

تعیین تنش برشی متوسط کف و جداره ی در کانال های مستطیلی صاف

بابک لشکرآرا^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲، حسین محمد ولی سامانی^۳

* دانش آموخته دکتری گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه عمران دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۲

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۷

چکیده

مطالعات حاضر بر پایه ی نتایج آزمایشگاهی به منظور تعیین توزیع تنش برشی در کانال های مستطیلی صاف ارائه شده است. جهت تعیین تغییرات تنش برشی موضعی از لوله ی پرستون با قطر خارجی ۴ میلیمتر مجهز به سلول های حساس به فشار دینامیک استفاده شده است. جهت تبدیل فشار قرائت شده به تنش برشی از منحنی کالیبراسیون پتل استفاده گردید. آنالیز نتایج آزمایشگاهی با استفاده از معادلات رگرسیون غیر خطی منجر به معرفی معادلاتی جهت تعیین درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره ی ها و متوسط تنش برشی جداره ی و کف کانال در اطراف محیط مرطوب گردیده است. مقایسه ی نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مطالعات قبلی، حاکی از درجه ی همبستگی بالاتر و انحراف از معیار کوچک تر معادلات پیشنهادی می باشد. از طرفی معرفی معادلات تک پارامتری در تحقیق حاضر را می توان از مزایای آن نسبت به مطالعات قبلی برشمرد.

کلید واژه ها: تنش برشی، نیروی برشی، لوله ی پرستون، بستر صاف، انرژی

مقدمه

ساختار جریان در مجاری روباز مستقیماً تحت تاثیر نحوه ی توزیع تنش برشی در اطراف محیط مرطوب می باشد. تعیین نحوه ی توزیع نیروی برشی در طبیعت کار مشکلی است و به همین منظور از کانال های آزمایشگاهی جهت غلبه بر این مشکل استفاده می شود. تفکیک تنش برشی بستر از تنش های برشی جداره ی از جایگاه مهمی برخوردار است.

به طور مثال به منظور تخمین میزان بار بستر باید تنش برشی بستر را از تنش برشی کل تفکیک نمود. به طور مشابه برای تخمین میزان فرسایش دیواره های ساحلی و سیل بندها باید از میزان تنش برشی جداره ی آگاهی داشت؛ لذا تحقیق حاضر به منظور بررسی آزمایشگاهی و تعیین میزان سهم هر یک از تنش های برشی کف و جداره ی در یک مجرای مستطیلی با بستر صاف و ارائه معادلات حاکم بر تعیین درصد سهم نیروی برشی کل وارده بر جداره ها و تعیین تنش برشی جداره و کف و هم

چنین تعیین سرعت برشی بستر وارده بر محیط مرطوب به اجرا درآمد. از سال ۱۹۶۰ به بعد مطالعات تجربی متعددی جهت تعیین تنش برشی بستر و جداره ی کانال ها توسط کروف (۱۹۶۵) [۱]، گاش و روی (۱۹۷۰) [۲]، کارتا و لوفیسر (۱۹۷۰) [۳]، مایرز (۱۹۷۸) [۴]، نایت (۱۹۸۱) [۵]، نات سوپالوس و حاجیه پنس (۱۹۸۲) [۶]، نایت و همکاران (۱۹۸۴) [۷]، هو (۱۹۸۵) [۸]، گو و جولین (۲۰۰۵) [۹]، سکین و همکاران (۲۰۰۶) [۱۰] و برخی محققان دیگر گزارش شده است.

نایت و همکاران (۱۹۸۴) با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش ها متعدد بر روی یک کانال مستطیلی با بستر و جداره ی صاف روابط حاکم بر تعیین تنش برشی متوسط جداره ی و کف و همینطور تخمین متوسط سرعت برشی بستر را پیشنهاد دادند. ایشان با استفاده از ۴۳ سری داده آزمایشگاهی در محدوده ی $0.3 < B/H < 6$ و ۱۲ سری داده در محدوده ی $6 < B/H < 15$ معادلات تجربی خود را به صورت زیر بر اساس اصل بقای انرژی ارائه نمودند.

سرعت برشی بستر است.

