

# بررسی اثر تیغه هدایت کننده بر راندمان تله اندازی حوضچه رسوب گیر با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی

مهدی خادمی<sup>1</sup>، محمد حسین امید<sup>2\*</sup>، عبدالحسین هورفر<sup>3</sup>

- 1- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
- 2- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی پردیس کرج، دانشگاه تهران
- 3- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی پردیس کرج، دانشگاه تهران

\* تهران، دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی پردیس کرج

momid@ut.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق تأثیر یک تیغه عمودی مستغرق بر راندمان تله اندازی و طول ناحیه رسوبگذاری در حوضچه رسوب گیر مستطیلی با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل ریاضی مطالعه شده است. برای انجام آزمایشها از کانال مستطیلی با کف پرسپکس و جداره های شیشه ای به طول 6 و عرض و ارتفاع 0/5 متر استفاده شده است. مدل ریاضی به کار رفته در این تحقیق، مدل اولری-لاگرانژی است که در آن برای حل میدان جریان، از معادلات متوسط گیری شده رینولدز، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد برای تحلیل آشفتگی و مدل لاگرانژی برای روندیابی ذرات رسوبی استفاده می شود. نتایج نشان می دهند که زمانی که تبدیل به کار رفته بین حوضچه رسوب گیر و کانال بالادست، جریان را بدون ایجاد آشفتگی اضافی به داخل حوضچه منتقل می کند، تیغه تأثیری در افزایش راندمان حوضچه و کم کردن طول ناحیه رسوبگذاری ندارد. اما زمانی که جت وارد شده از کانال بالادست، تغییرات شدید عرضی سرعت را در حوضچه به وجود می آورد، نصب تیغه در عمق استغراق 15%، افزایش راندمان به میزان حداکثر 8/5% را نشان می دهد.

**کلید واژگان:** حوضچه رسوب گیر، تیغه هدایت کننده، مدل عددی اولری-لاگرانژی، راندمان تله اندازی.

## 1- مقدمه

می شود که این مواد اثری بر هیدرودینامیک جریان نداشته باشند و حرکت ذرات رسوبی توسط جریان کنترل شود، اما در حوضچه های رسوب گیر ثانویه - که بعد از فیلترهای بیولوژیکی قرار می گیرند - غوطه ور شدن مواد ورودی باعث به وجود آمدن جریانهای چگال در حوضچه و حرکت جریان سطحی به سمت بالادست می شود. باز شدگی ناگهانی در اتصال این حوضچه ها به کانال بالادست، باعث می شود که جریان ورودی از کانال بالادست مانند یک جت در حوضچه عمل کند. جت ورودی، در صورت عدم کنترل، طول زیادی از حوضچه

استفاده از حوضچه های رسوب گیر ثقلی، معمولترین راه برای جداسازی ذرات رسوبی از جریان در جلوگیری از ورود رسوب به شبکه های آبیاری و کانالهای منتهی به توربینها و همچنین در طرحهای تصفیه پساب است. حوضچه های رسوب گیر تصفیه پساب به دو نوع حوضچه های رسوب گیر اولیه و ثانویه تقسیم می شوند. حوضچه های رسوب گیر اولیه و ثانویه از نظر ظاهری شبیه به یکدیگرند، اما شرایط جریان در این دو حوضچه کاملاً متفاوت است. در اولی غلظت کم مواد وارد شونده، باعث

هدایت‌کننده مقایسه کردند. تیغه هدایت‌کننده نوع اول، یک‌طرفه بود که جریان از زیر آن عبور می‌کرد و تیغه هدایت‌کننده نوع دوم، دوطرفه بود که جریان از دو طرف آن عبور می‌کرد. تزریق رنگ و مشاهده منحنیهای خطوط جریان نشان داد که هر دو نوع تیغه هدایت‌کننده، کارایی هیدرولیکی حوضچه را بهبود می‌بخشند و طول ناحیه چرخشی از 45 درصد طول کل حوضچه برای حالت بدون تیغه هدایت‌کننده، به ترتیب به 38 و 18 درصد طول کل حوضچه برای حالت تیغه هدایت‌کننده یک‌طرفه و دوطرفه می‌رسد.

شرایط خاص جریان در حوضچه‌های رسوب‌گیر ثانویه، طراحی ورودی برای این حوضچه‌ها را بیشتر مورد توجه قرار داده است که در این مورد می‌توان به تحقیقات Krebs et al. (1991), Lyn et al. (1991) و Krebs et al. (1992) اشاره کرد.

شرایط جریان در حوضچه‌های رسوب‌گیر مورد استفاده در شبکه‌های آبیاری، شبیه به جریان در حوضچه‌های رسوب‌گیر اولیه است، اما برای انتقال جریان از کانال بالادست به حوضچه، از یک تبدیل تدریجی استفاده می‌شود. مطالعات انجام شده برای این نوع حوضچه‌ها محدود بوده و بیشتر تحقیقات بر حوضچه‌های رسوب‌گیر اولیه و ثانویه متمرکز است. (Atkinson (1992) تحقیقاتی را برای طراحی مناسب تبدیل‌های ورودی در این حوضچه‌ها با استفاده از یک مدل عددی انجام داد. در مدل عددی Atkinson جریان ورودی از بالادست بدون حمل رسوب در نظر گرفته شد.

Garde et al. (1990) و Rnaga Raju et al. (1999) نیز روابط مختلف محاسبه راندمان را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و دریافته‌اند که روابط ارائه شده، فقط برای ذرات درشت‌دانه جواب خوبی ارائه می‌دهند و برای ذرات ریزدانه، راندمان مشاهده شده در آزمایشها، کمتر از مقدار محاسبه شده است.

را طی می‌کند و باعث می‌شود قسمتی از جریان در حوضچه با سرعت بیشتری به خروجی حوضچه برسد که به آن جریانهای چرخشی کوتاه<sup>1</sup> گفته می‌شود. تیغه هدایت‌کننده مستغرق<sup>2</sup> در ورودی این حوضچه‌ها برای کم کردن اثر منفی جت ورودی و پخش رسوبهای ورودی در عرض حوضچه به کار می‌رود.

اولین مطالعات برای طراحی تیغه هدایت‌کننده را Wiegmann and Muller Neuhaus (1951) برای حوضچه‌های رسوب‌گیر دایره‌ای - که رسوبها در مرکز حوضچه وارد می‌شدند - انجام دادند. آنها دو دیوار متخلخل هم مرکز را برای از بین بردن انرژی جریان ورودی پیشنهاد دادند. همچنین Knop (1952) برای حوضچه‌های مستطیلی، تیغه هدایت‌کننده مستغرق و یک دیوار متخلخل بلافاصله پس از آن را پیشنهاد داد.

