

تأثیر ایجاد موج‌های سطحی در رسوب‌شویی رسوبات تجمع یافته در بستر کانال‌های انتقال آب با  
مقطع مستطیلیسجاد ویسی<sup>۱</sup>، محمد حسین امید<sup>۲</sup> و علیرضا وطن‌خواه<sup>۳</sup>

## چکیده

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر ایجاد موج‌های سطحی در جریان یکنواخت بر دبی بار بستر رسوبات تجمع یافته در بستر کانال با مقطع اولیه صلب مستطیلی است. پژوهش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۲ و ارتفاع ۰/۳ متر انجام شد. آزمایش‌های این پژوهش برای دو نوع ماسه با قطر متوسط ۰/۳۴ و ۰/۴۸ میلی‌متر و چگالی ۲/۶۷، پنج تنش برشی متفاوت جریان یکنواخت (آستانه حرکت و مضارب ۱/۱۶، ۱/۲۵، ۱/۳۹، ۱/۴۳ برابر آن برای دانه‌بندی اول، و آستانه حرکت و مضرب‌ها ۱/۱۵، ۱/۲۵، ۱/۳۳، ۱/۴۱ برابر آن برای دانه‌بندی دوم)، دو ارتفاع موج (۱ و ۱/۶ سانتی‌متر) و چهار سرعت موج مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به طور کلی ایجاد موج‌ها سبب افزایش دبی رسوب بستر خواهد شد. به ازای سایر پارامترهای آزمایشگاهی ثابت، افزایش هر کدام از پارامترهای عدد استرووال (سرعت نسبی بی‌بعد)، ارتفاع نسبی موج و تنش برشی جریان یکنواخت، موجب افزایش مقدار دبی رسوب بار بستر خواهد شد. نتایج همچنان نشان داد که در محدوده آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، ایجاد موج‌ها در جریان می‌تواند دبی رسوب بستر را در کانال صلب مستطیلی تا حدود ۲۸٪ افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: بار بستر، تنش برشی بستر، جریان یکنواخت، کانال صلب مستطیلی، موج.

ارجاع: ویسی س. امید م. ح. و وطن‌خواه ع. ۱۳۹۴. تأثیر ایجاد موج‌های سطحی در رسوب‌شویی رسوبات تجمع یافته در بستر کانال‌های انتقال آب با مقطع مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۷: ۱۴۹-۱۵۷.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی تهران.

۲- استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی تهران.

۳- استادیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی تهران.

\* نویسنده مسئول: [sajjad\\_veysi@ut.ac.ir](mailto:sajjad_veysi@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

## مقدمه

شبکه‌های آبیاری به طور معمول از رودخانه‌ها آبرگیری می‌کنند. از آنجا که آب رودخانه‌ها دارای رسوباتی به صورت بار بستر و بار معلق است، ورود و رسوب‌گذاری این ذرات در شبکه‌های آبیاری موجب افزایش هزینه نگهداری و بروز مشکلاتی در بهره‌برداری از آن‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال در کانال گانگای بالا در هند، ورود آب حاوی رسوب موجب رسوب‌گذاری زیاد در کانال شده، به نحوی که نزدیک به ۰/۱۷ میلیون مترمکعب ماسه در یک فاصله ۱۳ کیلومتری به عمق ۲/۱ متر ترسیب شده و خارج کردن رسوبات از کانال در مدت زمان دو ماه در فصل کشاورزی انجام شد که علاوه بر جلوگیری از آبرسانی، هزینه خارج کردن رسوبات در حدود یک میلیون دلار برآورد شد. در ایران نیز در شبکه‌های آبیاری گتوند، سفیدرود، قزوین و ورامین رسوب‌گذاری به‌عنوان یک مشکل خودنمایی می‌کند. با وجود اینکه شبکه‌های مختلف آبیاری ممکن است به‌دلیل‌های مختلفی دچار مشکل رسوب‌گذاری باشند، نتایج پژوهش در چندین شبکه مهم کشور نشان داده که عواملی مانند آبرگیری از رودخانه‌ها در زمان‌های سیلابی، عدم کارایی حوضچه‌های رسوب‌گیر به‌دلیل عدم لایروبی به موقع آن‌ها، انتقال شن و ماسه جاده سرویس‌ها به داخل کانال‌ها در اثر تردد ماشین‌آلات و همچنین عملیات شن‌ریزی و شیب‌زنی جاده به‌عنوان عامل‌های اصلی مشترک رسوب‌گذاری در همه شبکه‌های آبیاری هستند (امید، ۱۳۸۶). در حال حاضر، بهبود عملکرد شبکه‌های موجود نسبت به ایجاد شبکه‌های جدید با جدیت بیشتری دنبال می‌شود، زیرا ساخت و بهره‌برداری از شبکه‌های جدید، به سرمایه‌گذاری‌های بسیار نیاز دارد. مدیریت مناسب رسوب در شبکه‌های آبیاری، یکی از چالش‌های اصلی بهبود شرایط فعلی است.

به‌دلیل آنکه رسوبات ورودی به کانال‌های آبیاری به طور معمول از منابع خارج از شبکه (مانند رودخانه‌ها) هستند، اندازه رسوبات با ذرات تشکیل دهنده مصالح بستر متفاوت است. اندازه ذرات رسوب به نحوه عملکرد سازه‌های تله‌اندازی رسوب یا سازه‌های آبرگیر در ابتدای شبکه کانال‌ها بستگی دارد. به طور معمول، رسوباتی که وارد کانال‌های آبیاری می‌شوند در محدوده ماسه ریزدانه، لای و رس هستند (وراپانسوپاک، ۱۹۹۲). ذرات با اندازه‌های بزرگ‌تر، به طور معمول با آبرگیری مناسب به کانال راه نمی‌یابند یا

اینکه در سازه‌های تله اندازه رسوب در ابتدای شبکه از کانال‌ها جدا می‌شوند (داهمن، ۱۹۹۴). در نتیجه این اقدامات، فرض می‌شود که اندازه قطر میانه رسوبات وارد شده به شبکه بین ۰/۵ تا ۰/۵ میلی‌متر باشد. همچنین با آنکه ممکن است ذرات ریزدانه، تا حدودی خواص چسبندگی از خود نشان دهند، فرض می‌شود که فقط رسوبات غیرچسبنده در شبکه کانال‌های آبیاری وجود دارد (دیوگ و مندز، ۲۰۰۷).

