

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

با توجه به رشد جمعیت و نیاز به تأمین آب جمعیت بالغ بر ۷۰ میلیون نفر کشور ایران، در سال‌های اخیر توجه خاصی به طرح‌های آبی شده است. روند روبه رشد احداث سدهای بزرگ خاکی و بتونی در سال‌های اخیر نیز موید این واقعیت است. نکته حائز اهمیت اینکه در طراحی این سازه‌ها و کلیه ملحقات آن باید اصول مهندسی به طور کامل لحاظ گردد. لازمه این امر شناخت صحیح و کامل قوانین حاکم و پدیده‌هایی است که با این علم مرتبط است، در غیر این صورت احتمال بروز خسارات جبران ناپذیر وجود خواهد داشت که علاوه بر تحمیل هزینه‌های اضافی بر طرح، حتی می‌تواند سلامت سازه را نیز به خطر اندازد.

یکی از اجزاء مهم سدها، سازه‌های پراکنش انرژی می‌باشد. جریان خارج شده از مخزن سد دارای انرژی بسیار زیاد بوده که برای کاهش میزان انرژی این جریان از حوضچه‌های استغراق یا حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود. جریان ریزشی از خروجی سد که با کف رودخانه اختلاف ارتفاع دارد، دارای انرژی بالا است که حوضچه‌های استغراق با استهلاک این انرژی نقش بسزایی را در جلوگیری از تخریب بستر رودخانه ناشی از عبور این جریان از رودخانه ایفا می‌کند. به این ترتیب از بروز خسارت سازه‌ای و زیست محیطی قابل توجهی که می‌تواند بر طرح وارد شود، جلوگیری خواهد شد. برخورد جریان ریزشی به کف رودخانه باعث ایجاد حفره‌هایی خواهد شد که در صورت توسعه حفره می‌تواند باعث تخریب پی سد و در نهایت تخریب آن را به همراه داشته باشد. بنابراین لازم است تا دامنه گسترش این پدیده، برای طراحان سازه‌های هیدرولیکی شناخته شود. اگر چه مطالعات متعددی در زمینه آبستگي ناشی از جت انجام شده و جت‌های مختلف از قبیل جت‌های افقی، عمودی و ریزشی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، لیکن تاکنون روابط جامعی برای بررسی رفتار و خصوصیات کامل حفره آبستگي و برآمدگی پائین دست آن ارائه نگردیده و بررسی کامل‌تر پارامترهای موثر بر این پدیده مستلزم ادامه مطالعات است.

۱-۲- تاریخچه

با پی ریزی علم هیدرولیک در قرن ۱۷ میلادی توسط پاسکال و نیوتن و سایرین، مسأله حرکت آب و بطور کلی سیالات در بستر خود مورد توجه بیشتر قرار گرفت. در قرن ۱۸ میلادی با ارائه معادلات انرژی از سوی Euler و Bernoulli, Lagrange تحولی در این علم رخ داد. در همین ایام بود که شزی با ارائه فرمول معروف خود $V = C\sqrt{RS}$ ارتباط بین ذرات بستر و سرعت جریان را مورد توجه قرار داد. هر چند که هنوز مسأله رسوب در آبشستگی مرکز توجه محققین قرار نگرفته بود اما ضریب C ، بوضوح اثر بستر بر حرکت را می‌رساند. در اواخر قرن ۱۸ میلادی یک مهندس فرانسوی به نام دوبوات (Dubuat) پایه گذار آزمایش‌هایی شد که این آزمایش‌ها نام او را به‌عنوان بنیان‌گذار علم رسوب و آبشستگی در تاریخ هیدرولیک ثبت کرد. فعالیت‌های وی منجر به نوشتن کتاب اصول هیدرولیک گردید که در جلد دوم آنان به مسائل رسوب پرداخته شده است. کندی (Kennedy) نتایج مطالعات گسترده خود را در مورد کانال‌های آبیاری در مقاله‌ای تحت عنوان جلوگیری از رسوبگذاری در کانال‌های آبیاری منتشر کرد. او اولین کسی بود که اصول پایداری کانال‌ها را مطرح نمود. افراد دیگری همچون لیس (Lacey)، اینگلس (Inglis)، بلنج (Blench) مطالعات کندی را ادامه دادند که امروزه تحت عنوان تئوری رژیم مشهور است [۱].