مواد و روش ها

تحقیق حاضر در یک کانال آزمایشگاهی به عرض ۸۰ سانتیمتر و طول ۸/۶ متر که در شیب ۰/۰۰۱۹۵ تثبیت گردیده به اجرا در آمد. به منظور اندازه گیری تنش برشی موضعی از لوله ی پرستون [۱۱] با قطر خارجی ۴ میلیمتر استفاده گردید. در این تحقیق جهت افزایش دقت داده برداری تغییرات فشار های دینامیک و استاتیک از یک فشار سنج تفاضلی مجهز به دو سلول حساس به تغییرات فشار دینامیک (ترانسدیوسر تفاضلی) استفاده گردید. این سلول ها یا با استفاده از یک قطعه ی برنزی به گونه ای به یکدیگر متصل گردیدند که ایفای نقش یک دستگاه فشار سنج واحد را دارا می باشند. شکل ۱ نمایی از نحوه ی اتصال این قطعات را نشان می دهد. این سلول ها قادرند تا تغییرات زمانی فشار استاتیک و دینامیک وارده بر لوله ی های پرستون را اندازه گیری نمایند. به منظور ثبت داده ها از یک دستگاه جمع آوری داده استفاده گردید. برای تبدیل تفاضل فشار قرائت شده به تنش برشی از روابط کالیبراسیون پتل [۱۲] به شرح زیر استفاده گردید.

$$\%SF_w = EXP[-3.23 \times \log(B/H + 3) + 6.146] \quad (۱)$$

که در آن $\%SF_w$ درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره ی ها در واحد طول کانال و B و H به ترتیب عرض و عمق کانال می باشند. از طرفی روابط زیر جهت تعیین تنش برشی متوسط جداره ی و کف پیشنهاد گردید:

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H S_f} = 0.01 \times \%SF_w \times \left(\frac{B}{2H} \right) \quad (۲)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H S_f} = 1 - 0.01 \times \%SF_w \quad (۳)$$

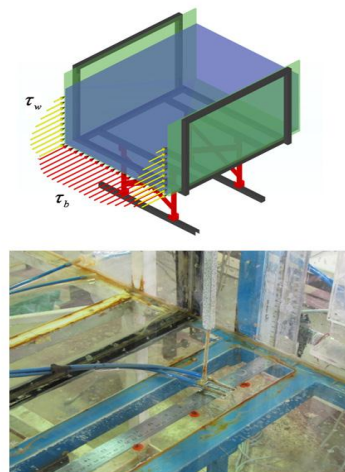
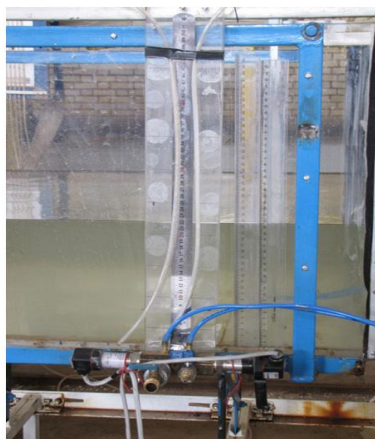
که در روابط فوق $\bar{\tau}_w$ و $\bar{\tau}_b$ به ترتیب متوسط تنش برشی جداره ی و کف، ρ وزن مخصوص آب، g شتاب ثقل و S_f شیب خط انرژی، H ارتفاع آب و B عرض کانال می باشد. ایشان معادلات تنش های برشی جداره ی و کف را با استفاده از متوسط تنش برشی کل $(\rho g R S_f)$ بدون بعد نمودند:

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g R S_f} = 0.01 \times \%SF_w \times \left(1 + \frac{B}{2H} \right) \quad (۴)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g R S_f} = (1 - 0.01 \times \%SF_w) \left(1 + \frac{2H}{B} \right) \quad (۵)$$

$$\frac{\bar{u}_{*b}}{\sqrt{(\bar{\tau}_b/\rho)}} = (1 - 0.01 \times \%SF_w)^{1/2} \quad (۶)$$

که در آن ها R شعاع هیدرولیکی و \bar{u}_{*b} متوسط



شکل (۱) نمایی از فشار سنج تفاضلی دینامیکی، لوله ی پرستون و نحوه ی توزیع تنش

حاصل گردید. سطح زیر منحنی نمایشگر متوسط تنش برشی کل $\bar{\tau}_0$ می باشد.

