

# به نام خداوند بخشنده و مهربان

۱۳۲۹/۱۱

۱۳۲۹/۱۱ - ۲...۹۵۲



دانشگاه صنعت آب برق

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی آب

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران - مهندسی رودخانه

عنوان:

توسعه مدل تحلیلی برای شبیه سازی مسلح شدن بستر رودخانه در پایین دست سدها

تحقیق و تدوین:

مرضیه خضریان

استاد راهنما:

دکتر محمد رضا مجدزاده طباطبایی

استاد مشاور:

دکتر سعید سعید موسوی ندوشنی

اسفند ۸۷

اطلاعات در کتابخانه  
شهرک

۱۳۸۸/۱۲/۱۶

۱۳۲۶۱۸



دانشگاه صنعت آب و برق

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی آب

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - مهندسی رودخانه، خانم مرضیه خضریان

تحت عنوان:

توسعه مدل تحلیلی برای شبیه سازی مسلح شدن بستر رودخانه

در تاریخ ۸۷/۱۲/۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

استاد راهنمای پایان نامه: دکتر محمدرضا مجدزاده طباطبائی

استاد مشاور پایان نامه: دکتر سید سعید موسوی ندوشنی

استاد داور: دکتر فیروز بهادری

استاد داور: دکتر احمد رضا غواصیه

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر محمد رضا مجدزاده طباطبائی

۱۳۸۸/۱۲/۱۶

به پدر و مادرم

فهرست

چکیده

## فصل اول: شناخت فرآیند مسلح شدن بستر

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ارزیابی پدیده مسلح شدن	۳
۱-۳- شروع فرآیند مسلح شدن	۴
۱-۴- شرایط لازم برای مسلح شدن	۶
۱-۵- مکانیسم فرآیند مسلح شدن	۱۰

## فصل دوم: مدل سازی فرآیند مسلح شدن بستر

۱-۲- مقدمه	۱۶
۲-۲- مدل های یک مرحله ای	۱۷
۳-۲- مدل های چند مرحله ای	۲۰
۱-۳-۲- مدل های آزمایشگاهی	۲۰
۲-۳-۲- مدل های تحلیلی	۲۴
۳-۳-۲- مدل های عددی	۳۰
۱-۳-۳-۲- مدل های یک لایه ای	۳۰
۲-۳-۳-۲- مدل های چند لایه ای	۳۳
۴-۲- مقایسه و بررسی	۳۵

## فصل سوم: معادلات حاکم بر پدیده مسلح شدن

۱-۳- مقدمه	۳۷
۲-۳- معادلات ممتوم و پیوستگی جریان	۳۷
۳-۳- معادله پیوستگی رسوب	۴۰
۴-۳- معادلات انتقال رسوب	۴۳
۱-۴-۳- تابع پناه گیری	۴۴

۴۵.....	۳-۴-۱-۱-آستانه حرکت
۴۹.....	۳-۴-۱-۲-تنش برشی
۵۲.....	۳-۵-معادلات مقاومت جریان

## فصل چهارم: توسعه مدل

۵۷.....	۴-۱-مقدمه
۵۸.....	۴-۲-فرضیات حاکم بر مدل
۵۹.....	۴-۳-تئوری حاکم بر مدل
۶۰.....	۴-۳-۱-معادلات حاکم
۶۱.....	۴-۴-حل تحلیلی دستگاه معادلات حاکم
۶۷.....	۴-۴-۱-دستگاه معادلات حاکم
۶۹.....	۴-۴-۲-شرایط مرزی
۷۰.....	۴-۵-معادله بار بستر
۷۲.....	۴-۶-الگوریتم محاسباتی مدل

## فصل پنجم: واسنجی مدل و بررسی نتایج حاصله

۷۸.....	۵-۱-مقدمه
۷۹.....	۵-۲-اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده در کالیبراسیون مدل
۷۹.....	۵-۲-۱-داده‌های آزمایشگاهی (Chin et al (1994
۸۲.....	۵-۲-۲-آنالیز نمونه گیری های لایه مسلح
۸۳.....	۵-۳-بررسی قابلیت مدل در شبیه سازی تغییرات بستر
۹۵.....	۵-۴-بررسی قابلیت مدل در محاسبه تغییرات شیب و شعاع هیدرولیکی بستر
۱۰۰.....	۵-۵-بررسی قابلیت مدل در شبیه سازی تغییرات دانه بندی بستر
۱۰۷.....	۵-۶-بررسی کارایی مدل نسبت به مدل تحلیلی (Proffitt (1980
۱۱۰.....	۵-۷-بررسی مفهوم سرعت برشی مسلح شدن بحرانی

