

صلى الله عليه وسلم



دانشکده عمران و معماری

گروه مهندسی آب و محیط زیست

بررسی سازوکار و میزان آب شستگی در رودخانه هایی با بستر شنی در پایین دست سدها و

چگونگی تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

نگارنده : امیر فرهنگ فرزانه

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۹۷،۳۹۹/ع  
تاریخ: ۹۷،۸،۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیر فرهنگ فرزانه با شماره دانشجویی ۹۴۱۳۳۲۴ رشته عمران گرایش سازه های هیدرولیکی تحت عنوان بررسی ساز و کار و میزان آب شستگی در رودخانه هایی با بستر شنی در پایین دست سدها و چگونگی تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی که در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خوب)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر رامین امینی	۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر مهدی گلی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر امیر عباس عابدینی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سعید گلپیان	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تنبیه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پیشگام مادر و پدر، همیشه مهربانم که در محظات سخت و طاقت فرسای زندگی نور

امید در دلم بوده و هستند.

## تشر و قدرانی :

اکنون که این تحقیق ثمره ماه ها تلاش و کوشش بی وقفه اینجانب در عرصه علم و فن آوری در جهت رشد و بالندگی کشور عزیزم ایران است، مرهون زحمات خستگی ناپذیر اساتید محترم و همفکری و شراکت معنوی این عزیزان با این حقیر است.

لذا بر خود لازم می دانم از جناب آقای دکتر رامین امینی که همواره با بینش دقیق علمی خود و با روی گشاده بنده را یاری داده اند قدردانی نمایم. بحق که بسیاری از دانسته های علمی خود را مدیون لطف و عنایت این عزیزان می باشم.

الهی بر تمامی عزیزانی که از آثارشان استفاده نمودم و دوستانی که در تهیه این مختصر حقیر را یاری نمودند نظری خاص فرما که همگی سخت محتاج آن اکسیر نگاه و کیمیای عشق تو هستیم.

باشد که این تحقیق هر چند ناچیز، مورد استفاده دیگران که در این زمینه فعالیت خواهند کرد قرار گیرد.

## تعهدنامه

اینجانب امیر فرهنگ فرزانه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی سازوکار و میزان آب شستگی در رودخانه هایی با بستر شنی در پایین دست سدها و چگونگی تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی" تحت راهنمایی آقای دکتر رامین امینی به عنوان استاد راهنما متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء دانشجو

تاریخ:

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوط ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان
- نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این مطالعه میزان آب شستگی در بستر رودخانه و چگونگی تشکیل لایه مقاوم و دانه بندی نهایی لایه سطحی و لایه زیرین بستر به وسیله یک مدل عددی که با گدنویسی در نرم افزار اکسل به زبان ویژوال بیسیک نوشته شده است محاسبه می شود. معادلات حاکم بر فرآیند انتقال رسوب از دو مدل هیدروداینامیک و مورفوداینامیک تشکیل شده است. مدل هیدروداینامیک که از معادلات پیوستگی و بقا مومنوم تشکیل شده است، جهت محاسبه مولفه های وابسته به جریان مورد استفاده قرار می گیرد. مدل مورفوداینامیک نیز شامل معادلات مربوط به فرآیند انتقال رسوب است. پارامترهای هیدرولیکی در ترکیب با معادلات هیدروداینامیک و مورفوداینامیک در نوشتن گدها مورد استفاده قرار گرفته است.

از آنجاییکه در این تحقیق از روش تفاضل محدود استفاده شده از این رو معادلات حاکم پس از گسسته سازی و تعیین ضرائب، توسط زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک گدنویسی می شوند. نهایتاً نتایج عددی بدست آمده با دو مدل آزمایشگاهی مقایسه می شوند و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفته می شود.

در این تحقیق در ابتدا صحت عملکرد مدلسازی عددی جریان توسط دو تست آزمایشگاهی به اثبات رسید. سپس مدل سازی عددی در حالتی انجام شد که رسوب وارد شده به ابتدای کانال بیش از رسوب قابل انتقال توسط جریان باشد که نتایج مناسب و مطابق با واقعیت نشان داده شد. در مرحله بعد رسوب وارد شده به کانال به مقداری در نظر گرفته شد که کمتر از رسوب قابل انتقال توسط جریان باشد و مدل سازی عددی به خوبی رسوب برداری در کانال را به نمایش گذاشت. در نهایت با به کار بردن مدل رسوب برداری در طولانی مدت، مدل توانست لایه مقاوم در برابر آب شستگی را به نمایش بگذارد که در صورت استفاده از این لایه در پایین دست سدها می توان از آب شستگی در پایین دست سدها و تخریب ابنیه پایین دست به خوبی جلوگیری کرد.

کلمات کلیدی: انتقال رسوب، لایه مقاوم، آب شستگی

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول:

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- ضرورت انجام تحقیق ..... ۲
- ۳-۱- به چه دلیل از روش های عددی برای حل معادلات استفاده می شود؟ ..... ۳
- ۴-۱- روش عددی بکار رفته چیست و چه ویژگی هایی دارد؟ ..... ۴
- ۵-۱- هدف از تحقیق پیش رو چیست؟ ..... ۴
- ۶-۱- ساختار پایان نامه ..... ۴

فصل دوم :

- ۱-۲- مقدمه ..... ۸
- ۲-۲- تحقیقات خارجی ..... ۸
- ۱-۲-۲- مدل کانتربری ..... ۱۲
- ۲-۲-۲- مدل اوک کریک ..... ۱۴

فصل سوم :

- ۱-۳- مقدمه ..... ۲۲
- ۲-۳- مدل هیدرودینامیک ..... ۲۳
- ۱-۲-۳- معادله پیوستگی ..... ۲۳
- ۲-۲-۳- معادله بقای مومنتوم ..... ۲۴
- ۳-۳- معادلات انتقال رسوب ..... ۲۷
- ۱-۳-۳- انواع بستر رودخانه ..... ۲۷
- ۲-۳-۳- آستانه حرکت ذره رسوبی ..... ۲۸
- ۳-۳-۳- انتقال بار بستر(معادله اکسنر)..... ۳۰
- ۴-۳-۳- انتقال بار معلق(معادله انتقال-انتشار)..... ۳۱



- ۳-۴- معادلات بکار رفته و مراحل طی شده در مدل عددی برای تشخیص دانه بندی بستر، میزان رسوب انتقال یافته و تغییرات تراز بستر ..... ۳۴
- ۳-۴-۱- شرایط مدل سازی رسوب برداری و رسوب گذاری در رودخانه هایی با بستر شنی در حالت مخلوط و پارامترهای مورد استفاده: ..... ۳۴
- ۳-۴-۲- معادله تعادل اکسیر با در نظر گرفتن اثر سیلاب متناوب در حالت مخلوط ..... ۳۵
- ۳-۴-۳- محاسبه تنش برشی در کف و شیب بستر ..... ۳۶
- ۳-۴-۴- محاسبه مقدار رسوب انتقالی به شکل بار بستر ..... ۳۸
- ۳-۴-۵- بدست آوردن ارتفاع بستر و دانه بندی بستر در هر گام زمانی ..... ۳۹
- ۳-۴-۶- شرایط مرزی ..... ۴۱
- ۳-۴-۷- شرایط اولیه مورد نیاز نرم افزار ..... ۴۲
- ۳-۴-۸- مقادیر اولیه مورد نیاز نرم افزار ..... ۴۲
- ۳-۴-۹- ضرایب کمکی مورد نیاز نرم افزار ..... ۴۳

#### فصل چهارم:

- ۴-۱- مقدمه ..... ۴۶
- ۴-۲- معرفی مدل آزمایشگاهی اول ..... ۴۶
- ۴-۳- معرفی مدل آزمایشگاهی دوم ..... ۵۱
- ۴-۴- بررسی بستر شنی در حالت رسوب گذاری با استفاده از مدل عددی ..... ۵۴
- ۴-۴-۱- تغییرات ارتفاع بستر ..... ۵۶
- ۴-۴-۲- نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست ..... ۵۷
- ۴-۴-۳- دانه بندی نهایی لایه سطحی و لایه زیرین ..... ۵۸
- ۴-۴-۵- بررسی بستر شنی در هنگام رسوب برداری ..... ۵۹
- ۴-۵-۱- تغییرات ارتفاع بستر ..... ۶۰
- ۴-۵-۲- نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی ..... ۶۱
- ۴-۵-۳- اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر ..... ۶۲
- ۴-۵-۴- دانه بندی نهایی لایه سطحی و لایه زیرین ..... ۶۳
- ۴-۶- لایه محافظ در برابر آب شستگی ..... ۶۴

- ۶۶ ..... ۱-۶-۴ اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر
- ۶۶ ..... ۲-۶-۴ تغییرات ارتفاع بستر
- ۶۷ ..... ۳-۶-۴ نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی
- ۶۸ ..... ۴-۶-۴ تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

فصل پنجم:

- ۷۲ ..... ۱-۵ خلاصه
- ۷۲ ..... ۲-۵ نتیجه گیری
- ۷۳ ..... ۳-۵ پیشنهادات
- ۷۵ ..... مراجع

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲) مشخصات دانه های بکار رفته در آزمایش پروفیت ..... ۱۸
- جدول ۱-۳) ضرائب ثابت در معادلات k-۴ ..... ۲۶
- جدول ۱-۴) انحراف معیار، اندازه متوسط دانه ها و اندازه دانه ای که ۹۰٪ بقیه دانه ها از آن کوچکترند در آزمایش ویلکاک ..... ۴۸
- جدول ۲-۴) نتایج بدست آمده از آزمایش ویلکاک ..... ۴۹
- جدول ۳-۴) نتایج ۱۰ آزمایش J06 ..... ۵۰
- جدول ۴-۴) دانه بندی آزمایش J06 ..... ۵۰
- جدول ۵-۴) دانه بندی اولیه لایه سطحی (initial bulk) ..... ۵۳

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲) طرح آزمایش پارکر و ساترلند ..... ۱۱
- شکل ۲-۲) نمودار محاسبه N ..... ۱۴
- شکل ۳-۲) نمودار محاسبه مقادیر  $w_0$  و  $\sigma_{\phi 0}$  ..... ۱۶
- شکل ۴-۲) نتایج بدست آمده از حل مدل های اوک کریک و کانتربری در پیش بینی **Da50** ..... ۱۹
- شکل ۵-۲) دانه بندی لایه مسلح در برابر آب شستگی از حل دو روش اوک کریک و کانتربری ..... ۱۹
- شکل ۱-۳) نحوه انتقال رسوب به شکل بار بستر ..... ۳۰
- شکل ۱-۴) دانه بندی رسوبات مختلف در آزمایش ویلکاک ..... ۴۷
- شکل ۲-۴) مقایسه دبی رسوب بدست آمده از نرم افزار و دبی رسوب آزمایش ویلکاک ..... ۵۱
- شکل ۴-۳) دانه بندی نهایی لایه سطحی بر اساس آزمایش کالس ..... ۵۲
- شکل ۴-۴) مقایسه دانه بندی نهایی لایه سطحی که توسط مدل عددی محاسبه شده است با دانه بندی اولیه و دانه بندی نهایی لایه سطحی در مدل آزمایشگاهی ..... ۵۴
- شکل ۵-۴) مقادیر اولیه برای حالت رسوب گذاری ..... ۵۵
- ..... ۵۵
- شکل ۶-۴) دانه بندی رسوب ورودی از بالادست، لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب گذاری ..... ۵۵
- ..... ۵۶
- شکل ۷-۴) پارامترهای بدون بعد در حالت رسوب گذاری ..... ۵۶
- شکل ۸-۴) تغییرات ارتفاع بستر در حالت رسوب گذاری ..... ۵۷
- شکل ۹-۴) نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست در حالت رسوب گذاری ..... ۵۸
- شکل ۱۰-۴) دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب گذاری ..... ۵۹
- شکل ۱۱-۴) مقادیر اولیه برای حالت رسوب برداری ..... ۶۰
- شکل ۱۲-۴) تغییرات ارتفاع بستر در حالت رسوب برداری ..... ۶۱
- شکل ۱۳-۴) نسبت دبی رسوب قابل انتقال به دبی رسوب ورودی از بالادست در حالت رسوب برداری ..... ۶۲
- شکل ۱۴-۴) اندازه متوسط دانه ها در لایه سطحی در حالت رسوب برداری ..... ۶۳
- شکل ۱۵-۴) دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب برداری ..... ۶۴
- شکل ۱۶-۴) مقادیر اولیه برای لایه مقاوم در برابر آب شستگی ..... ۶۵

- شکل ۴-۱۷) اندازه متوسط دانه ها در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۸) تغییرات ارتفاع بستر در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۹) نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی ورودی در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی ..... ۶۸
- شکل ۴-۲۰) لایه مقاوم در برابر آب شستگی ..... ۶۹



# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

انسان بیشتر دوران تاریخی خود را به شکار و جمع آوری غذا پرداخته است و تنها حدود ده هزار سال پیش آموخت که چگونه حیوانات را اهلی کند و گیاهان را پرورش دهد. و لذا بهره برداری از منابع آب سطحی و زیر زمینی و انتقال آب از یک مکان به مکان دیگر به منظور آبیاری و آبرسانی به عنوان یک ضرورت حیاتی مورد توجه قرار گرفت.

در گذشته مردم در هر منطقه بنابر ضرورت و مشکلات موجود نسبت به ایجاد بند یا آبگیر اقدام می کردند تا نیازهای خود را در زمینه آبیاری و آبرسانی مرتفع سازند. با پیشرفت صنعت، کشاورزی و توسعه شهرنشینی نیاز انسان به ذخیره و انتقال آب هر روز بیشتر شد و همسو با آن درک قوانین علمی حاکم بر بهره برداری بیشتر و بهتر از منابع آبی ضرورت پیدا کرد. در میان روش های مختلف استفاده از منابع آبی، ساخت سد بر روی رودخانه ها و استفاده از نیروی ثقل و به حرکت درآوردن آب به صورت جریان با سطح آزاد به همراه ایجاد کانال ها و سازه های هیدرولیکی مربوط از متداول ترین روش ها در آبیاری و آبرسانی بوده است. باید در نظر داشت احداث سد بر روی رودخانه ها باعث برهم خوردن تعادل و رژیم جریان رودخانه شده و باعث می شود رودخانه ها در مقابل، رژیم جریان خود را تغییر داده و در مسیری برای ایجاد تعادل مجدد قرار گیرند. رودخانه ها شریان های اصلی زمین می باشند و لذا علاوه بر بهره برداری از آنها برای حفاظت و حراست از آنها باید درک درستی از رفتارشان بدست آورد.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

محدوده پایین دست سدهای مخزنی از جمله مکان هایی است که معمولاً در معرض گود شدن بستر<sup>۱</sup> و فرسایش بستر قرار می گیرند. به دلیل ته نشین شدن ۹۹٪ رسوبات در پشت سدهای مخزنی، آبی که از سد

---

<sup>1</sup> Degradation



به سمت پایین دست جاری می شود بدون رسوب خواهد بود. از آن جا که رودخانه قبل از ساخت سد با نرخ انتقال رسوب خود در حال تعادل بوده است لذا بعد از ساخت سد و قطع انتقال رسوب، بستر رودخانه به منبعی برای رسوب مورد نیاز جهت رسیدن به تعادل تبدیل خواهد شد و تحت آب شستگی شدید قرار می گیرد. بنابراین همواره بعد از ساخت سدها شاهد افت بستر رودخانه در پایین دست و به طبع آن ایجاد اختلاف تراز بین کف حوضچه آرامش و رودخانه پایین دست می باشیم.

از جمله مسائل مهمی که در این زمینه باید مورد بررسی قرار گیرد می توان به ضرورت شناخت شکل کلی رودخانه (مرفولوژی رودخانه)، تثبیت سواحل و بستر رودخانه اشاره کرد. سواحل و بستر رودخانه در پایین دست سدها مخصوصاً در رودخانه هایی با بستر شنی همواره با پدیده آب شستگی روبرو هستند. به دلیل ته نشینی شدن رسوبات رودخانه در مخزن سد، آبی که از سد به سمت پایین دست رها می شود دارای بار رسوب بسیار پایینی بوده و تمایل زیاد آن به جذب مجدد رسوبات باعث ایجاد پدیده ای به نام آب شستگی شدید در پایین دست سدها، فرسایش سواحل، تغییر ریخت شناسی رودخانه و خسارت به انبیه پایین دست می شود. برای مقابله با این پدیده می توان از لایه های مقاوم در برابر آب شستگی استفاده کرد. که در مورد ابعاد، ضخامت و شکل دانه بندی این لایه نظرات کاملی ارائه نشده است. از این رو به نظر می رسد شناخت ساز و کار فرسایش و آب شستگی و راه های مقابله با آن ضروری باشد.

### ۱-۳- به چه دلیل از روش های عددی برای حل معادلات استفاده می شود؟

ساختن مدل فیزیکی و بررسی پدیده آب شستگی می تواند نتایج خوبی را به ما بدهد. ولی این بررسی مستلزم صرف هزینه های زیادی است و همین طور محدودیت های زیادی نیز دارد. زیرا شناختن و ساخت کانال هایی منطبق بر مورفولوژی رودخانه بدلیل پیچیدگی جریان و همچنین تاثیرات ناشی از مقیاس باعث می شود درک روشنی از واقعیت بدست نیاید به همین دلیل می توان از مدل های عددی استفاده کرد که هم کم هزینه تر بوده و هم می توان به راحتی پارامترهای مختلف را تغییر داد و اثرات به وجود آمده را با هم

مقایسه کرد. برای این که در نهایت درک درستی به وجود آید می توان نتایج حاصل از مدل سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی و همچنین مشاهدات واقعی مقایسه کرد.

#### ۱-۴- روش عددی بکار رفته چیست و چه ویژگی هایی دارد؟

در حال حاضر مدل های مختلفی در زمینه شبیه سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در کانال ها ارائه شده است که از آن جمله می توان به روش تفاضل محدود اشاره نمود. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن ها تقریب زده می شود. معادلات حرکت در سیالات غالباً به شکل معادلات سهموی نوشته می شوند معادلات لایه مرزی و معادلات ناویر-استوکس<sup>2</sup> نمونه هایی از چنین فرمول بندی می باشند.

#### ۱-۵- هدف از تحقیق پیش رو چیست؟

هدف از این تحقیق بررسی کارایی مدل سازی عددی برای شبیه سازی الگوی جریان و فرسایش و آب شستگی و راهکار مقابله با آن است در نهایت نتایج به دست آمده جهت صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی و مدل های عددی دیگر مقایسه می شود.

#### ۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه متشکل از چهار فصل است. در ابتدا تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته توسط محققین مختلف در مورد آب شستگی ارائه می شود و انواع روش های تجربی، آزمایشگاهی و مطالعات عددی که در زمینه های مختلف مربوط به رسوب انجام شده با شرحی مختصر بررسی می شود. در فصل سوم معادلات و روابط حاکم در پدیده رسوب گذاری و رسوب برداری و دانه بندی لایه های مختلف ارائه شده و در ادامه معادلات

---

<sup>2</sup> Navier-Stokes equations

گسسته شده و روش حل ارائه می شود. در ادامه و در فصل چهارم نتایج بدست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و همینطور نتایج به دست آمده از محاسبات عددی بررسی و تحلیل خواهند شد و در پایان خلاصه ای از آن چه صورت گرفته به همراه نتایج حاصل بیان خواهد شد و همچنین توصیه هایی برای مطالعات آینده ارائه می شود.



# فصل دوم

## تاریخچه مطالعات

## ۲-۱- مقدمه

در رابطه با سازوکار انتقال رسوب در رودخانه های شنی و آب شستگی در این رودخانه ها و همین طور چگونگی ایجاد انواع لایه های پوششی و دانه بندی آنها تحقیقات فراوانی توسط دانشگاه ها و مراکز تحقیقاتی در خارج از کشور انجام شده است که بخش زیادی از آن به شکل آزمایشگاهی و میدانی بوده است. ولی مدل سازی های عددی و کامپیوتری و نرم افزاری به ندرت انجام گرفته است. لازم به ذکر است که تحقیقات و آزمایشات خاصی در این زمینه در داخل کشور انجام نشده است. به جهت پیش درآمدی بر تحقیق حاضر خلاصه ای از تحقیقات انجام شده در رابطه با بررسی سازو کار و میزان آب شستگی در رودخانه هایی با بستر شنی در پایین دست سدها و چگونگی تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی، در ادامه می آید.

## ۲-۲- تحقیقات خارجی

رایس و کادوی<sup>۳</sup> با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی معیاری برای انتخاب قطر مناسب سنگچین ارائه کردند آنها با ریختن ماسه ( $D_{50}=0.74 \text{ mm}$ ) در پایین دست حوضچه های آزمایش، میزان فرسایش و حداکثر عمق آب شستگی را اندازه گیری نمودند و بر اساس این نتایج طول و ضخامت لایه لازم برای سنگچین را انتخاب کردند و بر اساس نتایج آزمایشگاهی فرمول زیر را بدست آوردند [۱]

(۱-۲)

$$\left(\frac{D_{50}}{d_1}\right) / \left(\frac{V_*}{V_2}\right) = 0.4396F_r^{1.7854}$$

(۲-۲)

$$V_* = \sqrt{gRS}$$

---

<sup>3</sup> Rice and Kadavy

$D_{50}$ : اندازه سنگچین پایدار در برابر فرسایش در پایین دست حوضچه آرامش

$d_1$ : عمق اولیه پرش هیدرولیکی

$V_2$ : سرعت در پایاب حوضچه آرامش

$F_r$ : عدد فرود جریان بر اساس عمق اولیه پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش

$V_*$ : سرعت برشی جریان

$g$ : شتاب ثقل

$S$ : شیب بستر جریان

$R$ : وزن مخصوص مستغرق

ماینورد<sup>۴</sup> نیز برای ذرات سنگی واقع در بستر کانال و شرایط آستانه حرکت معادله ای به صورت زیر بدست

آورد. [۲]

(۳-۲)

$$\frac{D_{30}}{d} = 0.3 \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gd}} \right]$$

$D_{30}$ : اندازه دانه ای که ۳۰٪ بقیه دانه های خاک از آن کوچکترند.

$\gamma$ : وزن مخصوص آب

$\gamma_s$ : وزن مخصوص دانه های خاک

$V$ : سرعت جریان

---

<sup>4</sup> Maynard

$d$ : عمق جریان

$g$ : شتاب ثقل

گسلر، لیتل ومیر<sup>۵</sup> بیان کردند که اگر جریان ورودی فاقد رسوب باشد باعث ایجاد سطحی در کانال می شود که به آن لایه پوششی ثابت<sup>۶</sup> گفته می شود. [۳] و [۴]

اندرو و پارکر<sup>۷</sup> بیان کردند که اگر جریان ورودی به کانال حاوی رسوبات باشد باعث ایجاد لایه پوششی متحرک<sup>۸</sup> می شود. [۵]

پارکر و ساترلند، دو مدل عددی را برای شبیه سازی شیوه تشکیل لایه های پوششی مقاوم، متحرک و ثابت ارائه دادند. که عبارتند از مدل کانتربری<sup>۹</sup> و مدل اوک کریک<sup>۱۰</sup>. [۶]

شکل (۱-۲) مدل آزمایشگاهی که آنها طراحی کردند را نشان می دهد.

---

<sup>5</sup> Gesler, Little and Mayer

<sup>6</sup> Static Armor Layer

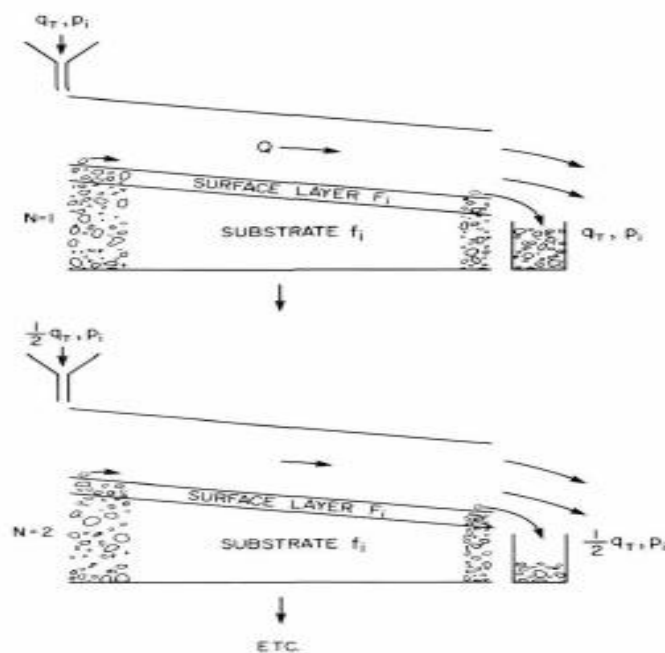
<sup>7</sup> Andrew and Parker

<sup>8</sup> Mobile armor layer

<sup>9</sup> Conterbury model

<sup>10</sup> Oak Creek model





شکل ۱-۲) طرح آزمایش پارکر و ساترلند

که در آن:

$q_T$ : دبی کل رسوب در واحد عرض

در این آزمایش یک کانال که بستر آن با دانه بندی غیر یکنواخت پوشیده شده در نظر گرفته شده است و جریان با دبی مشخص و دبی رسوب در واحد عرض مشخص از روی آن بستر عبور می کند. رسوب ورودی دارای دانه بندی غیر یکنواخت است که مقدار درصد هر دانه با  $P_i$  نشان داده شده است. لازم به ذکر است که دانه بندی رسوب ورودی که با  $P_i$  نمایش داده می شود با دانه بندی رسوبات در لایه زیرین که با  $f_i$  نمایش داده می شود برابر می باشد. ( $P_i = f_i$ ). در هنگام شروع آزمایش به علت وجود دبی ورودی رسوب در واحد عرض، لایه پوششی متحرک شکل می گیرد. در هر مرحله  $q_T/k$  شده است که  $k$  عددی صحیح از ۲ تا بی نهایت در نظر گرفته شده است. با زیاد شدن  $k$  مقدار  $q_T$  بسیار کاهش پیدا کرده است و به مرحله محو شدن رسوب ورودی رسیده است. در هر مرحله درصد ذرات لایه سطحی که با  $F_i$  نمایش داده می

شود اندازه گیری شده است. و براساس آن دو روش برای پیش بینی  $F_i$  در دو حالت لایه پوششی متحرک و ثابت بیان شده است.

### ۲-۲-۱-مدل کانتربری

این مدل بر معادلات حاکم بر لایه محافظ ثابت تکیه دارد که در ادامه بیان خواهد شد.

(۴-۲)

$$F_i = \frac{P_i F_{ci}^{-3/2} g_c^{-N} (F_{ci} \Delta)}{\sum P_i F_{ci}^{-3/2} g_c^{-N} (F_{ci} \Delta)}$$

(۵-۲)

$$\Delta(I_{s50}^*) = \begin{cases} 1/0.7 & 0.055 < \tau_{s50}^* \\ 1/(1.8 - 20\tau_{s50}^*) & 0.035 < \tau_{s50}^* < 0.055 \\ 1/1.1 & 0.035 > \tau_{s50}^* \end{cases}$$

(۶-۲)

$$\tau_{s50}^* = \frac{\tau}{\rho R g D_{s50}}$$

(۷-۲)

$$F_{ci} = \frac{D_i}{D_{s50}}$$

(۸-۲)

$$\ln D_{s50} = \ln D_{r,j} + \frac{\ln D_{r,j+1} - \ln D_{r,j}}{F_{c,j+1} - F_{c,j}} (0.5 - F_{c,j})$$

(۹-۲)

$$F_{c,j} = \sum_{i=1}^J F_i$$

(۱۰-۲)

$$D_i = \sqrt{D_{r,i-1} \cdot D_{r,i}}$$

(۱۱-۲)

$$g_c(F_{ci} \cdot \Delta) = \begin{cases} (F_{ci} \cdot \Delta)^{-0.49} & F_{ci} < 0.66 \\ 1.16(F_{ci} \cdot \Delta)^{-0.19} & F_{ci} > 0.66 \end{cases}$$

که در آن:

$F_{c,j}$ : مجموع درصد مواد ریزدانه کوچکتر از هر سایز مثلاً سایز ۱ام در لایه سطحی

$D_i$ : اندازه متوسط دانه ها در هر رنج

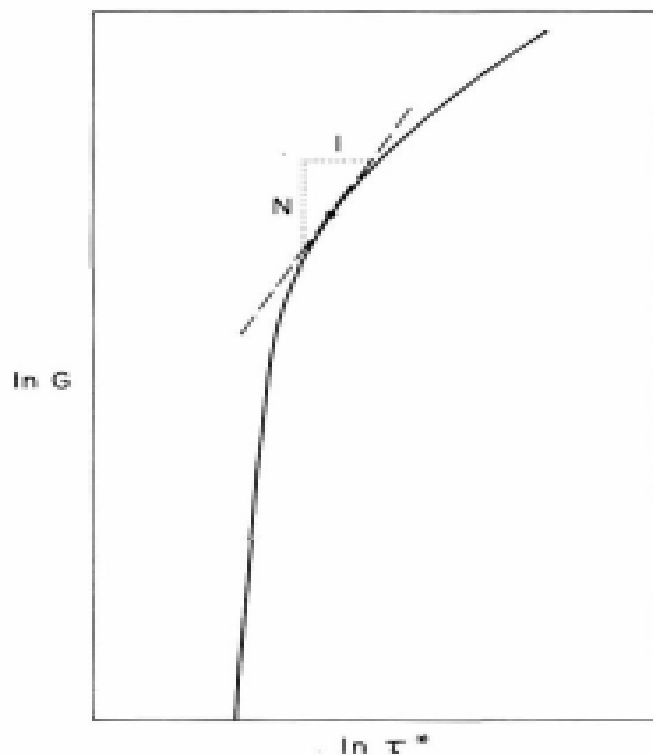
$D_{s50}$ : اندازه متوسط کل دانه ها در لایه سطحی

$\tau$ : تنش برشی که از روابط هیدرولیکی قابل محاسبه است.

$\rho$ : دانسیته آب

$F_i$ : درصد دانه ها در هر رنج در لایه سطحی

برای بدست آوردن توان  $N$  از شکل ۲-۲ استفاده شده است.



شکل ۲-۲) نمودار محاسبه N

### ۲-۲-۲-۲ مدل اوک کریک

این مدل بر اساس معادلات حاکم بر لایه پوششی متحرک تکیه دارد که در ادامه بیان خواهد شد.

(۱۲-۲)

$$F_i = \frac{P_i/G [wq_{sgo}g_B(F_i)]}{\varepsilon P_i/G [wq_{sgo}g_B(F_i)]}$$

(۱۳-۲)

$$G(\varphi) = \begin{cases} 5474 \left(1 - \frac{0.853}{\varphi}\right)^{4.5} & \varphi > 1.59 \\ \exp[14.2(\varphi - 1) - 9.28(\varphi - 1)^2] & 1 \leq \varphi \leq 1.59 \\ \varphi^{14.2} & \varphi < 1 \end{cases}$$

(۱۴-۲)

$$F_i = \frac{D_i}{D_{sg}}$$

(۱۵-۲)

$$g_0 = F_i^{-\beta}$$

$$\beta = 0.0951$$

(۱۶-۲)

$$\ln D_{sg} = \varepsilon F_i \ln D_i$$

(۱۷-۲)

$$\varphi_{sg0} = \varphi = \frac{\tau_{sg}^*}{0.0386}$$

(۱۸-۲)

$$\tau_{sg}^* = \frac{\tau}{pRgD_{sg}}$$

(۱۹-۲)

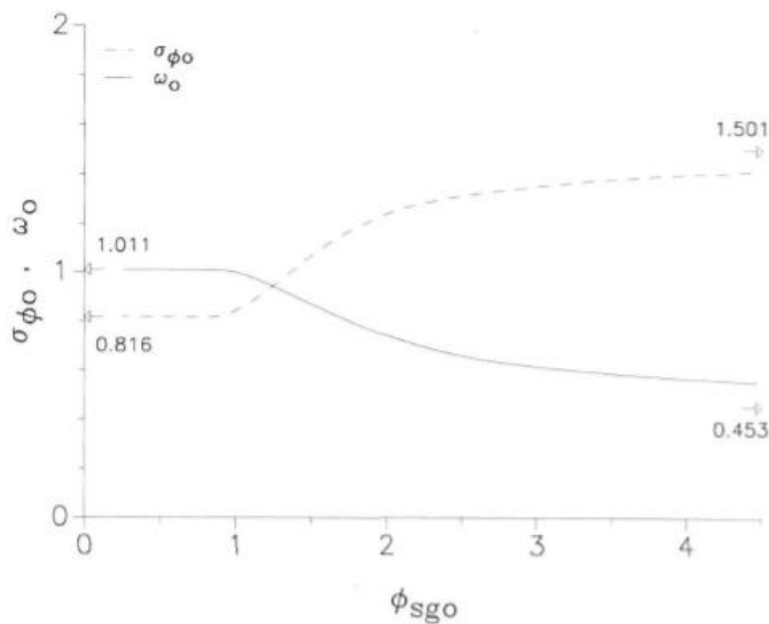
$$w = 1 + \frac{\sigma\varphi}{\sigma\varphi_0}(w_0 - 1)$$

(۲۰-۲)

$$\sigma_\varphi^2 = \sum \left[ \frac{\ln(D_i/D_{sg})}{\ln(2)} \right]^2 F_i$$

$$\sigma_{sg} = 2^\sigma \varphi$$

مقادیر  $w_0$  و  $\sigma\varphi_0$  از شکل ۲-۳ محاسبه خواهد شد.



شکل ۲-۳ نمودار محاسبه مقادیر  $\sigma\phi_0$  و  $\omega_0$

$\sigma\phi$ : ضریب انحراف معیار در سطح بستر

$D_{sg}$ : اندازه متوسط دانه ها در سطح بستر

$\phi_{sg0}$ : ضریب بدون بعد تنش برشی بستر

بستر اکثر رودخانه های شنی شامل مقدار معینی از ماسه می باشند که جریاناتی که قدرت انتقال ذرات شنی را دارند، به راحتی می توانند ذرات ماسه را به شکل غوطه ور منتقل کنند. فرمول هایی که در بالا گفته شد، قابلیت محاسبه انتقال رسوبات ماسه را دارا نمی باشند در نتیجه برای کاربرد معادلات بالا مقدار ماسه نرمالایز شده است.

لازم به ذکر است در معادلات بالا خاصیت (*hiding effect*) لحاظ شده است. اگر شدت جریان خیلی زیاد باشد باعث می شود مقدار تنش برش بسیار زیاد شود که باعث افزایش خیلی زیاد انتقال رسوب خواهد شد.

بالا رفتن تنش برش باعث می شود عمل کرد ( $G$ ) یک مقدار ثابت تبدیل شود و در نتیجه  $Fi=Pi$  خواهد شد و هیچ گونه پیش بینی در مورد خصوصیات لایه سطحی بدست نمی آید. اگر شدت جریان کم باشد و نرخ انتقال رسوب ورودی به مقطع پایین باشد که حالتی عمومی تر است، پیش بینی می شود لایه سطحی به صورت قابل ملاحظه ای درشت دانه تر و زمخت تر از ذرات موجود در جریان بشود. و در این حالت لایه پوششی متحرک تشکیل خواهد شد.

پروفیت<sup>۱۱</sup> نتایج مفیدی را به شکل آزمایشگاهی در مورد لایه پوششی ثابت فراهم کرده است [۷] در این آزمایش مخلوط رسوبی<sup>۱۲</sup> در کانال قرار داده شده است و در معرض جریان مناسبی که کف را بر می دارد قرار می گیرد. هیچ بار رسوب تغذیه از بالا دست وجود ندارد در نتیجه کف دچار آب شستگی<sup>۱۳</sup> می شود. و لایه سطحی زمخت تر و درشت دانه تر می شود و رسوب به سمت پایین دست و انتهای کانال حرکت می کند.

در پایین دست مقدار بار رسوبی اندازه گیری می شود و جریان تا زمانی که مقدار بار رسوبی پایین دست به یک در صد بار رسوبی اولیه کاهش یابد ادامه می یابد. در ادامه مقدار جریان افزایش یافته و اجازه داده می شود کف بیشتر دچار آب شستگی شود. در این حالت نیز جریان ادامه می یابد تا زمانی که دوباره بار رسوب پایین دست به یک درصد بار رسوبی که بعد از بیشتر شدن جریان ایجاد شده بود برسد. این پروسه تا زمانی تکرار شده است که دیگر با افزایش شدت جریان، افزایش قابل ملاحظه ای از بار رسوب در پایین دست مشاهده نشود. به لایه نهایی که در انتهای آزمایش تشکیل می شود لایه محافظ در برابر آب شستگی ثابت<sup>۱۴</sup> گفته می شود.

---

<sup>11</sup> proffit

<sup>12</sup> Sediment mixtures

<sup>13</sup> degrades

<sup>14</sup> Static armor layer

مشخصات دانه ها و منابع آن ها که در آزمایش بکار رفته است در جدول ۱-۲ موجود می باشد.

