





دانشکده مهندسی علوم آب  
گروه سازه‌های آبی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد  
عنوان:

## شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و رسوب حول آبشکن در قوس 180 درجه با نرم‌افزار CCHE2D

نگارش:

علیرضا فقیه‌الاسلام جهرمی

استاد راهنما:

دکتر سید حبیب موسوی جهرمی

استاد مشاور:

دکتر محمود شفاعی بجستان

شهریور 1388

## مشکر و قدردانی

در آغاز خداوند مهربان را بخاطر توفیق انجام این پژوهش، سپاس می‌گویم و امید دارم که این تلاش مورد توجه و عنایت دانشجویان و صاحب نظران کرامی قرار بگیرد.

مراتب سپاس و قدردانی خود را نسبت به استاد کرامی جناب آقای دکتر سید حبیب موسوی جهرمی به عنوان استاد راهنمای این پایان نامه، ابراز نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت و سلامتی می‌نمایم و از جناب آقای دکتر شاعری بجهت آن که مشاوره این رساله را بر عهده داشتند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. همچنین از کلیه اساتید محترم گروه سازه‌های آبی که همیشه راهنمای اینجانب بوده‌اند، تشکر می‌کنم.

از زحمات و همدلی‌های دوستان عزیزم به ویژه آقایان صادق حقیقی پور، هاشم صراف دخت، علی ابراو فرهاد حسین خانی در تمام مراحل مختلف تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارم و از تمامی دوستانم که در این رهگذر مجال ذکر نام آنها نبود، سپاس گذاری می‌کنم.

در پایان از همسر مهربانم که همیشه مشوق من در راه پیشرفت بوده و نیز از پدر و مادر و خانواده‌ام به خاطر دلگرمی‌هایشان تشکر می‌کنم.

یاد و خاطره همکاری و همراهی این عزیزان همیشه در خاطر من خواهد ماند.

شهریور ۱۳۸۸

علیرضا فقیه الاسلام

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

کہ فداکارانہ مشوق و مایہ مشرفت من بودہ اند

yazgulu.com

و فرشتہ زندگیم

کہ حضورش مایہ آرامش ہمیشگی من است

## فهرست مطالب

1 ..... مقدمه

### فصل اول - پيچانی شدن رودخانه‌ها

- 1-1 مئاندر (پيچانرود) ..... 4
- 1-1-1 چگونگی تشکیل مئاندر ..... 5
- 2-1 پيچانی شدن رودخانه ..... 8
- 3-1 هیدرولیک جریان در قوس رودخانه ..... 14
- 4-1 آبشکن‌ها و نقش آنها در حفاظت از فرسایش کناره‌ها ..... 15
- 1-4-1 کلیات ..... 15
- 2-4-1 خصوصیات عمومی آبشکن‌ها ..... 16
- 3-4-1 مروری بر انواع آبشکن‌ها و نقش آنها در فرایند فرسایش و رسوبگذاری ..... 18
- 1-3-4-1 آبشکن‌های باز ..... 18
- 2-3-4-1 آبشکن‌های بسته ..... 19
- 4-4-1 مشخصات عمومی آبشکن‌ها ..... 22
- 5-4-1 بررسی الگوی جریان در دماغه و میدان آبشکن‌ها ..... 23

### فصل دوم - پیشینه تحقیق

- 1-2 مروری بر تحقیقات انجام شده آزمایشگاهی ..... 28
- 2-2 مطالعات عددی ..... 37

### فصل سوم - آشنایی کلی با مدل عددی CCHE2D

- 1-3 آشنایی با مدل CCHE2D ..... 51
- 1-1-3 مراحل استفاده از مدل CCHE2D ..... 51
- 1-1-1-3 مش بندی ..... 52

53	..... 2-1-1-3 شرایط مرزی
53	..... 3-1-1-3 تعیین پارامترها
53	..... 4-1-1-3 شبیه سازی
54	..... 5-1-1-3 تفسیر نتایج
54	..... 2-3 مدل CCHE2D
54	..... 1-2-3 معادلات حاکم
55	..... 2-2-3 تنشهای رینولدز
55	..... 1-2-2-3 مدل لزجت گردابی
56	..... 2-2-2-3 مدل دو بعدی $k-\epsilon$
58	..... 3-2-3 انتقال رسوب
58	..... 1-3-2-3 بار کل
58	..... 2-3-2-3 انتقال نامتعادل
58	..... 3-3-2-3 طبقه بندی مواد بستر
59	..... 4-3-2-3 شرایط اولیه
59	..... 5-3-2-3 فرمولهای تجربی
60	..... 6-3-2-3 تعیین زبری بستر به روش Van Rijn و Wu and Wang
61	..... 7-3-2-3 معادلات جداگانه در مدل برای محاسبه بار معلق و بار بستر