---

۱۱۳.....	۱-۶- مقدمه.....	فصل ششم : نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۱۳.....	۲-۶- نتیجه گیری.....	
۱۱۶.....	۳-۶- ارائه پیشنهاداتی برای مطالعات آتی.....	
۱۱۹.....	پیوست.....	
۱۳۶.....	مراجع و منابع.....	

- شکل (۱-۱) - تراز کاهی چرخشی پایین دست سد ..... ۵
- شکل (۲-۱) - تراز کاهی موازی بستر جریان ..... ۶
- شکل (۳-۱) - لایه زیر سطحی در بستر رودخانه‌ها ..... ۹
- شکل (۴-۱) - نمونه‌ای از لایه مسلح بوجود آمده در بستر رودخانه ..... ۱۲
- شکل (۵-۱) - فرآیند مسلح شدن ..... ۱۳
- شکل (۱-۲) - نتایج مطالعات آزمایشگاهی Garde ..... ۲۱
- شکل (۲-۲) - فرآیند بررسی تغییرات ترکیبات بستر ..... ۲۷
- شکل (۳-۲) - حجم کنترل در نظر گرفته شده برای بررسی تغییرات بستر ..... ۲۸
- شکل (۴-۲) - فرم قرارگیری لایه‌های بستر از نظر Willetts ..... ۲۹
- شکل (۵-۲) - فرم قرارگیری لایه‌های بستر از نظر Hirano ..... ۳۱
- شکل (۱-۳) - شکل شماتیک تبدیل جریان ناپایدار هیدروگراف به جریان شبه پایدار ..... ۳۹
- شکل (۲-۳) - نمودار شیلدز برای رسوبات غیر یکنواخت ..... ۴۷
- شکل (۳-۳) - تابع پناه‌گیری به صورت تابعی از سائز رسوبات ..... ۴۸
- شکل (۴-۳) - مقایسه توابع پناه‌گیری مختلف ..... ۵۲
- شکل (۱-۴) - بازه در نظر گرفته شده برای ارائه مدل ..... ۵۹
- شکل (۲-۴) - چگونگی تعریف لایه‌های مختلف بستر در مدل ..... ۶۱
- شکل (۳-۴) - تراز کاهی بستر ..... ۶۶
- شکل (۴-۴) - روند محاسبه تراز بستر در هر گاه زمانی ..... ۷۳
- شکل (۵-۴) - روندنمای برنامه کامپیوتری ..... ۷۵
- شکل (۶-۴) - روندنمای زیر برنامه محاسبه تراز بستر ..... ۷۶
- شکل (۱-۵) - ترکیبات مواد بستر ..... ۸۰
- شکل (۲-۵) - ترکیبات مواد بستر ..... ۸۰
- شکل (۳-۵) - مقایسه مقادیر تغییرات تراز بدست آمده از مدل و مقادیر مشاهداتی ..... ۸۴
- شکل (۴-۵ الف) - مقایسه مقادیر عمق فرسایش محاسباتی توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱ ..... ۸۵
- شکل (۴-۵ ب) - مقایسه مقادیر عمق فرسایش محاسباتی توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱ ..... ۸۵