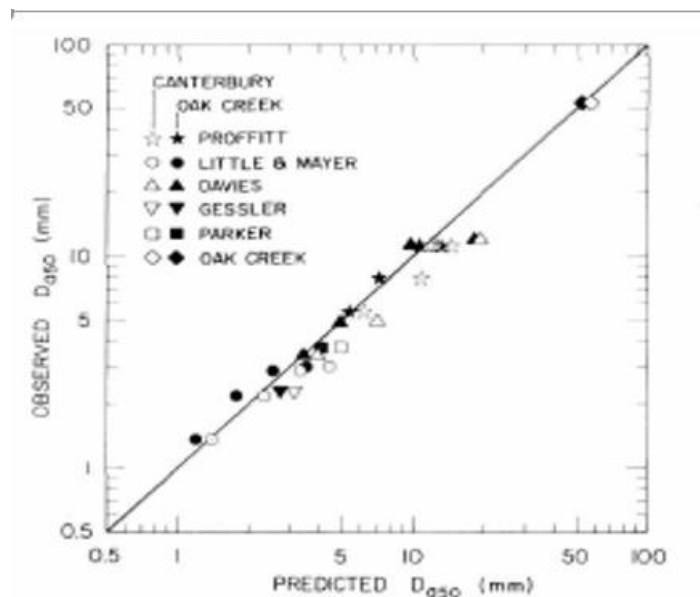
جدول ۱-۲) مشخصات دانه های بکار رفته در آزمایش پروفیت

data source	run no.	median grain size (mm) $D_g$	geometric standard deviation $\sigma_g$
Proffitt (1980)	1-5	2.91	2.33
	2-4	3.24	2.86
	3-3	3.06	2.55
	4-4	4.04	2.04
Davies (1974)	1	1.06	2.34
	2B	2.93	2.06
	3C	2.71	2.95
	4C	4.52	2.79
Little and Mayer (1976)	1-2	1.00	2.72
	2-2	1.00	2.04
	3-3	0.99	2.39
	4-2	1.00	1.50
Gessler (1967)	1.5	1.03	2.52
Parker (1980)	3	2.00	2.17
Oak Creek	-	19.4	3.93
Parker et al. (1982)			

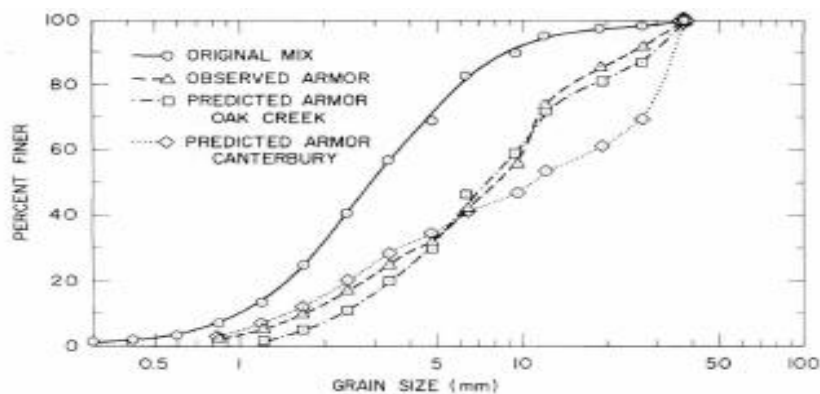
همانطور که در جدول مشاهده شد در تمام آزمایش ها، مقیاس ها طوری تنظیم شده اند که با مقیاس های طبیعی در جریان با بستر شنی یکسان باشند. در این آزمایش ۱۳٪ از لایه زیرین و ۳٪ از لایه سطحی از ماسه پوشانده شده است.

در شکل ۲-۴ نتایج بدست آمده از حل مدل های اوک کریک و کانتربری در پیش بینی  $D_{a50}$  دیده می شود.





شکل ۲-۴) نتایج بدست آمده از حل مدل های اوک کریک و کانتربری در پیش بینی  $D_{a50}$  در شکل ۲-۵ لایه مسلح در برابر آب شستگی که از حل دو روش اوک کریک و کانتربری بدست آمده است، به همراه نمودار دانه بندی لایه اولیه و دانه بندی نهایی کف کانال بعد از آب شستگی کامل دیده می شود.



شکل ۲-۵) دانه بندی لایه مسلح در برابر آب شستگی از حل دو روش اوک کریک و کانتربری



# فصل سوم

## معادلات و روابط حاکم

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل معادلات حاکم مورد نیاز برای شبیه سازی جریان و انتقال رسوب ارائه می شود. همچنین معادلات بکار رفته و مراحل طی شده در مدل عددی برای تشخیص دانه بندی بستر، میزان رسوب انتقال یافته و تغییرات تراز بستر ارائه می شود. از آن جا که این فصل منشأ معادلات بکار رفته در شبیه سازی را شرح می دهد دارای اهمیت است. از آن جایی که در این مطالعه با جریان و رسوب روبرو هستیم از این رو معادلات مربوط به مدل سازی جریان و رسوب به دو دسته کلی زیر تقسیم می شوند.

#### ۱- مدل هیدرودینامیک

الف- معادله پیوستگی جرم<sup>۱۵</sup>

ب- معادله بقا مومنتم<sup>۱۶</sup>

۲- معادلات انتقال رسوب

الف: انواع بستر رودخانه

ب: آستانه حرکت ذره رسوبی

ج- انتقال بار بستر (معادله اکسنر)<sup>۱۷</sup>

د- انتقال بار معلق (معادله انتقال-انتشار)

معادلات بکار رفته و مراحل طی شده در مدل عددی برای تشخیص دانه بندی بستر، میزان رسوب انتقال یافته و تغییرات تراز بستر به شکل زیر است.

---

<sup>15</sup> Mass Continuity

<sup>16</sup> Momentom Conservation

<sup>17</sup> Exoner-Equation

الف - شرایط مدل سازی رسوب برداری و رسوب گذاری در رودخانه هایی با بستر شنی در حالت مخلوط و پارامتر های مورد استفاده.

ب - معادله تعادل اکسنر با در نظر گرفتن اثر سیلاب متناوب در حالت مخلوط.

پ - محاسبه تنش برشی در کف و شیب بستر.

ت - محاسبه مقدار رسوب انتقالی به شکل بار بستر.

ث - بدست آوردن ارتفاع بستر و دانه بندی بستر در هر گام زمانی.

ج- تعیین شرایط مرزی

چ-تعیین شرایط اولیه

ه-پارامترها و اطلاعات اولیه مورد نیاز

### ۳-۲- مدل هیدرودینامیک

معادلات حاکم بر جریان در حالت کلی و به شکل سه بعدی عبارتند از معادله پیوستگی و معادله تعادل نیرو در سه جهت که معادلات ناویر استوکس نامیده می شوند. با اقناع معادلات در هر نقطه چهار مجهول فشار و سرعت ها در هر سه جهت معلوم می شوند. در قسمت زیر این معادلات شرح داده شده اند.

### ۳-۲-۱- معادله پیوستگی

اساس منشا فیزیکی معادله پیوستگی بقا جرم است. در این جا از مدل اویلری برای بدست آوردن معادله پیوستگی استفاده شده است. معادله پیوستگی برای یک المان سیال در حالت کلی به شکل زیر است.

(۱-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

که در معادله فوق  $\rho$  چگالی سیال؛  $u$  و  $v$  و  $w$  به ترتیب مقادیر سرعت در راستاهای  $x$  و  $y$  و  $z$  است. در صورتی که سیال تراکم ناپذیر باشد و با صرف نظر از تغییرات چگالی می توان نوشت

(۲-۳)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

### ۳-۲-۲- معادله بقای مومنتوم

معادله بقای مومنتوم یا ناویر-استوکس ارتباط بین تغییرات سرعت و تنش های نرمال مانند فشار و تنش برشی را بیان می کند. در بدست آوردن معادلات بقای مومنتوم هم از سیستم اویلری استفاده شده است

(۳-۳)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = \\ -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \end{aligned}$$

(۴-۳)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = \\ -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \end{aligned}$$

(۵-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) =$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho g + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

در روابط فوق  $u, v, w$  به ترتیب سرعت در جهت های  $X, Y, Z$  هستند. فشار  $p$  و چگالی سیال  $\rho$  و  $g$  شتاب جاذبه زمین و  $t$  زمان است. تنش های برشی سیال هستند. مجموعه معادلات (۳-۳) تا (۳-۵) به عنوان معادلات بقا مومنتوم و معادله (۳-۲) به عنوان معادله پیوستگی شناخته می شوند. با حل هر چهار معادله؛ چهار مجهول سرعت و فشار در تمام نقاط سیال بدست می آید. بخشی دیگر از محاسبات مربوط به تعیین تنش آشفستگی است. که به علت نوسانات سرعت ایجاد می شود. برای محاسبه پارامتر مربوط به آشفستگی روابط زیادی وجود دارد که معروف ترین آن روابط  $k-\varepsilon$  است. در مدل دو معادله ای  $k-\varepsilon$  لزجت گردابه ای  $v_t$ ؛ مقدار انرژی جنبشی  $k$  و نرخ اتلاف انرژی جنبشی بر اثر آشفستگی  $\varepsilon$  می باشد که از روابط زیر محاسبه می شوند

(۶-۳)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(ku) + \frac{\partial}{\partial y}(kv) + \frac{\partial}{\partial z}(kw) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z}\right) + G - \varepsilon$$

(۷-۳)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon u) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon v) + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon w) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{S1} G \frac{\varepsilon}{K} - C_{S2} \frac{\varepsilon^2}{K}$$

(۸-۳)

$$V_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$$

در معادلات فوق  $G$  ترم تولید انرژی جنبشی آشفتگی بوده و برابر است با

(۹-۳)

$$G = \left[ V_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} =$$

$$\left[ V_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = v_t s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

در رابطه فوق از تانسور کرنش استفاده شده که به صورت زیر تعریف می شود

(۱۰-۳)

$$s_{i,j} = \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \times \frac{1}{2}$$

سایر ضرائب موجود در معادلات در جدول (۳-۱) ارائه شده اند

جدول (۳-۱) ضرائب ثابت در معادلات  $k-\varepsilon$

$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
.09	1.43	1.92	1.3	1	1.3



### ۳-۳- معادلات انتقال رسوب

مواد رسوبی که توسط رودخانه ها حمل می شوند از قبل بر اثر عوامل فیزیکی - شیمیایی و مکانیکی از پوسته جامد زمین جدا شده و به رودخانه ها ریخته و به وسیله جریان آب حمل می گردند. رسوبات موجود در رودخانه ها همواره مشکلات زیادی را به وجود آورده اند از قبیل رسوب گذاری در بستر رودخانه ها و در نتیجه ایجاد جزایر، رسوب گذاری در محل ورود رودخانه به دریا و پی آمد آن تشکیل دلتا، رسوب گذاری در مخازن سدها و در نتیجه کاهش ظرفیت آن و همچنین مشکلات غیر مستقیم دیگری که به وجود آورده اند. برای مقابله با مشکلات ایجاد شده، ابتدا باید طبیعت و مکانیزم حرکت رسوب شناخته شده، سپس عوامل موثر در فرسایش شناسایی گشته و در نهایت مقدار و میزان مواد رسوبی حمل شده را بتوان دقیقاً تعیین و محاسبه کرد تا بتوان در طراحی سازه های آبی مورد استفاده قرار داد.

### ۳-۳-۱- انواع بستر رودخانه

رودخانه های موجود در طبیعت را می توان با توجه به ذرات سطح بستر به دو دسته شنی و ماسه ای تقسیم کرد. با توجه به غیر یکنواخت بودن ذرات در رودخانه های شنی برای بررسی میزان انتقال رسوب در آنها با چالش های بیشتری در مقایسه با رودخانه های ماسه ای روبرو هستیم. با توجه به خصوصیات جریان نیز رودخانه ها را به دو گروه فصلی و دائمی طبقه بندی می کنند. رودخانه های دائمی عموماً در مناطق مرطوب و در دشت ها و جنگل ها وجود داشته و معمولاً آب در تمام طول سال در آنها جریان دارد. عموماً سرعت جریان در رودخانه های دائمی کم است و در نتیجه تنش برشی در این رودخانه ها کم و میزان بار بستر منتقل شده در آنها پایین است. یکی از خصوصیات بارز رودخانه های شنی وجود لایه درشت دانه بر روی لایه زیرین می باشد که به لایه پوشش موسوم است. این لایه درشت دانه از مصالح بستر در مقابل آب شستگی محافظت می کند. تاکنون روابط زیادی برای تخمین میزان انتقال رسوب در رودخانه های شنی ارائه شده که یا دارای خطای زیادی بوده و یا از جامعیت برخوردار نیستند. همچنین بیشتر محققین از

میانگین قطر ذرات بستر به عنوان نماینده ذرات بستر رودخانه در تمامی لحظات استفاده کرده اند که به نظر دارای خطای زیادی می باشد.

### ۳-۳-۲- آستانه حرکت ذره رسوبی

ذره رسوبی قرار گرفته در مجاورت جریان تا زمانی در حال تعادل است و حرکت نمی کند که نیروهای محرک وارد بر آن کمتر از نیروهای مقاوم باشند. نیروهای محرک که سبب جابجایی ذره می شوند عبارتند از نیروی دراگ و نیروی بالا رونده و نیروی مقاوم نیز وزن دانه رسوب است و همچنین چسبندگی بین ذرات رسوب و پنهان شدن ذرات کوچکتر در فضای خالی بین ذرات بزرگتر را می توان عوامل موثر در مقاومت ذره در برابر جابه جایی می نامید. انتقال مواد رسوبی در رودخانه ها تابع دو عدد بی بعد رینولدز و شیلدز می باشد.

(۱۱-۳)

$$\tau^* = \frac{\tau}{\gamma(G_s - 1)d_s}$$

(۱۲-۳)

$$Re^* = \frac{u_* d_s}{\nu}$$

(۱۳-۳)

$$\tau = \gamma R_h S_d$$

(۱۴-۳)

$$S_d = \frac{n^2 u |u|}{R_h^{4/3}}$$

(۱۵-۳)

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho}$$

$\tau^*$ : عدد شیلدز

$Re^*$ : عدد رینولدز

$\tau$ : تنش برش

$S_d$ : شیب بستر

$R_h$ : شعاع هیدرولیکی که تقریباً برابر با  $h$  (ارتفاع ستون آب) می باشد.

$\gamma$ : وزن مخصوص آب

$g$ : شتاب ثقل

$n$ : ضریب مانینگ

$u$ : سرعت جریان

$d_s$ : قطر ذرات رسوبی موجود در بستر

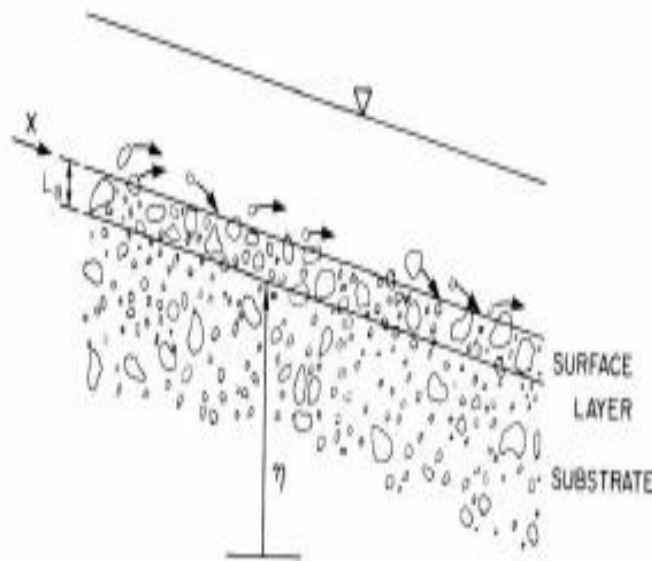
$G_s$ : چگالی ذرات رسوبی که برابر با  $2/65$  لحاظ می شود

$v$ : لزجت سینماتیکی آب

$u_*$ : متوسط سرعت برشی جریان آب

### ۳-۳-۳- انتقال بار بستر (معادله اکسنر)

با افزایش تنش برش بستر و فزونی آن از مقدار بحرانی، ابتدا حالت انتقالی بار بستر فعال شده و ذرات رسوب در بستر جریان با لغزیدن و نهایتاً پرش های متوالی به حرکت در می آیند که در شکل ۱-۳ نمونه ای از انتقال رسوبات به شکل بار بستر دیده می شود.



شکل ۱-۳) نحوه انتقال رسوب به شکل بار بستر

معادله انتقال رسوب به شکل بار بستر برابر است با

(۱۶-۳)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\zeta} (1 - \lambda_p) f b_i dz = - \frac{\partial}{\partial x} q_T P_i$$

که در آن

$\lambda_p$ : تخلخل خاک بستر که ثابت فرض می شود.

$f b_i$ : درصد حجمی دانه در رنج  $i$  ام در خاک بستر

$Z = \zeta(x,t)$  : موقعیت لایه سطحی

اگر لایه سطحی با ارتفاع  $La$  در نظر گرفته شود و دانه بندی لایه زیرین در طول زمان ثابت باشد

(۱۷-۳)

$$fL_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + La \frac{\partial F_i}{\partial t} = - \frac{1}{1 - \lambda_p} \frac{\partial}{\partial x} (q_T P_i)$$

$fL_i$ : همان  $fb_i$  است در خط انتقال لایه سطحی و لایه زیرین

$F_i$ : درصد حجمی دانه ها در رنج  $i$  ام در لایه سطحی

$q_T$ : دبی ورودی رسوب کل در واحد عرض

$P_i$ : درصد حجمی دانه ها در رنج  $i$  ام در دبی ورودی رسوب کل

در حالتی که آب شستگی وجود داشته باشد معادله اکسندر بر فرم زیر تبدیل خواهد شد.

(۱۸-۳)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{1 - \lambda_p} \frac{\partial q_T}{\partial x}$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial t} = \frac{1}{La} \left[ (p_i - f_i) \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{1}{\lambda P} q_T \frac{\partial P_i}{\partial x} \right]$$

### ۳-۳-۴ - انتقال بار معلق (معادله انتقال-انتشار)

بهترین راه برای شبیه سازی بار رسوب معلق بکار بردن معادله انتقال-انتشار است. با افزایش سرعت برشی

ذرات بستری که به حرکت درآمده بودند ممکن است به حالت معلق درآیند. برای محاسبه بار معلق لازم

است توزیع غلظت بار معلق در عمق مقطع مشخص باشد. با مشخص بودن غلظت و سرعت می توان بار معلق

را با انتگرال گیری در عمق محاسبه نمود. غلظت بار معلق در هر نقطه از جریان با حل معادله انتقال-انتشار امکان پذیر است و شکل کلی آن در حالت سه بعدی و مختصات کارتزین به صورت زیر است:

(۱۹-۳)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu) + \frac{\partial}{\partial y}(cv) + \frac{\partial}{\partial z}(c(w_s - w)) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial c}{\partial z}\right)$$

ترم اول در سمت چپ در معادله فوق نرخ تغییرات غلظت در مکان نسبت به زمان است. همچنین سه ترم دیگر در سمت چپ معادله فوق ترم های انتقال و ترم های سمت راست ترم های انتشار هستند. در رابطه فوق  $C$  غلظت حجمی رسوبات معلق،  $v_t$

لزجت گردابه ای آشفتگی که بر اساس رابطه (۸-۳) محاسبه می شود. و  $\sigma_s$  عدد آشفتگی پرانتل اشمیت<sup>۱۸</sup> برای انتقال رسوب است که مقادیر آن بین ۰.۵ تا ۱ بوده که بسیاری از محققین آن را ۱ در نظر می گیرند. ون راین این ضریب را به صورت زیر محاسبه کرده است.

