

## مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ نمکی تحت تأثیر پوشش گیاهی

آتنا خلیلی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل اکبرپور<sup>۲</sup>، حسین خزیمه نژاد<sup>۳</sup> و پیمان ورجاوند<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> - نویسنده مسئول، دانش آموخته کارشناسی ارشد منابع آب دانشگاه بیرجند

<sup>۲</sup> - دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه بیرجند

<sup>۳</sup> - استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند

<sup>۴</sup> - استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۱۵

### چکیده

جریان غلیظ از مهم‌ترین عوامل در رسوب‌گذاری است که باعث انتقال رسوبات به نزدیکی بدنه سد می‌شود. لذا شناخت این جریان و عوامل مؤثر بر آن از نقطه نظر کیفیت آب و پیش‌بینی میزان آلودگی، حائز اهمیت است. پیش‌بینی حرکت جریان غلیظ به دلیل پیچیدگی اندازه‌گیری آن، معمولاً به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. در تحقیق حاضر، به بررسی تأثیر ارتفاع پوشش گیاهی مصنوعی در کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ پرداخته شد. جریان غلیظ با چهار غلظت متفاوت وارد فلوم شد و پوشش گیاهی تحت چهار ارتفاع و پنج تراکم مختلف در مسیر جریان قرار گرفت. اندازه‌گیری سرعت در شش مقطع انجام گردید. تغییرات غلظت در راستای قائم در سه مقطع اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که ارتفاع  $0.2$  متر و تراکم  $1/4$  درصد پوشش گیاهی مؤثرترین پوشش برای کاهش سرعت و غلظت پیشانی جریان می‌باشد. همچنین ضریب کنولگان برای محاسبه سرعت در بستر صاف و بستر دارای پوشش گیاهی ارائه شد و در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه سرعت در بستر دارای پوشش گیاهی استخراج گردید.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ، پوشش گیاهی مصنوعی، سرعت پیشانی، پروفیل غلظت.

### Experimental Study on Head of Saline Density Current Affecting by Vegetation

A. Khalili<sup>1\*</sup>, A. Akbarpour<sup>2</sup>, H. Khozaymeh-Nezhad<sup>3</sup>, and P. Varjavand<sup>4</sup>

1\*-Graduate Student of Water Engineering Department, University of Birjand

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand

4-Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahvaz, Iran.

Received:6 December 2014

Accepted:27 May 2015

### Abstract

Density currents are the most important transport mechanisms and deposition of sediments which causes sediments transportation to the near of dam body. Therefore, Studying of these flows and their affecting parameters are very important in terms of water quality and pollution prediction. According to density current complexity, experimental studies are typically used. In the present research, behavior of the saline density current forehead flowing over artificial vegetation was studied by conducting experiments. Density currents were entered into the flume with four different concentrations. Artificial vegetation was placed in the direction of the flow with four heights and five densities. Velocity and vertical concentration profile were measured in 6 and 3 longitudinal sections, respectively. The results showed that the most effective artificial vegetation density and height in this work can be concluded 1.4 percent and

خلیلی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ...

0.2 meter, respectively. Keulegan coefficient is presented for velocity calculation of flows over smooth bed and bed with artificial vegetation, according to the vegetation density and height. Finally, a relationship was provided to calculate the velocity of flows over the beds with artificial vegetation.

**Keywords:** Saline density current, Artificial vegetation, Head velocity, Concentration profile.

#### مقدمه

همه دریاچه‌ها و مخازن احداث شده روی رودخانه‌های طبیعی در معرض خطر رسوب‌گذاری قرار دارند. احداث سد یا هر سازه هیدرولیکی دیگر در مسیر رودخانه‌ها باعث به هم خوردن تعادل رسوبی در مسیر جریان گردیده و متعاقباً پروفیل طولی مسیر رودخانه را تغییر می‌دهد که ایجاد تعادل مجدد ممکن است سال‌ها به طول انجامد (حسن‌زاده و قلمی، ۱۳۸۳). یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در رسوب‌گذاری مخازن، جریان‌های غلیظ می‌باشند. این جریان‌ها می‌توانند رسوبات همراه خود را تا دیواره سد برسانند. علاوه بر این گاهی اوقات می‌توانند رسوبات نشست‌شده در مخزن را از جا کنده و با خود همراه نمایند (قمشی، ۱۳۹۱). جریان غلیظ به جریانی گفته می‌شود که یک سیال با سرعت مخالف صفر و چگالی متفاوت از چگالی سیالی که نسبتاً ساکن است، وارد آن شود و در امتداد یکی از لایه‌های سیال به حرکت خود ادامه دهد (احمدی رنایی، ۱۳۸۲). بررسی و مطالعه حرکت جریان‌های غلیظ در مخازن از نوع تحقیقاتی است که در جهت وصول نیل به هدف پیش‌بینی سرعت پیشروی جریان غلیظ رسوبی و مدیریت تخلیه آن از مخزن با کم‌ترین تلفات آب مخزن می‌باشد (تونبولو و پارکر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳). اولین مشاهده ثبت شده جریان غلیظ توسط محقق به نام فارل<sup>۲</sup> در سال ۱۸۸۵ در دریاچه ژنو<sup>۳</sup> در کشور سوئیس گزارش شده است. مشاهدات وی نشان داده، که رسوبات رودخانه رن که به دریاچه ژنومنتهی می‌شود باعث ایجاد جریان‌های غلیظ می‌گردد. (گارسیا<sup>۴</sup>، ۱۹۹۲). بل<sup>۵</sup> (۱۹۴۲) مطالعه‌های آزمایشگاهی وسیعی را در زمینه بررسی جریان‌های گل‌آلود، در فلوم‌های متعدد انجام داد و به اهمیت جریان‌های گل‌آلود در مسأله رسوب‌گذاری مخازن بی‌برد و این‌گونه بررسی‌ها از آن به بعد ادامه پیدا کرد. سکیورس و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۰) پروفیل‌های سرعت و غلظت را برای جریان کدر نمکی بر روی بستر متحرک به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. شرایط جریان آن‌ها به صورت زیر و فوق بحرانی بوده است. آزمایش‌های آن‌ها در پنج نوع غلظت انجام شد. نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) ساختار جریان غلیظ رهاشده روی بستر شیب‌دار را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مشاهدات

آزمایشگاهی این‌طور نتیجه شد که اگر جریان غلیظ در یک فلوم حرکت کند ممکن است به دلیل پرش هیدرولیکی، ضخامت آن افزایش یابد. این پدیده در حالت‌های خاص جریان ورودی اتفاق می‌افتد و بر روی ساختار جریان شامل سرعت، ارتفاع جریان و تنش برشی بستر تأثیر محسوس می‌گذارد. در تحقیق حاضر سعی بر آن شد تا با تغییر ارتفاع پوشش گیاهی در غلظت‌های مختلف به بررسی رفتار پیشانی جریان غلیظ نمکی پرداخته شود.