.....	آزمایش ۲	۸۵
.....	شکل (۵-۴-ج) - مقایسه مقادیر عمق فرسایش محاسباتی توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۸۵
.....	آزمایش ۳	۸۵
.....	شکل (۵-۴-د) - مقایسه مقادیر عمق فرسایش محاسباتی توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۸۶
.....	آزمایش ۴	۸۶
.....	شکل (۵-۴-و) - مقایسه مقادیر عمق فرسایش محاسباتی توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۸۶
.....	آزمایش ۵	۸۷
.....	شکل (۵-۵-الف) - مقایسه مقادیر عمق نهایی فرسایش محاسبه شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای	۸۷
.....	شکل (۵-۵-ب) - مقایسه مقادیر عمق نهایی فرسایش محاسبه شده توسط مدل و مقادیر محاسبه شده توسط GSTAR	۸۸
.....	شکل (۵-۶-الف) - مقایسه عمق‌های فرسایش محاسبه شده توسط مدل و GSTAR در زمان ۴۵ دقیقه	۹۰
.....	شکل (۵-۶-ب) - مقایسه عمق‌های فرسایش محاسبه شده توسط مدل و GSTAR در زمان ۹۰ دقیقه	۹۱
.....	شکل (۵-۶-ج) - مقایسه عمق‌های فرسایش محاسبه شده توسط مدل و GSTAR در زمان ۳۶۰ دقیقه	۹۱
.....	شکل (۵-۷-الف) - مقایسه روند تغییرات شیب بستر محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۹۵
.....	آزمایش ۱	۹۵
.....	شکل (۵-۷-ب) - مقایسه روند تغییرات شعاع هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۹۶
.....	آزمایش ۱	۹۶
.....	شکل (۵-۷-ج) - مقایسه روند تغییرات شیب بستر محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۹۶
.....	آزمایش ۴	۹۶
.....	شکل (۵-۷-د) - مقایسه روند تغییرات شعاع هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	۹۷
.....	آزمایش ۴	۹۷
.....	شکل (۵-۸-الف) - مقایسه شیب‌های نهایی محاسبه شده توسط مدل و مقادیر محاسبه شده توسط GSTAR	۹۸

شکل (۵-۸-ب)- مقایسه شعاع هیدرولیکی نهایی محاسبه شده توسط مدل و مقادیر محاسبه شده توسط	
GSTAR	۹۸.....
شکل (۵-۹-الف)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۱	
آزمایش ۲	۱۰۰.....
شکل (۵-۹-ب)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۲	
آزمایش ۳	۱۰۱.....
شکل (۵-۹-پ)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۳	
آزمایش ۱	۱۰۱.....
شکل (۵-۹-ج)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۴	
آزمایش ۳	۱۰۲.....
شکل (۵-۹-د)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۵	
آزمایش ۴	۱۰۲.....
شکل (۵-۹-و)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۶	
آزمایش ۲	۱۰۳.....
شکل (۵-۹-ه)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۷	
آزمایش ۱	۱۰۳.....
شکل (۵-۹-ی)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۸	
آزمایش ۱	۱۰۴.....
شکل (۵-۹-ز)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل و GSTAR مخلوط ۹	
آزمایش ۲	۱۰۴.....
شکل (۵-۱۰)- مقایسه مقادیر (میانگین وزنی قطر دانه‌ها) محاسبه شده توسط مدل GSTAR	۱۰۶.....
شکل (۵-۱۱)- بررسی تغییرات (میانگین وزنی قطر دانه‌ها) در لایه مسلح با تنش برشی وارد بر بستر	۱۰۷.....
شکل (۵-۱۲-الف)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی و مدل	
proffitt، مخلوط ۱ آزمایش ۲	۱۰۸.....
شکل (۵-۱۲-ب)- بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی و مدل	
proffitt، مخلوط ۱ آزمایش ۳	۱۰۸.....

شکل (۵-۱۲-پ) - بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی و مدل proffitt، مخلوط ۱ آزمایش ۴.....	۱۰۹
شکل (۵-۱۲-ج) - بررسی چگونگی انطباق لایه مسلح محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی و مدل proffitt، مخلوط ۱ آزمایش ۵.....	۹۸
شکل (۵-۱۳) - تغییرات عمق نهایی فرسایش با سرعت برشی وارد بر بستر.....	۱۱۰