(۲۰-۳)

$$\sigma_s = \frac{1}{\beta\varphi}$$

که  $\varphi$  بیان کننده اثر رسوبات بر ساختار آشفتگی جریان می باشد و برای غلظت های کمتر از ۲۵۰۰ میلی گرم بر لیتر در حدود ۰.۹ تا ۱ قرار دارد. ضریب  $\beta$  تفاوت پخش ذرات رسوب نسبت به ذرات سیال را نشان می دهد و از رابطه زیر محاسبه می شود.

<sup>18</sup> Turbulent Prandtl -Schmit Number

(۲۱-۳)

$$\beta = 1 + 2 * \left(\frac{w_s}{u^*}\right)^2$$

که  $w_s$  سرعت سقوط ذره است و بر حسب قطر ذره  $d_s$  و از رابطه زیر بدست می آید.

(۲۲-۳)

$$w_s = \begin{cases} \frac{1}{18} \frac{(G-1)g * d_s^2}{\nu} & d_s < 100\mu m \\ 10 \frac{\nu}{d_s} \left\{ \left[ 1 + \frac{0.01(G-1)d_s^3}{\nu^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} & 100\mu m < d_s < 1000\mu m \\ 1.1[(G-1)gd_s]^{0.5} & 1000\mu m < d_s \end{cases}$$

پس از محاسبه و تعیین غلظت رسوب معلق می توان مولفه های دبی رسوب بار معلق را در امتداد محور

کارتزین از رابطه زیر محاسبه کرد

(۲۳-۳)

$$q_{sx} = \int_a^{z_b} \left( uc - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial c}{\partial x} \right) dz$$

(۲۴-۳)

$$q_{sy} = \int_a^{z_b} \left( uc - \frac{v_t}{\sigma_s} \frac{\partial c}{\partial y} \right) dz$$

۳-۴- معادلات بکار رفته و مراحل طی شده در مدل عددی برای تشخیص دانه بندی بستر، میزان

رسوب انتقال یافته و تغییرات تراز بستر

۳-۴-۱- شرایط مدل سازی رسوب برداری و رسوب گذاری در رودخانه هایی با بستر شنی در

حالت مخلوط و پارامترهای مورد استفاده :

دانه بندی خاک بستر رودخانه هایی با بستر شنی بعد از مدتی بر اثر جریان تغییر میکنند. در طول جریان، دانه های ماسه بر اثر سیلاب ها به شکل بار شسته شده<sup>۱۹</sup> منتقل می شوند و شن های کف بستر به شکل بار بستر<sup>۲۰</sup> منتقل می شوند. انتقال نامتوازن دانه ها باعث می شود خاک بستر رودخانه های شنی به شکل بدانه بندی شده<sup>۲۱</sup> در آید. بسترهای شنی رودخانه به دو لایه سطحی و زیرین تقسیم می شود. که لایه سطحی درشت دانه تر از لایه زیرین است. مقدار رسوب گذاری و رسوب برداری بستر رودخانه رابطه مستقیمی با سرعت جریان و میزان رسوبات موجود در جریان دارند و همینطور باعث تغییردانه بندی خاک بستر رودخانه در طول زمان می شوند. برای پیش بینی مقدار رسوب گذاری و یا رسوب برداری در نقاط مختلف رودخانه و همینطور تغییرات دانه بندی خاک پس از گذشت زمان مشخص باید پارامترهای مختلفی را در نظر گرفت و اثر این متغیرها و پارامترها بر روی هم را بررسی کرد. این پارامترها عبارتند از:

*If*: ضریب تناوب سیلاب

*Fi*: در صد ذرات در هر رنج در لایه سطحی<sup>۲۲</sup>

*Di*: اندازه قطر هر ذره

*La*: ضخامت لایه سطحی

---

<sup>19</sup> Wash Load

<sup>20</sup> Bedload

<sup>21</sup> Poor-Sorted

<sup>22</sup> Surface Layer



$fli$ : درصد ذرات در هر رنج در لایه زیرین<sup>۲۳</sup>

$qbi$ : نرخ انتقال رسوب به شکل بار بستر در واحد عرض در هر رنج دانه

$qbT$ : نرخ انتقال رسوب کل در واحد عرض که برابر است با:

$$QbT = \sum qbi$$

$Pi$ : در صد هر دانه در انتقال رسوب به شکل بار بستر که برابر است با

$$Pi = qbi / qbT$$

$\lambda P$ : تخلخل خاک

$\eta$ : ارتفاع سطح خاک از سطح مبنا

$R$ : وزن مخصوص مستغرق

$$R = (\rho_s / \rho) - 1$$

۳-۴-۲ - معادله تعادل اکسنر با در نظر گرفتن اثر سیلاب متناوب در حالت مخلوط

(۲۵-۳)

$$(1 - \lambda p) \left[ La \frac{\partial Fi}{\partial t} + (Fi - fli) \frac{\partial La}{\partial t} \right] = -If \frac{\partial qbT \times Pi}{\partial x} + If \times fli \frac{\partial qbT}{\partial x}$$

با توجه به وجود حالت رسوب گذاری و یا رسوب برداری در بستر درصد هر دانه در لایه زیرین ( $fli$ ) از رابطه زیر محاسبه می شود.

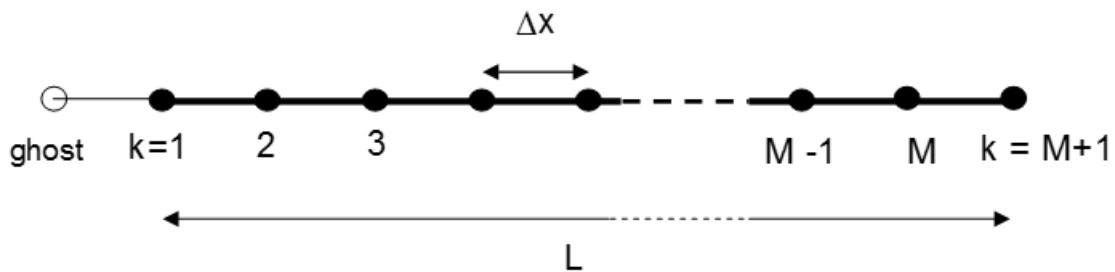
(۲۶-۳)

---

<sup>23</sup> Substrate Layer

$$fli = \begin{cases} fli, \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \\ \alpha Fi + (1 - \alpha) Pi, \frac{\partial \eta}{\partial t} > 0 \end{cases}$$

مسیر جریان به  $M$  قسمت و  $M+1$  نقطه تقسیم می شود. به علاوه در ابتدای مسیر یک نقطه فرضی<sup>۲۴</sup> تعریف می شود که مقدار و دانه بندی رسوب اولیه در این نقطه داده می شود. لازم به ذکر است نمایه  $i$  بیانگر رنج دانه ها و نمایه  $k$  بیانگر نقطه مشخصی از مسیر است.



در هر گام زمانی باید ارتفاع بستر ( $\eta$ ) و درصد ذرات هر رنج در لایه سطحی ( $Fi$ ) در هر نقطه از مسیر مشخص شود.

### ۳-۴-۳- محاسبه تنش برشی در کف و شیب بستر

باید در نظر داشت که با تقریب خوبی می توان جریان در رودخانه هایی با بستر شنی را یکنواخت در نظر گرفت و بر اساس تحقیقات مانینگ زبری کف از رابطه زیر بدست می آید

(۲۷-۳)

$$K_{S,k} = n_k D_{S90,k}$$

که در آن:

$K_S$  ضریب زبری کف

<sup>24</sup> Ghost Node

$n_k$ : عدد بدون بعد که بر اساس تحقیقات (kamphuis 1974) بین ۱.۵ تا ۳ باید در نظر گرفته شود

$D_{S90}$ : اندازه دانه ای که ۹۰٪ دانه های دیگر خاک از آن کوچکترند.

همچنین ارتفاع لایه بستر ( $La_k$ ) در هر نقطه برابر است با

(۲۸-۳)

$$La_k = n_a D_{S90, K}$$

که در آن :

$n_a$  برابر است با عدد بدون بعد بین ۳ و ۱

با استفاده از تقریب جریان نرمال تنش برشی کف در هر نقطه از مسیر برابر خواهد بود با

(۲۹-۳)

$$\tau_{b,k} = \left( \frac{k_{s,k}^{1/3} \times q_w^2}{\alpha_r^2} \right)^{3/10} g^{7/10} S_k^{7/10}$$

که در آن :

$U^*$ : سرعت برشی

$S_K$ : شیب بستر است که برابر است با

(۳۰-۳)

$$S_k = \begin{cases} \frac{\eta_1 - \eta_2}{\Delta x}, & K = 1 \\ \frac{\eta_{k-1} - \eta_{k+1}}{2\Delta x}, & K = 2 \dots M \end{cases}$$

شیب بستر در نقطه  $K=M+1$  ثابت در نظر گرفته می شود

### ۳-۴-۴- محاسبه مقدار رسوب انتقالی به شکل بار بستر

بعد از مشخص شدن دانه بندی لایه سطحی  $(F_{i,k})$  و تنش برشی کف  $(\tau_{b,k})$  می توان نرخ انتقال رسوب به شکل بار بستر در حالت مخلوط برای هر رنج دانه  $(q_{bi})$  و دبی رسوب کل در واحد عرض  $(q_{bT})$  و همچنین در صد هر دانه در رسوب انتقالی<sup>۲۵</sup> که با  $(p_i)$  نشان داده می شود را در هر نقطه محاسبه کرد.

اندازه متوسط دانه هادر هر نقطه از مسیر  $(D_{sg,k})$  برابر است با

$$(۳۱-۳)$$

$$\bar{\Psi}_k = \sum_{i=1}^N \Psi_i F_{i,k} \quad , \quad D_{sg,k} = 2^{\bar{\Psi}_k}$$

که در آن  $\Psi_i = \ln_2(D_i)$  یا

$$(۳۲-۳)$$

$$\Psi = -\phi = \log_2(D) = \frac{\ln(D)}{\ln(2)}$$

عدد شیلدز  $(\tau^*_{sg,k})$  و سرعت برشی  $(U^*_K)$  را می توان از روابط زیر محاسبه کرد

$$(۳۳-۳)$$

$$\tau^*_{sg,k} = \left( \frac{k_{s,k}^{1/3} \times q_w^2}{\alpha_r^2} \right)^{3/10} g^{7/20} S_k^{7/20}$$

$$U^*_k = \left( \frac{k_{s,k}^{1/3} \times q_w^2}{\alpha_r^2 \times g} \right)^{3/10} \frac{S_k^{7/10}}{RD_{sg,k}}$$

مقدار رسوب انتقالی در واحد عرض به شکل زیر محاسبه می شود

<sup>25</sup> Fraction of bedload material in the ith grain size range

(۳۴-۳)

$$q_{bi,k} = F_{i,k} \frac{u_{*,k}^3}{Rg} W_{i,k}^*$$

$$q_{bT,k} = \sum_{i=1}^N q_{bi,k} \quad , \quad p_{bi,k} = \frac{q_{bi,k}}{q_{bT,k}}$$

که  $W_{i,k}^*$  از روابطی که توسط ویلکاک و کرو<sup>۲۶</sup> در سال ۲۰۰۳ بدست آمده محاسبه می شود

(۳۵-۳)

$$W_{i,k}^* = \begin{cases} 0.002\phi_{i,k}^{7.5} & \text{for } \phi_{i,k} < 1.35 \\ 14 \left( 1 - \frac{0.894}{\phi_{i,k}^{0.5}} \right)^{4.5} & \text{for } \phi_{i,k} \geq 1.35 \end{cases}$$

$$\phi_{i,k} = \frac{\tau_{sg,k}^*}{\tau_{ssrg,k}^*} \left( \frac{D_i}{D_{sg,k}} \right)^{-b_{i,k}}$$

$$\tau_{ssrg,k}^* = 0.021 + 0.015 \exp(-20F_{s,k})$$

$$b_{i,k} = \frac{0.67}{1 + \exp(1.5 - D_i / D_{sg,k})}$$

که در آن:

$F_{s,k}$  برابر است با درصد ماسه موجود در رسوب انتقالی

### ۳-۴-۵ - بدست آوردن ارتفاع بستر و دانه بندی بستر در هر گام زمانی

معادله پایه انتقال رسوب برای بدست آوردن تراز ارتفاعی هر نقطه از مسیر در گام های زمانی به صورت زیر

نوشته می شود

---

<sup>26</sup> Wilcock And Crow

(۳۶-۳)

$$\eta_k|_{t+\Delta t} = \eta_k - \frac{I_f}{1-\lambda_p} \frac{\partial q_{bT}}{\partial x} \Big|_k \Delta t$$

معادله پایه برای بدست آوردن درصد موجود از هر رنج از دانه ها در لایه سطحی از معادله زیر بدست می

آید

(۳۷-۳)

$$F_{i,k}|_{t+\Delta t} = F_{i,k} - \frac{1}{L_{a,k}} (F_{i,k} - f_{li,k}) \frac{\partial L_{a,k}}{\partial t} \Delta t + \frac{I_f}{L_{a,k}(1-\lambda_p)} \left( - \frac{\partial q_{bT} p_{bi}}{\partial x} \Big|_k + f_{li,k} \frac{\partial q_{bT}}{\partial x} \Big|_k \right) \Delta t$$

مشتقات رابطه بالا به شکل زیر است:

(۳۸-۳)

$$\frac{\partial q_{bT}}{\partial x} \Big|_k = a_u \frac{q_{bT,k} - q_{bT,k-1}}{\Delta x} + (1 - a_u) \frac{q_{bT,k+1} - q_{bT,k}}{\Delta x}$$

(۳۹-۳)

$$\frac{\partial q_{bT} p_{bi}}{\partial x} \Big|_k = a_u \frac{q_{bT,k} p_{bi,k} - q_{bT,k-1} p_{bi,k-1}}{\Delta x} + (1 - a_u) \frac{q_{bT,k+1} p_{bi,k+1} - q_{bT,k} p_{bi,k}}{\Delta x}$$

که در آن:

$a_u$ : در روش تفاضل محدود به عنوان (*upwinding coefficient*) برابر ۰.۵ در نظر گرفته می شود.

در حالتی که  $k=1$  است نقطه  $k-1$  همان نقطه فرضی خواهد بود که در آن مقدار رسوب موجود در جریان

در هر رنج دانه ( $q_{bi}$ ) و مقدار رسوب کل جریان ( $q_{b,T}$ ) و همچنین درصد هر دانه در رسوب جریان

( $P_i$ ) به عنوان مقادیر اولیه مشخص است.

مشق  $\partial L_{a,k} / \partial t$  کوچک بوده و با تخمین مناسبی از رابطه زیر محاسبه می شود

(۴۰-۳)

$$\frac{\partial L_{a,k}}{\partial t} \Delta t \cong L_{a,k} - L_{a,k,old}$$

معادله پایه برای بدست آوردن درصد موجود از هر رنج از دانه ها در لایه زیرین از معادله زیر بدست می آید

(۴۱-۳)

$$f_{ii,k} = \begin{cases} f_{s,i,intk}, \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_k < 0 \\ \alpha F_{i,k} + (1 - \alpha) p_{bi,k}, \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_k > 0 \end{cases}$$

که در آن:

$F_{s,i,int,k}$ : در صد هر دانه در لایه زیرین در گام زمانی قبل

$\alpha$ : ضریب اصلاح که بین ۰ و ۱ انتخاب می شود.

### ۳-۴-۶ - شرایط مرزی

شرایط مرزی عبارتند از مقدار مشخص و ثابتی از:

۱-  $q_{bi}$  (مقدار دبی بدلود در هر رنج دانه)

۲-  $q_{bt}$  (مقدار دبی بدلود کل)

۳-  $p_{bi}$  (درصد هر دانه در دبی بدلود کل)

۴- تعیین ارتفاع مشخصی مانند  $\eta$  در انتهای مسیر در نقطه  $K=M+1$

### ۳-۴-۷ - شرایط اولیه مورد نیاز نرم افزار

۱- ارتفاع مشخص اولیه تمامی نقاط  $\eta$  که با توجه به شیب اولیه بستر قابل محاسبه است

۲- دانه بندی اولیه خاک بستر در لایه های سطحی و زیرین ( $F_i$  و  $f_{s,i}$  در تمامی نقاط مسیر)

در هر گام زمانی با مشخص بودن  $\eta$  و  $F_i$  در هر نقطه می توان  $D_{s90}$  و  $D_{s50}$  و  $K_S$  و  $L_a$  و بقیه پارامترها را در هر نقطه محاسبه کرد.

مقادیر  $\eta$  برای محاسبه شیب مسیر ( $S$ ) در ترکیب با پارامتر  $K_S$  برای محاسبه  $(\tau_{b,k})$  در تمام نقاط مسیر غیر از نقطه انتها مسیری کار می رود.

