

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رسول اکرم ﷺ: اعلم الناس من جمع علم الناس الى العلمه؛
داناترين مردم کسی است که دانش ديگران را به دانش خود بيفزايد.



10th National Congress
on Civil Engineering

April 19-20, 2017
Tehran - Iran



دهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۳۰ و ۳۱ فروردین ماه ۱۳۹۶
تهران - ایران

گواهی ارائه مقاله



شناسه مقاله: W019

نویسنده(ها): سیدسعید قاسمی نژاد، محمدرضا جعفرزاده

عنوان مقاله: حل عددی یک بعدی جریان های گلی با استفاده از روش های با قدرت تفکیک بالا

ضمن تشکر و قدردانی از نویسندگان (های) محترم، گواهی می شود مقاله با مشخصات فوق از سوی کمیته علمی کنگره پذیرش

گردیده و در دهمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف ارائه و در مجموعه مقالات منتشر شده است.

علی بخشی
دبیر کنگره



مطالعه عددی یک‌بعدی جریان های گلی با استفاده از روش های با قدرت تفکیک بالا

سید سعید قاسمی نژاد^۱، محمدرضا جعفرزاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- مهندسی آب، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

* مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد

jafarzad@um.ac.ir

خلاصه

حرکت جریان گلی با سطح آزاد بر بستر شیبدار با مدل عددی یک بعدی معادلات آبهای کم عمق شبیه سازی میشود. رفتار جریان گلی که از جمله سیالات ویسکوپلاستیک است با استفاده از فرضیات مدل های هرشل-بالکلی و بینگهام بررسی می شود. معادلات آبهای کم عمق با استفاده از روش-های حجم محدود با قدرت تفکیک بالا حل میشوند. مقایسه پروفیل جریان با داده های مختلف آزمایشگاهی بسیار رضایت بخش است. مطالعه پارامترهای رئولوژیکی جریان گلی نشان داد که برای مدل هرشل-بالکلی در صورتی که توان نرخ کرنش برشی کمتر از یک گردد ($n < 1$)، طول رانش توده سیال هرشل-بالکلی در ابتدا نسبت به سیال بینگهام (با نرخ کرنش برشی یک) بیشتر و عمق آن کمتر است، اما با گذشت زمان طول پیشروی سیال بینگهام افزایش یافته، ارتفاع پیشانی آن نسبت به سیال هرشل-بالکلی کاهش می یابد. با افزایش تنش تسلیم برشی، طول پیشروی کاهش می یابد ولی عمق آن افزایش پیدا میکند. طول پیشروی سیال نیوتنی بیشتر از سیال هرشل-بالکلی است ولی عمق آن بغیر از پیشانی جریان کمتر می شود. همچنین با افزایش پارامتر K و کاهش چگالی جرمی، طول پیشروی توده گلی کاهش پیدا میکند و عمق جریان افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: جریان گلی، روش های با قدرت تفکیک بالا، سیال هرشل-بالکلی، مدل سازی عددی

۱- مقدمه

جریان با غلظت بالای رسوب^۱ به جریانی گفته می شود که مقدار زیادی رسوب حمل کند و میزان بالای رسوبات حمل شده توسط جریان بر زبری هیدرولیکی آن تاثیر قابل توجهی داشته باشد. جریان های رسوبی بسیار غلیظ به جریان های واریزه ای، سیلاب گلی و جریان های گلی طبقه بندی میشوند [1]:
جریان واریزه ای^۲: به جریانی اطلاق می شود که ۷۰ تا ۹۰ درصد وزن مواد جامد آن شامل ذرات درشت دانه مانند قلوه سنگ، سنگ خرد شده (حتی با قطر بیش از ۲ متر) و بعضاً تنه درخت می باشد [2]. سیلاب گلی^۳: جریانی است که از ذرات غیرچسبنده (مانند ماسه) تشکیل شده است. سیلاب های گلی مخصوصاً برای غلظت های رسوبی تا ۴۰٪ اغلب آشفته هستند. در این جریان ها مقاومت به زبری جداره بستگی دارد. نقطه ای که مواد گل آلود شروع به سیلان می کند، به اندازه دانه و مقدار آب آن بستگی دارد [3].