افزافه شدن موج‌ها به جریان، به‌دلیل افزایش تنش برشی مابین آب و رسوب در طی رخ دادن موج‌ها، یک امتیاز بزرگ برای لایروبی مواد انباشته شده و رسوبات ته‌نشین شده در کف جریان است (جپسن و همکاران، ۲۰۱۱).

آشفته‌گی ایجاد شده بر روی بستر خیلی ریزدانه در ترکیب جریان-موج، موجب اختلاط عمودی جریان و نیز انتقال غلظت ذرات رسوب به سمت لایه‌های بالایی جریان می‌شود. ساز و کار انتقال رسوبات در این حالت، تعلیق ذرات رسوب بوسیله موج و انتقال آن‌ها با حرکت جریان به‌صورت بار معلق و همچنین افزایش تنش برشی بستر و بار رسوب بستر می‌باشد. اما در صورتی که اندازه ذرات رسوب بستر مقدار درشت‌تر شود، اعمال موج به جریان فقط موجب افزایش نرخ انتقال بار بستر خواهد شد (ون راین، ۱۹۹۳).

مدل‌ها و معادلات ریاضی گوناگونی برای محاسبه نرخ انتقال بار معلق و بار بستر رسوبات در جریان همراه با موج‌های پایدار توسط پژوهش‌گران مختلفی ارائه شده است، از جمله معادله بیکر (۱۹۶۷ و ۱۹۷۱) نرخ انتقال بار معلق و نرخ انتقال بار بستر را فقط مربوط به جریان (جریان تحت تأثیر موج) برای شرایط ترکیب جریان و موج می‌دهد. معادله گرت و مادسن (۱۹۷۶) نرخ انتقال دبی کل (جمع بار معلق و بار بستر) لحظه‌ای را برای واحد عرض ارائه می‌کند، معادله بیلارد و بگنولد (۱۹۸۱) و نیز معادله ون رای (۱۹۸۹) دبی رسوب بار معلق و بار بستر را در اثر ایجاد موج به‌صورت مجزا و لحظه‌ای بیان می‌کند.

در مبحث تأثیر ایجاد موج‌ها در جریان بر دبی رسوبات نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است، از جمله نرخ انتقال مربوط به جریان برای دو دانه‌بندی رسوب ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر در فلوم آزمایشگاهی، توسط نیوجار و وندرکاج (۱۹۸۷) و ون کمپن (۱۹۸۸) انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها و نیز پژوهش‌های هاوینگا (۱۹۹۲) برای

با استفاده از اصول تحلیل ابعادی (تئوری باکینگهام) معادله ۲ برای دبی رسوب ترکیب موج- جریان به دست می‌آید:

$$\frac{Q}{h^2 V} = f_2 \left( \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{h} \right) \quad (2)$$

$$R_e = \frac{\rho V h}{\mu}, Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}, S_t = \frac{C}{V}, \frac{a}{h}, \frac{\tau}{\rho V^2}$$

که در آن  $R_e$ ، عدد رینولدز،  $Fr$ ، عدد فرود و  $S_t$ ، عدد استروهل است.

در عددهای رینولدز برشی بزرگ که رژیم هیدرولیکی جریان آشفته زبر است می‌توان از تأثیر لزجت و عدد رینولدز صرف‌نظر کرد. بنابراین در این شرایط برای دبی رسوب ترکیب موج- جریان معادله ۳ را خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{h^2 V} = f_2 \left( \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{h}, Fr, S_t, \frac{a}{h}, \frac{\tau}{\rho V^2} \right) \quad (3)$$

#### تجهیزات آزمایشگاهی

در این پژوهش یک کانال با مقطع مستطیلی، به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۲ متر، ارتفاع ۰/۳ متر و شیب کف ۰/۰۰۱، در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران استفاده شد که شمای کلی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. کف و دیواره‌های این کانال از جنس پلکسی‌گلاس است. بازه‌هایی به طول ۳ متر در ابتدا و ۲ متر در انتهای کانال، به ارتفاع ۰/۰۷ متر بالا آورده شد تا محفظه‌ای به طول ۵ متر، عرض ۰/۲ متر و عمق ۰/۰۷ متر برای قرار دادن رسوبات مدنظر ایجاد شود. کف ناحیه بالا آمده در ابتدای کانال با چسباندن رسوبات از همان جنس استفاده شده در محفظه، زبر شد. ابعاد مخزن پایین‌دست نیز به طول ۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۷ متر است. برای قرار دادن لایه‌ای از آب ساکن بر روی رسوبات ریخته شده در محفظه، به‌منظور جلوگیری از شسته شدن ناگهانی رسوبات در اثر ورود جریان آب به کانال، از یک دریچه کشویی در پایین‌دست و یک صفحه در بالای دست کانال استفاده شد. برای تولید موج‌ها در جریان یکنواخت از یک دستگاه موج‌ساز استفاده شد که پره موج‌ساز در فاصله دو متری از ابتدای فلوم قرار داشت. موجی که با این موج‌ساز در این پژوهش ساخته شد، از نوع موج‌های منفرد بوده که می‌تواند مسافت طولانی را با کمترین تغییر شکل و استهلاک بپیماید.

تعیین تأثیر ارتفاع موج و سرعت متوسط جریان بدین صورت گزارش شده است که با افزایش ارتفاع موج، برای یک جریان ضعیف افزایش زیاد و برای یک جریان قوی افزایش کمی در نرخ انتقال رسوب ایجاد می‌شود، همچنین با افزایش سرعت متوسط جریان برای موج کوچک افزایش زیاد و برای موج‌های بزرگ افزایش کمی در نرخ انتقال رسوب به وجود می‌آید.

