

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

## تأثیر پوشش گیاهی بر شکل بستر و طول ناحیه جدایی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی - سازه های آبی

فاضله کبیری

استاد راهنما  
دکتر حسین افضلی مهر



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی کشاورزی - سازه‌های آبی خانم فاضله کیبیری  
تحت عنوان

### تأثیر پوشش گیاهی بر شکل بستر و طول ناحیه جدایی

در تاریخ ۹۳/۱۰/۶ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| دکتر حسین افضل‌ی مهر   | ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه   |
| مهندس اسماعیل لندی     | ۲- استاد مشاور پایان‌نامه     |
| دکتر سید سعید اسلامیان | ۳- استاد داور                 |
| دکتر محمدرضا مصدقی     | ۴- استاد داور                 |
| دکتر محمد مهدی مجیدی   | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

سپاس خدای را که سخنوران، دستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کزاردن  
توانند.

بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزوجل" :  
از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریماز از کنار غفلت هایم  
گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند، و از خواهر و برادرم که مراد این مسیر  
یاری نموده اند سپاسگزارم...

اما از آنجایی که بحلیل از استاد، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می کند و سلامت امانت های را  
که به دست سپرده اند، تضمین؛

از استاد گرامی؛ جناب آقای دکتر افضل مهر که در کمال سع صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ لگی در این عرصه بر من  
دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

از استاد مشاور، جناب آقای مهندس لندی، که زحمت مشاوره این پایان نامه را متقبل شدند؛  
و از اساتید داور؛ جناب آقایان دکتر اسلامیان و دکتر مصدقی که زحمت داوری این پایان نامه را به عهده گرفته اند؛ کمال  
تشکر و قدردانی را دارم...

از آقایان عشقی و علیشاهی که از بیچ لگی در امور آزمایشگاه و تاسیسات آن دریغ نمودند تشکر کنم...  
همچنین از تمامی دوستان عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین  
پشتیان هستند صمیمانه سپاسگزارم...

و برای همگان از خداوند منان سلامتی، شادی، موفقیت و دلی خوش خواستارم...

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از پژوهش موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان  
است.

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

تقدیم به

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم

پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

مادر مهربانم که زندگیم را بدیون مهر و عطوفت آن می دانم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار خشکیتان را بزداید.

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان...

تقدیم به خواهر و برادرم، همراهان، همیشگی و پشتوانه های زندگیم...

و همه کسانی که بجزای بعد انسانی و وجدانی خود را فراموش نمی کنند و بر آستان گران سنگ انسانیت سرفرودمی آورند و انسان را با

همه تفاوت هایش ارج می نهند

به استادان فرزانه و فریخته ای که در راه کسب علم و معرفت مریاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش را بنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه می راهم بود.

الهی به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ای آنان جامه می گل پوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

## فهرست مطالب

| صفحه                                | عنوان                                      |
|-------------------------------------|--|
| هشت                                 | فهرست مطالب                                |
| ۵۵                                  | فهرست اشکال                                |
| <b>فصل اول: مقدمه و بررسی منابع</b> |  |
| ۲                                   | ۱-۱- مقدمه                                 |
| ۴                                   | ۲-۱- شکل بستر                              |
| ۴                                   | ۱-۲-۱- مقدمه                               |
| ۵                                   | ۱-۲-۱- حمل رسوبات آبرفتی                   |
| ۶                                   | ۳-۲-۱- انواع اشکال بستر                    |
| ۸                                   | ۴-۲-۱- شکل گیری، ساختار و مهاجرت تلماسه‌ها |
| ۱۰                                  | ۵-۲-۱- ابعاد تلماسه‌ها                     |
| ۱۲                                  | ۶-۲-۱- بررسی صحت مطالعات آزمایشگاهی        |
| ۱۲                                  | ۷-۲-۱- مروری بر انواع تلماسه‌ها            |
| ۱۴                                  | ۸-۲-۱- ساختار جریان بر روی تلماسه          |
| ۲۲                                  | ۹-۲-۱- فرآیند حمل رسوب بر تلماسه‌ها        |
| ۲۳                                  | ۱۰-۲-۱- مروری بر منابع                     |
| ۳۰                                  | ۳-۱- پوشش گیاهی                            |
| ۳۰                                  | ۱-۳-۱- مقدمه                               |
| ۳۱                                  | ۲-۳-۱- ساختار جریان در حضور پوشش گیاهی     |
| ۳۲                                  | ۳-۳-۱- مروری بر منابع                      |
| ۳۷                                  | ۴-۱- ضرورت انجام پژوهش                     |
| <b>فصل دوم: مواد و روش‌ها</b>       |  |
| ۳۸                                  | ۱-۲- مقدمه                                 |
| ۳۸                                  | ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی                    |
| ۳۸                                  | ۱-۲-۲- فلوم آزمایشگاهی                     |
| ۳۹                                  | ۲-۲-۲- دستگاه ADV                          |
| ۴۱                                  | ۳-۲- مواد مورد استفاده                     |
| ۴۱                                  | ۱-۳-۲- شن                                  |
| ۴۱                                  | ۲-۳-۲- پوشش گیاهی                          |
| ۴۲                                  | ۴-۲- چگونگی انجام آزمایش                   |
| ۴۲                                  | ۱-۴-۲- انتخاب ابعاد بستر                   |

