

## مقدمه

احداث سد های کوتاه و متوسط در مناطق مختلفی از کشور بخصوص در سال های اخیر مورد توجه برنامه ریزان وزارتخانه های نیرو و جهاد کشاورزی قرار گرفته است. این گونه سدها با اهداف مختلف، ذخیره سازی رواناب ناشی از سیلاب ها، تغذیه مصنوعی آبخوان ها و یا کنترل سیلاب با رویکرد حفاظت از سازه های کاهش فرسایش به کار گرفته می شوند. بخش عمده ای از این سدها بر روی رودخانه های فصلی در مناطق مرکزی، شرق و جنوب ایران قرار دارند که مسئول جمع آوری رواناب ناشی از رگبارهای تندی که معمول این مناطق است، می باشند. حتی سدهای تاخیری احداث شده در سرشاخه رودخانه های دائمی نیز به دلیل داشتن شیب تند همیشه مواجه با سیلاب های طغیانی می باشند. حرکت این سیلاب ها باعث انتقال رسوب به صورت غیرماندگار می گردد که به طور قطع با میزان انتقال رسوب در حالت ماندگار متفاوت است. از آنجا که عمر مفید این سدها بستگی کامل به میزان رسوب های ته نشین شده دارد، برآورد دقیق حرکت رسوب در اثر آبنمود سیلاب های طغیانی و چگونگی ترسیب آنها ضروری می باشد. عدم شناخت ویژگی های چنین سیلاب هایی و تاثیر آن بر بستر موجب شد، خسارت قابل توجهی از نظر جانی و مالی پس از سیل سال ۱۳۸۰ در مناطق بالا دست گرگان رود بوجود آید، چنانکه گابیون های احداثی در سال اول با وقوع سیل ۸۱ از رسوب پر شده و جریان سیلاب توانست سنگ هایی با قطر نزدیک به ۵۰ سانتیمتر را به پایین دست منتقل کند. نکته مهم دیگر اینکه تاکنون دستورالعملی از طرف سازمان های مسئول در ارتباط با شیوه مطالعه چنین آبراهه هایی تهیه نگردیده که این خود از دلایل بی توجهی در این زمینه بوده و می تواند احداث سدهای کوتاه را برای ذخیره سازی آب حاصل از سیلابها از نظر تجمع رسوب با مشکل روبرو نماید.

تاکنون مطالعات در رابطه با مکانیزم حرکت رسوب در رودخانه ها و تحت شرایط ماندگار بسیار گسترده انجام شده است ولی در خصوص انتقال رسوب تحت شرایط غیرماندگار مطالعات بسیار اندک بوده که چکیده ای از این مطالعات در زیر ارایه می گردد. سیلابهای ناگهانی توسط بارشهای با شدت زیاد و مدت کم ایجاد می شوند. برانسون و همکاران [۲]، کوهن و همکاران [۴] نیز در مورد انتقال رسوب تحت سیلاب ناگهانی در بعضی از رودخانه های منطقه اسرائیل مطالعه کرده نتایج نشان داد جریان در این آبراهه ها دارای زمان کم و حداکثر دبی نیز دوام کمی داشته بطوری که آبنمود

## بررسی آزمایشگاهی عوامل موثر بر انتقال رسوب در

## شرایط سیلاب طغیانی

کازم اسماعیلی<sup>۱</sup>محمود شفاعی بجنستان، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup>

## چکیده

این پژوهش با هدف بررسی مکانیزم انتقال رسوب در رودخانه فصلی ناشی از سیلاب ناگهانی بصورت مدل سازی شرایط طبیعی در یک فلوم آزمایشگاهی با قابلیت شیب پذیری انجام شد. از آنجا که سیلاب جریان غیر ماندگار است برای تولید آن مخزنی در بالادست کانال نصب گردید. طرح مخزن امکان ایجاد آبنمودهای با دبی حداکثر یکسان و زمان پایه متفاوت را فراهم می نمود. قطر متوسط ذرات انتخابی ۱/۵ میلیمتر، دبی ها بین ۲۵ تا ۴۲ لیتر بر ثانیه بر واحد عرض، زمان پایه نیز متفاوت انتخاب شد. نتایج نشان می دهد در آزمایش های با آبنمودهای مشابه از نظر دبی حداکثر، دبی رسوب متوسط با افزایش زمان پایه آبنمود روند کاهشی داشته، ولی میزان رسوب انتقالی همواره نسبت به شرایط ماندگار بیشتر است. با طولانی شدن زمان پایه آبنمود سیلاب دبی متوسط بار کف انتقالی به مقدار بار کف انتقال یافته در شرایط ماندگار نزدیک تر می شود. مدت زمان صعود شاخه بالارونده آبنمود جریان نیز بر میزان بار کف انتقالی موثر است. تغییر شکل بستر ناشی از جابجایی ذرات کف در ابتدای بستر بیشترین مقدار را دارد. از اینرو مقاومت ناشی از تغییر شکل بستر در برابر جریان بشدت افزایش یافته و می تواند بر میزان رسوب انتقالی موثر باشد.

واژه های کلیدی: رودخانه فصلی، جریان غیرماندگار رسوب، سیلاب طغیانی، بررسی آزمایشگاهی، بار کف

۱- عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد و دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
Esmaili@ferdowsi.um.ac.ir

۲- به ترتیب استاد و دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
kashefipour@excite.com , m\_shafai@yahoo.com

دارای راس تا حدودی تیز می باشد.

و نیومکزیکو عنوان نمود کمبود پوشش گیاهی موجب گشته که روانابهای بوجود آمده در فاصله کوتاهی به سیلاب تبدیل گردد. لین و همکاران [۹] پژوهش هایی را درمورد ارتباط آبنمود ورودی و خروجی جریان در رودخانه های فصلی انجام داده و در آن به توسعه مدل پیش بینی آبنمود خروجی از روی حجم جریان ورودی پرداخت که در آن با استفاده از معادله همبستگی خطی آبنمود خروجی از روی آبنمود ورودی پیش بینی شد. رابطه همبستگی بدست آمده دارای متغیرهای محدود و با اهمیت بود. نتایج کار نشان داد رابطه بسیار خوبی بین انتقال افت و حجم جریان ورودی وجود دارد. همچنین آبنمود خروجی همبستگی خوبی را براساس توزیع گاما مشخص می کرد.

