

راهنمای تعیین منحنی دبی-

اشن رو دخانه با استفاده از روش

اینشتین - بارباروسا

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه - وزارت نیرو

راهنمای تعیین منحنی دبی - اشل رو دخانه با استفاده از روش اینشتین - بار باروسا

نشریه شماره ۱۵۶

معاونت امور فنی
دفتر تحقیقات و معیارهای فنی

۱۳۷۵

انتشارات سازمان برنامه و بودجه ۷۵/۰۰/۸۲

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 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 /)
مریبوط به دستورالعمل شماره ۱۳۹۰-۵۶-۶۶۵۳/۱۰۲-۱۳۷۵/۱۰/۸ مورخ
کتابنامه: 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. ۱۵۶ ۳۶۸/۲ س. TA

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



ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه
دفتر رئیس

دستورالعمل شماره: ۱۳۹۰-۵۶/۵۶۵۳/۱۰۲	به: تمامی دستگاه‌های اجرایی و مهندسان مشاور
تاریخ: ۱۳۷۵/۱۰/۸	
موضوع: راهنمای تعیین منحنی دبي - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا	
<p>به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه کشور و آیین نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی به پیوست نشریه شماره ۱۵۶ دفتر تحقیقات و معیارهای فنی این سازمان با عنوان "راهنمای تعیین منحنی دبي - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا" از گروه دوم ابلاغ می‌گردد.</p> <p>تاریخ اجرای این دستورالعمل ۱۳۷۶/۲/۱ می‌باشد.</p> <p>شایسته است دستگاه‌های اجرایی و مهندسان 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</p> <p>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 (مصطفویه 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 مأخذ 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 هرندي 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

و معیارهای فنی

۱۳۷۵ زمستان

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 :

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

ضمناً کارشناسان محترم آقایان: دکتر حسن احمدی، دکتر مرتضی پاکزاد و دکتر چنگیز فولادی در تهیه پیش‌نویس اولیه این استاندارد همکاری کرده‌اند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
-۱	تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با استفاده از روش اینشتین - بارباروسا
-۱-۱	انتخاب بازه مطالعاتی
-۲-۱	تعیین شیب خط انرژی (شیب انرژی)
-۱-۲-۱	تعیین شیب انرژی برای یک مقطع اصلی
-۲-۲-۱	تعیین شیب انرژی براساس مفهوم جریان نرمال
-۳-۲-۱	تعیین شیب انرژی به روش چندمقطعی
-۳-۱	تعیین مقطع متوسط
-۴-۱	نمونه برداری از رسوبات بستر
-۱-۴-۱	اگر بستر رودخانه خشک است
-۲-۴-۱	اگر آب در رودخانه جاری باشد
-۵-۱	محاسبات هیدرولیکی
-۱-۵-۱	تعیین منحنی دبی - اشل با صرفنظر کردن از مقاومت اصطکاکی دیواره ها
-۲-۵-۱	تعیین منحنی دبی - اشل با درنظر گرفتن مقاومت اصطکاکی دیواره ها
-۲	مثال
-۳	منابع و مأخذ

منحنی دبی - اشل^۱ 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، به طور 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 سیالبها بزرگ اندازه‌گیری مستقیم دبی و اشل نظری آن مشکل است، لذا ترسیم قسمت انتهایی منحنی تجربی که معرف کمیت دیبهای سیالبی 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 موردنیاز است. روش‌های گوناگونی برای تعیین منحنی دبی - اشل تئوریک و یا ادامه منحنی دبی - اشل و یا منحنی دبی - اشل تجربی وجود دارد که هریک به تناسب وضعیت هیدرولیکی مجرأ 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 بدوآ تخمین دقیقی از ضریب n (ضریب مانینگ) به عمل آورد؛ به علاوه ثابت بودن n در دیبهای مختلف خود محل تردید است، زیرا معمولاً "زبری نسبی" بستر و کناره‌ها در دیبهای مختلف یکسان نیست.

در این راهنمای یک دستورالعمل تئوریک برای تعیین منحنی دبی - اشل بر مبنای روش اینشتین - بارباروسا^۲ 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 پردازد. امید است روش قدم به قدم و فرمهای محاسباتی ارائه شده در این راهنمای 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 موردنیاز برای ارزیابی باررسوبی 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

روش استفاده موثر از خصوصیات هندسی و فیزیکی مجرأ و بهره‌گیری از اصول و مبانی حاكم 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-اصل طرز تعیین شیب طولی و مشخصات مقطع معرف رودخانه نیز بیان گردیده است. مراحل مختلفی که برای تعیین مشخصات منحنی دبی - اصل لازم است انجام گیرد عبارتند از:

- ۱-۱ انتخاب بازه مطالعاتی^۱ رودخانه
- ۲-۱ تعیین شیب خط انرژی (شیب انرژی)^۲
- ۳-۱ تعیین مشخصات مقطع متوسط^۳
- ۴-۱ نمونه‌برداری از مواد بستر^۴
- ۵-۱ محاسبات هیدرولیکی

۱-۱ انتخاب بازه مطالعاتی

برای تعیین مشخصات منحنی دبی - اصل 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 احناها، 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 بالادرست و یا پایین‌درست بازه مطالعاتی نیز نامطلوب است.

به طورکلی 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 "ممولا" 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 درخصوص 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^۱

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 مبنای مشخص نمود.
- ۲-۱-۲-۱ علاوه‌بر مقطع عرضی موردنظر که در آن باید شیب انرژی تعیین شود، دو مقطع عرضی دیگر، یکی بالادست و دیگری پایین‌دست مقطع اصلی و به فاصله حداقل 25° متر از آن انتخاب می‌گردد.
- ۳-۱-۲-۱ با یک جسم شناور، مسیر جريان اصلی آب بين دو مقطع بالادست و پایین‌دست مشخص می‌شود.
- ۴-۱-۲-۱ رقوم سطح آب در هریک از سه مقطع فوق الذکر در مسیر جريان اصلی نسبت به خط مبنای اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری حداقل در سه تکرار صورت می‌گیرد و متوسط نتایج تعیین می‌گردد.
- ۵-۱-۲-۱ فاصله مقاطع عرضی بالادست و پایین‌دست با مقطع عرضی اصلی اندازه‌گیری می‌شود.
- ۶-۱-۲-۱ شیب سطح آب در مقاطع بالادست و پایین‌دست تعیین و با هم مقایسه می‌شود. اگر اختلاف شیب مقاطع مذبور بیش از 1° 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 عرضی اصلی با معادله $AU = Q$ 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:

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

در این رابطه :

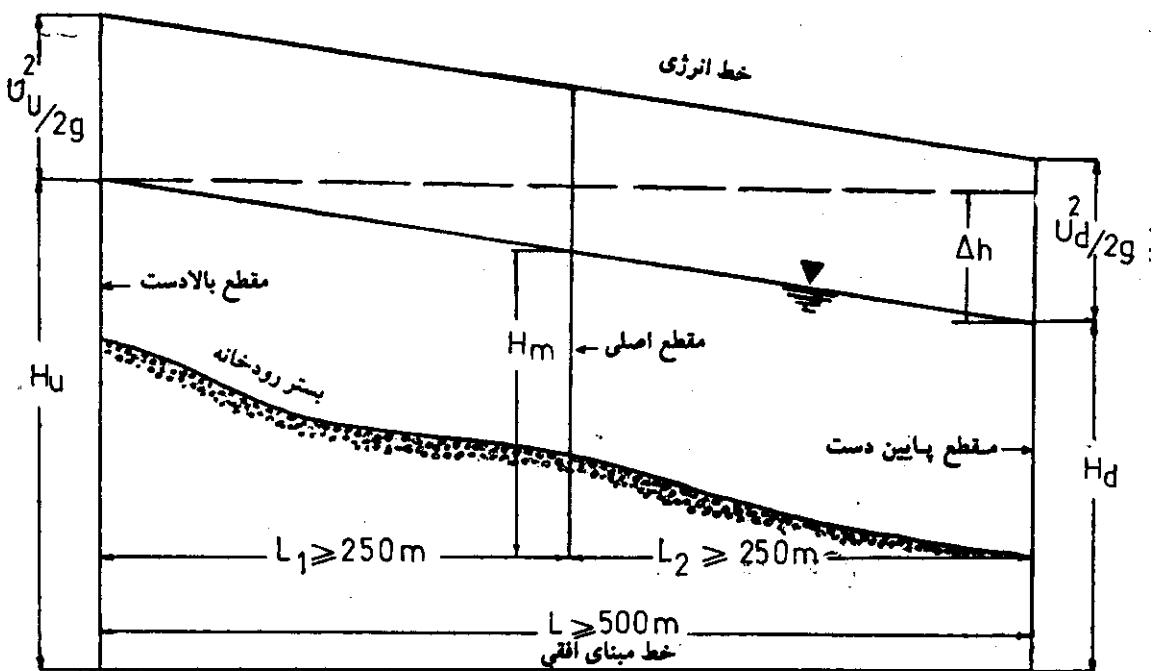
$$S = \text{شیب انرژی}$$

$$\Delta h = \text{اختلاف رقوم سطح آب بین مقطع بالادست و پایین‌دست (بر حسب متر)}$$

$$L = \text{فاصله بین دو مقطع (بر حسب متر)}$$

$$U_u = \text{سرعت در مقطع بالادست (بر حسب متر بر ثانیه)}$$

$$U_d = \text{سرعت در مقطع پایین‌دست (بر حسب متر بر ثانیه)}$$



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

توضیح علائم:

Δh - اختلاف ارتفاع سطح بین مقاطع بالادست و پایین دست

U_u - سرعت جریان آب در مقاطع بالادست

U_d - سرعت جریان آب در مقاطع پایین دست

H_u - تراز سطح آب در مقاطع بالادست

H_d - تراز سطح آب در مقاطع پایین دست

H_m - تراز سطح آب در مقاطع اصلی

S - شیب خط انرژی

S_0 - شیب بستر رودخانه

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

L - طول بازه مطالعاتی

۸-۱-۲-۱ اگر تعیین تقریبی شیب موردنظر باشد، می‌توان اندازه‌گیری رقوم سطح آب را در امتداد ساحل رودخانه انجام داد؛ به قسمی که این نقاط حتی‌المقدور متعلق به یک خط جريان 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 جريان مشکل است و باید اندازه‌گیری در امتداد کناره (کناره‌ها) صورت گیرد.

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

۲-۲-۱ تعیین شیب انرژی براساس مفهوم جريان نرمال

همان‌گونه که در مبحث ۱-۱ گفته شد در تعیین منحنی دبی - اشنل بازه مطالعاتی طوری انتخاب می‌شود که کم و بیش از نظر مشخصات هندسی و خصوصیات دانه‌بندی یکنواخت باشد؛ به نحوی که در محاسبات به عنوان یک مجرای یکنواخت و با یک شیب انرژی ثابت با آن برخورد می‌شود. در چنین شرایطی روابط جريان نرمال برای بازه صادق است و شیب انرژی را می‌توان با شیب بستر متراff فرض کرد. شکل ۲ نمونه‌ای از جريان نرمال را در یک بازه مطالعاتی نشان می‌دهد. برای تعیین شیب، باید بتوان از تغییرات ارتفاع معادل سرعت در مقاطع مختلف بازه مطالعاتی صرفنظر نمود، که این امر بستگی به درجه یکنواختی رودخانه در این محدوده دارد. با برقراربودن 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 جريانهای کم) قرار داده می‌شود. با محاسبه S در این شرایط، فرض می‌شود که مقدار S ثابت است و در دیبهای مختلف تغییری نخواهد نمود و بدین ترتیب وابستگی S به Q از بین رفته تلقی می‌شود و شرایط جريان نرمال در تمام دیبهای برقرار شده فرض می‌شود.

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

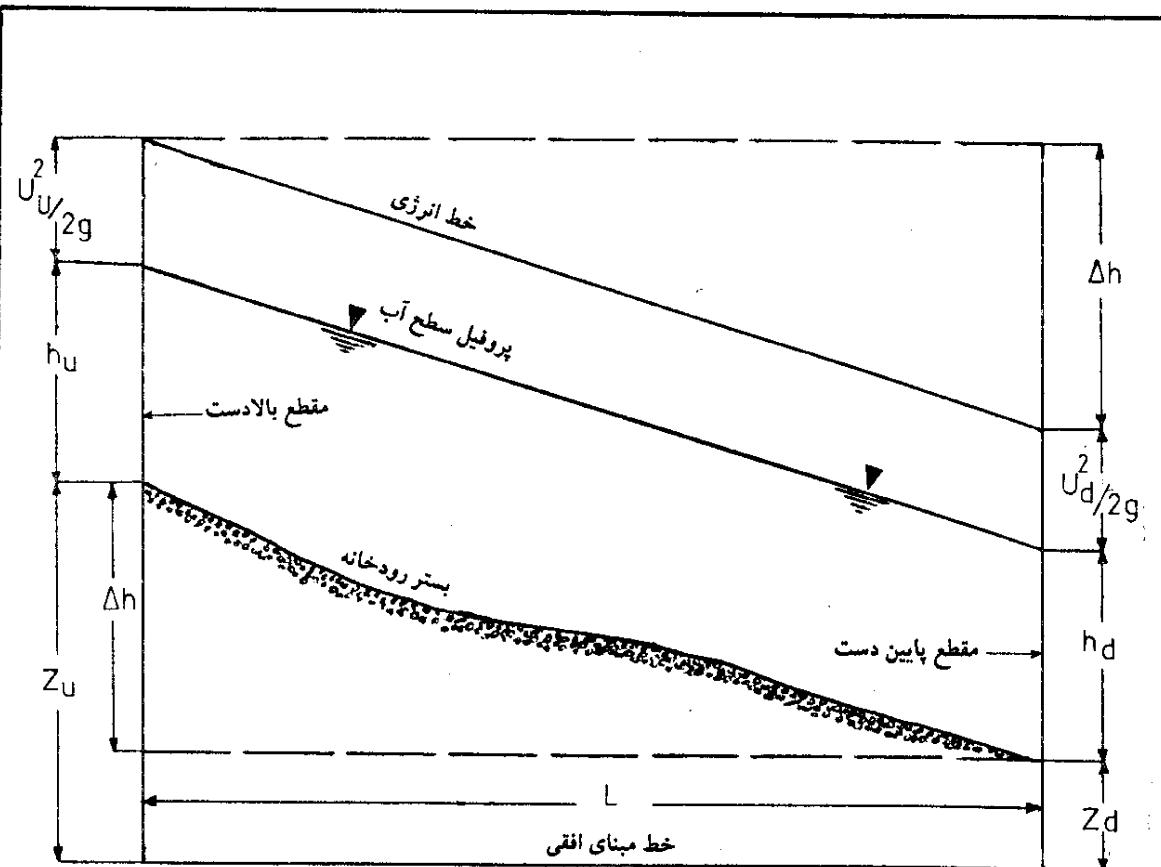
در این رابطه :

S = شیب انرژی

Δh = اختلاف سطح آب در بالادرست و پایین‌دست

L = طول بازه مطالعاتی

* - دبی غالب: در این روش منظور از دبی غالب آن محدوده از دبی رودخانه است که در شرایط کم‌آبی بیشترین تداوم را از نظر وقوع جريان دارا باشد. می‌توان دبی غالب را مشخصه جريانهای کم تلقی کرد.



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

توضیح علائم :

Δh - 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 نقشه‌برداری مشخص می‌گردد، لذا ساده‌تر است که اندازه شیب (شیب انرژی) با درنظرگرفتن کلیه این مقاطع و یکباره 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:

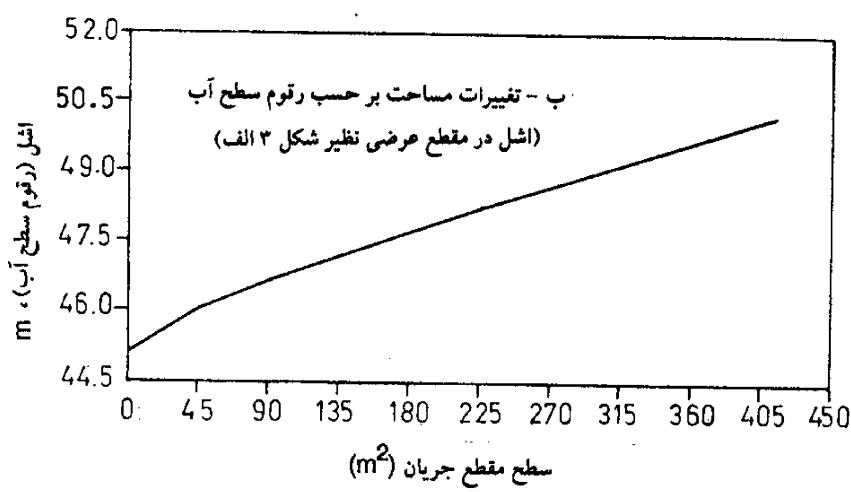
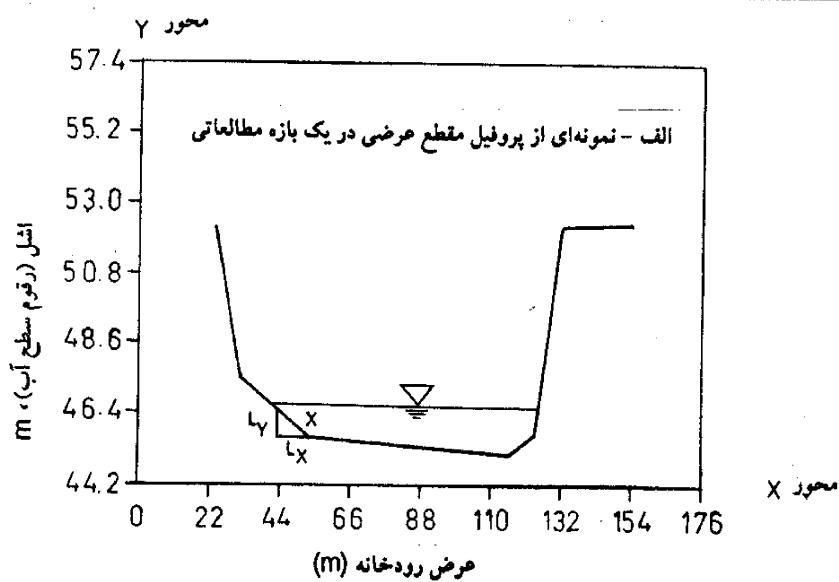
ابتدا لازم است پروفیلهای عرضی به تعداد مناسب (به فواصل 25° تا 75° متر) برداشت شود. شکل ۳-الف نمونه‌ای از یک پروفیل عرضی را (که معمولاً بر روی کاغذ میلیمتری رسم می‌شود) نشان می‌دهد. همچنین بر روی شکل ۳-ب منحنی تغییرات مساحت مقطع جریان بر حسب رقوم سطح آب (اصل) به همراه قواعد محاسباتی برای مقطع مزبور نشان داده است.

با استفاده از اطلاعات حاصل از مقاطع عرضی، برای محاسبه شیب انرژی می‌توان به یکی از دوروش 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 برآش دادن بهترین خط براساس روش حداقل مربعات^۱ به این نقاط و محاسبه شیب این خط، می‌توان شیب متوسط رودخانه و یا به عبارتی شیب انرژی را به دست آورد. برای کلیه دیها 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 موردنظر درج شده و روش محاسبه شیب انرژی نیز نشان داده شده است. براساس محاسبات مزبور، شیب به دست آمده برابر با $(\text{متر}/\text{متر}) = 0.00121$ است.

۲-۳-۲-۱ در صورتی که طول بازه مطالعاتی کوتاه باشد، گودیها 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 بابدهای 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 - اشل نظری در یک بازه مطالعاتی

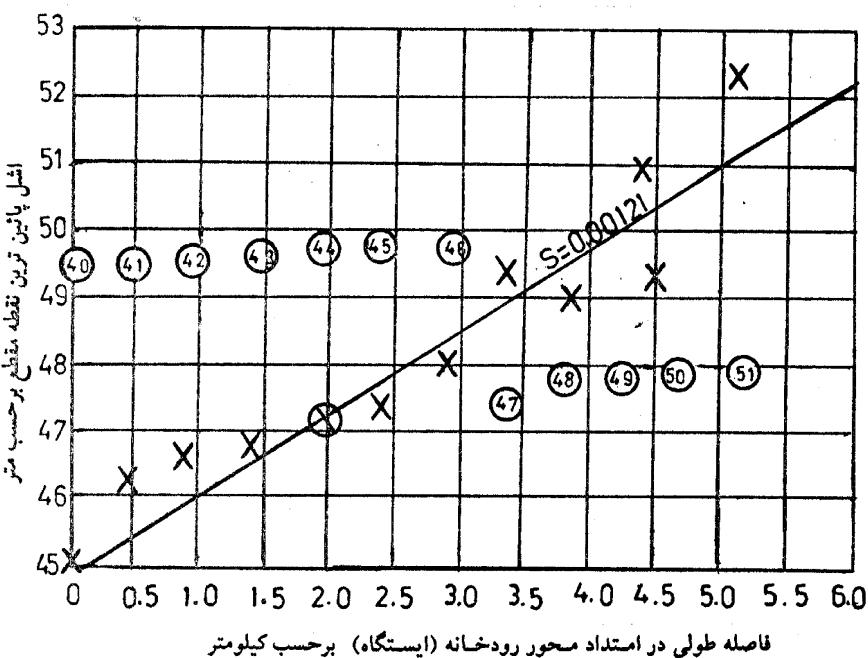
راهنمای محاسبه مساحت و محیط تر شده از روی پروفیل عرضی :

اگر در مقطع عرضی، هر میلی متر محور X برابر a مترو هر میلی متر محور Y برابر b مترو باشد:

- ۱- هر خانه 1×1 میلی مترمربع از مساحت روی پروفیل عرضی معرف مساحت واقعی ab مترمربع خواهد بود.

- ۲- هر پاره خط از مقطع عرضی که تصویر آن روی محور x برابر L_x میلی متر و روی محور Y برابر L_y میلی متر

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



شارع مقطع	فواصله مقطع رقوم پایین ترین نقطه قطعه (m)	فواصله 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
n تعداد مقاطع	y_i	x_i

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^{12} = 31273.00 \text{ (m)}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^{12} = 577.99 \text{ (m)}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = \sum_{i=1}^{12} x_i y_i = 1543225.72$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^{12} x_i^2 = 112095552.00$$

$$(\sum_{i=1}^n x_i)^2 = (\sum_{i=1}^{12} x_i)^2 = 978000529.00$$

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{(n \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{12(1543225.72) - (31273)(577.99)}{12(112095552) - (978000529)}$$

$$S = 0.00121 \text{ (m/m)}$$

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

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

راه حل اول :