جدول (۱-۲)-انواع مدل های ارائه شده برای شبیه سازی پدیده مسلح شدن.....	۳۴
جدول (۱-۵)- خلاصه مشخصات آزمایش های انجام شده روی مخلوط های مختلف .....	۸۱
جدول (۲-۵)- مقادیر خطای مدل در محاسبه عمق نهایی فرسایش .....	۸۹
جدول (۳-۵-الف)- مقادیر خطای موجود در محاسبات مدل در زمان های اولیه از شروع فرآیند مسلح شدن .....	۹۲
جدول (۳-۵-ب)- مقادیر خطای موجود در محاسبات مدل در زمان های اولیه از شروع فرآیند مسلح شدن .....	۹۳
جدول (۳-۵-ج)- مقادیر خطای موجود در محاسبات مدل در زمان های اولیه از شروع فرآیند مسلح شدن .....	۹۴
جدول (۴-۵)- مقادیر خطای موجود در محاسبات مدل برای شیب و شعاع هیدرولیکی .....	۹۹

## چکیده

بررسی چگونگی حرکت و جابه‌جایی مواد رسوبی در رودخانه‌ها و توزیع دانه بندی مواد بستر، همواره از چالش‌های مهندسين رودخانه بوده است. پدیده مسلح شدن بستر رودخانه پدیده‌ای قابل توجه در حیطه مسائل انتقال رسوب در رودخانه‌ها است. در اثر فرآیند مسلح شدن، در بستر رودخانه‌ها، لایه‌ای از ذرات درشت بر روی لایه‌ای از ذرات ریزتر قرار می‌گیرد و در این حالت نوعی تعادل در بستر رودخانه به وجود می‌آید. مکانیسم اساسی در فرآیند مسلح شدن، تغییر در ترکیبات دانه‌بندی بستر رودخانه است، بنابراین هدف مدل‌های ارائه شده برای توضیح پدیده مسلح سازی پیش بینی ترکیبات دانه بندی سطح بستر است.

در رساله پیش‌رو مدلی تحلیلی برای پیش بینی دانه بندی بستر مسلح و عمق فرسایش بستر در حین فرآیند مسلح شدن ارائه شده است. در مدل مزبور با استفاده از معادلات حاکم بر جریان، معادله پیوستگی رسوب و معادلات بار بستر دستگامی از معادلات تشکیل شده است. دستگام معادلات بدست آمده به صورت تحلیلی مورد حل قرار گرفته است. جهت حل تحلیلی معادلات، فرضیاتی در نظر گرفته شده که در بازه‌های زمانی و مکانی کوتاه صادق است. از این رو حل تحلیلی معادلات در یک بازه زمانی کوتاه جایگزین منفصل سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده شده و جواب‌های بدست آمده برای هر گام به عنوان شرایط ورودی برای گام زمانی بعد بکار رفته است. به این ترتیب الگوریتمی نوشته شده که برای آن برنامه‌ای کامپیوتری ترتیب داده شده است. الگوریتم حاصل قادر است، تغییرات دانه بندی بستر رودخانه را در حین تکامل تا رسیدن به بستر مسلح و نیز عمق فرسایش، طی این فرآیند را پیش بینی نماید.

فرضیات محدود کننده اعمال شده بر این مدل شامل پایداری جریان و یکنواختی مورفولوژی در طول بازه مورد بررسی است.

در نهایت مدل مزبور به کمک نتایج آزمایشگاهی و نرم افزار مرجع GSTAR-1D کالیبره شده است. نتایج حاصل از مدل با سایر مدل‌های تحلیلی موجود نیز مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی و نرم افزار GSTAR-1D دارند و مدل نسبت به سایر مدل‌های تحلیلی موجود نتایج قابل قبول تری بدست می‌دهد.

کلمات کلیدی: مدل تحلیلی، انتقال رسوب، مسلح شدن، توزیع دانه بندی

فصل اول

شناخت فرآیند مسلح شدن بستر

## فصل اول

### شناخت فرآیند مسلح شدن بستر

#### ۱-۱- مقدمه

هنگامی که توانایی انتقال رسوب در یک آبراهه بر میزان رسوب تزریقی از بالادست فزونی یابد، آبراهه برای موازنه بار رسوبی خود کمبود ها را، از بستر و کناره خود تامین خواهد کرد. در این حالت آبراهه بستر و کناره های خود را می فرساید. این پدیده که در مهندسی رودخانه ترازگاهی<sup>۱</sup> نامیده می شود، اغلب در پایین دست سدهای ذخیره ای و انحرافی تازه احداث شده اتفاق می افتد. دیوارهای نگهدارنده رودخانه Seyhan ترکیه، دو سال بعد از احداث، در اثر فرآیند ترازگاهی در پایین دست سد Seyhan، فروریختند. چنین نمونه هایی را در سراسر دنیا می توان مثال زد. از این رو لازم است، میزان ترازگاهی مورد محاسبه قرار گیرد تا در حین طراحی سازه ها تدابیر مناسب برای مقابله با آن را اندیشید (Bureau of Reclamation Manual, ۱۹۸۴).