Imam et al. (1983) از یک مدل عددی دو بعدی برای تحلیل میدان جریان و از معادله بقای رسوب برای محاسبه راندمان در حوضچه رسوب‌گیر با تیغه هدایت‌کننده استفاده کرد. او برای بستن معادلات مومنتم، لزجت گردابه‌ای را در کل حجم کنترل ثابت و متناسب با سرعت جریان در زیر تیغه هدایت‌کننده در نظر گرفت که ضریب تناسب با کالیبراسیون مدل به دست می‌آمد. نتایج مدل عددی و آزمایشهای او نشان داد که بیشتر شدن عمق استغراق تیغه هدایت‌کننده از یک حد مطلوب، باعث تشکیل یک جت قوی در زیر تیغه هدایت‌کننده شده و باعث فرسایش و بلند شدن ذرات رسوبی کف می‌شود و کم شدن عمق تیغه هدایت‌کننده از یک مقدار بهینه نیز، باعث به وجود آمدن جریانهای چرخشی کوتاه می‌گردد. به ازای عمق بهینه استغراق، راندمان تله‌اندازی نسبت به حالت عدم وجود آن افزایش می‌یابد. Lyn and Rodi (1990)، کارایی حوضچه رسوب‌گیر اولیه را در حالت بدون تیغه هدایت‌کننده و نیز با استفاده از دو نوع تیغه

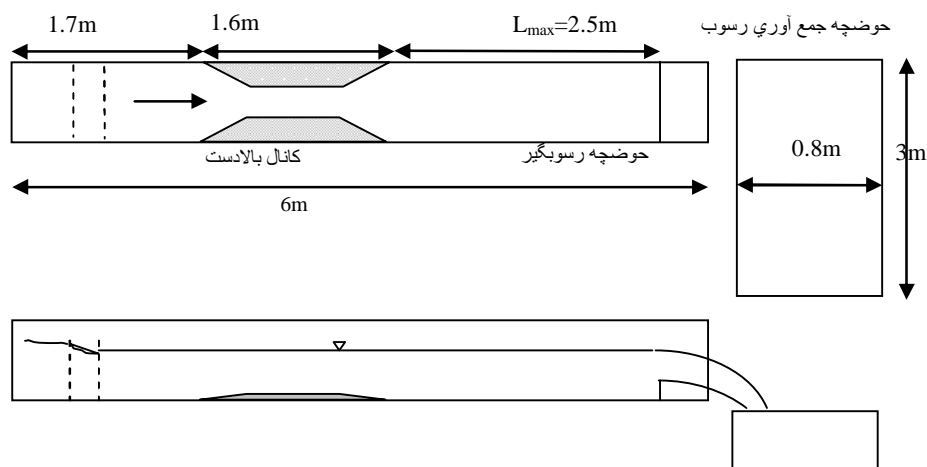
1. Short Circuited flows  
2. Submerged Baffle

## 2- مواد و روشها

### 1-1- مدل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشها، یک کانال مستطیلی با کف پرسپکس و جدار شیشه‌ای به طول 6 و عرض و ارتفاع 0/5 متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران ساخته شد. شکل 1 نمای بالا و جانبی فلوم آزمایشگاهی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. قسمتی از این فلوم با حداکثر طول 2/5 متر به عنوان حوضچه رسوب‌گیر در نظر گرفته شد. همچنین در داخل این فلوم، یک کانال کوچکتر با عرض 0/2 متر و طول 1 متر که کف آن 4 سانتیمتر بالاتر از کف حوضچه رسوب‌گیر است، در بالادست حوضچه رسوب‌گیر ساخته و از طریق تبدیل خطی به طول 30 سانتیمتر به حوضچه متصل شد. از سرریز بدون فشردگی جانبی در انتهای حوضچه برای تنظیم عمق آب در حوضچه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی کانال، از سرریز مثلی استفاده شده است. از آنجا که جریان عبوری از سرریز به داخل کانال ریزش می‌کند، برای آرام کردن جریان از چند ردیف آرام‌کننده قبل از ورود به کانال بالادست حوضچه استفاده شده است.

در تحقیق حاضر، اثر تیغه هدایت‌کننده بر کارایی هیدرولیکی حوضچه رسوب‌گیر شبکه آبیاری از نظر راندمان تله‌اندازی و طول ناحیه رسوبگذاری برای بهینه‌سازی اقتصادی ابعاد حوضچه مورد مطالعه قرار گرفته است. عوامل متعددی از جمله قطر ذرات رسوبی، سرعت ورودی جریان، عمق استغراق تیغه هدایت‌کننده و عمق نزدیک شدن ذرات رسوبی به تیغه هدایت‌کننده، در نحوه اثر تیغه مؤثر هستند؛ به همین دلیل قابلیت کاربرد و کارایی مدل عددی اولری-لاگرانژی (Frey et al. 1993) برای روندیابی ذرات رسوبی و بهینه‌سازی عمق تیغه بررسی شده است. در این مدل از اندرکنش ذره با ذره صرف‌نظر می‌شود از این رو در مواردی می‌توان از آن استفاده کرد که فاز رسوب کمتر از 10% از حجم کل جریان را تشکیل دهد. با توجه به این شرایط، مدل اولری-لاگرانژی گزینه مناسبی برای حوضچه‌های رسوب‌گیر اولیه می‌باشد که می‌توان به کاربرد این مدل توسط Jayanti and Narayanan, Frey et al. (1993) و (2004) و Adamsson et al. (2003) در این حوضچه‌ها اشاره کرد.



شکل 1 نمای بالا و مقطع جانبی حوضچه مورد استفاده و اجزاء مختلف آن

استفاده شد که مشخصات آنها در جدول 2 آمده است. رسوب نوع دوم فقط برای گروه T2D-S3 استفاده شده است.

از آنجا که تأثیر جابجایی کوچک تیغه بر راندمان باید با دقت اندازه‌گیری می‌شد، راندمان تله‌اندازی حوضچه رسوب‌گیر، از روش وزنی محاسبه شد. بدین ترتیب که پس از اتمام آزمایش، کل رسوب ته‌نشین شده در حوضچه رسوب‌گیر جمع‌آوری و در کوره خشک می‌شد و با تقسیم وزن رسوب خشک ته‌نشین شده بر کل رسوب خشک ترزریق شده به داخل حوضچه، راندمان تله‌اندازی حوضچه محاسبه می‌شد.

## 2-2- مدل عددی

برای روندیابی ذرات رسوبی در حوضچه، از نوعی مدل عددی اولری-لاگرانژی استفاده شده است. معادلات حاکم بر فاز پیوسته شامل معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز است.

برای تزریق رسوب از یک مخزن تزریق رسوب استفاده شد که با تعبیه پره‌هایی در داخل این مخزن، آب و رسوبها دائماً در طول آزمایش مخلوط شده و به داخل کانال بالادست تزریق می‌شد. محل تزریق رسوب در کانال ورودی حوضچه، در نقطه‌ای انتخاب شد که ذرات رسوب تا رسیدن به ابتدای حوضچه رسوب‌گیر، فرصت مخلوط شدن با جریان را پیدا می‌کردند و سرعت زیاد جریان در کانال بالادست، مانع از ته‌نشینی آنها در کانال بالادست می‌شد. برای جمع‌آوری رسوبهای خارج شده، از حوضچه دیگری با طول 3 و عرض 0/8 متر استفاده می‌شد که طول زیاد آن موجب ته‌نشینی تمامی رسوبهای مورد استفاده در آزمایشها می‌شود.