|    |  |
|----|--|
| ۴۳ | ..... ۲-۴-۲- آزمایش‌های سری اول                |
| ۴۳ | ..... ۳-۴-۲- آزمایش‌های سری دوم                |
| ۴۴ | ..... ۴-۴-۲- آزمایش‌های سری سوم                |
| ۴۴ | ..... ۵-۴-۲- آزمایش‌های سری چهارم              |
| ۴۴ | ..... ۶-۴-۲- مطالعات صحرایی                    |
| ۴۵ | ..... ۷-۴-۲- اندازه‌گیری‌های نیم‌رخ‌های سرعت   |
| ۴۵ | ..... ۵-۲- اصول حاکم بر جریان آشفته            |
| ۴۸ | ..... ۱-۵-۲- جریان یکنواخت                     |
| ۵۴ | ..... ۲-۵-۲- جریان غیریکنواخت                  |
| ۵۶ | ..... ۳-۵-۲- سرعت متوسط                        |
| ۵۸ | ..... ۶-۲- آنالیز کوادرات                      |
| ۶۳ | ..... ۷-۲- تحلیل طیفی داده‌ها                  |
| ۶۵ | ..... ۸-۲- ناپایداری کلون-هلمهولتز             |
| ۶۵ | ..... ۱-۸-۲- مقدمات تئوری پایداری              |
| ۶۷ | ..... ۲-۸-۲- قاعده کلی ناپایداری کلون-هلمهولتز |

### فصل سوم: نتایج و بحث

|    |  |
|----|--|
| ۷۴ | ..... ۱-۳- مقدمه                           |
| ۷۴ | ..... ۲-۳- فیلتر کردن داده‌ها              |
| ۷۶ | ..... ۳-۳- بررسی قانون کلموگراف            |
| ۷۷ | ..... ۴-۳- نتایج آزمایش                    |
| ۷۷ | ..... ۱-۴-۳- ناحیه ناپایداری کلون-هلمهولتز |
| ۷۸ | ..... ۲-۴-۳- تعیین سرعت برشی و ضریب زبری   |
| ۸۲ | ..... ۳-۴-۳- توزیع سرعت                    |
| ۸۸ | ..... ۴-۴-۳- توزیع آشفتگی                  |
| ۹۲ | ..... ۵-۴-۳- توزیع تنش رینولدز             |
| ۹۵ | ..... ۶-۴-۳- آنالیز کوادرات                |

### فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| ۱۰۰ | ..... ۱-۴- مقدمه          |
| ۱۰۰ | ..... ۲-۴- جمع‌بندی نتایج |
| ۱۰۲ | ..... ۳-۴- پیشنهادات      |
| ۱۰۴ | ..... مراجع               |



## فهرست اشکال

| عنوان  | صفحه |
|--|------|
| شکل ۱-۱- مدل مفهومی از تقابل پیچیده فرآیندهای مختلف در کانال‌های آبرفتی.....               | ۵    |
| شکل ۲-۱- طبقه‌بندی شکل‌های بستر بر اساس تحلیل پایداری با داده‌های آزمایشگاهی.....          | ۶    |
| شکل ۳-۱- نمودار ارائه شده جهت تعیین شکل‌های بستر بر پایه قدرت جریان و قطر متوسط سقوط.....  | ۷    |
| شکل ۴-۱- نمودار مراحل مختلف شکل بستر از طریق سرعت متوسط جریان.....                         | ۷    |
| شکل ۵-۱- نمای شماتیکی از تلماسه و مشخصات آن.....   | ۹    |
| شکل ۶-۱- ابعاد تلماسه مطابق با ون‌راین.....  | ۱۱   |
| شکل ۷-۱- مقایسه ارتفاع تلماسه‌های محاسبه شده.....  | ۱۱   |
| شکل ۸-۱- نمای شماتیکی از ساختار لایه مرزی بر روی تلماسه.....                               | ۱۴   |
| شکل ۹-۱- شماتیکی از مناطق اصلی جریان بر روی تلماسه‌های نامتقارن.....                       | ۱۵   |
| شکل ۱۰-۱- توزیع فرضی از تنش برشی و فشار روی تلماسه.....                                    | ۱۷   |
| شکل ۱۱-۱- طیف آشفتگی، در بر گیرنده ۳ محدوده مولد، لختی و لزجت.....                         | ۱۹   |
| شکل ۱۲-۱- تولید کلک و بویل در وجه پایین دست تلماسه.....                                    | ۲۰   |
| شکل ۱۳-۱- نمایی از انفجار لایه مرزی.....   | ۲۱   |
| شکل ۱۴-۱- جریان مشاهده شده بر تلماسه در نتیجه واضح‌سازی جریان.....                         | ۲۲   |
| شکل ۱۵-۱- نیم‌رخ‌های سرعت در راستای جریان (آزمایش دلف).....                                | ۲۴   |
| شکل ۱۶-۱- نیم‌رخ‌های تنش برشی در طول تلماسه (آزمایش دلف).....                              | ۲۴   |
| شکل ۱-۲- نمایی از کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش.....                          | ۳۹   |
| شکل ۲-۲- نحوه عملکرد سرعت‌سنج صوتی ADV.....  | ۴۰   |
| شکل ۳-۲- پوشش گیاهی در رودخانه و آزمایشگاه.....  | ۴۲   |
| شکل ۴-۲- نمایی از ابعاد شکل بستر در این پژوهش.....   | ۴۳   |
| شکل ۵-۲- نمایی از سری اول آزمایش.....  | ۴۳   |
| شکل ۶-۲- نمایی از سری دوم آزمایش.....  | ۴۳   |
| شکل ۷-۲- نمایی از سری سوم آزمایش.....  | ۴۴   |
| شکل ۸-۲- نمایی از سری چهارم آزمایش.....  | ۴۴   |
| شکل ۹-۲- نمایی از آزمایش صحرائی.....   | ۴۴   |
| شکل ۱۰-۲- روش کلازر در تعیین سرعت برشی.....  | ۴۹   |
| شکل ۱۱-۲- توزیع شدت آشفتگی در جریان کندشونده (سمت چپ) و جریان تند شونده (سمت راست).....    | ۵۵   |
| شکل ۱۲-۲- توزیع تنش رینولدز در جریان کندشونده (سمت راست) و در جریان تندشونده (سمت چپ)..... | ۵۶   |
| شکل ۱۳-۲- چهار نوع واقعه فرآیند شبه‌نوسانی و ویژگی‌های نوسانات سرعت.....                   | ۵۹   |
| شکل ۱۴-۲- ناحیه Hole.....  | ۶۰   |