نتایج آزمایشگاهی

با استفاده از نتایج حاصل از قرائت فشار تفاضلی لوله ی پرستون، تنش برشی موضعی بر روی بستر و جداره ی ها برای هر یک از نسبت های B/H محاسبه گردید. سپس با محاسبه سطح زیر منحنی توزیع تنش برشی، مقدار نیروی برشی وارد بر جداره ی ها و بستر در واحد طول کانال محاسبه گردید. در تحقیق حاضر ۱۴ سری آزمایش به انجام رسید که نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است. بررسی نتایج مندرج در جدول ۱ نشان می دهد که عدد رینالدز برشی در محدوده ی بستر صاف هیدرولیکی می باشد.

کلیدی اندازه گیری ها در فاصله ی $4/7$ متری از ابتدای کانال بانجام رسید. دبی جریان عبوری با استفاده از یک عدد سرریز مستطیلی اندازه گیری گردید. سپس با استفاده از سطح مقطع عبوری جریان، سرعت متوسط از این روش نیز محاسبه گردید. هدف از تحقیق حاضر اندازه گیری توزیع تنش برشی در اطراف محیط مرطوب در نسبت های مختلف B/H در محدوده ی بین $7/96$ تا $18/6$ می باشد. عرض فلوم ثابت و معادل 80 سانتیمتر و عمق جریان در محدوده ی 43 تا 101 میلیمتر تغییر داده شد. محدوده ی تغییرات دبی بین $18/56$ الی $69/47$ لیتر بر ثانیه بود. به منظور ایجاد شرایط جریان یکنواخت و حصول شیب هیدرولیکی معادل با شیب کف فلوم از یک دریچه در انتهای کانال استفاده گردید و نهایتاً با رسم پروفیل سطح آب، شیب هیدرولیکی معادل $1/95 \times 10^{-3}$ برآورد گردید. در هر نسبت B/H مقدار تنش برشی موضعی بستر τ_b و تنش برشی موضعی جداره ی ها τ_w در اطراف محیط مرطوب با استفاده از لوله ی پرستون و معادلات کالیبراسیون پتل اندازه گیری شد. فاصله نقاط اندازه گیری بر روی محیط مرطوب 1 تا 2 سانتیمتر می باشد. سپس با استفاده از روش ترسیمی پروفیل مربوط به توزیع تنش برشی موضعی در اطراف محیط مرطوب

جدول (۱): نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر در بستر صاف هیدرولیکی

عمق H(m)	نسبت B/H	دبی Q(L/s)	سرعت V (m/s)	عدد فرود Fr	عدد رینالدز Re	رینالدز برشی Re*
0.101	7.96	69.47	0.864	0.870	2.757E+05	0.058
0.095	8.42	64.32	0.846	0.877	2.581E+05	0.057
0.081	9.94	50.55	0.785	0.883	2.089E+05	0.053
0.075	10.67	45.43	0.757	0.883	1.899E+05	0.052
0.071	11.27	41.48	0.730	0.875	1.749E+05	0.051
0.062	12.90	33.52	0.676	0.867	1.441E+05	0.048
0.059	13.56	30.61	0.649	0.853	1.325E+05	0.047
0.056	14.29	28.31	0.632	0.853	1.233E+05	0.046
0.053	15.01	26.09	0.612	0.846	1.143E+05	0.045
0.049	16.33	23.03	0.588	0.848	1.019E+05	0.043
0.047	17.02	21.60	0.574	0.846	9.596E+04	0.042
0.046	17.39	20.61	0.560	0.834	9.178E+04	0.042
0.045	17.78	19.92	0.553	0.833	8.890E+04	0.041
0.043	18.60	18.56	0.540	0.831	8.321E+04	0.041

جدول (۲): نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر به منظور تعیین تنش برشی کف و جداره ی

