

بررسی تغییرات تنش برشی در مقطع مرکب مستطیلی

علی آرمان^{۱*} و منوچهر فتحی مقدم^۲

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز armaan59@gmail.com

۲- استاد گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۱

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۱۷

چکیده

پیش بینی دقیق تنش برشی در کانال های روباز در بسیاری از مسائل مهندسی نظیر طراحی کانال های پایدار، محاسبات مربوط به افت انرژی و رسوبگذاری در کانال ها حائز اهمیت می باشد. در هنگام سیلاب، بخشی از دبی رودخانه توسط کانال اصلی و بخش دیگر توسط دشت های سیلابی که در اطراف کانال اصلی قرار دارند، حمل می شود. به دلیل تفاوت عمق جریان بین کانال اصلی و دشت های سیلابی اطراف، سرعت جریان نیز متفاوت بوده و متعاقباً میزان تنش برشی و توزیع آن به صورت قابل ملاحظه ای دستخوش تغییر می گردد. در تحقیق حاضر آزمایش هایی بر روی یک مقطع مرکب مستطیلی از جنس پلکسی گلاس به همراه دشت های سیلابی اطراف با دبی های مختلف و سه نسبت شکل متفاوت به انجام رسید. نتایج نشان داد که در هر نسبت شکل، با افزایش عمق جریان میزان تنش برشی نیز افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش نسبت شکل، میزان تنش برشی به صورت معنی داری کاهش می یابد.

کلید واژه ها: تنش برشی، مقطع مرکب، نسبت شکل.

Study of Shear Stress Distribution in a Compound Rectangular Section

A. Arman¹ and M. Fathi Moghaddam²

1- Ph D Candidate of Shahid Chamran University, College of Water Science Engineering, Ahwaz-Iran.

2- Professor of Shahid Chamran University, College of Water Science Engineering, Ahwaz-Iran.

Received: 7.May.2012

Accepted: 23.Oct.2012

Abstract

Reliable prediction of boundary shear force distributions in open channel flow is crucial in many critical engineering problems such as channel design, calculation of energy losses and sedimentation. During floods, part of the discharge of a river is carried by the simple main channel and the rest is carried by the floodplains located to its sides. For such compound channels, the flow structure becomes complicated due to the transfer of momentum between the deep main channel and the adjoining floodplains that magnificently affects the shear stress distribution in floodplain and main channel sub sections. In the present study experiments were conducted in a compound rectangular section with different discharges and 3 different aspect ratios. The results showed that in each aspect ratio, shear stress increases by increasing the water level. It is also shown that by increasing the aspect ratio, shear stress is decreased significantly.

Key words: shear stress, compound section, aspect ratio

مقدمه

اطلاعات در خصوص طبیعت توزیع جریان در یک کانال ساده و مرکب نیازمند حل متغیرهای مسائل هیدرولیک رودخانه ها و مسائل مهندسی نظیر مفهوم رابطه مقاومت جریان، مکانیسم انتقال رسوب، طراحی کانال پایدار، پوشش کانال ها و ... می باشد. تعیین دقیق تنش برشی بستر و دیواره از دیدگاه تئوریک و همچنین از دیدگاه مسائل کاربردی نظیر نقش آن در مطالعات فرسایش و رسوبگذاری و طراحی پوشش های حفاظتی از اهمیت خاصی برخوردار است. کانال های مرکب شامل یک کانال اصلی عمیق و یک یا دو دشت سیلابی در اطراف آن می باشند که به صورت نسبی عمق کمتری نسبت به کانال اصلی دارند. مطالعات هیدرولیکی بر روی این کانال ها به دلیل تأثیر متقابل دشت های سیلابی و کانال اصلی به مراتب پیچیده تر از کانال های معمولی است. زمانی که عمق جریان در یک کانال طبیعی از عمق مجاز کانال تجاوز می کند، دشت های سیلابی را که در مجاورت آن قرار دارند پوشانیده و بخشی از جریان در دشت های سیلابی حمل می گردد. به دلیل تفاوت شرایط هیدرولیکی بین دو مقطع (کانال اصلی و دشت های سیلابی)، سرعت متوسط در کانال اصلی با دشت های سیلابی متفاوت است (سرعت متوسط در کانال اصلی بسیار بیشتر از سرعت در دشت سیلابی است). بنابراین جریان در کانال اصلی با شتاب بیشتری بر روی دشتهای سیلابی اعمال می گردد. این فرایند باعث انتقال مومنتوم بین جریان در کانال اصلی و دشت های سیلابی اطراف می گردد. تأثیر متقابل فرایند مذکور وقتی که جریان بر روی دشت سیلابی خیلی کم است، نمود بیشتری داشته و رفته رفته با افزایش عمق آب بر روی دشت سیلابی، از میزان آن کاسته می شود. عدم استنباط صحیح از این فرایند، باعث می شود که در طراحی کانال های پایدار میزان دبی واقعی بسیار بیشتر یا بسیار کمتر برآورد گردد. بر طبق مطالعات دفتر مهندسی عمران آمریکا^۱، هنگامی که آب در کانال جریان می یابد، نیرویی در جهت حرکت آب بر سطح بستر کانال اثر می کند. این نیرو به طور ساده نیروی کشش آب بر روی محیط مرطوب است و نیروی مالشی^۲ نام دارد. بر اساس تقسیم بندی های کلی، تنش برشی به دو دسته آرام و آشفتنه تقسیم بندی می گردد. تنش برشی دیواره (تنش برشی در نزدیکی دیوار یا زیر لایه ورقه ای) از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در بیرون از لایه آرام، تنش برشی آشفتنه حکمفرما است. یک لایه بینابینی هم وجود دارد که هردوی تنش های آرام و آشفتنه در آن رخ می دهد. در برخی از متون اشاره گردیده که میزان تنش برشی آشفتنه تا دهها هزار برابر تنش برشی آرام است. شکل (۱) چگونگی توزیع پروفیل سرعت و توزیع تنش برشی آرام و آشفتنه را نشان می دهد.