- شکل ۲-۱۵- چگالی طیفی در جریان آشفته (مقیاس‌ها لگاریتمی می‌باشند)..... ۶۳
- شکل ۲-۱۶- طیف انرژی رسم شده و شیب‌های موجود در هر زیرلایه..... ۶۴
- شکل ۲-۱۷- سه ناحیه طیف انرژی..... ۶۵
- شکل ۲-۱۸- اثر ناپایداری کلونین-هلمهولتز در تشکیل ابر..... ۶۷
- شکل ۲-۱۹- اتصال ورتکس سه بعدی در ناپایداری کلونین-هلمهولتز..... ۶۸
- شکل ۲-۲۰- توسعه ناپایداری کلونین-هلمهولتز از یک آشفتهگی موجی شکل با شماره موج  $K$  در حد فاصل بین دو ناحیه عمودی..... ۶۸
- شکل ۲-۲۱- نمایش نیم‌رخ‌های سرعت؛ (a) جریان در لوله، (b) جریان لایه مرزی، (c) جریان در ناحیه برخاستگی و (d) جریان جت که همگی جریان برشی هستند..... ۶۹
- شکل ۲-۲۲- مثالی از ناپایداری کلونین-هلمهولتز..... ۶۹
- شکل ۲-۲۳- دیاگرام شماتیک ناپایداری کلونین-هلمهولتز..... ۶۹
- شکل ۲-۲۴- چیدمان جریان چند لایه..... ۷۰
- شکل ۲-۲۵- ناحیه ناپایداری کلونین-هلمهولتز..... ۷۰
- شکل ۲-۲۶- دیاگرام شماتیک ویژگی‌های ورتکس در جریان با پوشش گیاهی..... ۷۱
- شکل ۲-۲۷- قرارگیری سه مقیاس طولی درون زیرلایه پوشش گیاهی..... ۷۱
- شکل ۲-۲۸- جریان درون و بالای پوشش گیاهی مستغرق با ارتفاع  $h$  و عمق آب  $H$ ..... ۷۲
- شکل ۳-۱- سری زمانی داده‌های (الف) خام و (ب) فیلتر شده..... ۷۵
- شکل ۳-۲- بررسی اعتبار قانون کلموگراف؛ (الف) شکل بستر بدون پوشش گیاهی در پایین دست، (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی در پایین دست، (ج) بستر مسطح بدون پوشش گیاهی، (د) بستر مسطح با پوشش گیاهی..... ۷۶
- شکل ۳-۳- نیم‌رخ‌های سرعت بر روی یک شکل بستر؛ (الف) شکل بستر شنی، (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۷۷
- شکل ۳-۴- نیم‌رخ‌های سرعت بر روی شکل بستر با پوشش گیاهی در طبیعت (رودخانه)..... ۷۷
- شکل ۳-۵- ناحیه ناپایداری کلونین-هلمهولتز..... ۷۸
- شکل ۳-۶- نیم‌رخ‌های سرعت به روش میانگین‌گیری دوگانه؛ (الف) بستر تخت، (ب) شکل بستر، (ج) مطالعه صحرائی..... ۸۰
- شکل ۳-۷- نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت در راستای جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۵
- شکل ۳-۸- نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت در راستای عرضی جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۵
- شکل ۳-۹- نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت در راستای عمود بر جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۵
- شکل ۳-۱۰- نیم‌رخ‌های بی‌بعد سرعت جریان در آزمایش صحرائی..... ۸۶
- شکل ۳-۱۱- منحنی‌های هم‌سرعت در راستای جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۸۶
- شکل ۳-۱۲- منحنی‌های هم‌سرعت در راستای عرضی جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۸۷
- شکل ۳-۱۳- منحنی‌های هم‌سرعت در راستای عمود بر جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۸۷
- شکل ۳-۱۴- نیم‌رخ‌های بی‌بعد نوسانات سرعت در راستای جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۹
- شکل ۳-۱۵- نیم‌رخ‌های بی‌بعد نوسانات سرعت در راستای عرضی جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۹
- شکل ۳-۱۶- نیم‌رخ‌های بی‌بعد نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان در کانال آزمایشگاهی..... ۸۹
- شکل ۳-۱۷- نیم‌رخ‌های بی‌بعد نوسانات سرعت جریان در آزمایش صحرائی..... ۹۰

- شکل ۳-۱۸- منحنی‌های نوسانات سرعت در راستای جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی.... ۹۰
- شکل ۳-۱۹- منحنی‌های نوسانات سرعت در راستای عرضی جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۹۱
- شکل ۳-۲۰- منحنی‌های نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۹۱
- شکل ۳-۲۱- نیم‌رخ‌های بی‌بعد تنش رینولدز در کانال آزمایشگاهی..... ۹۳
- شکل ۳-۲۲- نیم‌رخ‌های بی‌بعد نوسانات سرعت جریان در آزمایش صحرائی..... ۹۴
- شکل ۳-۲۳- منحنی‌های تنش رینولدز؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۹۴
- شکل ۳-۲۴- پیشامدهای غالب در فرآیند شبه‌نوسانی در شکل بستر شنی و با پوشش گیاهی..... ۹۶
- شکل ۳-۲۵- پیشامدهای غالب در فرآیند شبه‌نوسانی در بستر تخت شنی و با پوشش گیاهی..... ۹۷
- شکل ۳-۲۶- نمونه‌ای از خروجی آنالیز کوادرنانت در فاصله ۶۰ میلی‌متری از پایین دست شکل بستر؛ (الف) شکل بستر شنی و (ب) شکل بستر با پوشش گیاهی..... ۹۸