در هشت دهه اخیر، هیدرولیک انتقال رسوب پیشرفت گسترده کرد. شلیدز (Shields) اولین کسی بود که مطالعه سیستماتیک آستانه حرکت یا شروع حرکت ذرات رسوب را مورد توجه قرار داد. وی با نمودار خود ابزاری جهت استفاده طراحان فراهم آورد تا نسبت به پایداری کانال‌های خاکی و رودخانه‌ای اظهار نظر نمایند. اینیشتن (Einstein) با تکمیل و ارائه رابطه خود برای برآورد میزان بار رسوبی، گامی جدید در پیشبرد تکنولوژی انتقال مواد رسوبی برداشت. افراد متعدد دیگری هم از جمله شوکلیچ، شلیدز و یالین که امروزه پایه گذاران مباحث فرسایش و حمل رسوب شناخته می‌شوند به پیشبرد این علم کمک کردند. در حال حاضر نیز به دلیل نیاز به حل مسائل مختلف مرتبط با رسوب، مطالعات دامنه‌داری در مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی دنیا در حال انجام می‌باشد.

۳-۱- فرسایش و مفهوم آستانه حرکت:

فرسایش در حقیقت جابه‌جائی ذرات همراه جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگر به علت شدت انرژی سیال است. مانند هر حرکت فیزیکی دیگر، این حرکت ذرات بستر نیز شامل دو گروه از نیروها می‌باشد. گروهی از نیروها در مقابل حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدائی آن ذره می‌شوند و گروهی از نیروها نیز سعیدر جدا کردن ذره از بستر داشته و می‌خواهند آن را همراه جریان حرکت دهند. فرایند آبشستگی به طور عادی در کف رودخانه‌ها و دیواره‌های آنها رخ می‌دهد، اما حالت بسیار بحرانی آن معمولاً پس از عبور جریان از اطراف یک سازه هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان سیال یعنی نیروی کشسانی و بالابر که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروهای مقاوم به علت وزن ذره غالب آیند (آستانه حرکت ذره). نیروی بالابر ذکر شده به دو دلیل ممکن است ایجاد شود. تغییرات سرعت در نزدیکی کف کانال و ایجاد یک اختلاف فشار بین بالا و پایین ذره و وجود جریان‌های متلاطم موضعی که ممکن است ذره را از کف جدا و با خود حمل کند، دلایل ایجاد نیروی بالابر می‌باشند.

فرسایش از آستانه حرکت شروع شده که عبارتاز لحظه‌ای است که حرکت دانه‌ها پس از آن ادامه می‌یابد. این حرکت منجر به جابه‌جائی ذره حداقل در یک بعد گردیده و ذره متحرک در نهایت به جای خود بر نمی‌گردد [۲]. Aderibigbe & Rajaratnam، با مطالعه بر روی جت‌های عمودی مستغرق دایروی بر بستر ماسه‌ای، با انتخاب پارامتر فرسایش $SN \cdot D/H_c$ به عنوان معیاری برای تعیین آستانه حرکت ذره، به ترتیب مقدار پارامتر فرسایش را در آستانه حرکت ۰/۱۷، ۰/۱۲ و ۰/۳۶۷ بدست آوردند. در پارامتر فوق SN ، عدد فرود ذره می‌باشد [3]:

$$S \quad (1-1)$$

$$\Delta \quad (2-1)$$

در روابط فوق D قطر جت، V سرعت جت خروجی، g شتاب جاذبه زمین، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر، H_c ارتفاع ریزش جت، ρ چگالی سیال و ρ_s چگالی ذرات بستر می‌باشد. برای بدست آوردن روابط هیدرولیکی در زمان شروع حرکت ذره روش‌های متفاوتی شامل روش تنش برشی و روش سرعت بحرانی وجود دارد [۱]. در

روش اول وقتی که تنش برشی وارد بر ذرات بیشتر از تنش بحرانی باشد ذرات شروع به حرکت می‌کنند. مهمترین این روش‌ها روش شلیدز و روش اصلاح شده شلیدز می‌باشند. در روش سرعت بحرانی به جای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان به عنوان مهمترین فاکتور تعیین آستانه حرکت ذرات به کار رفته است.