پرانتل^۳ (۱۹۰۴) در سومین کنگره بین المللی ریاضیدانان در شهر هایدلبرگ^۴ آلمان و ارائه نظریه لایه مرزی، انقلابی در علم مکانیک سیالات به پا نمود. با ارائه این تئوری علت وجود نیروی مقاوم در مدل سیال ایده آل توجیه گردید.

پرانتل اظهار می دارد که برای سیال با لزجت ناچیز، اثر اصطکاک درونی بر جریان سیال فقط در ناحیه باریکی که مرز سیال را احاطه کرده، محسوس است. با این وجود، در کانال های باز این ناحیه توسعه پیدا می کند تا تمام عمق جریان را تحت پوشش قرار دهد. این ناحیه برخلاف ضخامت ناچیز خود نسبت به ناحیه سیال ایده آل، تأثیر مهمی بر شرایط جریان می گذارد و از پیچیدگی های خاصی برخوردار است. در این ناحیه لایه مرزی تشکیل می شود. حاصل این لایه تشکیل تنش برشی می باشد.

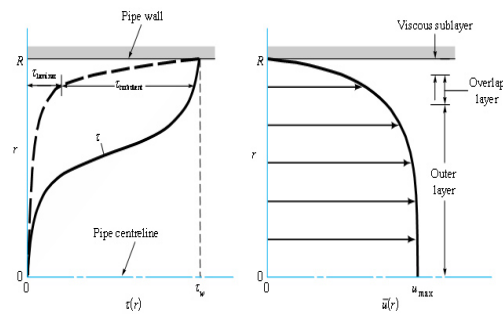
انیشیتین^۵ (۱۹۴۲) اظهار می دارد ناحیه جریان که توسط دیوار جامد محصور شده است، به سه قسمت مرتبط با دیوارهای جانبی و بستر، تقسیم می شود و نیروی وارد بر بستر جدا از نیروی وارد بر دیوار می باشد. او فرض کرد که سرعت متوسط در هر کدام از قطعه ها یکسان و تنش برشی متوسط می تواند از رابطه $\tau_0 = \rho g R S$ به دست آید که τ_0 : تنش برشی کف رودخانه، ρ : چگالی آب، g : شتاب ثقل، R : شعاع هیدرولیکی و S : شیب خط انرژی است. همچنین تنش برشی بستر و دیوار می تواند به ترتیب توسط روابط $\tau_w = \rho g R_w S$ و $\tau_b = \rho g R_b S$ بدست آید که R_w و R_b برتریب شعاع هیدرولیکی بستر ($R_b = \frac{A_b}{P_b}$) و شعاع هیدرولیکی دیوار ($R_w = \frac{A_w}{P_w}$) می باشد.

لین و کارلسون^۶ (۱۹۵۳) تحقیقات گسترده ای در خصوص اندازه گیری تنش برشی انجام دادند. آنها عنوان نمودند که توزیع تنش برشی در مقاطع روباز بستگی زیادی به شکل مقطع دارد ولی به ابعاد مقطع بستگی ندارد.

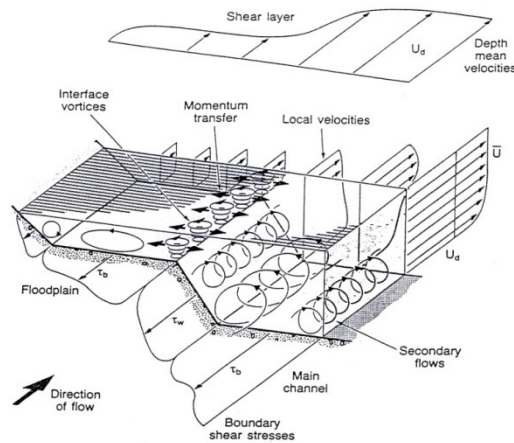
هانتر راس^۷ (۱۹۶۵) مفهوم مقاومت جریان را به صورت عملی تر بیان نمود. دانشمندان معروف دیگری نظیر شزی، گانگلیه، کاتر و مانینگ تحقیقات گسترده ای را در ارتباط با مقاومت هیدرولیکی جریان انجام داده اند. از آن زمان تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه اندازه گیری و تعیین تنش برشی صورت یافته است ولی اغلب بدلیل

3- Prantdl
4- Heidelberg
5- Einstein
6- Lane and Carlson
7- Hunter Rass

1- U. S. Bureau of Reclamation
2- Tractive Force



شکل ۱- پروفیل سرعت در جریان آشفته و منحنی تنش



شکل ۲- نحوه اثر جریان‌های ثانویه بر توزیع تنش برشی جداره و کف در یک مجرای روباز مستقیم

تحقیق این است که توزیع تنش برشی به‌صورت معنی‌داری در ته‌نشینی و فرسایش رسوبات در کانال‌های آب‌رقتی مؤثر است. شیونو و اسکات^۲ (۲۰۰۳) با استفاده از مدل‌های توربولانسی، میزان انتقال سیال و همچنین تنش برشی ناشی از این انتقال را در یک کانال مرکب به‌دست آوردند. افضلی مهر و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر بستر شنی در یک قوس مرکب (شبهه مقطع سینوسی) از رودخانه طبیعی زاینده رود را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج تحقیق مذکور این است که توزیع تنش برشی و پارامترهای انتقال رسوب به‌صورت قابل ملاحظه‌ای بر روی مقاومت جریان موثرند، همچنین عدد فرود و عمق جریان و اندازه دانه‌های بستر تأثیر ناچیزی بر روی تخمین مقاومت جریان دارند. البته بیان عدم تأثیر عدد فرود و عمق جریان بر روی مقاومت جریان از سوی محققین، قابل تأمل است.