#### روابط حاکم بر پدیده

جریان چگالی یا ثقلی<sup>۷</sup> (جریان دو فازی) جریانی با چگالی  $\rho_{av}$  است که ذاتاً در اثر اختلاف چگالی  $\Delta\rho$  بر روی شتاب جاذبه  $g$  به وجود می‌آید. این جریان مادامی که جاذبه به وسیله نسبت  $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$  تغییر کند، رخ می‌دهد. در واقع جاذبه کاهش یافته نیروی محرکه جریان‌های وزنی بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$g' = g \left( \frac{\rho_{av} - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (1)$$

که در آن  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $\rho_{av}$ : چگالی متوسط جریان و  $\rho_a$ : چگالی سیال پیرامون است (گراف و آلتینکار<sup>۸</sup>، ۱۹۹۸). از آنجایی که عامل حرکت جریان‌های غلیظ نیروی ثقل می‌باشد، همانند جریان در فلوم‌های باز از عدد فرود برای تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می‌گردد، با این تفاوت که شتاب ثقل به دلیل اختلاف چگالی کاهش یافته است که آن را عدد دنسیومتریکی می‌نامند و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{gh \cos \theta}} \quad (2)$$

که  $Fr_d$ : عدد فرود دنسیومتریکی،  $U$ : سرعت متوسط،  $h$ : عمق جریان و  $\theta$ : زاویه بستر با افق می‌باشند (قمشی، ۱۳۹۱).

- 1-Toniolo and Parker
- 2-Forel
- 3-Geneva
- 4-Garcia
- 5-Bell
- 6-Sequeiroset al.

- 7-Gravity Current
- 8-Graf and Altinakar

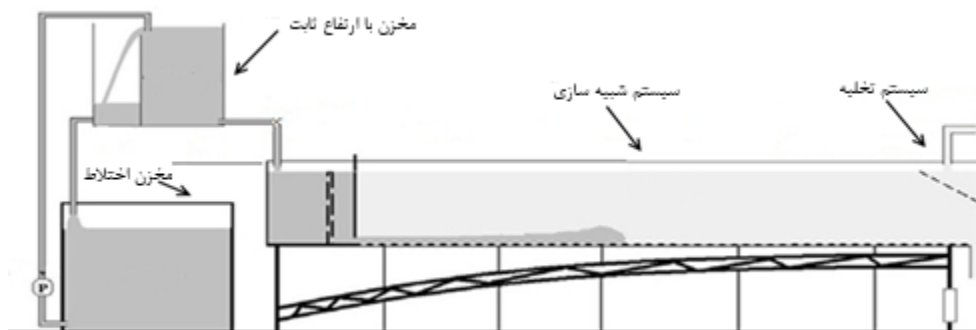
## مواد و روش ها

## مدل فیزیکی

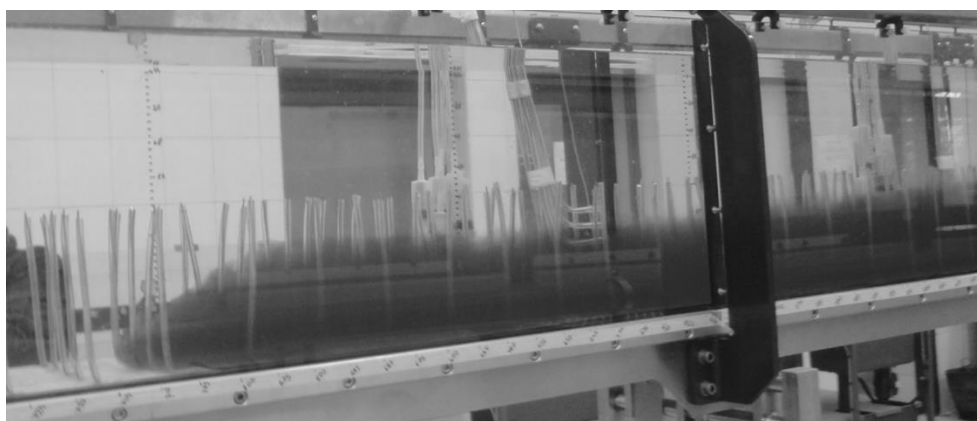
آزمایش‌های تحقیق در آزمایشگاه هیدرویک مهندسی آب دانشکده کشاورزی بیرجند انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها از فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۶ متر استفاده شد. به فاصله یک متر در ابتدای فلوم یک آرام‌کننده و به فاصله یک متر بعد از آرام‌کننده، یک دریچه کشویی قرار دارد. میزان بازشدگی این دریچه به منظور دسترسی هر چه بیشتر به شرایط جریان یکنواخت ۰/۰۵ متر و فاصله شروع پوشش گیاهی از دریچه دو متر می‌باشد. طول پوشش گیاهی سه متر در نظر گرفته شد و به صورت موازی با هم و در جهت عمود بر جریان قرار گرفتند. فلوم قابلیت تغییر شیب تا پنج درصد را به وسیله یک اهرم در پایین دست دارا می‌باشد. در انتهای فلوم یک سرریز برای کنترل سطح آب سیال پیرامون نصب شده است. همچنین یک شیر فلکه تخلیه در انتهای فلوم پیش‌بینی شده که به منظور تخلیه جریان غلیظ از انتها و جلوگیری از برگشت آن استفاده گردید. برای ایجاد جریان غلیظ از یک مخزن اختلاط به حجم مفید ۳/۱۲۵ متر مکعب استفاده گردید (شکل ۱).

به منظور ایجاد جریان غلیظ نمکی از نمک پودری استفاده شد. در همه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق پیشروی جریان غلیظ در طول فلوم با استفاده از یک دوربین فیلمبرداری ( Canon

PowerShot A3400 IS)، دارای سرعت ۱/۱۰۰۰ ثانیه، تصویربرداری شد و در نهایت متوسط سرعت پیشروی پیشانی جریان غلیظ در فواصل ۵۰ سانتی‌متری از ابتدای پوشش در ششمقطع اندازه‌گیری شد. نمونه‌گیری غلظت از پیشانی جریان غلیظ به صورت پروفیل قائم غلظت در مرکز فلوم انجام شد. اندازه‌گیری غلظت در سه مقطع به فاصله ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ سانتیمتر از ابتدای پوشش گیاهی انجام گردید. در هر مقطع شش غلظت به فاصله ۲/۵ سانتی متر نسبت به هم، برداشت شد و فاصله اولین نقطه نمونه‌گیری از کف فلوم نیز ۲/۵ سانتی‌متر بود. به منظور تعیین میزان نمک نمونه‌های جریان غلیظ نمکی، از یک EC متر مدل Neo Met 815pdc استفاده گردید. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی از لوله‌های پلاستیکی باریک ارتجاع‌پذیر با ضخامت ۸/۵ میلی‌متر استفاده شد. این لوله‌ها با آرایش ثابت موازی به یک صفحه گالوانیزه با ضخامت دو میلی‌متر متصل گردید و در مقطع آزمایش اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها برای چهار غلظت ( $C$ ) مختلف و پنج تراکم ( $N$ ) متفاوت در چهار ارتفاع ( $H$ ) با شیب ثابت یک درصد انجام شد. تراکم به صورت نسبت سطح اشغال شده توسط پوشش گیاهی به سطح کل پوشش گیاهی بیان شده است. در شکل (۲) نمونه‌ای از جریان غلیظ شکل‌گرفته در فلوم نشان داده شده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایش‌ها انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده



شکل ۲- جریان غلیظ در هنگام عبور از پوشش گیاهی

**جدول ۱- فهرست آزمایش‌ها**

| تعداد آزمایش | عدد فرودپیشانی جریان غلیظ | عدد رینولدز $\times 10^4$ | ارتفاع پوشش گیاهی (سانتی متر) | غلظت (گرم بر لیتر) | تراکم (درصد) | سری آزمایش |
|--------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|------------|
| ۱۶           | ۰/۵۱ - ۰/۷۷               | ۱/۰۷ - ۲/۲۸               | ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵                 | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | ۰/۶          | ۱          |
| ۱۶           | ۰/۴۹ - ۰/۷۰               | ۰/۹۴ - ۲/۲۳               | ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵                 | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | ۰/۸          | ۲          |
| ۱۶           | ۰/۴۶ - ۰/۶۷               | ۰/۸۸ - ۲/۰۷               | ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵                 | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | ۱            | ۳          |
| ۱۶           | ۰/۴۴ - ۰/۶۶               | ۰/۸۵ - ۲/۰۸               | ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵                 | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | ۱/۲          | ۴          |
| ۱۶           | ۰/۴۰ - ۰/۶۴               | ۰/۷۲ - ۲/۰۶               | ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵                 | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | ۱/۴          | ۵          |
| ۴            | ۰/۵۷ - ۰/۷۴               | ۰/۱۳ - ۲/۳۲               | .                             | ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰     | .            | ۶          |

و همکاران، ۱۳۹۳، کاهه و همکاران، ۱۳۹۰، ترابی‌پوده و همکاران، (۱۳۸۶).

