

راهنمای تعیین منحنی دبی -  
اشل رودخانه با استفاده از روش  
اینشتین - بارباروسا

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه - وزارت نیرو

# راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا

نشریه شماره ۱۵۶

معاونت امور فنی  
دفتر تحقیقات و معیارهای فنی

## فهرستبرگه

سازمان برنامه و بودجه. دفتر تحقیقات و معیارهای فنی  
راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا /  
معاونت امور فنی، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی؛ وزارت نیرو، [امور آب] - تهران: سازمان و  
برنامه و بودجه، مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات، ۱۳۷۵.  
۴۱ ص: مصور. - (سازمان برنامه و بودجه. دفتر تحقیقات معیارهای فنی؛  
نشریه شماره ۱۵۶) انتشارات سازمان برنامه و بودجه: ۸۲ / ۷۵/۰۰/  
مربوط به دستورالعمل شماره ۱۳۹۰-۶۶۵۳/۵۶-۱۰۲ مورخ ۱۳۷۵/۱۰/۸  
کتابنامه: ص ۴۱.

۱. رودها - اندازه‌گیری. ۲. آب - نوسانها. الف. وزارت نیرو. امور آب. ب.  
سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات. ج. عنوان. د.  
فروست.

ش. ۱۵۶ / ۲ / ۳۶۸ TA

راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین -

بارباروسا

تهیه کننده: دفتر تحقیقات و معیارهای فنی

ناشر: سازمان برنامه و بودجه. مرکز مدارک اقتصادی - اجتماعی و انتشارات

چاپ اول: ۵۰۰ نسخه، ۱۳۷۵

قیمت: ۳۰۰۰ ریال

چاپ و صحافی: چاپ زحل

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

بسمه تعالی

دستور العمل شماره : ۱۳۹۰-۵۶/۵۳۶۶۵۳-۱۰۲ مورخ : ۷۵/۱۰/۸	به : تمامی دستگاههای اجرایی ومهندسان مشاور
موضوع : راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا	
<p>به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه کشور و آئین نامه استانداردهای اجرایی طرحهای عمرانی به پیوست نشریه شماره ۱۵۶ دفتر تحقیقات و معیارهای فنی این سازمان با عنوان " راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا " از گروه دوم ابلاغ می گردد.</p> <p>تاریخ اجرای این دستور العمل ۱۳۹۶/۲/۱ می باشد.</p> <p>شایسته است دستگاههای اجرایی ومهندسان مشاور مفاد نشریه یاد شده و ضوابط و معیارهای مندرج در آن را ضمن تطبیق با شرایط کار خود در طرحهای عمرانی مورد استفاده قرار دهند.</p> <p>حمید میرزاده معاون رئیس جمهور و رئیس سازمان برنامه و بودجه</p>	

## پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان سنجی) مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرحهای عمرانی بلحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرحها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیتی ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۳/۲۳ هیأت محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام‌شده طرحها را مورد تأکید جدی قرار داده است. با توجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان برنامه و بودجه (دفتر تحقیقات و معیارهای فنی) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه‌کننده استاندارد

ضمن تشکر از اساتید محترم دانشگاه صنعتی اصفهان، آقایان دکتر سید فرهاد موسوی دانشیار دانشکده کشاورزی، مهندس حمید رضا صفوی عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دکتر امیر تائبی هرنندی معاون پژوهشی دانشکده عمران، برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحب‌نظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

## دفتر تحقیقات

ومعیارهای فنی

زمستان ۱۳۷۵

## ترکیب اعضای کمیته

این استاندارد با مشارکت کمیته فنی شماره ۱۴-۱ (رسوب)، که اسامی آنها به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر، است تهیه و تدوین شده است :

خانم زهرا ایزدپناه	دانشگاه شهید چمران	فوق لیسانس آبیاری و آبادانی
آقای فیروز بهادری	دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی	فوق لیسانس منابع آب
آقای سید محمود رضا بهبهانی	دانشگاه تهران	دکترای منابع آب و خاک
آقای سید جمال الدین پرورده	شرکت تماب	فوق لیسانس هیدرولوژی
آقای محمود شفاعی	مهندسين مشاور دزآب	دکترای هیدرولیک و رسوب
آقای میراحمد میلانی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی	فوق لیسانس هیدرولیک و آبیاری
	آب کشور	

ضمناً کارشناسان محترم آقایان: دکتر حسن احمدی، دکتر مرتضی پاکزاد و دکتر چنگیز فولادی در تهیه پیش نویس اولیه این استاندارد همکاری کرده اند.

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۱	۱- تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا
۲	۱-۱ انتخاب بازه مطالعاتی
۲	۲-۱ تعیین شیب خط انرژی ( شیب انرژی )
۳	۱-۲-۱ تعیین شیب انرژی برای یک مقطع اصلی
۵	۲-۲-۱ تعیین شیب انرژی براساس مفهوم جریان نرمال
۷	۳-۲-۱ تعیین شیب انرژی به روش چندمقطعی
۱۰	۳-۱ تعیین مقطع متوسط
۱۲	۴-۱ نمونه برداری از رسوبات بستر
۱۳	۱-۴-۱ اگر بستر رودخانه خشک است
۱۳	۲-۴-۱ اگر آب در رودخانه جاری باشد
۱۳	۵-۱ محاسبات هیدرولیکی
۱۴	۱-۵-۱ تعیین منحنی دبی - اشل با صرف نظر کردن از مقاومت اصطکاکی دیواره ها
۱۹	۲-۵-۱ تعیین منحنی دبی - اشل با در نظر گرفتن مقاومت اصطکاکی دیواره ها
۲۱	۲- مثال
۳۱	۳- منابع و مأخذ

منحنی دبی - اشل<sup>۱</sup> از جمله اطلاعات پایه برای محاسبات گوناگون هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، رسوب رودخانه‌ها و کانالهای با بستر خاکی است. این منحنی برای مقاطعی از رودخانه که در آنها ایستگاه اندازه‌گیری وجود دارد، به‌طور تجربی قابل تعیین است. بدیهی است منحنی دبی - اشل تجربی فقط برای مقطع خاصی از جریان که در آن اندازه‌گیری صورت گرفته، صادق است؛ گرچه می‌توان برای مقاطع دیگر مشابه با آن مقطع نیز از این منحنی استفاده کرد. از طرفی چون در سیلابهای بزرگ اندازه‌گیری مستقیم دبی و اشل نظیر آن مشکل است، لذا ترسیم قسمت انتهایی منحنی تجربی که معرف کمیت دبیهای سیلابی است، اغلب با استفاده از روشهای تئوریک و یا نیمه‌تجربی انجام می‌گیرد. همچنین محاسبه تئوریک منحنی دبی - اشل برای یک مقطع یا طول معینی از رودخانه با مقطع کم و بیش یکنواخت نیز اغلب مورد نیاز است. روشهای گوناگونی برای تعیین منحنی دبی - اشل تئوریک و یا ادامه منحنی دبی - اشل و یا منحنی دبی - اشل تجربی وجود دارد که هر یک به تناسب وضعیت هیدرولیکی مجرا و اهداف مورد نظر می‌تواند ملاک عمل قرار گیرد. به عنوان نمونه، رابطه مانینگ یکی از ساده‌ترین روابط برای محاسبه منحنی دبی - اشل است. با استفاده از این رابطه، عمق محاسبه شده با در نظر گرفتن رقوم بستر جریان تبدیل به اشل می‌شود. محدودیت رابطه مانینگ در این است که نمی‌توان در آن بدواً تخمین دقیقی از ضریب  $n$  (ضریب مانینگ) به عمل آورد؛ به علاوه ثابت بودن  $n$  در دبیها و اشلهای مختلف خود محل تردید است، زیرا معمولاً "زبری نسبی بستر و کناره‌ها در دبیهای مختلف یکسان نیست.

در این راهنما، یک دستورالعمل تئوریک برای تعیین منحنی دبی - اشل بر مبنای روش اینشتین - بارباروسا<sup>۲</sup> ارائه گردیده است. این روش را همچنین برای ادامه منحنی دبی - اشل تجربی نیز می‌توان به کار گرفت.

نحوه ارائه مطالب به گونه‌ای است که خواننده بتواند بدون نیاز به غور و تفحص عمیق در مفاهیم تئوریک، به محاسبات عملی بپردازد. امید است روش قدم به قدم و فرمهای محاسباتی ارائه شده در این راهنما بتواند چنین هدفی را برآورده کند.

## ۱- تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا

اینشتین و بارباروسا [۱] در سال ۱۹۵۲ با ارائه مقاله‌ای یک روش تئوریک برای تعیین منحنی دبی - اشل ارائه کردند. این روش ماهیتاً بخشی از محاسبات هیدرولیکی مورد نیاز برای ارزیابی بار رسوبی حمل شده توسط رودخانه، موسوم به روش بار بستر اینشتین، است که در سال ۱۹۵۰ آن را اینشتین [۲] مطرح کرد. از جمله ویژگیهای این

1 - Stage - Discharge Curve ( Rating Curve )

2 - Einstein & Barbarossa



روش استفاده موثر از خصوصیات هندسی و فیزیکی مجرا و بهره‌گیری از اصول و مبانی حاکم بر رفتار هیدرولیکی جریان است و از این رو می‌توان آن را از جمله روشهای نسبتاً دقیق محسوب نمود که در آن علاوه بر تعیین رابطه دبی-اشل طرز تعیین شیب طولی و مشخصات مقطع معرف رودخانه نیز بیان گردیده است. مراحل مختلفی که برای تعیین مشخصات منحنی دبی - اشل لازم است انجام گیرد عبارتند از:

۱-۱ انتخاب بازه مطالعاتی<sup>۱</sup> رودخانه

۲-۱ تعیین شیب خط انرژی (شیب انرژی)<sup>۲</sup>

۳-۱ تعیین مشخصات مقطع متوسط<sup>۳</sup>

۴-۱ نمونه برداری از مواد بستر<sup>۴</sup>

۵-۱ محاسبات هیدرولیکی

## ۱-۱ انتخاب بازه مطالعاتی

برای تعیین مشخصات منحنی دبی - اشل باید طول معینی از رودخانه به عنوان بازه مطالعاتی انتخاب شود. این بازه قسمتی از رودخانه خواهد بود که از نظر شکل هندسی و ترکیب رسوبات بستر تا حد امکان یکنواخت است. در این بازه وجود انحناها، برآمدگیهای بستر، رویش نباتات در بستر و عوارض مشابه آن نامطلوب تلقی می‌شود. در چنین بازه‌ای نباید شاخه‌های فرعی مهمی به رودخانه متصل و یا از آن منشعب گردد. حتی الحاق شاخه‌های فرعی موثر در محدوده نزدیکی در بالادست و یا پایین دست بازه مطالعاتی نیز نامطلوب است.

به‌طور کلی لازم است بازه مطالعاتی انتخابی در رودخانه مورد نظر به گونه‌ای باشد که بتوان آن را با یک شیب کلی و با یک مقطع هیدرولیکی متوسط و دانه‌بندی رسوب همسان بیان کرد.

## ۲-۱ تعیین شیب خط انرژی (شیب انرژی)

تعیین شیب انرژی یکی از مهمترین و در عین حال دشوارترین اندازه‌گیری‌های هیدرولیکی است. با توجه به تغییرات مقطع و وجود عوامل مختلف ناهنجاری، امتداد سطح آب رودخانه معمولاً موازی امتداد بستر رودخانه نیست و تحت این شرایط، تعیین شیب انرژی مسئله چندان ساده‌ای نخواهد بود. در ذیل، چند روش برای تعیین شیب خط انرژی درج شده است. برای کسب اطلاع بیشتر در خصوص سایر روشهای مختلف تعیین شیب انرژی به منابعی نظیر [۳]، [۴] و [۵] مراجعه شود.