استفاده از معادله انرژی و حساسیت بسیار زیاد پارامترها و همچنین عدم دقت لوازم اندازه‌گیری، از دقت کافی برخوردار نبوده‌اند. این مسأله در مورد کانال‌های مرکب فراتر رفته و بیشتر شامل مطالعات صحرایی بر روی رودخانه‌های طبیعی با فرض داشتن دشت‌های سیلابی کلاسیک و بیشتر توسط مدل‌های ریاضی می‌باشد. در این بخش به برخی از تحقیقاتی که در این زمینه در سال‌های اخیر به انجام رسیده است، اشاره می‌گردد. الخطیب و دمادی^۱ (۱۹۹۶) در تحقیقی توزیع تنش برشی را در یک مقطع مستطیلی و دشت‌های مستطیلی اطراف آن مورد بررسی قرار دادند. آنها نسبت‌های بدون بعدی را به‌منظور محاسبه تنش برشی به‌دست آوردند. فلووم مورد استفاده در تحقیق آنها دارای نه متر طول، ۶۷ سانتی‌متر عرض و عمق ۷۵ سانتی‌متر بود. در این تحقیق دشت‌های سیلابی بعنوان انتقال مومنتوم بین مقطع عمیق (کانال اصلی) و دشت‌های سیلابی انتخاب شده‌اند. از مهمترین نتایج این

لشکرآرا و همکاران (۱۳۸۸) با ساخت فلوم لبه چاقویی نسبت به تفکیک تنش برشی در کانال‌های مستطیلی با بستر صاف و زیر هیدرولیکی مبادرت ورزیدند. آنها فرمول‌های زیر را به منظور تعیین تنش برشی کف و جداره پیشنهاد نمودند:

$$\frac{\tau_w}{\rho g R S_f} = \frac{a}{1 + b \exp[-c(B/H)]} \quad (1)$$

در فرمول فوق:

$$\begin{aligned} a &= 0.0114 \\ b &= -0.9892 \\ c &= 0.0004 \end{aligned}$$

$$\frac{\tau_b}{\rho g R S_f} = \frac{a + b(B/H)}{1 + c(B/H) + d(B/H)^2} \quad (2)$$

در فرمول فوق:

$$\begin{aligned} a &= 0.9461 \\ b &= 0.3466 \\ c &= 0.3028 \\ d &= 0.0012 \end{aligned}$$

همچنین جاعل و همکاران (۱۳۸۹) نسبت به تحلیل و تفکیک تنش برشی در مجاری با سطح مقطع دوزنقه‌ای در بسترهای صاف و زیر هیدرولیکی پرداختند. آنها برای تنش برشی دیواره فرمول زیر را پیشنهاد دادند:

$$\frac{\tau_w}{\rho g h S} = \frac{0.73018(b/h)}{0.507 + \left(\frac{b}{h}\right)} \quad (3)$$

در فرمول فوق، b: عرض کف و h: عمق جریان است.

روش‌های اندازه‌گیری تنش برش

در مطالعات هیدرودینامیک رودخانه‌ها، تعیین تنش برشی بستر با استفاده از روش‌ها و ابزار مختلف صورت می‌گیرد که در حالت کلی بر اساس مکانیسم و نحوه تعیین به دو روش کلی زیر تقسیم بندی می‌شوند:

الف) روش پروفیل سرعت: در این روش که در حقیقت ساده‌ترین روش اندازه‌گیری تنش می‌باشد، می‌توان با استفاده از مولینه پروفیل سرعت را تعیین و سپس با بهره‌گیری از رابطه زیر میزان تنش را تخمین زد:

کیشناجیت و چاران^۱ (۲۰۰۷) توزیع تنش برشی را در یک کانال مائندی مورد بررسی قرار دادند. آنها پنج پارامتر بدون بعد را به منظور ایجاد روابطی برای تعیین درصدی از جریان که توسط دشت‌های سیلابی اطراف حمل می‌شود، استفاده نمودند.

رامشواران^۲ و همکاران (۲۰۰۷) به منظور مدل‌سازی جریان مرکب، مطالعه موردی خود را بر روی رودخانه Blackwater به انجام رساندند و نتایج به‌دست آمده از مدل فیزیکی این رودخانه را بمنظور شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در مدل‌های دو بعدی و سه بعدی به‌کار بردند. از جمله نتایج آشکار این تحقیق این است که مدل سه بعدی نتایج بهتری را نسبت به مدل دو بعدی نشان می‌دهد. هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان پیش‌بینی رفتار جریان در مدل با مقیاس ۱:۵ مدل فیزیکی رودخانه Blackwater توسط مدل دو بعدی TELEMAC-2D و مدل سه بعدی PHOENICS بود.

مک ویلیامز^۳ و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی تأثیر یک کانال ساخته شده بر روی کاهش سرعت و همچنین تنش برشی بستر در طول جریان زیاد با استفاده از مدل یک بعدی HEC-RAS و مدل سه بعدی Un TRIM را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها اظهار داشتند اگرچه طراحی کانال مرکب برای پروژه‌های بهسازی اغلب بر اساس مدل‌های یک بعدی می‌باشد، اما این تحقیق مزایای استفاده از مدل سه بعدی و بررسی مسائل هیدرودینامیک رودخانه‌ها را توسط این مدل اثبات می‌نماید.