**توسعه مدل به کمک تحلیل ابعادی**

پارامترهای وابسته جریان غلیظ مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از:

**نتایج و بحث**

**بررسی سرعت**

در این قسمت به مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت در طول فلوم تحت تأثیر پوشش گیاهی با چهار ارتفاع ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ متر و تراکم‌های مختلف پرداخته شد. در شکل (۳) سرعت پیشروی پیشانی جریان غلیظ به‌عنوان نمونه در دو تراکم ۰/۶ و ۱/۴ درصد و در چهار غلظت موردنظر در این تحقیق آورده شده و نتایج با مقادیر متناظر سرعت در آزمون شاهد (بستر بدون پوشش گیاهی) مقایسه گردید. همان‌طور که از شکل (۳-الف) پیدا است پوشش گیاهی با ارتفاع بالاتر، کاهش سرعت بیشتری را نسبت به سرعت در بستر صاف نتیجه می‌دهد و با کاهش ارتفاع تأثیر پوشش گیاهی کم‌تر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در غلظت پایین و در تراکم کم، سرعت پیشانی جریان به دلیل کاهش عامل انسداد (پوشش گیاهی) و کاهش برش در فصل مشترک جریان، از پوشش گیاهی با تمامی ارتفاع‌ها، تأثیر ناچیزی می‌پذیرد. با قراردادن پوشش گیاهی در مسیر جریان به دلیل ایجاد اصطکاک و همچنین افزایش ورود سیال پیرامون به درون جریان، سرعت کم‌تر می‌شود اما دلیل کاهش سرعت با افزایش ارتفاع را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش ارتفاع، ضخامت جریان غلیظ و ارتفاع پیشانی جریان افزایش می‌یابد و فصل مشترک جریان غلیظ و سیال پیرامون افزایش پیدا می‌کند و تنش برشی بین دو سیال بیشتر می‌شود. به‌دنبال آن کاهش غلظت محسوس‌تر شده و در نتیجه سرعت کاهش می‌یابد. همچنین، در تراکم ۰/۶، ارتفاع‌های ۰/۰۵ و ۰/۱ با بستر صاف تفاوت چندانی ندارند ولی دو ارتفاع بزرگ‌تر تفاوت نمایان‌تری دارند. حال آن‌که با افزایش تراکم تأثیر ارتفاع‌های کم نیز محسوس‌تر شده و موانع با ارتفاع کم و زیاد دارای نتایج نزدیک هم هستند. این بدان دلیل است که در ارتفاع‌های پایین‌تر، سطح مقطع انسداد در مقابل جریان کم‌تر می‌باشد و میزان افت سرعت کم‌تر می‌شود اما با افزایش ارتفاع، تأثیر پوشش گیاهی محسوس‌تر می‌شود. در شکل (۳-ب) با افزایش تراکم پوشش گیاهی تأثیر ارتفاع پوشش گیاهی نمایان‌تر می‌شود. این نتایج برای تمامی تراکم‌ها یکسان بوده است.

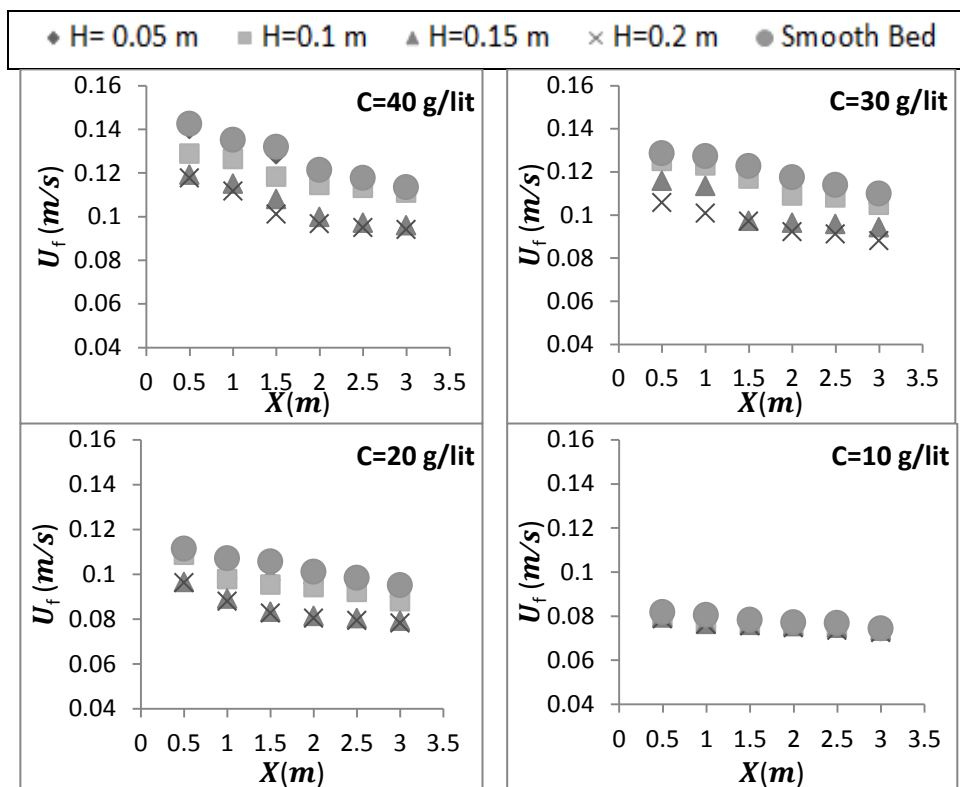
$$F_1(P, X, W, S, H, N, d, h_f, h_b, h_a, \mu_{d.c}, \rho_a, u_f, t, g' \cos \theta) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه P: آرایش پوشش گیاهی، X: طول پوشش گیاهی، W: عرض پوشش گیاهی، S: شیب کف، H: ارتفاع پوشش گیاهی، N: تراکم پوشش گیاهی، d: قطر پوشش گیاهی، h<sub>f</sub>: ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، h<sub>b</sub>: ارتفاع بدنه جریان غلیظ، h<sub>a</sub>: ارتفاع سیال پیرامون، μ<sub>d.c</sub>: لزجت دینامیکی جریان غلیظ، ρ<sub>a</sub>: جرم مخصوص سیال پیرامون، u<sub>f</sub>: سرعت پیشروی موج جریان غلیظ، t: زمان پیشروی موج جریان غلیظ و g'cosθ: شتاب ثقل مؤثر می‌باشد که در رابطه فوق آرایش پوشش گیاهی، عرض پوشش گیاهی، قطر پوشش گیاهی، شیب کف و ارتفاع سیال پیرامون ثابت در نظر گرفته شده است و چون مقدار cosθ ناچیز است، صرف نظر گردید. متغیرهای h<sub>f</sub>، u<sub>f</sub> و ρ<sub>a</sub> به عنوان پارامترهای تکراری انتخاب شده است و با استفاده از تحلیل ابعادی به روش پی باکینگهام، پارامترهای بی بعد رابطه‌ی (۴) حاصل گشت. سپس پارامتر بدون بعد عدد فرود استخراج گردید.