1 - The Test Reach

2 - The Energy Slope

3 - Average Cross Section

4 - Sampling of Bed Material

## ۱-۲-۱ تعیین شیب انرژی برای یک مقطع اصلی<sup>۱</sup>

در این روش، تعیین شیب انرژی در مقطع عرضی خاصی از بازه مطالعاتی مدنظر است. با بهره‌گیری از شکل ۱ مراحل مختلف مربوط به دستورالعمل تعیین شیب به شرح ذیل است [۶]:

- ۱-۱-۲-۱ یک خط مبنای افقی انتخاب می‌شود تا بتوان رقوم سطح آب را نسبت به این مبنا مشخص نمود.
- ۲-۱-۲-۱ علاوه بر مقطع عرضی موردنظر که در آن باید شیب انرژی تعیین شود، دو مقطع عرضی دیگر، یکی بالادست و دیگری پایین دست مقطع اصلی و به فاصله حداقل ۲۵۰ متر از آن انتخاب می‌گردد.
- ۳-۱-۲-۱ با یک جسم شناور، مسیر جریان اصلی آب بین دو مقطع بالادست و پایین دست مشخص می‌شود.
- ۴-۱-۲-۱ رقوم سطح آب در هر یک از سه مقطع فوق‌الذکر در مسیر جریان اصلی نسبت به خط مبنا اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری حداقل در سه تکرار صورت می‌گیرد و متوسط نتایج تعیین می‌گردد.
- ۵-۱-۲-۱ فاصله مقاطع عرضی بالادست و پایین دست با مقطع عرضی اصلی اندازه‌گیری می‌شود.
- ۶-۱-۲-۱ شیب سطح آب در مقاطع بالادست و پایین دست تعیین و با هم مقایسه می‌شود. اگر اختلاف شیب مقاطع مزبور بیش از ۱۰ درصد باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تعیین شیب انرژی با دقت خوبی امکانپذیر نیست و لازم است بازه دیگری انتخاب شود.
- ۷-۱-۲-۱ اگر دبی رودخانه معلوم باشد، سرعت متوسط در مقطع اصلی با معادله  $Q = AU$  به دست می‌آید. اگر دبی مشخص نیست، سرعت متوسط با اندازه‌گیری توسط مولینه تعیین می‌شود (در دبی موردنظر  $Q$ ) و سپس ارتفاع معادل سرعت با رقوم سطح آب جمع و شیب انرژی از رابطه ذیل تعیین می‌گردد:

$$S = \frac{\left( \frac{U_u^2 - U_d^2}{2g} \right) + \Delta h}{L} \quad (1)$$

در این رابطه :

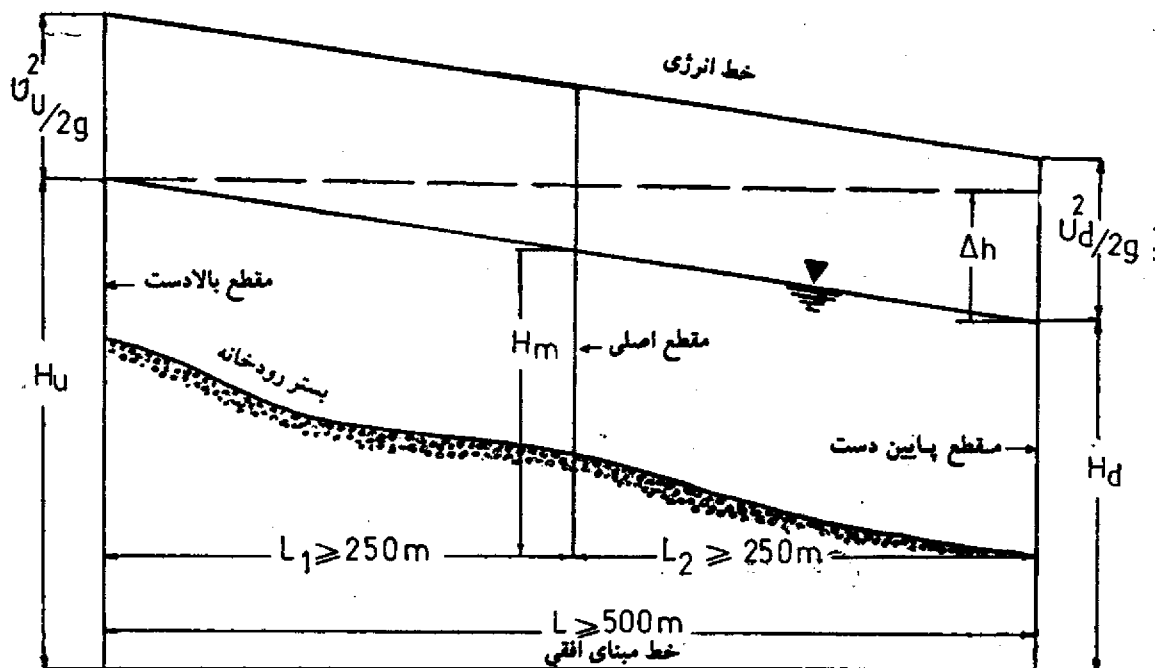
$S$  = شیب انرژی

$\Delta h$  = اختلاف رقوم سطح آب بین مقطع بالادست و پایین دست ( بر حسب متر )

$L$  = فاصله بین دو مقطع ( بر حسب متر )

$U_u$  = سرعت در مقطع بالادست ( بر حسب متر بر ثانیه )

$U_d$  = سرعت در مقطع پایین دست ( بر حسب متر بر ثانیه )



شکل ۱- موقعیت خط انرژی و بعضی مشخصات هیدرولیکی جریان برای تعیین شیب انرژی در مقطع اصلی در یک بازه مطالعاتی

#### توضیح علائم:

$\Delta h$  - اختلاف ارتفاع سطح بین مقاطع بالادست و پایین دست

$U_u$  - سرعت جریان آب در مقطع بالادست

$U_d$  - سرعت جریان آب در مقطع پایین دست

$H_u$  - تراز سطح آب در مقطع بالادست

$H_d$  - تراز سطح آب در مقطع پایین دست

$H_m$  - تراز سطح آب در مقطع اصلی

$S$  - شیب خط انرژی

$S_0$  - شیب بستر رودخانه

$L_1$  و  $L_2$  - فاصله مقاطع پایین دست و بالادست از مقطع اصلی

$L$  - طول بازه مطالعاتی

۸-۱-۲-۱ اگر تعیین تقریبی شیب مورد نظر باشد، می توان اندازه گیری رقوم سطح آب را در امتداد ساحل رودخانه انجام داد؛ به قسمی که این نقاط حتی المقدور متعلق به یک خط جریان باشند. باید خاطر نشان ساخت که در بسیاری از موارد به علت عرض زیاد رودخانه و یا محدودیتهای دیگر، تعیین شیب در امتداد مسیر اصلی جریان مشکل است و باید اندازه گیری در امتداد کناره (کناره ها) صورت گیرد.

شایان ذکر است که رابطه ۱ شیب انرژی را بر حسب یک دبی (Q) مشخص تعیین می کند و هیچ تضمینی نیست که با عوض شدن دبی مقدار شیب تغییر نکند.

### ۲-۲-۱ تعیین شیب انرژی براساس مفهوم جریان نرمال

همان گونه که در مبحث ۱-۱ گفته شد در تعیین منحنی دبی - اشل بازه مطالعاتی طوری انتخاب می شود که کم و بیش از نظر مشخصات هندسی و خصوصیات دانه بندی یکنواخت باشد؛ به نحوی که در محاسبات به عنوان یک مجرای یکنواخت و با یک شیب انرژی ثابت با آن برخورد می شود. در چنین شرایطی روابط جریان نرمال برای بازه صادق است و شیب انرژی را می توان با شیب بستر مترادف فرض کرد. شکل ۲ نمونه ای از جریان نرمال را در یک بازه مطالعاتی نشان می دهد. برای تعیین شیب، باید بتوان از تغییرات ارتفاع معادل سرعت در مقاطع مختلف بازه مطالعاتی صرف نظر نمود، که این امر بستگی به درجه یکنواختی رودخانه در این محدوده دارد. با برقرار بودن این شرایط رابطه ۲ برای تعیین شیب انرژی قابل استفاده خواهد بود. در این رابطه معمولاً "رقوم مربوط به خود مقطع (مثلاً گودترین نقطه مقطع) یا رقوم سطح آب در یک دبی غالب\*" (دبی مشخصه جریانهای کم) قرار داده می شود. با محاسبه S در این شرایط، فرض می شود که مقدار S ثابت است و در دبیهای مختلف تغییری نخواهد نمود و بدین ترتیب وابستگی S به Q از بین رفته تلقی می شود و شرایط جریان نرمال در تمام دبیها برقرار شده فرض می شود.

$$S = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

در این رابطه :

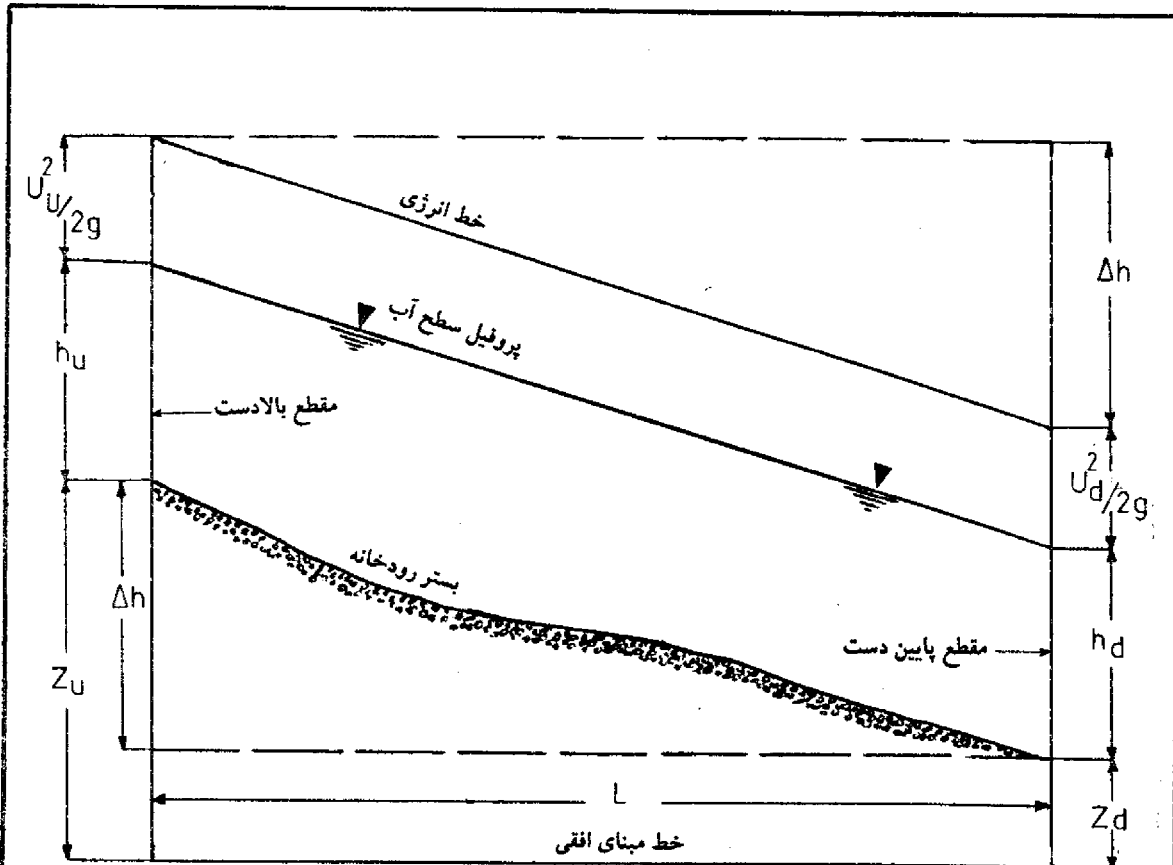
S = شیب انرژی

$\Delta h$  = اختلاف سطح آب در بالادست و پایین دست

L = طول بازه مطالعاتی

---

\* - دبی غالب: در این روش منظور از دبی غالب آن محدوده از دبی رودخانه است که در شرایط کم آبی بیشترین تداوم را از نظر وقوع جریان دارا باشد. می توان دبی غالب را مشخصه جریانهای کم تلقی کرد.



شکل ۲- مشخصات عمومی جریان نرمال ( جریان یکنواخت ) و وضعیت خط انرژی در یک بازه مطالعاتی

توضیح علائم :

$\Delta h$  - اختلاف ارتفاع بستر بین مقطع بالادست و پایین دست و یا ارتفاع نظیر افت انرژی

$U_u$  - سرعت متوسط جریان در بالادست

$U_d$  - سرعت متوسط جریان در پایین دست

$Z_u$  - ارتفاع پتانسیل در مقطع بالادست

$Z_d$  - ارتفاع پتانسیل در مقطع پایین دست

$h_u$  - عمق آب در بالادست

$S$  - شیب بستر و یا شیب خط انرژی

$h_d$  - عمق آب در پایین دست

$L$  - طول بازه مطالعاتی

### ۳-۲-۱ تعیین شیب انرژی به روش چندمقطعی

از آنجا که در بازه مطالعاتی معمولاً "پروفیل عرضی تعدادی از مقاطع با نقشه برداری مشخص می‌گردد، لذا ساده‌تر است که اندازه شیب (شیب انرژی) با در نظر گرفتن کلیه این مقاطع و یکبار حساب شود. در این خصوص می‌توان دستورالعمل زیر را برای محاسبه شیب متوسط در بازه مطالعاتی (صادق برای کلیه مقاطع عرضی در این بازه) بیان کرد:

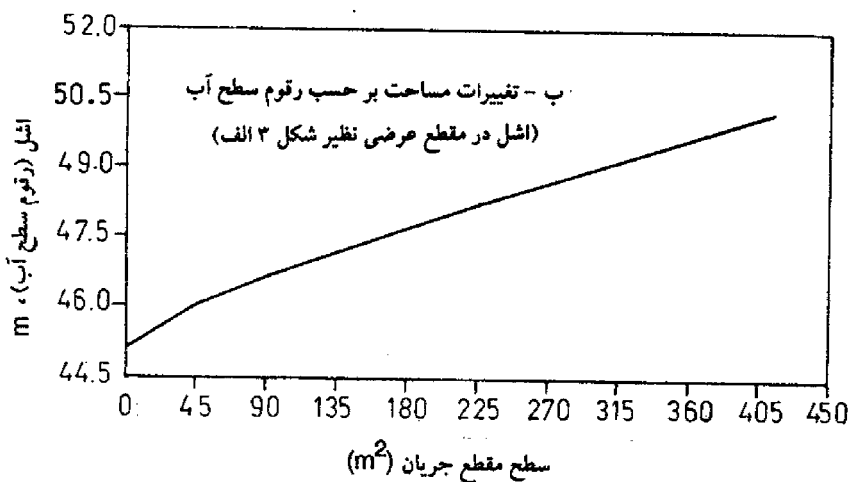
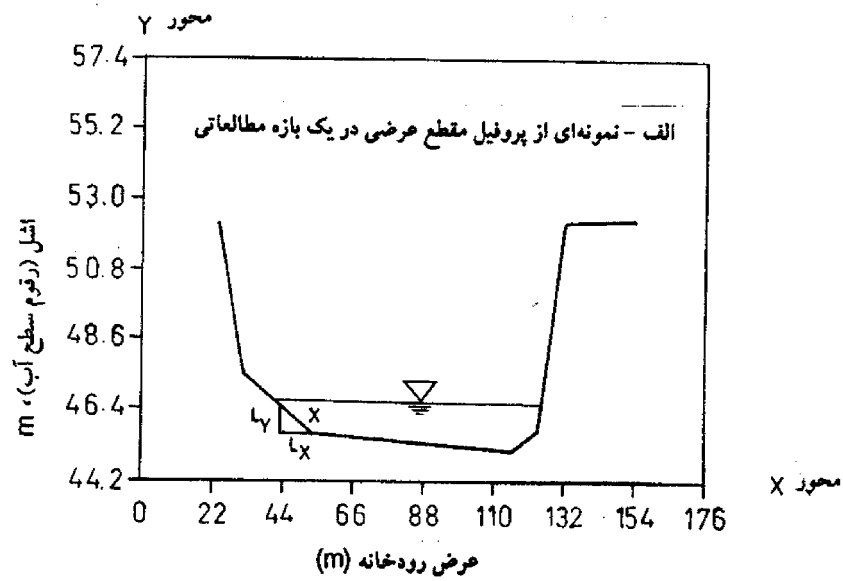
ابتدا لازم است پروفیل‌های عرضی به تعداد مناسب (به فواصل ۲۵۰ تا ۷۵۰ متر) برداشت شود. شکل ۳-الف نمونه‌ای از یک پروفیل عرضی را (که معمولاً بر روی کاغذ میلیمتری رسم می‌شود) نشان می‌دهد. همچنین بر روی شکل ۳-ب منحنی تغییرات مساحت مقطع جریان بر حسب رقوم سطح آب (اشل) به همراه قواعد محاسباتی برای مقطع مزبور نشان داده شده است.

با استفاده از اطلاعات حاصل از مقاطع عرضی، برای محاسبه شیب انرژی می‌توان به یکی از دو روش زیر عمل نمود:

۱-۳-۲-۱ در صورتی که طول بازه مطالعاتی به حد کافی طویل باشد، معمولاً می‌توان گودترین نقطه هر مقطع عرضی را ملاک عمل قرار داده و رقوم این نقاط را بر حسب موقعیت مکانی مقطع (طول ایستگاه متناظر با مقطع) روی صفحه محورهای مختصات رسم کرد. با برازش دادن بهترین خط بر اساس روش حداقل مربعات<sup>۱</sup> به این نقاط و محاسبه شیب این خط، می‌توان شیب متوسط رودخانه و یا به عبارتی شیب انرژی را به دست آورد. برای کلیه دبیها این شیب ثابت فرض می‌گردد. شکل ۴ مثال مصوری از این روش را به نمایش می‌گذارد. بر روی این شکل، رقوم گودترین نقاط (خط القعر) برای مقاطع مختلف ۱۲ گانه در یک بازه مطالعاتی به طول حدود ۵ کیلومتر از یک رودخانه مورد نظر درج شده و روش محاسبه شیب انرژی نیز نشان داده شده است. بر اساس محاسبات مزبور، شیب به دست آمده برابر با (متر/متر)  $S = 0.00121$  است.

۲-۳-۲-۱ در صورتی که طول بازه مطالعاتی کوتاه باشد، گودبها و فرورفتگی‌های موضعی موجود در مقاطع عرضی تأثیر زیادی در جواب به دست آمده به روش فوق خواهد داشت. در این حالت توصیه می‌شود به جای استفاده از رقوم گودترین نقطه مقطع (یا خط القعر)، از رقوم سطح آب در مقاطع، مترادف باده‌های کم استفاده گردد.

در این روش دو راه حل به شرح زیر قابل توصیه است:



شکل ۳- نمونه‌ای از مقطع عرضی برای یک مقطع جریان و منحنی تغییرات مساحت - اشکل نظیر در یک بازه مطالعاتی

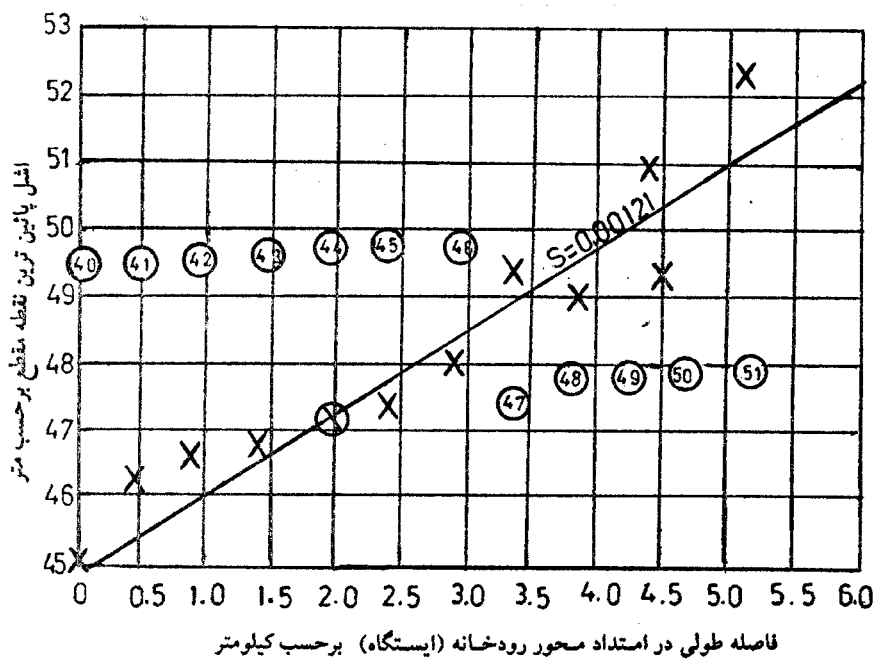
زاهنمای محاسبه مساحت و محیط تر شده از روی پروفیل عرضی:

اگر در مقطع عرضی، هر میلی‌متر محور X برابر a متر و هر میلی‌متر محور Y برابر b متر باشد:

۱- هر خانه ۱×۱ میلی‌متر مربع از مساحت روی پروفیل عرضی معرف مساحت واقعی ab مترمربع خواهد بود.

۲- هر پاره‌خط از مقطع عرضی که تصویر آن روی محور x برابر  $L_x$  میلی‌متر و روی محور Y برابر  $L_y$  میلی‌متر

باشد معرف محیط تر شده به طول واقعی  $\sqrt{(aL_x)^2 + (bL_y)^2}$  متر خواهد بود.



شماره مقطع	فاصله مقطع (m)	رقوم پائین ترین نقطه مقطع (m)
40	45.04	0
41	46.15	472
42	46.53	917
43	46.85	1442
44	47.19	1935
45	47.48	2375
46	48.09	2905
47	49.33	3345
48	49.10	3790
49	49.28	4267
50	50.80	4675
51	52.15	5150

$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^{12} = 31273.00 (m)$
$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^{12} = 577.99 (m)$
$\sum_{i=1}^n x_i y_i = \sum_{i=1}^{12} x_i y_i = 1543225.72$
$\sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^{12} x_i^2 = 112095552.00$
$(\sum_{i=1}^n x_i)^2 = (\sum_{i=1}^{12} x_i)^2 = 978000529.00$

$$\text{شیب منطبق ترین خط} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n y_i) (\sum_{i=1}^n x_i)}{(n \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{12(1543225.72) - (31273)(577.99)}{12(112095552) - (978000529)}$$

$$S = 0.00121 (m/m)$$

شکل ۴- نمونه‌ای از روش محاسبه شیب رودخانه براساس رقوم پائین ترین نقاط در مقاطع مختلف یک بازه

مطالعاتی



در این روش دو راه حل به شرح ذیل قابل توصیه می باشد:

#### راه حل اول :

در صورتی که آمار رقوم سطح آب در مقاطع مختلف در بده های پایین (دبی غالب رودخانه در جریانهای کم) موجود باشد، مشابه با شکل ۴ تغییرات این رقوم (به جای رقوم گودترین نقاط مقاطع عرضی) بر حسب موقعیت مقطع در صفحه مختصات رسم شده و بهترین خط به آن برازش داده می شود و شیب این خط به عنوان شیب متوسط رودخانه (شیب انرژی) در بازه مطالعاتی تلقی می گردد.

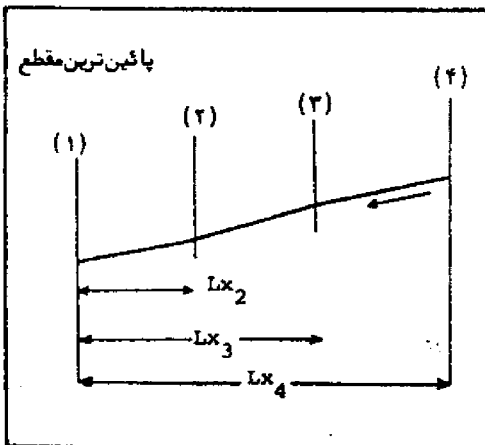
#### راه حل دوم :

در صورتی که آمار رقوم سطح آب در دبی غالب (بدون در نظر گرفتن جریانهای سیلابی) موجود نباشد، یک دبی غالب نظیر جریانهای کم با توجه به آمار دبی انتخاب می گردد. آنگاه سرعت متوسط در این دبی به طور تقریبی تخمین زده می شود، که برای هر مقطع به طور جداگانه موجود است. لذا می توان رقوم سطح آب را در هر مقطع (متناظر با مساحت حساب شده) به دست آورد. مجدداً تغییرات رقوم سطح آب بر حسب موقعیت مقطع رسم شده و سپس بهترین خط بر آن برازش داده می شود. شیب این خط برابر با شیب متوسط رودخانه در بازه مطالعاتی مورد نظر خواهد بود (برای آگاهی از جزئیات مربوط به استفاده از این روش رجوع شود به مثال مندرج در صفحه ۲۱).

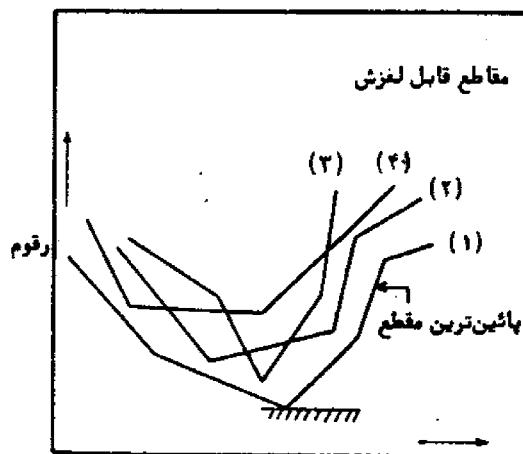
### ۳-۱ تعیین مشخصات مقطع متوسط

بعد از تعیین شیب متوسط بازه مطالعاتی می توان مشخصات مقطع متوسط را تعیین نمود. معمولاً پایین ترین مقطع انتخاب شده و سپس سایر مقاطع در امتداد شیب رودخانه لغزنده می شود تا روی این مقطع قرار گیرد. منظور از لغزاندن یک مقطع در امتداد شیب کانال این است که از کلیه ارقام مندرج در محور عمودی (محور رقوم) منحنی تغییرات مساحت و محیط تر شده مقدار  $SL_x$  کاسته شود.  $L_x$  فاصله مقطع با پایین ترین مقطع (معمولاً مقطع پایاب بازه مطالعاتی) و  $S$  شیب رودخانه در بازه مورد نظر است. کلیه منحنیهای مساحت که به این طریق به دست می آید، همراه با منحنی مساحت پایین ترین مقطع در یک صفحه رسم می شوند. متناظراً کلیه منحنیهای لغزنده شده محیط تر شده بر حسب رقوم نیز در همان صفحه منحنی محیط تر شده پایین ترین مقطع رسم می شوند. حال می توان منحنی متوسط تغییرات مساحت و منحنی محیط تر شده را با متوسط گیری از این منحنیها به دست آورد. در شکل ۵ جزئیات مربوط به تعیین مقطع متوسط به طور ترسیمی نشان داده شده است. از آنجا که عرض متوسط نیز مورد نیاز است، معمولاً علاوه بر منحنی تر شده هر مقطع، دو منحنی تر شده بستر (یا عرض بستر) و محیط تر شده کناره ها