به علت غیر یکنواختی اندازه مصالح و نوسانات جریان که منجر به وارد آمدن مقادیر متغیر تنش برشی به ذرات می شود، فرآیند فرسایش ذرات، در طول ترازگاهی، به صورت گزینشی انجام می شود. به این ترتیب مصالح ریزتر شسته شده و مصالح درشت روی بستر باقی می مانند. با تجمع مواد زیر بر روی بستر به تدریج این ذرات، لایه ای محافظ روی بستر ایجاد می کنند که از ادامه روند فرسایش جلوگیری می کند. لایه زیر بوجود آمده بر روی بستر لایه مسلح<sup>۲</sup> نامیده می شود.

تشکیل لایه مسلح بر روی بستر از این جهت که فرآیند ترازگاهی را تحت تاثیر خود قرار می دهد، حائز اهمیت است. در این فصل فرآیندهای کلی مربوط به شکل گیری لایه مسلح، چگونگی این پدیده و پیامدهای آن در بستر رودخانه، مورد بررسی قرار می گیرد.

۱-Degradation

۲-Armour layer

## ۱-۲- ارزیابی پدیده مسلح شدن

رودخانه‌ها در حالت تعادل، دارای مقاطع عرضی ثابتی هستند و پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی آن‌ها دچار تغییرات شدیدی نمی‌شود. هنگامی که تعادل بستر یک رودخانه در اثر فرآیند ترازگاهی بهم بخورد، تغییرات شگرفی در مشخصات هیدرولیکی و رسوبی رودخانه بوجود می‌آید. در صورتی که جلوی این تغییرات گرفته نشده و یا کنترل نشوند می‌توانند خطرناک باشند. پدیده مسلح شدن به عنوان نتیجه نهایی فرآیند ترازگاهی، قسمت عمده‌ای از مطالعات انتقال رسوب را به خود اختصاص داده است.

این پدیده تابعی از پارامترهای مختلف است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها شامل موارد زیر است:

۱. مشخصات جریان

۲. غلظت رسوبات موجود در جریان

۳. مشخصات رسوبات تشکیل دهنده بستر رودخانه

۴. مشخصات هیدرولیکی و مورفولوژی کانال رودخانه

بررسی این پدیده همواره با فرضیات اساسی زیر صورت گرفته است:

۱. آبی که به بازه مورد بررسی رودخانه وارد می‌شود تقریباً "عاری از رسوب است

۲. ناهمواری‌های بستر رودخانه قابل چشم پوشی است

۳. ویژگی‌های رسوبات در حال فرسایش در بازه مورد بررسی ثابت است

۴. رسوبات عمدتاً "به صورت بار بستر جابه‌جا می‌شوند

تاکنون تلاش‌های زیادی برای شناخت این پدیده، بدست آوردن نرخ ترازگاهی تا رسیدن به بستر مسلح، مقدار ترازگاهی و ترکیبات بستر، شده است. آنچه مسلم است این است که شناخت این پدیده همواره یکی از چالش‌های مهندسی رودخانه بوده است.

در تمامی تحقیقات صورت گرفته، سعی بر آن بوده است که به دو سوال اساسی پاسخ داده شود.

۱. تحت چه شرایطی و با چه مکانیسمی یک لایه مسلح شکل می‌گیرد؟

۲. ویژگی‌های اساسی یک لایه مسلح چیست و آیا می‌توان آن‌ها را پیش‌بینی کرد؟

در این رساله سعی بر این است که جواب‌های مناسبی برای این سوال‌ها پیدا کرد. پاسخ مناسب به این سوالات کمک می‌کند مشخصات این لایه و نرخ ترازگاهی بستر را بدست آورده تا در طراحی سازه‌ها با منظور داشتن این موارد، از حوادث احتمالی ناشی از این پدیده جلوگیری کنیم.