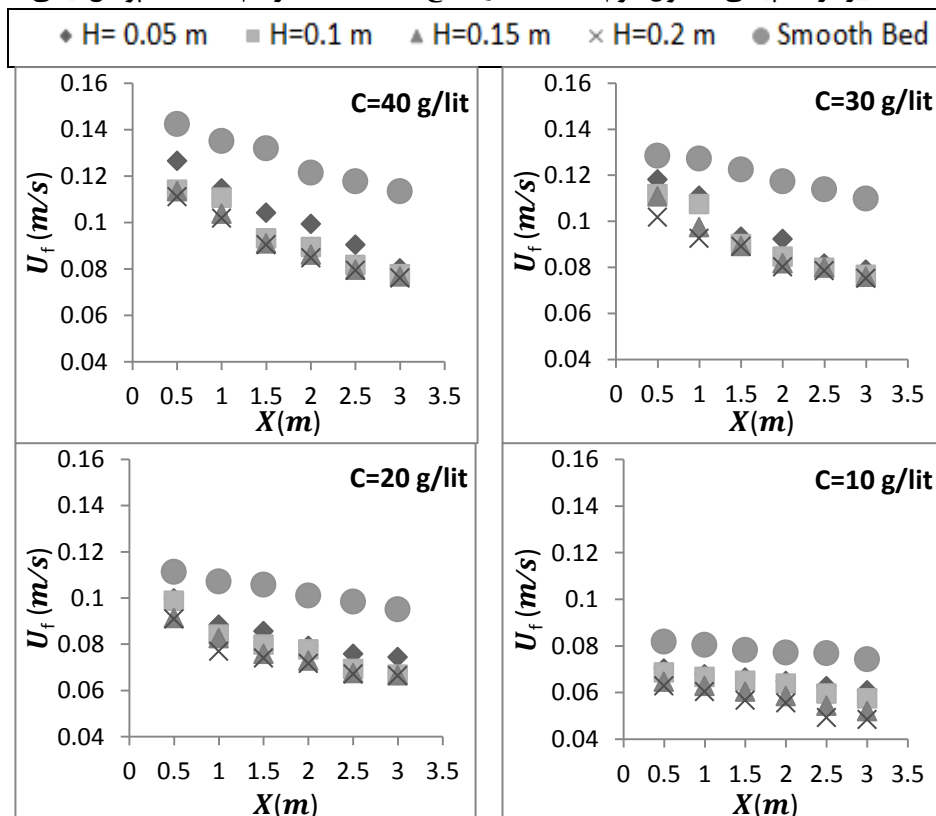
$$F_2 \left( \frac{H}{h_f}, N, \frac{X}{h_f}, \frac{h_b}{h_f}, \frac{u_f}{\sqrt{g' \times h_f}}, \frac{\mu_{d.c}}{\rho_a \times V \times h_f} \right) = 0 \quad (4)$$

$$F_{r.d.c} = \frac{u_f}{\sqrt{g' \times h_f}} = F_3 \left( \frac{H}{h_f}, N, \frac{h_b}{h_f}, \frac{X}{h_f} \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق  $\frac{u_f}{\sqrt{g' \times h_f}}$  بیانگر عدد فرود پیشانی جریان غلیظ می‌باشد و پارامترهای مؤثر بر آن در رابطه (۵) نشان داده شده است. از آنجا که آزمایش‌های این تحقیق در فلوم و در شرایط جریان آزاد و تغییرات کم دمایی صورت پذیرفت و از طرفی پس از محاسبه عدد رینولدز جریان غلیظ  $(\frac{\rho_a \times V \times h_f}{\mu_{d.c}})$ ، مشاهده شد که عدد رینولدز در این آزمون همواره در محدوده جریان متلاطم قرار داشت، همانند کار دیگر محققین از بررسی اثر آن صرف نظر شد (ورجاوند



الف) تغییر سرعت پیشانی در طول فلوم در غلظت‌ها و ارتفاع‌های مختلف در تراکم ۰/۶ درصد پوشش گیاهی

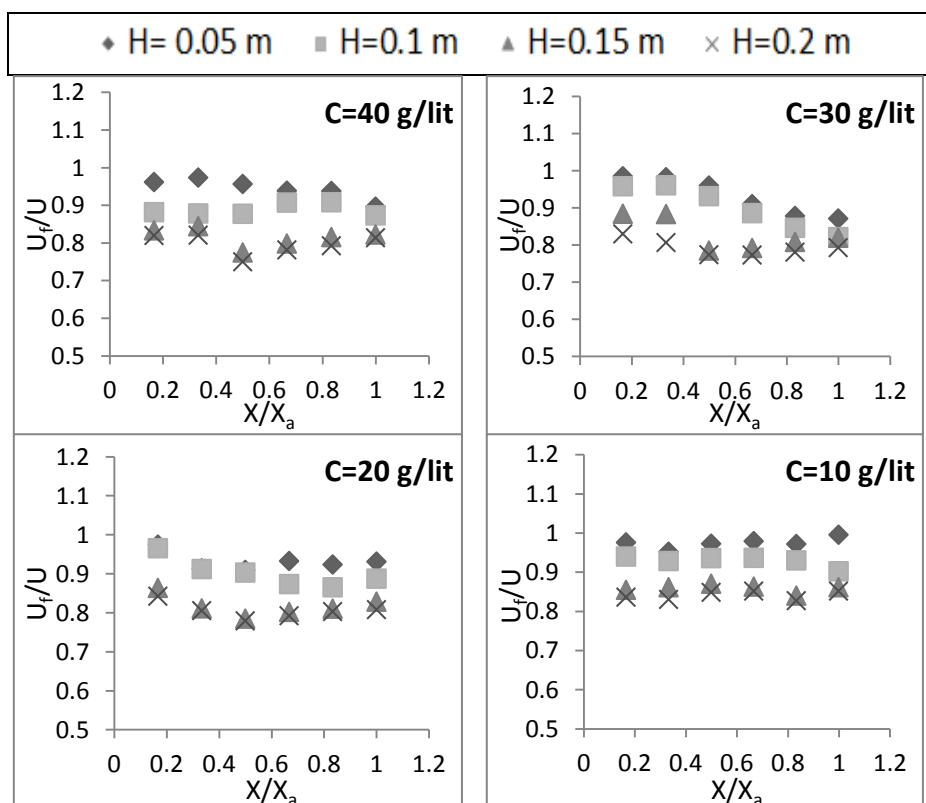


ب) تغییر سرعت پیشانی در طول فلوم در غلظت‌ها و ارتفاع‌های مختلف در تراکم ۱/۴ درصد پوشش گیاهی  
 شکل ۳- تغییر سرعت پیشانی جریان غلیظ تحت تأثیر پوشش گیاهی با ارتفاع‌های مختلف

خلیلی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ...