جریان گلی^۴: یک نوع از جریان های بسیار غلیظ چندفازی حاوی حداقل ۵۰٪ رسوبات گل و لای و رس است. این نوع جریان به علت بارش باران شدید، خزیدن ناشی از رانش زمین، شکست سد در بستر شیبدار و فعالیت های انسانی به وجود می آید [3]. برخی جریان های گلی بسیار لزج و کند هستند و برخی دیگر مانند یک بهمن به سرعت شروع به حرکت می کنند. اگر جریان های گلی به اندازه کافی بزرگ باشند، روستاهای واقع در مسیرشان را نابود می کنند [4]. احتمال دارد این نوع جریان ها پس از بارندگی در مناطق کوهستانی، آتشفشانی و یا نیمه خشک اتفاق بیافتند. جریان

¹Hyperconcentrated sediment flows

²Debris flow

³Mud flood

⁴Mud flow



خروجی از لوله تخلیه یک لایروب و یا دریچه تحتانی سدهای بلند به هنگام فلاشینگ نیز ممکن است از نوع جریان‌های گلی باشد. جریان‌های گلی غالباً همراه با خسارات جانی و مالی فراوانی هستند. از لحاظ مهندسی بررسی و پیش بینی حداکثر طول پیشروی جریان گلی، سرعت پیشانی جریان و نهایتاً شکل نهانی و ضخامت توده گلی ته‌نشین شده حائز اهمیت می‌باشد. خواص رئولوژیکی جریان‌های گلی و واریزه‌ای به عوامل متفاوتی نظیر غلظت مواد جامد معلق، خاصیت چسبندگی، توزیع دانه بندی، شکل دانه‌ها، اصطکاک دانه‌ای و فشار حفره‌ای بستگی دارد [5]. از جمله ویژگی‌های جریان گلی می‌توان به چسبندگی زیاد (تنش تسلیم بالا)، غلظت بالای گل و رس، سرعت کم، عمق زیاد جریان، عدد فرود پایین و ذرات بدون سایندگی اشاره کرد [3].

کاستا و ویلیوز^۱ و نیز والا^۲ اولین نفراتی بودند که مشاهدات میدانی و ویدئویی جریان گلی را ثبت و ضبط کردند. معادلات آبهای کم عمق در مورد امواج سینماتیکی برای جریان‌های واریزه‌ای توسط تاکاهاشی^۳، میزویاما^۴، ابرین و ژولین^۵، آراتانو و سوج^۶ بدست آمد. رفتار یک سیال نازک بینگهام که از جمله سیالات هرشل-بالکلی به حساب می‌آید بر روی یک سطح شیبدار توسط لی و یو^۷ مدل گردید. جویسون^۸ بیشترین تحقیقات مدلسازی سیالات ویسکوپلاستیک بینگهام را انجام داد. تاثیرات خاک و آشفته‌گی جریان یک جریان دانه‌ای و لزج در سیالات نیوتنی توسط ابرین و ژولین ارائه شد [6]. هانت^۹ دریافت که جریان‌های گلی یا واریزه‌ای لزج در ناحیه آرام قرار دارند [5]. کاست^{۱۰} رابطه بین جریان گلی طبیعی و سیال هرشل-بالکلی را با استفاده از پارامترهای بی بعد به دست آورد، وی همچنین عبارت اصطکاک دیواره در جریان‌های یکنواخت ماندگار در یک کانال آزمایشگاهی را تخمین زد. تنش برشی اصطکاک توسط ویلا^{۱۱} در جریان‌های ناپایدار معادلات آبهای کم عمق مدلسازی عددی شد [6]. در این مقاله، مسئله شکست سد برای یک توده مشخص گلی بر سطح شیبدار بر مبنای مدل بینگهام، با استفاده از روش‌های عددی با قدرت تفکیک بالا^{۱۲} بررسی می‌شود و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه می‌گردد. در این تحلیل معادلات حاکمه بر اساس مدل هرشل-بالکلی نوشته می‌شود. آن‌گاه با تغییر خواص توده سیال و پارامترهای رئولوژیکی هرشل-بالکلی، میزان طول پیشروی و ارتفاع جریان گلی مطالعه می‌گردد.