تاکنون مطالعات زیادی برای بررسی اثر موج روی پروفیل سرعت جریان، پروفیل غلظت رسوبات معلق و دبی رسوبات معلق توسط پژوهش‌گران مختلف انجام شده که هدف آن‌ها بررسی مورفولوژیکی ساحل‌های دریا و اقیانوس، نحوه انتقال رسوبات و ارائه معادله‌هایی برای دبی رسوب معلق ذرات بسیار ریزدانه بوده است. اما بررسی این اثر روی بار رسوب بستر، کمتر مطالعه شده که هدف آن‌ها نیز تعمیم نتایج به ساحل‌ها بوده است. به نظر می‌رسد می‌توان برای مشکل رسوبات ته نشین شده در کانال‌های آبیاری نیز از این ایده برای لایروبی استفاده کرد. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر ایجاد موج‌ها در جریان یکنواخت موجود در کانال‌های با مقطع اولیه صلب مستطیلی بر افزایش دبی رسوب بار بستر و در نتیجه لایروبی رسوبات ته‌نشین شده از کف کانال‌های آبیاری است. بر این اساس اگر جریان قدرت حمل رسوبات را تا مسافتی از مسیر کانال داشته باشد و سپس به دلیل اصطکاک و افت انرژی در این مسیر قدرت جریان کاهش یابد، پس می‌توان با راه‌حل‌های توان حمل رسوب توسط جریان را از این مکان به بعد نیز ایجاد کرد.

#### مواد و روش‌ها

##### تئوری جریان

به طور کلی دبی رسوب در ترکیب موج با جریان یکنواخت تابعی از پارامترهای معادله ۱ است:

$$Q = f_1(\tau, \rho, \rho_s, d_{50}, \mu, g, C, a, h, V) \quad (1)$$

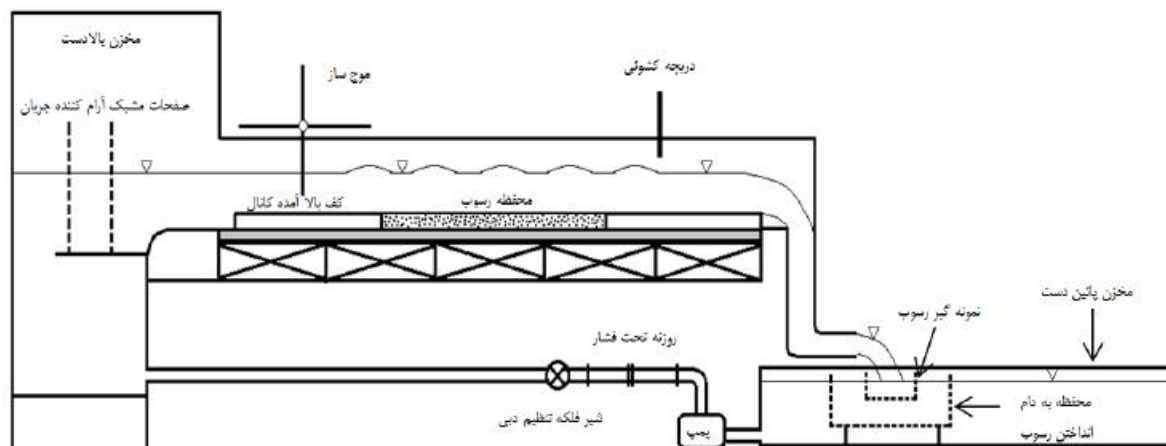
که در آن  $\tau$  تنش برشی جریان یکنواخت بر بستر،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s$  جرم مخصوص ذرات رسوب،  $d_{50}$  قطر میانه ذرات رسوب،  $\mu$  لزجت دینامیکی آب،  $g$  شتاب ثقل،  $C$  سرعت نسبی موج،  $a$  دامنه موج (ارتفاع موج برای موج‌های منفرد)،  $h$  عمق جریان و  $V$  سرعت متوسط جریان است.

در این جدول  $D_{15.9}$ ،  $D_{50}$  و  $D_{84.1}$  به ترتیب قطر ذراتی که ۱۵/۹، ۵۰ و ۸۴/۱ درصد ذرات رسوب از آنها کوچکتر باشند.  $C_u$  ضریب یکنواختی و  $\sigma_g$  انحراف معیار رسوبات است.

مشخصات هندسی رسوبات به کار رفته در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات رسوبات استفاده شده

No.	$D_{15.9}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{84.1}$ (mm)	$C_u$	$\sigma_g$
۱	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۴۳	۱/۵۲	۱/۲۹
۲	۰/۳۵	۰/۴۸	۰/۵۷	۱/۵۹	۱/۲۸



شکل ۱ پلان مدل آزمایشگاهی و متعلقات آن

کانال شده و شیب سطح رسوبات نیز برابر با شیب کف کانال شد. حال دریچه کشویی انتهای کانال را بسته و لایه‌ای از آب ساکن در کانال ایجاد می‌شد. پس از راه‌اندازی سیستم و برقراری جریان، با باز کردن شیر فلکه تنظیم دبی، میزان دبی مورد نظر با قرائت اختلاف ارتفاع پیزومتر روزنه تحت فشار و جای‌گذاری آن در معادله کالیبره شده برای محاسبه دبی، تنظیم می‌شد. با برقراری جریان در کانال، دریچه پایین‌دست کانال کم‌کم باز می‌شد تا جریان یکنواخت در کانال برقرار شود.