جدول ۲- درصد متوسط کاهش سرعت در تمامی ارتفاعها

| ارتفاع (متر) | غلظت (گرم بر لیتر) |      |      |      |
|--------------|--------------------|------|------|------|
|              | ۰/۲                | ۰/۱۵ | ۰/۱  | ۰/۰۵ |
| ۴۰           | ۲۳/۶               | ۲۱/۸ | ۱۶/۱ | ۱۲/۳ |
| ۳۰           | ۲۳/۱               | ۲۰/۳ | ۱۵/۶ | ۱۲   |
| ۲۰           | ۲۲/۶               | ۲۰   | ۱۴   | ۱۱/۳ |
| ۱۰           | ۱۸/۱               | ۱۵/۹ | ۱۲/۲ | ۹/۲  |



شکل ۴- تغییر سرعت بی بعد در طول فلووم در غلظت‌ها و از ارتفاع‌های مختلف و تراکم ۰/۸ درصد پوشش گیاهی

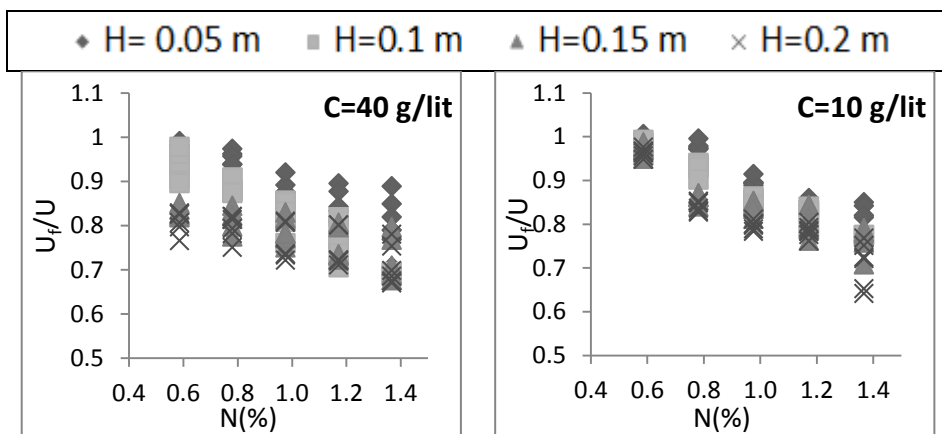
از محققین از جمله آلتیناکار و همکاران<sup>(۱۹۹۶)</sup> و حسینی و همکاران<sup>(۲۰۰۶)</sup> از سرعت حداکثر و ارتفاع آن برای بدون بعد ساختن سرعت استفاده نمودند. در تحقیق حاضر برای بی بعد سازی از  $U_f$ ، سرعت متناظر در آزمون شاهد و  $X_a$ ، طول کل پوشش گیاهی استفاده شده است.  $U_f/U$  نشان دهنده میزان قابلیت پوشش گیاهی برای کنترل جریان غلیظ نسبت به بستر صاف می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۴) پیدا است با حرکت جریان در طول فلووم سرعت بی بعد کاهش می‌یابد که این نشان می‌دهد کارایی پوشش برای کنترل سرعت جریان غلیظ در طول فلووم افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع پوشش گیاهی، پس از طی نیمی از مسیر جریان، مجدداً سرعت بی بعد افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که در این ارتفاع‌ها، از مقطع سوم کارایی پوشش گیاهی برای کنترل جریان کم‌تر می‌شود. دلیل این امر آن است که با حرکت جریان غلیظ در

در جدول (۲) درصد کاهش سرعت نسبت به بستر صاف در تمامی تراکم‌ها با توجه به غلظت‌ها و ارتفاع‌های مختلف پوشش گیاهی آورده شده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت، به دلیل افزایش اختلاف چگالی بین دو سیال، پدیده درون آمیختگی و ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ بیشتر می‌شود و از طرفی به دلیل وجود مانع در مسیر جریان و ایجاد اصطکاک و کاهش قدرت محرکه جریان، سرعت پیشانی جریان از پوشش گیاهی تأثیر بیشتری می‌پذیرد و کاهش بیشتری دارد. درصد متوسط کاهش سرعت در اثر تغییر ارتفاع پوشش گیاهی بین ۱۱/۳ تا ۲۳/۶ متغیر است (ورجوند و همکاران، ۱۳۹۳).

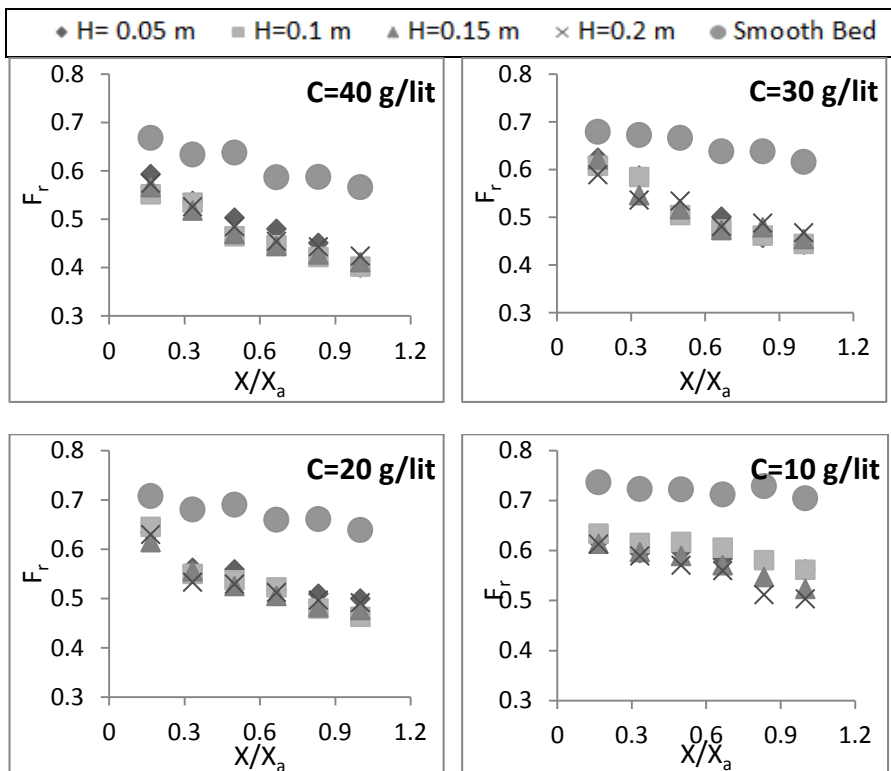
برای نشان دادن سرعت بی بعد نسبت به طول مسیر جریان و مقایسه کارایی پوشش گیاهی با ارتفاع‌های متفاوت، از شکل (۴) استفاده شده است. در این شکل به عنوان نمونه، پوشش گیاهی با تراکم ۰/۸ درصد در مسیر جریان قرار گرفت. در پیشینه تحقیق برخی

با نیروهای مقاوم در برابر حرکت به تعادل رسیده و زبری مؤثر ثابت شده و سرعت در طول تغییرات محسوسی ندارد. برای مقایسه سرعت بی‌بعد نسبت به تراکم برای تمامی ارتفاع‌ها و به عنوان نمونه، برای دو غلظت ۱۰ و ۴۰ گرم بر لیتر، از شکل (۵) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش تراکم و افزایش ارتفاع پوشش گیاهی، کنترل سرعت پیشروی جریان غلیظ بهتر اتفاق می‌افتد و در غلظت‌های پایین افت سرعت نسبت به سرعت متناظر در بستر صاف، کم‌تر می‌باشد. هر چهار غلظت نتایج یکسانی را ارائه کردند.