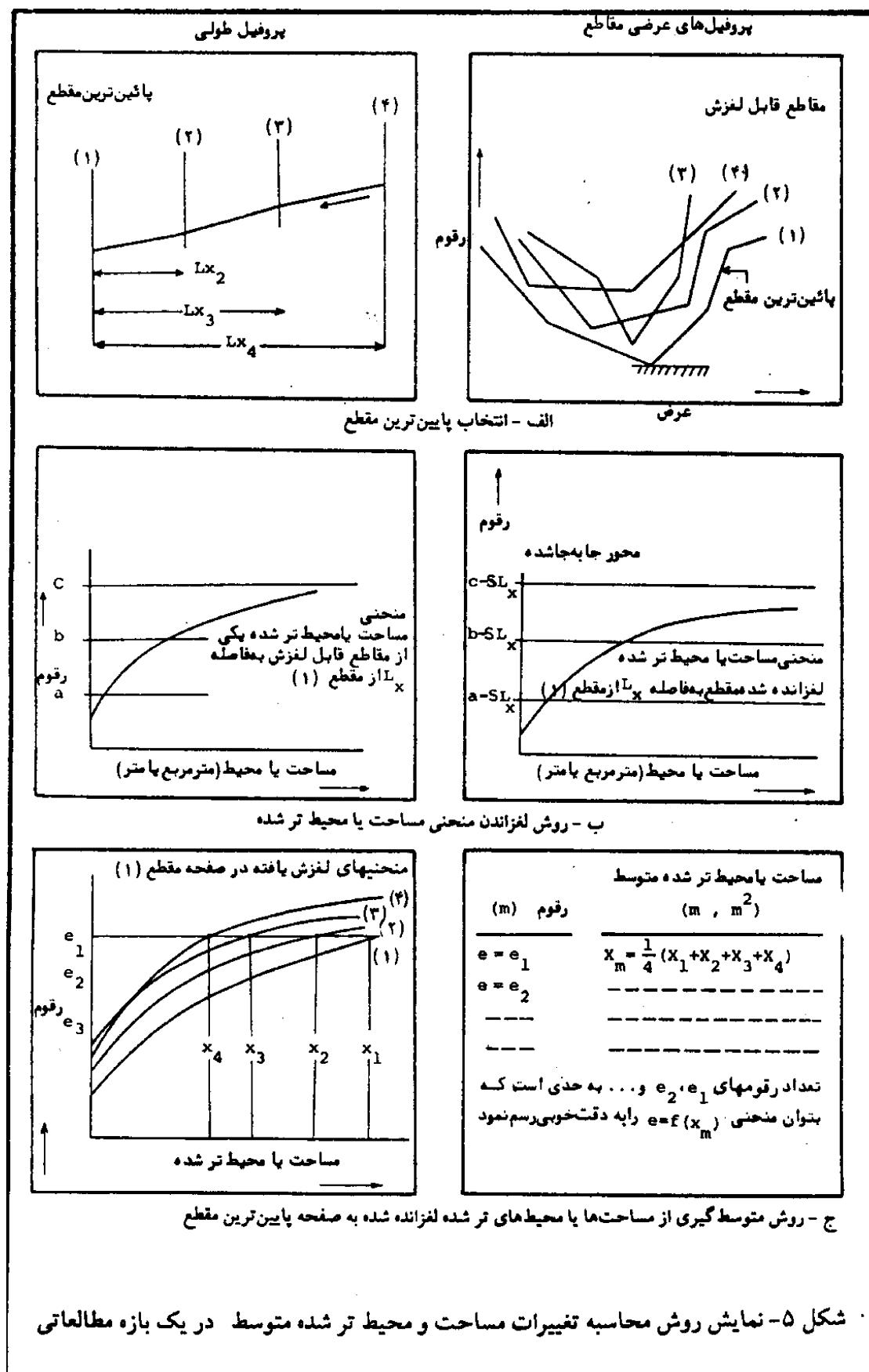
در صورتی که آمار رقوم سطح آب در مقاطع مختلف در بددهای پایین (دبی غالب رودخانه در جریانهای کم) موجود باشد، مشابه با شکل ۴ تغییرات این رقوم (به جای رقوم گودترین نقاط مقاطع عرضی) بر حسب موقعیت مقطع در صفحه مختصات رسم شده و بهترین خط به آن برازش داده می شود و شیب این خط به عنوان شیب متوسط رودخانه (شیب انژری) 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 (منتاظر 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 موردنظر 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 لغازاند می شود تا روی این مقطع قرار گیرد. منظور از لغازاندن یک مقطع در امتداد شیب کanal این است که از کلیه ارقام مندرج در محور عمودی (محور رقوم) منحنی تغییرات مساحت و محیط ترشده مقدار S_L کاسته شود. فاصله مقطع با پایین ترین مقطع (ممولاً) مقطع پایاب شیب رودخانه در بازه موردنظر است. کلیه منحنیهای مساحت که به این طریق به دست می آید، بازه مطالعاتی) و S شیب رودخانه در بازه موردنظر همراه با منحنی مساحت پایین ترین مقطع در یک صفحه رسم می شوند. منتظر آنکه منحنیهای لغازانده شده محیط ترشده بر حسب رقوم نیز در همان صفحه منحنی محیط ترشده پایین ترین مقطع رسم می شوند. حال می توان منحنی متوسط تغییرات مساحت و منحنی محیط ترشده را با متوسطگیری 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 موردنیاز است، معمولاً "علاوه بر منحنی ترشده هر مقطع، دو منحنی ترشده بستر (یا عرض بستر) و محیط ترشده کناره ها



(محیط ترشده بستر یا عرض بستر به اضافه محیط ترشده کناره = محیط ترشده 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 ترشده 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 ترشده متوسط، محیط ترشده بستر متوسط (عرض بستر) و بالاخره محیط ترشده کناره‌ها بر حسب رقوم سطح آب به دست می‌آید. این منحنیها مربوط به مقطع متوسط هیدرولیکی است و به همراه شبکه طولی می‌توانند کلیه مشخصات هیدرولیکی بازه مطالعاتی را بیان نمایند.

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

بالاخره می‌توان از تقسیم مقادیر متوسط مساحت به مقادیر متوسط محیط کل ترشده 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 ترشده بستر ($P_b = \text{عرض بستر}$) و محیط ترشده 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 ($P_T = R_b = A_b/P_b$) و شعاع هیدرولیکی کناره‌ها ($R_w = A_w/P_w$). یادآوری می‌شود که P_T محیط ترشده کل = $R_T R_T = A_T P_b + P_w$ مساحت ترشده کل ($A_T = A_b + A_w$) است. بین شعاعهای هیدرولیکی رابطه 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 نمونه‌برداری از مواد بستر

برای تعیین σ (چگالی دانه‌ها)، d_{50} ، d_{65} و غیره معمولاً "آنالیز نمونه‌های مواد بستر موردنیاز است. برای نمونه‌برداری و تهیه نمونه‌های موردنیاز لازم است دستورالعمل زیر رعایت گردد (برای کسب اطلاعات بیشتر درخصوص 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 درحالی که بستر رودخانه خشک باشد:

- الف - با یک بیلچه رسوبات قشر سطحی موجود در بستر به ضخامت حدود d_{90} برداشته می شود. ذرات ریزدانه که عمدهاً متعلق به بار معلق حوضه ای^۱ 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_{95} و d_{65} از نمونه الف و d_{50} از نمونه ب تعیین و مناسب با آن منحنی دانه بندی معرف بستر ترسیم می گردد.

۱-۴-۲ درحالی 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.

۱-۵ 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 صرفنظر کردن از مقاومت اصطکاکی دیواره ها

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

۱-۱-۵-۱ $b' R'$ شعاع هیدرولیکی نظیر زبری دانه‌های تشکیل دهنده بستر است و باید برای شروع محاسبات مقدار فرضی برای آن در نظر گرفته شود. $b' R'$ در عمل از مقادیر کم شروع و تا حد اکثر، 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:

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

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

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

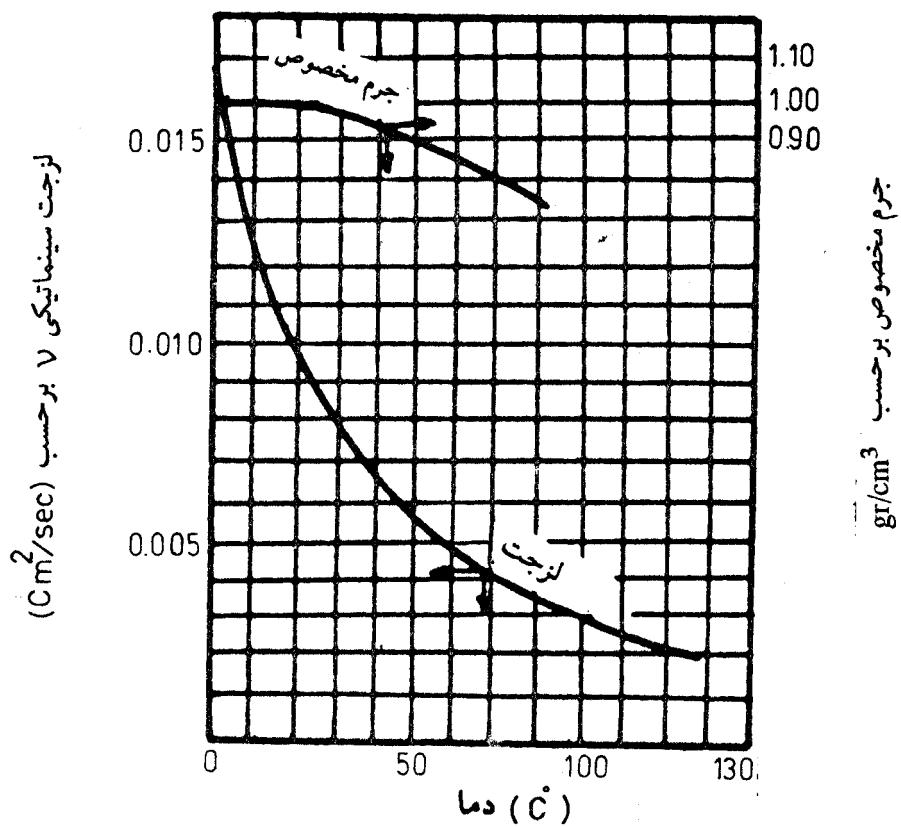
$$\delta = \frac{11.6\nu}{u'^*} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

در این رابطه ν لزجت سینماتیکی آب است (بر حسب m^2/sec). ضریب لزجت سینماتیکی برای آب در دمای 20° 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/δ به صورت یک کمیت بدون بعد محاسبه می‌شود. منظور از K_s قطر زبری ذرات بستر است که اغلب معادل $0.05 d$ منظور می‌شود و از منحنی دانه‌بندی مواد بستری به دست می‌آید. d قطری از ذرات است که 65% درصد وزنی رسوبات از آن کوچکترند.