نسبت B/H	تفاضل فشار پرستون mm H ₂ O		متوسط تنش برشی (N/m ²)		نیروی برشی (N)		
	متوسط بستر	متوسط جداره	بستر $\bar{\tau}_b$	جداره $\bar{\tau}_w$	کل SF _p	جداره SF _w	بستر SF _b
7.96	21.96	16.75	1.570	1.239	1.505	0.249	1.256
8.42	21.86	16.49	1.564	1.222	1.483	0.232	1.251
9.94	18.14	13.48	1.328	1.024	1.228	0.165	1.063
10.67	17.47	12.04	1.285	0.928	1.167	0.139	1.028
11.27	16.36	11.14	1.214	0.868	1.094	0.123	0.971
12.90	13.98	9.37	1.058	0.745	0.939	0.092	0.847
13.56	13.61	9.03	1.033	0.722	0.912	0.085	0.827
14.29	12.92	8.47	0.987	0.682	0.866	0.076	0.790
15.01	11.93	7.97	0.921	0.647	0.806	0.069	0.737
16.33	11.01	6.78	0.858	0.562	0.742	0.055	0.687
17.02	10.74	6.55	0.840	0.545	0.723	0.051	0.672
17.39	10.34	6.42	0.812	0.536	0.699	0.049	0.649
17.78	10.15	6.23	0.799	0.521	0.686	0.047	0.639
18.60	9.77	5.64	0.773	0.478	0.660	0.041	0.618

بستر محاسبه و مقادیر مربوطه در جدول ۲ خلاصه گردیده اند.

مقادیر تنش برشی متوسط وارده بر جداره ی ها و کف فلوم که با استفاده از متوسط تنش برشی ($\rho g H S_f$) بدون بعد گردیده اند، محاسبه و در جدول ۲ خلاصه گردیده اند. به منظور دستیابی به معادلات حاکم بر تغییرات تنش برشی جداره ی از معادلات رگرسیون غیر خطی (تابع گویای ۴ پارامتری) و جهت تنش برشی بستر

جهت ارزیابی نتایج حاصل از تحقیق حاضر، از ۶۹ داده آزمایشگاهی ناشی از نتایج محققان دیگر از جمله [۱] الی [۴] و [۶]، [۷] و [۱۰] بهره گیری شده است. با استفاده از نتایج حاصل از تحقیق حاضر مقادیر مربوط به درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره ی ها، متوسط تنش برشی کف، جداره ی ها و متوسط سرعت برشی

و $d = 0.0176$ می باشد.

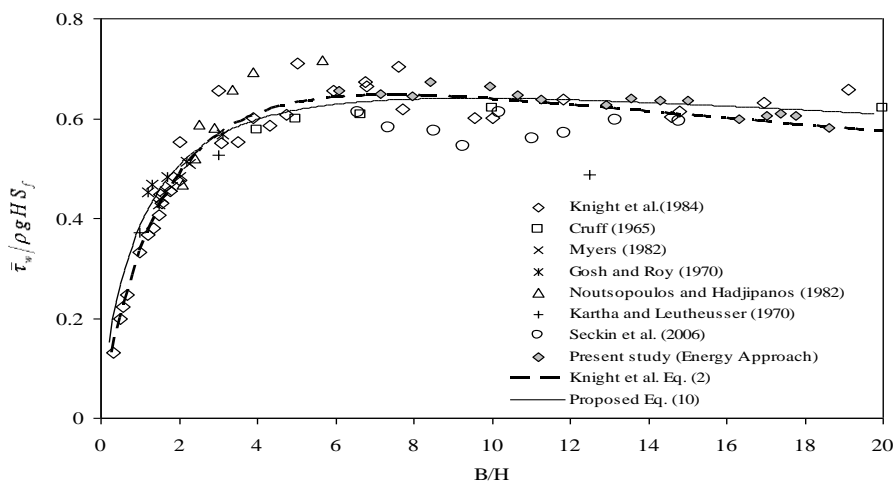
$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g H . S_f} = \frac{a(B/H)^b}{c^b + (B/H)^b} \quad (11)$$

که در آن $a = 1.0186$ ، $b = 1.1313$ و $c = 2.0527$ می باشد.