### **فصل چهارم-مواد و روشها**

63	..... 1-4 مشخصات میدان محاسباتی
63	..... 2-4 روش انجام کار
64	..... 1-2-4 برداشت مختصات هندسی نقاط فلوم
65	..... 2-2-4 مرزبندی میدان محاسباتی
67	..... 3-2-4 مش بندی
69	..... 4-2-4 تعریف سناریوهای مختلف از نظر طرز قرارگیری آبشکنها و شرایط اولیه جریان
69	..... 1-4-2-4 موقعیت 30 درجه قوس
70	..... 2-4-2-4 موقعیت 90 درجه قوس

70	3-4-2-4 موقعیت 170 درجه قوس
71	4-4-2-4 موقعیت 30 و 90 درجه قوس
72	5-4-2-4 موقعیت 90 و 170 درجه قوس
72	6-4-2-4 موقعیت 30 و 170 درجه قوس
73	7-4-2-4 موقعیت 30 و 90 و 170 درجه قوس
73	8-4-2-4 شبیه سازی قوس بدون آبشکن
74	5-2-4 شبیه سازی
74	1-5-2-4 شبیه سازی جریان
74	1-1-5-2-4 تعریف شرایط اولیه جریان و کالیبراسیون مدل
76	2-1-5-2-4 تعیین پارامترهای شبیه سازی جریان
78	3-1-5-2-4 تعیین شرایط مرزی
79	2-5-2-4 شبیه سازی رسوب
79	1-2-5-2-4 تعیین خواص رسوب
81	2-2-5-2-4 شرایط مرزی رسوب
82	3-2-5-2-4 تعیین انواع الگوی دانه بندی موجود
82	4-2-5-2-4 تعیین الگوی دانه بندی بستر

### فصل پنجم - نتایج حاصل از شبیه سازی

85	مقدمه
86	1-5 موقعیت 30 درجه
86	1-1-5 دبی 20 لیتر بر ثانیه
88	2-1-5 دبی 24 لیتر بر ثانیه
91	3-1-5 دبی 28 لیتر بر ثانیه
94	2-5 موقعیت 90 درجه
94	1-2-5 دبی 20 لیتر بر ثانیه
97	2-2-5 دبی 24 لیتر بر ثانیه

100	..... 3-2-5 دبی 28 لیتر بر ثانیه
103	..... 3-5 موقعیت 170 درجه
103	..... 1-3-5 دبی 20 لیتر بر ثانیه
106	..... 2-3-5 دبی 24 لیتر بر ثانیه
109	..... 3-3-5 دبی 28 لیتر بر ثانیه
112	..... 4-5 مقایسه کلی عمق حداکثر آبشستگی بین مدل ریاضی و فیزیکی
116	..... 5-5 شبیه‌سازی‌های دو و سه آبشکن
116	..... 1-5-5 شبیه سازی دو آبشکن در موقعیتهای 30 و 90 درجه
118	..... 2-5-5 شبیه سازی دو آبشکن در موقعیتهای 30 و 170 درجه
120	..... 3-5-5 شبیه سازی دو آبشکن در موقعیتهای 90 و 170 درجه
122	..... 4-5-5 شبیه سازی سه آبشکن در موقعیتهای 30، 90 و 170 درجه
124	..... 6-5 شبیه سازی قوس 180 درجه بدون آبشکن
124	..... 1-6-5 دبی 20 لیتر بر ثانیه
125	..... 2-6-5 دبی 24 لیتر بر ثانیه
126	..... 3-6-5 دبی 28 لیتر بر ثانیه

### فصل ششم - نتایج و پیشنهادات

131	..... 1-6 نتایج
136	..... 2-6 پیشنهادات
137	..... <b>منابع و ماخذ</b>
139	..... <b>پیوست الف</b>
149	..... <b>پیوست ب</b>
172	..... <b>پیوست ج</b>