طول فلوم، سیال پیرامون وارد جریان غلیظ می‌شود و از طرفی پوشش گیاهی که عامل اصطکاک است، در طول فلوم بیشتر می‌شود و در نتیجه شتاب ثقل مؤثر که عامل چسبیدن و حرکت جریان در کف فلوم است، کاهش می‌یابد. به دنبال کاهش شتاب ثقل مؤثر، بخش عمده‌ای از جریان تمایل به عبور از روی مانع و رسیدن به میزان انرژی کم‌تر را پیدا می‌کند. در نتیجه سرعت نسبت به بستر صاف افزایش می‌یابد. این رفتار با کاهش ارتفاع و نیز افزایش تراکم جریان مشاهده نمی‌شود. همچنین در غلظت پایین با توجه به عبور جریان از موانع، به مرور قدرت محرکه جریان



شکل ۵- تغییر سرعت بی‌بعد نسبت به تراکم در ارتفاع‌های مختلف

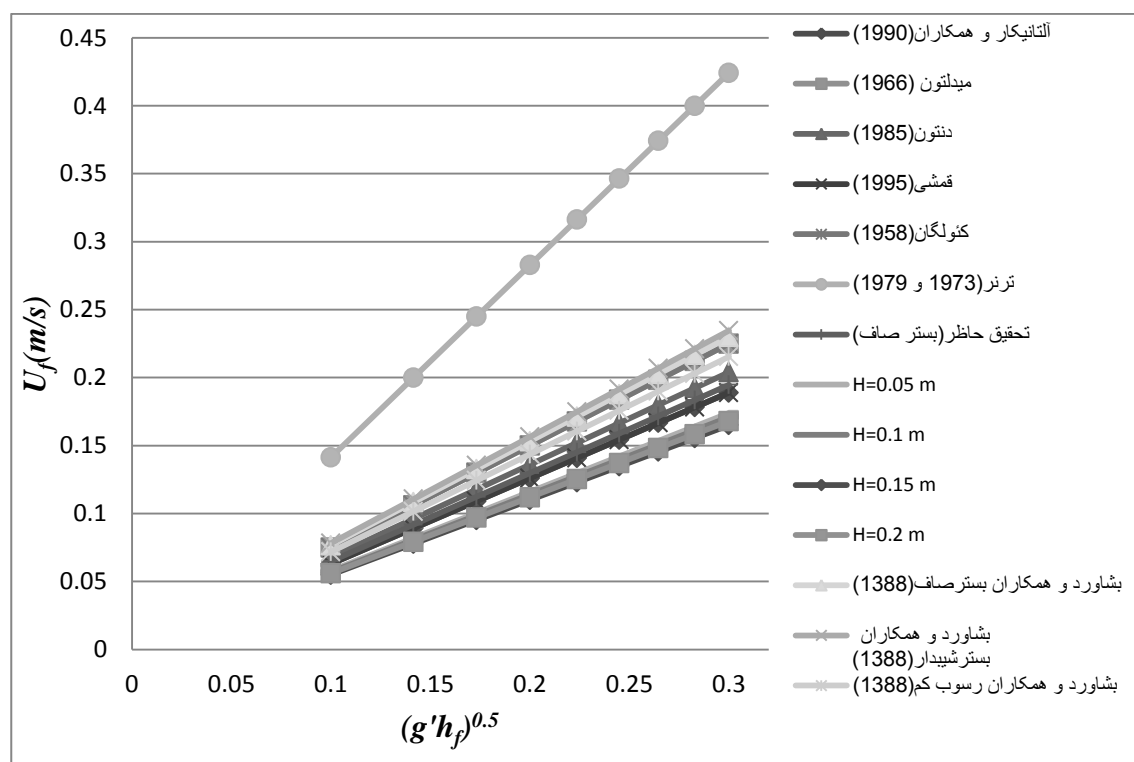


شکل ۶- تغییر عدد فرود در طول مسیر جریان برای تراکم ۱/۴ درصد پوشش گیاهی

خلیلی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ...

جدول ۳- مقادیر ضریب رابطه (۶)

| نام محقق                         | سال ارائه         | ملاحظات | نوع جریان                    | $C_c$ | ضریب تعیین |
|----------------------------------|-------------------|---------|------------------------------|-------|------------|
| آلتیناکار و همکاران <sup>۱</sup> | ۱۹۹۰              | ۰/۰۲۹   | نمکی و رسوبی                 | ۰/۶۳  | -          |
| میدلتون <sup>۲</sup>             | ۱۹۶۶              | ۰/۰۴    | نمکی                         | ۰/۷۵  | -          |
| دنتون <sup>۳</sup>               | ۱۹۸۵              | ۰/۰۱۵   | رسوبی                        | ۰/۶۸  | -          |
| قمشی                             | ۱۹۹۵              | ۰/۰۰۶۳۵ | نمکی و رسوبی                 | ۰/۶۳  | -          |
| کنولگان <sup>۴</sup>             | ۱۹۵۸              | ۰/۰۴۵   | نمکی                         | ۰/۷۵  | -          |
| ترنر <sup>۵</sup>                | ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹       | -       | رسوبی                        | ۱/۴۱  | -          |
| بشاورد و همکاران                 | ۱۳۸۸              | ۰       | رسوبی                        | ۰/۷۶۶ | ۰/۹۱۳      |
| بشاورد و همکاران                 | ۱۳۸۸              | ۰/۰۸    | رسوبی                        | ۰/۷۸۲ | ۰/۹۴       |
| بشاورد و همکاران                 | ۱۳۸۸              | -       | رسوبی کمتر از ظرفیت حمل رسوب | ۰/۷۱۸ | ۰/۸۵۹      |
| تحقیق حاضر                       | بستر صاف          |         | نمکی                         | ۰/۶۴۹ | ۰/۸۸۷      |
|                                  | ارتفاع (۰/۰۵ متر) |         | نمکی                         | ۰/۵۸  | ۰/۷۲       |
|                                  | ارتفاع (۰/۱ متر)  |         | نمکی                         | ۰/۵۷  | ۰/۶۹       |
|                                  | ارتفاع (۰/۱۵ متر) |         | نمکی                         | ۰/۵۵  | ۰/۷۰       |
|                                  | ارتفاع (۰/۲ متر)  |         | نمکی                         | ۰/۵۶  | ۰/۷۱       |