### ۱-۳- شروع فرآیند مسلح شدن

اکثر سیستم های جریان در دراز مدت به حالت شبه تعادل میرسند. در این حالت فرآیندهای رسوبی ترازگاهی و ترازافزایی<sup>۱</sup> تقریباً متوقف شده و اگر هم اتفاق بیافتند به صورت موضعی اتفاق می افتند. هنگامی که تراز بستر جریان تغییر نمی کند، سیستم جریان با دبی رسوبات ورودی به بازه در حالت تعادل است. حالت تعادل سیستم جریان را می توان به صورت کیفی توسط معادله (Jain ۱۹۹۰) توضیح داد.

$$Q_s D_m \alpha Q S_b \quad (1-1)$$

که در آن:

$Q_s$ : دبی مواد رسوبی

$D_m$ : قطر موثر مواد بستر

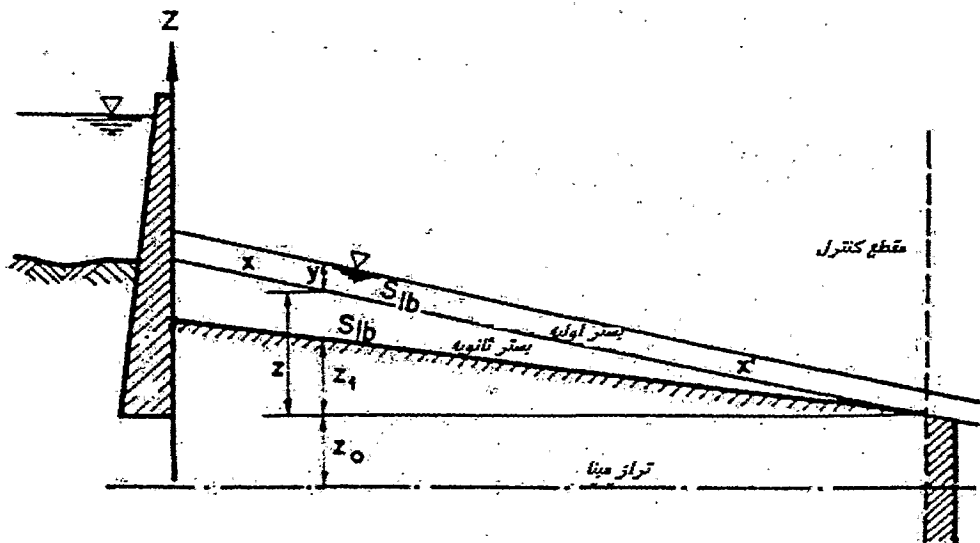
$Q$ : دبی جریان

$S_b$ : شیب جریان

هنگامی که هر یک از پارامترهای رابطه فوق تغییر کنند، یک یا دو پارامتر دیگر خود را به گونه ای تنظیم می کنند که تعادل در سیستم جریان دوباره برقرار گردد. هرگونه عاملی که این تعادل را به هم بزند موجب تغییراتی در تراز سطح بستر می شود. احداث سد و یا مخزن بر روی رودخانه، تغییر در کاربری آبراهها، کانالیزه کردن جریان، برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه و انحراف مسیر جریان عواملی هستند که می توانند این تعادل را تحت تاثیر قرار دهند. احداث یک سد بر روی رودخانه سبب می شود بار رسوبی ورودی به بازه پایین دست سد به شدت کاهش یافته یا به کلی قطع شود. آبی که از مخزن رها می شود تقریباً عاری از رسوب است. سیستم جریان سعی می کند به نحوی کمبود بار بستر را جبران کند. به این ترتیب جریان شروع به فرسایش و ترازگاهی کف و یا کناره های خود می کند. بسته به اینکه مواد بستر یا کنارهها فرسایش پذیرتر باشند، ترازگاهی به صورت عمودی (در بستر) و یا به صورت افقی (در کناره ها) اتفاق می افتد.