پروفیل طولی

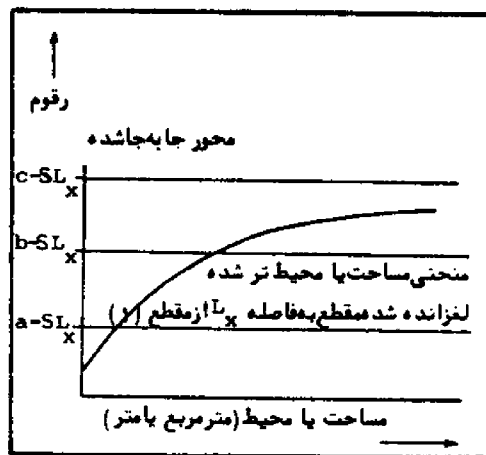
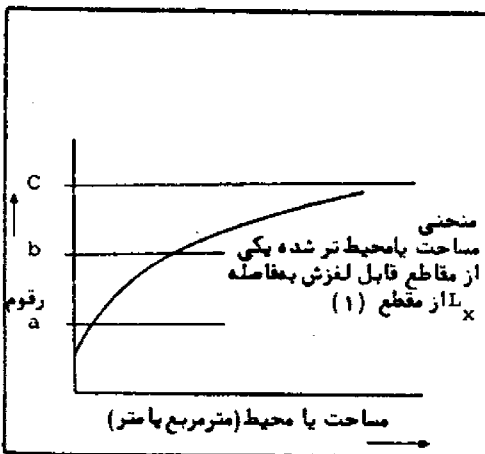


پروفیل‌های عرضی مقاطع

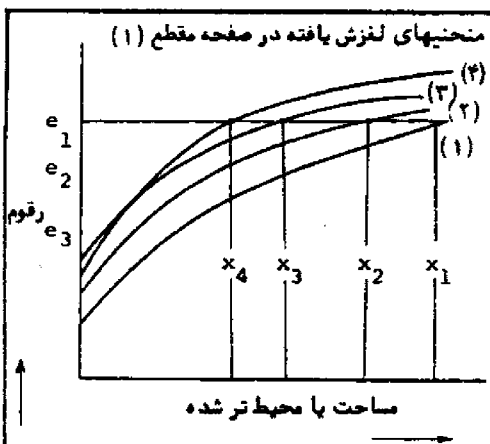


الف - انتخاب پایین‌ترین مقطع

عرض



ب - روش لغزاندن منحنی مساحت یا محیط تر شده



رقوم (m)	مساحت یا محیط تر شده متوسط (m, m <sup>2</sup> )
$e = e_1$	$x_m = \frac{1}{4}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$
$e = e_2$	-----
-----	-----
-----	-----

تعداد رقمهای  $e_1, e_2, \dots$  به حدی است که بتوان منحنی  $e = F(x_m)$  را به دقت خوبی رسم نمود

ج - روش متوسط گیری از مساحت‌ها یا محیط‌های تر شده لغزنده شده به صفحه پایین‌ترین مقطع

شکل ۵- نمایش روش محاسبه تغییرات مساحت و محیط تر شده متوسط در یک بازه مطالعاتی

(محیط تر شده بستر یا عرض بستر به اضافه محیط تر شده کناره = محیط تر شده کل) نیز برای هر مقطع از پروفیل آن محاسبه و رسم می‌گردد (رجوع شود به شکل ۵). این منحنیها (و یا حداقل فقط منحنی محیط تر شده یا عرض بستر) را نیز می‌توان به روش فوق لغزانده و در نتیجه منحنیهای متناظر متوسط را به دست آورد.

در خاتمه، چهار منحنی تغییرات مساحت متوسط، محیط تر شده متوسط، محیط تر شده بستر متوسط (عرض بستر) و بالاخره محیط تر شده کناره‌ها بر حسب رقوم سطح آب به دست می‌آید. این منحنیها مربوط به مقطع متوسط هیدرولیکی است و به همراه شیب طولی می‌توانند کلیه مشخصات هیدرولیکی بازه مطالعاتی را بیان نمایند.

یادآوری می‌شود که پایین‌ترین مقطع، مقطعی است که رقوم گودترین نقطه آن از رقوم مختلف پروفیل کلیه مقاطع پایین‌تر باشد.

بالاخره می‌توان از تقسیم مقادیر متوسط مساحت به مقادیر متوسط محیط کل تر شده در همان رقوم، شعاع هیدرولیکی کل را به دست آورد و منحنی تغییرات آن را بر حسب رقوم سطح آب رسم کرد. البته باید توجه نمود که منحنی به دست آمده، از لغزاندن منحنیهای شعاع هیدرولیکی هر مقطع به طور جداگانه به صفحه پایین‌ترین مقطع، نیز منحنی شعاع هیدرولیکی به دست می‌آید و البته با منحنی اولی تفاوت خواهد داشت. توصیه می‌شود که از روش اول استفاده شود. متناظر با محیط تر شده بستر ( $P_b = \text{عرض بستر}$ ) و محیط تر شده کناره‌ها ( $P_w$ )، سه نوع شعاع هیدرولیکی می‌توان تعریف کرد که عبارتند از: شعاع هیدرولیکی کل ( $R_T = A_T/P_T$ )، شعاع هیدرولیکی بستر ( $R_b = A_b/P_b$ ) و شعاع هیدرولیکی کناره‌ها ( $R_w = A_w/P_w$ ). یادآوری می‌شود که  $P_T$  محیط تر شده کل ( $P_T = P_b + P_w$ ) و  $A_T$  مساحت تر شده کل ( $A_T = A_b + A_w$ ) است. بین شعاعهای هیدرولیکی رابطه  $P_T R_T = R_b P_b + R_w P_w$  برقرار است. به علت اینکه همواره  $P_w$  خیلی کوچکتر از  $P_b$  است (در رودخانه‌های طبیعی)، معمولاً "شعاع هیدرولیکی کل از رابطه  $R_T \frac{A_T}{P_b + P_w} \sim \frac{A_T}{P_b}$  حساب می‌گردد.

#### ۴-۱ نمونه برداری از مواد بستر

برای تعیین  $\sigma$  (چگالی دانه‌ها)،  $d_{90}$ ،  $d_{60}$ ،  $d_{50}$  و غیره معمولاً آنالیز نمونه‌های مواد بستر مورد نیاز است. برای نمونه برداری و تهیه نمونه‌های مورد نیاز لازم است دستورالعمل زیر رعایت گردد (برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص موازین و معیارهای مربوط به تهیه نمونه‌های مواد بستر و آنالیز دانه‌بندی آنها به منابع [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰] مراجعه شود).

#### ۱-۴-۱ درحالتی که بستر رودخانه خشک باشد:

الف- با یک بیلچه رسوبات قشر سطحی موجود در بستر به ضخامت حدود  $2d_{90}$  برداشته می شود. ذرات ریزدانه که عمدتاً متعلق به بار معلق حوضه ای<sup>۱</sup> است حذف می شود و نمونه تهیه شده مورد آزمایش دانه بندی قرار می گیرد.

ب- نمونه هایی از زیر لایه سطحی در محدوده عمق  $d$  متر برداشت می شود. عمق  $d$  بستگی به مشخصات بستر دارد. باید توجه کرد که نمونه برداشت شده معرف محدوده کاملی از رسوبات منتقله رودخانه باشد.

ج- اندازه های  $d_{60}$  و  $d_{90}$  از نمونه الف و  $d_{50}$  از نمونه ب تعیین و متناسب با آن منحنی دانه بندی معرف بستر ترسیم می گردد.

#### ۲-۴-۱ درحالتی که رودخانه دارای جریان آب باشد:

الف- یک قسمت از رسوبات رودخانه ای که خارج از محدوده جریان آب و در حواشی آن قرار دارد، انتخاب و سعی می شود. نمونه های مواد بستر تهیه و برای مقایسه آماده شود. بدیهی است محدوده انتخابی باید معرف خوبی از رسوبات منتقله توسط رودخانه باشد.

ب- نمونه هایی از مواد بستری موجود در قشر سطحی برای آزمایش دانه بندی تهیه می شود. نمونه های تهیه شده در قسمت الف و ب مورد آزمایش قرار می گیرد و از نتایج آن برای ترسیم منحنی دانه بندی مواد بستر استفاده می شود.

#### ۵-۱ محاسبات هیدرولیکی

پس از انتخاب بازه مطالعاتی و فراهم شدن اطلاعات مربوط به مشخصات هندسی مقطع و دانه بندی مواد بستر، محاسبات هیدرولیکی برای تعیین منحنی دبی - اشل را می توان انجام داد. برای تعیین منحنی دبی - اشل دو حالت می توان در نظر گرفت:

#### ۱-۵-۱ تعیین منحنی دبی - اشل با صرف نظر کردن از مقاومت اصطکاکی دیواره ها

اغلب به لحاظ عریض بودن رودخانه ها، می توان از اصطکاک اعمال شده توسط دیواره ها صرف نظر و محاسبات را برای بستر رودخانه ها محدود کرد. در جدول ۱ گامهای مختلف محاسباتی آورده شده است. توضیح هر یک از عوامل جدول ۱ به شرح ذیل است:

1 - Wash - load

۱-۱-۵-۱  $R'_b$  شعاع هیدرولیکی نظیر زبری دانه‌های تشکیل دهنده بستر است و باید برای شروع محاسبات مقدار فرضی برای آن در نظر گرفته شود.  $R'_b$  در عمل از مقادیر کم شروع و تا حداکثر، با توجه به منحنی تغییرات شعاع هیدرولیکی و رقوم سطح آب انتخاب می‌شود.

۲-۱-۵-۱  $u^*$  سرعت برشی مربوط به اصطکاک سطح ذرات بستر است و از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$u^* = \sqrt{gR'_b S} \quad (\text{m/sec}) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $S$  شیب انرژی و  $g$  شتاب ثقل (برابر  $9.81 \text{ m/sec}^2$ ) و  $R'_b$  در بند ۱ توضیح داده شده است.

۳-۱-۵-۱  $\delta$  ضخامت قشر ورقه‌ای یا لایه نظیر جریان آرام است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

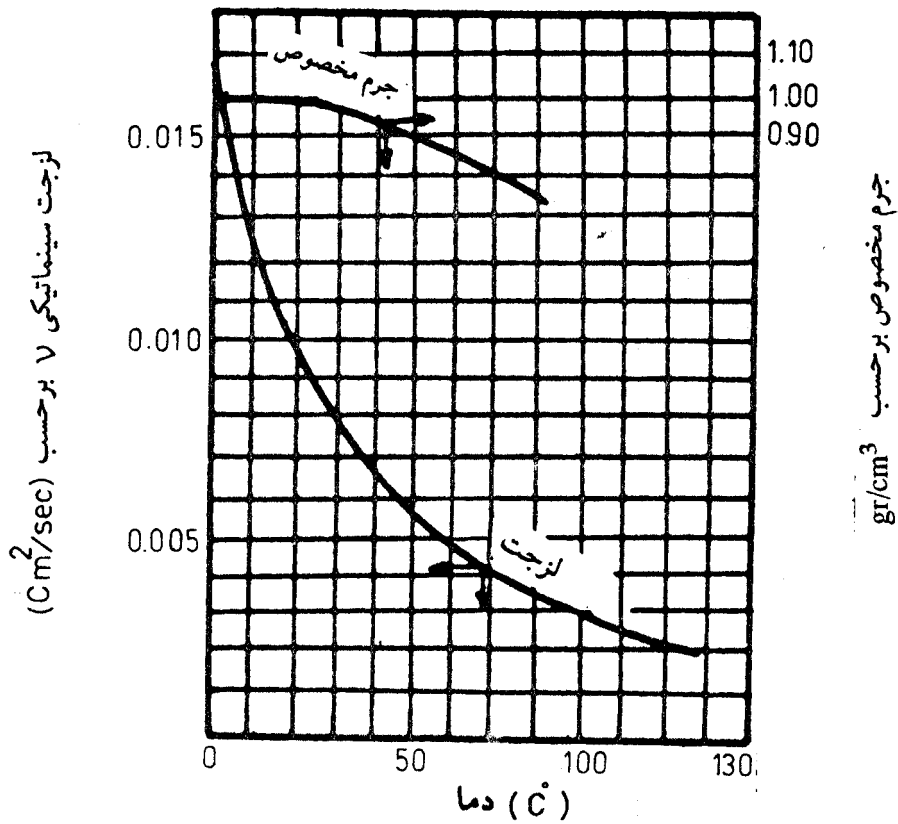
$$\delta = \frac{11.6\nu}{u^*} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

در این رابطه  $\nu$  لزجت سینماتیکی آب است (بر حسب  $\text{m}^2/\text{sec}$ ). ضریب لزجت سینماتیکی برای آب در دمای  $20^\circ$  درجه سانتیگراد حدوداً برابر  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  است و برای سایر درجه حرارتها از شکل ۶ و جدول مربوط به آن تعیین می‌شود.