## چکیده

اشکال شکل بستر و پوشش گیاهی روی بستر تاثیر بسزایی بر ساختار جریان در مجاری طبیعی و رودخانه‌ها دارند. هر چند تاثیر پوشش گیاهی روی بستر بر ساختار جریان در برخی عوامل رودخانه‌ها از جمله شکل‌های بستر هنوز روشن نیست. هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر پوشش گیاهی بر شکل بستر و طول ناحیه جدایی، تعیین چگونگی توزیع مولفه های سرعت، آشفتگی و تنش رینولدز به همراه طیف انرژی کلموگراف و پدیده های غالب در فرآیند شبه‌نوسانی در کانال با شکل بستر تلماسه و پوشش گیاهی روی آن و مطالعه ناپایداری کلونین - هلمهولتز در تعامل جریان و پوشش گیاهی بستر می‌باشد. آزمایش‌ها در کانالی با ابعادی به طول ۷ متر، عرض ۳۲ سانتی متر و عمق ۳۶ سانتی متر با حداکثر دبی ۱۸ لیتر بر ثانیه و دارای سطح مقطعی به شکل مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. در این پژوهش از شن با قطر میانه ذرات ۱۰ میلی متر برای ساخت تلماسه‌های شنی استفاده شد. پوشش گیاهی مورد استفاده روی شکل بستر چمن با ارتفاع حدود ۳ سانتی متر بوده و به صورت گسترده روی تمام شکل بسترها قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV انجام شد. آزمایش در ۴ مرحله به صورت شکل بستر شنی، شکل بستر با پوشش گیاهی، بستر تخت شنی و بستر تخت با پوشش گیاهی و همچنین یک مرحله مطالعه صحرایی در رودخانه کاج انجام شد. نتایج نشان داد که طول ناحیه جدایی در شکل بستر با پوشش گیاهی بیشتر از شنی است و جدایی جریان در شکل بستر با پوشش گیاهی در آزمایشگاه و مطالعات صحرایی به وضوح دیده می‌شود. نقاط عطف نیم‌رخ‌های سرعت به بالای تاج پوشش گیاهی متمایل شده است و در سایر نواحی شکل بستر، این ناپایداری درون پوشش گیاهی وجود دارد و نیم‌رخ‌های سرعت دارای یک نقطه عطف هستند. در واقع در ناحیه اتصال مجدد، جدایی جریان باعث ایجاد لایه برشی با ناپایداری کلونین-هلمهولتز و افزایش آشفتگی در طول لایه برشی می‌شود. شکل بستر در هر دو حالت باعث افزایش ضریب زبری شد. موقعیت مقدار حداکثر سرعت RMS در هر دو شکل بستر با موقعیت اندازه‌گیری در امتداد شکل بستر تغییر می‌کند به طوری که حداکثر مقدار  $RMS(u')$ ،  $RMS(v')$  و  $RMS(w')$  در تاج یا پایین دست رخ می‌دهد که در آنجا آشفتگی زیاد است. در شکل بستر با پوشش گیاهی حداکثر تنش در بالادست تاج بستر و در شکل بستر شنی حداکثر تنش در پایین دست تاج شکل بستر رخ می‌دهد. مقدار منفی تنش رینولدز در پوشش گیاهی مشاهده شد، در حالی که تنش برشی منفی بر روی شکل بستر شنی مشاهده نگردید. در شکل بستر با پوشش گیاهی، درون پوشش رخداد جرقه و بالای پوشش رخداد جاروب غالب است.

**واژه‌های کلیدی:** شکل بستر، پوشش گیاهی بستر، ساختار جریان، ناپایداری کلونین - هلمهولتز، جدایی جریان، آنالیز کوادرنانت

## فصل اول

### مقدمه و بررسی منابع

#### ۱-۱- مقدمه

رودخانه‌ها از منابع اصلی توسعه در جوامع بشری محسوب می‌شوند و حفاظت و بهره‌برداری بهینه و همچنین حراست از بستر و حریم آن‌ها از مهم‌ترین مسئولیت‌های انسان می‌باشد. استفاده بهینه از رودخانه‌ها به لحاظ اهمیتی که این منابع در برآورد نیازهای بشر، از دیرباز تاکنون داشته‌اند از انگیزه‌های مهم به وجود آمدن شاخه دیگری از مهندسی آب به نام مهندسی رودخانه بوده است. مهندسی رودخانه علمی است که در مورد کلیه مراحل مطالعه و برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا و بهره‌برداری جهت بهبود و یا تغییر وضعیت موجود یک رودخانه به منظور برآورد نیازهای عمرانی بحث می‌کند.

کلیه رودخانه‌ها در معرض تغییر و تحول قرار دارند و کارهای مهندسی رودخانه برای تغییر بده، مطالعه بده رسوبی، مسیر رودخانه، عمق آبراهه، پهنه سیل‌گیر و کیفیت آب، مورد نیاز می‌باشد. از جمله مباحث مهم در مهندسی رودخانه شناخت شکل رودخانه، تثبیت سواحل و بستر رودخانه، کانالیزه کردن و کنترل سیلاب است. شناختن شکل و ساختمان رودخانه، مورفولوژی رودخانه نامیده می‌شود. به کمک مورفولوژی رودخانه می‌توان اطلاعاتی از شکل هندسی آبراهه، شکل بستر و نیم‌رخ طولی رودخانه به دست آورد.

اندازه، حجم و دینامیک انتقال رسوب، کنترل قابل توجهی بر شکل‌گیری مقطع یک رودخانه دارد. این مسئله به نوبه خود سبب ایجاد و تحکیم زیستگاه گیاهان و جانوران آبرزی در سیستم رودخانه می‌گردد. در واقع اندازه رسوب، نوع رودخانه (شنی، قلوه سنگی یا ریزدانه) را از دیدگاه مورفودینامیک تعیین می‌کند و ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی هر رودخانه، تعیین‌کننده زیستگاه مناسب برای انواع جانداران آبرزی است.