۱-Aggradation

در شرایطی که مواد تشکیل دهنده بستر موادی باشند که جریان قابلیت حمل اکثریت دانه‌های آن را داشته باشد و این دانه‌بندی تا عمقی بیشتر از عمق مورد انتظار تراز کاهی وجود داشته باشد، تراز کاهی منجر به کاهش شیب جریان می‌گردد. این حالت را می‌توان تراز کاهی چرخشی<sup>۱</sup> نامید. فرآیند فرسایش تا جایی ادامه می‌یابد که شیب آنقدر کاهش پیدا کند که تنش برشی ناشی از جریان دیگر توانایی شستن ذرات را نداشته باشد. با کاهش شیب، سیستم جریان دوباره به حالت تعادل می‌رسد. این نوع تراز کاهی در جایی که یک نقطه کنترل، مثلاً "یک سد انحرافی در پایین دست بازه تحت تراز کاهی وجود داشته باشد نیز بوجود می‌آید. در این حالت بستر شروع به چرخش حول نقطه کنترل می‌کند (شکل ۱-۱). در این حالت با کاهش تراز سطح بستر دانه بندی آن دچار تغییر چندانی نمی‌شود.

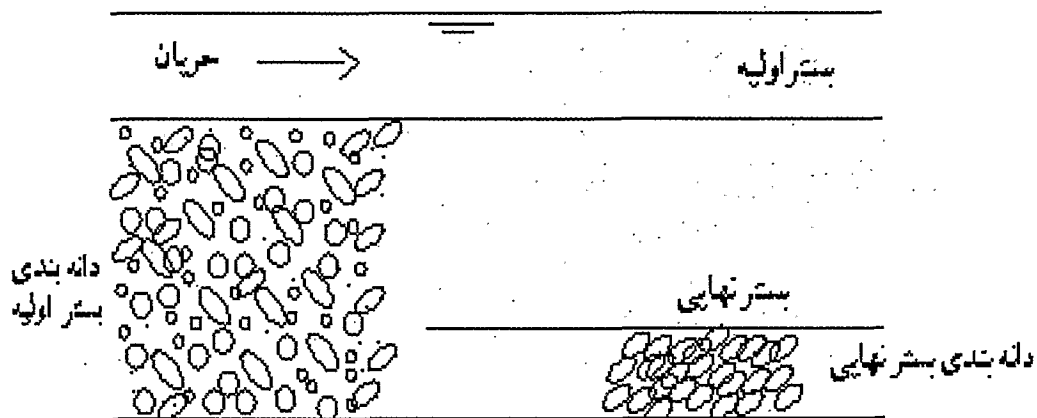


شکل (۱-۱) - تراز کاهی چرخشی پایین دست سد (Bureau of Reclamation Manual, ۱۹۸۴)

در صورتی که مواد بستر اولیه حاوی ذرات درشتی باشد که در شروع روند فرسایش جریان توانایی حمل آنها را نداشته باشد، این ذرات بر روی بستر باقی می‌مانند و ذرات ریزتر به تدریج شسته می‌شوند. در این حالت تراز کاهی در لایه‌های موازی اتفاق می‌افتد و شیب جریان تغییر نمی‌کند. این حالت را می‌توان تراز کاهی موازی<sup>۲</sup> نامید (شکل ۱-۲). با شسته شدن ریزدانه‌ها به تدریج بستر زیر می‌شود. با تجمع مواد غیر قابل انتقال بر روی بستر در نهایت لایه‌ای از مواد زیر روی بستر را می‌پوشاند که وجود آن از ادامه فرسایش جلوگیری می‌کند. لایه‌ی محافظ بوجود آمده روی بستر لایه مسلح است.

۱-Rotational degradation

۲-Parallel Degradation



شکل (۱-۲) - تراز کاهی موازی بستر جریان (Yang, ۱۹۹۶)

آنچه در بستر های طبیعی جریان اتفاق می افتد ترکیبی از دو حالت تراز کاهی موازی و تراز کاهی چرخشی است به نحوی که جداسازی این دو پدیده در طبیعت امکان پذیر نیست. در شروع فرآیند فرسایش تمامی ذرات بستر شروع به حرکت می کنند. این فرسایش منجر به کاهش اولیه شیب جریان می گردد (تراز کاهی چرخشی). در ادامه به علت کاهش شیب و در نتیجه کاهش تنش برشی، فرآیند فرسایش به صورت گزینشی ادامه می یابد (تراز کاهی موازی) تا جایی که بستر به حالت تعادل برسد.