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

۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
y_o (m)	Q (m ³ /sec)	P _b (m)	A _T (m ²)	H (m)	R _b =R _T (m)	R'' _b (m)	u''* (m/sec)	u/u''* (-)	ψ' (-)	u (m/sec)	Δ (m)	x (-)	K _s / δ (-)	δ (m)	u'* (m/sec)	R' _b (m)



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

درجه حرارت (°C)	جرم مخصوص (kg / m³)	لزجت η (cm²/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 می‌آید.

۶-۱-۵-۱ Δ برای هریک از مقادیر x متناظر با $R'_{b/x}$ از رابطه $\Delta = K_s/x$ بر حسب متر به دست می‌آید. مقدار Δ را زیری ظاهری می‌نامند.

۷-۱-۵-۱ u سرعت متوسط است که برای هریک از ردیفهای متناظر با R'_{b} طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u = \frac{5/75}{\Delta} u' \log_{10} \left(\frac{R'_b}{12/27} \right) \quad \text{m/sec} \quad (7)$$

۸-۱-۵-۱ ψ' معرف تأثیرات اصطکاکی مربوط به زیری سطح دانه‌های مواد بستری است. پارامتر ψ' برای هریک از ردیفهای R'_{b} محاسبه می‌گردد:

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

منظور از ρ_s و ρ_f به ترتیب جرم مخصوص دانه‌های رسوب و آب است و معمولاً "به ترتیب حدود ۲/۶۵ و ۱ گرم جرم بر سانتیمترمکعب و یا ارقام دقیق‌تری که از آزمایش تعیین جرم مخصوص دانه‌های بار بستر به دست می‌آید، درنظر گرفته می‌شوند. ρ_f را می‌توان 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 ψ' از شکل ۸ برای هر ردیف b' به دست می‌آید. u'' سرعت برشی متناظر با ناهمواریها موجود در بستر است.

۱۰-۱-۵-۱ u'' براساس نسبت تعیین شده برای u''/u و کمیت سرعت متوسط به دست می‌آید (m/sec).

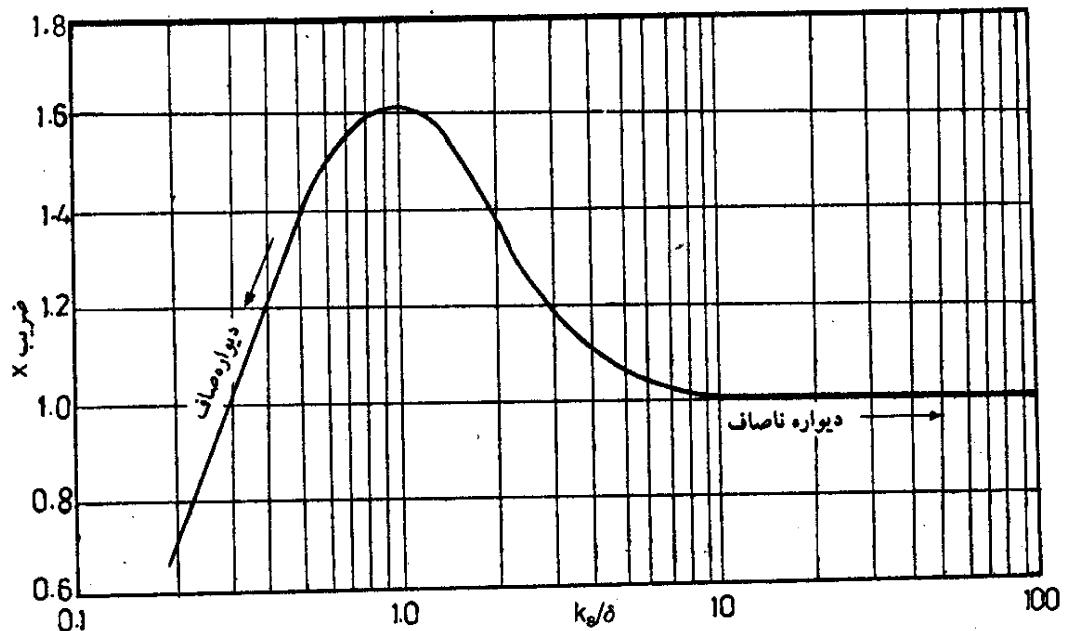
۱۱-۱-۵-۱ R''_b برای هر ردیف b' از رابطه ذیل تعیین می‌شود:

$$R''_b = \frac{u''_*^2}{S.g} = \frac{u''_*^2}{9/81 S} \quad (\text{m}) \quad (9)$$

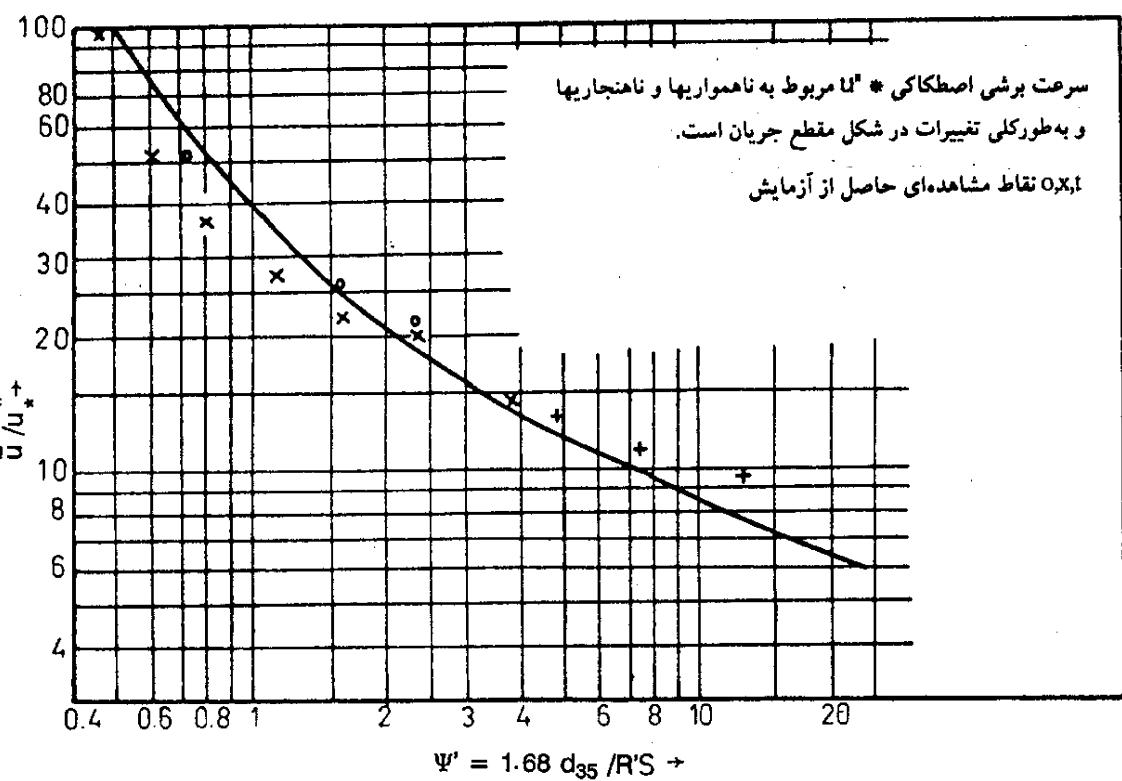
مقدار R''_b شعاع هیدرولیکی نظیر: ناهمواری و تضاریس موجود در بستر است.

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

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



شکل ۷- تغییرات ضریب تصحیح X بر حسب نسبت k_g/δ



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

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

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

۱۳-۱-۵-۱ 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.

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

۱۶-۱-۵-۱ 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 b' R' تعیین می‌شود.