۱-۴- مراحل مختلف فرسایش:

بر اساس مطالعاتی که توسط Dietz, Breusers و Zanke انجام گرفت، به طور کل آبستگی در چهار مرحله ابتدایی (Initial phase)، مرحله توسعه (Development Phase)، مرحله تثبیت (Stabilization phase) و مرحله تعادل (Equilibrium Phase) قابل بررسی می‌باشد. مرحله اول ظرفیت آبستگی بالایی دارد و حفره آبستگی در این مرحله ایجاد می‌شود. در مرحله دوم عمق ابعاد حفره گسترش می‌یابد و در مرحله سوم روند تغییرات کاهش می‌یابد. در این مرحله تنها دیواره پایین دست حفره آبستگی دست خوش تغییرات محسوس می‌شود. در مرحله چهارم نیز که مرحله تعادل است تنها حرکت ذرات درون حفره صورت می‌گیرد، به طوری که ذرات حرکت غلطشی دارند و از درون حفره آبستگی خارج نمی‌شوند. در این مرحله ابعاد حفره با گذشت زمان تغییر نمی‌کند [۲].

۱-۵- انواع آبستگی:

آبستگی از دو جنبه کلی به صورت زیر تقسیم می‌شود:

الف- انواع آبستگی از نظر علت به وجود آمدن این پدیده

- آبستگی عمومی (Generalscour): این نوع آبستگی زمانی رخ می‌دهد که در بازه‌ای از رودخانه سرعت برشی از سرعت بحرانی بالاتر باشد. در این حالت جریان آب، ذرات بستر را در طول مسیر جابه‌جا کرده و با خود به پایین دست حمل می‌کند. این پدیده کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه را به همراه خواهد داشت.
- آبستگی به جهت تنگ شدگی مقطع (Constriction Scour): تنگ شدن مقطع باعث افزایش سرعت جریان شده و قدرت فرسایش جریان را در این محل بالا می‌برد.

- آبشستگی موضعی (Local Scour): این نوع آبشستگی ناشی از اثر یک سازه بر الگوی جریان در آن محل می‌باشد که بصورت موضعی و در پایین دست و یا اطراف سازه مورد نظر و بطور کلی هر مکانی که شدت جریان‌های متلاطم بطور موضعی افزایش یابد رخ می‌دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به تنهایی و یا به همراه آبشستگی‌های دیگر باشد.

وقتی موانعی مثل اپی، پایه‌های پل، سرریز، آبشار یا هر نوع سازه هیدرولیکی دیگر در مقابل جریان قرار گیرد، به علت اختلاف فشار هیدرواستاتیکی در بالادست و پایین دست سازه و همچنین برخورد جریان با این موانع و تغییر ناگهانی مسیر سرعت‌ها و تنش‌های محلی یک سری جریان‌های گردابی در پیرامون مانع یا پایین دست سازه هیدرولیکی به وجود می‌آید که عامل اصلی ایجاد آبشستگی در اطراف مانع مزبور می‌باشد [۲].

ب- انواع آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب

- آبشستگی در حالت آب زلال (Clear water scour): به شرایطی اطلاق می‌شود که مواد بستر بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت باشند و به آستانه حرکت نرسیده باشند.
- آبشستگی در حالت آب حاوی رسوب (Live bed scour): به شرایطی اطلاق می‌شود که جریان در حال حمل رسوب باشد یعنی در بالادست سازه مورد مطالعه نیز آبشستگی داشته باشیم و جریان ورودی به سازه همراه گل و لای باشد [۲].

