ۵-۲۰: نمودار سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ذره نسبت به شدت انتقال بی‌بعد..... ۹۸
شکل ۵-۲۱: نمودار سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ذره در مرحله بلندشدگی نسبت به پارامتر بی‌بعد قطر ذره. ۹۸
شکل ۵-۲۲: نمودار فراوانی نسبی مشخصه‌های جهش: الف- ارتفاع جهش بی‌بعد، ب- سرعت جهش بی‌بعد، ج- طول جهش بی‌بعد..... ۱۰۱
شکل ۵-۲۳: نمودار احتمال وقوع مقدار مشخص و کمتر از آن برای طول و ارتفاع جهش بی‌بعد.....۱۰۳

فصل اول

کلیات

فصل ۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

رسوبات مواد شکسته ریز شده‌ای هستند که از لحاظ فیزیکی و شیمیایی نتیجه از هم پاشیدگی تخته سنگ‌ها بر روی زمین می‌باشند. دامنه اندازه این ذرات متغیر و شکل آنها نیز از دانه های گردگوشه تا زاویه دار متغیر می‌باشد، چگالی و ترکیبات معدنی این ذرات نیز متغیر بوده، ولی اغلب رسوبات در طبیعت از جنس کوارتز می‌باشند. ذرات رسوبی جدا شده می‌توانند تحت اثر نیروی ثقل، باد یا آب انتقال یابند. انتقال رسوب توسط آب را یک انتقال رودخانه‌ای یا دریایی[۱] می‌نامند. به فرایند حرکت رسوبات و جدا شدن آنها از منبع اصلی فرسایش گفته می‌شود. در اغلب موارد حرکت ذرات در آب به سه صورت انجام می‌گیرد:

- حرکت رسوب به صورت غلتش یا لغزش[۲]
- حرکت رسوب به صورت جهش[۳]
- حرکت رسوب به صورت بار معلق

هنگامی‌که سرعت برشی بستر جریان از مقدار بحرانی خود فراتر رود، حرکت رسوبات به صورت غلتش یا لغزش آغاز می‌شود. با افزایش سرعت برشی بستر، ذرات رسوبی در طول بستر با ایجاد جهش یا پرش به حرکت خود ادامه داده و زمانی که سرعت برشی بستر از سرعت سقوط ذرات بیشتر گردد، این ذرات از جای خود بلند شده و نیروهای آشفتگی بر نیروی غوطه‌وری[۴] غلبه خواهدکرد و سبب معلق شدن این ذرات می‌گردد. در اغلب موارد حرکت رسوبات به صورت غلتشی و جهشی، انتقال بار بستر و حرکت ذرات به صورت معلق، انتقال بار معلق نامیده می‌شود. بار معلق ممکن است دارای ذرات سیلتی نیز باشد که از

[1] Fluvial or Marine Sediment Transport
[2] Rolling or Sliding
[3] Saltation
[4] Submerged Force

حوزه آبریز آورده شده‌اند و ناشی از بلند شدگی ذرات کف نمی‌باشند که در اصطلاح به آنان بار شسته[1] گفته می‌شود. از اندازه ذره μm ۵۰ برای تمایز بین بار شسته و بار بستر استفاده می‌شود. همچنین انتقال بار بستر و بار معلق به طور همزمان صورت می‌گیرد ولی مرز بین این دو ناحیه به طور مشخص تعریف شده نمی‌باشد.

۱-۲- تاریخچه مباحث مربوط به انتقال رسوب

مساله انتقال رسوب مربوط به کانال های آبیاری توسط فرایند سعی و خطا توسط چینی های قدیم، مصریان و رومیان مورد مطالعه قرار گرفته است. اولین محققی که هم به صورت تئوری و هم به صورت آزمایشگاهی تاثیر جریان را بر روی رسوبات بستر مطالعه نمود دبوات[2] (۱۸۰۹-۱۷۳۷) در فرانسه بوده است. او نشان داد که سرعت جریان سبب فرسایش بستر خواهد شد. وی همچنین رسوبات گوناگون (از رس تا سنگریزه) را مورد بررسی قرار داد و مفهوم مقاومت برشی را توسعه داد. هیگن[3] (۱۸۸۴-۱۷۹۷) در آلمان و دپیت[4] (۱۸۶۶-۱۸۰۴) در فرانسه توضیحات کیفی از حرکت ذرات رسوب به صورت بار بستر و معلق ارائه نمودند. اولین رابطه بار بستر که عمق و شیب را لحاظ می‌نمود توسط دبویز[5] (۱۹۲۴-۱۸۴۷) بیان شد، وی فرایند انتقال را به صورت حرکت ذرات در چندین لایه موازی هم فرض نمود که سرعت بین لایه ها به صورت خطی تغییر می‌نمود. در سال ۱۹۰۰ اولین مدل بستر متحرک توسط فارگ[6] (۱۹۱۰-۱۸۲۷) در فرانسه و رینولدز[7] (۱۹۱۲-۱۸۹۲) در انگلستان ساخته‌شد. داده های تهیه شده توسط گیلبرت[8] (۱۹۱۸-۱۸۴۳) با عنوان انتقال آب توسط آب جاری (۱۹۱۴) هنوز هم توسط بسیاری از محققین برای کالیبره کردن روابط پیشنهادی بار بستر به کار می‌رود.

[1] Wash Load
[2] Dubuat
[3] Hagen
[4] Dupuit
[5] Duboys
[6] Fargue
[7] Reynolds
[8] Gilbert