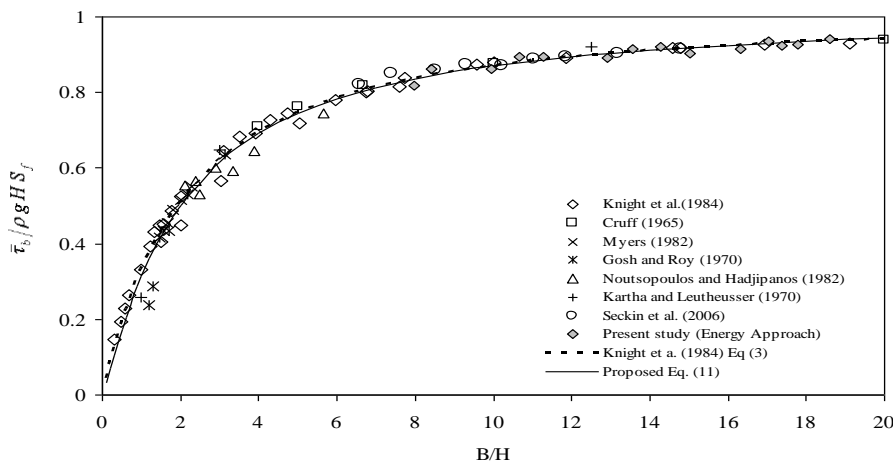
از معادله سیگموئید تپه ای سه پارامتری استفاده گردید و بهترین منحنی مطابق با معادلات ۱۰ و ۱۱ از بین داده ها برازش داده شد. مقادیر مربوطه جهت مقایسه با نتایج حاصل از محققان قبلی در شکل های ۲ و ۳ نمایش داده شده اند.

$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g H . S_f} = \frac{a + b(B/H)}{1 + c(B/H) + d(B/H)^2} \quad (10)$$

که در آن $a = -0.115$ ، $b = 0.7724$ ، $c = 0.913$



شکل (۲): متوسط تنش برشی بدون بعد جداره ی در مقابل نسبت B/H



شکل (۳): متوسط تنش برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H

که در آن $a = 0.0114$ ، $b = -0.9892$ و $c = 0.0004$ می باشد.

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho g R S_f} = \frac{a + b(B/H)}{1 + c(B/H) + d(B/H)^2} \quad (13)$$

که در آن $a = 0.9461$ ، $b = 0.3466$ ، $c = 0.3028$ ، $d = 0.0012$ و سرعت برشی بدون بعد برابر (شکل ۶)،

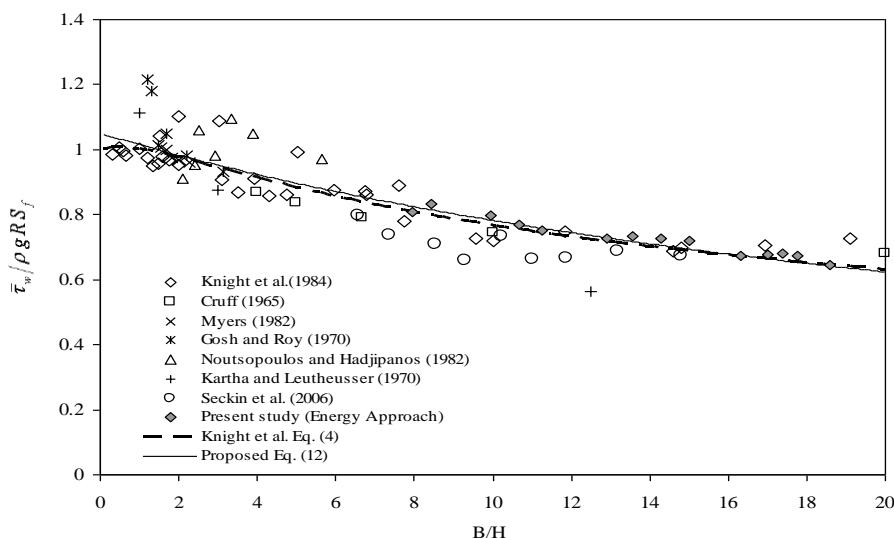
$$\frac{\bar{u}_{*b}}{\sqrt{g H S_f}} = \frac{ab + c(B/H)^d}{b + (B/H)^d} \quad (14)$$

که در آن $a = 0.3149$ و $b = 1.7159$ و $c = 0.99$ و $d = 1.2348$ می باشد.