در بسترهای آبرفتی ضخامت بارکف قابل حمل به ضخامت قشری از سطح بستر بستگی دارد که در بسیاری از مواقع درحال انتقال است پارکر [۱۳]. این ضخامت به حدود سه برابر ضخامت قطر ذرات در این نوع بسترها می رسد سامر و همکاران [۱۷]. نتایج پژوهش های آزمایشگاهی لی و همکاران [۸] در مورد روند انتقال رسوب کف در شرایط جریان غیر ماندگار نشان می دهد بین دبی حداکثر آبنمود جریان و حداکثر آبنمود رسوب تاخیر وجود دارد که ناشی از تاثیر اندازه قطر ذرات است. این میزان تاخیر حدود ۶-۱۵٪ از دوره آبنمود را تشکیل می دهد. با تاخیر ایجاد شده میزان بار رسوبی کف در شرایط غیر ماندگار بیشتر از مقادیر پیش بینی شده از روش های ماندگار بوده و مقادیر حداکثر دبی رسوب کف نیز بیشتر از مقادیر پیش بینی شده می باشد. همچنین این نتایج نشان می دهد نسبت مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه گیری شده برای تمامی آبنمودهای بدست آمده تقریباً ثابت بوده است. در آزمایشات انجام شده مقدار کار انجام گرفته توسط جریان برای تمامی حالت های ثابت در نظر گرفته شد. پژوهش های گرف و سونگ [۷] منتهی به ارایه یک مدل ریاضی برای برآورد بارکف گردید.

### عواملهای بدون بعد

تغییرات عمق و فرم کف در بسترهای تشکیل شده از مواد متحرک در شرایط غیرماندگار بصورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} \neq 0 \quad (3)$$

که در آن  $Q$  دبی جریان،  $h$  عمق جریان،  $Z_b$  تراز بستر،  $t$  زمان است. رابطه های اخیر حاکی از آن است که دبی در مدت عبور جریان در حال تغییر می باشد. تاکنون برآورد بارکف براساس شرایط ماندگار جریان انجام می گرفته که برای شرایط ناپایدار از دقت کافی برخوردار نمی باشد. عامل های متعددی بر روند انتقال بارکف موثر

رید و همکاران [۱۴] اثر جریان، بصورت سیلاب ناگهانی را در مورد انتقال بارکف در آبراهه های بیابانی با احداث یک بازه پژوهشی ارزیابی شده مورد توجه قرار دادند، نتایج نشان داد تغییرات زیادی در بارشهای چنین مناطقی وجود دارد. لی و همکاران [۸] پژوهش های آزمایشگاهی در مورد روند انتقال بارکف تحت جریان غیرماندگار انجام دادند. لیال [۱۰] در مورد اثر موج حاصل از شکست سد که بصورت پدیده ای غیرماندگار عمل می نماید بر تغییرات ایجاد شده روی یک بستر قابل حرکت (مواد شنی و مواد سبک متخلخل) بررسی نمود. نتایج نشان داد که پیشانی موج بطور واضحی در بستر متخلخل و دانه بندی سبکتر نسبت به بسترهای شنی و ثابت کوچکتر است. کوهن و لارون [۴] اولین مطالعات محاسباتی را در مورد هیدرولیک جریان روی کف های متحرک و ارزیابی انتقال رسوب و تغییرات بستر را از طریق مدل رایانه ای انجام دادند ایشان یک مدل نظری بر مبنای اصل بقای جرم در آبراهه های کم عمق ارایه کرده نتایج نشان داد که با شکست سد در ابتدای بستر، فرسایش و شستشوی شدیدی بوجود آمده و همچنان که موج به سمت پایین دست منتقل می گردد از شدت آن کاسته می شود. شرایط فوق موجب شستشوی زیاد در اطراف سد می گردد. کالیفیو و الیانی [۳] نیز در زمینه اثر جریان های ناگهانی بر بسترهای متحرک، پژوهش هایی را انجام داده و یک مدل ریاضی برای پیش بینی چگونگی تغییرات بستر پس از رها شدن آب ناشی از شکست سد بصورت یک موج قوی که پدیده ای غیرماندگار از نظر هیدرولیکی می باشد ارایه کردند. ایشان برای تشکیل مدل مناسب یک دستگاه چهار معادله یک بعدی انتخاب کرده و آزمایش هایی را در روی دو بستر تر و خشک انجام دادند. فراکارلو و آرمانیی [۶] نیز کار مشابه ای را در تهیه یک مدل ریاضی برای بررسی شرایط بستر پایین دست سد انجام دادند. اسپینون [۱۵] جریان ناشی از شکست یک سد را روی بستر قابل حرکت و تخت مورد بررسی قرار داده از طریق عکس برداری و قرار دادن فریم های بدست آمده در فواصل زمانی کوتاه روند پیشروی سیل ایجاد شده در اثر خرابی سد را تحلیل نمودند نتایج حاکی از جبهه قوی پیشروی در ابتدای شکست سد می باشد که می تواند فرسایش قابل ملاحظه ای در بستر ایجاد کند. هامس و ریچارد [۵] جمع بندی در مورد انتقال افت ناشی از یک سیلاب سریع<sup>۱</sup> را شبیه سازی کرد برای این کار با استفاده از یک مدل دستی، رگباری ناگهانی ایجاد کرده با بکارگیری معادله های سنت ونانت و ترکیب آن با معادله ریچارد، افت ناشی از نفوذ را در کف بستر بدست آورد. نتایج مدل او پویایی انتقال افت را در هنگام عبور جریان در پایین دست شبیه سازی می کند. سیمون [۱۶] با اندازه گیری غلظت رسوب های موجود بصورت بار معلق که مقدار آن در بعضی از موارد به  $100000 \text{ mg/l}$  می رسید در نقاطی مانند آریزونا