۲- معادلات حاکمه

در حالت کلی تنش برشی برای سیالات ویسکوپلاستیک از رابطه هرشل-بالکلی بدست می‌آید: [7]

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$ نرخ کرنش برشی، $\tau_y =$ تنش برشی تسلیم، بر حسب پاسکال و n و K [pa.sⁿ] پارامترهای مدل می‌باشند. برای $n=1$ ، $K = \mu$ و $\tau_y = 0$ سیال از نوع نیوتنی است. μ لزجت دینامیکی سیال نیوتنی است، برای $n=1$ ، $K = \mu_1$ و $\tau_y \neq 0$ سیال از نوع بینگهام و برای $n < 1$ ، $K = \mu_n$ و $\tau_y \neq 0$ سیال از نوع هرشل-بالکلی است. در شکل (۱) رابطه تنش برشی با نرخ کرنش برشی برای سیالات نیوتنی، بینگهام و هرشل-بالکلی مقایسه شده‌اند.

¹ Casta and Williwos

² Valla

³ Takahashi

⁴ Mizuyama

⁵ O'Brien and Julien

⁶ Arattano and Savage

⁷ Liu and Mei

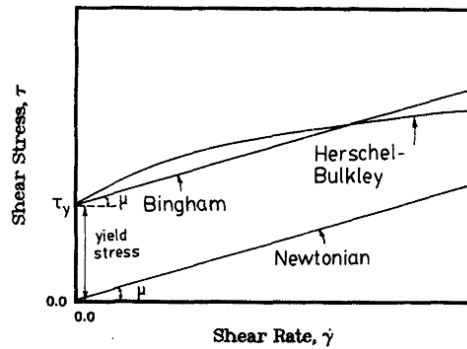
⁸ Johison

⁹ Hunt

¹⁰ Coussot

¹¹ Vila

¹² High-Resolution Methods



شکل (۱) - رفتار سیال ویسکوپلاستیک در جریان برشی و تعریف تنش برشی تسلیم.

معادلات آبهای کم عمق، با فرض اولیه توزیع فشار هیدرواستاتیک و سیال غیر قابل تراکم، از متوسط گیری در عمق معادلات سه بعدی ناویر-استوکس حاصل می شود. این معادلات برای مطالعه بسیاری از پدیده ها از جمله شکست سد و جریان در کانال های روباز به کار می روند. شکل بقای معادلات آبهای کم عمق برای جریان های گلی توسط برگر ارائه شد: [8]

$$\left[\begin{array}{c} h \\ hu \end{array} \right]_t + \left[\begin{array}{c} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \cos(i) \end{array} \right]_x = \left[\begin{array}{c} 0 \\ gh \sin(i) - F \end{array} \right] \quad (2)$$

h = عمق جریان [m]، u = سرعت متوسط گیری شده در عمق، [m/s]، g = شتاب جاذبه، [m/s²]، i = شیب بستر کانال و F = مقاومت اصطکاکی در یک مقطع عرضی، [m³/s²] است. برای مسئله ای با شرایط مرزی و اولیه معلوم و همچنین با مشخص بودن هیدرولیک کانال، در معادله (۲) تنها عبارت مقاومت اصطکاکی ناشناخته است. این مقاومت برای یک سیال ویسکوپلاستیک از یکی از روابط زیر تخمین زده میشود.

الف) رابطه کاست [9]

$$F = \frac{\tau_p}{\rho} \chi \quad (3-الف)$$

$$\tau_p = \tau_y [1 + a(Hb)^{-0.9}] \quad , \quad Hb = \frac{\tau_y}{K} \left(\frac{h}{u} \right)^n \quad (3-ب)$$

τ_p = تنش برشی بدنه [pa]، χ = محیط خیس شده [m]، ρ = چگالی سیال [kg/m³]، a = مقدار ثابت، برای صفحه پهن نامحدود $a = 1/93$ و برای کانال مستطیلی $a = 1.93 - 0.43 \text{Arctan} \left[\left(\frac{10h}{u} \right)^{20} \right]$ در نظر گرفته می شود و Hb عدد بی بعد برای یک سیال هرشل-بالکلی است.