آزمایش‌ها برای دو دانه‌بندی، در پنج تنش متفاوت وارده از طرف جریان یکنواخت به بستر رسوب، همراه با اضافه نمودن موج انجام شد. با توجه به یکنواخت بودن جریان پایه، برای محاسبه تنش‌های جریان یکنواخت بر بستر رسوبی به صورت بی‌بعد، از معادلات ون‌راین (۱۹۹۳) برای نمودار آستانه حرکت شیلدز استفاده شد. اولین مرتبه تنش مورد نظر برای انجام آزمایش‌ها، تنش آستانه حرکت است. سپس آزمایش‌ها در چهار مرحله تنش برشی بستر بیش از مقدار آستانه حرکت در اثر جریان یکنواخت نیز (به صورت مضربی از تنش برشی آستانه حرکت) انجام شد.

برای اندازه‌گیری سطح آب و ارتفاع موج از عمق‌سنج با دقت ۰/۰۰۰۱ متر و برای اندازه‌گیری طول موج از عکس‌برداری از طول کانال هنگام عبور چند موج متوالی استفاده شد. برای جمع‌آوری رسوبات حمل شده برای محاسبه دبی رسوب، از یک توری جمع‌کننده رسوب با سوراخ‌های بسیار ریز استفاده شد. یک محفظه مشبک به طول ۰/۸ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر، برای جلوگیری از ورود رسوبات حمل شده توسط جریان به سامانه چرخشی جریان در زمان‌های بدون نمونه‌برداری در مخزن پایین‌دست قرار گرفت. برای انجام محاسبات و استخراج نتایج از دبی وزنی رسوبات که با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شده، استفاده شد.

نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بوده که ابتدا دانه‌بندی مورد نظر در محفظه آماده رسوب ریخته شده است. برای هر کدام از دانه‌بندی‌ها و قبل از هر آزمایش، رسوبات به طور کامل اشباع شدند و این حالت اشباع بودن به عنوان معیار تراکم در نظر گرفته شد. سپس سطح رسوبات با یک صفحه پلکسی تسطیح‌کننده به طور کامل صاف شده به نحوی که هم سطح با قسمت‌های ثابت ابتدا و انتهای



هم درحالت اعمال موج، در ناحیه رسوبی فرم بستر تشکیل شد. پس از برقراری جریان اصلی در حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه زمان داده شد تا فرم بستر از نظر ظاهری به تعادل برسد. هنگامی که فرم بستر شکل ثابتی به خود گرفت آنگاه به مدت پنج دقیقه (به علت بالا بودن دبی رسوب) یک نمونه از دبی رسوب به عنوان آزمایش شاهد گرفته شد. سپس موج به جریان اضافه شده و در این حالت نیز مدت لازم (در حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه) در نظر گرفته شد تا فرم بستر به شکل جدید متناسب با موج تولید شده درآید و بعد از ثبات نسبی شکل فرم بستر جدید نیز، به مدت پنج دقیقه از رسوبات حمل شده نمونه برداری انجام شد.

شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها نیز در جدول ۲ مشاهده می‌شود. تمام آزمایش‌ها در وضعیت جریان زیر بحرانی انجام شده است. از نظر رژیم هیدرولیکی جریان، کل آزمایش‌های انجام شده برای هر دو دانه‌بندی در رژیم جریان انتقالی قرار دارد. از نظر تقسیم جریان در آبراه‌های آبرفتی، آزمایش‌ها در رژیم جریان پایینی قرار گرفته است. پارامتر  $X_c$  در ستون آخر جدول ۲، مکانی است که عدد رینولدز محلی به حد بحرانی خود (۵۰۰ هزار) می‌رسد. در این نقطه با صرف نظر از ناحیه گذار به دلیل غیردائم بودن این ناحیه، جریان در داخل لایه مرزی از حالت آرام به حالت آشفتگی تبدیل می‌شود (شاگنزی و همکاران، ۲۰۰۵). همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، طول تکامل لایه مرزی برای جریان ماندگار یکنواخت در تمام آزمایش‌ها محاسبه شده و حداکثر مقدار آن  $2/2$  متر از ابتدای کانال است که به طور تقریبی با فاصله محل قرار گرفتن پره از ابتدای کانال برابر است. در نتیجه موج از مکانی تولید می‌شود که جریان در آن به‌طور تقریبی توسعه یافته است.

سایر پارامترهای این جدول شامل  $Q$  دبی جریان،  $\alpha_{cr}$  پارامتر بی‌بعد انتقال شیلدز یا تنش برشی بی‌بعد،  $\alpha_{cr}$  مضربی از تنش برشی بی‌بعد،  $Re^*$  عدد رینولدز برشی و  $Fr$  عدد فرود جریان است.

با محاسبه نسبت طول موج به عمق جریان  $(\lambda/h)$ ، برای هر دو دانه‌بندی قطر  $0/34$  و  $0/48$  میلی‌متر در چهار دبی اول، موج‌های از نوع موج‌های آب کم و در دبی آخر، موج‌های بینابین هستند. به طور کلی افزودن موج به جریان باعث می‌شود که جریان یکنواخت تبدیل به جریان نوسانی (یک جریان پایه به علاوه موج نوسانی) شود.

پژوهش‌گران مختلفی از جمله انگلند (۱۹۶۵)، بگنولد (۱۹۶۶) و ون‌راین (۱۹۸۴ ب) شرایطی از جریان را برای آستانه تعلیق معرفی کرده‌اند (ون‌راین، ۱۹۸۹). پارامتر آستانه تعلیق برای جریان در آزمایش‌های انجام شده این پژوهش از پارامترهای تعریف شده برای آستانه تعلیق توسط انگلند، بگنولد و ون‌راین کمتر است. پس شدت جریان در این آزمایش‌ها پایین‌تر از جریان آستانه تعلیق برای ذرات رسوب مورد استفاده بوده و در صورت وجود رسوب بار معلق شرایط برای ته‌نشینی آن‌ها فراهم می‌شد. بنابراین جریان از نظر شرایط رسوب‌گذاری مشابه وضعیت موجود در ناحیه رسوب‌گذار کانال‌های آبیاری است. در این پژوهش از روش اینشتین برای حذف اثر دیواره‌ها در محاسبه تنش برشی مؤثر استفاده شد. محاسبه دبی رسوب بی‌بعد بستر با استفاده از معادله ۴ انجام شده است.

