

## بررسی تأثیر رژیم جریان و هندسه کانال بر روی تنش برشی و فشار در کانال‌های روباز دوزنقه‌ای شکل با پوشش بتن پارچه ای

محمد رضا جلیلی قاضی‌زاده<sup>۱\*</sup>، سعید احمدی<sup>۲</sup>، محمد مهدی کرمانی‌نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۰

### چکیده

استفاده روز افزون مصالح پیش ساخته در پروژه‌های عمرانی سرعت بیشتری گرفته است. یکی از این محصولات که در پوشش کانال‌های آب استفاده می‌شود بتن پارچه‌ای است. جریان آب در کانال، باعث ایجاد نیرویی در جهت حرکت آب بر سطح بستر کانال می‌شود. این نیرو، ایجادکننده تنش برشی بر روی سطح مرطوب شده کانال است. تنش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار هستند زیرا باعث آب شستگی و آسیب رساندن به پوشش کانال‌ها خواهد شد. همچنین فشار هیدرو استاتیک نوع دیگری از نیروهایی است که در کانال‌های روباز وجود دارد و به پوشش سطح کانال‌ها وارد می‌شود. در این تحقیق ابتدا جریان‌های کانال‌های روباز در مقطع دوزنقه‌ای تحت ۹ سناریو شبیه‌سازی شده است که شامل ۳ هندسه متداول کانال در حالت مسیر مستقیم، مسیر دارای انحنا و انحراف و نهایتاً مسیر کانال دارای تغییر ارتفاع در کف کانال است. در هر یک از حالات جهت محاسبه تنش‌های برشی ۳ رژیم مختلف جریان به همراه مدل‌سازی آشفته‌گی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. این کار با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و نرم‌افزارهای جانبی Matlab و excel صورت گرفته است. برای بررسی فشار از سه گره محاسباتی در طول کانال استفاده شده است و نتایج در هر رژیم جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر رژیم جریان به حالت فوق بحرانی میزان تنش برشی ایجادشده در کف و دیواره کانال افزایش می‌یابد. همچنین انحراف در مسیر کانال باعث رشد چشمگیر تنش برشی در کانال روباز دوزنقه‌ای می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** بتن پارچه‌ای، کانال روباز، کانال دوزنقه‌ای، هندسه کانال، تنش برشی، رژیم‌های جریان، FLOW-3D

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران - نویسنده مسئول (M\_jalili@sbu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

## ۱- مقدمه

تأثیر نیروی ثقل در قالب پارامتر دینامیکی بدون بعدی به نام عدد فرود ( $Fr$ ) مورد بررسی قرار می‌گیرد (بارانی ۱۳۹۲):

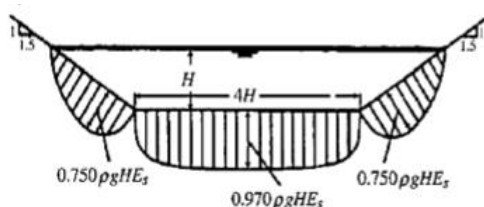
اگر  $Fr > 1$  باشد جریان فوق بحرانی نامیده می‌شود.

اگر  $Fr < 1$  باشد جریان زیر بحرانی است.

اگر  $Fr = 1$  باشد جریان بحرانی در کانال وجود خواهد داشت.

بررسی معادلات تنش برشی و نحوه توزیع تنش برشی در بستر و جداره کانال‌ها اهمیت زیادی دارد که می‌توان میزان انتقال رسوبات بستر و فرسایش کانال‌ها را تعیین کرد. تعیین این پارامتر به‌طور دقیق و مؤثر به محاسبات انتقال رسوب و فرسایش کانال کمک کرده و بر این اساس می‌توان کانال‌های پایدارتر و بهتری را طراحی کرد. نحوه طراحی صحیح و بررسی پایداری کانال‌های آب در قبال فرسایش تحمیل‌شده از سمت جریان سیال درون کانال اهمیت دارد. به‌طور کلی پارامتر اصلی پایداری کانال‌ها وابسته به نیروی تنش برشی حاصل‌شده از جریان سیال عبوری درون کانال آب است که از اهمیت بسیاری برخوردار است. تنش برشی در حالت کلی مؤلفه‌ای از تنش است که به‌صورت مماس بر سطح مورد بررسی اعمال می‌شود. به بیان ساده تنش برشی در کانال آب، بیانگر نیروهایی است که میل به حرکت دادن و کشیدن سطح (پوسته) کانال را دارد. با بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی تنش‌های برشی در کانال‌های روباز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

روش کلو<sup>۵</sup> یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای تعیین میزان توزیع تنش برشی در کانال‌های دوزنقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱ مشخص می‌شود که بیشترین میزان تنش برشی در کف کانال است و مقدار آن به مراتب بیشتر از دیواره‌های کانال خواهد بود.



شکل (۱): توزیع تنش در کانال دوزنقه‌ای

در سال (knight et al 1984, 1985) و همچنین (patel 1986) تنش برشی ایجادشده در مرز کانال دوزنقه‌ای با سطح صاف و سطح زبر مورد بررسی قرار دادند که در نهایت معادلاتی جهت محاسبات ارائه شد. یکی از معادلات تناسب نیروی برشی تحمل شده توسط کف و دیواره‌های کانال و معادله دیگر در ارتباط با

جریان‌ها در کانال‌ها را می‌توان به چند بخش تقسیم کرد. در دسته‌بندی اول، جریان در کانال باز را می‌توان به دو نوع پایدار<sup>۱</sup> و غیر پایدار<sup>۲</sup> دسته‌بندی کرد [۸]. در جریان پایدار، در یک نقطه مشخص، باگذشت زمان تغییری در پارامترهای مختلف هیدرولیکی جریان مانند دبی، سرعت و ... اتفاق نمی‌افتد. در دسته‌بندی دوم، می‌توان جریان در کانال باز را با توجه به چگونگی تغییرات عمق جریان در طول کانال، به دو نوع یکنواخت و غیریکنواخت (متغیر) تقسیم کرد. دسته‌بندی مهم دیگر جریان‌ها در کانال‌های روباز را می‌توان به تقسیم‌بندی جریان از لحاظ لایه‌ای<sup>۳</sup> بودن و متلاطم<sup>۴</sup> بودن جریان اشاره کرد. این دسته‌بندی با توجه به پارامتر عدد رینولدز تعیین می‌شود. عدد رینولدز نشان‌دهنده نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز است که به دلیل حرکت سیال به وجود می‌آیند. از آنجایی که آشفتگی و یا لایه‌ای بودن جریان وابسته به این نیروها است، از این رو با استفاده از عدد رینولدز می‌توان رژیم (لایه‌ای یا آشفته بودن) یک جریان را تعیین کرد. با توجه به مراجع موجود جریان را می‌توان به سه دسته لایه‌ای، انتقالی و آشفته تقسیم‌بندی کرد [۱۶]. جدول (۱) نشان‌دهنده بازه عدد رینولدز در جریان‌های مختلف است.