## فهرست شکل‌ها

- شکل 1-1: طرح کلی یک پیچان رود ..... 4
- شکل 1-2: بخش‌های اصلی پیچان رود در مرحله میانی تکامل آن ..... 6
- شکل 1-3: مراحل ایجاد مئاندر و تحولات آن در یک منطقه ..... 7
- شکل 1-4: تعریف پارامترها در رودخانه پیچانی ..... 9
- شکل 1-5: هندسه رودخانه پیچانی در پلان ..... 10
- شکل 1-6: خواص پیچان‌رودها ..... 12
- شکل 1-7: هندسه تجربی پیچ و خم‌ها (Leopold et al., 1960 and ackers and Charlton, 1970) ..... 13
- شکل 1-8: هندسه تجربی پیچ و خم‌ها (Zeller, 1967) ..... 13
- شکل 1-9: وضعیت قرار گرفتن آبشکن نسبت به راستای جریان ..... 17
- شکل 1-10: نمایش اجزا مختلف سازه آبشکن ..... 17
- شکل 1-11: نمایش انواع آبشکن‌ها بر اساس شکل سازه ..... 18
- شکل 1-12: نمونه‌ای از یک آبشکن نفوذپذیر و نقش آن در ایجاد لایه رسوبی و تثبیت کناره رودخانه ..... 19
- شکل 1-13: پلان ومقطع یک آبشکن بسته ..... 20
- شکل 1-14: نمایش وضعیت رسوب‌گذاری در محدوده آبشکنها (در حالت تکی و سری) ..... 21
- شکل 1-15: انواع آبشکن‌ها از نظر انحراف جریان ..... 21
- شکل 1-16: نمایش عملکرد نامطلوب آبشکن‌ها ..... 22
- شکل 1-17: تاثیر سازه آبشکن بر وضعیت جریان رودخانه و پدید آمدن جریان ثانویه ..... 24
- شکل 1-18: نمونه‌ای از الگوی جریان در دماغه آبشکن بسته ..... 26
- شکل 1-19: الگوی جریان ایجاد شده در محدوده آبشکن‌های بسته در حالات مختلف ..... 26
- شکل 2-1: بردارهای سرعت و غلظت رسوب در ناحیه مورد نظر با استفاده از CCHE2D ..... 44
- شکل 2-2: تغییرات نهایی بستر (بالا: آزمایشگاهی - پایین: عددی) ..... 45
- شکل 2-3: بردارهای سرعت در عمق 2/3 سانتی-متر (بالا: آزمایشگاهی - پایین: عددی) ..... 45
- شکل 2-4: طرح شماتیک فلوم آزمایش فضلی و همکاران ..... 46
- شکل 2-5: غلظت موادشیمیایی در ناحیه مورد بررسی در رودخانه راین ..... 48
- شکل 4-1: نقاط هندسی فلوم ..... 65
- شکل 4-2: بلوک‌بندی برای موقعیت 30 درجه قوس ..... 66
- شکل 4-3: بلوک‌بندی برای موقعیت 90 درجه قوس ..... 66
- شکل 4-4: بلوک‌بندی برای موقعیت 170 درجه قوس ..... 66
- شکل 4-5: معیارهای سنجش مش در CCHE2D برای مش موجود ..... 68
- شکل 4-6: مش‌بندی حول آبشکن در قسمت 30 درجه قوس ..... 69
- شکل 4-7: تعریف شرایط اولیه جریان ..... 75
- شکل 4-8: مشخص کردن آبشکن در قوس ..... 75
- شکل 4-9: تعیین پارامترهای شبیه‌سازی جریان ..... 76