1- Flash Flood

ماندگاری جریان،  $Re$  عدد رینولدز،  $\rho_s$  و  $\rho$  بترتیب جرم مخصوص ذرات و جرم مخصوص آب،  $d$  قطر ذره،  $U_0$  سرعت جریان پایه،  $R_{h0}$  شعاع هیدرولیکی جریان پایه،  $\mu$  لزجت مطلق آب،  $\Delta y$  اختلاف بین عمق جریان پایه و عمق جریان در هر لحظه،  $\Delta T$  زمان پایه آبنمود،  $\gamma$  و  $\gamma'$  سونگ [7] معادله های حاکم بر جریان غیرماندگار و رسوب را بصورت زیر بیان می کنند.

$$\alpha \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial(uy)}{\partial x} + \alpha \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

که در آن

$$\alpha = \frac{(L_0/U_0)}{T_0} \quad (9)$$

معادله مومنتوم

$$(10)$$

$$\frac{y_0}{L_0 S_0} \{ Fr^2 \alpha \frac{\partial u}{\partial t} + (2\beta-1) Fr^2 u \frac{\partial u}{\partial x} + [(\beta-1) \frac{Fr^2 u^2}{y} +$$

$$(2k-k') \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial z'}{\partial x} \} = 1 - \frac{1}{S_0} S_f$$

معادله پیوستگی رسوب

$$\alpha \frac{\partial z}{\partial t} + \alpha \gamma \frac{\partial((C/C_0)y)}{\partial t} + \gamma \frac{\partial((C/C_0)yu)}{\partial x} = 0$$

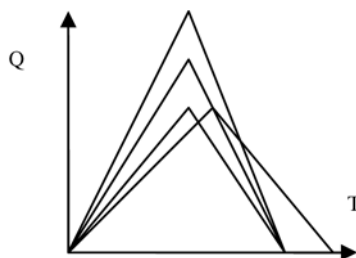
$$\gamma = \frac{C_0}{(1-\lambda)} \quad (11)$$

در این رابطه ها

$y_0$  عمق جریان پایه،  $S_f$ ،  $S_0$  بترتیب شیب بستر و شیب خط انرژی،  $L_0$  مشخصه طول مربوط به بستر،  $u$  سرعت جریان،  $\beta$  ضریب مومنتوم جریان،  $C$  دبی بارکف در جریان غیردایمی،  $C_0$  دبی بارکف در جریان دایمی،  $y$  عمق جریان،  $k$ ،  $k'$  ضریب می باشند.

### کارهای آزمایشگاهی

آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه مشهد انجام شد. برای تولید جریان غیرماندگار یک تانک در مسیر سامانه مدار بسته جریان کانال قرارداد شد، با نصب ابزار لازم در سامانه تانک امکان تولید جریان غیرماندگار (آبنمود) به ازاء هر زمان پایه مورد نیاز فراهم آمد. نمونه آبنمودهای تولیدی در شکل ۱



شکل ۱- نمونه آبنمودهای تولیدی

هستند که آنها را می توان در پنج گروه بدون بعد تفکیک نمود،  $\gamma$  و سونگ [7]. خواص سیال ( $\mu$ ,  $\rho$ ,  $S_g$ ) بترتیب وزن مخصوص، جرم و لزجت سیال، عامل های خواص موج ( $\Delta t$ ,  $A$ ,  $y_m$ ) بترتیب عمق حداکثر، حجم آب زیر آبنمود در واحد عرض و زمان پایه آبنمود و عامل های مربوط به ویژگی های کانال ( $U^*b$ ,  $\eta$ ,  $\eta_a$ ,  $\eta_x$ ,  $\eta'$ ) بترتیب سرعت برشی، شیب، عرض، خصوصیات طول کانال سایر عامل ها در زیر تعریف شده اند. ویژگی های رسوب ( $\rho_s$ ,  $d_s$ ,  $G_c$ ,  $G_s$ ,  $\delta p$ ,  $X$ ,  $\lambda$ ) بترتیب قطر و جرم مخصوص ذرات، سایر عامل ها در زیر تعریف شده اند و جریان پایه ( $U_0$ ,  $Z_0$ )، بترتیب عمق، سرعت جریان پایه، تراز کف بستر،  $t$  زمان  $x$  فاصله.

عامل های  $G$  عامل درجه بندی و یکنواختی ذرات رسوب،  $G_s$  عامل شکل ذرات رسوب،  $G_c$  عامل مربوط به غیر یکنواختی ذرات رسوب در طول محیط خیس شده،  $X$  چسبندگی ذرات رسوب،  $\lambda$  تخلخل ذرات بستر،  $\delta p$  عامل مربوط به نفوذپذیری ذرات رسوب و یا دیواره های کانال،  $\eta$  ضریب شکل هندسه مقطع،  $\eta_a$  عامل تصحیح محور طولی کانال و  $\eta'$  عامل تغییر مقطع عرضی کانال در شرایط آزمایشگاهی برابر یک در نظر گرفته می شوند.

در آزمایش های انجام گرفته بسیاری از عامل های ذکر شده ثابت هستند لذا در تحلیل ابعادی شرکت نمی نمایند. گروه های بدون بعد عبارتند از:

$$\left( \frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right) = f \{ Fr, Re, \frac{y_m}{y_0} HG, \frac{A}{y_0 L_0}, \frac{L_0}{y_0}, \frac{b}{y_0}, S_0, \tau_c^*, \eta, \eta_a, \eta_x, \eta', ds, y_0, S_g, \left. G_c, G_s, G, S_s, \lambda, X, \frac{Z_b}{y_0}, \frac{x}{y_0}, \frac{t}{y_0/U_0} \right\}$$

$$\left( \frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right) = f \left\{ Fr, \Gamma_{HG}, \frac{A}{y_0 L_0}, \frac{L_0}{y_0}, \frac{b}{y_0}, S_0, S_s, n, \frac{ds}{y_0}, \frac{Z_0}{y_0}, \frac{x}{L_0}, \lambda, \frac{t}{y_0/U_0} \right\}$$