## ۲- رابطه عدد فرود و عدد رینولدز در کانال‌های دوزنقه‌ای

در کانال‌های دوزنقه‌ای شکل رابطه فرود، دبی و سرعت و همچنین عدد رینولدز به ترتیب روابط ۱ و ۲ با جای گذاری روابط هندسی کانال بازنویسی خواهد شد [۱]:

$$Re = \frac{byV + Vz^2}{b\theta + zy\theta\sqrt{1+z^2}} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{gy(b+zy)}{b+2zy}}} \quad (2)$$

Z شیب جانبی کانال است. لزجت سینماتیکی برای آب ۲۰ درجه  $1 \times 10^{-5}$  مجذور سرعت بر ثابته است. همچنین b عرض کف کانال، y عمق آب درون کانال، g شتاب گرانش، V سرعت جریان است.

جدول (۱): رژیم جریان با توجه به عدد رینولدز

نوع جریان	عدد رینولدز
لایه‌ای	$Re < 2300$
انتقالی	$2300 < Re < 4000$
آشفته	$Re > 4000$

<sup>1</sup> Steady

<sup>2</sup> Unsteady

<sup>3</sup> Laminar

<sup>4</sup> Turbulence

### ۳- مواد و روش‌ها

شرکت Flow-Science یکی از ارائه‌دهندگان محصول نرم‌افزاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. نرم‌افزار FLOW-3D را به‌عنوان یک نرم‌افزار جامع و دقیق بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی از سال ۱۹۸۵ آغاز و تاکنون نسخه‌های مختلفی از این نرم‌افزار را به جامعه مهندسی ارائه کرده است.

نرم‌افزار FLOW-3D با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته برای مدل‌سازی حرکت جریان‌ها برای حل عددی معادلات سه‌بعدی استفاده می‌کند. به‌طور مثال برای مدل‌سازی سطح آزاد جریان از روش  $VOF^1$  و جهت مدل‌سازی موانع جامد و هندسه مسئله از روش  $FAVOR^2$  بهره می‌برد. این تکنیک‌ها باعث می‌شوند که هندسه و شبکه‌بندی مسئله باهم وابسته نباشند و برای مدل‌سازی جریان‌های سه‌بعدی در حالت‌های ماندگار و غیر ماندگار با هندسه‌های پیچیده توانمندی خوبی را ارائه دهد. معادلات مورد استفاده در این نرم‌افزار معادلات ناویر استوکس است و از پنج مدل آشفتگی مختلف در حل جریان‌های آشفتنه استفاده می‌کند.

### ۳-۱- معادلات پیوستگی سیال

معادله پیوستگی عمومی در رابطه ۳ نشان داده شده است که عبارت است از:

$$\begin{aligned} V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) \\ + \xi \frac{\rho u A_x}{x} \\ = R_{DIF} + R_{SOR} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $V_F$  کسر حجمی جریان<sup>۳</sup>،  $\rho$  دانسیته جریان،  $R_{DIF}$  پخشیدگی آشفتگی و  $R_{SOR}$  منبع جرم است. سرعت جریان  $(u, v, w)$  در جهت‌های  $(x, y, z)$  و یا  $(r, \theta, z)$  هستند.  $A_x, A_y, A_z$  برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت‌های  $x, y, z$  است. همچنین مقدار  $R$  به نوع سیستم مختصات بستگی خواهد داشت، یعنی زمانی که از مختصات استوانه‌ای برای حل استفاده می‌شود، مشتقات باید به مشتقات قطبی نیز تبدیل شوند.

عبارت  $R_{DIF}$  که عبارت پخش آشفتگی است که رابطه ۴ آن را تعریف می‌کند:

میزان حداکثر تنش برشی در کانال است. در واقع آن‌ها روش کلو را توسعه دادند از دیگر روش‌های محاسبه توزیع تنش برشی در کانال‌های دوزنقه‌ای می‌توان به روش SKM اصلاحی که توسط (knight etal 2006) ارائه شد، اشاره کرد. آن‌ها نتایج کار خود را با نتایج آزمایشگاهی (Yuen 1989) منتشر شد مقایسه کردند. نتایج حاصله حاکی از آن بود که توزیع تنش برشی تطابق خوبی ندارد و علت این امر مدل‌سازی نامناسب جریان‌های ثانویه است.

روش MPM که توسط (Khodashenas & paquier 2008) معرفی شد. این روش به نسبت روش‌های دیگر از دقت مناسب‌تری برخوردار بود. ساختار کلی این روش یک‌راه حل هندسی برای اندازه‌گیری تنش برشی در مقاطع نامنظم است که اقتباسی از روش جداسازی شعاع هیدرولیکی انیشتین است. (blancaert 2010) طیفی از آزمایش‌ها را بر روی کانال‌های دوزنقه‌ای با سطح زبر خیلی زبر و صاف مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در حالت زبر و خیلی زبر یک ناهم‌انگهی در توزیع تنش برشی وجود دارد. در حالت دیواره صاف توزیع تنش به‌صورت هم‌انگ خواهد بود. زبری باعث کاهش سرعت جریان خواهد شد و تنش برشی به‌طور فراوانی بالا خواهد رفت، همچنین باعث بیشتر شدن ضریب اصطکاک دیواره‌ها خواهد شد. (Kabiri- Samani 2012) با استفاده از روش‌های ارائه شده محاسبه توزیع تنش برشی برای کانال‌های مستطیلی و بسط آن‌ها برای کانال‌های دوزنقه‌ای استفاده کردند. (بهادری و بهاروندی ۱۳۹۴) اثر زبری نسبی بر تنش‌های برشی در کانال‌های مستطیلی متقارن را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D انجام دادند. از نتایج آن‌ها می‌توان به این موضوع اشاره کرد که افزایش زبری نسبی، سبب افزایش تنش برشی متوسط در زیر مقاطع کانال و افزایش درصد تنش برشی ظاهری می‌گردد. (نجفیان و همکاران ۱۳۹۶) خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب منشوری را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. آن‌ها از یک نمونه آزمایش که در ارتباط با کانال‌های مرکب در دانشگاه تهران مدل‌سازی شده بود استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نرم‌افزار دارای دقت مناسبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب با زبری‌های نامتقارن است.