کین و همکاران^۴ (۲۰۰۹) روشی را به منظور محاسبه سرعت و تنش برشی بستر در نزدیکی ساحل آزمایش نمودند. اندازه‌گیری‌های آنها در یک فلوم با مقطع سیلابی که توسط سنگ‌های بزرگ (از قطر ۶۳ تا قطر ۲۰۰ میلی‌متر) پوشش داده شده و زیر شده بود، بود انجام گرفت. روشی که در این تحقیق انجام گرفته، قبلاً توسط کین و اسمیت^۵ در سال ۲۰۰۴ ارائه شده بود. در این تحقیق اثر نیروی درگ و الگوهای مختلف سرعت جریان و تنش برشی ایجاد شده در کانال مورد بررسی قرار گرفت. لازم بذکر است که در این تحقیق جریان‌های ثانویه اندازه‌گیری نشد. از نتایج جالب توجه این تحقیق، ساختار اندازه‌گیری شده خطوط سرعتی است که توسط محاسبات پیچیده جریان به‌دست آمد. همچنین در این تحقیق نسبت‌های مختلف عرض به عمق برای نشان دادن تأثیر آن بر روی توزیع سرعت و تنش برشی مرزی استفاده گردید.

- 1- Kishnajit et al.
- 2-Rameshwaran et al.
- 3-Mc.Williams et al.
- 4- Kean et al.
- 5- Kean and Smith

خارجی لوله پیتوت بر حسب واحد ها، P : فشار بر حسب ،
 U : لزوجت سینماتیک و ΔP : فشار تفاضلی لوله پرستون می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی مستطیلی شکل به طول ۸/۳ متر، عرض ۸۰ سانتی متر (عرض دشت‌های سیلابی معادل ۳۰ سانتی متر و عرض کانال اصلی معادل ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد) و ارتفاع ۱ متر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به انجام رسید. همچنین شیب عمومی کف کانال برابر ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شد. در محدوده برداشت داده‌ها از فلوم لبه چاقویی^۵ (فلوم بدون اصطکاک که بر روی پایه‌هایی از جنس چاقو سوار است) استفاده شد. برداشت داده‌ها با استفاده از لوله پرستون (روش انرژی) و تبدیل مقادیر فشار برداشت شده به تنش (با استفاده از معادل‌ها مربوط به لوله پرستون) انجام شد. به‌منظور از بین بردن هر گونه موج در محدوده برداشت داده‌ها، در ابتدای کانال از صفحات مشبک و در انتهای کانال از دریچه استفاده گردید.

به‌منظور ایجاد مقطع مرکب و بر اساس مطالعات محققین گذشته، طول هر یک از دشت‌های سیلابی تقریباً معادل ۱/۵ برابر طول کانال اصلی بایستی در نظر گرفته شد. بنابراین در این تحقیق طول هر یک از دشت‌های سیلابی معادل ۳۰ سانتی متر و طول کانال اصلی معادل ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. شکل (۳) نمای شماتیک مقطع ایجاد شده را نشان می‌دهد.

همچنین ارتفاع دیواره کانال اصلی برابر ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. به‌منظور بررسی میزان تنش بر روی دشت‌های سیلابی و همچنین کانال اصلی و دیواره‌های آنها، در اعماق ۳، ۵، ۷ و ۹ سانتی‌متر بر روی دشت سیلابی داده برداری انجام شد. همچنین به‌منظور بررسی میزان تغییرات تنش در حالت‌های مختلف مقطع، سه حالت در نظر گرفته شد: حالت اول زمانی است که عمق کانال اصلی برابر ۱۵ سانتی متر است. حالت دوم زمانی است که ارتفاع کانال اصلی برابر ۱۰ سانتی متر و حالت سوم زمانی است که ارتفاع کانال اصلی برابر پنج سانتی متر می‌باشد. شایان ذکر است که در هر مرحله به‌منظور بالا آوردن کف کانال اصلی از صفحات پلکسی گلاس استفاده شد.

در شکل (۴) نمای شماتیک مقطع حالت یک ارائه گردیده است.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

ب) اندازه‌گیری تنش با استفاده از تکنیک انرژی جنبشی آشفته^۱ TKE: در این روش با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج لیزری و یا اکوستیک^۲ می‌توان مؤلفه‌های سه بعدی سرعت را تخمین زد و سپس میزان تنش برشی را با دقت بالایی ارزیابی کرد. این روش که به روش انرژی جنبشی آشفته نیز معروف است، توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق از روش جدید مومنتوم برای اندازه‌گیری تنش برشی استفاده گردیده و اندازه‌گیری مستقیم نیرو توسط سلول‌های بار دینامیک انجام می‌گردد. فتحی‌مقدم (۱۹۹۷) و کاون^۳ (۲۰۰۰) از این روش به منظور جذب ممنتوم و اندازه‌گیری درآگ گرفته شده از سیال توسط المان‌های پوشش گیاهی استفاده نمودند. از آنجایی که در این روش بر خلاف روش انرژی اندازه‌گیری فقط در یک نقطه صورت می‌گیرد، خطای اندازه‌گیری بسیار کمتر و دقت داده‌برداری بالاتر است.

مطالعات پرستون (۱۹۵۴) در خصوص تنش برشی

پرستون^۴ (۱۹۵۴) یک روش ساده را برای اندازه‌گیری تنش برشی موضعی بر روی مرزهای صاف درون جریان آشفته ابداع نمود. وی با استفاده از یک لوله پیتوت که به سطح صاف بستر چسبیده بود، تنش برشی را اندازه‌گیری نمود. این روش بر پایه فرضیه‌های قانون داخلی (قانون دیوار) که بیانگر تنش برشی مرزی ناشی از توزیع سرعت نزدیک دیواره است، استوار می‌باشد.