$$\left( \frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right) = f \left\{ Fr, \Gamma_{HG}, \frac{A}{y_0 L_0}, \frac{L_0}{y_0}, \frac{b}{y_0}, S_0, S_s, n, \frac{ds}{y_0}, \frac{Z_0}{y_0}, \frac{x}{L_0}, \lambda, \frac{t}{y_0/U_0} \right\}$$

$$\left( \frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right) = f \left\{ Fr, \Gamma_{HG}, \frac{A}{y_0 L_0}, \frac{L_0}{y_0}, \frac{b}{y_0}, S_0, S_s, n, \frac{ds}{y_0}, \frac{Z_0}{y_0}, \frac{x}{L_0}, \lambda, \frac{t}{y_0/U_0} \right\}$$

$$\left( \frac{y}{y_0}, \frac{U}{U_0}, \frac{Z}{Z_0}, C \right) = f \left\{ Fr, \Gamma_{HG}, \frac{A}{y_0 L_0}, \frac{L_0}{y_0}, \frac{b}{y_0}, S_0, S_s, n, \frac{ds}{y_0}, \frac{Z_0}{y_0}, \frac{x}{L_0}, \lambda, \frac{t}{y_0/U_0} \right\}$$

از مجموعه گروه های بدون بعد ذکر شده گروه های زیر در زمینه انتقال بار کف تحت جریان غیرماندگار از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gy_0}} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho U_0 R_{h0}}{\mu} \quad (6)$$

$$\Gamma_{HG} = \frac{1}{U_0} \times \frac{\Delta y}{\Delta T} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $\tau_c^*$  عامل شیلدز،  $Fr$  عدد فرود،  $\Gamma_{HG}$  عامل غیر

جدول ۱ - خلاصه شرایط آزمایشی سری A

حداکثر عمق فرسایش mm	حداکثر ارتفاع تلمبارش mm	عمق جریان پایه mm	دبی جرمی ذرات g/s/m	زمان پایه آبنمود sec	دبی حداکثر lit/s/m
		۰	۶۲/۱۲	۲۰	۴۲/۲
		۰	۶۰	۱۸	۴۲/۲
۱۰	۵/۵	۰	۳۱/۵	۳۰	۴۲/۲
		۰	۴۴/۴	۲۵	۴۲/۲
		۰	۳۳/۸	۳۵	۴۲/۲
۱۳	۶/۵	۰	۵۵/۱۱	۲۴	۴۲/۲
		۰	۲۹/۷	۲۷۰	۴۲/۲
		۰	۲۵/۲	۹۰۰	۴۲/۲
		۰	۲۵/۶	۴۶	۴۲/۲
		۰	۳۲/۶۴	۲۲	۴۳/۸
		۰	۵۷/۶	۲۲	۴۳/۸
		۰	۴۲/۲	۱۸	۴۳/۸
		۰	۳۳/۳	۳۰	۴۳/۸
		۰	۴۸/۸	۴۱	۴۳/۸
		۰	۲۶/۱	۶۰	۴۳/۸
		۰	۴۰/۶	۶۸۸	۴۳/۸
		۰	۴۸/۸	۳۰	۴۳/۳
		۰	۳۴/۶	۴۰	۴۳/۳
		۰	۲۹/۵	۵۶	۴۳/۳
		۰	۱۳/۹	۶۰	۳۵/۲
		۰	۱۶/۱	۴۰	۳۵/۲
		۰	۱۷/۵۳	۳۰	۳۵/۲
۸/۵	۵	۹	۲۰/۵	۴۰	۳۵/۲
۱۳	۳	۹	۳۸/۲	۴۰	۴۱/۷
۱۱	۵	۹	۲۹/۴	۴۰	۴۱/۷
۱۳	۵/۵	۹	۳۳/۶	۴۰	۴۲/۲
۷	۵	۱۲	۳۰/۴	۲۰	۴۲/۲
۲۶	۱۰	۷	۳۸	۴۰	۴۱/۷
۳۵	۱۰	۷	۳۳/۴	۴۰	۴۲/۸

مشاهده می شود. کانال آزمایشی، مستطیلی به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و عرض ۳۰ سانتیمتر با دیواره های شیشه ای که امکان رویت جریان را در هنگام آزمایش فراهم می سازد. کف کانال از جنس فلز صیقلی و رنگ شده، کانال دارای قابلیت شیب پذیری و سامانه اندازه گیری دبی در آن روزنه که قبلا واسنجی شده است [۱]. ذرات بکار رفته در آزمایش ها از جنس کوارتز با دانه بندی یکنواخت با قطر متوسط (d50)، ۱/۵ میلیمتر و ضریب یکنواختی (Cu)، ۱/۱ و ضخامت بار بستر حدود ۶۸ میلیمتر انتخاب شد، در این آزمایش ها جریان آب تمیز در کانال برقرار شده و لذا تغذیه از بالادست وجود نداشت. میزان بار رسوبی کف خارج شده از بازه مورد آزمایش پس از عبور آبنمودهای مورد نظر جمع آوری شده و توزین می شد. بدلیل کوتاه بودن زمان انجام هر آزمایش برای ثبت عمق جریان در طول آزمایش از روش عکسبرداری رقومی استفاده شد. این روش امکان تعیین عمق جریان را در هر زمان فراهم می نمود. شیب کانال برابر ۰/۰۰۶ انتخاب گردید برای تعدادی از آزمایش ها، توپوگرافی بستر پس از عبور آبنمود توسط پوینت گیج برداشت شد و با بکارگیری نرم افزار سورفر<sup>۱</sup> خطوط تراز رسم گردید (شکل ۲). طول بستر با بکارگیری حداکثر دبی قابل تولید با انجام چند آزمایش بدست آمد. طولی که تغییرات بر روی آن صورت گرفت حدود یک متر بود لذا طول ۱/۵ متر انتخاب شد. یک سامانه آرام کننده شرایط تلاطمی جریان در محل ورود جریان بداخل کانال نصب و بستر متحرک در فاصله یک متری بعد از آن قرار داده شد. دو سری آزمایش انجام گردید، ۲۹ آزمایش در سری A و ۱۲ آزمایش در سری B، تغییرات دبی بین ۳۵/۲ تا ۴۳/۸ لیتر بر ثانیه بر متر بود. خلاصه شرایط آزمایش برای سری های A و B به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است.