مطالعات گسترده‌ای تا به امروز بر روی محاسبه تنش‌های برشی ایجاد شده صورت گرفته است. در این تحقیق تأثیر هندسه کانال و همچنین رژیم جریان کانال بر روی تنش برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup> Volume of Fluid

<sup>2</sup> Fractional Area-Volume Obstacle Representation

<sup>3</sup> Fractional Volume Open to Flow

در این معادلات ( $G_x, G_y, G_z$ ) شتاب‌های بدنه، ( $f_x, f_y, f_z$ ) شتاب‌های ناشی از لزجت، ( $b_x, b_y, b_z$ ) افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج و نهایتاً عبارت آخر در سمت راست به تزریق جرم در سرعت صفر ارتباط دارد.

برای لزجت دینامیک  $\mu$  عبارت‌های شتاب به شرح روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ است:

$$\rho V_F f_x = wsx - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \quad (9)$$

$$\rho V_F f_y = wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xy}) + A_y \tau_{xy} \right\} \quad (10)$$

$$\rho V_F f_z = wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \quad (11)$$

که در آن‌ها تنش به صورت مجموعه روابط ۱۲ تا ۱۷ تعریف می‌شود:

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\xi u}{x} \right\} \quad (12)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\xi u}{x} \right\} \quad (13)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\xi u}{x} \right\} \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \quad (15)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad (16)$$

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (4)$$

که در آن  $v_\rho$  برابر با  $C_p \mu / \rho$  خواهد بود که  $\mu$  برابر با ضریب پخش مومنتوم، و  $C_p$  یک ثابت است و معکوس آن به عدد آشفتگی اشمیت<sup>۱</sup> ارتباط دارد. لازم به ذکر است که این مدل پخش جرم برای اختلاط‌های آشفتگی مورد استفاده است که سیال دارای گرادیان غیریکنواخت چگالی است. عبارت  $R_{SOR}$  نیز مربوط به چگالی سیال است.

برای سیالات غیر تراکم پذیر مانند آب،  $\rho$  در معادله پیوستگی ثابت است، و رابطه به صورت رابطه ۵ ساده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5)$$

### ۳-۲- معادلات مومنتوم سیال

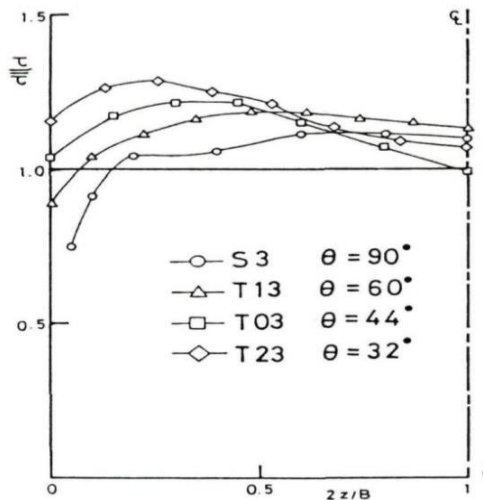
معادلات مومنتوم جریان یا همان معادلات حرکت سیال ( $x, y, z$ ) در سه جهت به صورت سه بعدی قابل بررسی است. رابطه ۶، ۷ و ۸ شرح دهنده مومنتوم سیال است که به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SUR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (8)$$

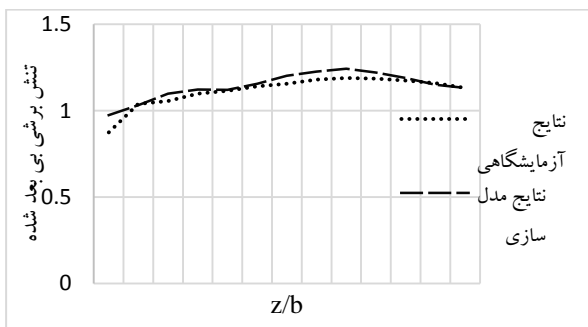
<sup>۱</sup> Turbulent Schmidt Number



شکل (۲): نتایج آزمایش تومینگا در مدل سازی تنش برشی کانال دوزنقه‌ای

$$\tau_0 = \rho g R_h S_f \quad (18)$$

نتایج مقایسه مدل سازی در شکل ۳ نشان داده شده است که با نتایج با نتایج آزمون آزمایشگاهی تطابق قابل قبول را دارا است.



شکل (۳): مقایسه نتایج مدل سازی نرم افزاری و آزمایشگاهی کانال دوزنقه‌ای

#### ۴-۱- سناریوهای مدل سازی

با توجه به این که در طبیعت، جریان آرام<sup>۱</sup> عملاً وجود ندارد و جریان به دو صورت انتقالی و یا آشفته هستند، لازم است تا نیروهای لزجت در مدل سازی شوند. همچنین عدد رینولدز جریان در محدوده آشفته قرار خواهد گرفت. به طور کلی جریان برای سه فیزیک مختلف و متداول در جریان مدل سازی شده است. شکل (۴) نشان دهنده هندسه کانال‌های مورد بررسی است.

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (17)$$

در حالت‌های بالا، عبارات  $w_{sx}, w_{sz}, w_{sy}$  تنش‌های برشی دیواره هستند. اگر این عبارات حذف شوند، هیچ تنش برشی روی دیواره وجود نخواهد داشت. زیرا جمله‌های باقیمانده شامل نواحی جریان کسری  $(Az, Ay, Ax)$  است که در دیوارها ناپدید می‌شوند. تنش‌های روی دیواره با فرض سرعت مماسی صفر روی هر قسمتی از سطح محدود به جریان مدل سازی می‌شوند و همچنین شبکه‌ها و مرز موانع متحرک از این قاعده مستثنا نیستند.