- شکل 4-10: تعیین روش ضریب زبری ..... 77
- شکل 4-11: ثابت‌های صفحه Advanced ..... 77
- شکل 4-12: (الف) تعیین شرایط مرزی ورودی، (ب) تعیین شرایط مرزی خروجی ..... 78
- شکل 4-13: تعیین کلاس ذرات ..... 80
- شکل 4-14: تعیین نوع انتقال رسوب ..... 81
- شکل 4-15: صفحه Sediment ..... 82
- شکل 4-16: ویرایشگر شرایط مرزی ..... 82
- شکل 4-17: تعیین الگوی دانه‌بندی موجود ..... 82
- شکل 4-18: تعیین الگوی دانه‌بندی بستر ..... 83
- شکل 5-1: الگوی جریان حول آبشکن در موقعیت 30 درجه قوس ..... 85
- شکل 5-2: پروفیل‌های عرضی در راستای آبشکن در موقعیت 30 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه ..... 87
- شکل 5-3: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 30 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه .. 88
- شکل 5-4: پروفیل‌های عرضی در راستای آبشکن در موقعیت 30 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه ..... 90
- شکل 5-5: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 30 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه ... 91
- شکل 5-6: پروفیل‌های عرضی در راستای آبشکن در موقعیت 30 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 93
- شکل 5-7: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 30 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه .. 94
- شکل 5-8: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 90 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه ..... 96
- شکل 5-9: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 90 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه .... 97
- شکل 5-10: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 90 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه ..... 99
- شکل 5-11: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 90 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه .. 100
- شکل 5-12: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 90 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 102
- شکل 5-13: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 90 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه 103
- شکل 5-14: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 170 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه ..... 105
- شکل 5-15: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 170 درجه و دبی 20 لیتر بر ثانیه 106
- شکل 5-16: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 170 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه ..... 108
- شکل 5-17: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 170 درجه و دبی 24 لیتر بر ثانیه 109
- شکل 5-18: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر در موقعیت 170 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 111
- شکل 5-19: مقایسه پروفیل‌های بستر (ریاضی و فیزیکی)؛ موقعیت 170 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه 112
- شکل 5-20: مقایسه مقادیر حداکثر آبشستگی در تمام حالات بین مدل ریاضی و فیزیکی ..... 113
- شکل 5-21: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر؛ دو آبشکن در 30 و 90 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه ... 117
- شکل 5-22: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر؛ دو آبشکن در 30 و 170 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه . 119
- شکل 5-23: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر؛ دو آبشکن در 90 و 170 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه . 121
- شکل 5-24: مقایسه پروفیل‌های عرضی بستر؛ سه آبشکن در 30، 90 و 170 درجه و دبی 28 لیتر بر ثانیه . 123
- شکل 5-25: پروفیل‌های عرضی قوس در حالت بدون آبشکن و دبی 20 لیتر بر ثانیه ..... 124
- شکل 5-26: پروفیل‌های عرضی قوس در حالت بدون آبشکن و دبی 24 لیتر بر ثانیه ..... 126

شکل 5-27: پروفیل‌های عرضی قوس در حالت بدون آبشکن و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 128

شکل 5-28: پروفیل‌های طولی قوس در حالت بدون آبشکن و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 129

شکل 5-29: پروفیل‌های طولی سرعت در مرزها در حالت بدون آبشکن و دبی 28 لیتر بر ثانیه ..... 129

## فهرست جداول

- جدول 2-1: درصد کاهش عمق فرسایش در آبشکن اصلی با وجود آبشکن فرعی ..... 32
- جدول 2-2: مشخصات آزمایش آقای حسنی ..... 40
- جدول 5-1: عمق حداکثر آبستگی در حالت‌های مختلف برای مدل‌های ریاضی و فیزیکی ..... 114
- جدول 5-2: درصد افزایش عمق حداکثر آبستگی با تغییرات طول آبشکن بین مدل ریاضی و فیزیکی ..... 114
- جدول 5-3: درصد افزایش عمق حداکثر آبستگی با تغییر موقعیت آبشکن در قوس ..... 115
- جدول 5-4: درصد افزایش عمق حداکثر آبستگی با تغییر دبی برای مدل‌های ریاضی و فیزیکی ..... 115

## مقدمه

توسعه و پیشرفت کامپیوترها در سه دهه اخیر باعث تشویق و ترغیب محققین برای استفاده از این وسیله در حل مسایل مربوط به علوم سیالات شده است؛ به طوری که در حال حاضر روش‌های عددی در اکثر مواردی که قابل مقایسه با روش‌های تحلیلی بوده‌اند، همانند روش‌های تحلیلی و تقریباً با همان دقت در حل و طراحی بسیاری از کارهای مهندسی و غیره به کار گرفته می‌شود.

از جمله کارهای مهندسی که امروزه کامپیوتر نقش وسیعی در آن پیدا کرده، بخش آب و مسایل مربوط به آن می‌باشد. یکی از مسایل مهمی که اغلب مهندسين با آن سروکار دارند، جریان‌های جدا شده‌ای است که در اثر وجود موانع بر سر راه جریان پیش می‌آید. از جمله این موانع آبشکن‌ها یا اپی‌ها هستند که در این پایان‌نامه به آن‌ها پرداخته شده است.

اپی عبارت است از ساختمانی که در کانال‌های روباز و رودخانه‌ها به منظور حفاظت دیواره‌ها در مقابل فرسایش و یا انحراف و هدایت آب در جهت‌های موردنظر ساخته می‌شود. استفاده از این ساختمان به صورت‌های مختلفی انجام می‌گیرد. بسته به موارد استفاده و کاربرد، این سازه می‌تواند به صورت منفرد و یا یک سری اپی پشت سر هم با فواصل معین قرار گیرد. یک مسئله اساسی و مهم، فرسایش و رسوب‌گذاری حول این سازه می‌باشد. برای به دست آوردن مقادیر آبشستگی و رسوب‌گذاری در اطراف تک آبشکن، از روش‌های تئوری و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. باید توجه داشت با وجود آن‌که روش‌های آزمایشگاهی از دقت خوبی برخوردارند، اما از نظر اقتصادی در بعضی موارد مبالغ زیادی را به خود اختصاص می‌دهند. بدین لحاظ در حال حاضر سعی بر آن است که کارهای تحقیقاتی و طراحی‌های مهندسی بر اساس روش‌های تئوری و به وسیله کامپیوتر انجام شود و مشخص شده است که نتایج به دست آمده از این روش‌ها با واقعیت اختلاف چندانی ندارد.