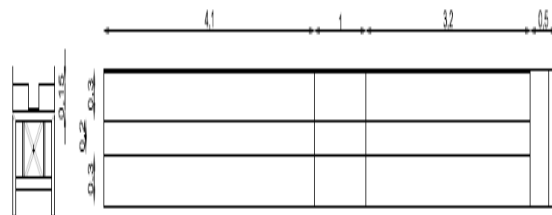
پرستون (۱۹۵۴) با استفاده از افت فشار در یک مجرای دایره‌ای (جهت کالیبراسیون وسیله) به معادله‌هایی دست یافت که بیانگر نسبت تنش برشی به اختلاف بین فشارهای استاتیک و دینامیک (لوله پیتوت) می‌باشد.

وی یک نسبت بدون بعد بین تفاضل فشار لوله پرستون (تفاوت بین فشارهای استاتیک و دینامیک) و تنش برشی مرزی را از رابطه زیر به‌دست آورد:

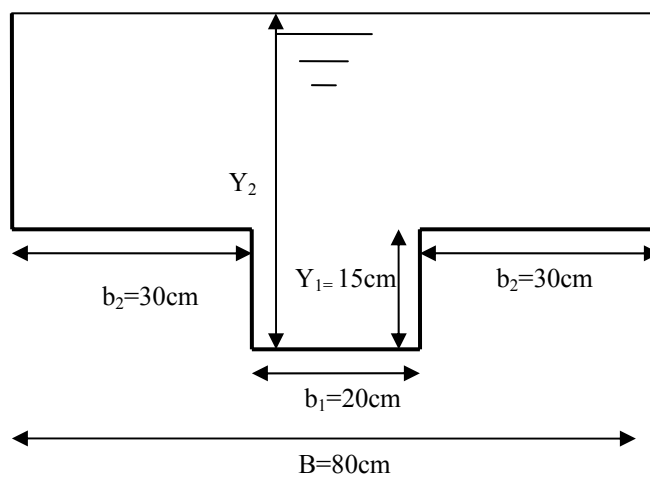
$$\frac{\tau_0 d^2}{4\rho v^2} = f\left(\frac{\Delta P d^2}{4\rho v^2}\right) \quad (5)$$

که در آن τ_0 : تنش برشی مرزی مکانی بر حسب Pa، d: قطر

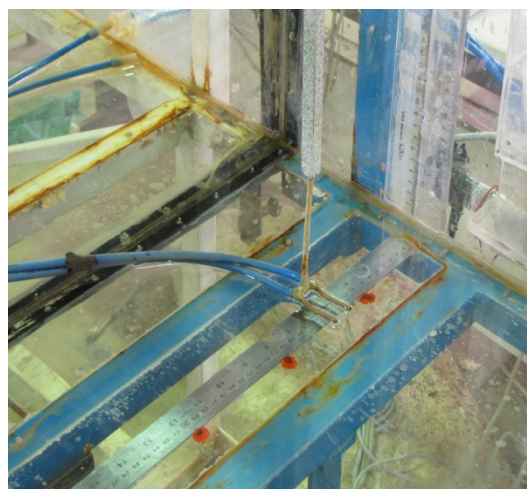
- 1-Turbulent Kinetic Energy
- 2-Acoustic
- 3-Kouen
- 4- Preston



شکل ۳- پلان و مقطع کانال مرکب آزمایشگاهی



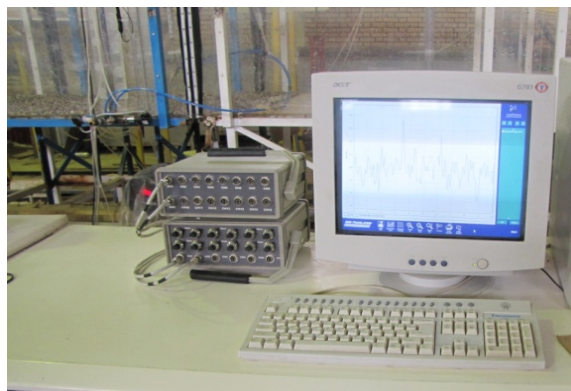
شکل ۴- نمای شماتیک مقطع حالت یک



شکل ۵- نمایی از لوله پرستون

بر روی دیواره دشت سیلابی به فواصل یک سانتی متر تا عمق یک سانتی متر مانده به سطح جریان و بر روی دشت‌های سیلابی و همچنین کانال اصلی به فواصل دو سانتی متر برداشت فشارهای

به‌منظور برداشت فشارهای دینامیکی و تبدیل آن به تنش برشی، از لوله پرستون به قطر چهار میلی‌متر استفاده شد. داده برداری توسط لوله پرستون بشرح زیر انجام یافت:



شکل ۶- سیستم مبدل اندازه‌گیری نوسانات فشار



شکل ۷- نمایی از سیستم فشار سنج تفاضلی

دامنه‌ی دبی‌های آزمایش‌های این تحقیق در محدوده ۱۶/۲۲ لیتر بر ثانیه تا ۶۰/۸۲ لیتر بر ثانیه قرار دارد.

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به آزمایش‌های این تحقیق برای دبی ۱۶/۲۲ لیتر ثانیه در کلاس یک ارائه گردیده است.

نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی بیان شد، به منظور بررسی تغییرات تنش برشی در کانال مرکب مستطیلی، آزمایش‌هایی با سه نسبت شکل مختلف و اعماق نسبی متفاوت و با دبی‌های مختلف به انجام رسید.