جدول 1 محدوده آزمایشهای انجام شده را نشان می‌دهد. مجموعه آزمایشها در محدوده  $L/D = 5 - 10$  و  $w/U = 0/09 - 0/14$  قرار می‌گیرند. L طول حوضچه رسوب‌گیر، D عمق آب در حوضچه، w سرعت سقوط برای ذره با قطر متوسط و U سرعت متوسط جریان در حوضچه است. برای انجام آزمایشها از دو نوع رسوب

جدول 1 محدوده آزمایشهای انجام شده

کد آزمایش	سرعت متوسط در حوضچه (متر بر ثانیه)	عمق آب در حوضچه (سانتی متر)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	طول حوضچه (متر)
T2D-S1	0/09	26	11/85	1/3
T3D-S1	0/12	27	16/5	و
T2D-S2	0/09	17	7/26	1/7
T2D-S3	0/055	23/65	6/5	
T3D-S2	0/12	17	10	

جدول 2 محدوده دانه‌بندی رسوبهای مورد استفاده در آزمایشها

درصد تشکیل دهنده	قطر متوسط هر بازه (mm)	قطر بازشدگی (mm)	شماره الکها (استاندارد A.S.T.M)	رسوب نوع اول
8	0/194	0/177-0/21	70-80	رسوب نوع اول
44	0/163	0/149-0/177	80-100	
48	0/137	0/125-0/149	100-120	
-----	0/09	0/074-0/108	140-200	رسوب نوع دوم

جریان نیز صرف‌نظر شده و معادلات به صورت یک‌طرفه حل می‌شوند که به دلیل غلظت کم رسوب مورد استفاده، این فرض معتبر است.

### 3- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، برای گرفتن انرژی جریان ورودی، زمانی که جریان از کانال بالادست به صورت جت به حوضچه وارد می‌شود از تیغه‌های هدایت کننده استفاده شد. محدوده انجام آزمایشها نیز مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی طوری انتخاب شد که در برخی شرایط، جریان ورودی از کانال بالادست بدون ایجاد آشفتگی اضافی به داخل حوضچه منتقل می‌شود. در نتیجه تغییرات عرضی سرعت در ورودی حوضچه تقریباً ناچیز بوده و جریان در حوضچه به صورت دوبعدی تحلیل می‌شود. این گروه از آزمایشها با T2DS1, T2DS2 و T2DS3 در جدول 1 نشان داده شده است. به صورت مشابه، گروههای T3DS1 و T3DS2 به صورت سه بعدی تحلیل می‌شوند.

### 3-1- تحلیلهای دوبعدی

شکل 2، نتایج آزمایشگاهی اثر تیغه هدایت کننده بر راندمان تله‌اندازی حوضچه رسوب‌گیر را برای گروههای T2DS1, T2DS2 و T2DS3 به صورت اختلاف راندمان حوضچه در حالت قرارگیری تیغه هدایت کننده در  $(r_b)$  و حالتی که تیغه هدایت کننده وجود ندارد  $(r_0)$  در مقابل نسبت  $L/D$  نشان می‌دهد. تیغه هدایت کننده در دو فاصله ثابت صفر و 30 سانتیمتری از ابتدای حوضچه قرار گرفته است. نقاط، تغییرات راندمان را برای عمقهای استغراق مختلف 35% - 15%  $D_b$  نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، تیغه هدایت کننده در اینجا اثر مثبتی بر راندمان حوضچه رسوب‌گیر نداشته و با افزایش عمق استغراق تیغه، تأثیر منفی آن بیشتر می‌شود.

برای بستن معادلات مومنتم از فرضیه بوزینسک و از مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد اعداد رینولدز بالا استفاده شده است (Bredberg, 2000).

پس از حل میدان جریان و به دست آوردن مؤلفه‌های سرعت جریان در گره‌های محدوده حل، از مدل لاگرانژی برای روندیابی مسیر ذرات استفاده می‌شود. روش کار چنین است که با قرار دادن توازن نیروهای وارد بر ذره در رابطه اندازه حرکت نیوتن  $\vec{F} = m\vec{a}$ ، سرعت ذره و با قرار دادن سرعت ذره در رابطه  $dx_p/dt = u_p$  موقعیت مکانی ذره محاسبه می‌شود. نیروهای وارد بر ذره شامل نیروی درگ، باست<sup>1</sup>، جرم هیدرودینامیکی، ارشمیدس، نیروی بالادهنده<sup>2</sup> و وزن ذره است.

(Armenio and Fioroto (2001) با حل مستقیم معادلات ناویراستوکس، دریافتند که اگر کل نیروهای وارد بر ذره در نظر گرفته شود، در مقایسه با حالتی که نیروی درگ استوکس در نظر گرفته شود، تنها 0/97 درصد در پخش رسوب در جریان آشفتنه اختلاف وجود داشت. بنابراین در اینجا نیز تنها نیروهای درگ، وزن ذره، نیروی ارشمیدس و نیروی بالادهنده در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای توازن نیروها در جهت x داریم (Fluent, 2001):

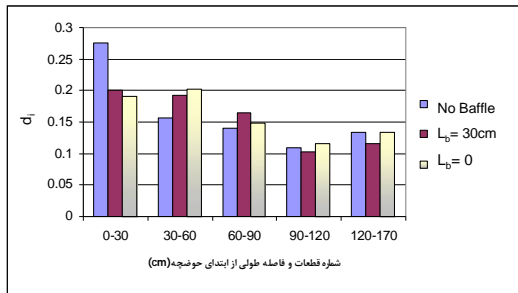
$$d\vec{u}/dt = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + \vec{F}_{Lx} \quad (1)$$

که در این رابطه  $F_D = 18\mu C_D \text{Re}/(24\rho_p d_p^2)$ ،  $F_{Lx}$  نیروی بالادهنده در جهت x،  $C_D$  ضریب درگ ذره،  $\text{Re} = \rho d_p |u - u_p|/\mu$  عدد رینولدز نسبی ذره،  $d_p$  قطر ذره،  $\rho_p$  جرم مخصوص ذره،  $u_p$  مؤلفه افقی سرعت ذره و  $u$  مؤلفه افقی سرعت جریان است.

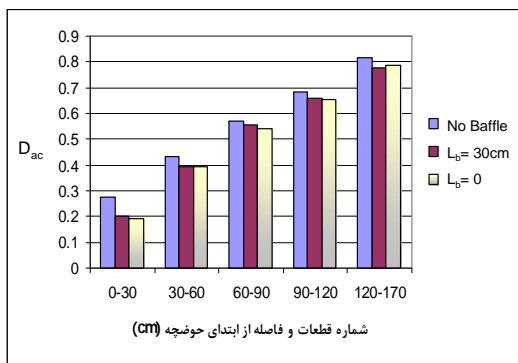
برای حل معادلات بالا از نرم افزار Fluent استفاده شده است که متغیرها را در مرکز سلول تعریف کرده و با استفاده از روش حجم محدود، معادلات را حل می‌کند. در این مدل علاوه بر اثر ذره بر ذره، از اثر ذره بر مومنتم