همچنین در روش‌های تحلیلی، معادلات پیچیده ریاضی با اعمال یکسری فرضیات و ساده‌سازی حل می‌شوند، در حالی که هنگام استفاده از روش‌های عددی و کامپیوتری این امکان وجود دارد

که کلیه ترم‌های موجود در یک معادله پیچیده ریاضی را برای رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر به کار ببریم.

با توجه به توضیحات فوق، به علت کاربرد وسیع اپی‌ها در کارهای مهندسی رودخانه ضرورت دارد که در خصوص مسایل هیدرولیکی جریان اطراف آن‌ها مطالعات وسیع و گسترده‌ای صورت گیرد تا بتوان در خصوص کارآیی آن‌ها برای هدایت جریان و یا تثبیت کناره‌های رودخانه و نیز مسایل و مشکلات جانبی ناشی از ایجاد اپی، مانند نحوه انتقال رسوبات، نشست رسوبات و نیز آبشستگی‌های موضعی خصوصاً آبشستگی در دماغه آبشکن، پیش‌بینی و اظهار نظر نمود.

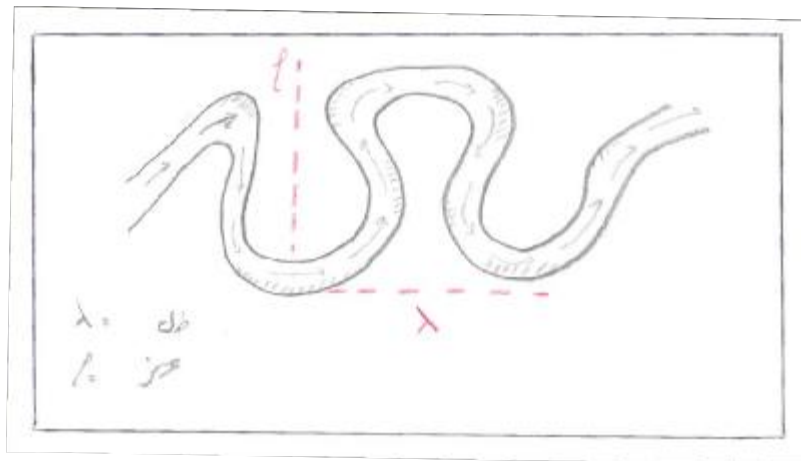
برای بررسی این اثرات، گام اول تعیین میدان جریان اطراف آبشکن می‌باشد. در این پایان‌نامه که به بررسی الگوی جریان و رسوب حول آبشکن در قوس 180 درجه می‌پردازد، ابتدا توسط مدل دو بعدی متوسط عمقی CCHE2D شبیه‌سازی جریان و رسوب در قوس 180 درجه بدون آبشکن با دبی‌های 20، 24 و 28 لیتر بر ثانیه صورت گرفته‌است. سپس این شبیه‌سازی حول تک آبشکن با طول‌های 8، 10 و 12 سانتی‌متر در موقعیت‌های 30، 90 و 170 درجه از قوس با دبی‌های 20، 24 و 28 لیتر بر ثانیه صورت گرفته‌است و در نهایت این نتایج با نتایج مدل فیزیکی صحت‌سنجی شده‌است. همچنین شبیه‌سازی دو و سه آبشکن با حالت‌های مختلف در موقعیت‌های 30، 90 و 170 درجه از قوس و با همان اندازه‌های مربوط به پارامترهای دبی و طول آبشکن گفته‌شده در بالا صورت گرفته‌است.

## 1-1 مئاندر (پیچان رود)

رودخانه‌ها در تمام مسیر خود از بستری منظم و مسیری مستقیم برخوردار نیستند و بسته به شکل ناهمواری و تشکیلات بستر، شرایط اقلیمی حاکم بر محیط و تفاوت‌های دبی جریان، گاه پیچ و خمهایی در طول مسیر رودخانه پدید می‌آید که اصطلاحاً به آن مئاندر می‌گویند. از لحاظ لغوی این نام از اسم رودخانه *Maiandras* در جنوب باختر ترکیه گرفته شده است و در متون تخصصی فارسی واژه‌های پیچا نرود و رودپیچ بعنوان معادل *Meander* برگزیده شده‌اند.