۴-۱-۵-۱  $K_s/\delta$  به صورت یک کمیت بدون بعد محاسبه می‌شود. منظور از  $K_s$  قطر زبری ذرات بستر است که اغلب معادل  $d_{65}$  منظور می‌شود و از منحنی دانه‌بندی مواد بستری به دست می‌آید.  $d_{65}$  قطری از ذرات است که ۶۵ درصد وزنی رسوبات از آن کوچکترند.

جدول ۱- محاسبات هیدرولیکی برای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه بدون در نظر گرفتن اصطکاک دیواره‌ها

۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
$y_0$	Q	$P_b$	$A_T$	H	$R_b=R_T$	$R''_b$	$u''^*$	$u/u''^*$	$\psi'$	u	$\Delta$	x	$K_s/\delta$	$\delta$	$u'^*$	$R'_b$
(m)	(m <sup>3</sup> /sec)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m)	(m/sec)	(-)	(-)	(m/sec)	(m)	(-)	(-)	(m)	(m/sec)	(m)



شکل ۶- تغییرات لزجت سینماتیکی و جرم مخصوص آب بر حسب درجه حرارت

درجه حرارت (°C)	جرم مخصوص (kg /m <sup>3</sup> )	لزجت $\nu$ (cm <sup>2</sup> /sec)
0	999.3	0.0180
10	999.3	0.0130
20	997.3	0.0101
40	991.5	0.0066
60	982.6	0.0048
80	971.8	0.0037
100	959.1	0.0030

۵-۱-۵-۱ x ضریب تصحیح عبور از مرز صاف به مرز ناصاف جریان است و از شکل ۷ به دست می آید.

۶-۱-۵-۱  $\Delta$  برای هریک از مقادیر x متناظر با  $R'_b$  از رابطه  $\Delta = K_s/x$  بر حسب متر به دست می آید. مقدار  $\Delta$  را زبری ظاهری می نامند.

۷-۱-۵-۱ u سرعت متوسط است که برای هریک از ردیفهای متناظر با  $R'_b$  طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$u = 0.75 u^* \log_{10} \left( 12.7 \frac{R'_b}{\Delta} \right) \quad \text{m/sec} \quad (7)$$

۸-۱-۵-۱  $\psi'$  معرف تأثیرات اصطکاکی مربوط به زبری سطح دانههای مواد بستری است. پارامتر  $\psi'$  برای هریک از ردیفهای  $R'_b$  محاسبه می گردد:

$$\psi' = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \frac{d_{35}}{R'_b S} \quad (8)$$

منظور از  $\rho_s$  و  $\rho_f$  به ترتیب جرم مخصوص دانههای رسوب و آب است و معمولاً به ترتیب حدود ۲/۶۵ و ۱ گرم جرم بر سانتیمتر مکعب و یا ارقام دقیقتری که از آزمایش تعیین جرم مخصوص دانههای بار بستر به دست می آید، در نظر گرفته می شوند.  $\rho_f$  را می توان بر حسب درجه حرارت آب به طور دقیق از شکل ۶ نیز تعیین نمود.  $d_{35}$  قطری از ذرات است که ۳۵ درصد وزنی رسوبات از آن کوچکترند ( $d_{35}$  بر حسب متر است).

۹-۱-۵-۱ نسبت  $u/u^*$  بر حسب  $\psi'$  از شکل ۸ برای هر ردیف  $R'_b$  به دست می آید.  $u^*$  سرعت برشی متناظر با ناهمواریهای موجود در بستر است.

۱۰-۱-۵-۱  $u^*$  بر اساس نسبت تعیین شده برای  $u/u^*$  و کمیت سرعت متوسط به دست می آید (m/sec).

۱۱-۱-۵-۱  $R''_b$  برای هر ردیف  $R'_b$  از رابطه ذیل تعیین می شود:

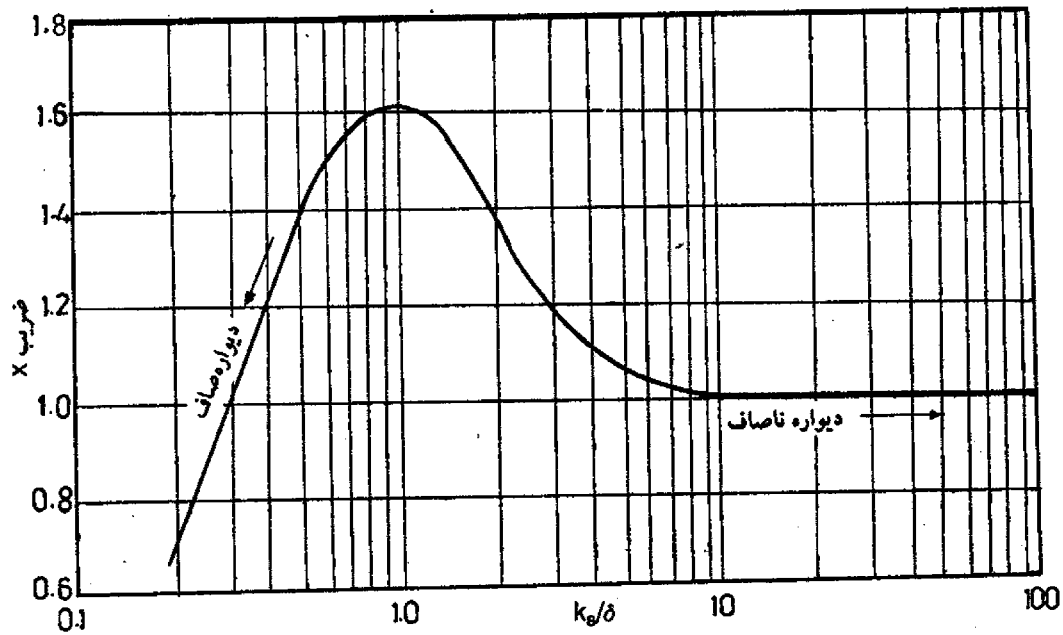
$$R''_b = \frac{u^{*2}}{S.g} = \frac{u^{*2}}{9.81 S} \quad (m) \quad (9)$$

مقدار  $R''_b$  شعاع هیدرولیکی نظیر: ناهمواری و تضاریس موجود در بستر است.

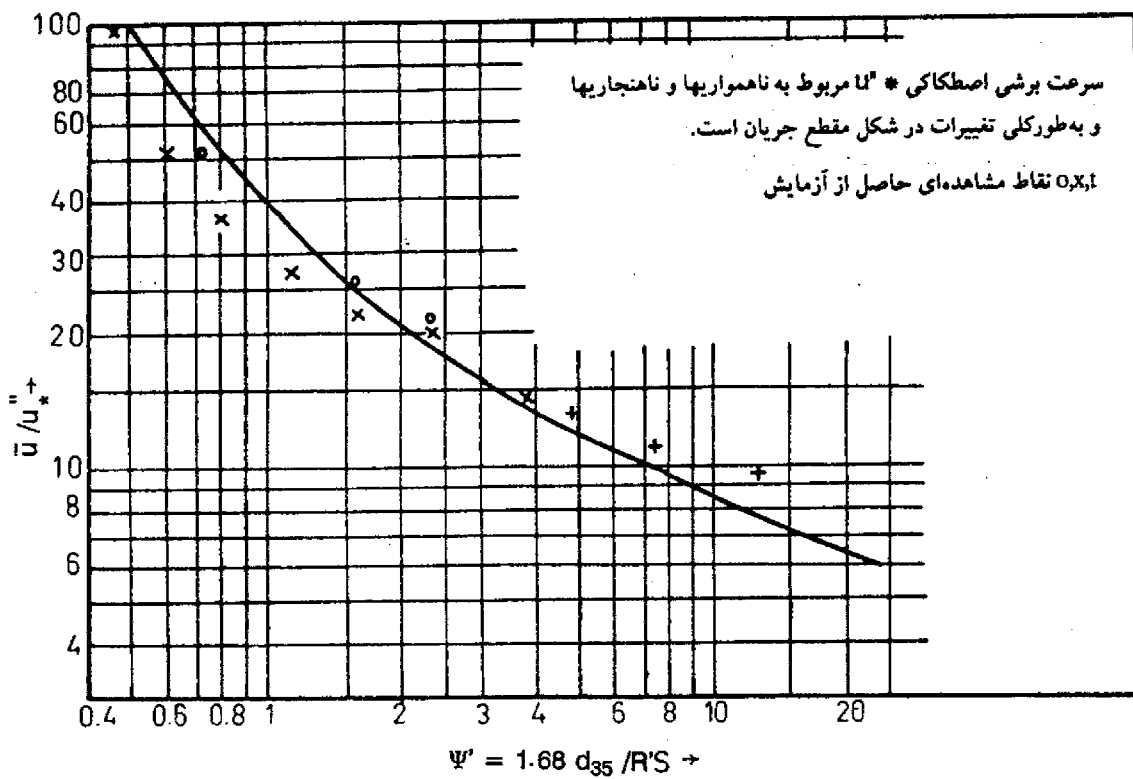
۱۲-۱-۵-۱  $R_b$  شعاع هیدرولیکی کل بستر است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_b = R'_b + R''_b \quad (m) \quad (10)$$





شکل ۷- تغییرات ضریب تصحیح X بر حسب نسبت  $k_0/\delta$



شکل ۸- رابطه بین پارامترهای  $\psi'$  و  $\bar{u}/u_*''$

چون از مقاومت اصطکاکی جداره‌ها صرف‌نظر شده است، لذا  $R_b$  مساوی شعاع هیدرولیکی کل مقطع ( $R_T$ ) است.

$$R_T = R_b \quad (m) \quad (11)$$

۱-۵-۱۳ چون منحنی تغییرات شعاع هیدرولیکی کل ( $R_T$ ) بر حسب اشل (رقوم سطح آب) معلوم است، لذا با معلوم بودن مقادیر  $R_T$  مقدار  $H$  بر حسب متر تعیین می‌شود.

۱-۵-۱۴ و ۱۵ چون منحنی تغییرات مساحت کل ( $A_T$ ) و محیط تر شده ( $P_b$ ) بر حسب اشل ( $H$ ) معلوم است، لذا با معلوم بودن  $H$  مقادیر  $A_T$  و  $P_b$  نیز مشخص می‌گردد.

۱-۵-۱۶ دبی جریان ( $Q$ ) بر حسب مترمکعب در ثانیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = A_T \cdot \bar{u} \quad (m^3/sec) \quad (12)$$

منحنی تغییرات دبی جریان ( $Q$ ) بر حسب اشل ( $H$ ) از ترسیم نتایج حاصله از ردیف‌های ۱۶ و ۱۲ به ازای مقادیر مختلف  $R'_b$  تعیین می‌شود.

۱-۵-۱۷  $y_0$  عمق متوسط آب است و از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$y_0 = R_b = \frac{A_T}{P_b} \quad (m) \quad (13)$$

۱-۵-۲ تعیین منحنی دبی - اشل بادر نظر گرفتن مقاومت اصطکاکی دیواره‌ها:

برای این حالت مراحل ۱ تا ۱۲ مشابه حالت (۱-۵-۱) بوده و سایر مراحل آن در جدول ۲ آورده شده است. در ذیل به توضیح هر یک از عوامل مندرج در جدول ۲ پرداخته می‌شود:

۱-۵-۲-۱۳  $R_w$  شعاع هیدرولیکی کناره‌ها (دیواره‌ها) بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_w = \left( \frac{\bar{u} n_w}{\sqrt{S}} \right)^{1/5} \quad (m) \quad (14)$$

در این رابطه  $n_w$  ضریب مانینگ کناره‌های مقطع است که بسته به چگونگی سطح کناره‌ها و میزان رویش نباتات در آن قابل تخمین است. مقدار  $R_w$  برای هر ردیف  $R'_b$  حساب می‌شود.

جدول ۲- محاسبات هیدرولیکی برای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با در نظر گرفتن اصطکاک دیواره‌ها

ستون ۱ تا ستون ۱۲ از جدول ۱ (تکرار)	۱۳ (تکرار)	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
	$R_w$ (m)	H (m)	$P_b$ (m)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$P_w$ (m)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	$R_T$ (m)	$y_o$ (m)

۱-۲-۵-۱۴ مقادیر جدید H(اشل) که به ازای آن رابطه :

$o, x, t$  نقاط مشاهده‌ای حاصل از آزمایش

$$A_T = P_b R_b + P_w R_w \quad (m^2) \quad (15)$$

برقرار است از آزمون و خطا به دست می‌آید. برای هر ردیف  $R'_b$  مقادیر  $R_b$  از مرحله ۱۲ و  $R_w$  از مرحله ۱۳ (جدول ۲) محاسبه می‌شود و تغییرات  $P_w$  (محیط تر شده دیواره‌ها) و  $P_b$  و  $A_T$  بر حسب رقوم (اشل) سطح آب معلوم است.

با رسم منحنی تغییرات  $(P_b R_b + P_w R_w)$  بر حسب رقوم برای هر  $R'_b$  معین در صفحه تغییرات  $A_T$  بر حسب رقوم و تلاقی این دو منحنی می‌توان رقوم سطح آب موردنظر را به دست آورد.