نتایج بدست آمده برای محاسبه  $q_{bi}$ ،  $q_{bt}$  و  $p_{bi}$  در گام های زمانی در همه نقاط بکار می رود. در نهایت معادله اکسیر برای محاسبه ارتفاع کف بستر و دانه بندی لایه سطحی و زیرین نوشته می شود

### ۳-۴-۸ - مقادیر اولیه مورد نیاز نرم افزار

$q_w$ : دبی در واحد عرض ( $m^2/s$ )

$q_{btf}$ : دبی رسوب به شکل بار بستر در واحد عرض ( $m^2/s$ )

$I_f$ : ضریب سیلاب

$\eta$ : ارتفاع انتهایی مسیر (m)

$S$ : شیب اولیه مسیر

$L$ : طول مسیر

$\Delta t$ : فاصله هر گام زمانی

$M$ : تعداد نقاطی که مسیر جریان به آن تقسیم می شود



$N_{toprin}$ : تعداد گام زمانی برای چاپ هر نتیجه

$N_{print}$ : تعداد نتایجی که چاپ می شوند

تعداد گام های زمانی =  $N_{toprin} \times N_{print}$

۳-۴-۹- ضرایب کمکی مورد نیاز نرم افزار

$n_k$ : ضریب زبری

$n_a$ : ضریب لایه سطحی

$\alpha_r$ : ضریب رابطه مانینگ

$R$ : ضریب غوطه وری رسوبات

$\lambda$ : تخلخل

$a_u$ : ضریب (upwinding coefficient)

$\alpha$ : ضریب تاثیر لایه سطحی و زیرین



# فصل چهارم

## محاسبات و نتایج

در این فصل محاسبات مربوط به انتقال رسوب و نتایج بدست آمده ارائه می شود. از آنجاکه فرآیند انتقال رسوب ترکیبی از اثر همزمان دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین، هیدرولیک جریان، مقدار و دانه بندی رسوبات موجود در جریان است که باعث آب شستگی بستر و یا رسوب گذاری در بسترو تغییرات لایه سطحی و لایه زیرین خواهد شد در مرحله نخست باید نتایج بدست آمده از کدهای نوشته شده و مدل سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد و از صحت نتایج محاسباتی اطمینان حاصل کرد. به این منظور برای صحت سنجی مدل سازی عددی انجام گرفته در این پایان نامه از چند کار آزمایشگاهی معروف کمک گرفته شده است. که در قسمت های بعدی این آزمایش ها معرفی شده و مقایسه و صحت سنجی انجام شده است. در بخش بعدی که هدف اصلی مطالعه صورت گرفته است به بررسی یک بستر شنی در دو حالت رسوب گذاری و رسوب برداری و بررسی نتایج حاصله پرداخته خواهد شد و در نهایت دانه بندی مورد نیاز برای به حداقل رساندن آب شستگی که به لایه مقاوم معروف است به دست می آید. کدهای نوشته شده برای حل معادلات حاکم در فرآیند انتقال رسوب، رسوب گذاری و رسوب برداری، معادلات انتقال بار بستر، و معادله اکسیر با استفاده از زبان ویژوال بیسیک<sup>۲۷</sup> انجام گرفته است.

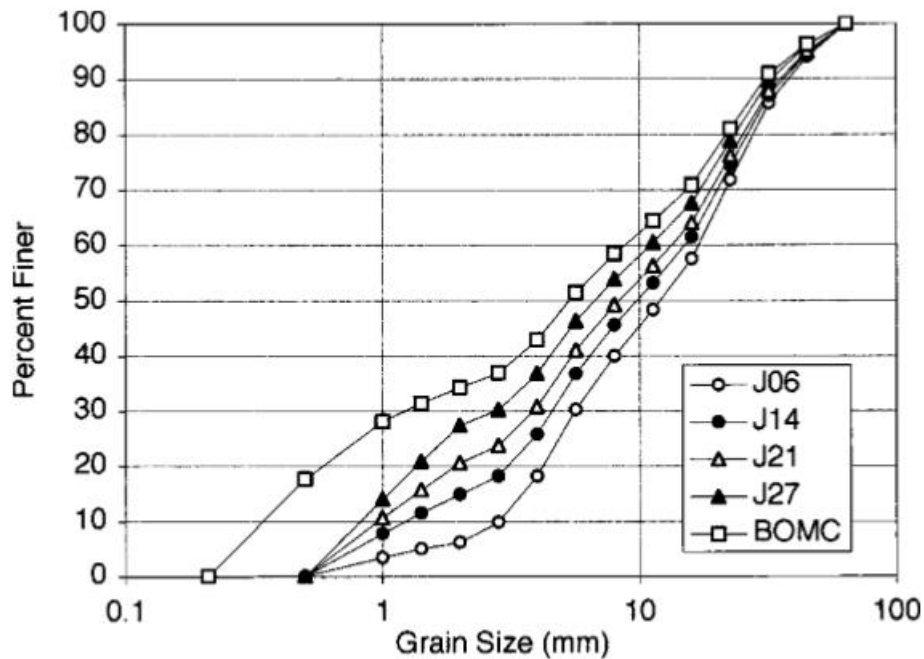
#### ۴-۲- معرفی مدل آزمایشگاهی اول

ویلکاک<sup>۲۸</sup> در سال ۲۰۰۳ به بررسی آزمایشگاهی رسوب گذاری و رسوب برداری در بسترهای شنی پرداخت. بستر جریان حاوی مقادیر مختلفی از شن و ماسه بود و تحت جریاناتی با دبی های مختلف که این جریانات نیز مقادیر مختلفی از رسوبات را حمل می کنند قرار گرفت.

در شکل (۴-۱) دانه بندی مختلف رسوباتی که در کانال قرار گرفته است نشان داده شده است (۸)

<sup>27</sup> Visual Basic

<sup>28</sup> Wilcock



شکل ۴-۱) دانه بندی رسوبات مختلف در آزمایش ویلکاک

دانه های شن با ابعادی بین ۲ تا ۶۴ میلی متر و دانه های ماسه با ابعادی بین ۰.۵ تا ۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. مقدار ماسه در هر آزمایش بین ۶.۲٪ تا ۳۴.۳٪ متغییر است. نامگذاری رسوبات در هر آزمایش با توجه به مقدار ماسه موجود در رسوب انجام گرفته است. به این صورت که *j06* حاوی ۶.۲٪ ماسه. *j14* حاوی ۱۴.۹٪ ماسه. *j21* حاوی ۲۰.۶٪ ماسه. *j27* حاوی ۲۷٪ ماسه و *BOMC* حاوی ۳۴.۳٪ ماسه است.

برای هر بستر ۱۰ آزمایش انجام شده است که عمق جریان در این آزمایش ها بین ۰.۰۹ تا ۱.۲ متر بوده است. نرخ رسوب ورودی از بالادست (رسوب تغذیه) در هر آزمایش حداقل  $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  و حداکثر  $1.2 \times 10^{-1} \text{ kg/ms}$  می باشد. عرض کانال مورد استفاده در آزمایش ۰.۶ متر و طول کانال ۸ متر است. دانه های شن بزرگتر از ۱۶ میلی متر به شکل دستی لحظاتی قبل از شروع آزمایش در جریان مخلوط می شوند. برای مشاهده بهتر دانه بندی بستر، از دانه هایی با رنگ های متفاوت استفاده شده است.

دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در نقاط ۳ و ۲ و ۶ متری کانال اندازه گیری می شود. بقیه اطلاعات مورد نیاز شامل انحراف از معیار ، اندازه متوسط دانه ها و اندازه دانه ای که ۹۰٪ بقیه دانه ها از آن کوچکترند در جداول (۴-۱) داده شده است.

جدول (۴-۱) انحراف معیار، اندازه متوسط دانه ها و اندازه دانه ای که ۹۰٪ بقیه دانه ها از آن کوچکترند در آزمایش ویلکاک

	Mean, mm	Standard Deviation $\phi$	Median $D_{50}$ , mm	$D_{90}$ , mm
Gravel	12.2	1.28	13.4	39
Sand	1.0	0.53	1.0	1.7
Sand (BOMC) <sup>a</sup>	0.5	0.82	0.5	1.35
J06	10.5	1.54	12.2	38
J14	8.4	1.77	9.8	37
J21	7.3	1.88	8.4	36
J27	6.1	1.96	6.7	33
BOMC	4.1	2.41	5.3	31

نتایج آزمایشات انجام گرفته در جدول (۴-۲) مشاهده می شود.

جدول ۴-۲) نتایج بدست آمده از آزمایش ویلکاک

Run	Unit Discharge, $m^2 s^{-1}$	Flow Depth, m	Water Slope	Bed Shear Stress, Pa	Gravel Transport, $g m^{-1} s^{-1}$	Sand Transport, $g m^{-1} s^{-1}$
J06-1	0.0781	0.104	0.0044	4.10	2.09E - 04 <sup>a</sup>	1.33E - 05
J06-2	0.0862	0.108	0.0049	4.90	2.52E - 03	6.17E - 06
J06-3	0.0959	0.104	0.0094	8.70	9.23E - 02	2.36E - 04
J06-4	0.1032	0.102	0.0133	11.3	1.40E + 00	2.90E - 03
J06-5	0.0906	0.103	0.0067	6.18	2.01E - 02	4.44E - 05
J06-6	0.1048	0.103	0.0092	8.29	4.29E - 01	7.98E - 04
J06-7	0.1212	0.106	0.0158	16.0	1.45E + 01	3.17E - 02
J06-8	0.0778	0.105	0.0056	5.42	3.29E - 03	3.26E - 05
J06-9	0.1282	0.109	0.0176	17.5	2.95E + 01	6.21E - 02
J06-10	0.1334	0.108	0.0204	23.6	2.04E + 02	1.57E - 01
J14-1	0.1259	0.117	0.0165	16.5	5.08E + 01	5.51E - 01
J14-2	0.1243	0.109	0.0173	19.1	7.29E + 01	1.56E + 00
J14-3	0.0838	0.107	0.0061	6.43	2.91E - 02	7.32E - 04
J14-4	0.1013	0.104	0.0106	9.74	1.70E + 00	8.13E - 02
J14-5	0.1103	0.106	0.0144	16.1	1.19E + 01	5.96E - 01
J14-6	0.0788	0.102	0.0044	4.38	1.81E - 02	1.03E - 03
J14-7	0.0957	0.106	0.0083	8.63	1.48E + 00	6.31E - 02
J14-8	0.0909	0.106	0.0076	7.27	5.08E - 01	3.84E - 02
J14-9	0.1334	0.117	0.0157	20.1	1.14E + 02	1.90E + 00
J21-1	0.1259	0.118	0.0155	15.9	1.25E + 02	9.41E + 00
J21-2	0.0785	0.108	0.0043	4.07	4.21E - 01	6.53E - 02
J21-3	0.0888	0.102	0.0071	6.64	5.32E + 00	8.04E - 01
J21-4	0.0992	0.105	0.0114	10.8	9.92E + 00	2.01E + 00
J21-5	0.0734	0.109	0.0034	3.35	9.81E - 02	3.50E - 02
J21-6	0.0903	0.104	0.0078	7.21	1.04E + 01	2.43E + 00
J21-7	0.0654	0.099	0.0032	2.82	1.30E - 02	3.67E - 03
J21-8	0.1119	0.102	0.0171	16.1	1.36E + 02	1.61E + 01
J21-9	0.1203	0.107	0.0175	18.6	NA <sup>b</sup>	NA <sup>b</sup>
J27-1	0.0651	0.102	0.0029	2.78	2.39E - 01	2.44E - 01
J27-2	0.0892	0.101	0.0070	6.91	2.26E + 01	1.40E + 01
J27-3	0.0495	0.110	0.0010	1.10	7.57E - 04	2.17E - 03
J27-4	0.0572	0.101	0.0026	2.50	7.74E - 02	1.28E - 01
J27-5	0.0816	0.093	0.0074	6.57	2.09E + 01	6.79E + 00
J27-6	0.0749	0.098	0.0043	3.96	3.44E + 00	2.18E + 00
J27-7	0.1029	0.106	0.0080	7.91	4.68E + 01	2.00E + 01
J27-8	0.1128	0.106	0.0098	9.46	6.78E + 01	3.73E + 01
J27-9	0.1255	0.106	0.0143	11.5	2.37E + 02	1.02E + 02
J27-10	0.1297	0.111	0.0168	17.4	5.27E + 02	2.51E + 02
BOMC 14c	0.0285	0.111	0.00059	0.57	3.92E - 05	2.27E - 03
BOMC 7a	0.0342	0.110	0.00088	0.85	1.00E - 20	3.29E - 02
BOMC 14b	0.0362	0.109	0.00091	0.86	1.16E - 04	3.85E - 02
BOMC 7b	0.0397	0.111	0.0011	1.07	1.81E - 04	9.50E - 02
BOMC 7c	0.0480	0.105	0.0017	1.60	2.73E - 03	4.24E - 01
BOMC 1	0.0672	0.120	0.0018	1.83	7.62E - 02	5.72E + 00
BOMC 2	0.0667	0.112	0.0032	3.14	4.40E - 01	6.66E + 00
BOMC 6	0.0786	0.096	0.0069	5.94	3.51E + 01	8.99E + 01
BOMC 4	0.0812	0.094	0.0077	6.47	4.42E + 01	1.13E + 02
BOMC 5	0.0950	0.088	0.0162	13.1	3.05E + 02	2.67E + 02

برای صحت سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی نتایج حاصل از ۱۰ آزمایش J06 در نظر گرفته شده

که در جدول (۴-۳) ذکر شده. نتایج موجود با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه می شود.

جدول (۳-۴) نتایج ۱۰ آزمایش J۰۶

Run	Unit Discharge, $m^2 s^{-1}$	Flow Depth, m	Water Slope	Bed Shear Stress, Pa	Gravel Transport, $g m^{-1} s^{-1}$	Sand Transport, $g m^{-1} s^{-1}$
J06-1	0.0781	0.104	0.0044	4.10	2.09E - 04 <sup>a</sup>	1.33E - 05
J06-2	0.0862	0.108	0.0049	4.90	2.52E - 03	6.17E - 06
J06-3	0.0959	0.104	0.0094	8.70	9.23E - 02	2.36E - 04
J06-4	0.1032	0.102	0.0133	11.3	1.40E + 00	2.90E - 03
J06-5	0.0906	0.103	0.0067	6.18	2.01E - 02	4.44E - 05
J06-6	0.1048	0.103	0.0092	8.29	4.29E - 01	7.98E - 04
J06-7	0.1212	0.106	0.0158	16.0	1.45E + 01	3.17E - 02
J06-8	0.0778	0.105	0.0056	5.42	3.29E - 03	3.26E - 05
J06-9	0.1282	0.109	0.0176	17.5	2.95E + 01	6.21E - 02
J06-10	0.1334	0.108	0.0204	23.6	2.04E + 02	1.57E - 01

دانه بندی بستر در آزمایش J06 که از نمودار شکل (۴-۱) استخراج شده در جدول (۴-۴) مشخص شده است

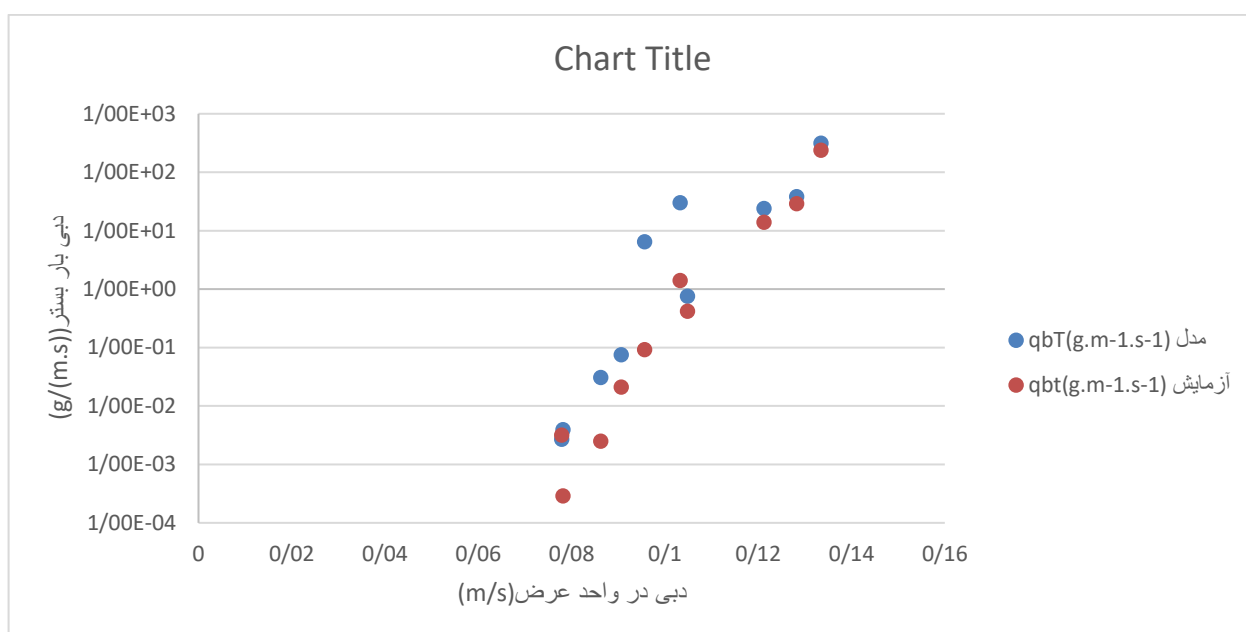
جدول (۴-۴) دانه بندی آزمایش J۰۶

D mm	% finer
64	100
46	94
32	85
22,68	71,65
15,81	57,17
11,18	47,9
8,14	39,8
5,68	30,2
4	18
2,8	10,3
2	6,25
1,4	5,4
1	0

همانطور که در جدول (۲-۴) دیده می شود دبی در واحد عرض از  $0.0781 m^2/S$  در آزمایش اول تا  $0.1334 m^2/s$  تغییر می کند. شیب بستر از  $0.0044$  در آزمایش اول تا  $0.0204$  در آزمایش دهم تغییر می کند و دبی کل که مجموع دبی بستر و دبی معلق می باشد اندازه گیری شده است.



در نمودار شکل (۲-۴) با استفاده از مدل عددی و بر اساس مقادیر دبی در واحد عرض و شیب های استفاده شده در آزمایشگاه مقادیر دبی کل محاسبه شده و با دبی کل بدست آمده در آزمایشگاه مقایسه شده است. همانطور که این شکل نشان می دهد، تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. در کارهای انتقال رسوب چنین تطابقی مناسب است و حتی یک آزمایش در آزمایشگاه در تکرارهای مختلف، نتایج مختلفی را نشان می دهد.



شکل (۲-۴) مقایسه دبی رسوب بدست آمده از نرم افزار و دبی رسوب آزمایش ویلکاک

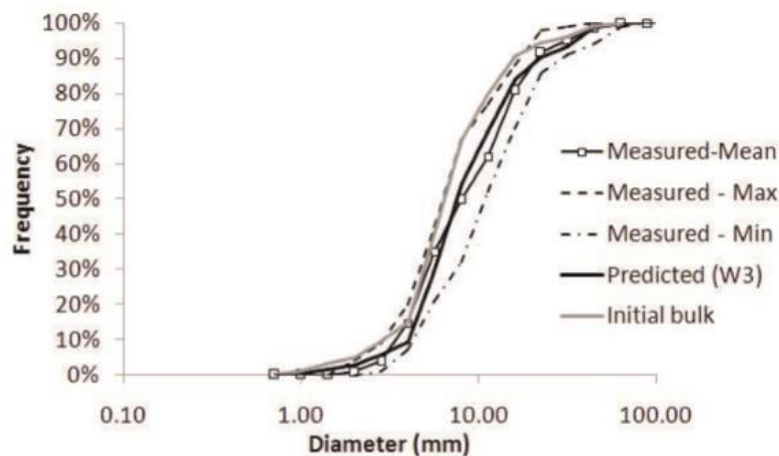
#### ۳-۴- معرفی مدل آزمایشگاهی دوم

گاریل کالس و ماریو لنزی و لوکا مائو<sup>۲۹</sup> در سال ۲۰۱۳ یک مدل عددی دو بعدی برای پیش بینی دانه بندی لایه سطحی تهیه کردند و نتایج خود را با نتایج مدل آزمایشگاهی که در دانشگاه *Hull* انگلستان انجام شده بود مقایسه کردند. [۹] در مدل آزمایشگاهی انجام شده عرض فلوم ۲ متر و طول آن ۱۱ متر است. شیب

<sup>29</sup> Gariel Kaless, Mario A Lenzi and Luca Mao

فلوم است و در ۸ نقطه از فلوم قسمت هایی ۰.۲۷ برای اندازه گیری دبی رسوب به شکل بار بستر در نظر گرفته شده است. دبی رسوب در واحد عرض برابر ۰.۳۴ متر مربع بر ثانیه بوده است. تخلخل دانه ها ۰.۲۷  $\lambda_p =$  در نظر گرفته شده است. و آزمایش تا زمانی که دبی رسوب خروجی به یک درصد دبی رسوب خروجی اولیه میرسد ادامه پیدا کرده است.