ب) رابطه ضمنی آنسی و همکاران [10]

$$F = \frac{\tau_b}{\rho} \quad (4)$$

τ_b = تنش برشی در بدنه کانال [pa] و برای سیال رنولوزیکی هرشل-بالکلی از رابطه زیر بصورت سعی و خطا بدست می آید:

$$\left(\frac{\mu_n}{\tau_y} \right)^{1/n} \frac{2n+1}{n} \frac{u}{h} = \left(\frac{\tau_b}{\tau_y} \right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{\tau_y}{\tau_b} \right)^{1+\frac{1}{n}} \left(1 + \frac{n}{n+1} \frac{\tau_y}{\tau_b} \right) \quad (5)$$

۲-۱- خطی سازی معادلات جریان های گلی به روش Roe :

برای خطی سازی معادلات جریان های گلی شکل غیربقای رابطه (۲) نوشته میشود

¹conservative

²Linearization

$$\begin{bmatrix} h \\ hu \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -u^2 + gh \cos(i) & 2u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ hu \end{bmatrix}_x = \begin{bmatrix} 0 \\ gh \sin(i) - F \end{bmatrix} \quad (6)$$

ماتریس ژاکوبین غیرخطی معادله (۶) عبارت است از:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -u^2 + gh \cos(i) & 2u \end{bmatrix} \quad (7)$$

در روش Roe ماتریس ژاکوبین A خطی سازی شده به شکل ماتریس $\hat{A}_{i-1/2}$ در هر وجه $i-1/2$ از یک سلول حجم محدود \hat{i} با ضرایب ثابت نوشته می شود [11].

$$\hat{A}_{i-1/2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\hat{u}^2 + g\bar{h} & 2\hat{u} \end{bmatrix}, \bar{h} = \frac{1}{2}(h_{i-1} + h_i), \hat{u} = \frac{\sqrt{h_{i-1}}u_{i-1} + \sqrt{h_i}u_i}{\sqrt{h_{i-1}} + \sqrt{h_i}} \quad (8)$$

\hat{u} و \bar{h} میانگین های Roe برای عمق و سرعت جریان نامیده می شوند.

۳- روش عددی

معادلات خطی سازی شده Roe با روش حجم محدود با قدرت تفکیک بالا حل میشود. این روش فلاکس عددی با محدود کننده مناسب طوری نوشته میشود که مدل اصطلاحاً کاهش دهنده مجموع تغییرات^۱ یا TVD باشد. از مزایای این روش از بین رفتن نوسانات در پیشانی امواج تیز می باشد. در تحقیق حاضر از محدود کننده Van Leer استفاده شده است. گام زمانی Δt از رابطه زیر بدست می آید: [11]

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{\max(u + c)} \quad (9)$$

برای پایداری باید ضریب CFL یا عدد کورانت کوچکتر از یک انتخاب شود. Δx = فاصله مکانی سلولها، c = سرعت موج در هر سلول، m/s و u = سرعت سیال در هر سلول، m/s میباشد. جمله چشمه $S_i^n = \begin{bmatrix} 0 \\ gh_i^n \sin(i) - F_i^n \end{bmatrix}$ در هر سلول حساب میشود [11]. عبارت اصطکاک F_i^n از روابط (۳-الف) و (۳-ب) بدست می آید.

۴- ارزیابی مدل

به منظور صحت سنجی، نتایج مدل عددی با داده های آزمایشگاهی رایت و کرون [12] و هانگ و گارسیا [13] مقایسه می شود.

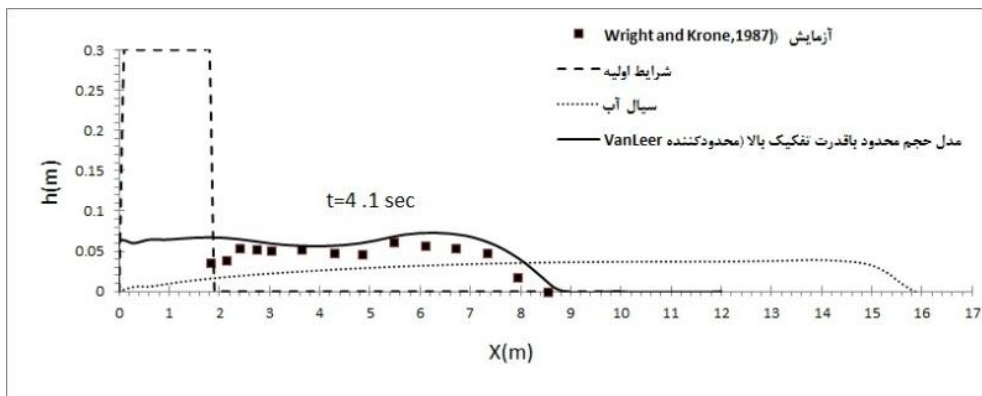
۴-۱- آزمایش رایت و کرون [12]