### انتخاب مقیاس زمانی

برای ایجاد ارتباط علمی بین شرایط طبیعی رودخانه با آزمایش ها، طول دوره آبنمود و نیز ابعاد بستر آزمایشی بایستی بر مبنای مقیاس تعیین شود، دو روش برای انتخاب مقیاس زمان وجود دارد، مقیاس زمانی هیدرولیک و مقیاس زمانی رسوب گذاری که مقیاس زمانی هیدرولیک همواره کوچکتر از مقیاس زمانی رسوب گذاری می باشد. در آزمایش های مدل های کج که تاکید بر تغییرات زمانی تراز بستر است و نه شرایط تعادل کف می توان از اثر مقیاس زمانی صرف نظر کرد [۸].

از اینرو زمان پایه آبنمودها در محدوده ۱۸ تا ۶۰ ثانیه انتخاب گردید. سه آزمایش نیز با زمان طولانی ۲۷۰ تا ۹۰۰ ثانیه برای بررسی انتقال بار کف در شرایط ماندگار انجام شد.

1- surfer

متوسط $q_s$	تکرار $q_s$	gr/s/m $q_s$	$T_1$ sec	$T_2$ sec	$q_{max}$ m <sup>2</sup> /s
۴۳/۰۵	۴۱	۴۵/۱	۶	۱۲	۴۳
-	-	۳۲	۱۰	۲۰	۴۳
۲۶/۵	۲۶/۵	۲۸/۱۸	۱۵	۳۰	۴۳
-	-	۲۷/۴	۲۰	۴۰	۴۳
۴۸/۱	۴۹/۱	۴۷/۱	۱۲	۶	۴۳
-	-	۴۵/۴۷	۲۰	۱۰	۴۳
-	-	۳۰/۳	۳۰	۱۵	۴۳
-	-	۲۶	۲۰	۴۰	۴۳
۴۴/۶	۵۹/۱	۳۷	۹	۹	۴۳
۳۵/۴	۳۶/۴	۳۲/۴۵	۱۵	۱۵	۴۳
۲۶/۳	۲۷/۹	۲۴/۷	۲۲/۵	۲۲/۵	۴۳
		۲۶/۸	۳۰	۳۰	۴۳

### بررسی شرایط معلق شدن ذرات

معلق شدن ذرات بستر به نسبت  $(U^*/\omega)$  بستگی دارد، که  $U^*$  سرعت برشی و  $\omega$  سرعت سقوط ذرات حالت مستغرق است، این نسبت که به عنوان معیار بنابر مطالعات بگنولد، واحد و بر اساس پیشنهاد انگولند  $0.25$  پیشنهاد شده است. بنابراین در مواردی که این نسبت کمتر از مقدار پیشنهادی باشد ذرات بحالت معلق در نمی آیند. رویی رابطه های زیر را برای  $\omega$  ارایه کرده است. به نقل از موربی [۱۱]

$$\omega = \frac{(1636(\rho_s - \rho)d^3 + 9\mu^2)^{0.5} - 3\mu}{500d_{50}} \quad \text{اگر } d < 2\text{mm} \quad (12)$$

$$\omega = 3.22(d_{50})^{0.5} \quad \text{اگر } d > 2\text{mm} \quad (13)$$

$\mu$ : لزجت پویایی آب (سانتی پواز)،  $\rho_s$  و  $\rho$  بترتیب جرم مخصوص ذرات بستر و آب (کیلو گرم بر متر مکعب) می باشند. با توجه به رابطه های بالا و اینکه عمق جریان در آزمایش های اولیه نزدیک به ۱۰۰ میلیمتر اندازه گیری گردید لذا می توان نوشت که:

$$d_{50} = 1.5\text{mm}$$

$$\omega = 0.4\text{m/s}$$

$$\tau_0 = \rho g R_h S = 3.52 \text{ N/m}^2$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = (g R_h S)^{0.5}$$

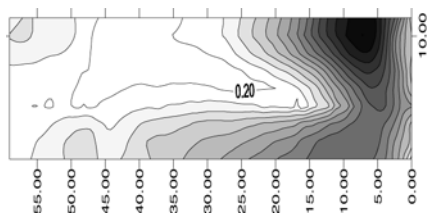
$$g = 9.81 \text{ m/s}^2, S_0 = 0.006, R_h = 0.06\text{m}, U_* = 0.059 \text{ m/s}$$

$$\frac{U_*}{\omega} = \frac{0.59}{4} = 0.15 < 0.25$$

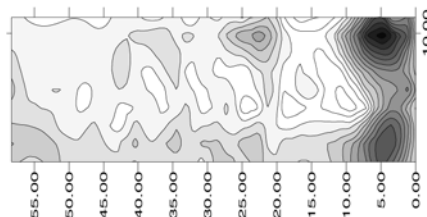
که نشان می دهد ذرات به حالت معلق در نخواهند آمد. در رابطه های بالا  $\omega$  سرعت سقوط ذره،  $\tau_0$  تنش برشی کف،  $R_h$  شعاع هیدرولیکی،  $U_*$  سرعت برشی می باشند. در این آزمایش ها شیب انرژی برابر شیب کف کانال در نظر گرفته شد هرچند که اهمیت تغییر شیب در جریان غیر ماندگار توسط میروچ و رید [۱۲] مورد تاکید قرار گرفته است.