زیستگاه‌های طبیعی در رودخانه‌ها از طریق برآمدگی‌ها<sup>۱</sup> و فرورفتگی‌های<sup>۲</sup> کف ایجاد و توسعه می‌یابند. در این بین پوشش گیاهی اثر بسیاری بر کمیّت، کیفیت و انتقال رسوب در آن‌ها دارد. در واقع برهم‌کنش رسوب، جریان و پوشش گیاهی عامل تعیین‌کننده در مورفودینامیک رودخانه‌ها است. پوشش گیاهی یک عامل کنترل‌کننده برای برهم‌کنش جریان، فرسایش و ژئومورفولوژی رودخانه‌ها می‌باشد و عدم در نظر گرفتن آن مشکلاتی را در طراحی هیدرولیکی ایجاد می‌نماید [۷۳].

توسعه شکل بستر در کانال‌های طبیعی و رودخانه‌ها می‌تواند موجب افزایش مقاومت جریان، زبری بستر و کاهش انتقال مؤثر دبی به پایین دست کانال باشد [۷۶، ۱۴۵، ۱۵۹]. شکل بستر رودخانه‌ها تابعی از ژئولوژی منطقه، مشخصات رسوبات حمل شده از بالادست، دبی عبوری و نیروهای هیدرودینامیک در رودخانه می‌باشد [۲۰۵]. نوع شکل بستر اساساً به اندازه قطر ذرات رسوب بستگی دارد. شکل‌های بستر با استفاده از مفاهیم هیدرودینامیکی تحت شرایط مشخصی از جریان طبقه‌بندی شده‌اند [۳۳، ۷۹]. این طبقه‌بندی تعیین‌کننده موقعیتی است که در آن آشفتگی اولیه در بستر شروع به رشد کرده، امادانسته‌هایی در رابطه با ابعاد بستر ارائه نمی‌دهد. منطقی‌ترین طبقه‌بندی اشکال بستر بر پایه تجزیه و تحلیل‌های انجام گرفته برای اشکال بستری است که در آزمایشگاه و یا در طبیعت (رودخانه‌ها) دیده شده‌اند [۱۹۵]. تقریباً همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، شکل‌های مختلف بستر شروع به شکل‌گیری می‌کنند. از رایج‌ترین شرایط مرزی در رودخانه‌های آبرفتی، بسترهای متحرک پوشیده از شکنج‌ها<sup>۳</sup> و تلماسه‌ها<sup>۴</sup> می‌باشد.

تلماسه‌ها در محدوده وسیعی، از ذرات بسیار ریزدانه و ذرات درشت ماسه [۱۶، ۴۴، ۶۳، ۱۴۷، ۲۰۲] تا ذرات درشت‌تر شن [۴۵، ۶۸] می‌توانند شکل بگیرند. تلماسه‌ها با ایجاد جدایی جریان، تولید جریان تند-شونده و کندشونده و تولید میدان‌های جریانی کاملاً متفاوت با جریان یکنواخت بر روی بستر هموار، جریان

<sup>۱</sup>-Riffles

<sup>۲</sup>-Pools

<sup>۳</sup>-Ripples

<sup>۴</sup>-Dunes

را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در بیشتر مطالعات مربوط به تلماسه‌ها، برای طبقه‌بندی شکل‌های پایدار از نظریه‌های تجربی براساس اندازه ذرات، قدرت جریان، سرعت و یا عمق جریان استفاده شده است [۱۷]، [۱۶۸].

به دلیل اهمیت شکل‌های بستر نظیر تلماسه‌ها در کنترل میزان انتقال رسوب، تولید آشفستگی و ایجاد مقاومت جریان، ضرورت مطالعه جزئیات برهم‌کنش پوشش گیاهی، شکل‌های بستر و ساختار جریان بیش از پیش مطرح می‌گردد. اگرچه در پژوهش‌های قابل توجهی در گذشته تأثیر پوشش گیاهی بر جریان بررسی شده است، تاکنون در زمینه اثر برهم‌کنش شکل‌های بستر با پوشش گیاهی در کف، بر توزیع سرعت جریان و توزیع تنش‌های رینولدز مطالعه‌ای در مراجع مهندسی رودخانه و هیدرولیک انجام نگرفته است. با توجه به اهمیتی که این برهم‌کنش در پایداری شکل‌های بستر دارد، ضرورت انجام این پژوهش مشخص می‌گردد. به طور خلاصه پژوهش حاضر اهداف زیر را دنبال می‌کند:

۱. تعیین چگونگی توزیع مولفه‌های آشفستگی به همراه طیف انرژی کلموگراف و پدیده‌های غالب در فرآیند شبه‌نوسانی<sup>۱</sup> در کانال با شکل بستر تلماسه و پوشش گیاهی روی آن و مقایسه با بستر تخت و تلماسه شنی
۲. مطالعه ناپایداری کلونین - هلمهولتز<sup>۲</sup> در تعامل جریان و پوشش گیاهی بستر
۳. بررسی تأثیر پوشش گیاهی بستر بر طول ناحیه جدایی جریان و اتصال مجدد<sup>۳</sup>

## ۲-۱- شکل بستر

### ۱-۲-۱- مقدمه

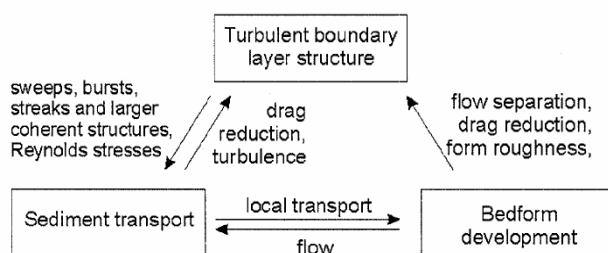
در بیشتر محیط‌های رسوبی، شروع و ادامه‌دار بودن حمل رسوب برای تولید شکل‌های بستر، همراه با سلسله روابط پیچیده‌ای مطابق با شکل ۱-۱ می‌باشد. در واقع تنش‌های رینولدز لحظه‌ای و نیروهای بالابرد<sup>۴</sup> موجب آغاز حمل رسوب می‌شوند، در ادامه زبری ذره و توسعه شکل بستر تأثیری بسزا بر ساختار جریان آشفته وارد می‌کند. مولر و گیر (۱۹۹۶) چرخه مشابهی شامل تقابل بین جریان، شکل بستر و حمل رسوب ارائه دادند [۱۲۷].