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} \quad (4)$$

که در آن  $q_b$  نرخ انتقال بار بستر به ازای واحد عرض بر حسب کیلوگرم بر ثانیه بر متر؛  $s$  چگالی ذرات رسوب (۲/۶۷) و  $\Phi_b$  دبی رسوب بار بستر بی‌بعد.

اندازه‌گیری کمیت‌های مورد نیاز بدین شکل بود که برای هر دو دانه‌بندی در مرحله اول تنش، جریان با شیر فلکه تنظیم دبی، طوری تنظیم شد که رسوبات در حالت آستانه حرکت قرار گیرند. در این حالت از تنش برشی، یک آزمایش به عنوان آزمایش شاهد انجام می‌شد، بدین صورت که بعد از برقراری جریان مورد نظر، مدت زمان ۲۰ دقیقه برای نمونه برداری رسوبات شسته شده با جریان بدون موج در نظر گرفته می‌شد. پس از انجام آزمایش شاهد دو دسته آزمایش‌های اصلی انجام شده است. هر دسته از این آزمایش‌ها شامل یک ارتفاع خاص موج ۱ یا  $1/6$  سانتی‌متر و چهار سرعت متفاوت از موج بوده، که سرعت موج با استفاده از دوره تناوب و طول موج محاسبه شد. در آزمایش‌های اصلی نمونه برداری چند لحظه پس از برقراری موج‌های در نظر گرفته شده و زمان نمونه برداری ۲۰ دقیقه بود. سری دوم و سوم آزمایش‌ها برای هر دو دانه بندی به صورت مضربی از تنش برشی اعمال شده در آستانه حرکت، به همین صورت انجام شد. برای دو سری آخر آزمایش‌ها (دو مرحله آخر تنش برشی اعمال شده از طرف جریان یکنواخت بر بستر) در هر دو دانه‌بندی، به دلیل بالا بودن تنش برشی هم در حالت شاهد (بدون اعمال موج) و

که در آن  $f$  فرکانس مشخصه نوسان (موج) بر حسب معکوس ثانیه،  $L$  طول موج بر حسب متر،  $V$  سرعت متوسط جریان بر حسب متر بر ثانیه و  $C$  سرعت نسبی موج (سرعت موج نسبت به جریان) بر حسب متر بر ثانیه.

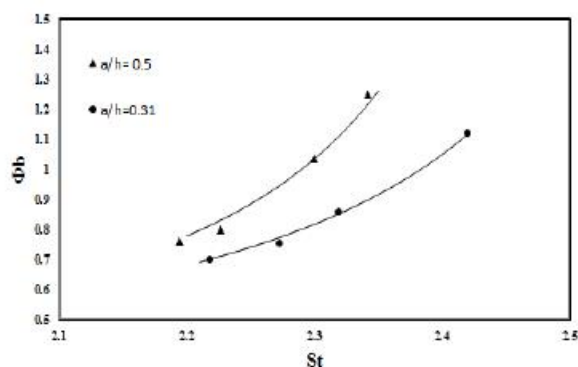
در نتیجه برای بررسی جریان در این حالت نیاز به محاسبه عدد بی بعد استروهل است که به صورت نسبت سرعت نوسان (سرعت نسبی موج) به سرعت متوسط جریان تعریف می‌شود و به شکل معادله ۵ است.

$$St = \frac{fL}{V} = \frac{C}{V} \quad (5)$$

جدول ۲ شرایط هیدرولیکی و محدوده اعداد بی‌بعد آزمایش‌ها

$D_{50}$ (mm)	$Q$ (lit/s)	$Y$ (m)	$V$ (m/s)	$\Theta$	$\alpha\Theta_{cr}$	$Re^*$	$Fr$	$X_c$ (m)
۰/۳۴	۱/۱	۰/۰۲۵	۰/۲۳	۰/۰۲۴۲	۱	۴۳/۸	۰/۴۶	۲/۲۱
۰/۳۴	۱/۶	۰/۰۳۲	۰/۲۶	۰/۰۲۸۲	۱/۱۶	۴۸/۳	۰/۴۶	۱/۹۴
۰/۳۴	۲/۱	۰/۰۳۷	۰/۲۸	۰/۰۳۰۳	۱/۲۵	۵۱	۰/۴۶	۱/۸
۰/۳۴	۳	۰/۰۴۷	۰/۳۱	۰/۰۳۳۶	۱/۳۹	۵۵/۶	۰/۴۶	۱/۶
۰/۳۴	۳/۳	۰/۰۵۱	۰/۳۳	۰/۰۳۴۶	۱/۴۳	۵۷	۰/۴۶	۱/۵۴
۰/۴۸	۱/۳	۰/۰۲۹	۰/۲۳	۰/۰۱۹۳	۱	۴۶/۵	۰/۴۴	۲/۱۶
۰/۴۸	۲	۰/۰۳۸	۰/۲۷	۰/۰۲۲۳	۱/۱۵	۵۱/۵	۰/۴۴	۱/۸۷
۰/۴۸	۲/۶	۰/۰۴۵	۰/۲۹	۰/۰۲۴۲	۱/۲۵	۵۴/۷	۰/۴۴	۱/۷۲
۰/۴۸	۳/۳	۰/۰۵۳	۰/۳۱	۰/۰۲۵۷	۱/۳۳	۵۷/۶	۰/۴۴	۱/۶
۰/۴۸	۴/۳	۰/۰۶۳	۰/۳۴	۰/۰۲۷۲	۱/۴۱	۶۱	۰/۴۴	۱/۴۷

طراحی شده آن است) با افزایش عدد استروهل، دبی رسوب بی‌بعد افزایش خواهد یافت.