در این آزمایش چگونگی انتشار دوغاب بنتونیت رها شده از یک مخزن مستطیلی به عرض ۰/۶، طول ۱/۸ و عمق ۰/۳ متر در بالادست یک دریچه، به فلومی با شیب کف $i = 0.06$ بررسی می شود. سیال غیرنیوتنی با جرم حجمی $\rho = 1073 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ، تنش تسلیم $\tau_y = 42/5 \text{ [pa]}$ و نرخ کرنش مرجع $\dot{\gamma}_K = 193/2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ با فرض $n=1$ می باشد.

در مدل عددی، فاصله مکانی ۰/۱ متر و گام زمانی از رابطه (۹) بدست می آید. لبه تیز موج عددی با فرض مسئله شکست سد بر بستر خشک اصلاح می شود [14]، پروفیل عمق جریان اندازه گیری شده در آزمایشگاه در زمان $t = 4/1 \text{ s}$ با مدل عددی در شکل (۲) مقایسه شده است. نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی سازگار است. علی الخصوص، لبه موج بخوبی شبیه سازی شده است. مرز بالادست مانع پیشروی سیال بطرف بالا میشود. این مسئله برای آب که یک سیال نیوتنی است نیز حل شد. نتایج در همان شکل ترسیم شده است. طول پیشروی آب در زمان مشخص بیشتر و عمق آن کمتر از سیال ویسکوپلاستیک است. عمق آب در بالادست به صفر رسیده است در حالیکه سیال گلی در حدود ۲۵ درصد عمق اولیه را دارد.

¹ Total Variation Diminishing

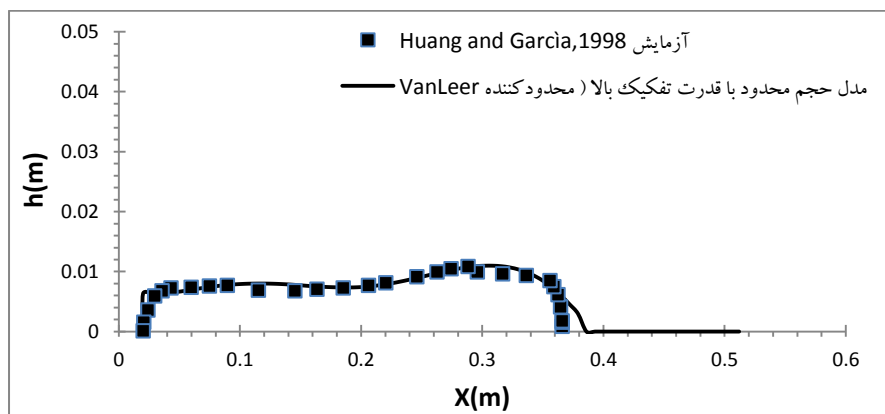
² Wright and Krone, 1987



شکل (۲) - مقایسه نتایج داده های آزمایشگاهی با مدل عددی

۴-۲- آزمایش هانگ و گارسیا^۱ [13]

هانگ و گارسیا جریان سیال گلی با جرم حجمی $\rho = 1348 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ، تنش تسلیم برشی $\tau_y = 14/1 \text{ [pa]}$ ، ضریب لزجت دینامیکی $K = 10/2 \text{ [pa.s}^{0.34}\text{]}$ و $n = 0/34$ را در یک کانال آزمایشگاهی به عرض $0/3$ و طول 1 متر با شیب $18/5$ درجه مطالعه کردند. در فاصله $0/1$ متری از ابتدای کانال یک دریچه قرار داشت که عمق سیال در پشت آن برابر $0/0484$ متر و در ابتدای کانال برابر $0/1$ متر با حجمی برابر $8/76 \text{ cm}^3$ بود. عمق سیال در پایین دست دریچه برابر $0/003$ متر فرض شد (بستر خشک). زمان آزمایش پس از باز شدن دریچه برابر $0/3$ ثانیه بود. این مسئله با مدل عددی ارائه شده در بخش قبل شبیه سازی شد. در این مدل فاصله مکانی $0/007$ متر فرض شد و فاصله زمانی از رابطه (۹) بدست آمد. در شکل (۳) داده های آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی مقایسه شده اند. پروفیل عددی بدست آمده سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایش دارد هر چند که پیشانی موج عددی کمی جلوتر تخمین زده شده است.