در شکل‌های (۸) تا (۱۵) نمودارهای تغییرات تنش برشی در برابر نسبت عمق و همچنین تنش برشی در برابر نسبت شکل‌های مختلف ارائه گردیده است.

دینامیکی صورت پذیرفت. همچنین بر روی دیواره کانال اصلی داده برداری به فواصل دو سانتی‌متر تا لبه کانال به انجام رسید. لازم به ذکر است که در هر داده برداری، لوله پرستون دقیقاً در راستای جریان آب قرار داده شد و هر بار داده برداری نیز به مدت ۲۰ ثانیه و با فرکانس ۵۰ هرتز انجام گرفت. به بیان دیگر هر نقطه برداشت شده نماینده ۱۰۰۰ داده اندازه‌گیری توسط لوله پرستون می‌باشد.

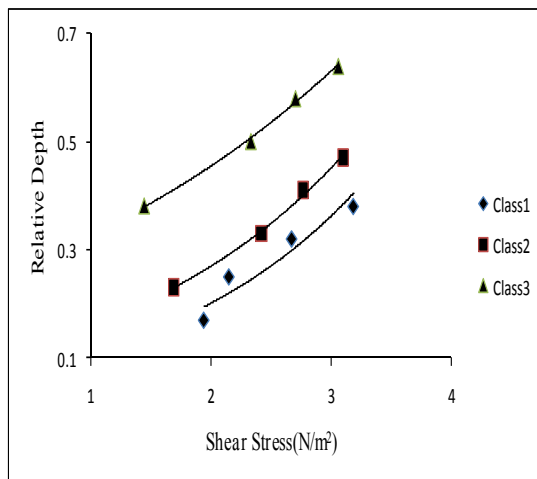
قرائت اختلاف فشار حاصل از تبدیل سرعت به ارتفاع آب در لوله‌های پرستون، یکی از منابع اصلی ایجاد خطا در تعیین تنش برشی در اکثر تحقیقات گذشته می‌باشد که در این تحقیق با استفاده از مبدل فشار (ترانسدیوسر) این خطا به مقدار چشم‌گیری مرتفع گردید. این حسگرها توسط سیم‌های رابط به دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال و از آنجا به سیستم کامپیوتری و نرم افزار پردازشگر اطلاعات مرتبط می‌گردد.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به آزمایشات کلاس یک به ازای دبی ۱۶/۲۲ لیتر بر ثانیه

عمق (cm)	مقطع	دبی (lit/Sec)	تنش برشی (N/m ²)	تنش کل (N/m ²)	* عمق نسبی	**نسبت شکل
۳	دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۱/۹۴۱			
۳	کانال اصلی	۱۶/۲۲	۰/۸۵۲	۶/۱۲۶	۰/۱۷	۴/۴۴
۳	دیواره دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۱/۶۱۴			
۳	دیواره کانال اصلی	۱۶/۲۲	۱/۷۱۹			
۵	دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۲/۱۵			
۵	کانال اصلی	۱۶/۲۲	۱/۰۴	۸/۰۳۷	۰/۲۵	۴
۵	دیواره دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۲/۷۳			
۵	دیواره کانال اصلی	۱۶/۲۲	۲/۴۷۸			
۷	دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۲/۶۷۲			
۷	کانال اصلی	۱۶/۲۲	۱/۲۸۳	۹/۵۲۹	۰/۳۲	۳/۶۴
۷	دیواره دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۲/۵۹۵			
۷	دیواره کانال اصلی	۱۶/۲۲	۲/۸۱۱			
۹	دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۳/۱۸۵			
۹	کانال اصلی	۱۶/۲۲	۱/۵۰۹	۱/۸۸۱	۰/۳۸	۳/۳۳
۹	دیواره دشت سیلابی	۱۶/۲۲	۳/۰۸۲			
۹	دیواره کانال اصلی	۱۶/۲۲	۳/۱۰۵			

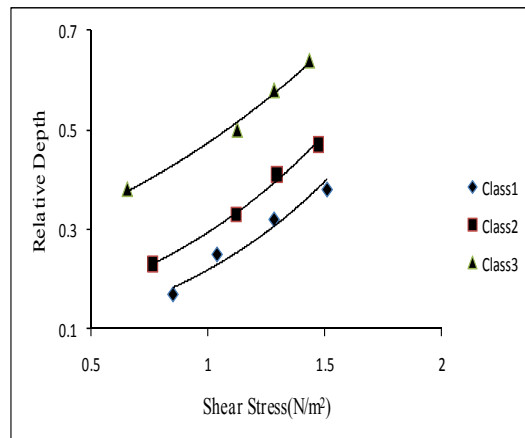
$$= \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2} \text{ 1- Relative Depth}$$

$$2\text{- Aspect ratio} = \frac{B}{Y_2}$$

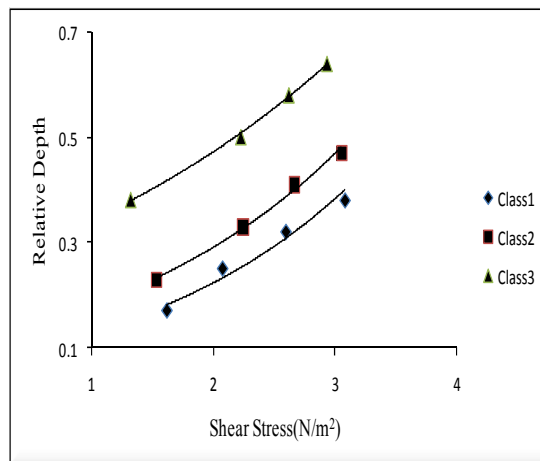


شکل ۸- نمودار تغییرات تنش برشی کف دشت سیلابی در برابر نسبت عمق برای کلاس‌های مختلف