شکل ۲ دبی رسوب بی‌بعد در برابر عدد استروهل به ازای ارتفاع نسبی موج‌ها برای قطر ۰/۳۴ میلی‌متر در  $\Theta = 1.16\Theta_{cr}$  (دبی رسوب عد شاهد  $\Phi_b = 0.3$ )

تأثیر جریان یکنواخت پایه بر دبی رسوب بستر موج-جریان

در شکل‌های ۳ و ۴ به ازای یک ارتفاع موج مشخص، تأثیر تغییر تنش برشی جریان یکنواخت به ازای عدد استروهل بر دبی رسوب بی‌بعد مشاهده می‌شود. این نمودارها برای دانه‌بندی ۰/۳۴ میلی‌متر و ارتفاع موج ۱ سانتی‌متر ترسیم شده‌اند. همین دسته نمودارها برای دانه‌بندی ۰/۳۴

### نتایج و بحث

در این پژوهش در مجموع ۸۰ آزمایش انجام شد. که ۴۰ آزمایش مربوط به دانه‌بندی ۰/۳۴ میلی‌متر و ۴۰ آزمایش نیز مربوط به دانه‌بندی ۰/۴۸ میلی‌متر است. نتایج آزمایش‌ها به صورت زیر بیان می‌شود.

#### تأثیر عدد استروهل بر دبی رسوب بستر موج-جریان

در شکل ۲ که به ازای یک تنش برشی جریان یکنواخت ثابت است، مشاهده می‌شود که برای هر مقدار از عدد استروهل، افزایش ارتفاع موج نسبی باعث افزایش دبی رسوب بی‌بعد می‌شود. شکل ۲ به‌عنوان یک نمونه از نمودارهای دانه‌بندی‌های ۰/۳۴ و ۰/۴۸ میلی‌متر آورده شده است. همین نوع شکل‌ها برای هر دو دانه‌بندی در تمام تنش‌های دیگر جریان یکنواخت نیز ترسیم شده است.

همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در یک تنش برشی بی‌بعد  $\alpha\Theta_{cr}$  ثابت (تنش برشی جریان مضرپی از تنش برشی آستانه حرکت)، برای یک ارتفاع موج نسبی ( $a/h$ ) مشخص (نسبت ارتفاع موج به عمق خالص جریان است که در کانال‌های آبیاری دارای رسوبات ته‌نشین شده، عمق خالص جریان کمتر از عمق اولیه

تأثیر افزایش عدد استروهمال در شیب افزایش دبی رسوب بستر بی بعد

از شکل ۲ مشاهده می‌شود، در یک تنش برشی معین به ازای یک افزایش معین عدد استروهمال، برای موج با ارتفاع نسبی بزرگ‌تر، میزان افزایش دبی رسوب بی بعد بستر بیشتر است یا به عبارت دیگر شیب افزایش نرخ دبی رسوب بی بعد بیشتر می‌شود.

تأثیر تغییر تنش‌های برشی جریان یکنواخت

از شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که در یک ارتفاع موج معین، به ازای یک افزایش مشخص عدد استروهمال، هرچه جریان در تنش برشی بالاتری باشد میزان افزایش دبی رسوب بی بعد بستر بیشتر است. به عبارت دیگر هرچه از تنش‌های برشی پایین‌تر به تنش‌های بالاتر می‌رویم، با ثابت بودن سایر متغیرها، شیب افزایش نرخ دبی رسوب بی بعد بیشتر می‌شود.

تأثیر افزودن موج‌های به جریان بر دبی رسوب بستر

تمام آزمایش‌ها در محدوده‌ای از عدد استروهمال انجام شده که در دامنه حداقل ۱/۹ تا حداکثر ۲/۶ بوده است. برای مقایسه اثر موج بر دبی رسوب بستر، مقدار عدد استروهمال ۲/۳ که در تمام آزمایش‌ها وجود داشته است، انتخاب شده و برای هر دو دانه‌بندی ۰/۳۴ و ۰/۴۸ میلی‌متر نسبت دبی رسوب بی بعد موج به دبی رسوب بی بعد جریان برحسب درصد در جدول ۳ آورده شده‌اند.

در این جدول  $St$  عدد استروهمال،  $a$  ارتفاع موج ایجاد شده است. دبی رسوب بی بعد موج، با تفاضل دبی رسوب بی بعد جریان یکنواخت از دبی رسوب بی بعد ترکیب موج-جریان به صورت معادله ۶ محاسبه می‌شود:

$$\Phi(w) = \Phi(c \& w) - \Phi(c) \quad (6)$$

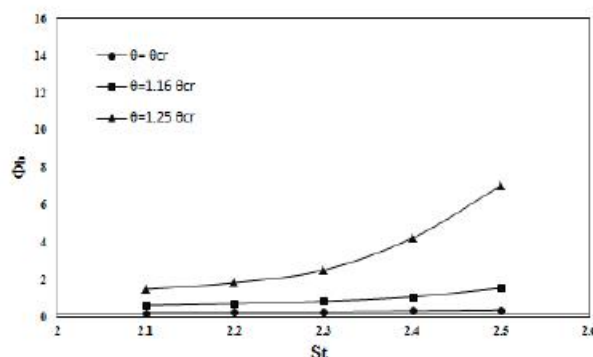
که در آن  $\Phi(w)$  دبی رسوب بی بعد موج؛  $\Phi(c \& w)$  دبی رسوب بی بعد ترکیب موج-جریان و  $\Phi(c)$  دبی رسوب بی بعد جریان یکنواخت.

از جدول ۳ نتایج زیر را می‌توان استخراج کرد:

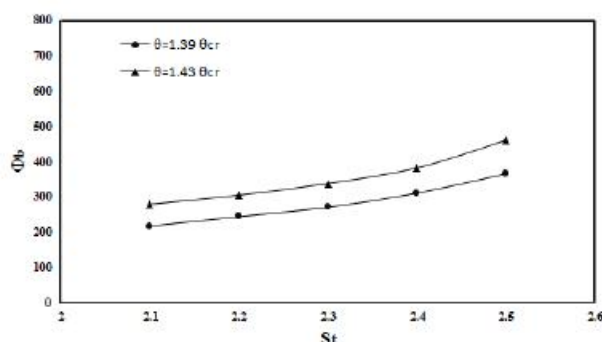
الف) به طور کلی افزودن موج به جریان باعث افزایش فاکتور اصطکاک و در نتیجه افزایش تنش برشی بستر و در نهایت افزایش دبی رسوب بستر جریان خواهد شد.