#### ۴- نتایج و بحث

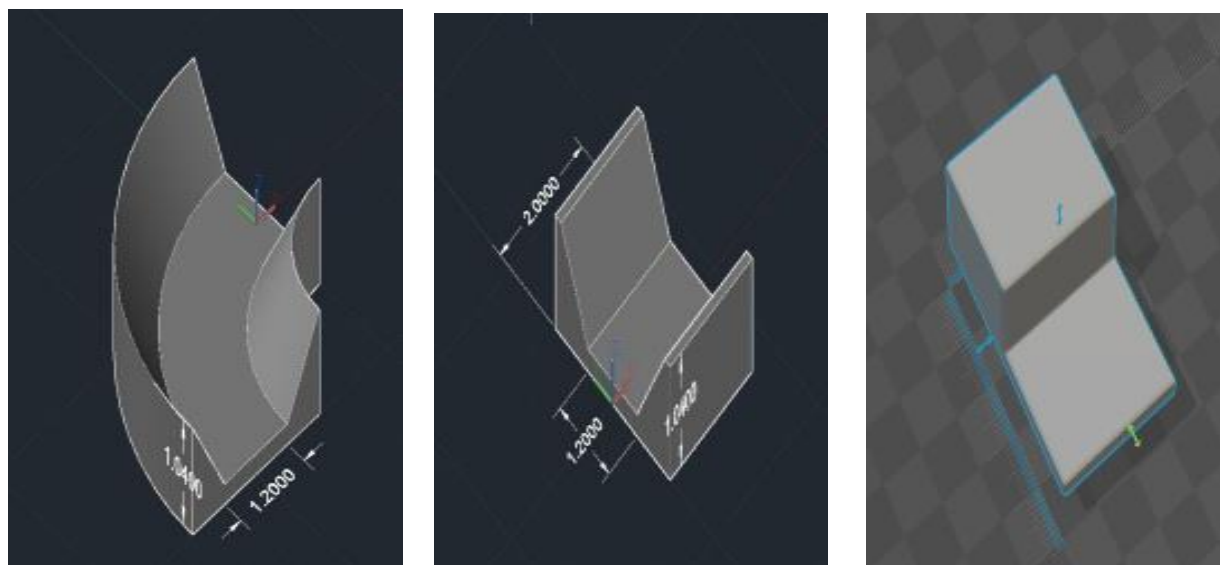
برای صحت سنجی مدل سازی نرم افزار و همچنین کنترل شبیه سازی لازم است تا ابتدا یک آزمون آزمایشگاهی با نرم افزار شبیه سازی شود. با توجه به مجموعه آزمایش‌ها Tominga در سال ۱۹۸۹ که بر روی نحوه مدل سازی تعیین تنش برشی در کانال‌های روباز دوزنقه‌ای صورت گرفته است. جنس کف کانال از آهن رنگ شده است و جداره‌های کانال مورد بررسی از شیشه ساخته شده است که ضریب مانینگ برای آن ۰/۰۱ است. جدول ۲ اطلاعات تکمیلی آزمایش مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای بررسی مدل سازی نرم افزاری آزمون T13 از مجموعه آزمایش‌های تومینگا مورد استفاده قرار گرفته است که شکل ۲ نتایج آزمایشگاهی تومینگا را نشان می‌دهد که نتایج آزمایش T13 در آن قابل مشاهده است.

به طور مشخص شرایط کلی آن در جدول زیر نمایش داده شده است.

جدول (۲): مشخصات آزمایش مدل سازی شده مقطع دوزنقه‌ای

عدد فرود	۰/۳۲
زاویه دیواره کانال	۶۰
عدد رینولدز	۴E۶/۳
حداکثر سرعت سانتیمتر بر ثانیه	۳۹/۳۶
سرعت متوسط (سانتیمتر بر ثانیه)	۳۰/۰۹
عرض کانال (سانتیمتر)	۲۴/۸
عمق جریان (سانتیمتر)	۱۱
دبی (لیتر بر ثانیه)	۱۰/۵۵

<sup>۱</sup> Laminar



شکل (۴): هندسه کانال‌های بررسی شده

الف) کانال دوزنقه‌ای با شیب بستر تقریباً افقی (ب) بستر ریزشی (ج) کانال دارای انحراف مسیر

سرعت جریان در حالت فوق بحرانی ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. عدد فرود در این حالت عدد فرود  $1/25$  خواهد بود. همچنین عدد رینولدز جریان  $59558$  است. سرعت جریان در حالت بحرانی  $1/62$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. عدد فرود در این حالت عدد فرود  $1$  خواهد بود. همچنین عدد رینولدز جریان  $54675$  است. سرعت جریان در حالت زیر بحرانی  $1/2$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. عدد فرود در این حالت عدد فرود  $0/74$  خواهد بود. همچنین عدد رینولدز جریان  $43392$  است. با توجه به عدد رینولدز هر رژیم جریان لازم است تا تأثیرات آشفتگی جریان بر روی تنش‌های برشی نیز لحاظ شود. از مدل RNG جهت مدل‌سازی تأثیرات آشفتگی استفاده شده است. این مدل جهت مدل‌سازی جریان‌های ثانویه نیز توانمند است و نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بیشتری نیز دارد. (Parsaei 2015). برای بررسی بهتر نتایج لازم است تا ضریب مانینگ هر سه مدل کانال یکسان در نظر گرفته شود. در این پژوهش ضریب مانینگ  $0/012$  در نظر گرفته شده است. شرایط کلی کانال‌ها در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول (۴): مشخصات فیزیکی کانال و جریان

عمق جریان (متر)	طول کانال (متر)	زاویه دیواره کانال دوزنقه‌ای (درجه)	ضریب مانینگ	عرض کف کانال (متر)
۰.۳	۲	۶۰	۰/۰۱۲	۱/۲

همچنین جریان با توجه به عدد فرود به سه دسته بحرانی، فوق بحرانی و زیر بحرانی تقسیم‌بندی می‌شود. برای هر کدام از این سه هندسه کانال، هر سه حالت از لحاظ بحرانی بودن جریان مدل‌سازی خواهد شد. در مجموع به‌طور کلی می‌توان به ۳ مورد کلی و ۹ زیرمجموعه آن در جدول ۳ اشاره کرد.