1. Basset Force

2. Lift Force



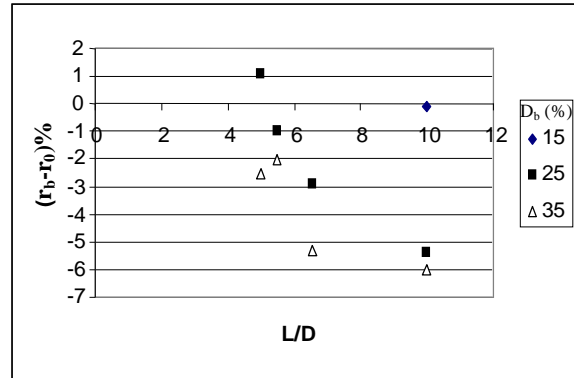
الف- توزیع موضعی ته‌نشینی



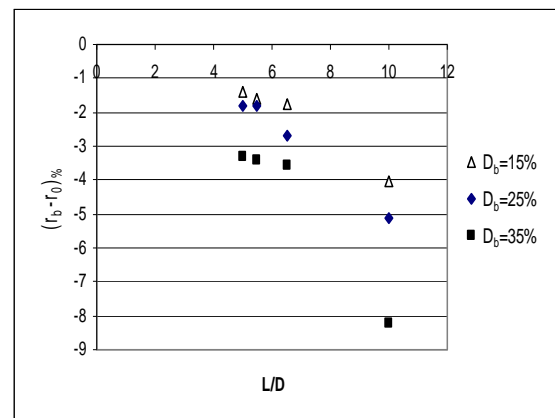
ب- توزیع تجمعی ته‌نشینی

شکل 3 توزیع ته‌نشینی ذرات رسوبی؛ گروه T2DS1

همانطور که شکل 3 نشان می‌دهد تیغه هدایت‌کننده، طول ناحیه رسوبگذاری را نیز کاهش نداده است. در قطعه اول یعنی 0-30 سانتیمتری که تیغه هدایت‌کننده در یک آزمایش در انتهای این قطعه و در یک آزمایش در ابتدای این قطعه قرار گرفته است، رسوب کمتری ته‌نشین شده و در قطعه‌های بعدی مقدار رسوب ته‌نشینی بیشتر از حالت بدون تیغه هدایت‌کننده است. در قطعه‌های انتهایی، توزیع‌ها برای حالت با تیغه هدایت‌کننده و بدون آن تقریباً یکسان است با توجه به شکل 3-الف، در محدوده قرارگیری تیغه هدایت‌کننده، به علت افزایش مؤلفه افقی سرعت جریان، رسوب کمتری ته‌نشین شده و رسوبهایی که در این محدوده نتوانسته‌اند ته‌نشین شوند به قطعه‌های بعدی منتقل شده و در آنجا ته‌نشین می‌شوند. در این حالت از آزمایشها، تیغه هدایت‌کننده باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع ته‌نشینی رسوبها در حوضچه شده است. این پدیده از آن رو قابل بررسی است که زمانی که



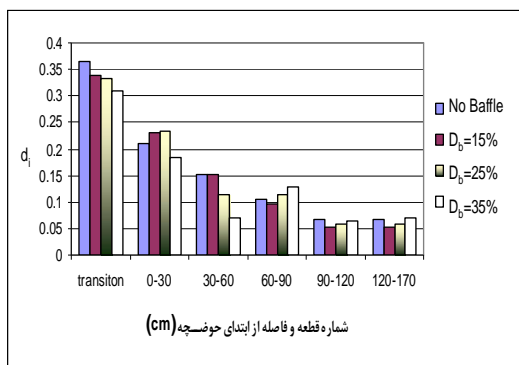
الف- تیغه در فاصله  $L_b = 30cm$  از ورودی



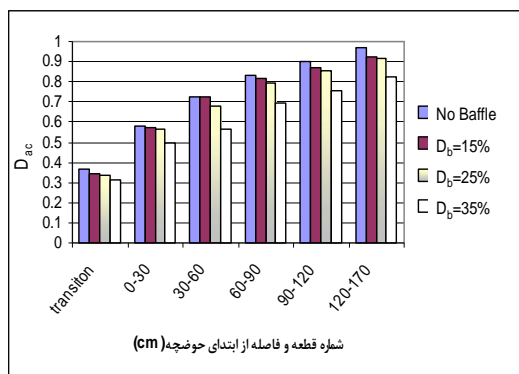
ب- تیغه در ورودی حوضچه

شکل 2 نتایج آزمایشگاهی تغییرات راندمان با نصب تیغه هدایت‌کننده در حالت‌های دوبعدی از جریان

از طرفی جابه‌جایی تیغه در طول حوضچه نیز به سبب تغییر نکردن شرایط هیدرولیکی جریان، تأثیری نداشته است. برای بررسی اثر تیغه هدایت‌کننده بر طول ناحیه رسوبگذاری و توزیع ته‌نشینی ذرات رسوبی برای آزمایشهای انجام شده با طول 170 سانتیمتر حوضچه، حوضچه به صورت طولی به 4 قطعه 30 سانتیمتری و یک قطعه 50 سانتیمتری تقسیم شد. نسبت ته‌نشینی در هر قطعه از تقسیم وزن رسوب خشک ته‌نشین شده در آن قطعه بر وزن کل رسوب خشک وارد شده به حوضچه به‌دست آمد. شکل 3 نحوه ته‌نشینی موضعی و تجمعی را برای گروه T2DS1 از آزمایشها در حالتی که تیغه در ابتدای حوضچه و در فاصله ثابت  $L_b = 30cm$  از ورودی قرار گرفته نشان می‌دهد.



الف - توزیع موضعی ته نشینی



ب - توزیع تجمعی ته نشینی

شکل 4 توزیع ته نشینی ذرات رسوبی برای گروه T2DS2

برای شرط مرزی دیوار، اولین سلول محاسباتی مجاور آن در زیر لایه لگاریتمی قرار می‌گیرد و مقادیر متغیرهای سرعت جریان و نرخ هدررفت انرژی آشفتگی  $\epsilon$ ، با استفاده از فرضیه تعادل موضعی و قانون استاندارد دیوار محاسبه می‌شوند (Fluent, 2001). فقط از انرژی جنبشی جریان آشفته تا دیوار انتگرال‌گیری شده و  $\partial k/\partial n = 0$  در دیوار اعمال می‌شود که  $n$  بردار نرمال بر دیوار است. در شرط مرزی ذرات رسوبی، باید موقعیت اولیه ذره رسوبی، قطر ذره، سرعت اولیه ذره و تعداد کل ذرات در ورودی مشخص شود. مهمترین محدودیت در این مدلها نحوه رفتار ذره پس از برخورد به دیوار است. در Fluent دو نوع شرط مرزی ذره در دیوار وجود دارد: ذره پس از برخورد به دیوار در جای خود ساکن می‌ماند و به تله می‌افتد و یا تحت زاویه ای که باید توسط کاربر داده شود

حوضچه‌های رسوب‌گیر در شرایطی قرار می‌گیرند که درصد زیادی از رسوبها در همان ابتدای حوضچه ته‌نشین می‌شوند، به مرور زمان، تجمع رسوبها باعث به وجود آمدن مانعی می‌شود که مانند یک پله عمل کرده و جداسازی جریان از روی این پله روی داده و باعث به وجود آمدن آشفتگی اضافی در حوضچه می‌شود.

توزیع ته‌نشینی رسوبها برای گروه T2DS2 از آزمایشها در حالتی که تیغه در ابتدای حوضچه و در فاصله ثابت  $L_b = 30cm$  از ورودی قرار گرفته، در شکل 4 نشان داده شده است. در این حالت با کم شدن ظرفیت قابل حمل جریان، مقدار زیادی از رسوبها در همان ابتدای حوضچه و بر روی تبدیل ورودی ته‌نشین شده‌اند و ذراتی که باید تحت تأثیر تیغه قرار می‌گرفتند ذراتی ریز بودند که در عمقهای بالایی حرکت می‌کردند. در این حالت نیز مقدار راندمان تله‌اندازی در حالت بدون تیغه کمی بیشتر از حالت قرارگیری تیغه شده است.