۱-۲-۵-۱۴ (۱۵-۱۶-۱۷-۱۹ و ۲۰) مقادیر  $P_w, P_b, R_T$  و  $A_T$  متناظر با رقومهای به دست آمده در مرحله ۱۴

به ازای هر  $R'_b$  معین تعیین می‌شوند (از منحنی تغییرات  $R_w, R_b, P_b$  و  $A_T$  بر حسب رقوم سطح آب). مقدار  $R_T$  در رابطه  $R_T = A_T / P_T$  و سایر مقادیر در رابطه  $A_T = R_b P_b + R_w P_w$  صدق خواهند نمود. معمولاً شعاع هیدرولیکی کل به جای  $R_T = A_T / P_b$  از رابطه  $R_T = A_T / P_T$  حساب می‌شود. در این صورت عمق متوسط جریان را نیز می‌توان مساوی آن فرض کرد ( $y_o = R_T$ )

۱-۲-۵-۱۸ دبی جریان (Q) برای هر ردیف  $R'_b$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = A_T \cdot \bar{u} \quad (m^3/sec) \quad (15)$$

منحنی تغییرات دبی جریان (Q) بر حسب اشل (H) از رسم نتایج حاصله در قسمت ۱۸ و ۱۴ به دست می‌آید.

## ۲- مثال

به منظور نشان دادن چگونگی استفاده از دستورالعمل‌های فوق، رودخانه فرضی را در نظر می‌گیریم. این رودخانه، دارای حوضه آبریزی به وسعت ۲۵۶ کیلومتر مربع است.

گام اول - موقعیت بازه مطالعاتی با در نظر گرفتن محل تنها ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی این رودخانه تعیین می‌گردد. بازه مطالعاتی برابر حدود ۵ کیلومتر و بر مبنای ملاحظات زیر انتخاب شده است :

بازه مطالعاتی باید به عنوان کانال با مقطع یکنواخت و با جریان یکنواخت تلقی گردد. از آنجا که در

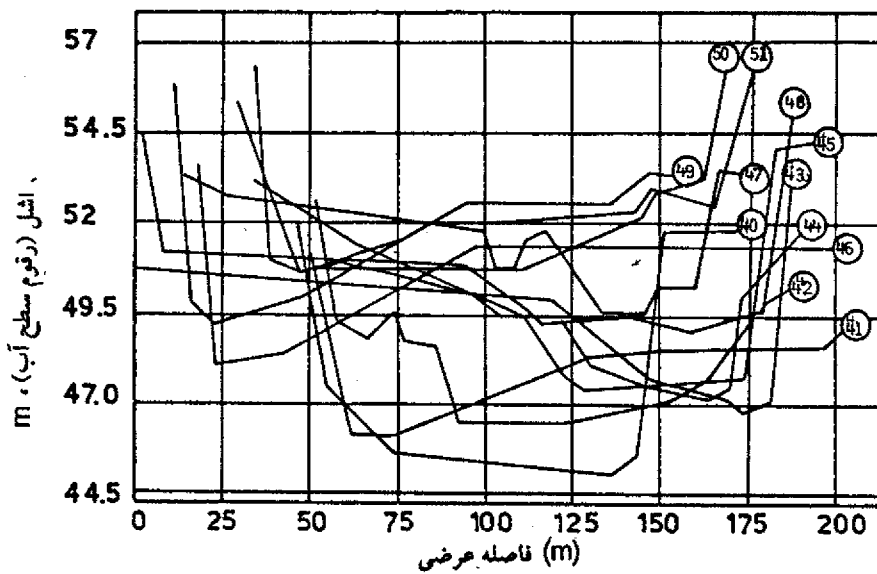
جریان یکنواخت در کانال با مقطع یکنواخت، سرعت در طول کانال ثابت است، بنابراین باید بتوان از هر نوع افت خط انرژی به علت تغییرات سرعت (و نتیجتاً ارتفاع معادل سرعت  $\frac{u^2}{2g}$ ) با دقت قابل قبولی صرفنظر نمود. در این بازه، سرعت در بده‌های بالا بین ۳ تا ۳/۴ متر بر ثانیه است، که متناظر با ارتفاع معادل سرعت حداکثر  $u^2/2g = 0/6$  متر است. حدود ۳۰ درصد تغییر در مقدار سرعت معادل  $0/18$  متر تغییر در ارتفاع معادل سرعت، قابل انتظار است (در بازه مطالعاتی). اگر شیب بستر در این قسمت از رودخانه حدود  $0/001$  باشد، افت خط انرژی بین ابتدا و انتهای بازه مطالعاتی برابر  $(5 = 5 \times 10^3 \times 0/001)$  متر خواهد بود. نسبت  $(0/18)/(5)$  برابر حدود  $0/04$  است که قابل قبول است. بدین ترتیب می‌توان از افت خط انرژی به دلیل تغییرات سرعت با دقت خوبی صرفنظر کرد، زیرا این افت حداکثر حدود  $4/100$  مقدار کل افت خط انرژی بین ابتدا و انتهای بازه مطالعاتی است.

گام دوم - مقاطع عرضی رودخانه در بازه مطالعاتی (۵ کیلومتر)، برداشت شده و به صورت شکل ۹ رسم گردیده‌اند. فاصله بین این مقاطع و درواقع ایستگاههای مختلفی که این مقاطع در آنها واقع گردیده‌اند، بر طبق شکل ۱۰ است. ترازهای آب نشان داده شده در شکل ۱۰، در هر مقطع، مربوط به رقوم سطح آب با مساحت تر شده  $4/65$  مترمربع است. این رقم به این دلیل انتخاب شده که معرف بده‌های کم در رودخانه است. برای به دست آوردن ترازهای مزبور لازم است ابتدا از منحنیهای شکل ۹، تغییرات مساحت تر شده مقطع بر حسب رقوم سطح آب محاسبه گردد. این محاسبات انجام شده و نتایج آنها در شکل ۱۱ داده شده است. بدیهی است محاسبات مذکور را می‌توان با رسم منحنیهای شکل ۹ روی کاغذ میلیمتری و شمارش خانه‌ها، انجام داد. آنگاه ترازهای رقوم سطح آب از منحنیهای شکل ۱۱ متناظر با مساحت  $4/65$  مترمربع به دست می‌آید.

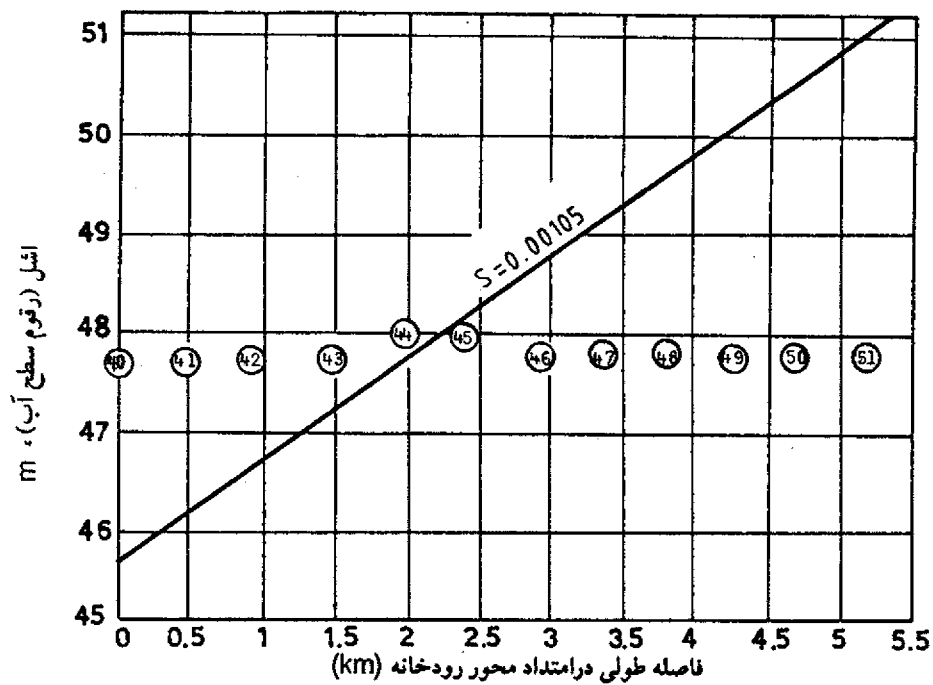
متناظراً می‌توان از منحنیهای شکل ۹ (رسم شده روی کاغذ میلیمتری) تغییرات محیط تر شده را بر حسب رقوم سطح آب در هر مقطع به دست آورد. در مواردی که مقطع رودخانه عریض و عمق آب کم است، می‌توان محیط تر شده را مساوی عرض سطح آب در نظر گرفت.

گام سوم - مناسب‌ترین خط با استفاده از روش "حداقل مربعات به ترازهای آب مندرج در شکل ۱۰ برازش داده می‌شود. شیب چنین خطی برابر (متر/متر)  $0/00105$  خواهد بود. این رقم معرف شیب کانال یکنواختی است که باید در محاسبات مربوط به منحنی دبی - اشل به کار رود.

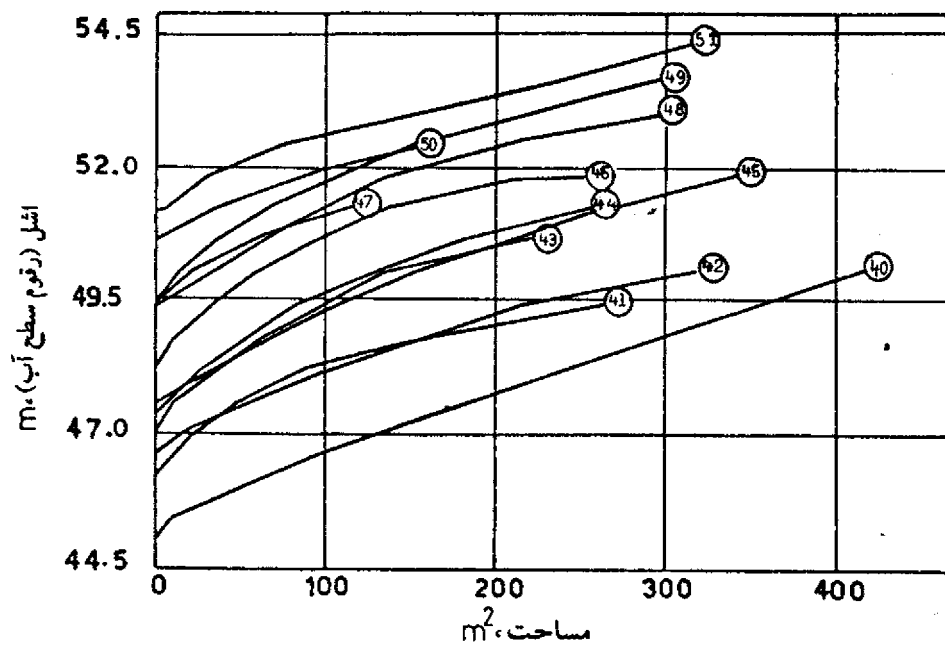
گام چهارم - برای به دست آوردن مقطع متوسط، کلیه مقاطع تر شده عرضی در بازه مطالعاتی در امتداد طولی لغزنده می‌شود و به قسمت انتهایی منتقل می‌گردد. این لغزش با شیب (متر/متر)  $0/00105$  صورت می‌گیرد. سپس همه مقاطع لغزنده شده در یک صفحه رسم می‌شوند (شکل ۱۲) و متوسط آنها به عنوان، مقطع متوسط در بازه مطالعاتی انتخاب می‌گردد. عمل لغزاندن یک مقطع بدین صورت انجام می‌شود که از کلیه رقوم نقاط مختلف آن مقطع، رقم  $L_x$   $0/00105$  کاسته می‌شود.  $L_x$  فاصله آن مقطع تا انتهای قسمت است. در محاسبه مقطع متوسط، لازم است که برای هر رقوم، مقدار متوسط مقاطع لغزنده شده طبق رابطه زیر محاسبه گردد:



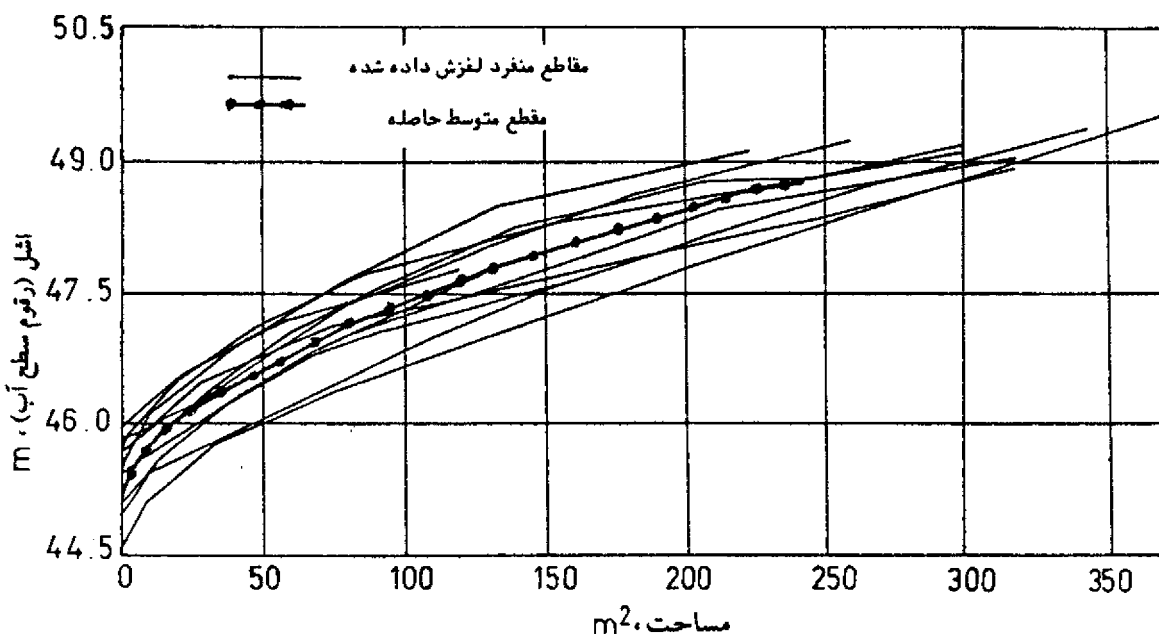
شکل ۹- مقاطع عرضی دوازده مقطع رودخانه مفروض



شکل ۱۰- محاسبه شیب متوسط بر اساس رقوم سطح آب در رودخانه مفروض



شکل ۱۱- تغییرات مساحت برحسب اشل در مقاطع مختلف



شکل ۱۲- منحنیهای لفرزنده شده مساحت به صفحه مقطع شماره ۴۰

$$A_m = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} A_i \quad (17)$$

$A_m$  مقطع متوسط برای رقوم مورد نظر و  $A_i$  مقاطع لغزانده شده در همان رقوم است. مشابه با روند محاسبه تغییرات مساحت مقطع متوسط بر حسب رقوم، می توان تغییرات محیط تر شده متوسط (بستر و کناره ها) را نیز بر حسب رقوم حساب کرد. محیط متوسط، برابر متوسط محیطهای لغزانده شده مقاطع مختلف خواهد بود. شکل ۱۳ تغییرات مساحت مقطع متوسط و محیط تر شده متوسط محاسبه شده بر حسب رقوم را نشان می دهد. البته در شکل ۱۳ برای محیط تر شده دو منحنی محاسبه شده است که مربوط به محیط تر شده کف و کناره ها است. تغییرات شعاع هیدرولیکی بر حسب رقوم را می توان از تقسیم مساحت مقطع به محیط تر شده (جمع دو محیط تر شده بستر و کناره ها) به دست آورد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. باید توجه نمود که می توان تغییرات شعاع هیدرولیکی بر حسب رقوم را از لغزاندن منحنیهای متناظر مربوط در مقاطع مختلف و محاسبه متوسط منحنیهای لغزانده شده به دست آورد. البته منحنی به دست آمده برای شعاع هیدرولیکی متفاوت با منحنی قبلی خواهد بود، توصیه می شود که از روش اول استفاده گردد، یعنی شعاع هیدرولیکی متوسط از تقسیم مساحت مقطع متوسط به محیط تر شده متوسط به دست آید، نه از متوسط شعاع هیدرولیکی.

گام پنجم - دانه بندی رسوبات بستر در بازه مطالعاتی از نمونه برداری و آنالیز نمونه ها به دست می آید. اگر مقاطع عرضی رودخانه در بازه مطالعاتی خیلی یکنواخت باشد، معمولاً سه تا پنج نمونه کافی است. برای رودخانه مربوط به این مثال، چهار نمونه مورد آنالیز قرار گرفته است. هریک از این چهار نمونه مربوط به یک مقطع عرضی است و خود از ترکیب ۳ تا ۴ نمونه که از نقاط با فاصله مساوی در عرض بستر آن مقطع برداشت شده، به دست آمده است. نمونه برداری از ۳ تا ۴ نقطه با فاصله مساوی در عرض هر بستر هر مقطع توسط اگر با نمونه بردار لوله ای صورت گرفته و ارتفاع هر نمونه برداشت شده حدود ۶۰ سانتیمتر بوده است (از سطح بستر تا عمق ۶۰ سانتی متری، عمقی است که احتمال فرسایش در آن می رود و به عبارت دیگر محدوده فعالیت و حرکت بار بستر، تشخیص داده شده است). به طوری که گفته شد، نمونه های برداشت شده از یک مقطع با هم ترکیب گردیده است. دانه بندی نمونه های ترکیب شده در جدول ۳ داده شده، که بیانگر دانه بندی متوسط در چهار مقطع عرضی در بازه مطالعاتی است.



جدول ۳- دانه‌بندی چهارنمونه ترکیب شده رسوبات بستر رودخانه موردنظر

متوسط		نمونه ۴ (%)	نمونه ۳ (%)	نمونه ۲ (%)	نمونه ۱ (%)	محدوده اندازه ذرات (mm)
متوسط هندسی (mm)	(%)					
--	۲/۴	۱/۴	۵/۷	۱/۴	۱/۳	$d > ۰/۵۸۹$
۰/۵۲۶	۱۷/۸	۱۵/۴	۲۷/۵	۹/۸	۱۸/۶	$۰/۵۸۹ > d > ۰/۴۷۱$
۰/۳۵۱	۴۰/۲	۴۰/۹	۳۵/۹	۳۶/۱	۴۷/۷	$۰/۴۷۱ > d > ۰/۲۹۵$
۰/۲۴۸	۳۲/۰	۳۵/۶	۲۳/۷	۴۰/۴	۲۸/۲	$۰/۲۹۵ > d > ۰/۲۰۸$
۰/۱۷۵	۵/۸	۵/۷	۵/۷	۹/۳	۲/۶	$۰/۲۰۸ > d > ۰/۱۴۷$
--	۱/۸	۱/۰	۱/۵	۳/۰	۱/۶	$۰/۱۴۷ > d$

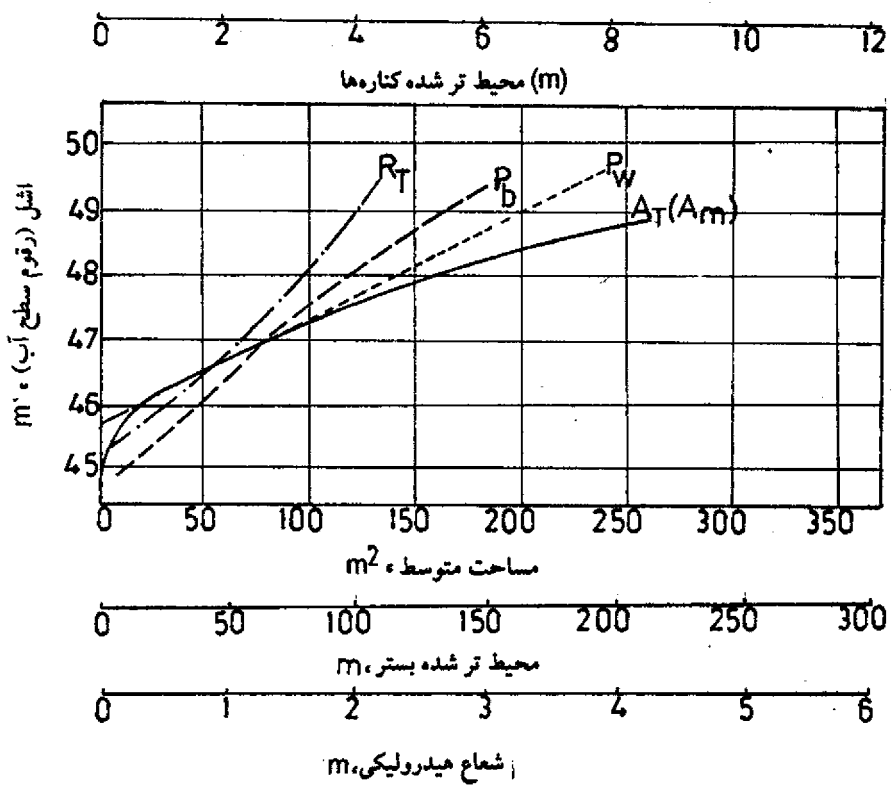
این ۴ مقطع عرضی طوری انتخاب شده‌اند که معرف دانه‌بندی موجود در تمام بازه مطالعاتی باشند. انتخاب مقاطع با فاصله مساوی عموماً مطلوب است. آخرین ستون جدول ۳ بیانگر متوسط به دست آمده از آنالیز چهارنمونه ترکیب یافته است. این ستون نشان‌دهنده درصد وزنی رسوبات واقع در هر محدوده اندازه  $d_i$  تا  $d_{i+1}$  میلی‌متر است و به علاوه متوسط هندسی این محدوده را نیز نشان می‌دهد. متوسط هندسی در محدوده  $d_i$  تا  $d_{i+1}$  میلی‌متر از رابطه:

$$\log d_m = \frac{1}{2} (\log d_i + \log d_{i+1}) \quad d_m = \sqrt{d_{i+1} \times d_i} \quad (\text{mm})$$

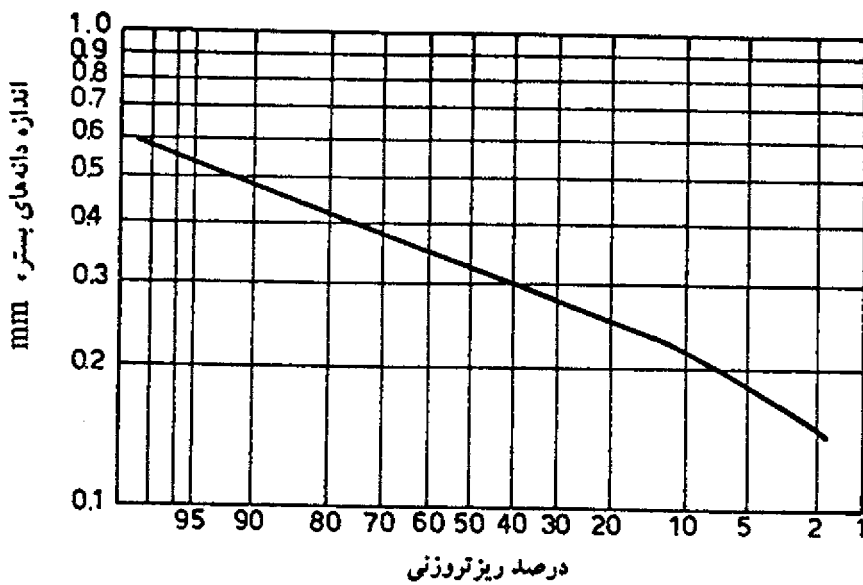
به دست آمده است.

شکل ۱۴ بیانگر منحنی تغییرات قطر متوسط هندسی، بر حسب درصد وزنی ذرات کوچکتر از قطر متوسط هندسی است (دانه‌بندی متوسط ذرات بستر). از این منحنی می‌توان اندازه‌های موردنیاز برای محاسبات موردنظر را به دست آورد.

در صورتی که بازه مطالعاتی، یکنواختی کمتری داشته باشد، تعداد نمونه‌های بیشتر و سنگینتر موردنیاز است. همچنین اگر رسوبات بستر رودخانه درشت‌دانه باشند، هریک از نمونه‌های آنالیز شده به چند صد کیلو نیز می‌رسد. (در خصوص موازین و معیارهای تهیه نمونه‌های مواد بستری و آنالیز آنها به مراجع [۷]، [۸] و [۹] مراجعه شود).  
گام ششم- محاسبات هیدرولیکی برای تعیین منحنی (دبی-اشل) طبق دستورالعمل مندرج در بند ۱-۵ این راهنما انجام می‌گیرد. خلاصه محاسبات در جداول ۴ و ۵ داده شده است.