#### ۱-۴- شرایط لازم برای مسلح شدن

تاکنون پیشرفت زیادی در زمینه بیان کمی شرایط لازم برای مسلح شدن بستر نشده است. آنچه که روشن است این است که وجود محدوده مشخصی از دانه ها در بستر، بستر را به سوی مسلح شدن سوق می دهد (Sutherland, ۱۹۸۷).

(Lane and Carlson (۱۹۵۳) با مطالعه کانال های طبیعی در دره San Luis نتیجه گیری کردند که لازم است پارامتر شیلدز بدست آمده با  $D_{75}$  مواد اصلی بستر، کمتر از ۰,۰۵ باشد. (Garde and Hassan (۱۹۶۷)، نشان دادند که با توجه به مقدار  $\sigma_{g0}$ ، انحراف معیار استاندارد مواد بستر اصلی، پارامتر شیلدز را باید با اندازه  $D_{75}$  تا  $D_{100}$  مواد بستر اصلی بدست آورد.

Knoroz(۱۹۷۱) ، شرط  $\frac{D_{95}}{D_5} > 5$  را لازم می داند .

Little and Mayer(۱۹۷۶) ، بر انحراف معیار استاندارد هندسی ذرات موجود در بستر بحث می کنند و نتیجه می گیرند که برای مسلح شدن لازم است این مقدار بیشتر از ۱٫۵ باشد ( $\sigma_{go} > 1.5$ ).

شرایط هیدرولیکی جریان نیز در این پدیده مؤثر است در حالی که در تئوری های فوق این مسئله نادیده گرفته شده است . به صورت واقع بینانه باید گفت فرآیند مسلح شدن وقتی اتفاق می افتد که شرایط جریان اعمالی به گونه ای باشد که نیرویی بیشتر از توان ذرات با کمترین مقاومت و کمتر از توان ذرات با بیشترین مقاومت به بستر اعمال کند. بنابراین مسئله مسلح شدن یک مسئله آستانه حرکت در یک مخلوط رسوبی است (Sutherland, ۱۹۸۷).

Gessler(۱۹۶۷، ۱۹۷۱) تنش برشی بحرانی  $\tau_{cm}$  را برای مخلوط رسوبی تنشی تعریف کرد که در آن تمام ذرات بستر در حال حرکتند.

Gunter(۱۹۷۱) گزارش کرد در حالی که  $\tau > \tau_{cm}$  باشد، تراز گاهی چرخشی بر روی بستر اتفاق می افتد و ترکیب مواد بستر ثابت باقی می ماند. هنگامی که شیب به اندازه کافی کاهش پیدا کرد و تنش به مقدار تنش بحرانی  $\tau_{cm}$  رسید، تراز گاهی موازی در تنش ثابت  $\tau_{cm}$  ادامه می یابد و شروع فرآیند مسلح شدن از اینجا است. Gessler(۱۹۷۱) و Gunter(۱۹۷۱) روابطی بدست آوردند که به کمک آن ها می توان حدس زد، یک بستر در یک شرایط بخصوص جریان در حال مسلح شدن است یا نه. Gessler(۱۹۷۱) پیشنهاد کرد میانگین احتمال باقی ماندن ذرات بر روی بستر را ملاکی برای پایداری بستر بدانیم .

او این میانگین را به صورت زیر تعریف کرد .

$$\bar{q} = \frac{\int_{\min}^{\max} q^2 p_0(D) dD}{\int_{\min}^{\max} q p_0(D) dD} \quad (2-1)$$

که در آن :

$\bar{q}$  : میانگین احتمال باقی ماندن ذره روی بستر

$D$  : سایز ذرات

$q$  : احتمال باقی ماندن ذره بر روی سطح

$p_0(D)$  : تابع توزیع فراوانی سایز ذرات بستر

طبق پیشنهاد Gessler  $\bar{q} = 0.5$  ، نشان دهنده شرایط بحرانی است . برای  $\bar{q} > 0.5$  ، تراز گاهی بدون تغییر در شیب

اتفاق می افتد و برای  $\bar{q} < 0.5$  ، بستر تنها در صورتی پایدار می ماند که شیب کاهش یابد .