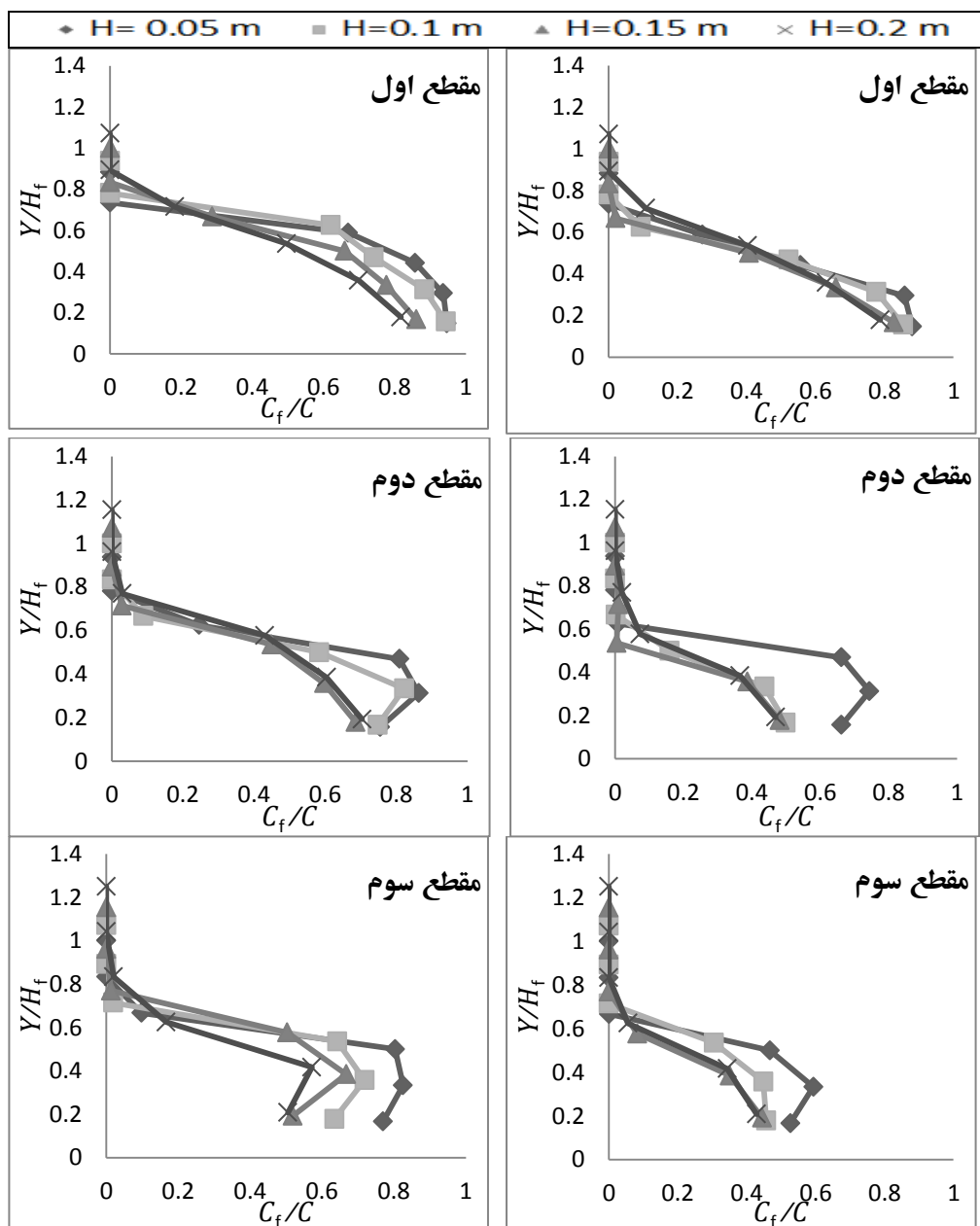
شکل ۷- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و دیگر محققین

- 1-Altinakaret al.
- 2-Middleton
- 3-Denton
- 4-Keulegan
- 5-Turner



جدول ۴- رابطه خطی بین متغیرهای سرعت و  $(g'H_f)^{0.5}$  و ارتفاع پوشش گیاهی

| ضریب تعیین | رابطه   | تراکم پوشش گیاهی (درصد) |
|------------|---|-------------------------|
| ۰/۸۷       | $U_f = 0.038 + 0.431(g'H_f)^{0.5} - 0.064(H)$ | ۰/۶                     |
| ۰/۸۵       | $U_f = 0.029 + 0.457(g'H_f)^{0.5} - 0.056(H)$ | ۰/۸                     |
| ۰/۸۳       | $U_f = 0.025 + 0.428(g'H_f)^{0.5} - 0.025(H)$ | ۱                       |
| ۰/۷۹       | $U_f = 0.02 + 0.433(g'H_f)^{0.5} - 0.02(H)$   | ۱/۲                     |
| ۰/۷۲       | $U_f = 0.021 + 0.408(g'H_f)^{0.5} - 0.026(H)$ | ۱/۴                     |



الف) توزیع قائم غلظت در پوشش گیاهی با تراکم ۱/۴ درصد  
ب) توزیع قائم غلظت در پوشش گیاهی با تراکم ۰/۸ درصد

شکل ۸- مقایسه توزیع قائم غلظت در طول پوشش گیاهی در مقاطع مختلف

خلیلی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ...

### جدول ۵- درصد کاهش متوسط غلظت در ارتفاع‌های مختلف برای تمامی تراکم‌ها و غلظت‌ها

| ارتفاع (متر) | ۰/۰۵  | ۰/۱   | ۰/۱۵ | ۰/۲   |
|--------------|-------|-------|------|-------|
| درصد کاهش    | ۴۶/۵۷ | ۵۶/۰۳ | ۵۹/۹ | ۶۵/۳۳ |

#### بررسی عدد فرود دنیومتریک

روابط نتیجه می‌دهد و با افزایش ارتفاع، سرعت جریان بیشتر کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده تأثیر پوشش گیاهی در کاهش سرعت جریان می‌باشد. همچنین با استفاده از نرم افزار SAS رابطه خطی چندگانه بین متغیرهای سرعت و  $(g'H_f)^{0.5}$  و ارتفاع پوشش گیاهی، برای هر پنج تراکم پوشش گیاهی برازش داده شد (جدول (۴)). که در این روابط  $U_f$ : سرعت پیشانی جریان غلیظ،  $g'$ : شتاب ثقل کاهش یافته،  $H_f$ : ارتفاع پیشانی جریان غلیظ،  $H$ : ارتفاع پوشش گیاهی می‌باشد.

#### بررسی تغییرات غلظت جریان غلیظ

اندازه‌گیری غلظت در سه مقطع موردنظر، در جهت عمودی صورت گرفت و در هر مقطع شش غلظت به فاصله ۲/۵ سانتی‌متر از هم قرائت شد. تغییرات غلظت در شرایطی که پوشش گیاهی با چهار ارتفاع ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ متر، در مسیر جریان غلیظ قرار گرفته بود با بستر صاف مقایسه شد. نتایج در شکل (۸) آمده است. در این شکل برای بی‌بعدسازی محور افقی، نسبت غلظت پیشانی جریان غلیظ در هر نقطه به غلظت در بستر صاف محاسبه شد و برای بی‌بعدسازی محور عمودی، فاصله قائم نقطه اندازه‌گیری نسبت به کف، به ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در آن مقطع تقسیم شد. نتایج نشان داد که با حرکت جریان در طول فوم غلظت در اثر پدیده درون آمیختگی ذرات آب صاف با جریان غلیظ کاهش می‌یابد. این نتیجه تطابق خوبی را با نتایج دیگر محققین نشان می‌دهد (کشتکار و همکاران، ۱۳۸۷). با افزایش ارتفاع پوشش گیاهی میزان افت غلظت به دلیل افزایش سطح مشترک و افزایش اصطکاک، نسبت به مقدار متناظر در بستر صاف بیشتر می‌شود و با افزایش تراکم به همراه افزایش ارتفاع میزان افت چشم‌گیرتر می‌شود. همانطور که ورجاوند و همکاران (۱۳۹۳) نتایج مشابهی را نشان دادند.

در جدول (۵) درصد کاهش متوسط غلظت نسبت به بستر صاف در ارتفاع‌های مختلف در تمامی تراکم‌ها و غلظت‌ها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کاهش غلظت تحت تأثیر پوشش گیاهی با ارتفاع‌های مختلف بین ۴۶/۵۷ تا ۶۵/۳۳ می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

پیشروی جریان غلیظ به عوامل زیادی از جمله اصطکاک بستر بستگی دارد. در این تحقیق به بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر سرعت پیشروی پیشانی و تغییرات غلظت جریان غلیظ نمکی پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد که با قراردادن پوشش گیاهی در مسیر جریان غلیظ به دلیل برخورد جریان با پوشش گیاهی و ایجاد اصطکاک و

شکل (۶) برای بررسی عدد فرود در طول فوم تحت تأثیر غلظت‌ها و ارتفاع‌های مختلف، برای نمونه برای تراکم ۱/۴ درصد آورده شده است. شکل نمایان‌گر آن است که عدد فرود در طول مسیر جریان کاهش می‌یابد. این بدان دلیل است که سرعت و ارتفاع پیشانی جریان در طول مسیر کم می‌شود اما میزان کاهش سرعت بیشتر از کاهش ارتفاع پیشانی جریان می‌باشد و عدد فرود کاهش می‌یابد. با قرار دادن پوشش گیاهی در مسیر جریان میزان افت عدد فرود بیشتر و در غلظت‌های پایین‌تر میزان کاهش عدد فرود به دلیل کاهش اختلاف غلظت و در نتیجه کاهش شتاب ثقل مؤثر کم‌تر است. همچنین با افزایش ارتفاع پوشش گیاهی، میزان افت عدد فرود نسبت به مقدار متناظر در آزمون شاهد، تغییر ناچیزی دارد و کارایی این پارامتر در عدد فرود کم است.