شکل ۱۳- تغییرات مساحت و محیط و شعاع هیدرولیکی بر حسب اشل و مقطع متوسط



شکل ۱۴- دانه بندی متوسط رسوبات بستر

جدول ۴- محاسبات هیدرولیکی منحنی دبی - اشل با صرف نظر کردن از اصطکاک دیواره‌ها برای رودخانه مفروض

۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
$y_0$	Q	$P_b$	$A_T$	H	$R_b=R_T$	$R''_b$	$u''^*$	$u/u''^*$	$\psi'$	u	$\Delta$	x	$K_s/\delta$	$\delta$	$u^*$	$R'_b$
(m)	(m <sup>3</sup> /sec)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m)	(m/sec)	(-)	(-)	(m/sec)	(m) × ۱۰ <sup>-۳</sup>	(-)	(-)	(m)	(m/sec)	(m)
۰/۴۲	۱۱/۵۸	۳۱/۴	۱۳/۰	۴۵/۸	۰/۴۱۵	۰/۲۶۲	۰/۰۵۲	۱۶/۸	۲/۹۸	۰/۸۸۰	۰/۲۲۰	۱/۵۹	۱/۱۷	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۳۹	۰/۱۵۲
۰/۵۴	۳۰/۱۵	۴۱/۵	۲۲/۳	۴۶/۰	۰/۵۳۶	۰/۲۳۲	۰/۰۴۹	۲۷/۰	۱/۴۹	۱/۳۵۳	۰/۲۴۰	۱/۴۶	۱/۶۷	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۵۶	۰/۳۰۵
۰/۷۶	۷۹/۸۴	۵۱/۸	۳۹/۵	۴۶/۴	۰/۷۶۲	۰/۱۵۲	۰/۰۴۰	۵۱/۰	۰/۷۵	۲/۰۲۱	۰/۲۷۶	۱/۲۷	۲/۳۳	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۷۹	۰/۶۱۰
۱/۰۱	۱۵۲/۳۲	۵۹/۱	۵۹/۵	۴۶/۷	۱/۰۰۶	۰/۰۹۱	۰/۰۳۰	۸۷/۰	۰/۵۰	۲/۵۶۰	۰/۲۹۷	۱/۱۸	۲/۹۲	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۹۷	۰/۹۱۴
۱/۲۶	۲۷۲/۳۷	۷۱/۳	۹۰/۱	۴۷/۲	۱/۲۶۲	۰/۰۴۳	۰/۰۲۱	۱۵۰/۰	۰/۳۷	۳/۰۲۳	۰/۳۰۷	۱/۱۴	۳/۵۰	۰/۰۰۰۱۰	۰/۱۱۲	۱/۲۱۹
۱/۵۴	۴۶۸/۵۸	۸۸/۱	۱۳۶/۱	۴۷/۸	۱/۵۴۵	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵	۲۴۰/۰	۰/۳۰	۳/۴۴۴	۰/۳۱۸	۱/۱۰	۳/۸۴	۰/۰۰۰۰۹	۰/۱۲۶	۱/۵۲۴
۱/۸۴	۸۵۵/۶۱	۱۲۱/۳	۲۲۹/۹	۴۸/۶	۱/۸۳۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۳۷۰/۰	۰/۲۵	۳/۸۳۰	۰/۳۲۴	۱/۰۸	۴/۲۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۱۳۷	۱/۸۲۹

ستون ۹: تعیین  $u/u''^*$  طبق شکل ۸ مرحله ۹

ستون ۱۰: محاسبه  $u''^*$  طبقه مرحله ۱۰

ستون ۱۱: محاسبه  $R''_b$  طبق فرمول (۹)، مرحله ۱۱

ستون ۱۲: محاسبه  $R_b$  طبق فرمول (۱۰)، مرحله ۱۲

ستون ۱۳: تعیین رقوم سطح آب (H) از منحنی  $R_T$  در شکل ۱۳ (با فرض  $R_T = R_b$ )، طبق مرحله ۱۳

ستون ۱۴: از منحنی  $A_T$  در شکل ۱۳ طبق مرحله ۱۴

ستون ۱۵: از منحنی  $P_b$  در شکل ۱۳، طبق مرحله ۱۴ و ۱۵

ستون ۱۶: تعیین Q از رابطه (۱۲)، مرحله ۱۶

ستون ۱۷: عمق متوسط جریان ( $y_0$ ) مساوی شعاع هیدرولیکی  $R_T$  (مساوی شعاع هیدرولیکی بستر  $R_b$ ) در نظر گرفته می‌شود، مرحله ۱۷

ستون ۱: مقادیر فرض شده برای  $R'_b$

ستون ۲: محاسبه  $u^*$  طبق رابطه (۵) با فرض  $S = ۰/۰۰۱۰۵$

ستون ۳: محاسبه  $\delta$  طبق رابطه (۶)، با فرض  $\nu = 10^{-6} (m^2/s)$

ستون ۴: محاسبه نسبت  $K_s/\delta$ ،  $K_s = d_{\phi 5} = ۰/۳۵ (mm)$

ستون ۵: تعیین ضریب x از شکل ۷

ستون ۶: محاسبه  $\Delta$  طبق مرحله ۶

ستون ۷: محاسبه u طبق رابطه (۷)، مرحله ۷

ستون ۸: محاسبه تابع  $\psi'$  با فرض:  $\rho_f$  و  $\rho_s = 2.65$ ,  $d_{\phi 5} = ۰/۲۹ (mm)$

جدول ۵- محاسبات هیدرولیکی منحنی دبی - اشل با در نظر گرفتن اصطکاک دیواره‌ها برای رودخانه مفروض

ستون ۱ (تکرار)	ستون ۱۲ (تکرار)	ستون ۷ (تکرار)	ستون ۱۳	ستون ۱۴	ستون ۱۵	ستون ۱۶	ستون ۱۷	ستون ۱۸	ستون ۱۹	ستون ۲۰
$R_b$ (m)	$R_b$ (m)	$u$ (m/sec)	$R_w$ (m)	$H$ (m)	$P_b$ (m)	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$P_w$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /sec)	$R_T$ (m)	$y_0 = R_T$
۰/۱۵۲	۰/۴۱۵	۰/۸۸۰	۱/۶۰۳	۴۵/۷	۳۱/۴	۱۳/۰	۰/۰	۱۱/۵۸	۰/۳۷	۰/۳۷
۰/۳۰۵	۰/۵۳۶	۱/۳۵۳	۲/۹۸۷	۴۶/۰	۳۹/۶	۲۳/۲	۰/۷	۳۱/۴۳	۰/۵۸	۰/۵۸
۰/۶۱۰	۰/۷۶۲	۲/۰۲۱	۵/۴۸۶	۴۶/۶	۵۵/۸	۵۲/۰	۰/۷	۱۰۵/۰۴	۰/۹۰	۰/۹۰
۰/۹۱۴	۱/۰۰۶	۲/۵۶۰	۷/۶۲۰	۴۷/۴	۷۵/۶	۱۰۱/۳	۳/۲	۲۵۹/۳۴	۱/۲۹	۱/۲۹
۱/۲۱۹	۱/۲۶۲	۳/۰۲۳	۱۰/۰۵۸	۴۸/۳	۱۰۶/۴	۱۸۵/۸	۵/۱	۵۶۲/۰۱	۱/۶۷	۱/۶۷
۱/۵۲۴	۱/۵۴۵	۳/۴۴۴	۱۲/۱۹۱	۴۹/۱	۱۳۶/۸	۲۹۳/۵	۶/۷۱	۱۰۱۰/۷۶	۲/۰۵	۲/۰۵
۱/۸۲۹	۱/۸۳۸	۳/۸۳۰	۱۴/۳۲۵	---	---	---	---	---	---	---

ستون ۱۳: از رابطه ۱۴، با فرض  $n_w = ۰/۰۵$  (وضعیت رویش نباتات در کناره‌ها راهنمای تخمین  $n_w$  است).

ستون ۱۴: محاسبه اشل ( $H$ ) روش ترسیمی مندرج در مرحله ۱۴. شکل ۱۵ مربوط به این محاسبات است،  $R_w$  برای آخرین ردیف جدول خارج از محدوده منحنیهای شکل ۱۳ است.

ستون ۱۵: محاسبه  $P_b$  از منحنی  $P_b$  در شکل ۱۳

ستون ۱۶: محاسبه  $A_T$  از منحنی  $A_T$  در شکل ۱۳

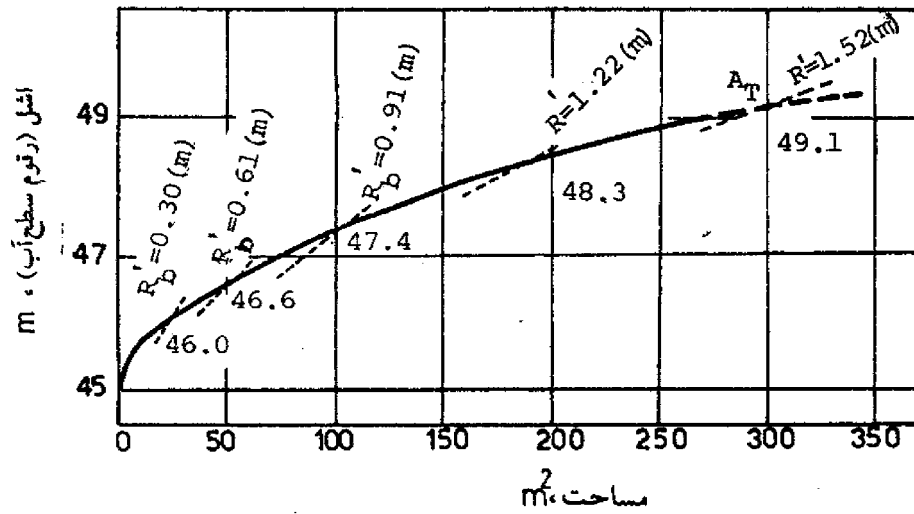
ستون ۱۷: محاسبه  $P_w$  از منحنی  $P_w$  در شکل ۱۳

ستون ۱۸: محاسبه  $Q$  براساس رابطه ۱۵

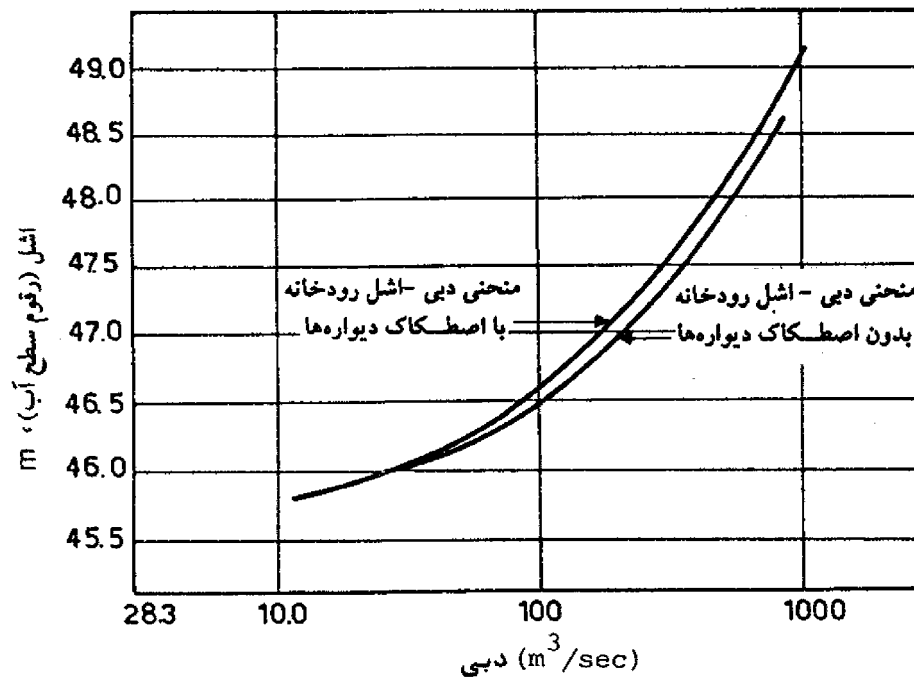
ستون ۱۹: تعیین  $R_T$  از رابطه  $R_T = A_T / P_T$

ستون ۲۰: تعیین  $y_0 = R_T = A_T / P_T$  از رابطه  $y_0 = R_T = A_T / P_T$

گام هفتم - منحنیهای دبی - اشل (رقوم) برای مقطع متوسط از نتایج محاسبات در شکل ۱۶ رسم شده است. با رسم این منحنی محاسبات هیدرولیکی نیز به اتمام می‌رسد.



شکل ۱۵- روش ترسیمی حل معادله  $A_T = P_b R_b + P_w R_w$



شکل ۱۶- منحنی دبی - اشل رودخانه مفروض (تعیین شده به روش اینشتین- بارباروسا)

- 1- Einstein, H.A., and N. Barbarossa, (1952), " River Channel Roughness," Transaction, ASCE, Vol. 117, PP.1121-1132.
- 2- Einstein, H.A., (1950), "The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow, U.S. Dept. Agr. Soil Conserv. Serv., Tech. Bull. 1026, September.
- 3- Chow, V.T. (1985), " Open Channel Hydraulics, Mc Graw Hill Pub., Co., U.S.A.
- 4- "Design of Small Dams", (1987), U.S.Dept. of Interior, Denver, Colorado, PP. 590-609.
- 5- Rouse, H.Hunter J.N., (1950), "Engineering Hydraulics", John Willy & Sons Inc., New York.
- 6- Simons D.B.and F.Senturk. (1992) " Sediment Transport Technology ", Water Resources Publications,. Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- 7- Thorne G.R.,et al., (1987), " Sediment Transport in Gravel Bed Rivers", Ch. on Sampling and Analysis, PP.43-89, Wiley - Interscience .
- 8- American Society for Testing and Materials, (1978), " Standard Methods of Sampling Aggregates", ANSI/ASTM D75 - 971.
- 9- Jansen P.Ph.,et al., (1979), " Principles of River Engineering," Part 3, Bed Material Sampling, PP. 220-223, Pitman Pub. Co.
- 10- American Society of Civil Engineers, (1977), " Sedimentation Engineering", No. 54, P. 745.

In the Name of God  
Islamic Republic of Iran  
Ministry of Energy  
Iran Water Resources Management CO.  
Deputy of Research  
Office of Standard and Technical Criteria

***Guideline for Determining Stage –  
Discharge Curve by Enstein & Barbarossa***