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

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

۲-۵-۱ تعیین منحنی دبی - اشل بادرنظرگرفتن مقاومت اصطکاکی دیوارهای:

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 هریک از عوامل مندرج در جدول ۲ پرداخته می‌شود:

۱۳-۲-۵-۱ شعاع هیدرولیکی کنارهای (دیوارهای) 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 کنارهای مقطع است که بسته به چگونگی سطح کنارهای و میزان رویش نباتات در آن قابل تخمین است. مقدار R_w برای هر ردیف b' R' حساب می‌شود.

جدول ۲ - محاسبات هیدرولیکی برای تعیین منحنی دبی - اشل رودخانه با درنظرگرفتن اصطکاک دیواره‌ها

۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳ (تکرار)	ستون ۱ تا ستون ۱۲ از جدول ۱ (تکرار)
y_0 (m)	R_T (m)	Q (m^3/sec)	P_w (m)	A_T (m^2)	P_b (m)	H (m)	R_w (m)	

۱۴-۲-۵-۱ مقادیر جدید H(اشنل) که بازای آن رابطه :

نقاط مشاهده‌ای حاصل از آزمایش o,x,t

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

برقرار است از آزمون و خطاب 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 ترشده دیواره‌ها) و P_b و A_T بر حسب رقوم (اشنل) 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 مورد نظر را به دست آورد.

۱۴-۱۷-۱۶-۱۹-۲۰ - مقادیر P_w, P_b, R_T و A_T متناظر با رقومهای به دست آمده در مرحله ۱۴ به بازای هر R'_b معین تعیین می‌شوند (از منحنی تغییرات R_T, P_b, R_w و A_T بر حسب رقوم سطح آب)، مقدار R_T در رابطه $R_T = A_T / P_T$ و سایر مقادیر در رابطه $A_T = R_b P_b + R_w P_w$ / وسایر مقادیر در رابطه $R_T = A_T / P_b$ از رابطه صدق خواهند نمود. معمولاً "شعاع هیدرولیکی کل به جای $R_T = A_T / P_T$ را نیز می‌توان مساوی آن فرض کرد ($y_0 = R_T$)

۱۸-۲-۵-۱ دبی جریان (Q) برای هر ردیف 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 اشنل (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 کیلومترمربع است. گام اول - موقعیت بازه مطالعاتی با درنظر گرفتن محل تنها ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی این رودخانه تعیین می‌گردد. بازه مطالعاتی برابر حدود ۵ کیلومتر و برمبنای ملاحظات زیر انتخاب شده است: بازه مطالعاتی باید به عنوان کanal با مقطع یکنواخت و با جریان یکنواخت تلقی گردد. از آنجاکه در

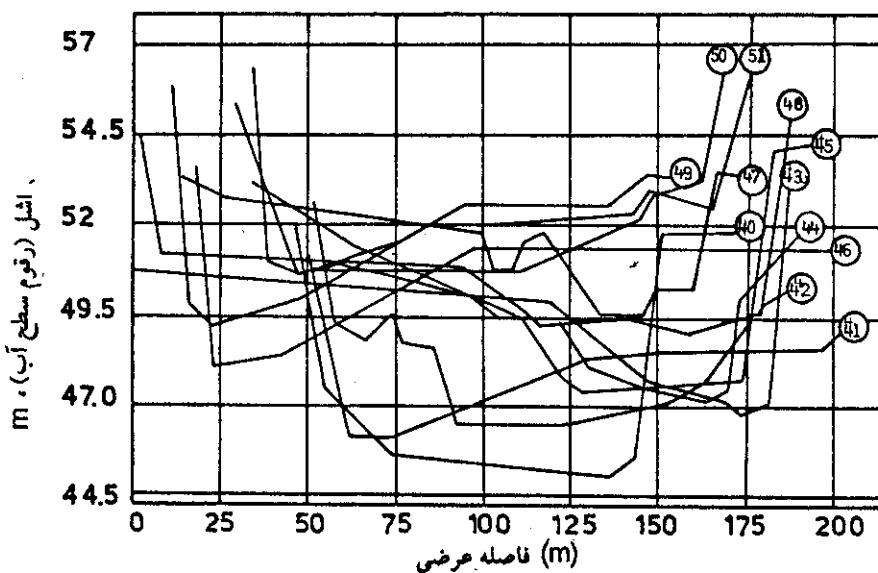
جريان یکنواخت در کanal با مقطع یکنواخت ، سرعت در طول کanal ثابت است، بنابراین باید بتوان از هر نوع افت خط انرژی به علت تغییرات سرعت (و نتیجتاً ارتفاع معادل سرعت $\frac{u^2}{2g}$) با دقت قابل قبولی صرفنظر نمود. در این بازه ، سرعت در بددهای بالا بین $\frac{3}{4}$ تا $\frac{3}{4}$ متر بر ثانیه است، که متناظر با ارتفاع معادل سرعت حداقل $\frac{u^2}{2g} = 0.6$ 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 1% باشد، افت خط انرژی بین ابتدا و انتهای بازه مطالعاتی برابر $(5 \times 10^3) \times 0.01 = 50$ متر خواهد بود. نسبت $(5)/(0.18)$ 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 حداقل 4% 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، بطبق شکل ۱۰ است. ترازهای آب نشان داده شده در شکل ۱۰، در هر مقطع ، مربوط به رقوم سطح آب با مساحت ترشده $4/65$ مترمربع است. این رقم به این دلیل انتخاب شده که معرف بددهای کم در رودخانه است. برای به دست آوردن ترازهای مذکور لازم است ابتدا از منحنیهای شکل ۹، تغییرات مساحت ترشده 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.

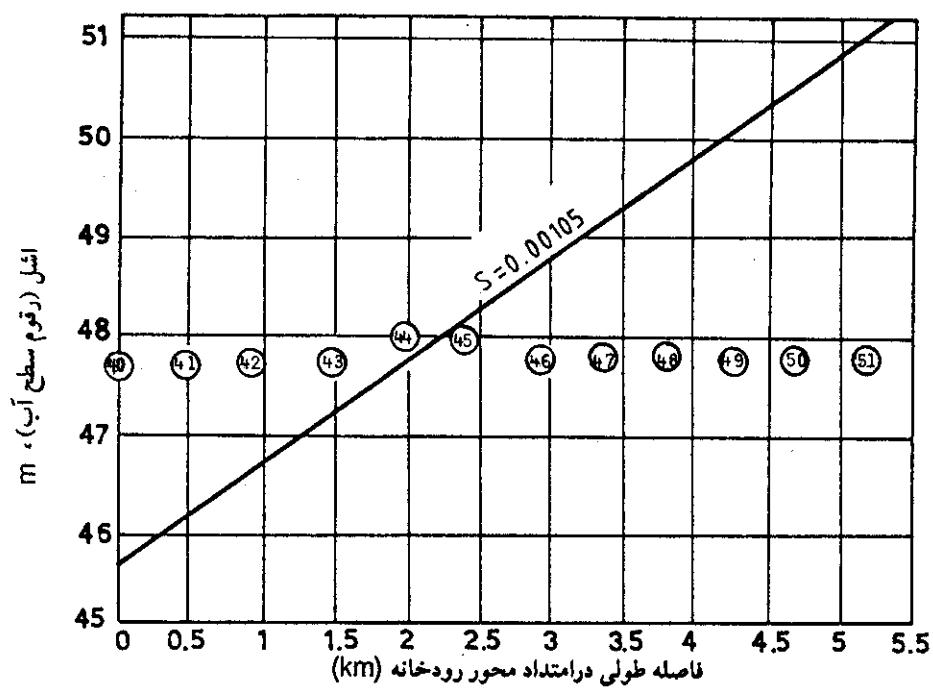
متناظرًا می‌توان از منحنیهای شکل ۹ (رسم شده روی کاغذ میلیمتری) تغییرات محیط ترشده را بر حسب رقوم سطح آب در هر مقطع به دست آورد. در مواردی که مقطع رودخانه عریض و عمق آب کم است، می‌توان محیط ترشده را مساوی عرض سطح آب در نظر گرفت.

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) 10.5×10^{-5} خواهد بود. این رقم معرف شیب کanal یکنواختی است که باید در محاسبات مربوط به منحنی دیبی - اشل به کار رود.