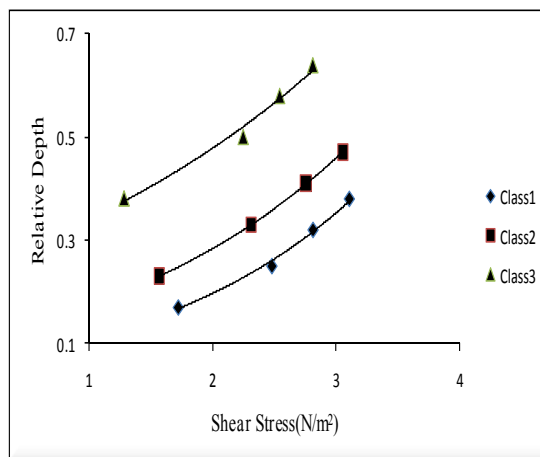
1. Aspect Ratio
2. Relative Depth



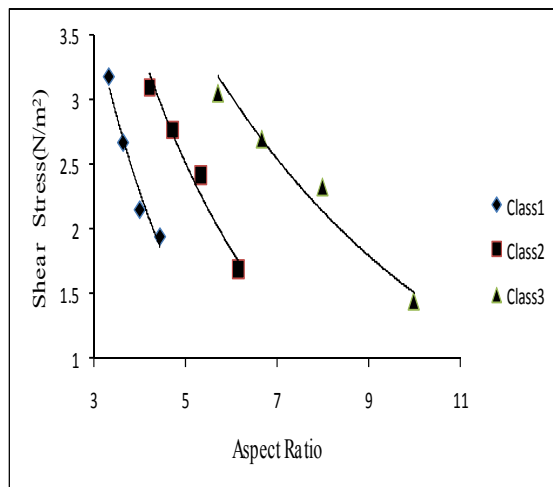
شکل ۹- نمودار تغییرات تنش برشی کف کانال اصلی در برابر نسبت عمق برای کلاس‌های مختلف



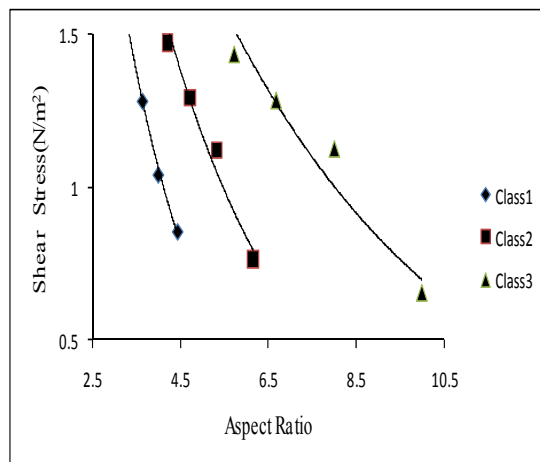
شکل ۱۰- نمودار تغییرات تنش برشی دیواره دشت سیلابی در برابر نسبت عمق برای کلاس‌های مختلف



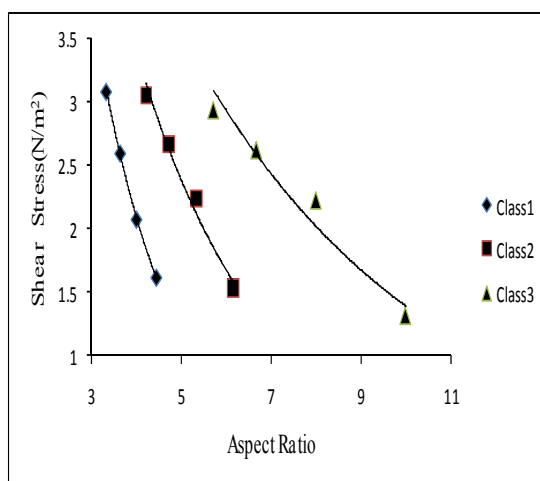
شکل ۱۱- نمودار تغییرات تنش برشی دیواره کانال اصلی در برابر نسبت عمق برای کلاس‌های مختلف



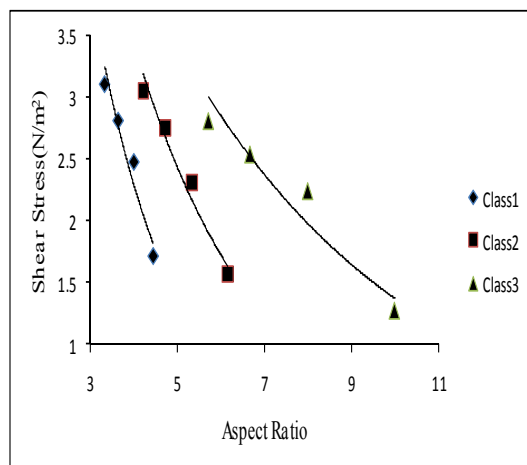
شکل ۱۲- نمودار تغییرات تنش برشی کف دشت سیلابی در برابر نسبت شکل برای کلاس‌های مختلف



شکل ۱۳- نمودار تغییرات تنش برشی کف کانال اصلی در برابر نسبت شکل برای کلاس‌های مختلف



شکل ۱۴- نمودار تغییرات تنش برشی دیواره دشت سیلابی در برابر نسبت شکل برای کلاس‌های مختلف



شکل ۱۵- نمودار تغییرات تنش برشی دیواره کانال اصلی در برابر نسبت شکل برای کلاس‌های مختلف