#### مقایسه سرعت و ارائه روابط

به منظور مقایسه سرعت پیشانی جریان غلیظ در تحقیق حاضر با دیگر محققین از رابطه (۶) استفاده شد (کئولگان<sup>۱</sup>، ۱۹۵۷؛ ۱۹۵۸):

$$U_f = C_c (g'H_f)^{0.5} \quad (۶)$$

که در آن  $U_f$ : سرعت پیشانی جریان،  $C_c$ : ضریب تجربی،  $g'$ : شتاب ثقل مؤثر و  $H_f$ : ضخامت پیشانی جریان می‌باشد.

در جدول (۳) ضرایب تجربی ارائه شده برای رابطه فوق در تحقیق حاضر و سایر محققین بیان شده است. مشاهده می‌شود که ضریب  $C_c$  برای جریان‌های نمکی بیشتر از جریان‌های رسوبی است که این بدان دلیل است که سرعت در جریان نمکی در شرایط مشابه به دلیل اختلاف در شناوری و نوسانات چگالی بیشتر از جریان رسوبی است. ضریب تعیین برای واسنجی است و مقدار بالای آن، نشان‌دهنده انتخاب مناسب‌ترین مقادیر برای ضریب  $C_c$  می‌باشد. در جدول (۳) مشاهده می‌شود که ضرایب تحقیق حاضر نزدیک به ضرایب ارائه شده قبلی می‌باشند و بیشترین مقدار ضریب تعیین برای ارتفاع ۰/۰۵ متر پوشش گیاهی می‌باشد. ضرایب تحقیق حاضر از ۰/۵۵ تا ۰/۵۸ متغیر می‌باشند و در واقع ضرایب پیشنهادی برای ارتفاع‌های مختلف، مقادیر تقریباً یکسانی را دارا می‌باشند.

روابط موجود در جدول (۳) برای نه مقدار  $g'H_f$  با اندازه‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸ و ۰/۰۹ مقایسه شده اند. نتایج در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب آزمون حاضر، سرعت کم‌تری را نسبت به دیگر

کمک به افزایش تنش در فصل مشترک دو سیال، سرعت پیشروی جریان نسبت به بستر صاف به میزان  $2/6$  تا  $28/5$  درصد و غلظت جریان بین  $34/48$  تا  $81/28$  درصد کاهش می‌یابد. در مقایسه پروفیل‌های بدون بعد سرعت جریان غلیظ مشاهده شد که در تراکم‌های پایین با افزایش ارتفاع، درصد کاهش سرعت تغییرات محسوس تری نسبت به تراکم‌های بالاتر دارد. غلظت در طول فلوام

به دلیل پدیده درون‌آمیختگی ذرات آب به درون جریان غلیظ کاهش می‌یابد و با افزایش غلظت، تأثیر افزایش ارتفاع پوشش گیاهی، در کاهش سرعت بیشتر می‌شود. همچنین روابطی برای پیش‌بینی سرعت پیشروی پیشانی جریان غلیظ نمکی با اضافه کردن فاکتور ارتفاع پوشش گیاهی استخراج شد.

### منابع

- ۱- احمدی رنای، م. ۱۳۸۲. تأثیر ایجاد مجرای خط القعر مخازن سدها بر راندمان تخلیه جریان گل‌آلود. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- بشاورد، ح. و قمشی، م.، شفاعی بجستان، م. و م. ماروسی. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر سرعت پیشانی جریان‌های غلیظ رسوبی. هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- بشاورد، ح. و م. قمشی. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات سرعت پیشانی غلیظ در جریان‌های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل. اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.
- ۴- ترابی پوده، ح.، فتحی مقدم، م.، قمشی، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۸۶. بررسی سرعت جبهه شدت اختلاط جریان‌های غلیظ ورودی به یک مقطع واگرا. تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۱): ۶۷-۵۶.
- ۵- حسن‌زاده، ی.، و، قلمی. ۱۳۸۳. بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد مقدس اردبیلی و برآورد عمر مفید مخزن. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- ۶- قمشی، م. ۱۳۹۱. شناخت و مدیریت جریان‌های غلیظ در مخازن سدها، کارگاه تخصصی نحوه مدیریت جریان غلیظ رسوبی در مخازن سدها. وزارت نیرو، سازمان آب و برق خوزستان.
- ۷- کاهه، م.، قمشی، م.، و ح. موسوی جهرمی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵(۱): ۱۰۹-۱۰۱.
- ۸- کشتکار، ش.، ایوب زاده، ع.، فیروزآبادی، ب.، و ز. نور محمدی. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان و شیب طولی مخزن بر توزیع قائم سرعت و غلظت جریان گل‌آلود. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۹- ورجاوندپ، قمشی، م.، حسین زاده دلیر، ع.، و د. فرسادی زاده. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری‌های مصنوعی بر مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ نمکی، نشریه آب و خاک، علوم و صنایع کشاورزی، ۳۷(۳): ۱۰۵-۹۶.
- 10-Altinakar, M.S., Graf, W. H. and Hopfinger. E.J.1990.Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*, 28(1): 55-80.
- 11-Bell H.S. 1942. Density currents as agents for transporting sediments. *Journal of Geology*. 5: 512-547.
- 12-Denton, R. A. 1985. Density current inflows to run of the river reservoirs. *Proceedings of 21th IAHR congress*. Melbourne, Australia.
- 13-Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentation Modeling. Ph.D. Thesi, University of Wollongong, Australia, 219p.
- 14-Garcia, M.H. 1992. Turbidity currents. *Encyclopedia of Earth System Science*, 4:399-408.
- 15-Graf, W.H. and M. S, Altinakar. 1998. Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry, Chapter 7. Wiley, New-York. John Wiley and Sons, 681p.

خلیلی و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ...

- 16-Hosseini, S. A., A. Shamsai, and B. Ataie-Ashtiani. 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *J. Flow Measurement and Instrument*, 17: 59-68.
- 17-Keulegan, G. H. 1957. The motion of saline fronts in still water, 12<sup>th</sup> Progress Report on model laws for density currents, US National Bureau of Standards Report.
- 18-Keulegan, G.H.1958. The motion of saline fronts in still water.U.S National Bureau of Standards Report, 5831, 29p.
- 19-Middleton, G. 1966. Experiments on density and turbidity currents motion of the sea. *Canadian Journal of Earth Science*, 3:523-546.
- 20-Nourmohammadi, Z., Afshin, H. and B. Firoozabadi. 2011. Experimental observation of the flow structure of turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2):168-177.
- 21-Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun T., Garcia H. M. and G. Parker. 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing Over a mobile bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(7):412-433.
- 22-Toniolo, H., and G., Parker. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation Proceeding. IAHR symposium on River. Coastal and Estuarine Morph dynamics, Barcelona, Spain, 457-468.
- 23-Turner, J.S. 1973. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge University Press, London, U.K.
- 24- Turner, J.S. 1979. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press. London, England.