### نتایج و بحث

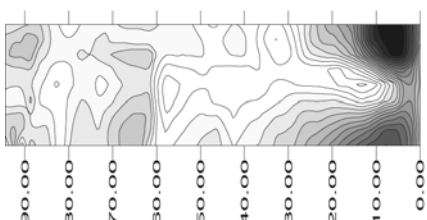
پس از تکمیل آزمایش ها و اندازه گیری تغییرات بستر در اثر جریان ناگهانی برقرار شده نتایج حاصل به شکل خطوط تراز به کمک نرم افزار سورفر در فضای دوبعدی ترسیم گردید. رسم خطوط تراز بستر برای سه حالت آزمایشی در شکل ۲ حاکی از فرسایش شدید بستر در ابتدای بازه آزمایشی بوده و نشان می دهد موج اولیه توانسته ذرات بستر را به فاصله ای در پایین دست انتقال دهد دقت در اشکال فوق نشان می دهد تغییرات قابل توجهی در قسمتهای انتهایی نسبت به ابتدای بستر رخ نداده لذا انتخاب طول بیشتری را برای بازه آزمایشی با در نظر گرفتن حداکثر دبی آبنمود توجه نمی کند. شکل ۳ محدوده فرسایش یافته بستر و نیز ناحیه فرونشست ذرات را نسبت به طول کل بستر به ازا دبی های متفاوت نشان می دهد.  $L_e$ : طول ناحیه فرسایشی و یا رسوب گذاری،  $L$ : طول کل بستر



الف

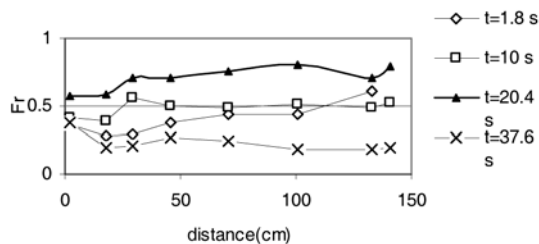


ب



ج

شکل ۲- الف زمان پایه آبنمود ۲۷۰ ثانیه ب: زمان پایه ۹۰۰ ثانیه ج: زمان پایه ۲۲ ثانیه (طول بازه آزمایشی ۲ متر و عرض ۰/۳ متر)



شکل ۵- ب تغییرات عدد فرود در طول بستر و در زمانهای مختلف

تغییرات عدد فرود در چهار نقطه اندازه گیری شده برحسب زمان (۵-الف) و نیز تغییرات عدد فرود در طول بستر را در چهار زمان (۵-ب) در طول یک آزمایش بعنوان نمونه نشان می دهد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که هم در ابتدای بستر و هم در شروع آزمایش عدد فرود ابتدا کم و زمان کوتاهی پس از شروع جریان، ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد، که نشان دهنده تغییراتی است که در تراز بستر بوجود می آید که اثر آن به پایین دست منتقل می شود.

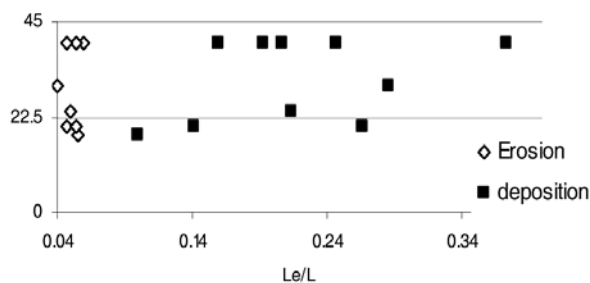
### تنش برشی

تنش برشی نمایه ای است که بر اساس آن شرایط پایداری ذرات روی بستر مورد بررسی قرار می گیرد. در شرایطی که تنش برشی وارد بر بستر بیشتر از تنش بحرانی باشد انتظار می رود ذرات بر روی بستر شروع به حرکت نمایند. معیارهای متفاوتی برای شروع حرکت ذرات پیشنهاد شده که کاربردی ترین آنها عامل شیلدز است.

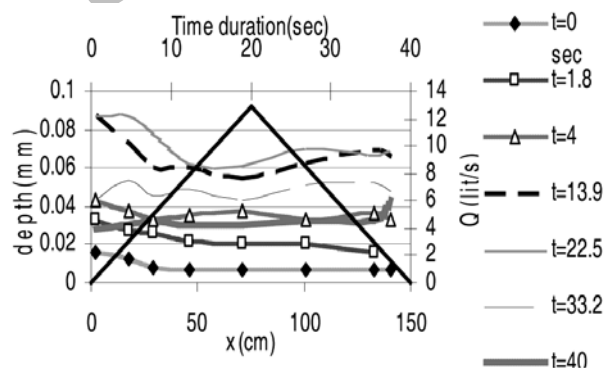
مقدار این عامل توسط شیلدز  $\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}}$  و گسler آنرا بین  $0.02$  تا  $0.06$  برای مصالح درشت رودخانه ای نوشته شده است. در این مطالعه مقدار  $0.047$  در محاسبه ها انتخاب شد. شکل ۶ الف تغییرات تنش برشی از رابطه  $\tau_0 = \rho g R_{H1} S$  در مدت زمان عبور یک آب نمود در هشت نقطه انتخابی در طول بازه آزمایشی و نیز تنش برشی بحرانی جهت مقایسه ترسیم شده است. با در نظر گرفتن شکل ۶-الف و مقادیر جداول ۲ و ۳ مشاهده می گردد، با وجود کمتر بودن تنش برشی وارد بر ذرات بستر نسبت به تنش برشی بحرانی، ذرات رسوبی در سطح بستر حرکت کرده و از بازه آزمایشی خارج می شوند. شکل ۶-ب نیز تغییرات تنش برشی را در هشت نقطه انتخابی و در چهار زمان از مدت عبور یک آب نمود نشان می دهد.

حرکت ذرات بستر در جریانهای غیرماندگار که تغییرات دبی در آنها خیلی سریع و دبی در فاصله زمانی کوتاه به مقدار حداکثر خود می رسد، تنها به مقدار تنش برشی ( $\tau_0$ ) وارد از طرف جریان بستگی نداشته عامل های دیگری می توانند نقش موثری ایفا نمایند. تجزیه و تحلیل ابعادی نشان می دهد انتقال بارکف در جریان غیرماندگار تابع عامل های مختلفی است و تنها تحت تاثیر تنش برشی نمی باشد. شکل ۷ میزان دبی متوسط بارکف انتقال یافته را برحسب  $gr/s/m$  در برابر زمان پایه آب نمود با دبی حداکثر متفاوت

نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از آزمایش های لیال [۱۰]، زیگسیان [۱۸] کالفیو ووالینا [۳] و اسپینویچ [۱۵] مطابقت خوبی را نشان می دهد. در شکل ۴ نیز تغییرات عمق جریان را در طول بستر برای یک نمونه از آزمایش ها رسم شده است که فرسایش شدید در ابتدای بستر مقاومت فرم بستر را افزایش داده و عمق جریان در این ناحیه افزایش قابل توجه نموده ولی یکنواختی بستر در پایین دست نیمرخ یکنواختی از جریان را فراهم می نماید.