ب) به ازای یک مقدار تنش برشی ثابت اعمال شده توسط جریان و یک عدد استروهمال ثابت، هرچه ارتفاع موج

میلی‌متر و ارتفاع موج ۱/۶ سانتی‌متر و دانه‌بندی ۰/۴۸ میلی‌متر و ارتفاع موج‌های ۱ و ۱/۶ سانتی‌متر نیز به دست آمده است. همچنین دیده می‌شود که، در ارتفاع موج مشخص (a) و عدد استروهمال ثابت، هرچه جریان در مرحله تنش برشی بی بعد بالاتری باشد، میزان دبی رسوب بی بعد تولید شده بیشتر خواهد بود. یعنی در یک کانال با رسوبات ته‌نشین شده در کف و تولید موج‌های با ارتفاع و سرعت نسبی (عدد استروهمال) ثابت، هرچه دبی جریان بیشتر باشد (تنش جریان یکنواخت بیشتر)، مقدار دبی رسوب بیشتری خواهیم داشت، که برای ارتفاع موج کوچک‌تر، درصد این افزایش دبی رسوب، نسبت به همان ارتفاع موج کوچک در تنش پایین‌تر جریان، بیشتر خواهد بود که با نتیجه مطالعه هاوینگا (۱۹۹۲) هماهنگی دارد.



شکل ۳ دبی رسوب بی بعد در برابر عدد استروهمال به ازای سه تنش اول جریان یکنواخت برای قطر ۰/۳۴ میلی‌متر در ارتفاع موج ۱ سانتی‌متر



شکل ۴ دبی رسوب بی بعد در برابر عدد استروهمال به ازای دو تنش آخر جریان یکنواخت برای قطر ۰/۳۴ میلی‌متر در ارتفاع موج ۱ سانتی‌متر



برشی جریان آنقدر افزایش می‌یابد که ذرات به‌خودی خود با سرعت بالا حرکت می‌کنند و بنابراین تأثیر موج بر افزایش تنش برشی بستر کمتر می‌شود. دلیل دیگری که در آزمایش‌های حاضر برای این امر می‌توان بیان کرد شاید این باشد که برای هر دو دانه‌بندی موج‌هایی که در سطح تنش برشی چهارم تولید شدند جز موج‌های کم‌عمق محاسبه شدند. ولی موج‌های سطح تنش برشی پنجم جز موج‌های بینابین به دست آمدند.

و) با افزایش قطر متوسط دانه‌بندی، به ازای یک سطح تنش برشی جریان برابر و عدد استروهمال ثابت و ارتفاع موج برابر، اثر موج بر نسبت دبی رسوب بی‌بعد موج به جریان، کاهش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان به ویژگی ظاهری ذرات رسوب غیرچسبنده، یعنی وزن آن‌ها ربط داد.

ز) در محدوده آزمایش‌های این پژوهش می‌توان گفت که ایجاد موج در جریان یکنواخت می‌تواند دبی رسوب بستر را در کانال‌های صلب مستطیلی تا حدود ۲۸۰٪ افزایش دهد.

#### نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ایجاد موج‌های باعث افزایش دبی رسوب بستر خواهد شد. به ازای سایر پارامترهای آزمایشگاهی ثابت، افزایش هر کدام از پارامترهای عدد استروهمال (سرعت نسبی بی‌بعد)، ارتفاع نسبی موج و تنش برشی جریان یکنواخت (افزایش دبی جریان)، موجب افزایش مقدار دبی رسوب بستر خواهد شد. نتایج همچنین نشان داد که در محدوده آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، ایجاد موج‌ها در جریان می‌تواند دبی رسوب بستر را در کانال‌های صلب مستطیلی تا حدود ۲۸۰٪ افزایش دهد. همچنین با توجه به اینکه اثر ایجاد موج‌ها در جریان یکنواخت بر دبی بار بستر مشاهده شد، در صورتی که بتوان سایر شرایط و امکانات مورد نیاز برای اجرای این روش را در شبکه‌های آبیاری مطالعه و بررسی نمود، به نظر می‌رسد می‌توان از این روش به‌عنوان راه حلی برای لایروبی رسوبات ته‌نشین شده در کف کانال‌های آبیاری و یا حداقل به تأخیر انداختن زمان پرشدن آن‌ها استفاده کرد، که در صورت قابلیت اجرای آن روشی جدید برای لایروبی غیرمکانیکی رسوبات ته‌نشین شده در کانال‌ها معرفی شده است. مزایای این روش عدم نیاز و یا کاهش نیاز به لایروبی مکانیکی و در نتیجه از بین بردن پیامدهای

افزایش یابد مقدار دبی رسوب مربوط به موج افزایش می‌یابد (نسبت دبی رسوب بی‌بعد موج به دبی رسوب بی‌بعد جریان افزایش می‌یابد)، زیرا هرچه ارتفاع موج بیشتر شود فاکتور اصطکاک موج-جریان بیشتر می‌شود و در نتیجه تنش برشی ترکیب موج-جریان افزایش می‌یابد.

ج) به ازای یک ارتفاع موج ثابت و عدد استروهمال ثابت، در آزمایش‌های سه تنش برشی اول جریان نسبت به آزمایش‌های دو تنش برشی آخر جریان درصد افزایش بار رسوب بی‌بعد ناشی از اعمال موج به جریان بیشتر است.