<sup>۱</sup>-Bursting

<sup>۲</sup>-Kelvin-Helmholtz

<sup>۳</sup>-Reattachment

<sup>۴</sup>-Lift forces



شکل ۱-۱- مدل مفهومی از تقابل پیچیده فرآیندهای مختلف در کانال‌های آبرفتی [۲۵، ۱۰۰]

بررسی‌های اولیه بر جزئیات ارتباط بین جریان و مورفولوژی بستر تأکید کرده است که تمام مراحل تا شکل‌گیری تلماسه را رژیم جریان تحتانی<sup>۱</sup> نامگذاری کنند [۶۳، ۱۶۷، ۱۶۹]. این رژیم معمولاً توسط حمل ذرات بستر کوچک به وجود می‌آید. رژیم جریان تحتانی شامل توالی بستر هموار<sup>۲</sup>، شکنج، تلماسه، با افزایش در مقاومت جریان می‌باشد. رژیم جریان فوقانی<sup>۳</sup> با تولید مجدد بستر هموار که ناشی از شسته شدن شکل‌های بستر در رژیم تحتانی می‌باشد، آغاز می‌گردد. از مشخصه‌های این رژیم، حمل ذرات نسبتاً بزرگ رسوب است. این رژیم شامل بستر هموار با حرکت رسوب، موج‌های ایستای<sup>۴</sup>، پاد تلماسه‌های موج شکسته<sup>۵</sup> و در نهایت با تنداب‌ها و گرداب‌ها<sup>۶</sup> همراه می‌شوند [۱۶۸]. منطقه جریان بینابینی<sup>۷</sup> دامنه شکل‌های بستر از تلماسه‌ها تا بسترهای هموار یا پاد تلماسه‌ها را شامل می‌گردد.

#### ۱-۲-۲- حمل رسوبات آبرفتی

به طور کلی، حمل رسوب فرآیندی است که در آن ذرات رسوب به صورت افقی از مکانی به مکان دیگر برده می‌شوند [۱۴]. رسوبات می‌توانند توسط چهار فرآیند تعلیق<sup>۸</sup>، لغزش<sup>۹</sup>، غلتش<sup>۱۰</sup> و جهش<sup>۱۱</sup> حرکت کنند. حمل رسوب در رودخانه‌های آبرفتی می‌تواند به صورت بار شسته شده<sup>۱۲</sup> یا بار مواد بستر<sup>۱۳</sup> باشد. بار مواد بستر به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- بار بستر<sup>۱۴</sup> ۲- بار معلق<sup>۱۵</sup>.