برای بررسی تأثیر تیغه بر میدان جریان و راندمان تله‌اندازی و تعیین عوامل مؤثر، نتایج مدل عددی برای آزمایش T2DS1 با طول حوضچه 170 سانتیمتر بررسی شد (شکل 5). در این آزمایش فاصله تیغه هدایت کننده از ورودی حوضچه برابر 30 سانتیمتر در نظر گرفته شد. در مرز بالادست یعنی ورودی حوضچه، سرعت جریان برابر با  $0/09m/s$  در جهت x در نظر گرفته شده و پارامترهای آشفتگی بر حسب مقیاس طولی آشفتگی و شدت آشفتگی با استفاده از روابط تجربی اعمال شده است (Fluent, 2001). سطح آب مانند صفحه تقارن در نظر گرفته شده که با این شرط، گرادپانهای عمودی تمامی متغیرها در سطح آب برابر صفر قرار داده شده و مؤلفه قائم سرعت نیز برابر صفر فرض می‌شود. در شرط مرزی پایین دست - که تیغه آب بالای دریچه انتهایی است - مقادیر گرادپانهای عمود بر مرز برابر صفر قرار داده شده و مقادیر متغیرها در مرز خروجی از مقادیر داخلی برون‌یابی می‌شود.

حدوده محل قرارگیری تیغه ( $x=0/3m$ ) می‌رسد. این شرایط، خطر شسته شدن رسوبهای کف در محدوده تیغه هدایت‌کننده را تقویت می‌کند.

شکل 7 نتایج مدل عددی را به صورت اختلاف مقدار راندمان در حالت قرارگیری تیغه هدایت‌کننده و بدون آن بر حسب عمق استغراق تیغه برای ذرات با قطر 0/1 میلیمتر و 0/15 میلیمتر - که در ورودی حوضچه به صورت یکنواخت پخش شده‌اند - نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، حداکثر افزایش راندمان 1/4 درصد، به ازای عمق استغراق 35% تیغه هدایت‌کننده و برای ذره با قطر 0/1 میلیمتر حاصل می‌شود.

در شرط مرزی دیوار فرض شده که ذره پس از اولین برخورد به بستر، در جای خود ساکن می‌ماند. با در نظر گرفتن این شرط مرزی فقط 1 درصد افزایش راندمان مشاهده شد.

شکلهای 8 و 9 به ترتیب مؤلفه‌های افقی و عمودی سرعت ذره با قطر 0/1 میلیمتر را در هنگام برخورد به کف، زمانی که تیغه هدایت‌کننده وجود ندارد و برای حالتی که تیغه هدایت‌کننده در عمق 35% عمق جریان قرار گرفته است، نشان می‌دهند.

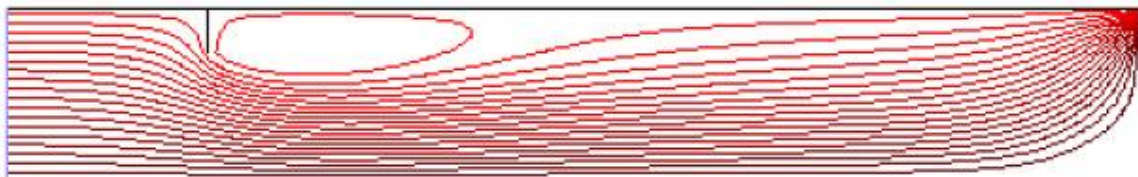
پس از برخورد به دیوار به داخل جریان باز می‌گردد. در اینجا فرض می‌شود که ذره پس از برخورد به کف حوضچه به تله افتاده و مؤلفه‌های افقی و قائم سرعت برخورد ذره به کف حوضچه به عنوان معیاری برای احتمال پایداری ذره تهنشین شده در نظر گرفته شده است.

شکل 5 خطوط جریان عبوری از اطراف صفحه را برای تیغه‌ای با عمق استغراق 25% نشان می‌دهد. با توجه به شکل 5، انحناى خطوط جریان قبل از تیغه، نشان‌دهنده افزایش مؤلفه قائم سرعت بوده و فشردگی خطوط جریان بعد از تیغه نیز افزایش مؤلفه افقی سرعت موضعی را نشان می‌دهند. ذرات زمانی به کف حوضچه متمایل می‌شوند که نرخ افزایش مؤلفه قائم سرعت جریان بیشتر از نرخ افزایش مؤلفه افقی آن باشد.

شکل 6 نتایج مدل عددی را برای تغییرات تنش برشی در کف حوضچه برای حالت بدون تیغه و تیغه با عمق استغراق 35% -  $D_p = 15$  نشان می‌دهد. با قرارگیری تیغه هدایت‌کننده، تنش برشی در محدوده تیغه، با کم شدن ضخامت لایه مرزی افزایش می‌یابد، به طوری که مثلاً برای عمق استغراق 35 درصد، تنش برشی کف به حدود 4 برابر مقدار آن برای حالت بدون تیغه هدایت‌کننده، در



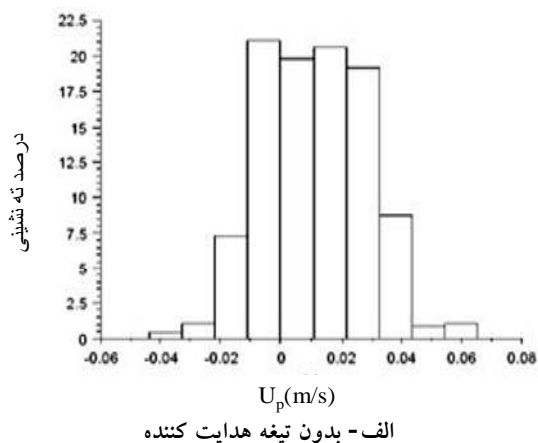
الف) بدون تیغه هدایت‌کننده



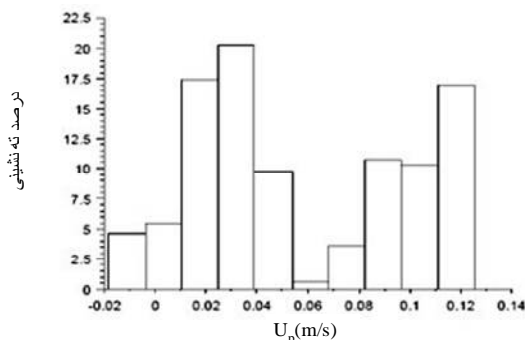
ب) با تیغه هدایت‌کننده در عمق استغراق 25%

شکل 5 نتایج مدل عددی خطوط جریان عبوری در حوضچه در حالت بدون تیغه و با قرارگیری تیغه





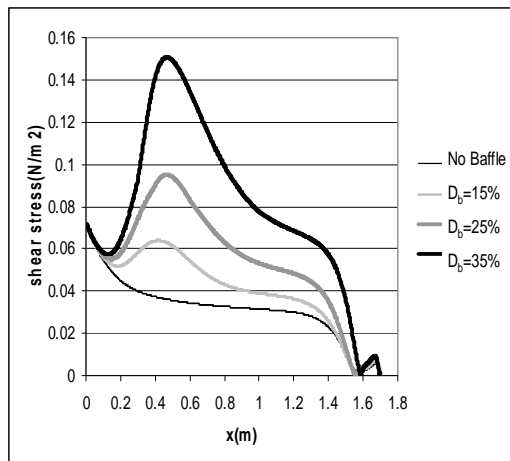
الف- بدون تیغه هدایت کننده



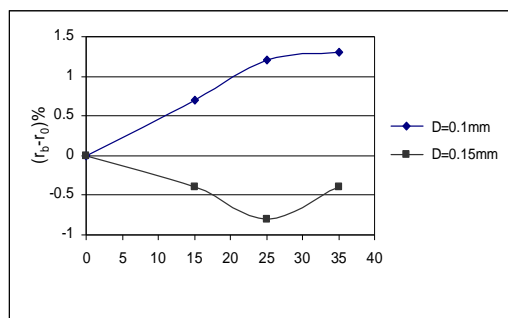
ب- تیغه هدایت کننده با عمق استغراق 35%

شکل 8 درصد ذرات ته نشین شده که هنگام برخورد به کف، مؤلفه افقی سرعت آنها  $u_p(m/s)$  می باشد.