د) در سه سری تنش‌های ابتدایی جریان که فرم بستر ایجاد نمی‌شود، به ازای یک ارتفاع موج ثابت و عدد استروهمال ثابت، هرچه جریان از تنش برشی پایین‌تر به سمت تنش برشی بالاتر می‌رود نسبت دبی رسوب بی‌بعد بار بستر موج به دبی رسوب بی‌بعد بار بستر جریان یکنواخت افزایش می‌یابد. علت این امر این است که در تنش برشی آستانه حرکت تعدادی ذرات در حال حرکت هستند که افزودن موج باعث افزایش تنش برشی بستر و در نتیجه افزایش سرعت حرکت آن‌ها می‌شود و تعدادی ذرات نیز هنوز به حرکت در نیامده‌اند که در صورت دریافت مقداری انرژی، آن‌ها نیز به حرکت در می‌آیند. افزودن موج برای این ذرات باعث می‌شود که این ذرات شروع به حرکت کنند. هرچه تنش بیشتری از طرف جریان به بستر اعمال شود ذرات بیشتری در حال حرکت و ذرات بیشتری نیز در آستانه حرکت هستند. در نتیجه، حضور موج در این سطح تنش برشی، تأثیر بیشتری بر افزایش نسبت دبی رسوب موج به جریان دارد. این افزایش تأثیر موج همراه با افزایش تنش برشی بستر جریان یکنواخت همچنان ادامه خواهد داشت تا زمانی که تنش برشی بستر به حدی برسد که بستر در آستانه تشکیل فرم بستر قرار بگیرد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در آزمایش‌های در این پژوهش بیشترین تأثیر موج بر افزایش دبی رسوب بستر نسبت به حالت شاهد، در بالاترین تنش برشی بستر صاف، اتفاق افتاده است.

ه) در دو سری تنش‌های جریان آخر که فرم بستر ایجاد می‌شود، به ازای یک ارتفاع موج ثابت و عدد استروهمال ثابت، هرچه جریان به سمت مقادیر تنش برشی بالاتر می‌رود، تأثیر موج بر نسبت دبی رسوب موج به دبی رسوب جریان یکنواخت، کاهش می‌یابد. شاید علت آن این باشد که پس از تشکیل فرم بستر با افزایش دبی جریان، تنش



ناشی از آن، از جمله پایین آوردن هزینه‌های سنگین، ممانعت از خسارت‌های فیزیکی وارده به شبکه و تعطیلی آن است.

جدول ۳ نسبت دبی رسوب بی‌بعد موج به جریان بر حسب درصد برای قطرهای ۰/۳۴ و ۰/۴۸ میلی‌متر

No.	St	a (cm)	D50=0.34mm	D50=0.34mm	D50=0.48mm	D50=0.48mm
			$\Theta = \alpha \Theta_{cr}$	$\Phi(w) / \Phi(c)$	$\Theta = \alpha \Theta_{cr}$	$\Phi(w) / \Phi(c)$
۱	۲/۳	۱	۱	۱۳۵/۶	۱	۱۰۵/۷
۲	۲/۳	۱/۶	۱	۲۳۲/۶	۱	۲۱۷/۴
۳	۲/۳	۱	۱/۱۶	۱۷۶	۱/۱۵	۱۳۲/۸
۴	۲/۳	۱/۶	۱/۱۶	۲۴۹/۳	۱/۱۵	۲۲۸/۳
۵	۲/۳	۱	۱/۲۵	۱۹۱	۱/۲۵	۱۴۳/۵
۶	۲/۳	۱/۶	۱/۲۵	۲۸۱	۱/۲۵	۲۵۳/۹
۷	۲/۳	۱	۱/۳۹	۱۲۳	۱/۳۳	۱۰۹
۸	۲/۳	۱/۶	۱/۳۹	۲۳۸/۲	۱/۳۳	۲۰۵/۸
۹	۲/۳	۱	۱/۴۳	۱۰۵/۵	۱/۴۱	۷۶/۴
۱۰	۲/۳	۱/۶	۱/۴۳	۲۱۰/۴	۱/۴۱	۱۱۴/۴

- Nap E. and Van Kampen A. 1988. Sediment transport in irregular non-breaking waves with a current. Department of Coastal Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 115 p.
- Nieuwjaar M. and Van Der Kaaij T. H. 1987. Sediment concentrations and transport in irregular non breaking waves with a current. Department of Coastal Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 98 p.
- Shaughnessy E. J. Jr. Katz I. M. and Schaffer J. P. 2005. Introduction to Fluid Mechanics. New York, Oxford University Press. 1018 p.
- Van Rijn L. C. 1989. Handbook of Sediment Transport by Current and Waves. Delft Hydraulics, Delft, the Netherlands. 125 p.
- Van Rijn L. C. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands. 690 p.
- Worapansopak J. 1992. Control of sediment in irrigation Schemes. M.Sc. Thesis, IHE, Delft, the Netherlands. 162 p.

#### منابع

- امید م. ح. ۱۳۸۶. گزارش نهایی طرح بررسی علل و عوامل رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبیاری کشور. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی. دانشگاه تهران. ۹۸ ص.
- Bailard J. A. 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. Journal of Geophysical Research: Oceans. 86(1):10938-10954.
- Bijker E. W. 1971. Longshore transport computations. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. 97(4):687-701.
- Dahmen E. R. 1994. Lecture notes on canal design. IHE, Delft, the Netherlands. 10 p.
- Depeweg H. and Mends N. 2007. A New Approach to Sediment Transport in the Design and Operation of Irrigation Canals. Taylor & Francis. 226 p.
- Grant W. D. and Madsen O. S. 1976. Quantitative description of sediment transport by waves. 15th Coastal Engineering Conference. 1093-1112.
- Havinga F. J. 1992. Sediment concentrations and transport in case of irregular non-breaking waves with a current. Department of Coastal Engineering, Parts E, F and G, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 102 p.
- Jepsen R. A. Roberts J. D. Kearney S. P. Dimiduk T. G. O'Hern T. J. and Gailani J. Z. 2011. Shear stress measurements and erosion implications for wave and combined wave-current generated flows. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE. 138(4):323-329.