<sup>۱</sup>-Lower flow regime

<sup>۲</sup>-Plane bed

<sup>۳</sup>-Upper flow regime

<sup>۴</sup>-Standing waves

<sup>۵</sup>-Antidunes breaking wave

<sup>۶</sup>-Chutes and pools

<sup>۷</sup>-Transition zone

<sup>۸</sup>-Suspension

<sup>۹</sup>-Sliding

<sup>۱۰</sup>-Rolling

<sup>۱۱</sup>-Saltation

<sup>۱۲</sup>-Wash load

<sup>۱۳</sup>-Bed material load

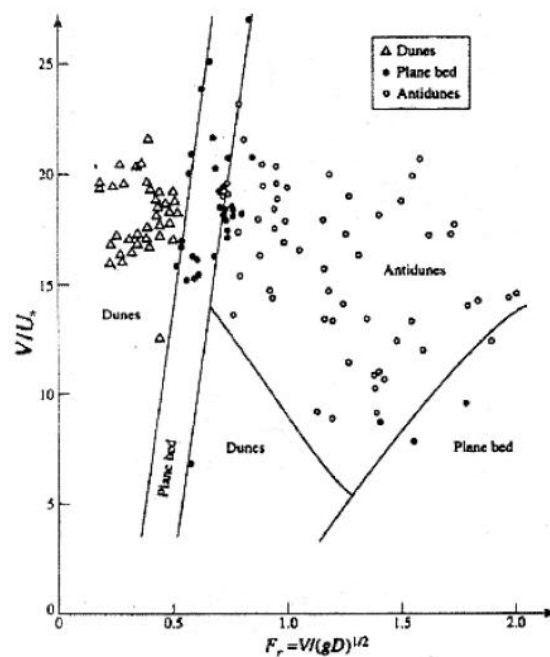
<sup>۱۴</sup>-Bed load

<sup>۱۵</sup>-Suspended load



### ۱-۲-۳- انواع اشکال بستر

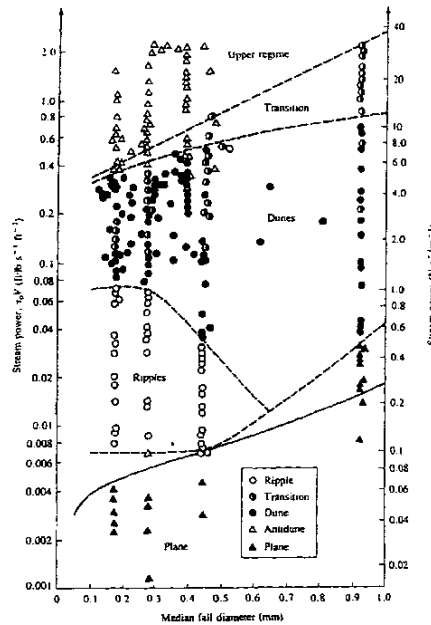
به طور کلی به تمام نوسانات بستر، بدون توجه به شکل و اندازه آن‌ها شکل‌های بستر<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۱۶۴]. به صورت کلی، شکنج‌ها به عنوان شکل‌های بستر کوچک مقیاس ( $<0.1\text{m}$  ارتفاع و  $<0.5\text{m}$  طول موج) که با عمق جریان رابطه ندارند، پذیرفته شده‌اند [۸۹]. عناوین تلماسه، شکنج‌های خیلی بزرگ<sup>۲</sup> و امواج شنی<sup>۳</sup> برای توضیح شکل‌های بستر بزرگ‌تر که با عمق جریان در ارتباط هستند، به کار می‌رود. با وجود این عناوین‌های مختلف، اشلی (۱۹۹۰) پیشنهاد عنوان تلماسه را برای این سری شکل‌ها داد [۱۹]. ون‌راین (۱۹۸۴) بیان کرد که اندازه شکل‌های بستر توسط انتقال بار رسوب کنترل می‌شود، در حالی که دانشمندانی نظیر اسمیت و مک‌لین (۱۹۷۷)، کاستاچوک و ویلارد (۱۹۶۶)، رسوبات معلق را عامل مهم در اندازه ابعاد شکل‌های بستر معرفی کردند [۸۹، ۱۷۱، ۱۹۱]. انگلوند و هانسن (۱۹۶۶) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، پایداری شکل‌های بستر را بر پایه مجموعه معینی از شرایط هیدرولیکی مانند عدد فرود ( $F_r$ )، سرعت متوسط جریان ( $V$ ) و سرعت برشی ( $U_*$ )، مورد مطالعه قرار دادند [۵۱]. شکل ۱-۲ طبقه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- طبقه‌بندی شکل‌های بستر بر اساس تحلیل پایداری با داده‌های آزمایشگاهی [۵۱]

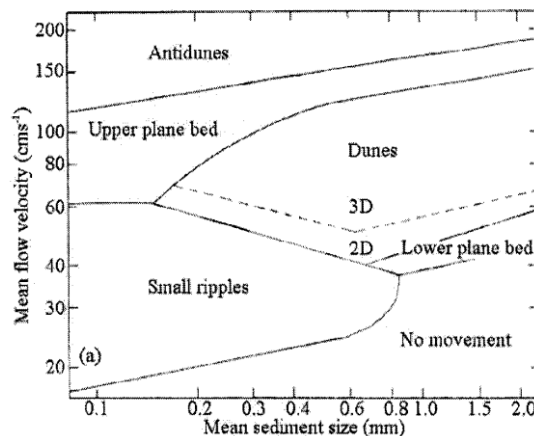
<sup>۱</sup>-Bed forms  
<sup>۲</sup>-Mega ripples  
<sup>۳</sup>-Sand waves

سایمونز و ریچاردسون (۱۹۶۶) توان جریان ( $\tau V$ ) را در برابر قطر میانه سقوط دانه‌های رسوب برای داده‌های فلوم آزمایشگاهی و تعدادی کانال، مطابق با شکل ۳-۱ ترسیم نمودند [۱۶۸]. از این شکل می‌توان برای تعیین شکل‌های بستر در فلوم‌های آزمایشگاهی و آبراهه‌های کوچک استفاده کرد.



شکل ۳-۱- نمودار ارائه شده جهت تعیین شکل‌های بستر بر پایه قدرت جریان و قطر متوسط سقوط [۱۶۸]

هارمز و همکاران (۱۹۸۲)، تلماسه‌های دو بعدی را در مقایسه با تلماسه‌های سه بعدی در شرایط محدودکننده مرزی از طریق سرعت متوسط جریان نشان دادند و تمایز میان تلماسه‌های دو بعدی و سه بعدی را بر پایه سرعت جریان دانستند که کاملاً درست نمی‌باشد. چراکه احتمالاً مقدار رسوبات معلق که از طریق تنش برشی به سرعت مرتبط می‌شوند، نقش بیشتر و مهم‌تری در انتقال تلماسه از دو بعدی به سه بعدی بازی می‌کند (شکل ۴-۱) [۶۴].



شکل ۴-۱- نمودار مراحل مختلف شکل بستر از طریق سرعت متوسط جریان [۶۴]

در سرعت‌های به اندازه کافی کوچک مانند سرعت‌های پایین‌تر از آستانه حرکت، ذرات رسوب در بستر مسطح، در برابر قدرت جریان مقاومت کرده و در همان موقعیت باقی می‌مانند. با افزایش سرعت جریان، هنگامی که نیروی بالابر و کششی<sup>۱</sup> از وزن مستغرق ذره و دیگر نیروهای مقاومت در بستر افزایش یابند، آستانه حرکت به وجود می‌آید. در مطالعات پیشین [۱۶۶]، آغاز حمل رسوب بر پایه نسبت تنش برشی بحرانی بستر و وزن مستغرق یک لایه از ذرات بستر تعیین می‌گردد. مطالعات چند دهه اخیر نشان داده است، حرکت آهسته رسوبات ممکن است در ارتباط با پدیده‌های تصادفی چون حرکات ورقه‌ای<sup>۲</sup>، جرقه<sup>۳</sup> و جاروب<sup>۴</sup> در لایه مرزی، که توسط فرآیند شبه‌نوسانی (انهدام)<sup>۵</sup> در تمام جریانات آشفته حاضر است، به وجود آید [۶۲]. مطالعات نشان می‌دهد که برخوردهای زیاد حرکات جارویی بر بستر، که سبب تجمع کوچک رسوبات (معروف به نوسانات بستر) می‌شود، خود عامل تولید جدایی جریان می‌باشد. جدایی جریان بر روی نوسانات بستر سبب تولید تنش برشی لحظه‌ای بالا در نقطه پیوست مجدد<sup>۶</sup> در پایین‌دست نوسانات می‌گردد. این عامل سبب افزایش در فرسایش ذرات رسوب و آشفتگی‌های نزدیک بستر می‌شود [۲۵]. با تداوم این فرآیند، بستر هموار به بستر شکنجی تبدیل می‌گردد [۲۲].