Jayanti and Narayanan (2004) با وجود غیریکنواختی دانه بندی، رسوبها را به صورت یکنواخت در نظر گرفته و حساسیت محاسبات را برای قطرهای مختلف در نظر گرفتند. (Adamsson et al. (2003) ذرات  $d_{20}, d_{50}, d_{80}$  و  $d_{90}$  را به صورت جداگانه و یکنواخت در ورودی پخش کردند. در اینجا از روش Frey et al. (1993) برای پخش غیریکنواخت ذرات در ورودی استفاده شده است. در این روش فرض می شود برای جرم مشخصی از رسوب - که در ورودی حوضچه روی یک خط عمودی تزریق می شود - الگوی پخش رسوبها در عمق جریان از منحنی دانه بندی تأثیر می گیرد. ابتدا منحنی دانه بندی به چند بازه - که هر یک درصد جرمی معینی از کل منحنی دانه بندی را تشکیل می دهد - تقسیم می شود. قطر متوسط هر بازه به عنوان نماینده آن بازه در ورودی حوضچه پخش می شود.



شکل 6 نتایج مدل عددی دو بعدی برای تغییرات تنش برشی کف در طول حوضچه برای مقادیر مختلف عمق استغراق تیغه



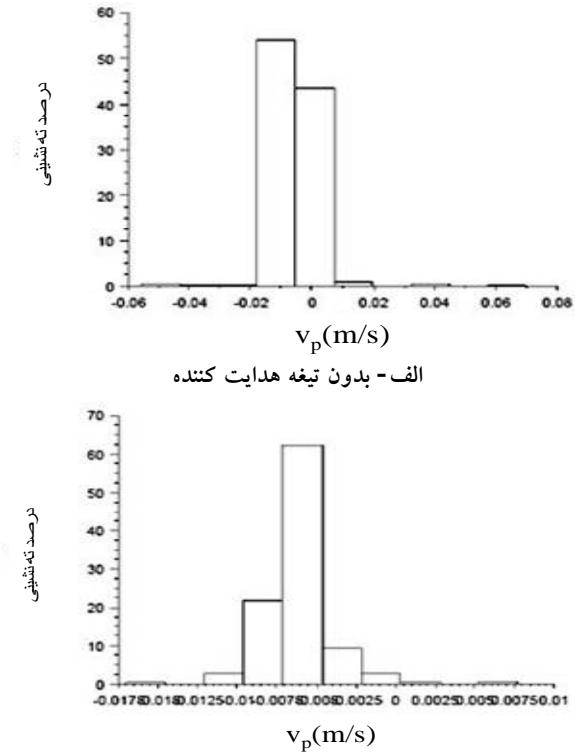
شکل 7 نتایج مدل عددی تغییرات راندمان حوضچه رسوب گیر برای دو ذره  $0/15mm$  و  $0/1mm$

همان طور که شکل 8 نشان می دهد، برای تیغه هدایت کننده با عمق استغراق 35%، حدود 17/5 درصد از ذرات ته نشین شده، با سرعت افقی  $0/12m/s$  به کف حوضچه برخورد کرده اند؛ اما برای حالت بدون تیغه هدایت کننده، کمتر از 2% ذرات با سرعت حدود  $0/06m/s$  به کف رسیده اند که نشان می دهد پایداری بیشتری برای ساکن ماندن دارند. بررسی تأثیر تیغه با استفاده از نتایج مدل عددی نشان می دهد که در حالت های دوبعدی، تیغه باعث افزایش راندمان نمی شود. برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در حالت های دوبعدی، باید غیریکنواخت بودن دانه بندی در نظر گرفته شود.

اولین برخورد به کف، ته نشین می شوند. جدول 3 نتایج را برای سری T2DS1 از آزمایشها در حالت بدون تیغه هدایت کننده و زمانی که تیغه در فاصله 30 سانتیمتری از ورودی قرار دارد، نشان می دهد. در اینجا منحنی دانه بندی به سه بازه تقسیم شده که نتایج راندمان برای هر بازه در جدول 3 آورده شد. مشاهده می شود که در این حالت، مطابقت خوبی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی به دست آمده است. همان طور که نتایج عددی در این حالت نشان می دهد، برای دو محدوده دانه بندی، راندمان تله اندازی در حالت بدون تیغه و با تیغه هدایت کننده 100% بوده و تیغه هدایت کننده، فقط محل ته نشینی ذرات این محدوده را جابه جا می کند. نتایج حل عددی همچنین نشان داد جابه جایی تیغه در طول، تأثیری بر راندمان حوضچه نمی گذارد، که این پدیده را می توان به تغییر نکردن شرایط هیدرولیکی حوضچه با جابه جایی تیغه نسبت داد.

### 3-2- تحلیل های سه بعدی

در گروه های T3DS1 و T3DS2، سرعت در ورودی تبدیل، از  $0/26m/s$  به  $0/36m/s$  افزایش داده شد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که جت وارد شده از بالادست، طولی از حوضچه را نیز طی می کند و تغییرات شدید عرضی سرعت در طولی از حوضچه به وجود می آید. برای مشاهده تأثیر تیغه برای این آزمایشها، مدل عددی به صورت سه بعدی در نظر گرفته شد.



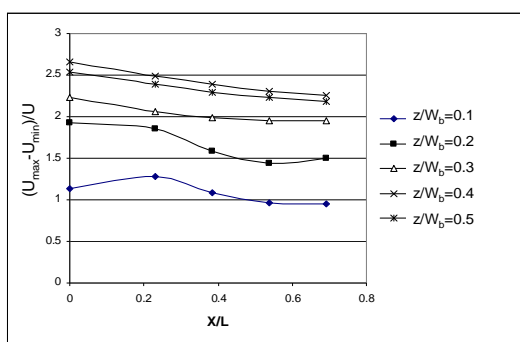
شکل 9 درصد ذرات ته نشین شده که هنگام برخورد به کف مؤلفه قائم سرعت آنها  $v_p(m/s)$  می باشد

برای جرم مشخصی از رسوب که در ورودی حوضچه در عمق پخش می شود، جرم رسوب هر بازه با توجه به قطر متوسط آن بازه و درصد تشکیل دهنده آن بازه تعیین و تعداد ذرات هر بازه با توجه به فرض کروی بودن ذرات برای هر بازه محاسبه می شود. محدوده عمقی هر بازه نیز با توجه به درصد جرمی تشکیل دهنده در دانه بندی تعیین می شود. در این روش تعداد ذرات رسوبی در هر بازه طوری به دست می آید که غلظت در کل عمق یکنواخت باشد. در اینجا نیز فرض شده که ذرات پس از

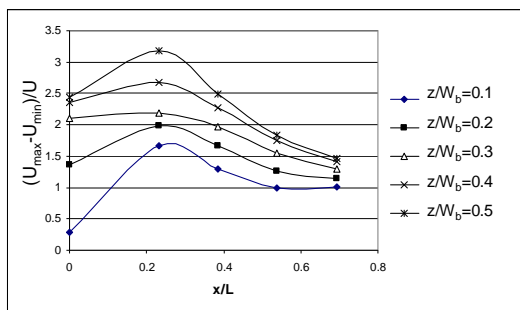
جدول 3 مقایسه راندمان محاسبه شده با مدل عددی و نتایج آزمایش گروه T2DS1