جدول (۳): طبقه‌بندی حالت‌های ۹ گانه مورد بررسی

کانال دوزنقه‌ای دارای انحراف	بستر ریزشی	کانال دوزنقه‌ای
رژیم جریان زیر بحرانی	رژیم جریان زیر بحرانی	رژیم جریان زیر بحرانی
رژیم جریان بحرانی	رژیم جریان بحرانی	رژیم جریان بحرانی
رژیم جریان فوق بحرانی	رژیم جریان فوق بحرانی	رژیم جریان فوق بحرانی

## ۲-۴- مدل‌سازی کانال دوزنقه‌ای

برای هر یک از حالات مختلف شرایط زیر برای هندسه کانال‌ها در نظر گرفته شده است:

کف کانال با عرض  $1/2$  متر است، زاویه کانال نسبت به افق  $60$  درجه است، طول کانال مدل‌سازی شده  $2$  متر است، مدل‌سازی در سه حالت بحرانی، فوق بحرانی و زیر بحرانی صورت گرفته است. عمق جریان  $0/3$  متر و دبی جریان  $0/67$  مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

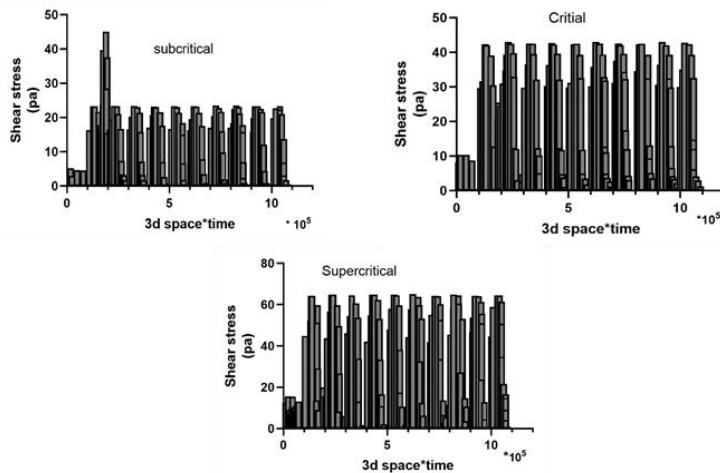
تمامی بلوک‌های محاسبه‌شده به همراه زمان‌های محاسبه لحاظ شده است. در نتیجه میزان تنش‌های ایجادشده در تمامی فرآیند محاسبات در نمودارها نمایش داده شده است. فرآیند تولید نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و MATLAB صورت گرفته است. در شکل (۵) نتایج تنش برشی در کل میدان جریان در تمام زمان مدل‌سازی کانال دوزنقه‌ای نمایش داده شده است. با مقایسه رژیم‌های جریان، میزان تنش در حالت فوق بحرانی بیشترین و رژیم زیربحرانی کمترین مقدار تنش‌ها را درون کانال دوزنقه‌ای داراست.

همچنین شرایط جریان با توجه به عدد فرود و رینولدز در جدول (۵) قابل مشاهده است.

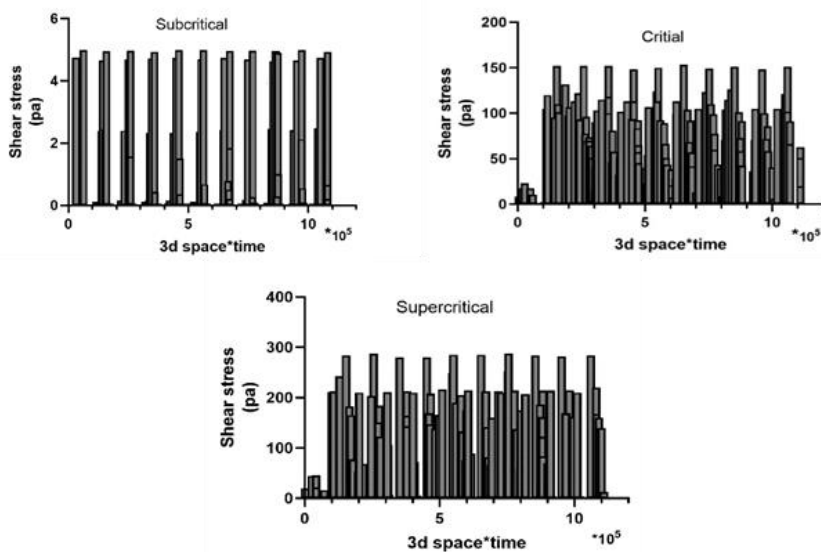
جدول (۵): مشخصات رژیم‌های جریان بررسی شده

نوع رژیم جریان	فوق بحرانی	بحرانی	زیربحرانی
سرعت جریان	۲	۱٫۶۲	۱٫۲
عدد فرود	۱٫۲۵	۱	۰٫۷۴
عدد رینولدز	۵۹۵۵۸	۵۴۶۷۵	۴۳۳۹۲

با توجه به تعداد بلوک‌های محاسباتی و زمان محاسبه، تعداد



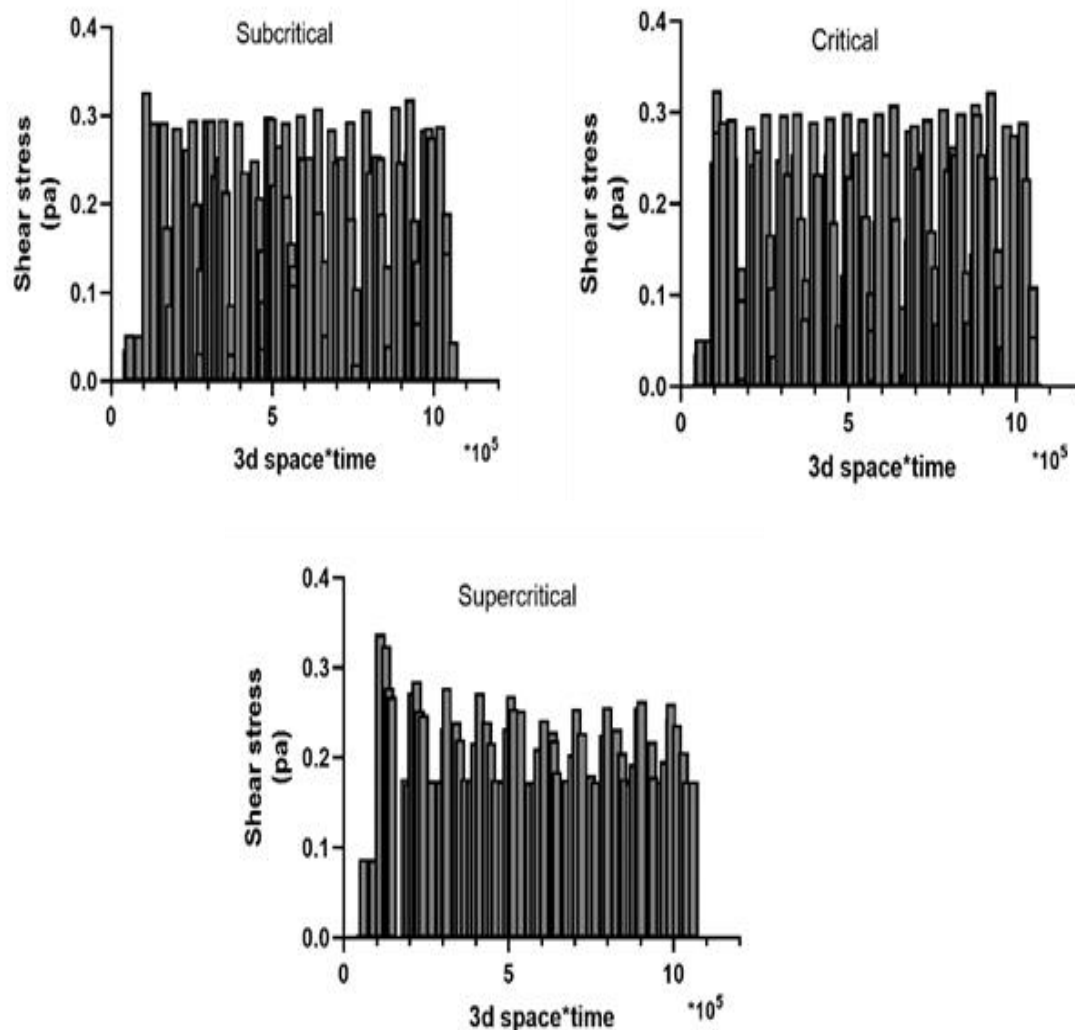
شکل (۵): میزان تنش برشی ایجادشده در میدان حل در هندسه کانال دوزنقه‌ای (الف) رژیم جریان زیربحرانی، (ب) رژیم جریان بحرانی، (ج) رژیم جریان فوق بحرانی