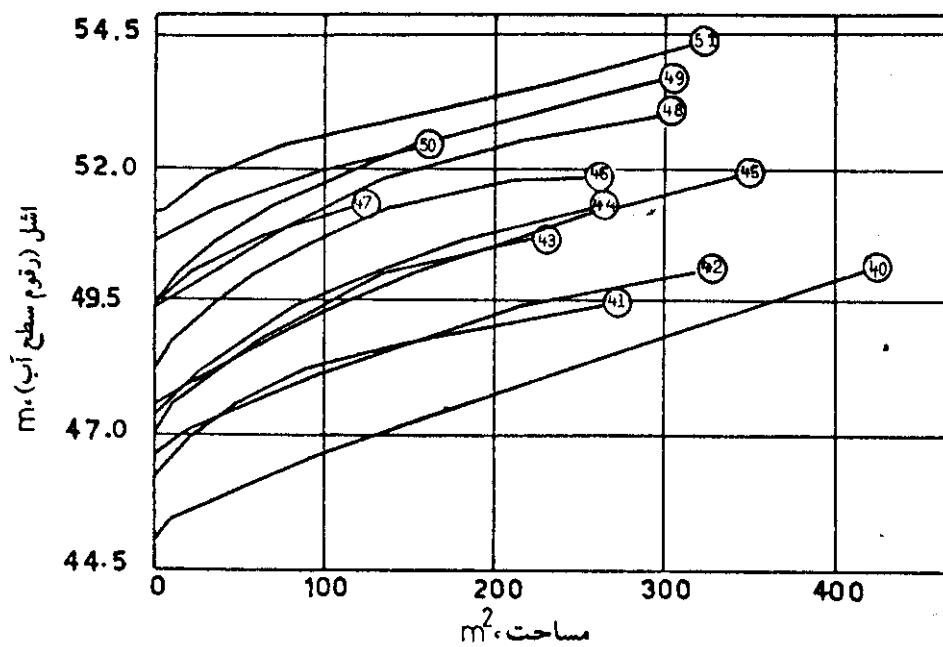
گام چهارم - برای به دست آوردن مقطع متوسط، کلیه مقاطع ترشده عرضی در بازه مطالعاتی در امتداد طولی لغزانده می‌شود و به قسمت انتهایی منتقل می‌گردد. این لغزش با شیب (متر/متر) 10.5×10^{-5} صورت می‌گیرد. سپس همه مقاطع لغزانده شده در یک صفحه رسم می‌شوند (شکل ۱۲) و متوسط آنها به عنوان، مقطع متوسط در بازه مطالعاتی انتخاب می‌گردد. عمل لغزاندن یک مقطع بدین صورت انجام می‌شود که از کلیه رقوم نقاط مختلف آن مقطع، رقوم L_x کاسته می‌شود. L_x فاصله آن مقطع تا انتهای قسمت است. در محاسبه مقطع متوسط ، لازم است که برای هر رقوم ، مقدار متوسط مقاطع لغزانده شده طبق رابطه زیر محاسبه گردد :



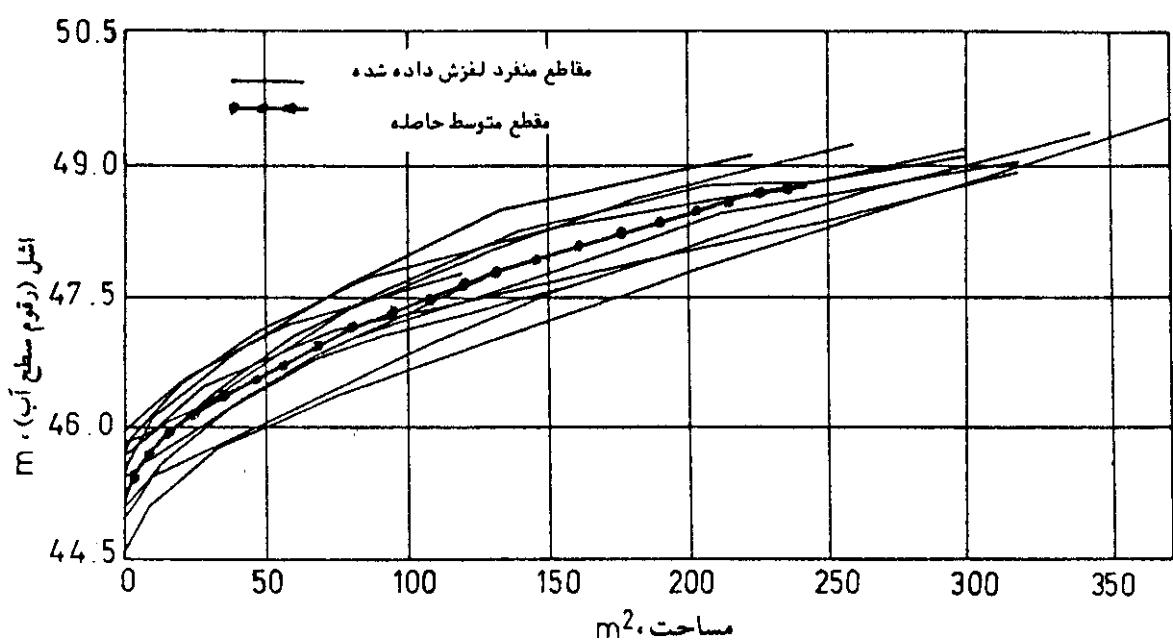
شکل ۹ - مقاطع عرضی دوازده مقطع رودخانه مفروض



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



شکل ۱۱- تغییرات مساحت بر حسب اشل در مقاطع مختلف



شکل ۱۲- منحنیهای لغزانده 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 موردنظر و A_i مقاطع لغزانده شده در همان رقوم است. مشابه با روند محاسبه تغییرات مساحت مقطع متوسط بر حسب رقوم ، می‌توان تغییرات محیط ترشده متوسط (بستر و کناره‌ها) 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 ترشده متوسط محاسبه شده بر حسب رقوم را نشان می‌دهد. البته در شکل ۱۳ برای محیط ترشده دو منحنی محاسبه شده است که مربوط به محیط ترشده کف و کناره‌ها است. تغییرات شعاع هیدرولیکی بر حسب رقوم را می‌توان از تقسیم مساحت مقطع به محیط ترشده (جمع دو محیط ترشده بستر و کناره‌ها) به دست آورد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. باید توجه نمود که می‌توان 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 می‌شود که از روش اول استفاده گردد، یعنی شعاع هیدرولیکی متوسط از تقسیم مساحت مقطع متوسط به محیط ترشده متوسط به دست آید، نه از متوسط شعاع هیدرولیکی.

گام پنجم - دانه‌بندی رسوبات بستر در بازه مطالعاتی از نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها به دست می‌آید. 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. نمونه‌برداری از ۳ تا ۴ نقطه با فاصله مساوی در عرض هر بستر هر مقطع توسط آنکه با نمونه‌بردار لوله‌ای صورت گرفته و ارتفاع هر نمونه برداشت شده حدود ۶۰ سانتی‌متر بوده است (از سطح بستر تا عمق ۶۰ سانتی‌متر، عمقی است که احتمال فرسایش در آن می‌رود و به عبارت دیگر محدوده فعالیت و حرکت بار بستر، تشخیص داده شده است). به طوری که گفته شد، نمونه‌های برداشت شده از یک مقطع با هم ترکیب گردیده است. دانه‌بندی نمونه‌های ترکیب شده در جدول ۳ داده شده، که بیانگر دانه‌بندی 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	$۰/۱۴۷ > d$