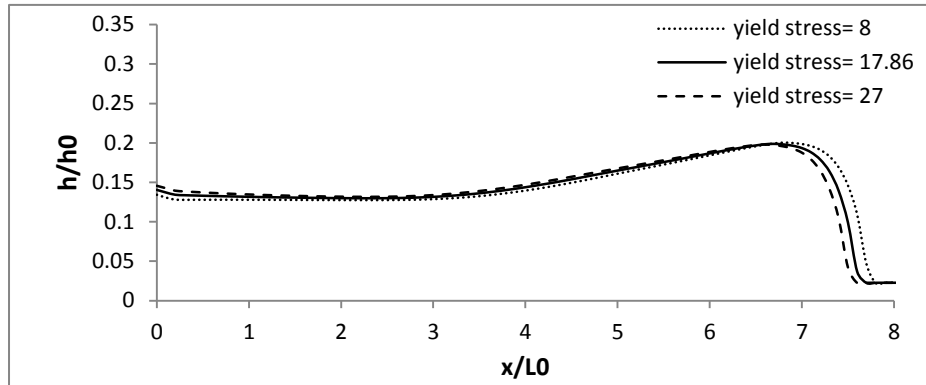
شکل (۳) - مقایسه نتایج داده های آزمایشگاهی با مدل عددی

۵- بررسی تاثیر پارامترهای رئولوژیک بر رانش توده جریان گلی

مشخصات رانش توده جریان گلی مانند طول، پروفیل و سرعت پیشانی جریان به پارامترهای مختلفی همانند حجم توده، خواص رئولوژیکی سیال و شیب بستر بستگی دارد. ابعاد کانال مطابق بخش (۴-۲) فرض شد اما شیب کف $0/17$ ، عمق اولیه پشت دریچه (بالادست) $0/22$ متر و عمق پایین دست دریچه $0/06$ متر در نظر گرفته شد. به جهت پیش بینی حرکت جریان در زمانهای زیاد به طول کانال در محاسبات عددی اضافه شد. برای ارزیابی تاثیر تغییرات این پارامترها بر مشخصات رانش از سیالی با خصوصیات زیر استفاده شد.
سیال گلی با طول اولیه، $L_0 = 0/1 \text{ m}$ و حجم بر واحد عرض $A_0 = 0/022 \text{ m}^2$ در پشت دریچه با جرم حجمی $\rho = 1365 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ، تنش تسلیم برشی $\tau_y = 17/86 \text{ [pa]}$ ، ضریب لزجت دینامیکی، $K = 21/3 \text{ [pa.s}^n\text{]}$ فرض شد.

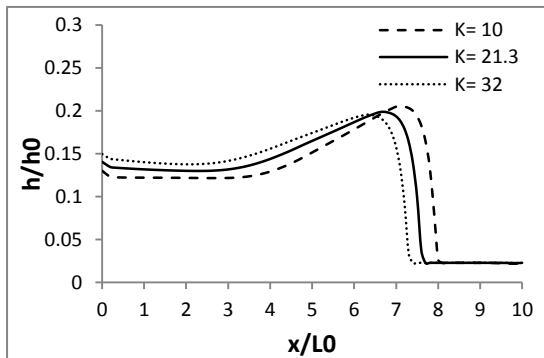
¹Huang and Garcia, 1998

در تحقیق حاضر مشخصه‌های هندسی و دینامیکی سیال به صورت h/h_0 ، x/L_0 و u/U_0 با فرض طول اولیه سیال $L_0 = 0.1$ m، عمق حداکثر در بالادست $h_0 = 0.22$ m و سرعت مقیاس $U_0 = \sqrt{g\sqrt{A_0}} = 1.2$ m/s بی‌بعد شدند [15].
در شکل (۴) حرکت توده سیال گلی هرشل-بالکلی با $n=0.7$ به‌ازای تنش تسلیم در حدود ۵۰ درصد کمتر $\tau_y = 8$ [pa] و ۵۰ درصد بیشتر $\tau_y = 27$ [pa] در زمان ۲ ثانیه نشان داده شده‌است. با افزایش تنش تسلیم طول پیشروی کاهش می‌یابد و متقابلاً عمق جریان کمی افزایش پیدا می‌کند.