شکل (۶): میزان تنش برشی ایجادشده در میدان حل در هندسه کانال دوزنقه‌ای دارای انحراف (الف) رژیم جریان زیربحرانی، (ب) رژیم جریان بحرانی، (ج) رژیم جریان فوق بحرانی

افت شدیدی را در این حالت نشان می‌دهد. تنش در رژیم جریان زیربحرانی به دلیل تماس بیشتر با سطح کانال بیشترین مقدار تنش را دار است.

در شکل (۷) نتایج تنش برشی در کل میدان جریان در تمام زمان مدل‌سازی کانال ذوزنقه‌ای دارای بستر ریزشی نمایش داده شده است. با توجه به ماهیت جریان در بستر ریزشی، میزان تماس سیال و کانال به کمترین حد خود رسیده و مقدار تنش‌ها



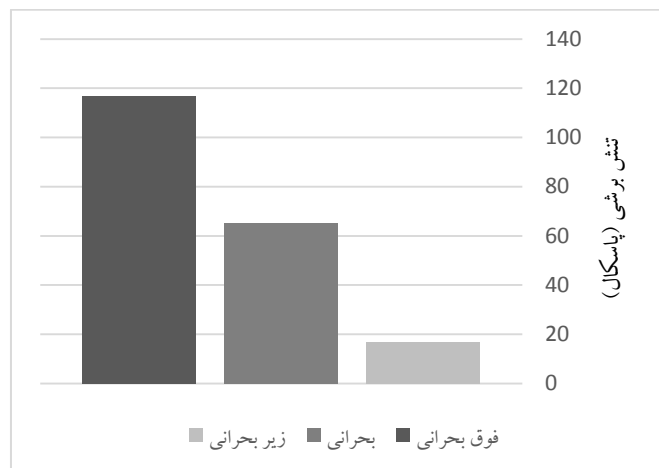
شکل (۷): میزان تنش برشی ایجادشده در میدان حل در هندسه کانال ذوزنقه‌ای دارای انحراف الف) رژیم جریان زیربحرانی. ب) رژیم جریان بحرانی. ج) رژیم جریان فوق بحرانی

جدول (۶): خلاصه نتایج تنش‌های برشی به‌دست‌آمده

نوع رژیم جریان	زیربحرانی	بحرانی	فوق بحرانی
کانال ذوزنقه‌ای با شیب بستر تقریباً افقی	۴۵ پاسکال	۴۲/۸ پاسکال	۶۵ پاسکال
بستر ریزشی	۰/۳۵ پاسکال	۰/۳۳ پاسکال	۰/۳ پاسکال
کانال دارای انحراف	۴/۹ پاسکال	۱۵۲/۳ پاسکال	۲۸۴/۵ پاسکال

به‌طور خلاصه می‌توان در جدول ۶ مقدار تنش‌های برشی برحسب پاسکال به‌دست‌آمده را مشاهده کرد. میزان تماس سیال و کانال به کمترین حد خود رسیده و مقدار تنش‌ها افت شدیدی را در این حالت نشان می‌دهد. تنش در رژیم جریان زیربحرانی به دلیل تماس بیشتر با سطح کانال بیشترین مقدار تنش را دار است. در شکل (۸) مقایسه میانگین تنش برشی ایجادشده با توجه به رژیم جریان در سه هندسه متفاوت قابل‌مشاهده است.