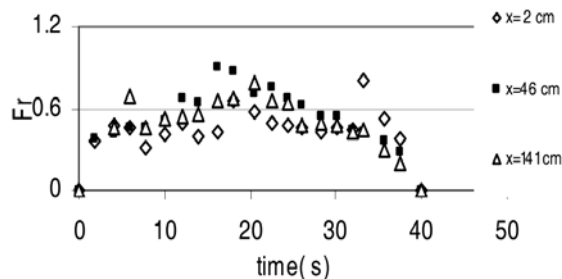
شکل ۳- موقعیت نسبی محل فرسایش و فرونشست ذرات روی بستر (Le طول تاثیر جریان)



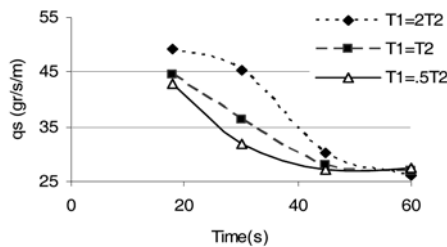
شکل ۴- تغییرات عمق جریان در طول بستر

### نمایه فرود

تغییرات عدد فرود از کم به زیاد در طول بستر نیز حاکی از کاهش تراز بستر یا افزایش عمق در ناحیه ابتدایی و افزایش تراز بستر و یا کاهش عمق در ناحیه پایین دست است. شکل ۵ این نکته را در مورد

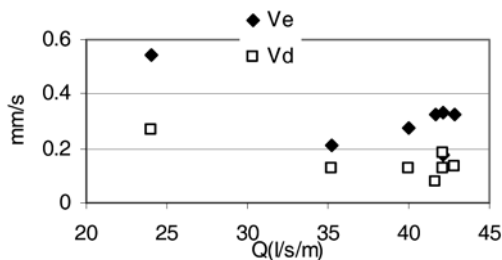


شکل ۵- الف تغییرات عدد فرود برحسب زمان در سه نقطه در طول بستر متحرک



شکل ۸- مقایسه دبی رسوب در سه نسبت انتخابی  $T_1/T_2$

نسبت به روند رسوب گذاری انجام می گیرد و این شرایط امکان خروج قسمتی از ذرات حرکت نموده را به خارج از بازه آزمایشی فراهم می آورد. شکل ۹ سرعت فرسایش و رسوب گذاری را برای دبی های مختلف نشان می دهد.



شکل ۹- مقایسه سرعت فرسایش و رسوب گذاری  
فرسایش  $V_e$ ، رسوب گذاری  $V_d$

### جمع بندی

نتایج حاصل از مجموعه آزمایش ها و مباحث را می توان بصورت زیر خلاصه کرد.

۱- تجزیه و تحلیل ابعادی نشان می دهد مهمترین عامل های موثر بر روند انتقال بار کف تحت جریان غیرماندگار عبارتند از کار انجام گرفته توسط جریان بر روی ذرات، عدد فرود جریان و عامل غیرماندگاری جریان.

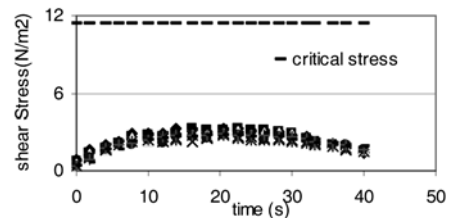
۲- نتایج بررسی توپوگرافی بستر پس از عبور جریان حاکی از آن است که تغییرات در فاصله محدودی از ابتدای بستر رخ می دهد.

۳- فرسایش در ناحیه ابتدایی بستر در مورد هر آبنمود و با هر زمان پایه متفاوت مشاهده می شود.

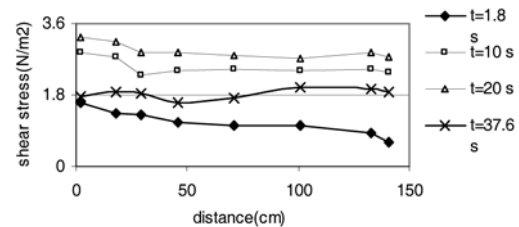
۴- تغییرات عدد فرود در طول بستر و نیز تغییرات آن در هر نقطه با گذشت زمان حاکی از آن است که این کمیت بدون بعد در دوره عبور جریان ثابت نیست.

۵- ناحیه ابتدایی بستر بشدت فرسایش یافته و رسوب گذاری ذرات در فاصله کمی دورتر بدلیل کاهش انرژی و افزایش تغییر شکل بستر صورت می گیرد.

۶- حرکت رسوبات بصورت بار کف فقط ناشی از اثر تنش برشی وارد از سوی جریان به بستر نبوده بلکه ویژگی های دیگر جریان غیر ماندگار بر جابجایی ذرات موثر است.

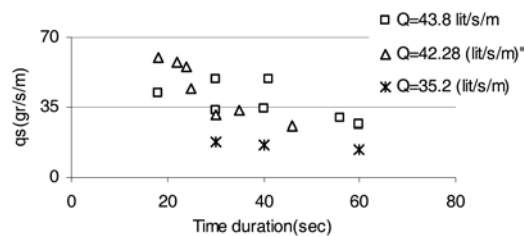


شکل ۶- الف- تغییرات تنش برشی در نقاط مختلف در طول بازه آزمایشی



شکل ۶- ب- تغییرات تنش برشی در طول بازه آزمایشی در دوره مختلف زمان پایه

نشان می دهد. از این شکل مشخص است با افزایش دبی حداکثر آبنمود میزان بارکف انتقالی به ازاء یک زمان پایه معین افزایش یافته لیکن با افزایش زمان پایه آبنمود مقدار آن به ازاء هر میزان دبی کاهش می یابد. افزایش زمان پایه آبنمود شرایط را به سمت کاهش اختلاف موجود در دبی رسوب بین آبنمودهای مختلف سوق می دهد.