آزمایش با شرایط بالا ۱۰ بار تکرار شده و نتایج حاصله در شکل (۳-۴) مشاهده می شود.



شکل (۳-۴) دانه بندی نهایی لایه سطحی بر اساس آزمایش کالس

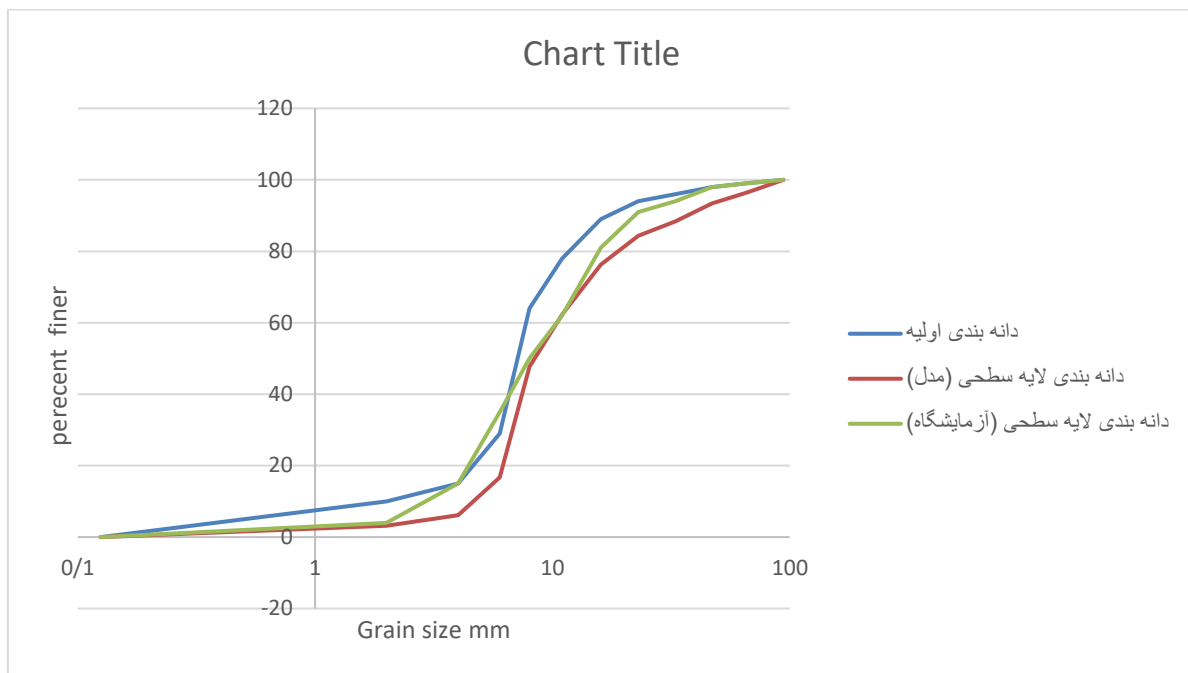
آزمایش مورد نظر با شرایطی که ذکر شد ۱۰ بار تکرار می شود و دانه بندی لایه نهایی برداشت می شود. در شکل (۳-۴) دانه بندی لایه اولیه، ضخیم ترین لایه برداشت شده، نرم ترین لایه برداشت شده و دانه بندی میانگین دیده می شود. دانه بندی اولیه بستر که از نمودار (*initial bulk*) شکل (۳-۴) استخراج شده در جدول (۴-۵) مشخص شده است.

جدول ۴-۵) دانه بندی اولیه لایه سطحی (initial bulk)

Dd,i mm	FfI,i Initial Surface
88	100
44	98
19	92
12	84
9	68
6	49
5	32
4	19
2	9
1,3	3
0,7	1
0,125	0

بر اساس مقادیر اولیه استفاده شده در آزمایشگاه و دانه بندی اولیه لایه سطحی که در جدول (۴-۵) مشخص شده است و با استفاده از مدل عددی می توان دانه بندی نهایی لایه سطحی را پیش بینی کرد. و نتایج حاصل از مدل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در شکل (۴-۴) مشاهده می شود.

همانطور که این نمودار نشان می دهد، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی با عددی وجود دارد که می تواند صحت مدل سازی عددی را تایید نماید.



شکل ۴-۴) مقایسه دانه بندی نهایی لایه سطحی که توسط مدل عددی محاسبه شده است با دانه بندی اولیه و دانه بندی نهایی لایه سطحی در مدل آزمایشگاهی

حال که صحت مدل سازی عددی به تایید رسید در ادامه از مدل عددی سه استفاده مختلف خواهد شد. این سه حالت عبارتند از مدل سازی ۱- رسوب گذاری ۲- رسوب برداری ۳- تعیین لایه محافظ رودخانه در برابر آب شستگی.

#### ۴-۴- بررسی بستر شنی در حالت رسوب گذاری با استفاده از مدل عددی

برای به وجود آوردن شرایط رسوب گذاری، شیب بستر کانال بسیار کم در نظر گرفته می شود. محاسبات در فاصله های زمانی ده ساله و تا پنجاه سال تکرار می شود و با مقایسه نتایج می توان سیر تکاملی بستر را به خوبی مشاهده کرد.

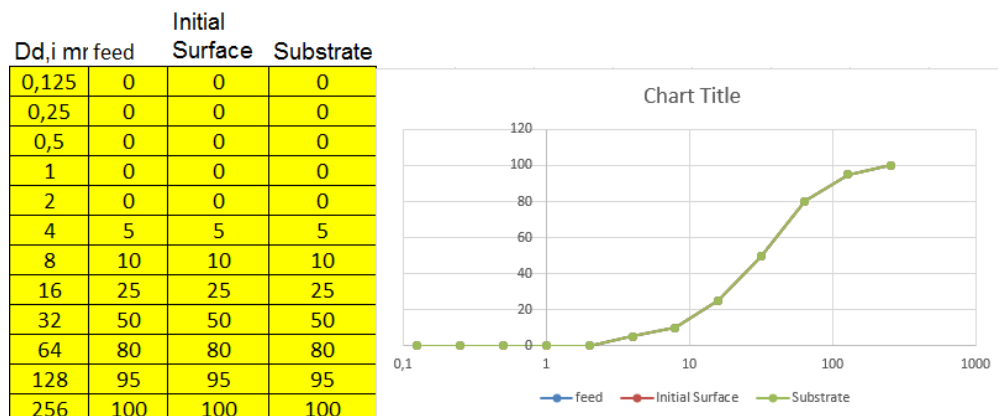
مقادیر اولیه مورد نیاز برای محاسبات که به مدل عددی داده شده است در شکل ۴-۵ قابل مشاهده است.

دانه بندی رسوب ورودی از بالادست، دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در شکل ۴-۶ قابل مشاهده است .  
 پارامترهای بدون بعد کمکی در شکل ۴-۷ قابل مشاهده است .

*Input parameters*

qw	6	water discharge/width, m <sup>2</sup> /s
qbTf	1,00E-04	gravel input rate, m <sup>2</sup> /s
Inter	0,05	Intermittency
etad	3	base level, m
Sfbf	1,00E-04	initial bed slope
L	20000	reach length,m
$\Delta t$	0,2	time step, years
M	25	no. of intervals
Ntoprin	50	no. of steps until a printout of results is mad
Nprint	5	no. of printouts after the initial one dt
	50	years calculation time
$\Delta x$	800	m
dt	6311520	s

شکل ۴-۵) مقادیر اولیه برای حالت رسوب گذاری



شکل ۴-۶) دانه بندی رسوب ورودی از بالادست، لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب گذاری

*Auxiliary Parameters (all dimensionless)*

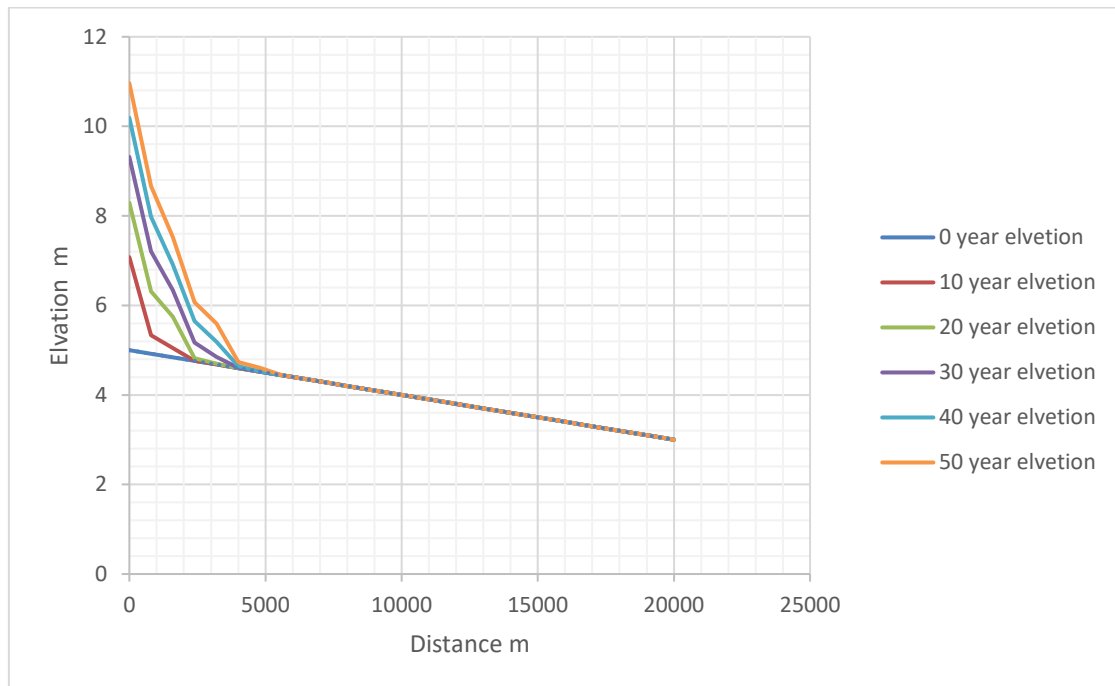
$n_k$	nk	2
$n_a$	nactive	2
$\alpha_r$	ar	8,1
R	Rr	1,65
$\lambda_p$	lps	0,4
$a_u$	au	0,75
$\alpha$	atrans	0,5

شکل ۴-۷) پارامترهای بدون بعد در حالت رسوب گذاری

پس از انجام محاسبات می توان تغییرات ارتفاع بستر، ارتفاع هر نقطه از مسیر، اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر، نسبت دبی بار بستر قابل انتقال توسط جریان به دبی بار بستر ورودی در هر نقطه از مسیر و در نهایت دانه بندی لایه های سطحی و زیرین را بدست آورد.

#### ۴-۴-۱- تغییرات ارتفاع بستر

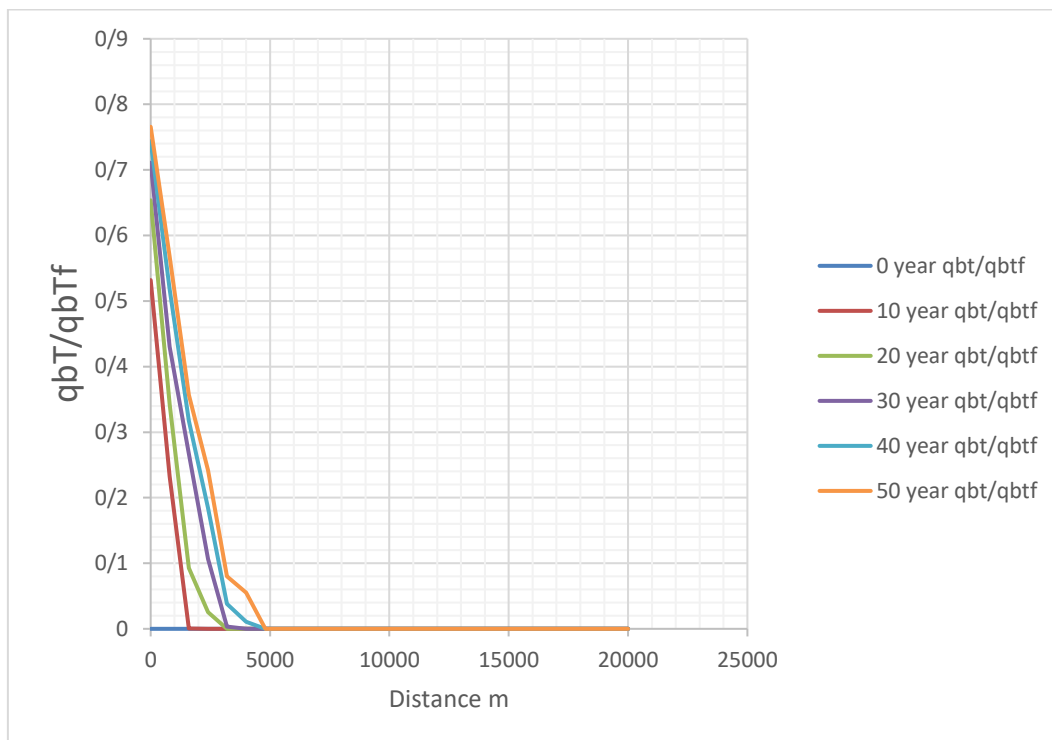
همانطور که در نمودار شکل (۸-۴) قابل مشاهده است افزایش ارتفاع بستر در ابتدای مسیر بسیار زیاد است که نشان می دهد مقدار زیادی از رسوبات در ابتدای مسیر ته نشین می شود. این افزایش ارتفاع با افزایش زمان در طول بیشتری از مسیراتفاق می افتد. همانطور که در شکل مشاهده می شود کلیه رسوب ورودی در طول ۵۰ سال تا فاصله ۷۲۰۰ متر از مبدا ته نشین می شود.



شکل ۴-۸) تغییرات ارتفاع بستر در حالت رسوب گذاری

#### ۴-۴-۲- نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست

همانطور که در نمودار شکل (۴-۹) قابل مشاهده است به علت شیب بسیار کم مسیر و سرعت کم جریان، قابلیت حمل رسوب توسط جریان در لحظه اولیه بسیار پایین است. که باعث می شود نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست بسیار پایین باشد. در نتیجه برای رسیدن به تعادل و افزایش سرعت جریان، انباشت رسوبات به شکلی انجام می شود که شیب مسیر زیاد شود. در نهایت و در گام های زمانی بعد دیده می شود که نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب بالادست افزایش چشمگیری داشته است.



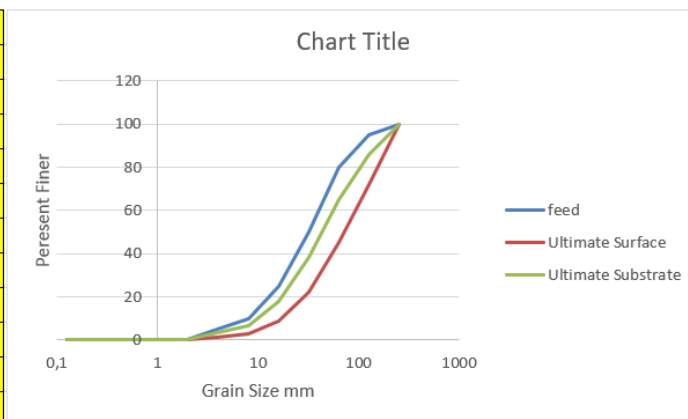
شکل ۴-۹) نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست در حالت رسوب گذاری

#### ۴-۴-۳- دانه بندی نهایی لایه سطحی و لایه زیرین

دانه بندی دبی ورودی از بالادست، لایه سطحی و لایه زیرین پس از گذشت پنجاه سال در شکل (۴-۱۰) قابل مشاهده است. همانطور که میدانیم در بسترهای شنی همواره لایه سطحی درشت دانه تر از لایه زیرین خواهد بود که در شکل (۴-۱۰) این موضوع قابل مشاهده است.



Dd,i mm	feed	Ultimate Surface	Ultimate Substrate
0,125	0	0	0
0,25	0	0	0
0,5	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
4	5	1,2811724	3,4036997
8	10	2,8833753	6,9469054
16	25	8,9672709	18,13117
32	50	22,158085	38,099425
64	80	45,047216	65,170947
128	95	72,028444	85,756437
256	100	100	100



شکل ۴-۱۰) دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب گذاری

#### ۴-۵- بررسی بستر شنی در هنگام رسوب برداری

برای به وجود آوردن شرایط رسوب برداری، باید شیب بستر کانال را به شکلی در نظر گرفت که جریانی که به وجود می آید به مقداری از سرعت برسد که بتواند مقدار رسوب بیشتری از مقدار رسوبی که از بالادست وارد می شود را انتقال دهد. این شرایط در پایین دست سدها، در بسیاری از رودخانه ها با بستر شنی وجود دارد. محاسبات با گام زمانی ۰.۰۲ سال و تا ۲۰۰ سال تکرار می شود و با مقایسه نتایج می توان سیر تکاملی بستر را به خوبی مشاهده کرد.

مقادیر اولیه مورد نیاز برای محاسبات که به مدل عددی داده شده است در شکل (۱۱-۴) قابل مشاهده است. دانه بندی رسوب ورودی از بالادست، دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در شکل (۶-۴) قابل مشاهده است. پارامترهای بدون بعد کمکی در شکل (۷-۴) قابل مشاهده است.