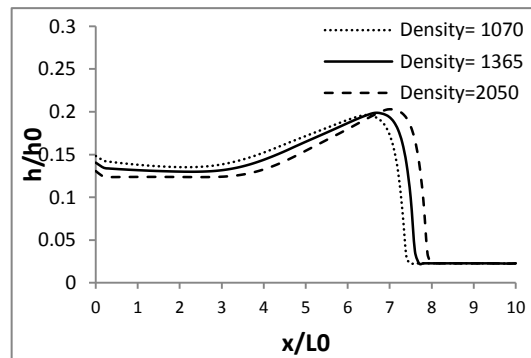


شکل(۴)- مقایسه طول پیشروی و ارتفاع جریان گلی به ازای تنش برشی تسلیم متفاوت

در شکل ۵ - الف تغییرات عمق جریان در امتداد کانال برای سیال با چگالی های جرمی در حدود ۲۰ درصد کمتر از سیال مفروض $\rho = 1070$ [kg/m³] و ۵۰ درصد بیشتر $\rho = 2050$ [kg/m³] ترسیم شده‌است. با افزایش چگالی جرمی پیشانی موج سیال سنگین، جلو می‌افتد. در شکل ۵ - ب تغییرات عمق جریان برای سیال با ضرایب لزجت دینامیکی در حدود ۵۰ درصد کمتر از سیال مفروض $K = 10$ [pa.s^{0.7}] و ۵۰ درصد بیشتر $K = 32$ [pa.s^{0.7}] نشان داده شده‌است. با افزایش پارامتر K طول پیشروی توده گلی کاهش پیدا می‌کند و عمق جریان افزایش می‌یابد.



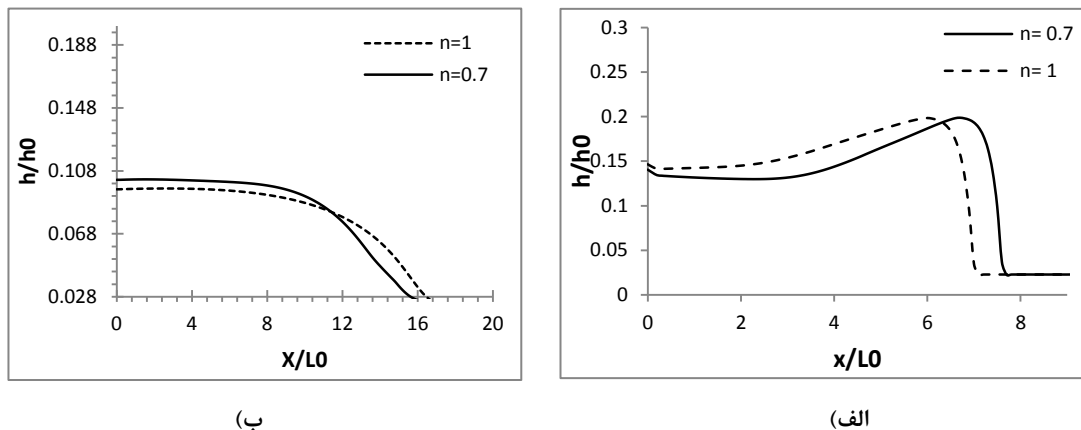
(ب)



(الف)

شکل(۵)- مقایسه طول پیشروی و ارتفاع جریان گلی برای سیال با چگالی جرمی و ضرایب لزجت دینامیکی متفاوت

در شکل‌های ۶ - الف و ۶ - ب، پروفیل طولی جریان برای سیال هرشل-بالکلی با $n=0.7$ و سیال بینگهام ($n=1$) بترتیب در زمانهای $t = 2s$ و $t = 170s$ از آغاز آزمایش ترسیم شده‌است. پروفیل اولیه مستطیل شکل و مشابه قبل است. در اوایل حرکت ($t = 2s$) طول رانش توده سیال هرشل-بالکلی نسبت به مدل بینگهام بیشتر و عمق آن کمتر است اما با گذشت زمان ($t = 170s$) طول پیشروی سیال بینگهام افزایش یافته، ارتفاع پیشانی آن نسبت به سیال هرشل-بالکلی کاهش می‌یابد.