همان‌گونه که سرعت جریان افزایش می‌یابد، با آمیختگی شکنج‌های با ارتفاع و سرعت متفاوت، یک شکل بستر با ارتفاع بزرگتر از شکنج‌های دیگر بوجود می‌آید. در این حالت انتقال سریع شکنج به تلماسه اتفاق می‌افتد که وابسته به شکل‌گیری شکنجی معروف به rouge ripple می‌باشد [۱۰۰]. این شکل بستر با ارتفاع بزرگتر، با افزایش شدت‌های آشفتگی و بنابراین تنش‌های رینولدز در نزدیک ناحیه پیوست مجدد روی ساختار جریان تأثیر می‌گذارد. rouge ripple باعث تولید بیشتر آبشستگی در وجه پایین‌دست و در نتیجه تولید دبی زیاد رسوب در پایین‌دست می‌گردد. بنابراین فرسایش و سرعت انتقال رسوب به پایین‌دست افزایش می‌یابد [۲۲]. این عمل تا هنگامی که تلماسه‌ها با عمق جریان، سرعت انتقال و تنش برشی به کار برده شده به تعادل برسند، ادامه می‌یابد [۲۲]. عبارت تلماسه اولین بار توسط ژیلبرت (۱۹۱۴) معرفی شد. در آن زمان عبارت امواج ماسه‌ای، شکنج‌های عظیم و... برای معرفی این شکل‌ها به کار برده می‌شد. اشلی (۱۹۹۰) به طبقه‌بندی تلماسه‌ها براساس شکلشان به دو دسته عمده پرداخت:

۱- دویعدی (2D)، در سرعت‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد.

۲- سه‌بعدی (3D)، در همان اندازه ذرات، در سرعت‌های بالاتر اتفاق می‌افتد [۱۹].

<sup>1</sup>-Drag

<sup>2</sup>-Streaks

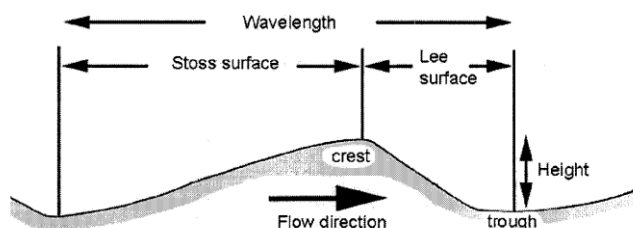
<sup>3</sup>-Ejection

<sup>4</sup>-Sweep

<sup>5</sup>-Burst

<sup>6</sup>-Reattachment point

طبق نظرات مک لین (۱۹۹۰) تلماسه‌ها اغلب به صورت سه‌بعدی و با ارتفاعی حدود ۰/۲ عمق جریان شکل می‌گیرند. این شکل‌ها معمولاً بسیار نامتقارن بوده و شیب بالادست آن‌ها حدود ۲ تا ۶ درجه و شیب پایین‌دست، دارای زاویه ایستایی (حدود ۳۰ درجه) می‌باشد [۱۲۰]. همچنین سولسبی (۱۹۸۹) بیان نموده است که امواج ماسه‌ای اغلب بوسیله یک سطح مقطع مثلثی و نامتقارن با شیب‌های تند پایین‌دست (۲۸-۳۵ درجه) و شیب کم بالادست (تا حدود ۵ درجه) مشخص می‌شوند. شکل زیر نمایی از تلماسه را نشان می‌دهد [۱۷۶].



شکل ۱-۵-۱- نمای شماتیکی از تلماسه و مشخصات آن [۱۶۴]

شرایط متوسط جریان که در آن تلماسه‌ها شکل می‌گیرند، می‌تواند توسط نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل که به عدد فرود ( $Fr$ ) معروف است، بیان شود.

$$\frac{\rho g}{2} \frac{L_c}{U_c} = \frac{g L_c}{2} = Fr^{-2} \quad \rightarrow \quad Fr = \frac{U_c}{\sqrt{g L_c}} \quad (1-1)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی،  $U_c$  سرعت متوسط جریان و  $L_c$  طول مشخصه می‌باشد.

تلماسه‌ها در شرایط زیر بحرانی ( $Fr < 1$ ) شکل می‌گیرند. در این شرایط، سطح آزاد آب بر اساس تغییر شکل بستر، اندکی تغییر فرم می‌دهد. بدین صورت که یک فرورفتگی کوچک بر روی قله تلماسه و یک برآمدگی ناچیز در طول قسمت فرورفته تلماسه تشکیل می‌شود [۱۶۴]. علت این امر، انقباض جریان بر وجه بالادست و انقباض آن بر روی قله مطابق با قانون برنولی است.

تنش‌های برشی موجود در وجه بالادست تلماسه سبب به حرکت درآوردن رسوبات و عبور آن‌ها از قله می‌گردد. از طرفی ذرات در وجه پایین‌دست، در زیر رسوبات وارده از وجه بالادست مدفون گشته؛ نتیجه نهایی مهاجرت آرام تلماسه به پایین‌دست می‌باشد [۵۲].

سرعت مهاجرت در تلماسه‌های دوبعدی به شرح زیر است:

$$R = \frac{Q_d}{\varepsilon \Delta} \quad (2-1)$$

که در آن  $R$  سرعت مهاجرت،  $Q_d$  میزان دبی رسوبات افزوده شده به وجه پایین‌دست در واحد عرض جریان،  $\varepsilon$  تجمع رسوبات در واحد عرض تلماسه و  $\Delta$  ارتفاع تلماسه می‌باشد.