پس از انجام محاسبات می توان تغییرات ارتفاع بستر و ارتفاع هر نقطه از مسیر، نسبت دبی رسوب قابل انتقال به دبی رسوب ورودی در هر نقطه از مسیر، اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر و در نهایت دانه بندی لایه های سطحی و زیرین را بدست آورد

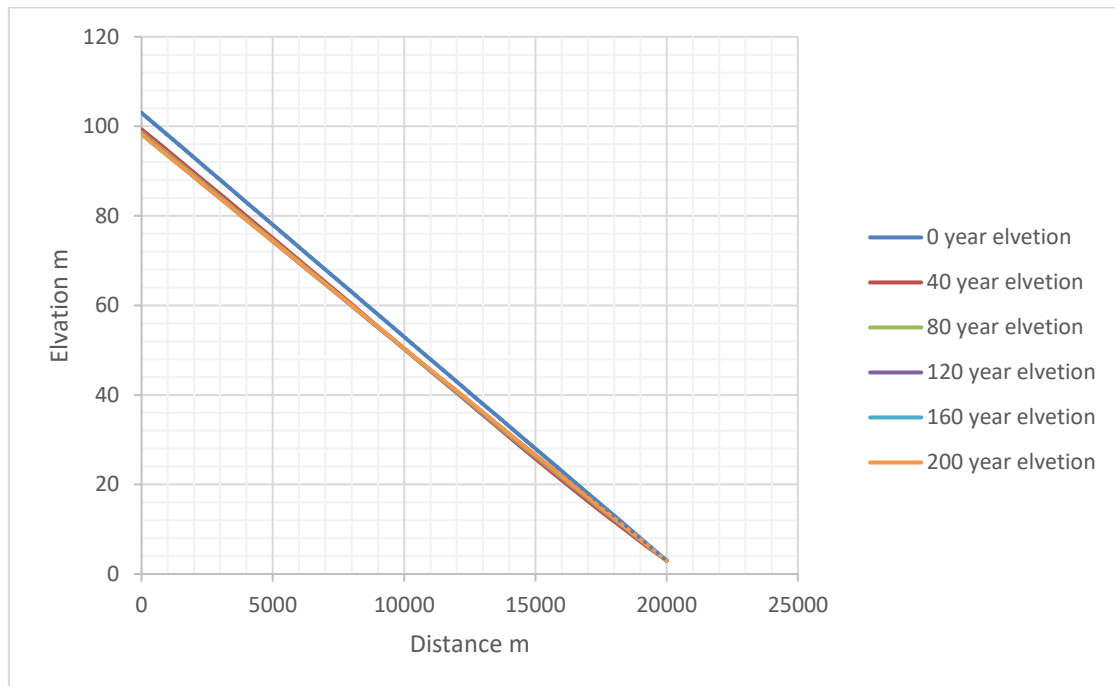
*Input parameters*

		Initial			
		Dd,i	mr feed	Surface	Substrate
qw	6	0,125	0	0	0
qbTf	1,00E-02	0,25	0	0	0
Inter	0,05	0,5	0	0	0
etad	3	1	0	0	0
Sfbl	5,00E-03	2	0	0	0
L	20000	4	5	5	5
$\Delta t$	0,02	8	10	10	10
M	25	16	25	25	25
Ntoprint	2000	32	50	50	50
Nprint	5	64	80	80	80
	200	128	95	95	95
$\Delta x$	800	256	100	100	100
dt	631152				

شکل ۴-۱۱) مقادیر اولیه برای حالت رسوب برداری

**۴-۵-۱- تغییرات ارتفاع بستر**

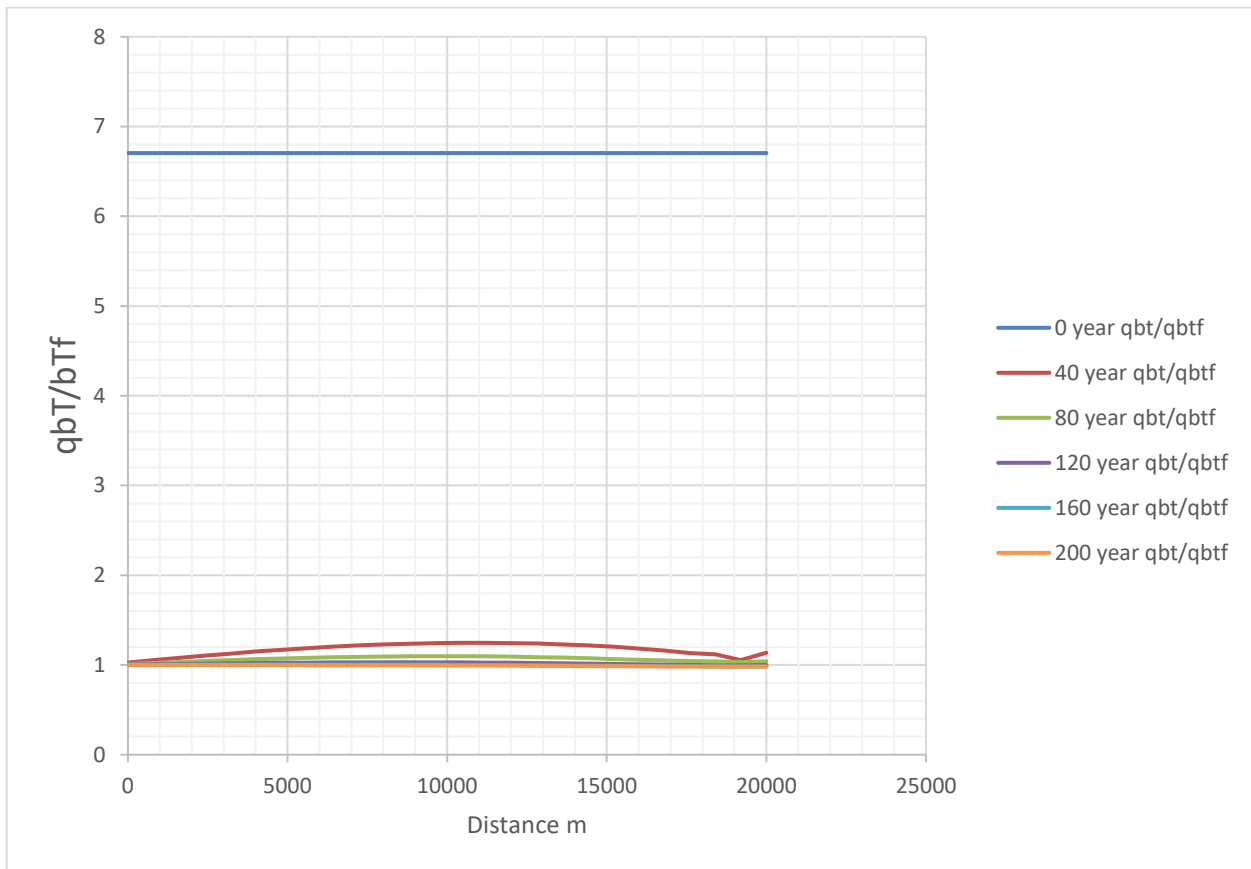
به علت شیب زیاد اولیه در بستر مسیر و کمتر بودن دبی رسوب ورودی باربستر از بالادست نسبت به دبی رسوب قابل حمل توسط جریان، جریان برای رسیدن به تعادل شروع به رسوب برداری و کم کردن شیب بستر میکند. که در نمودار شکل (۴-۱۲) قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۴-۱۲) قابل مشاهده است بیشترین آب شستگی در ۴۰ سال اول و در حدود ۴ متر ایجاد شده و از سال ۴۰ ام تا سال ۲۰۰ ام به دلیل کم شدن شیب بستر، سرعت جریان کاهش یافته و در نتیجه مقدار آب شستگی کاهش می یابد. از سال ۴۰ ام تا سال ۲۰۰ ام مقدار آب شستگی برابر ۱ متر می باشد.



شکل ۴-۱۲) تغییرات ارتفاع بستر در حالت رسوب برداری

#### ۴-۵-۲- نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی

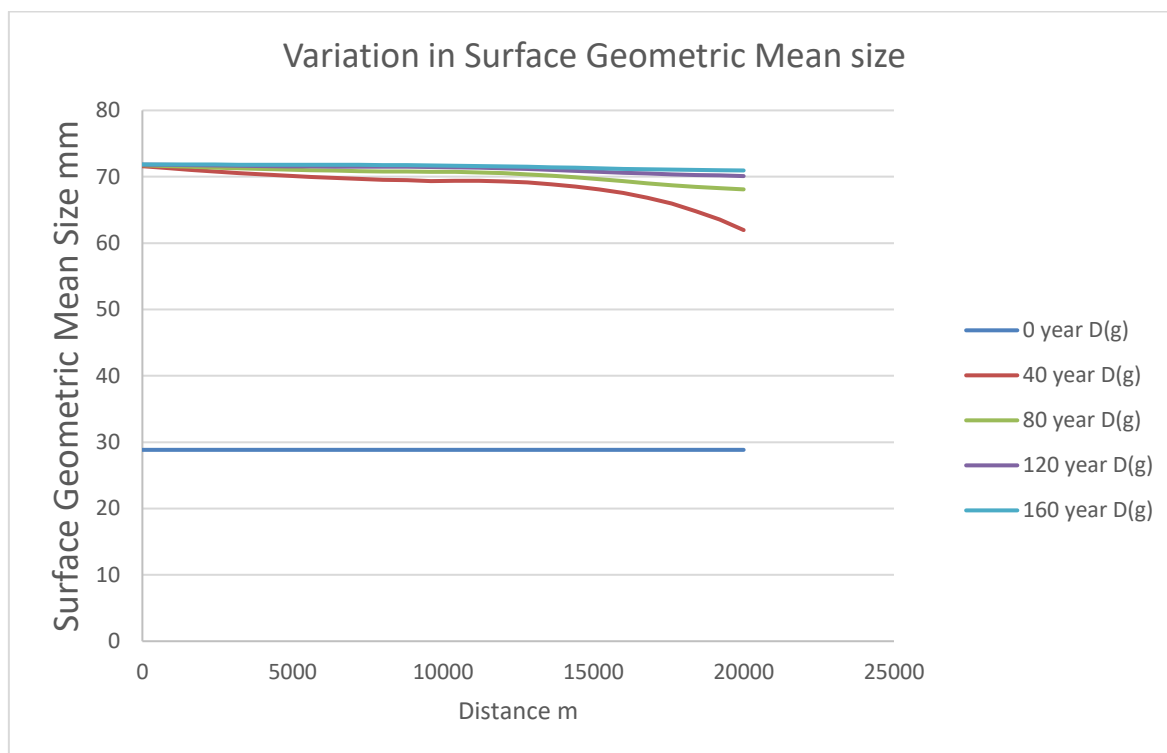
همانطور که در نمودار شکل (۴-۱۳) قابل مشاهده است نسبت دبی رسوب بار بستر قابل حمل توسط جریان به دبی رسوب ورودی از بالادست در لحظه اولیه بسیار زیاد و در حدود ۷ می باشد. این اختلاف زیاد باعث رسوب برداری شدید در مسیر می شود. پس از تغییرات شدید اولیه، مسیر تقریباً به تعادل می رسد



شکل ۴-۱۳) نسبت دبی رسوب قابل انتقال به دبی رسوب ورودی از بالادست در حالت رسوب برداری

### ۳-۵-۴- اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر

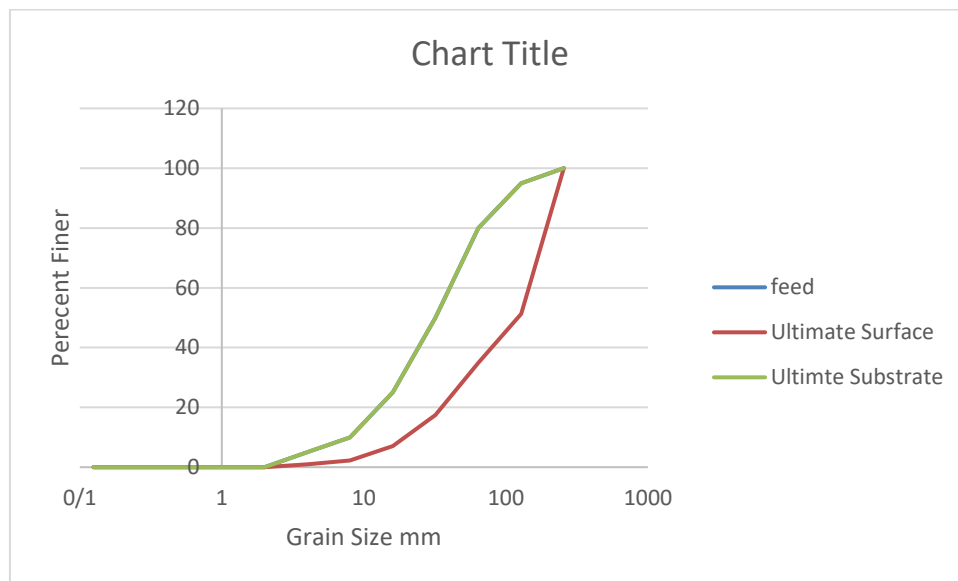
اندازه متوسط دانه ها در لایه سطحی در زمان های مختلف در نمودار شکل (۴-۱۴) مشاهده می شود. با زیاد شدن زمان اندازه متوسط دانه ها در لایه سطحی در طول مسیر بیشتر شده در حالی که دانه بندی لایه زیرین دست نخورده باقی مانده است. همانند اکثر رودخانه های شنی لایه سطحی بسیار درشت تر از لایه زیرین هست.



شکل ۴-۱۴) اندازه متوسط دانه ها در لایه سطحی در حالت رسوب برداری

#### ۴-۵-۴- دانه بندی نهایی لایه سطحی و لایه زیرین

دانه بندی دبی ورودی از بالادست، لایه سطحی و لایه زیرین پس از گذشت دو بیست سال در شکل (۴-۱۵) قابل مشاهده است. همانطور که میدانیم در بسترهای شنی همواره لایه سطحی درشت دانه تر از لایه زیرین خواهد بود که در شکل (۴-۱۵) این موضوع قابل مشاهده است. به علت این که بستر همواره تحت رسوب برداری بوده است لایه زیرین از نظر دانه بندی تغییری نکرده است.



شکل ۴-۱۵) دانه بندی لایه سطحی و لایه زیرین در حالت رسوب برداری

#### ۴-۶- لایه محافظ در برابر آب شستگی

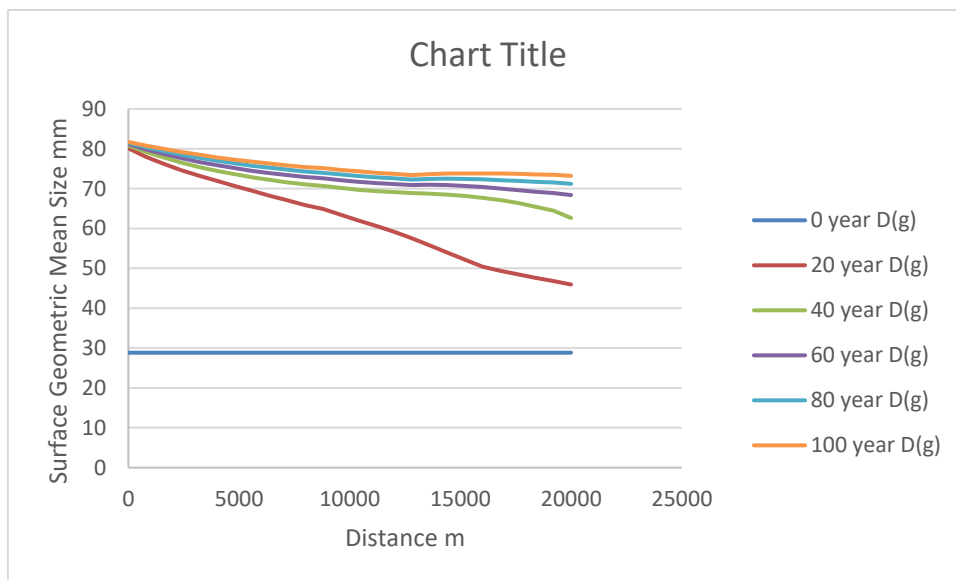
همانطور که قبلاً گفته شد در رودخانه هایی با بستر شنی لایه سطحی بسیار درشت دانه تر از لایه زیرین است. رودخانه برای جابجا کردن ذرات درشت ابتدا آنها را به لایه سطحی انتقال میدهد. ولی گاهی اوقات و مخصوصاً در زمانی که مقدار رسوب بار بستر از بالا دست خیلی کم باشد دانه بندی لایه بستر به شکلی درمی آید که بیشترین مقاومت در برابر آب شستگی ایجاد می شود. به این لایه، لایه محافظ در برابر آب شستگی گفته می شود. برای بررسی بیشترین موضوع، بستری با دانه بندی شکل (۴-۱۶) را در زمانی برابر ۱۰۰ سال بررسی میکنیم.

			Initial			
			Dd,i mn feed	Surface	Substrate	
qw	6	water discharge/width, m <sup>2</sup> /s	0,125	0	0	0
qbTf	1,00E-04	gravel input rate, m <sup>2</sup> /s	0,25	0	0	0
Inter	0,05	Intermittency	0,5	0	0	0
etad	3	base level, m	1	0	0	0
Sfbl	5,00E-03	initial bed slope	2	0	0	0
L	20000	reach length,m	4	5	5	5
$\Delta t$	0,02	time step, years	8	10	10	10
M	25	no. of intervals	16	25	25	25
Ntoprin	1000	no. of steps until a printout of results is made	32	50	50	50
Nprint	5	no. of printouts after the initial one	64	80	80	80
	100	years calculation time	128	95	95	95
$\Delta x$	800	m	256	100	100	100
dt	631152	s				

شکل ۴-۱۶) مقادیر اولیه برای لایه مقاوم در برابر آب شستگی

#### ۴-۶-۱- اندازه متوسط دانه ها در هر نقطه از مسیر

همانطور که در شکل (۴-۱۷) دیده می شود در ۲۰ سال اول اندازه متوسط دانه ها در طول مسیر متفاوت است ولی پس از آن تغییر زیادی در اندازه متوسط دانه ها دیده نمی شود که نشان دهنده این است که دانه بندی بستر رودخانه در طی سالها تقریباً ثابت مانده است.