در این بخش به نتایج حاصل از این تحقیق با توجه به نمودارهای فوق اشاره می‌گردد:

همان‌گونه که از جدول‌ها و نمودارهای فوق مشخص است، با افزایش عمق در هر کلاس میزان تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در کلاس یک و در عمق سه سانتی‌متر میزان دبی معادل $۱۶/۲۲$ لیتر بر ثانیه می‌باشد و میزان تنش برشی دشت سیلابی متناظر آن برابر $۱/۹۴۱$ نیوتن بر متر مربع است، در حالی که با افزایش عمق در همین کلاس و در عمق نه سانتی‌متر، میزان دبی برابر $۶۰/۸۱۵$ لیتر بر ثانیه و میزان تنش برشی دشت سیلابی برابر $۰/۶۴۴$ نیوتن بر متر مربع می‌باشد. به بیان دیگر میتوان عنوان نمود که در کلاس یک، با افزایش دبی به میزان $۷۳/۳۳$ درصد میزان افزایش تنش در دشت سیلابی برابر $۵۴/۰۴$ درصد می‌باشد. این مقدار برای کانال اصلی برابر $۳۲/۳۶$ درصد برای دیواره‌های دشت‌های سیلابی معادل $۶۶/۰۴$ درصد و برای دیواره های کانال اصلی برابر $۵۷/۵$ درصد می‌باشد.

در این بخش به نتایج حاصل از این تحقیق با توجه به نمودارهای فوق اشاره می‌گردد:

همان‌گونه که از جدول‌ها و نمودارهای فوق مشخص است، با افزایش عمق در هر کلاس میزان تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در کلاس یک و در عمق سه سانتی‌متر میزان دبی معادل $۱۶/۲۲$ لیتر بر ثانیه می‌باشد و میزان تنش برشی دشت سیلابی متناظر آن برابر $۱/۹۴۱$ نیوتن بر متر مربع است، در حالی که با افزایش عمق در همین کلاس و در عمق نه سانتی‌متر، میزان دبی برابر $۶۰/۸۱۵$ لیتر بر ثانیه و میزان تنش برشی دشت سیلابی برابر $۰/۶۴۴$ نیوتن بر متر مربع می‌باشد. به بیان دیگر میتوان عنوان نمود که در کلاس یک، با افزایش دبی به میزان $۷۳/۳۳$ درصد میزان افزایش تنش در دشت سیلابی برابر $۵۴/۰۴$ درصد می‌باشد. این مقدار برای کانال اصلی برابر $۳۲/۳۶$ درصد برای دیواره‌های دشت‌های سیلابی معادل $۶۶/۰۴$ درصد و برای دیواره های کانال اصلی برابر $۵۷/۵$ درصد می‌باشد.

با توجه به نمودارهای تنش برشی در برابر نسبت شکل می‌توان عنوان نمود که با افزایش نسبت شکل، میزان تنش برشی کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در کلاس ۳ و در عمق ۳ سانتی‌متر، به ازای دبی

منابع

- ۱- جاعل، آ.، فتحی مقدم، م.، بینام، م.، قمشی، م. و ب. لشکرآرا. ۱۳۸۹. تنش برشی در کانال دوزنقه‌ای صاف. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۳(۱): ۹۱-۷۷.
- ۲- لشکرآرا، ب.، فتحی مقدم، م. ح. محمود ولی سامانی. ۱۳۸۸. تعیین تنش برشی متوسط کف و جداره در کانال مستطیلی صاف. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۳(۲): ۵۰-۴۳.

- 3- And A., Afzalimehr, H., Heidarpour, M Salimi 2006. Flow resistance in a compound gravel-bed bend. *Journal of Sadhana , Engineering Sciences, Indian Academy of sciences*, 31(6): 731-741.
- 4- Al-Khatib, A. and n. m. Dmadi. 1996. Boundary shear stress in rectangular compound channels. *Journal of Engineering and Environmental Science*, 23: 9-18.
- 5- Einstein, H. A. 1942. Formulas For the transportation of bed-load. *Trans. American Society of Civil Engineering*, 107:561-597.
- 6- Fathi-Moghadam, M. 1997. Momentum absorption in non-rigid, non-submerged, tall vegetation along rivers. University of Waterloo, Canada. Doctoral thesis
- 7- Kean.J. W.Kuhnle, R.A. Smith, J. D. Alonso, C. V. and E.J. Langendoen. 2009. Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(7): 588-601.
- 8- Christodoulou, G, C. 1992. "Apparent shear stress in smooth compound channels." *Journal of Water Resources Management*, 6: 235-247.
- 9- Kishnajit Kumar, K. and p. Kanhu Charan. 2007 Boundary shear stress distribution in meandering compound channel flow. *Proceeding of the 5th Australian Stream Management Conference. Australian Rivers: Making Difference. Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales.*
- 10- Lane.E.W. and E. J. Carlson. 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. *Proc. IAHK 5th Congress, Minneapolis.*
- 11- Preston, J. H. 1954. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 58:109-121.
- 12- Rameshwaran, P.; Sun, X.; Shiono, K.; Chandler, J. H.; Sellin, R. H. J.. 2008 *The Modelling of Compound Channel Flow: Physical Model of River Blackwater. Proceedings of the International Conference on Fluvial hydraulics. Turkey, Kubaba Congress Department and Travel Services*, pp: 555-564
- 13- Shiono, K. and C. F. Scott, 2003. Predictions of solute transport in a compound channel using turbulence models. *Journal of Hydraulic Research*, 91(3):247-258.
- 14- Schlichting, H. 1979. *Boundary layer theory. 7th ed. McGraw-Hill, NewYork.*