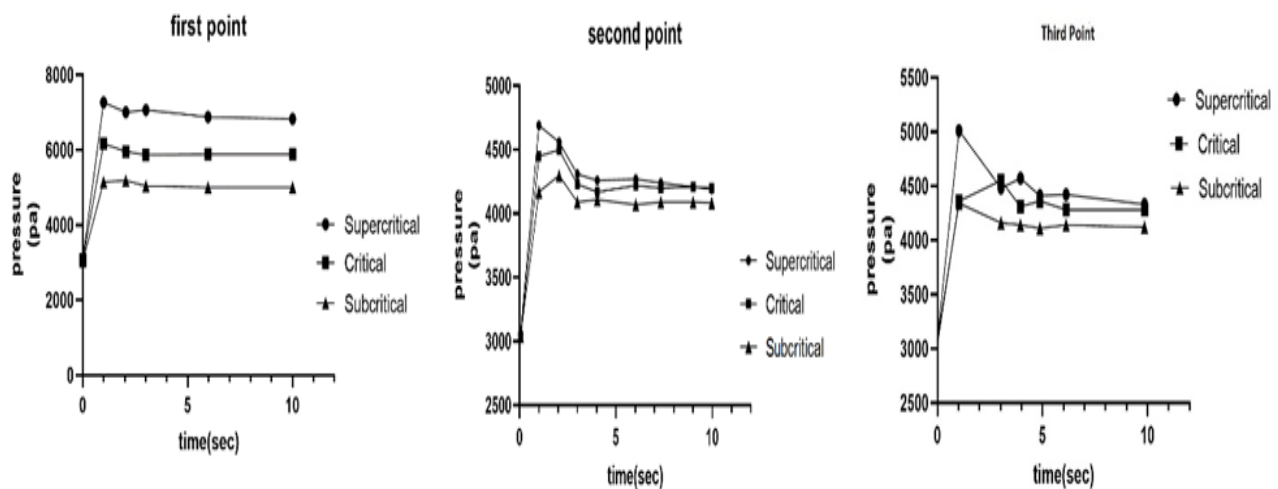




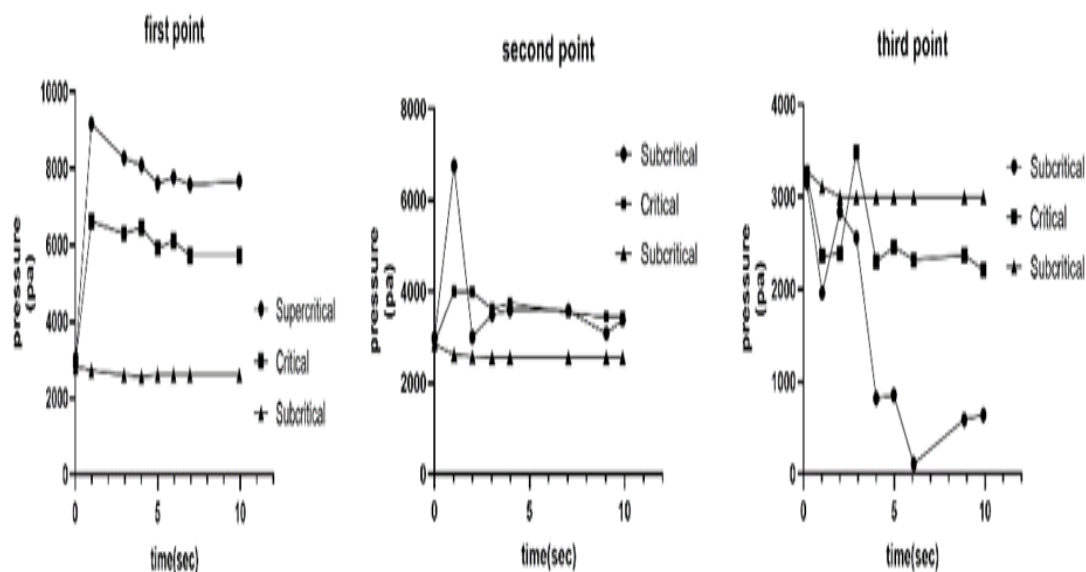
شکل (۸): مقایسه میانگین تنش‌های ایجادشده با توجه به رژیم جریان

قرار گرفته‌اند. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج فشار در سه رژیم جریان مختلف در گره‌های محاسباتی اول، دوم و سوم در کانال دوزنقه‌ای بدون انحراف و کانال دوزنقه‌ای با انحراف است.

برای بررسی نتایج فشار سه گره محاسباتی در ابتدا، انتها و میانه مسیر کانال دوزنقه‌ای بدون انحراف مسیر و دارای انحراف در نظر گرفته شده است. این گره‌ها شامل شرایط زیر هستند: در مسیر جریان قرار دارند اولین گره بعد از کف کانال در نظر گرفته شده‌اند. (در جهت عمق) در جهت عرضی در میانه کانال



شکل (۹): تغییرات فشار در سه گره محاسباتی در کانال دوزنقه‌ای



شکل (۱۰): تغییرات فشار در سه گره محاسباتی در کانال دوزنقه‌ای با انحراف مسیر

بود که در شرایط رژیم فوق بحرانی در کانال دوزنقه‌ای دارای انحراف رخ خواهد داد.

جدول (۷): میزان فشار وارده از سمت سیال بر سطح بتن پارچه‌ای برحسب پاسکال

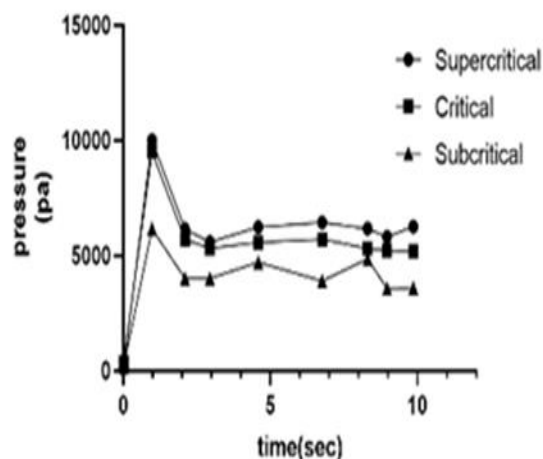
کانال دوزنقه‌ای دارای انحراف	بستر ریزشی	کانال دوزنقه‌ای	هندسه کانال رژیم جریان
۲۸۸۷	۱۹۰۰۲	۵۸۰۱	زیربحرانی
۲۷۳۵۳	۱۴۳۳۱	۸۰۷۴	بحرانی
۴۶۲۸۵	۱۱۷۶۷	۱۰۴۴۹	فوق بحرانی

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کانال‌های روباز دوزنقه‌ای که کاربرد فراوانی در جمع‌آوری رواناب سطحی و انتقال آب‌دارند از نظر تنش‌های برشی و فشار مورد ارزیابی قرار گرفتند. تنش برشی باعث آسیب رساندن به پوشش بتن پارچه‌ای کانال‌های روباز شده و در صورت کنترل نکردن این پدیده تخریب سطح کانال بیشتر از حد مجاز خواهد شد. این پژوهش در سه هندسه مرسوم در کانال‌های روباز و در رژیم‌های مختلف جریان بررسی شده است. به‌طور کلی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- با توجه به رژیم جریان زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی مشاهده شد که میزان تنش برشی ایجادشده در زیربحرانی کمترین مقدار و در جریان فوق بحرانی بیشتری مقدار را خواهد داشت.