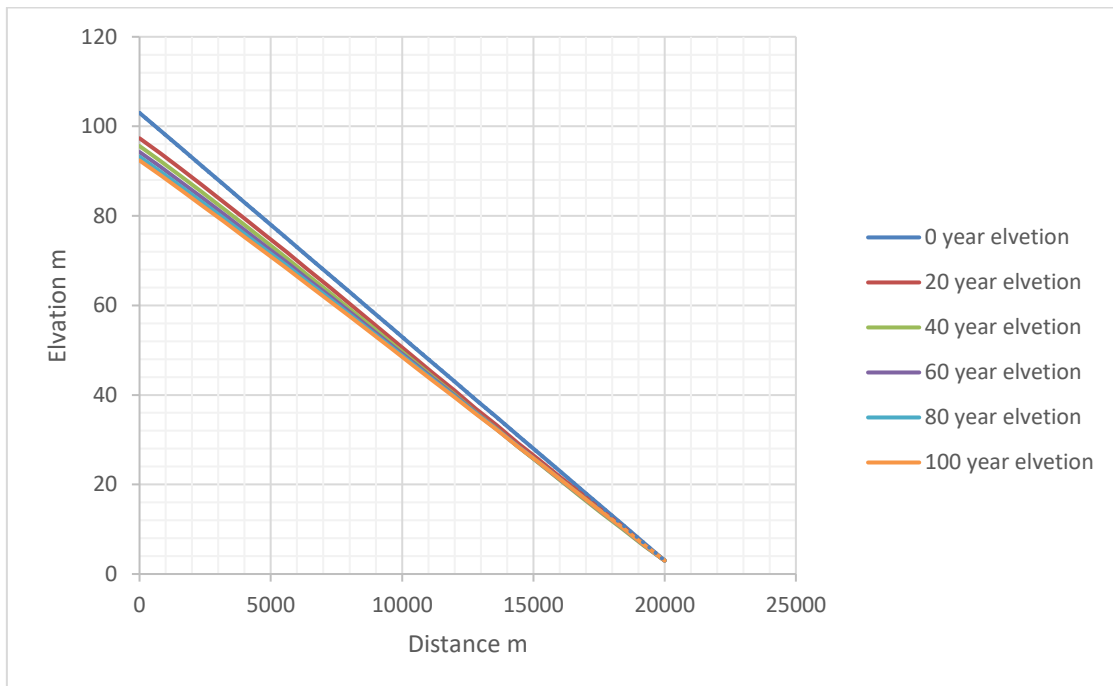


شکل (۴-۱۷) اندازه متوسط دانه ها در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

#### ۴-۶-۲- تغییرات ارتفاع بستر

همانطور که در شکل (۴-۱۸) دیده می شود تغییرات ارتفاع که ناشی از آب شستگی می باشد در ۲۰ سال اول در اولین نقطه از مسیر ۴ متر بوده است در حالی که تغییر ارتفاع همین نقطه در ۱۰۰ سال بعد از آن ۱.۳ متر می باشد و بعد از آن به حدود صفر نزدیک شده است که نشان دهنده این است که لایه محافظ در برابر آب شستگی از سال ۲۰ ام به بعد ایجاد شده است.

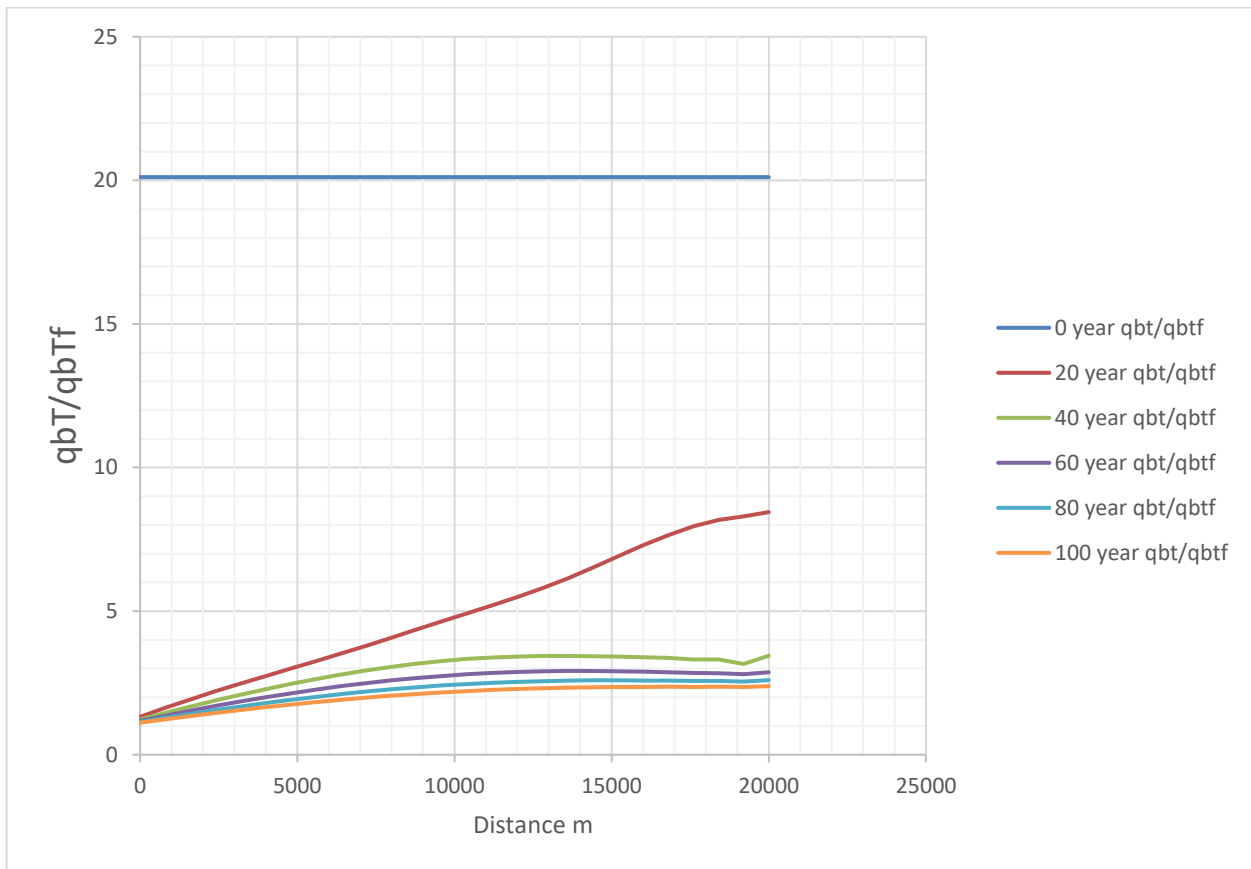




شکل ۴-۱۸) تغییرات ارتفاع بستر در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

#### ۴-۶-۳- نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی رسوب ورودی

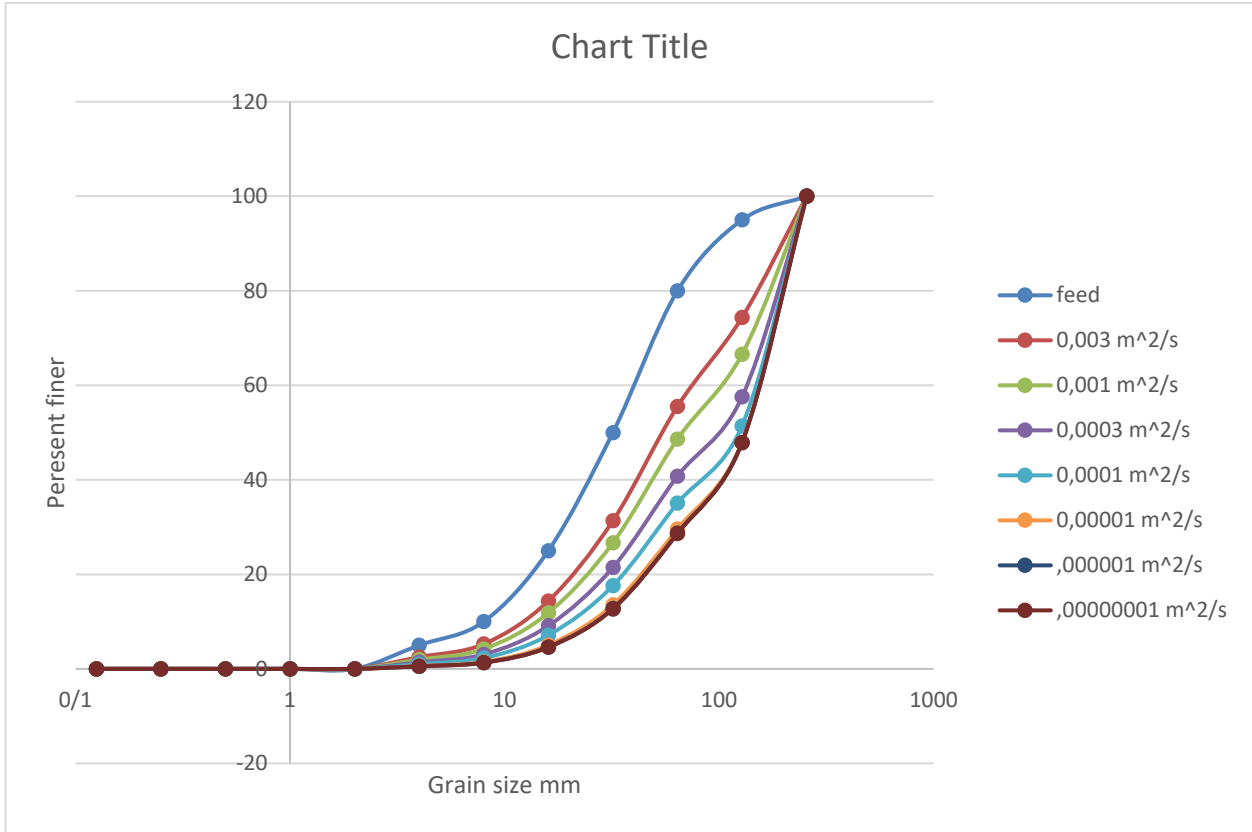
همانطور که در شکل (۴-۱۹) دیده می شود در لحظه آغازین مقدار دبی قابل حمل توسط جریان حدوداً ۲۰ برابر مقدار دبی بار بستر ورودی از بالادست می باشد که این نسبت بعد از ۴۰ سال به به عدد ۱ نزدیک شده است. هر چه این نسبت بیشتر به عدد ۱ نزدیک باشد مقدار آب شستگی کاهش می یابد.



شکل ۴-۱۹) نسبت دبی رسوب قابل انتقال توسط جریان به دبی ورودی در حالت تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

#### ۴-۶-۴- تشکیل لایه مقاوم در برابر آب شستگی

لایه بستر شکل (۴-۱۶) را در مدت زمان ۱۰۰ سال تحت انواع مختلف رسوب بار بستر از بالادست قرار می دهیم و دانه بندی های نهایی را با هم مقایسه می کنیم. همانطور که در شکل ۴-۲۰ دیده می شود با کم شدن تدریجی دبی رسوب بار بستر از بالادست لایه درشت دانه تر می شود. تا جایی که با کم شدن دبی رسوب بالا دست دیگر تغییر زیادی در لایه سطحی ایجاد نمی شود. در نهایت می توان نتیجه گرفت شکلی از دانه بندی لایه سطحی که با کم شدن دبی رسوب تغییری در آن ایجاد نشود لایه مقاوم نهایی گفته می شود.



شکل ۴-۲۰) لایه مقاوم در برابر آب شستگی



# فصل ۵

## جمع بندی و نتیجه گیری

## ۵-۱- خلاصه

همانطور که در ابتدا گفته شد تعیین مقدار آب شستگی و تغییرات بستر رودخانه و تعیین دانه بندی لایه های بستر در زمان های مختلف اهداف اصلی مطالعه پیش رو را تشکیل می دهند تا به این شکل بتوان بهترین پیش بینی را از تغییرات آینده در مورفولوژی رودخانه بدست آورد.

در ابتدا تاریخچه ای از مطالعات صورت گرفته در مورد آب شستگی و انتقال رسوب ارائه شد سپس با توجه به ماهیت فرآیند انتقال رسوب معادلات و روابط به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفت. فرآیند های مورفولوژی دارای دو مولفه هیدرودینامیک و مورفودینامیک می باشند. مولفه های هیدرودینامیک که مربوط به جریان آب هستند به وسیله دو دسته معادله پیوستگی و مومنوم تعیین می شوند. و مولفه های مورفودینامیک شامل معادلات اکسنر و انتقال-انتشار هستند.

در این پایان نامه تمام این مولفه ها و در هم تنیدگی آنها و اثر آنها بر روی هم به صورت کدهایی به زبان ویژوال بیسیک نوشته شده است. این کد از چند بخش اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول باید مقادیر اولیه به نرم افزار داده شود. سپس تنش برشی در کف و شیب بستر محاسبه می شود. در مرحله بعد مقدار رسوب انتقالی به شکل بار بستر محاسبه می شود. بعد از آن با شکستن معادله اکسنر به روش تفاضل محدود ارتفاع هر نقطه و دانه بندی آن نقطه در هر گام زمانی تعیین می شود.

## ۵-۲- نتیجه گیری

۱- مدل سازی جریان رسوب در این تحقیق نتایج خوب و مشابه نتایج آزمایشگاه ایجاد نمود. بنابر این مدل سازی های عددی می تواند جایگزین خوبی برای تست های آزمایشگاهی باشند و هزینه های تحقیقات را به مقدار زیادی کاهش دهند.

۲- در حالتیکه رسوب وارد شده به کانال بیشتر از رسوب قابل انتقال توسط جریان بود، مدل سازی عددی توانست به خوبی رسوب گذاری در کانال را نشان دهد. همچنین مشخص گردید که رسوبات درشت تر در بالادست و رسوبات ریزتر در پایین دست کانال ایجاد می شوند که این در تطابق با واقعیت می باشد.

۳- در حالتیکه رسوب وارد شده به ابتدای کانال کمتر از رسوب قابل انتقال توسط جریان باشد، مدل سازی عددی به خوبی رسوب برداری در کانال را به نمایش گذاشت. همچنین تغییرات دانه بندی از درشت تر در سطح تا ریزتر در عمق را نشان داد که در تطابق با واقعیت می باشد.

۴- با بکار بردن مدل رسوب برداری در طولانی مدت، مدل توانست لایه مقاوم در مقابل آب شستگی را به نمایش بگذارد که این لایه مقاوم می تواند در پایین دست سدها به کار رود تا به این ترتیب پایین دست سدها در دراز مدت ثابت و پایدار باشند.

۵- نتایج خروجی بدست آمده از محاسبات عددی صورت گرفته نشان می دهد که روش تفاضل محدود انتخاب شده برای نوشتن کدها خاصیت اصلی معادلات اکسنر و انتقال-انتشار را به خوبی نشان می دهد.

۶- از آنجاییکه نتایج بدست آمده از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد، می توان آن را جایگزین مناسبی برای مطالعات زمان بر و پرهزینه آزمایشگاهی دانست.

## ۵-۳- پیشنهادات

از آنجاییکه هیچ مطالعه و تحقیق علمی از هر نظر کامل و جامع نیست لذا پیشنهاداتی برای محققین گرامی ارائه می شود.

۱- در مطالعه صورت گرفته جریان و معادلات هیدرودینامیک و مورفولوژی به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است و برای دقیق تر شدن محاسبات می توان آن را دو یا سه بعدی در نظر گرفت

۲- در این تحقیق عرض رودخانه زیاد در نظر گرفته شده و از اثر مرزهای عرضی رودخانه بر روی جریان و انتقال رسوب صرف نظر شده است. می توان با در نظر گرفتن اثر مرزهای جامد رودخانه ها و کانال هایی با عرض کم را بهتر بررسی کرد

۳- در این تحقیق، طول مسیر مستقیم فرض شده است. می توان با در نظر گرفتن مسیره های منحنی رسوب گذاری در پیچ رودخانه ها را بررسی کرد.

۴- در این تحقیق رودخانه هایی با بستر شنی مورد بررسی قرار گرفته است که در صدبالیی از انتقال رسوب در این رودخانه ها به شکل بار بستر است. لذا توصیه می شود رودخانه هایی با بستر ماسه ای نیز بررسی شود

۵- در این تحقیق از روش تفاضل محدود استفاده شده است از این رو توصیه می شود از روش حجم محدود هم برای بررسی جریان و انتقال رسوب استفاده شود.



1. Ricc c.E. and Kadavy k.c 1992 , Riprap design for SAF Stilling basins . Transaction ASCE. 35 (6): 1817-1825.
2. Maynard S.T. 1987 . Stable riprap Department of civil engineering , cobrado state University, FtCoollins , Co.
3. Gessler.J. The beginning of bedload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels . swiss federal Institute of technology , Rept. No.69.1967.89 P.
4. BELL.R.G.. Non –equilibrium transport by steady and non- steady flows. Rep. No.80/23. Dept. Of civil fng , univ. Of canterbury. New zealand . 1980. 236p.
5. ANDREWS.E.D. and Parker . G. Formation of a coarse surface lojer as the response to a gravel mobility , Chop 10. sediment Transport in Grovel – Bed Rivers. Wiley –interscience Publications . 1987,pp.269-300.
6. Parker . G and Sutherland . A.J.. 1990.Fluvial Armor. Journal of Hydraulic Reasearch . 28(5)
7. PROFFITT.G.T.. Matchematical modelling of one –dimensional morphological changes in rivers with non- uniform sediment ph.D. thesis . Delft University of Technology. 1987.
8. Peter R.Wilcock , Stephan T.Kenworthy , and Joana C.Crow (2001) ''WATER RESOURCES RESEARCH , VOL,37,NO.12,PAGES 3349-3358
9. Gabriel Kaless, Mario A.Lenzi, Luca Mao(2013)''A 2D hydrodynamic-sedimantological rivers''. Jurnal of Agricultural Engineering.

## **ABSTRACT**

In this research, the level of riverbed scour, formation of a resistant layer, and final aggregation of surface and substrate of the bed were measured using a numerical model prepared by coding in excel software with the programming language of visual basic (VB). Equations governing the sediment transport process consist two hydrodynamic and morphodynamic models. The hydrodynamic, which encompasses continuity and conservation momentum equations, is applied to estimate the flow-dependent components. On the other hand, the morphodynamic model includes equations related to the sediment transport process. Hydraulic parameters in combination with hydrodynamic and morphodynamic equations are used in code writing. Given the application of the finite difference method in the present study, the governing equations were coded in VB programming language after discretization and determination of coefficients. Finally, the numerical results obtained were compared using two laboratory models, followed by assessing the accuracy of results. In this research, we first confirmed the accuracy of numerical flow modeling by two laboratory tests. Afterwards, the numerical modeling was carried out when the sediment entering at the beginning of the channel was more than the sediment that could be transferred by the flow. In this regard, appropriate results were shown based on reality. In the next stage, the amount of the sediment entering the canal was considered lower, compared to the sediment that could be transmitted by the current, which led to the presenting suitable numerical modeling for sedimentation in the canal. In the end, the long-term sedimentation model was applied, which led to the presenting of a layer resistant to downstream by the model. It is suggested that this layer be used in the downstream of dams to prevent scour in this area and the demolition of downstream buildings.

**Keywords:** Sediment transport, armor layer, degradation



**Shahroud University of Technology**  
**Faculty of Civil and Architecture**

**Department of Environmental and Environmental Engineering**

A Thesis/Dissertation Submitted in Partial Fulfillment for the Degree of

**study the mechanism of degradation and armoring in a gravel-bed  
rivers downstream of dams**

By:

**AMIR FARHANG FARZANEH**

**SUPERVISOR:**

**DR RAMIN AMINI**

September 2018