شکل ۷- تغییرات دبی انتقال رسوب در برابر زمان پایه آبنمود

۱۲ آزمایش در سری B درحالات  $T_1=0.5T_2$ ،  $T_1=T_2$  و  $T_1=2T_2$  انجام گرفت. (  $T_1$  زمان افزایش جریان و  $T_2$  زمان کاهش جریان) و نتایج آن در شکل ۸ ترسیم شد. این سری از آزمایش ها با هدف بررسی اثر شیب افزایشی جریان بر انتقال رسوب انجام شد چنانکه در شکل ۸ ملاحظه می شود دبی رسوب بستگی قابل ملاحظه ای به زمان افزایش جریان دارد و با کاهش زمان افزایش دبی جریان، میزان بار کف انتقالی بطور قابل ملاحظه ای تغییر می کند.

### سرعت فرسایش و رسوب گذاری

برای بررسی سرعت (متوسط) فرسایش و رسوب گذاری در انتهای هر آبنمود اقدام به اندازه گیری بیشترین عمق فرسایش و ارتفاع رسوب گذاری گردید. نتایج بدست آمده نشان می دهد همواره و برای تمامی آبنمودها روند فرسایش بستر با سرعت بیشتری

8- Lee, K. T., Liang, Y. L. and Cheng, K. H. 2003. Experimental Investigation of bed load transport processes under unsteady flow conditions. Hydrological processes. Copyright 2004 John Wiley & Sons, Ltd.

9- Lane, L. J., Hernandez, M. and Nichols, M. 1997. Processes controlling. J. of Hydr. Eng. 122(10): 549-558

10- Leal, J. G. A. B., Ferreira, RML., Cardoso, A. H. and Almedia, AB. 2003. Comparison between Numerical and Experimental Results on Dam-Break waves over Dry Mobile Beds. J. Riverflow 2002.

11- Morris, L. G. and Fan, J. 1998. Reservoir Sedimentation handbook McGraw-Hill

12- Meirovich, L. and Laronne, Ried. I. 1998. The variation of Water-surface Slope and its Significance for Bedload transport During Floods in Gravel-Bed Streams. J. Hyd. Vol. 36, no. 2, pp. 147-151.

13- Parker, G. (1990). Hydraulic geometry Transmission Loss. Hydrological Processes, 12, pp 1219-1232

14- Reid, I., Laronne, J. B. and Powell, M. 1998. Prediction of Bed-Load Transport by Desert Flash Floods J. of hyd. Eng. vol. 122, No. 3

15- Spinewine, Z. Y. 2003 Dam break waves over movable beds. Dept. Civ. And Env. Engrg., Universite Catholique de Louvain, Belgium

16- Simon, A. 2002. suspended-Sediment-Transport Rates at the 1.5-Year

Recurrence interval for Ecoregions of the united states: Transport Conditions at the Bankfull and Effective Discharge. Research Geological at the usda -ars National Sedimentation Laboratory.

17- Sumer, B. M. Kozakiewicz, A. Fredsoe, j. and Deigaard, R. 1996. Velocity and Concentration Profiles in Sheet Flow Layer of Movable Bed. J. of Hydr. Eng. 122(10): 549-558  
2004. Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible sediment Bed. J. Hydr. Eng. Vol. 130, Issue 7, pp. 689-703

18- Zhixan, C. G. P. wallis, and Carling P. sediment yield from watersheds as functions of spatial scale. Environmental Modeling and Software 12: 355-369.

۷- شیب شاخه آبنمود عبوری در شرایط افزایش جریان نقش زیادی بر میزان دبی بار کف ایفا می نماید.

۸- میزان دبی رسوب کف با افزایش زمان پایه کاهش می یابد.

۹- سرعت فرسایش از سرعت رسوب گذاری بیشتر است.

۱۰- انرژی اولیه موج موجب تغییرات زیاد در سطح بستر و باعث بروز مقاومت قابل ملاحظه ای در برابر جریان می شود.

از موارد ذکر شده بالا استنباط می شود در رودخانه های فصلی که بستر رودخانه فاقد پوشش گیاهی بوده و با وقوع جریان های طغیانی سریع مانعی در برابر جریان رواناب وجود ندارد سیلاب می تواند تغییرات قابل ملاحظه ای در بستر رودخانه ایجاد نماید و چون حرکت رسوبات در این شرایط ناشی از سیلابهای متوالی است، رسوب گذاری جریان با پیشانی مشخص در مخروط افکنه ها صورت می گیرد. همچنین در مواردی که شیب بستر زیاد باشد حرکت سنگ های با ابعاد بزرگ بدلیل قدرت بالای جریان محتمل است.

### منابع

۱- حسینی، س.م. ۱۳۸۲. بررسی عملکرد و تعیین ضریب تخلیه زیرگذرها، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد.

2- Branson, F. A. and Owen, J. B. 1970. Plant cover runoff and sediment yield relationships on Moncos shale in western Colorado. Water Resources Research 6(3): 783-790.

3- Caeffi, V. and Valiani, A. 2002. A Mathematical Model for Dam-Break Over Movable Bed. IAHR 2002. D. Bousmar and Y. Zech (ed). Proceeding of the International Conference on Fluvial Hydraulic, Louvain-la - Neuve, Belgium: 981-990. Balkema

4- Cohen, H. and Laronne, J. B. 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the southern Judean desert, Israel. Hydrological processes. 19, 167-1702

5- El-Hames, A. S. and Richards, K. S. 1998. An Integrated, Physically Based Model for Arid Region Flash Flood Prediction Capable of Simulating Dynamic Transmission Loss. Hydrological Processes, 12, pp 1219-1232

6- Fraccarollo, L. and Armanini, A. 1999. "A Simi-Analytical Solution For The Dam-Break Problem Over A movable bed". IAHR

7- Graf, W. H. and T. Song, 1997. Bed-Shear Stress in Non-Uniform and Unsteady Open-Channel Flows. Journal of Hydraulic research. 33(5): 399-704