مئاندر یکی از اشکال دینامیکی آب است که چگونگی برداشت بوسیله جریان‌های خطی را نمایش می‌دهد. خط‌السییر آنها قوس‌های قابل توجهی را در ارتباط با جهت عمومی جریان نشان می‌دهد و هر مئاندری شامل مسیری مدور و تنگ است که در قسمت پایه‌ها بهم نزدیک شده و حداکثر انحناء در قله آن است.

ویژگیهای ظاهری مئاندر از طریق طول موج (فاصله دو قله پایینی) و عرض آن (فاصله خطوط مماس با قله) مشخص می‌گردد. ضریب اعوجاج یا خمیدگی مئاندر نیز حاکی از نسبت طول بستر بین دو حد انتهایی پیچان رود به فاصله بستر در خط مستقیم آن است.



شکل 1-1: طرح کلی یک پیچان رود

### 1-1-1 چگونگی تشکیل مئاندر

همانگونه که اشاره شد یکی از پدیده‌های ناشی از دینامیک آب، ایجاد پیچ و خم‌هایی در مسیر جریان است که اصطلاحاً مئاندر نامیده می‌شود.

در مورد علل پدید آمدن مئاندر نظریات متفاوتی وجود دارد که در اینجا از دید ریخت‌شناسی علل بروز پیچ‌رود بیان می‌گردد. در صورتیکه نیروی خام رودخانه بزرگتر از نیروی حمل و اصطکاک آن باشد، نیروی خالص قدرت تخریبی یافته و در طول بستر رودخانه حداکثر نیروی خالص به عمیق‌ترین نقطه اثر نیرو به یکی از کناره‌های بستر رودکه از نظر تشکیلات کم مقاومت است وارد شود، در نتیجه آن بخش تحت تأثیر عمل حفر و کاهش جریان آب تخریب شده و مواد حاصل از آن بر اثر نیروی گریز از مرکز در بستر مقابل نهشته می‌شود. بدین ترتیب رودخانه بجای مسیری مستقیم در یک مسیر مارپیچ جریان می‌یابد. ادامه این فرآیند سبب می‌گردد تا کناره فرسایش یافته گود شده و بصورت مقعر (کاو) درآید؛ در صورتیکه کناره مقابل به واسطه رسوب گذاری برآمده و محدب (کوژ) می‌گردد.

برخی از پژوهشگران معتقدند که "بزرگی انحنای مئاندر بیشتر به دانه بندی مواد بستگی دارد نه به دبی آب رودخانه‌ها" و برخی دیگر به این مورد اشاره می‌کنند که « مواد نهشته شده بر حسب حجم و مقدار با ایجاد موانعی در برابر جریان آب ویژگیهای خاص به بستر می‌دهند. اگر مقدار آنها نسبتاً زیاد باشد در بستر حرکت پیچ و خم پدید می‌آید ».

همانگونه که در شکل ملاحظه می‌کنید در مسیر دو پیچ متوالی رودخانه (مئاندر)، بخش‌های

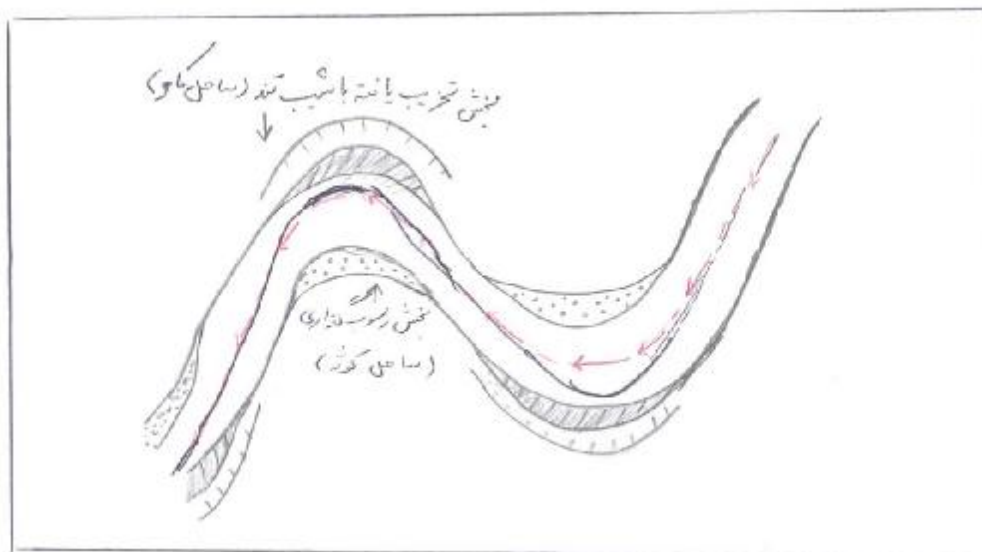
اصلی زیر مشاهده می‌گردند:

(1) بخش مقعر یا ساحل کاو که همیشه در معرض نیروی آب و تخریب تشکیلات کم مقاومت

کناره قرار دارد و دامنه گسترش ظاهری ساحل مذکور بسوی خشکی کشیده شده‌است.



- (2) بخش محدب یا ساحل کوژ که مواد حاصل از تخریب کناره مقابل در آن بر جا نهاده شده- است و پیشروی آن بسوی جریان آب است.
- (3) بخش میانی مئاندر که در واقع حد فاصل ساحل کاو و ساحل کوژ میباشد.



شکل 1-2: بخش های اصلی پیچان رود در مرحله میانی تکامل

باید در نظر داشت که توسعه و تکامل دو قوس مئاندر به میزان دبی رودخانه، بار جامد آن و شیب توپوگرافی بستر بستگی دارد. گسترش نهایی خمیدگی‌ها تقریباً 15 تا 20 برابر عرض جریان آب است، بنابراین برای تشکیل پیچان رود باید بین پارامترهای دبی، شیب بستر و نیروی خالص جریان و مقاومت سازندهای تشکیل دهنده بستر تعادل برقرار باشد. اگر نیروی خالص کمتر از نیروی خام باشد مئاندر تشکیل نخواهد شد.

در توضیح دینامیک آب در خم رودخانه ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر دو نیروی معمولی ثقل و اصطکاک که در جهت جریان آب و در امتداد محور X به آن وارد می شود، دو نیروی دیگر در جهت محور Y نیز به آب وارد شده که به اختصار شرح داده می شوند:

(1) نیروی سانتریفوژ که جهت آن بسوی خارج بوده و در اثر شرایط انحناء رودخانه در پیچ

پدید می‌آید.

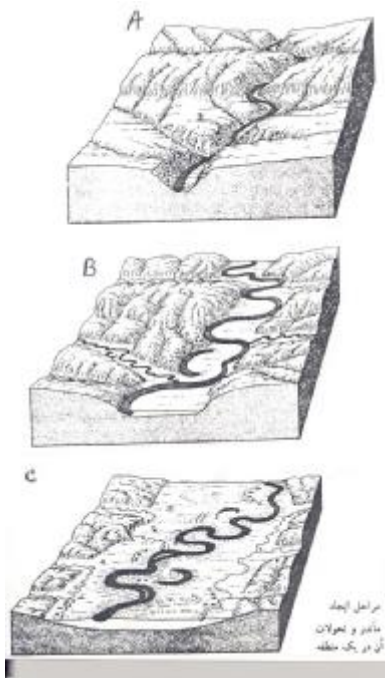
(2) نیروی محرک اصلی که موجب خارج شدن ذرات آب از مسیر مستقیم می‌شود.

بنابراین شیب طولی  $ix$  موجب حرکت آب در جهت محور  $X$  شده و اصطکاک را سبب می‌گردد در حالیکه شیب عرضی  $iy$  جریان قوسی را به وجود می‌آورد. بنابراین جریان آب در قوس مقعر رودخانه بسوی پائین و در قوس محدب بسوی بالا هدایت می‌گردد.

در ادامه فرآیند تکاملی پیچان‌رود (مئاندر)، ساحل کوژ با رسوبگذاری ممتد توسعه یافته و دو انحناء پیچان رود آنقدر به یکدیگر نزدیک می‌شوند که در یک جریان ناگهانی دیواره دو انحناء از بین رفته و پس از ایجاد میان بر طبیعی، بخش هلالی رود از آن جدا می‌گردد.

در شکل 1-3، مهاجرت پیوسته رودخانه را نسبت به مسیر مستقیم خود مشاهده می‌کنید.

تأثیرات تحول مئاندر بر تکامل ناهمواری های اطراف بویژه تشکیل دشت سیلابی عریض را در مرحله نهایی می‌توان ملاحظه نمود.