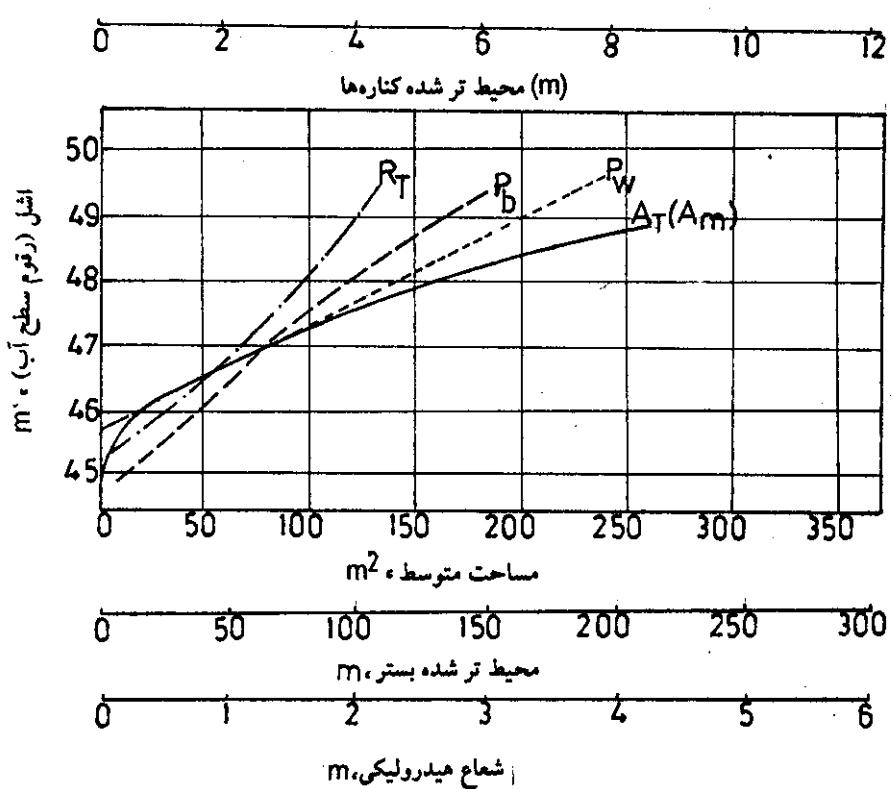
این ۴ مقطع عرضی طوری انتخاب شده‌اند که معرف دانه‌بندی موجود در تمام بازه مطالعاتی باشند. انتخاب مقاطع با فاصله مساوی عموماً مطلوب است. آخرین ستون جدول ۳ بیانگر متوسط به دست آمده از آنالیز چهارنمونه ترکیب یافته است. این ستون نشان‌دهنده درصد وزنی رسوبات واقع در هر محدوده اندازه d_i تا d_{i+1} میلیمتر است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

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

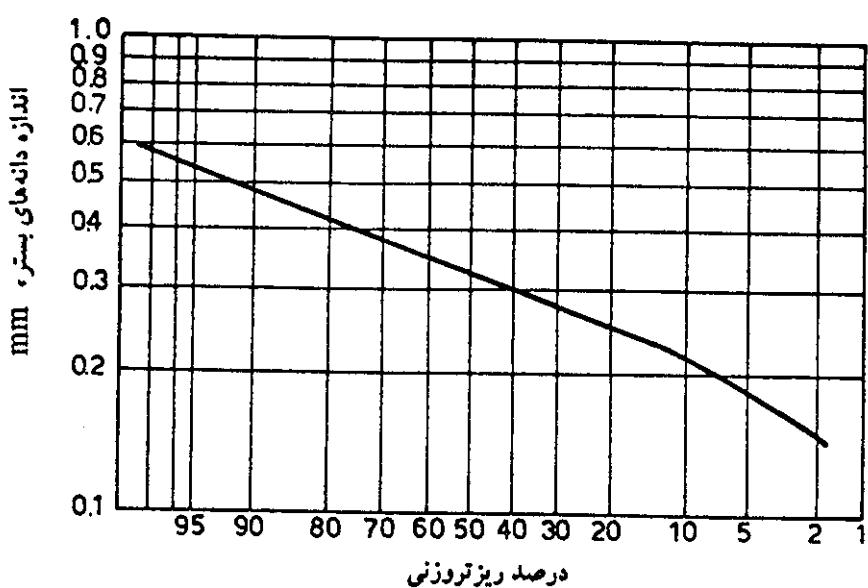
به دست آمده است.

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 کمتر داشته باشد، تعداد نمونه‌های بیشتر و سنگیتر 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 راهنمای 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 صرفنظر 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 (m)	Q (m^3/sec)	P_b (m)	A_T (m^2)	H (m)	$R_b = R_T$ (m)	R''_b (m)	u''^* (m/sec)	u/u''^* (-)	ψ' (-)	u (m/sec)	Δ (m_{x1}^{-3})	x (-)	K_s/δ (-)	δ (m)	u'^* (m/sec)	R'_b (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	۰/۰۳۶	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	۲۷۷۲/۳۷	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	۱/۰۴۵	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 $R_b = R_T$ ، مرحله ۱۳) 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

ستون ۳: محاسبه δ طبق رابطه (۶)، با فرض

ستون ۴: محاسبه نسبت K_s/δ ، $d_{۶۵} = ۰/۳۵$ (mm)

ستون ۵: تعیین ضریب x از شکل ۷

ستون ۶: محاسبه Δ طبق مرحله ۶

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

ستون ۸: محاسبه تابع ψ' با فرض: $(\rho_f/\rho_s)^{۰/۲۹} = 2.65$ (mm)

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

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

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 در شکل ۱۳

ستون ۱۶: محاسبه A_T از منحنی در شکل ۱۳

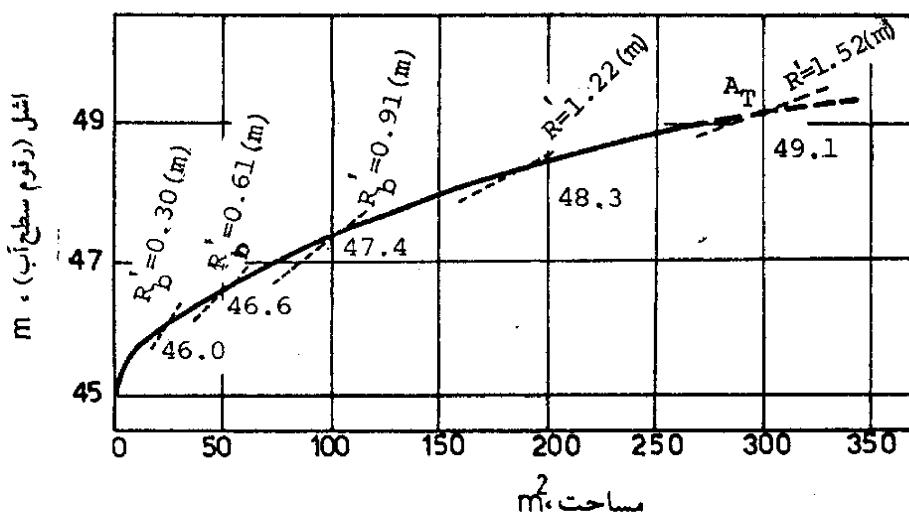
ستون ۱۷: محاسبه P_w از منحنی در شکل ۱۳

ستون ۱۸: محاسبه Q براساس رابطه ۱۵

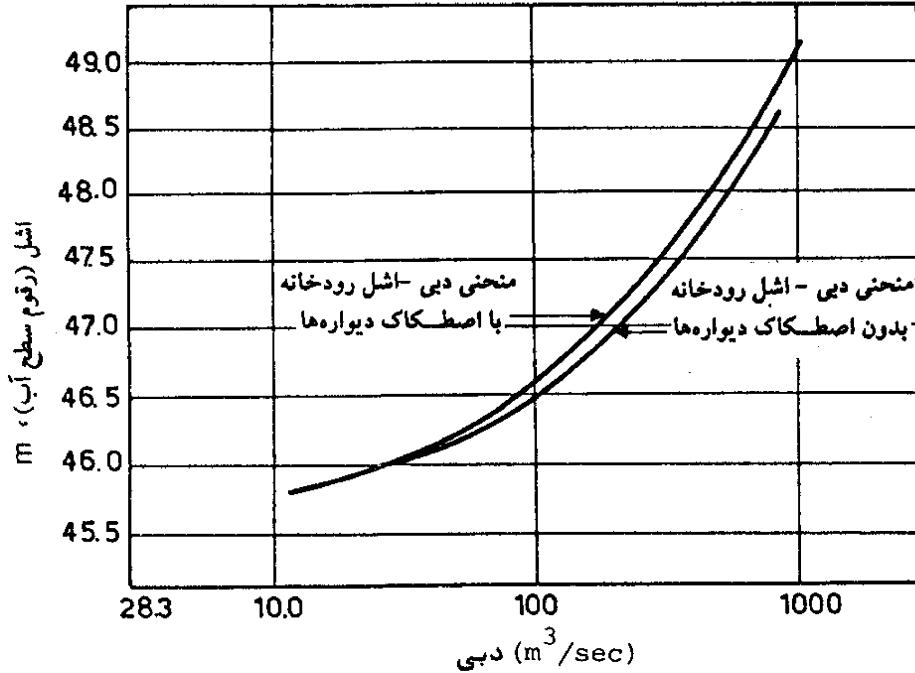
ستون ۱۹: تعیین R_T از رابطه

$$y_0 = R_T = A_T / P_T$$

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



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

- 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*