شکل (۶) - مقایسه شکل و طول رانش بدست آمده از مدل‌های بینگهام و Herschel-Bulkley: (الف) بعد از ۲ ثانیه، (ب) بعد از ۱۷۰ ثانیه

۶- نتیجه‌گیری

حرکت یک بعدی جریان ناماندگار بر شیب برای سیالات با خواص رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی با استفاده از معادلات بقای جرم و مومنت مطالعه شد. معادلات مذکور با استفاده از روش‌های عددی با قدرت تفکیک بالا حل شد. به منظور صحت سنجی مدل عددی، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی رایت و کرون (۱۹۸۷) و هانگ و گارسیا (۱۹۹۸) ارزیابی شد و صحت مدل بکار رفته تأیید گردید. در یک مطالعه پارامتری رفتار مدل سیال هرشل-بالکلی و بینگهام مقایسه شد. در ابتدا طول رانش توده سیال هرشل-بالکلی نسبت به مدل بینگهام بیشتر و عمق آن کمتر است اما با گذشت زمان طول پیشروی سیال بینگهام افزایش یافته، ارتفاع پیشانی آن نسبت به سیال هرشل-بالکلی کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از سیال نیوتنی طول رانش بیشتر و عمق آن (بغیر از ناحیه پیشانی) کمتر از سیال ویسکو پلاستیک خواهد شد. مدل هرشل-بالکلی به ازای تنش‌های برشی تسلیم متفاوت ارزیابی شد. با افزایش تنش برشی تسلیم، طول رانش کاهش و عمق جریان (مخصوصاً در پیشانی) افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی جرمی پیشانی موج سیال سنگین جلو می‌افتد. با افزایش پارامتر K طول پیشروی توده گلی کاهش و عمق جریان افزایش پیدا می‌کند.

۷- مراجع

- [1]: Julien, P.Y, Paris, A. (2010), "Mean Velocity of Mudflows and Debris Flows". J. Hydraul. Eng., ASCE Vol. 136, No. 9, pp:676-679.
- [2]: Walling, D.E, Davvies, T.R., and Hasholt, B. (1992), "Erosion, Debris flows and Environment in Mountain Regions". Proceedings of the International Symposium held at Chengdu, China, pp:217-227.
- [3]: Julien, P.Y and Leon, C. (2000) "Mudfloods, mudflows and debris flows - classification, rheology and structural design", Invited paper at the International Workshop on Mudflows and debris flows, Caracas, Venezuela.
- [4]: Hungr, O, Leroueil, S, Picarelli, L. (2014). "The Varnes classification of landslide types". Landslides 11 (2)-pp: 167-194.
- [5]: Hunt, B. (1994). "Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches." J. Hydraul. Eng, ASCE, 120(12), pp: 1350-1363.
- [6]: Laigle, D., and Coussot, P. (1997). "Numerical modeling of mudflows." J. Hydraul. Eng., 123(7), pp: 617-623.



- [7]: Herschel, W. H. and Bulkley, R. (1926), "*Konsistenzmessungen von Gummi-Benzol-Lösungen*", Kolloid Z. 39, pp: 291-300 .
- [8]: Berger. R. C. (1994). "*Strengths and weaknesses of shallow water equations in steep open channel flow.*" Proc ., 1994 Conf. on Hydraul. Eng., G. V. Cotroneo and R. R. Rumer, eds., pp: 1257-1261.
- [9]: Coussot, P. (1992). "*Rheologie des laves torrentielles.*" PhD thesis. Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble. France.
- [10]: Ancey, C. Andreini, N. Epely-Chauvin, G. (2012). "*Viscoplastic dambreak waves: Review of simple computational approaches and comparison with experiments*". Adv Water Resour 48, pp:79–91.
- [11]: LeVeque, R. V. (2004), "*Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*", Published by the press syndicate of the University of Cambridge.
- [12]: Wright, V., and Krone, R. B. (1987). "*Laboratory and numerical study of mud and debris flow.*" Rep. 1 and 2, Dept. of Civ. Eng., University of California, Davis, Calif.
- [13]: Huang X, Garcia M. H., (1998). "*A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope*". J Fluid Mech 374, pp:305–333.
- [14]: Toro, E. F. (Copyright 2001), "*Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*". Manchester metropolitan University, UK.
- [15]: Imran, J. Parker, G. Locat, J. Lee, H. (2001), "*1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows*". J. Hydr. Engrg., ASCE Vol. 127, pp: 959-968.