شکل 1-3: مراحل ایجاد مئاندر و تحولات آن در یک منطقه

## 2-1 پیچانی شدن رودخانه

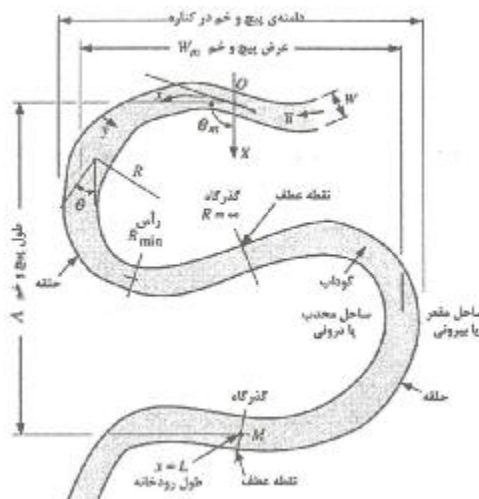
پیچانی شدن رودخانه با توالی حلقه‌های پیچان متناوب مشخص می‌شود. یک حلقه پیچان، بازه‌ای است که بین دو نقطه عطف منحنی تشکیل می‌شود. رودخانه‌ی پیچانی از حلقه‌های دوتایی تشکیل شده است که در خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. فرضیات متعددی در توضیح علت شروع پیچ و خم‌ها پیشنهاد شده است که از جمله آنها جریانهای ثانویه، اغتشاشات جزیی و فرضیات حدی را می‌توان نام برد.

پیچانی شدن اصولاً یک مسأله مکانیک سیالاتی است که در آن تاوایی نقش اساسی را بازی می‌کند. حرکت سیال در یک کانال خمیده بر اساس معادلات حرکت صورت می‌پذیرد و روشهای حل مختلفی توسط محققانی نظیر انیشتین (Einstein, 1926)، رزفسکی (Rosovakii, 1957)، ین (Yen, 1970)، دیوریند (De Vriend, 1969)، ادگارد (Odgaard, 1981)، نلسن و اسمیت (Neldonand Smith, 1989) و دیگران پیشنهاد شده‌است. بعضی از تلاش‌ها بر پایداری هیدرودینامیکی ذره در کانالهای آب‌رفتی مستقیم متمرکز شده‌است. از روش اغتشاشات جزیی جهت تعیین اینکه ارتعاشات کوچک تشدید و یا میرا می‌شوند، استفاده شده است. نمونه‌های این روش در مقالات کالاندر (Callander, 1969)، آندرسون (Anderson, 1967)، انگلاند و اسکاواگارد (Engelund and Skovgaard, 1973)، پارکر (Parker, 1976) و ایکیدا و همکاران (Ikeda et al., 1981) استفاده شده است.

تئوریهای حدی نظیر قانون حداقل واریانس، اولین بار توسط لانگبین و لئوپولد (Langbein and Leopold, 1966)، پیشنهاد شد. کمینه کردن شامل بر تعدیل هندسه پلانیمتریک و عوامل هیدرولیکی عمق، سرعت و شیب موضعی است. بنا به گفته یانگ (Yang, 1976) نرخ مصرف انرژی، ساختار پیچانی شدن رودخانه‌ها را توضیح می‌دهد. در مطالعات دیگری

مداک (Maddock, 1970) و چانگ (Chang, 1980) از قاعده توان حداقل رودخانه استفاده کردند.

چانگ (Chang, 1979a) نتیجه گیری کرد که یک رودخانه پیچانی از یک رودخانه مستقیم به دلیل مصرف توان کمتر بر واحد طول پایدارتر است. ژولین (Julien, 1985) پیچانی شدن را به صورت یک مسأله تغییراتی بررسی کرد که در آن انتگرال انرژی به فانکشنال یک مسأله حساب تغییراتی مربوط است که حل آن یک منحنی سینوسی است.



شکل 4-1: تعریف پارامترها در رودخانه پیچانی

مطابق شکل 4-1 مسیر پیچانی یک رودخانه آبرفتی را در نظر بگیرید. دو سیستم مختصات مستطیلی و منحنی الخط تعریف می‌شود. محور  $X$  از سیستم مختصات مستطیلی در راستای شیب بطرف پایین دره در امتداد خط مرکزی پیچ و خم است. در سیستم مختصات منحنی الخط محور سینوسی  $X$  در جهت خط میانی مسیر رودخانه پیچانی قرار دارد. زاویه بین دو محور  $X$  و  $X$  در امتداد مسیر جریان را  $q$  می‌نامیم. با توجه به خط میانی مسیر رودخانه شعاع انحنای  $R$  در جهت جانبی  $y$ ، عمود بر محور  $X$  است. جهت و مقدار شعاع انحنای  $R$ ، در طول مسیر کانال به عرض  $W$  و سرعت