شکل (۱۱) بیان‌گر تغییرات فشار در سه رژیم مختلف جریان در کانال با بستر ریزشی است. به دلیل ماهیت هندسه کانال، ۱ گره محاسباتی در محل ریزش جریان جهت بررسی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل (۱۱): تغییرات فشار در سه رژیم مختلف جریان در گره محاسباتی کانال با بستر ریزشی نتایج به‌دست‌آمده برای هر یک از هندسه‌های موردبررسی در سه رژیم مختلف در جدول (۷) نشان داده شده است. این جدول بیان‌گر ماکزیمم فشار ایجاد شده در کل میدان محاسباتی در تمامی زمان محاسبه است. در شرایط موردبررسی بیشترین میزان فشار هیدرو استاتیک وارده بر سطح کانال حدود ۰/۰۴۶ مگا پاسکال خواهد

- [۳] نجفیان شادی، یونسی حجت اله، پارسائی عباس، ترابی پوده حسن، مدل سازی عددی و فیزیکی خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن.
- [۴] اکبریان کاخکی، مجید و محمود فغفور مغربی، ۱۳۹۴، بررسی توزیع تنش برشی در کانال مستطیلی روباز با زبری های نامتقارن، چهاردهمین اجلاس ملی هیدرولیک ایران، زاهدان، گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان
- [۵] اکبریان کاخکی، مجید و محمود فغفور مغربی، ۱۳۹۴، بررسی عددی تأثیر زبری های نامتقارن بر توزیع تنش برشی در کانال مستطیلی رو باز، دومین همایش ملی راهکارهای پیش روی بحران آب در ایران و خاورمیانه، شیراز، مرکز همایش های علمی همایش نگار
- [۶] فیروز قاسم زاده، کتاب شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW 3D، انتشارات نوآور، تهران، ۱۳۹۷
- [۷] نشریه ۱۶۶، معیارهای هیدرولیکی طراحی کانالهای آبیاری و زهکشی روباز، ۱۳۷۶
- [8] Chanson, H., 2004. *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier.
- [9] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H., 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of hydraulic research*, 27(1), pp.149-173.
- [10] Knight, D.W. and Sterling, M., 2000. Boundary shear in circular pipes running partially full. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), pp.263-275.
- [11] Knight, D.W., Demetriou, J.D. and Hamed, M.E., 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Journal of hydraulic engineering*, 110(4), pp.405-422.
- [12] Khodashenas, S.R., Abderrezzak, K.E.K. and Paquier, A., 2008. Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods. *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), pp.598-609.
- [13] Wilcock, P.R., 1996. Estimating local bed shear stress from velocity observations. *Water Resources Research*, 32(11), pp.3361-3366.
- [14] Pope, N.D., Widdows, J. and Brinsley, M.D., 2006. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—a comparison of annular flume and field data. *Continental Shelf Research*, 26(8), pp.959-970.
- [15] Parsaie, A., Haghbi, A. H. and Moradinejad, A. 2015. CFD modeling of flow pattern in spillway's approach channel Sustainable. *Water Resour. Manage.* 1, 245-251.
- [16] Chow, V. T., (1959), *Open Channel Hydraulic*, McGraw-Hill, New York.
- ۲- با بررسی هندسه کانال‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در کانال‌هایی که در طول مسیر دارای انحراف و تغییر جهت‌های شدید هستند، تنش برشی در آن‌ها افزایش چشمگیری داشته است. ماکزیمم تنش ایجاد شده در هر ۹ حالت بررسی شده مربوط به مورد فوق بحرانی در کانال دارای انحراف است. این میزان حدود ۴٫۵ برابر بیشتر از کانال دوزنقه‌ای بدون انحراف مسیر است.
- ۱- با توجه بررسی هندسه کانال‌ها، هندسه دارای تغییر ارتفاع در کف کانال میزان کمتری از تنش برشی را تجربه می‌کند. دلیل این امر تماس کمتر جریان با بستر و پلکان بستر کانال است.
- ۲- فشار ماکزیمم در هر سه هندسه مختلف در جریان فوق بحرانی رخ خواهد داد. این امر تأیید کننده تأثیر سرعت بر روی فشار خواهد بود. همچنین ماکزیمم فشار در کانال‌های دارای انحراف رخ خواهد داد. لازم است تا جهت انحراف کانال حداقل ضوابط در این مورد لحاظ شود.
- ۳- با توجه به مراجع مربوط به طراحی هیدرولیکی کانال‌های روباز، تغییر کوچک انرژی مخصوص در نزدیکی نقطه بحرانی، تفاوت بین عمق‌های جایگزین را به شدت زیاد می‌کند. همین امر، موجب نوسان شدید در سطح آب خواهد شد. بنابراین، در طراحی کانال‌های روباز، باید حتی‌الامکان از این ناحیه فاصله گرفت. همچنین طبق مراجع و نشریات کانال‌های هیدرولیک روباز، بهترین حالت جریان در حالت زیربحرانی با محدوده عدد فرود ۰٫۸ مدنظر خواهد بود.

## ۶- مراجع

- [۱] غلام عباس بارانی، هیدرولیک کانال‌های روباز، انتشارات دانشگاه شهید باهنر (کرمان)، شهریور، ۱۳۹۲
- [۲] بهادری، شیما و بهداروندی عسکر، ۲۰۱۶. بررسی اثر عمق نسبی و زبری نسبی بر انتقال ممتنم عرضی در کانال مرکب مستطیلی متقارن با نسبت عرض‌های مختلف... پژوهش‌های کاربردی علوم آب، ۱(۲)، pp.59-68.

# Investigating the effect of flow regime and channel geometry on shear stress and pressure in trapezoidal open channels

Mohammad Reza Jalili Ghazizadeh\*, Saeed Ahmadi, Mohammad Mahdi Kermani Najad

\*Associate Professor, Shahid beheshti University, Tehran, Iran

## Abstrac

The increasing use of manufactured materials in construction projects has accelerated. One of these products used to cover water channels is concrete canvas. The flow of water in the channel creates a force in the direction of water movement on the surface of the channel bed. This force creates shear stress on the moistened surface of the channel. Tensions are very important because it will cause water to wash away and damage the lining of the canals. Also, hydrostatic pressure is another type of force that exists in open channels and enters the surface of the channels. In this research, first, the flows of open channels in the trapezoidal section are simulated under 9 scenarios, which include 3 common channel geometries in the state of a straight path, a path with curvature and deviation, and finally, a channel path with a change in height at the bottom of the channel. In each of the cases, 3 different flow regimes have been investigated along with flow turbulence modeling to calculate the shear stresses. This work has been done using FLOW-3D software and Matlab and Excel peripherals. To check the pressure, three computational nodes have been used along the channel and the results have been analyzed in each flow regime. The results show that by changing the flow regime to the supercritical state, the amount of shear stress created in the bottom and wall of the channel increases. Also, the deviation in the path of the channel causes a significant growth of the shear stress in the trapezoidal open channel.

**Keywords:** Concrete canvas, Open channel, trapezoidal channel, channel geometry, shear stress, flow regimes, FLOW-3D