نتایج آزمایشگاهی	محاسبه راندمان جرمی با استفاده از مدل عددی (%)			راندمان کل	راندمان کل
	70-80	80-100	100-120		
محدوده الک	70-80	80-100	100-120	82/8	81/5
بدون تیغه	100	100	64/2	82/2	77/4
تیغه هدایت کننده با عمق استغراق 25%	100	100	63/1	82/2	77/4

شکل 11، نتایج مدل عددی را برای نسبت  $(u_{max} - u_{min})/U$  در برابر فاصله طولی از ورودی حوضچه رسوب‌گیر، برای گروه T3DS1 با طول حوضچه 130 سانتیمتر نشان می‌دهد.  $u_{max}$  بیشینه سرعت در عمق،  $u_{min}$  کمینه سرعت در عمق و  $U$  متوسط سرعت جریان در حوضچه است. این نسبت برای مقادیر مختلف فاصله از دیوار، میزان ناهمگون شدن سرعت در عمق را تحت تأثیر جت ورودی نشان می‌دهد.



الف- بدون تیغه هدایت کننده

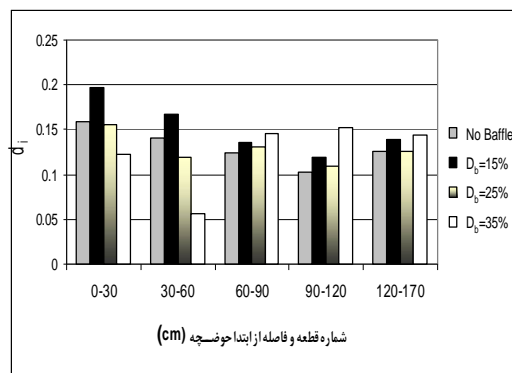


ب- تیغه هدایت کننده با عمق استغراق 15% در ورودی حوضچه

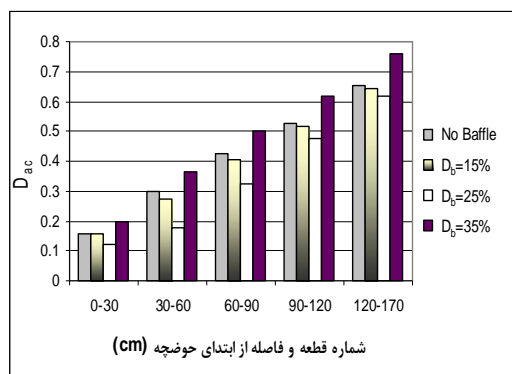
شکل 11 تغییرات  $\frac{u_{max} - u_{min}}{U}$  در طول حوضچه برای پنج نقطه مختلف عرضی

این نمودارها برای پنج نقطه عرضی مختلف  $z/W_b$  رسم شده که  $W_b$  عرض حوضچه و  $Z$  فاصله از دیوار می‌باشد. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، قرار دادن تیغه هدایت‌کننده در عمق استغراق 15%، این نسبت را در فاصله  $x/L = 0/4 - 0/7$  به شدت کاهش داده و آنرا نسبت به سمت یک میل می‌دهد؛ بنابراین با توجه به شیب

در این سری از آزمایشها، نتایج نشان می‌دهند که برای گروه T3DS1، قرار دادن تیغه در عمق استغراق 15%، راندمان تله‌اندازی حوضچه را حدود 4% برای طول 130 سانتیمتری و 8/5% برای طول 170 سانتیمتری حوضچه افزایش می‌دهد. توزیع ته‌نشینی رسوب برای این سری از آزمایشها در شکل 10 دیده می‌شود.



الف- توزیع موضعی ته‌نشینی



ب- توزیع تجمعی ته‌نشینی

شکل 10 توزیع ته‌نشینی موضعی و تجمعی برای سری T3DS1؛ تیغه در فاصله ثابت 30 سانتیمتر از ورودی و عمقهای استغراق 15-35%

در گروه T3DS2، افزایش راندمان با قرارگیری تیغه کمتر بوده و برای طول بیشتر حوضچه رسوب‌گیر (170cm)، قرار دادن تیغه در عمق استغراق 15% حدود 5/3% افزایش راندمان را نشان می‌دهد.

نمونه‌ای از نحوه شروع فرسایش رسوبها کف را نشان می‌دهد.

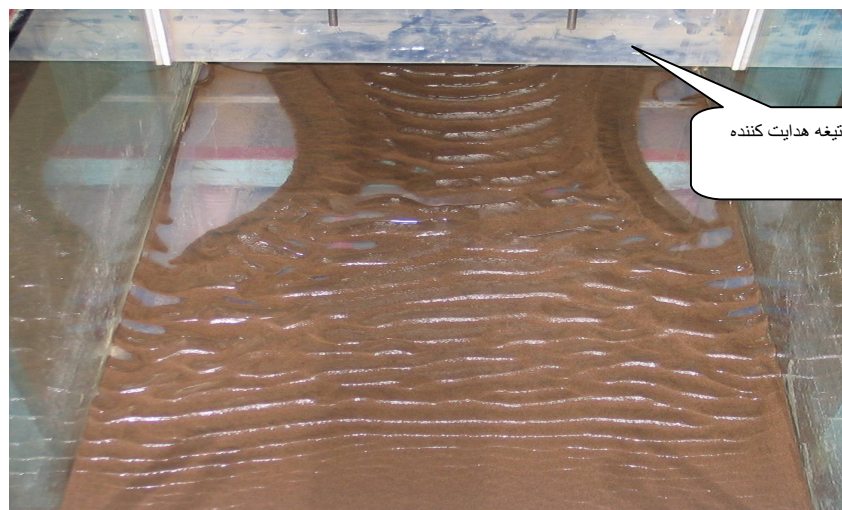
همان‌طور که شکل 12 نشان می‌دهد، فرسایش به صورت هلالی از گوشه‌ها شروع شده و به تدریج با افزایش عمق استغراق تیغه، به مرکز کانال گسترش می‌یابد. نحوه پیشروی فرم بستر بعد از تیغه نیز نشان می‌دهد که در مرکز -که پیشروی کمتر است- جت ورودی خنثی شده و در گوشه‌ها با قرارگیری تیغه، سرعت، کمی افزایش می‌یابد. این پدیده، حساسیت تنظیم عمق تیغه را نشان می‌دهد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر تیغه هدایت‌کننده مستغرق بر راندمان تله‌اندازی و نحوه رسوبگذاری در حوضچه رسوب‌گیر با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. نتایج مدل عددی به صورت کمی و کیفی نشان داد که تأثیر تیغه بر راندمان تله‌اندازی تا حد زیادی، به دانه‌بندی به کار رفته و عمق نزدیک شدن ذرات با قطر مشخص به تیغه بستگی دارد.

نمودارها می‌توان دریافت که با افزایش طول حوضچه، نرخ کاهش قدرت جت آب ورودی برای حالت بدون تیغه هدایت‌کننده، بسیار کمتر از میزان آن برای حالت با تیغه هدایت‌کننده است و شرایط برای رسوب‌گذاری با نصب تیغه هدایت‌کننده مناسبتر می‌شود. به منظور روندیابی ذرات رسوبی در این حالت، ذرات با قطر  $0/15$  و  $0/1$  میلیمتر در سطح ورودی حوضچه به صورت یکنواخت پخش شد. نتایج مدل عددی به ترتیب 7 و 5 درصد افزایش راندمان را به ترتیب برای ذرات  $0/15$  و  $0/1$  میلیمتر برای همین شرایط -یعنی زمانی که تیغه در عمق استغراق 15% نصب شده - نشان داد.