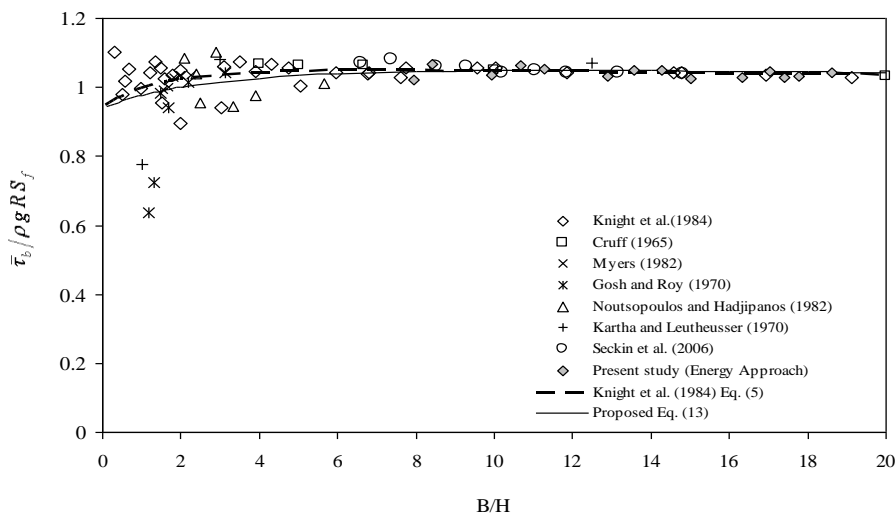
از طرفی متوسط تنش برشی جداره ی و بستر را می توان از تقسیم نمودن مقادیر مربوطه بر متوسط تنش برشی کل ($\rho g R S_f$) بدون بعد نمود. برای این منظور با استفاده از رگرسیون غیر خطی به ترتیب از تابع سیگموئید تپه ای ۳ پارامتری و تابع گویای ۴ پارامتری بهره گیری گردید و معادلات بدون بعد تنش برشی جداره ی و کف بر حسب شعاع هیدرولیکی به صورت معادلات ۱۲ و ۱۳ برآزش داده شد. مقادیر مربوطه جهت مقایسه ی با نتایج حاصل از محققان قبلی در اشکال ۴ و ۵ نمایش داده شده اند.

(۱۲)

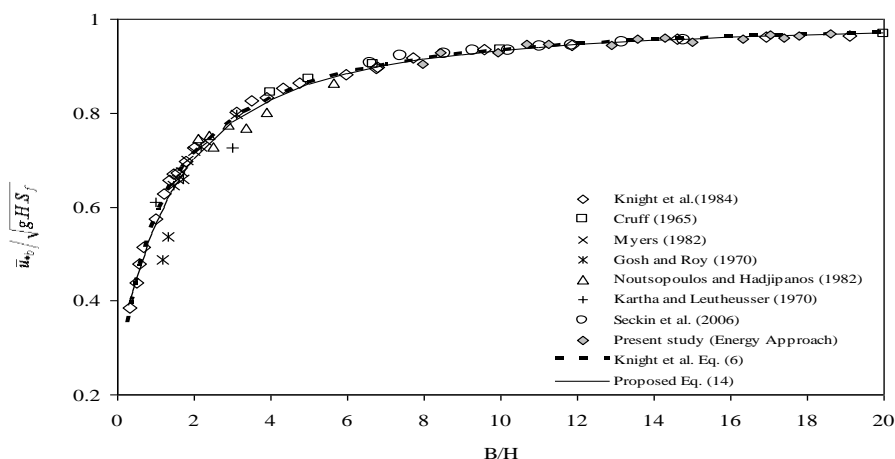
$$\frac{\bar{\tau}_w}{\rho g R S_f} = \frac{a}{1 + b \exp[-c(B/H)]}$$



شکل (۴): متوسط تنش برشی بدون بعد جداره ی در مقابل نسبت B/H



شکل (۵): متوسط تنش برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H



شکل (۶): متوسط سرعت برشی بدون بعد بستر در مقابل نسبت B/H

جدول (۳) مقایسه‌ی ضریب همبستگی و انحراف از معیار معادلات پیشنهادی [۷] با معادلات متناظر آن در تحقیق حاضر

معادلات پیشنهادی در تحقیق حاضر			معادلات پیشنهادی [۷]		
انحراف از معیار SD	ضریب همبستگی R ²	شماره معادله	انحراف از معیار SD	ضریب همبستگی R ²	شماره معادله
0.118	0.844	10	0.117	0.849	2
0.22	0.985	11	0.21	0.985	3
0.122	0.772	12	0.132	0.74	4
0.019	0.161	13	0.028	0.137	5
0.141	0.945	14	0.142	0.943	6