با توجه به شکل 10، حساسیت فرسایش رسوبهای کف نسبت به عمق تیغه در حالت‌های سه بعدی، بیشتر است. فرارگیری تیغه در عمق استغراق 35% فرسایش زیادی را در قطعه 30-60 سانتیمتری و تجمع رسوبها فرسایش یافته را در قطعه بعدی نشان می‌دهد. با بیشتر شدن عمق استغراق تیغه از مقدار بهینه، تنش برشی کف در محدوده فرارگیری تیغه زیاد شده و رسوبها در قالب فرم بستر بر روی کف حوضچه شروع به حرکت می‌کنند. شکل 12



شکل 12 فرسایش کف حوضچه در گروه T3DS1 با طول 130 سانتیمتر؛ تیغه در عمق استغراق 25% (جهت جریان از بالا به پایین صفحه)

$Re_r$	عدد رینولدز نسبی ذره
$u$	مؤلفه سرعت موضعی جریان در جهت x
$U$	سرعت متوسط جریان در حوضچه (متر بر ثانیه)
$u_{max}$	بیشینه سرعت افقی جریان در عمق
$u_{min}$	کمینه سرعت افقی جریان در عمق
$u_p$	سرعت موضعی ذره در جهت x
$v_p$	سرعت موضعی ذره در جهت y
$u_*$	سرعت برشی
$W_b$	عرض حوضچه رسوب گیر
$z$	فاصله از دیوار جانبی حوضچه

### 6- منابع

- [1] Adamsson, A.; Stovin, V.; Bergdahl, L. (2003); "Bed Shear Stress Boundary Condition for Storage Tank Sedimentation." J. Hyd. Eng., 129(7), 651-658.
- [2] Armenio, V.; Fioroto, V. (2001), "The Importance of the Forces Acting on Particles in Turbulent Flows;" ASME, Physics of Fluids; 13(8); 2437-2440.
- [3] Atkinson, E. (1992); "The Design of Sluiced Settling Basins: A Numerical Approach;" Rep. OD 124; Overseas Development Unit; HR Wallingford; U.K.
- [4] Bredberg J. (2000); "On Two Equation Eddy Viscosity Models;" Internal Report 01/8, Department of Thermo and Fluid Mechanics; Univ. of Chalmers; Sweden.
- [5] Frey, P.H.; Champagne, J.Y.; Morel, R.; Gay, B. (1993); "Hydrodynamics Fields and Solid Particles Transport in a Settling Tank;" J. Hydr. Research, 31(6); 763-776.
- [6] . Fluent User's Guide-Version 6 (2001); Fluent Inc.; NH.
- [7] Garde, R.j; Ranga Raju; K.G. and Sujudi A.W.R. (1990); "Design of Settling Basins;" J. Hydr. Research; 28(1), 81-91.
- [8] Imam, E.H.; McCorquodale, J.A. and Bewetra, J.K. (1983); "Numerical Modeling of Sedimentation Tanks;" J. Hydr. Eng.; 109(12); 1740-1754.

نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دادند در محدوده آزمایشهای انجام شده، تیغه هدایت کننده -در حالتی که جریان به صورت دوبعدی به حوضچه وارد می شود- باعث افزایش راندمان و کم کردن طول ناحیه رسوب گذاری نمی شود. علت این پدیده را می توان به تشکیل یک جت در زیر تیغه و به وجود آمدن یک ناحیه چرخشی در پشت صفحه نسبت داد که باعث می شود نرخ افزایش مؤلفه افقی سرعت جریان، بیشتر از مقدار مؤلفه قائم سرعت شده و رسوبها نتوانند به کف متمایل شوند. قرار دادن صفحه ای متخلخل به جای صفحه صلب، یا قرار دادن صفحه ای متخلخل بلافاصله بعد از تیغه هدایت کننده صلب را می توان در این حالت بررسی کرد. نتایج همچنین نشان داد، در حالت های سه بعدی -یعنی حالت هایی از جریان که تبدیل ورودی نمی تواند انتقال آرام جریان از بالادست را به خوبی انجام دهد و تغییرات عرضی سرعت در ورودی حوضچه زیاد است- قرار دادن تیغه در عمق استغراق 15%، راندمان حوضچه را 8/5% افزایش داد. استفاده از تبدیل ناگهانی همراه با یک تیغه هدایت کننده می تواند به عنوان یک گزینه جایگزین برای تبدیلهای تدریجی متداول بررسی شود.

### 5- فهرست علائم

$C_D$	ضریب درگ ذره
$d_i$	نسبت ته نشینی موضعی
$D_{ac}$	نسبت ته نشینی تجمعی
$D_b$	درصد عمق استغراق تیغه
$D$	عمق جریان در حوضچه
$L$	طول حوضچه رسوب گیر بر حسب سانتیمتر
$L_b$	فاصله تیغه هدایت کننده از ورودی حوضچه (سانتیمتر)
$Q$	دبی جریان ورودی به حوضچه (لیتر بر ثانیه)
$r$	راندمان حوضچه رسوب گیر (درصد)
$r_b$	راندمان حوضچه رسوب گیر با نصب تیغه هدایت کننده (درصد)

[14] Lyn; D.A. and Rodi; W. (1990); "Turbulence Measurement in Model Settling Tanks"; J. of Hydr. Eng.; 116(1); 3-21.

[15] Lyn; D.A.; Stamou; A.I. and Rodi; W. (1992); "Density Currents and Shear-Induced Flocculation in Sedimentation Tanks"; J. of Hyd. Eng.; 118(6); 849-867.

[16] Ranga Raju; K.G.; Kothiyari; U.C.; Srivastav S. and Saxena M. (1999); "Sediment Removal Efficiency of Settling Basins;" ASCE; J. of Irrigation and Drainage; 125(5); 308-314.

[17] Wiegmann, H. and Muller-Neuhaus; G. (1951); "Zwei neue Klaranlagen der Emschergenossenschaft." Die Wasserwirtschaft; Stuttgart; Germany; 42(93); 61-67 (in German); Cited in Krebs; P.; Vischer; D., Gujer; W. (1995);

[9] Jayanti S.; Narayanan S. (2004); "Computational Study of Particle-Eddy Interaction in Sedimentation Tanks"; J. of Envir. Eng.; 130(1); 37-49.

[10] Knop, E. (1952); "Ueber den Einflub der Stromung auf Flockung und Absetzvorange in Klarbecken;" Gesundheits-Ingenieur; Munich; Gemany; 73(9/10); 157-163 (in German); Cited in Krebs; P.; Vischer; D.; Gujer; W. (1995).

[11] Krebs P. (1991). "The Hydraulics of Final Settling Tanks"; Wat. Sci. Tech.; 23(4-6); 1037-1046.

[12] Krebs P.; Vischer D. and Gujer W. (1992); "Improvement of Secondary Clarifiers Efficiency by Porous Walls;" Wat. Sci. Tech.; 26(5-6), 1147-1156.

[13] Krebs; P.; Vischer; D. and Gujer; W. (1995); "Inlet-Structure Design for Final Clarifiers;" ASCE J. of Envir. Eng.; 121(8); 558-564.