بین $1/6 < B/H < 7/96$ بدست آمده است. معادلات معرفی شده در تحقیق حاضر جهت تعیین متوسط تنش برشی جداره‌ی و کف و هم چنین متوسط سرعت برشی بستر کاربرد دارند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر جهت تعیین متوسط تنش برشی جداره‌ی و کف برای کانال‌های مستطیلی صاف با نسبت‌های عرض فلوم به عمق جریان

از طرفی بررسی روند تغییرات در مقابل B/H در شکل های ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان می دهد که مقادیر حاصل از تحقیق حاضر در مقایسه ی با نتایج حاصل از تحقیقات گذشته از همبستگی مطلوبی برخوردار است. ذکر این نکته ضروری است که فلوم مورد استفاده جهت تحقیق حاضر از عرض نسبتا مناسبی در مقایسه ی با فلوم های به کار گرفته شده توسط محققان قبلی برخوردار است و بررسی نتایج به طور متوسط رقمی بالغ بر ۵۰ درصد افزایش در عرض را نشان می دهد و این امر باعث کاهش اثرات مقیاس و تطابق بیش تر نتایج با شرایط طبیعی می گردد.

تشکر و سپاس گزاری

بدینوسیله از دانشگاه شهید چمران و قطب علمی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی بدلیل تسهیل و ارائه امکانات آزمایشگاهی این تحقیق تشکر و قدر دانی می گردد.

بر روی نحوه ی عملکرد معادلات پیشنهادی در مقایسه ی با معادلات ارائه شده در [۷] در جدول ۵ خلاصه شده است. نتایج حاکی از آن است که معادلات ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ نسبت به معادلات نظیر خود (۴ و ۵ و ۶) از ضریب همبستگی بالاتر و انحراف از معیار کم تری برخوردار می باشند که از نقاط قوت این تحقیق بشمار می روند. در نقطه ی مقابل معادله ی ۱۰ نسبت به معادله ی نظیر خود (۲) از ضریب همبستگی پایین تر و از انحراف معیار بالاتری برخوردار است. از سوی دیگر معادلات پیشنهادی تنها به نسبت

عرض فلوم به عمق جریان B/H وابسته می باشند و این در حالیست که معادلات پیشنهادی در [۷] علاوه بر وابستگی به نسبت B/H به درصد نیروی برشی کل وارده بر جداره ی ها $SF_w\%$ نیز وابستگی دارد و این موضوع را می توان از نقاط قوت معادلات تحقیق حاضر برشمرد.

منابع

1. Cruff, R. W. (1965). "Cross-channel transfer of linear momentum in smooth rectangular channels." Water-Supply Paper, 1592-B, U.S. Geological Survey, Center, Miss., B1-B26.
2. Ghosh, S. N., and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow." J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 96(4), 967-994.
3. Kartha, V. C., and Leutheusser, H. J. (1970). "Distribution of tractive force in open-channels." J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 96(7), 1469-1483
4. Myers, W. R. C. (1978). "Momentum transfer in a compound channel." J. Hydraul. Res., 16(2), 139-150.
5. Knight, D. W. (1981). "Boundary shear in smooth and rough channels." J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 107(7), 839-851.
6. Noutsopoulos, G. C., and Hadjipanios, P. A. (1982). "Discussion of Boundary shear in smooth and rough channels by D. W. Knight." J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 108(6), 809-812.
7. Knight, D. W., Demetriou, J. D., and Homed, M.E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels." Agric. Water Manage., 110(4), 405-422.
8. Hu, C. H. (1985). "The effect of the width/depth ratio and side-wall roughness on velocity profile and resistance in rectangular open-channels." MS thesis, Tsinghua Univ., Beijing.
9. Junke Guo, and Pierre Y. Julien (2005). "Shear Stress in smooth rectangular open-channel flows." J. Hydraul. Eng., 125(3), 30-37
10. Seckin, G. and Seckin, N. and Yurtal, R. (2006). "Boundary Shear Stress Analysis in Smooth Rectangular Channels", Canadian Journal of Civil Engineering, 33: 336-342.
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. Patel, V.C. (1965) "Calibration of the Preston Tube and limitations on its use in pressure gradients". J. Fluid Mech. 23, 185-208.