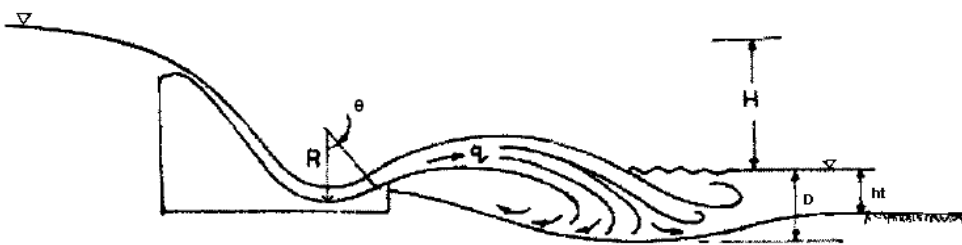
۱-۶- ضرورت تحقیق

آبشستگی ناشی از جت ریزشی در خروجی سازه‌هایی مانند کالورت و حوضچه‌آرامش‌اتفاق می‌افتد. آبشستگی در سازه‌ها از جنبه‌های ناپایداری سازه در اثر خسارت وارد به آن یا افزایش تراوش از زیر آن، خطر ناپایداری کف رودخانه در پایین دست و شیب کناره‌ها و خطر به وجود آمدن تپه‌هایی از مواد فرسایش یافته که در افزایش عمق آب پایاب موثرند، بسیار خطرناک بوده و باید کنترل شود. پرتاب‌کننده‌های جامی- در پروژ هیدرولیکی Dordogne که در فرانسه انجام پذیرفتونیز با مشاهداتی که Maitre و Obolenski بر روی جریان‌های جتانجام دادند، به عنوان یک طرح موفق مطرح گردید. با مطرح شدن پرتاب کننده جامی مسئله آبشستگی ناشی از جت نیز مطرح می‌شود. در سال ۱۹۶۰ آبشستگی ناشی از جت در سد کاباریاکه بر روی رودخانه زامبزی در افریقای جنوبی ساخته شده است، یک چاله آبشسته به عمق ۸۵ متر در عرض ۱۰ سال در محل برخورد فوران با بستر رودخانه بوجود آورد [۴]. تخمین میزان عمق آبشستگی از این رو اهمیت دارد که ممکن است باعث تخریب سازه شود و پایداری سرریز، سد و سازه‌های مرتبط را به مخاطره بیندازد.

همچنین تجمع مواد فرسایش یافته می‌تواند با تغییر رقوم پایاب، بر عملکرد خروجی سدها یا نیروگاه‌ها تاثیر بگذارد [۵]. در ضمن یک فرمول خاص که بتواند به خوبی میزان آبستگي را تعیین کند وجود ندارد لذا ضرورت انجام بررسی آزمایشگاهی بوجود می‌آید.

۷-۱- تبیین مسئله

در تحقیق حاضر هدف بررسی آبستگي پایین دست پرتاب کننده جامی شکل با استفاده از مدل آزمایشگاهی می‌باشد. شکل زیر نمای پرتاب کننده و سرریز را نشان می‌دهد. پرتاب کننده دارای شعاع مرکزی $R=45$ سانتیمتر و زاویه مرکزی $\theta=46/14$ درجه می‌باشد. ارتفاع کلی ریزش که از عوامل موثر بر پدیده آبستگي می‌باشد دارای مقدار H می‌باشد. عمق پایاب دارای مقدار h_t و بیشترین عمق آبستگي دارای مقدار D می‌باشد. با تغییر دبی و عمق پایاب در بستر پرتاب کننده ابعاد حفره آبستگي برداشت می‌شود. شکل جت مستطیلی و نوع جت ریزشی آزاد می‌باشد، آبستگي از نوع موضعی و جت ریزشی حاوی رسوب نمی‌باشد. با توجه به اهداف تحقیق حاضر با تغییر دبی و واحد عرض q و عمق پایاب h_t ، آزمایش‌های مربوطه انجام می‌شوند. چندین رابطه تجربی برای ابعاد حفره پایین دست ارائه می‌شود. همچنین با استفاده از داده‌های برداشت شده، مدل‌های شبکه عصبی برای ابعاد حفره ارائه و نتایج بررسی می‌شود.



شکل ۱-۱. شکل کلی از مساله مورد بررسی

فصل دوم

مروری بر مطالعات انجام شده

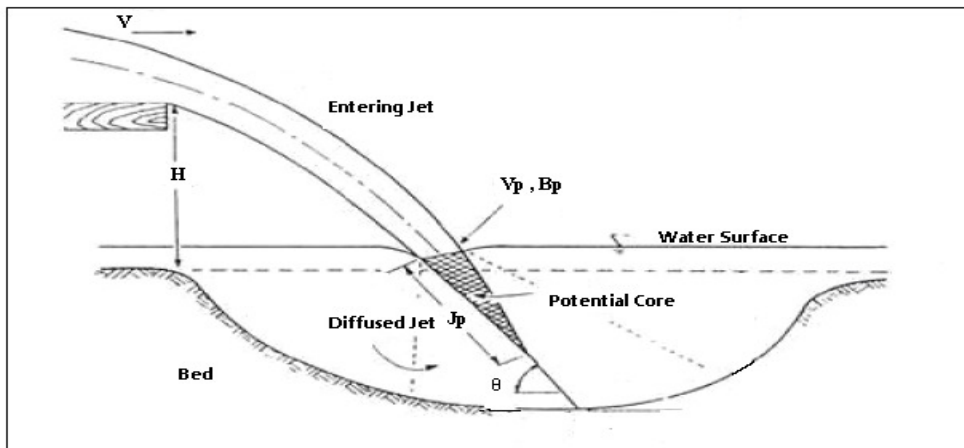
۲-۱- مقدمه:

فرآیند آبستگي یک پدیده دینامیکی است که در آن پارامترهای متعددی دخیل می‌باشند. مطالعات متعددی برای بررسی این پدیده انجام شده و روابط زیادی ارائه گردیده است که پایه اصلی این مطالعات، کارهای آزمایشگاهی بوده است. با توجه به اینکه در نظر گرفتن همزمان تمام متغیرهای موثر بر پدیده آبستگي در کارهای آزمایشگاهی مشکل است بنابراین هر کدام از محققان تنها با در نظر گرفتن تعدادی از متغیرها، آزمایش‌های خود را انجام داده و با توجه به آن شرایط خاص، روابطی ارائه داده‌اند. در این فصل، ابتدا خصوصیت جت و فرآیند آبستگي ناشی از آن معرفی می‌گردد و سپس به بررسی مطالعات برخی از محققین در خصوص اثر هر یک از پارامترها بر ابعاد حفره آبستگي پرداخته خواهد شد.

۲-۲- خصوصیات جت های ریزشی:

هنگامی که جت آب جاری می‌شود، به دلیل عملکرد اغتشاش داخلی، برش هوای اطراف آن و تاثیر کشش سطحی رو به انهدام می‌گذارد. اگر اغتشاش داخلی بنحوی افزایش یابد و یافاصله بین محل تشکیل جت تا انتهای مسیر زیاد باشد (در حالی که تحت اثر برش هوای اطراف قرار دارد) احتمال دارد قبل از رسیدن به حوضچه انتهایی مسیر نابود گردد. حتی این امکان وجود دارد که جت به صورت اسپری متشکل از قطره‌های آب در آید. حال اگر جت دارای شرایطی باشد که بدون انهدام به حوضچه برسد، بسیار سریعتر پخش خواهد شد تا وقتی که همان فاصله را در هوا طی کند. جتی که به حوضچه می‌رسد می‌تواند دارای زاویه و یا بصورت قائم باشد. زاویه برخورد جت با سطح آب (θ) خود در فرآیند فرسایش بخصوص شکل حفره تأثیر می‌گذارد.

مطابق شکل ۲-۱، اگر سرعت جت در برخورد با سطح حوضچه V_p باشد جت جریان به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌شود. قسمت اول ناحیه ایست که دارای یک هسته درونی (Potential core) به طول J_p از ابتدای جت، با کاهش عرض در جهت جت می‌باشد. در این ناحیه سرعت جت در طول خط مرکزی جت ثابت می‌ماند و مقدار آن حداکثر و برابر با سرعت اولیه جت خروجی V می‌باشد. در خارج از این ناحیه، سرعت جت به دلیل پخش (Diffusion) کم می‌شود و در کل می‌توان گفت که انرژی جت در جهت جت کاهش چشمگیری دارد.



شکل ۱-۲. شکل و خصوصیات جت ریزشی [۲]

رابطه عمومی پذیرفته شده برای سرعت جت صفحه‌ای در امتداد خط مرکزی و در خارج از هسته درونی
 در شکل (۱-۲) توسط Rajaratnam به صورت زیر ارائه شد [6]:

$$\frac{v}{\bar{v}} \quad (1-2)$$

که V_j سرعت جت صفحه‌ای در امتداد خط مرکزی و در خارج از هسته درونی، V سرعت اولیه جت خروجی، J فاصله از ابتدای جت در طول خط مرکزی جت، B_p ضخامت جت در برخورد با سطح پایاب و C_d ضریب پخش (Diffusion constant) با مقدار $2/47$ می‌باشد. در رابطه فوق با قرار دادن $V_j = V$ و $J = J_p$ ، طول هسته درونی جت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$J_1 \quad (2-2)$$

مطابق با روابط فوق طول هسته درونی جت و سرعت جت در امتداد خط مرکزی، به ضخامت جت، میزان آشفتگی و غیر یکنواختی سرعت جت اولیه بستگی دارد. در عمیق‌ترین قسمت حفره آبستگی، حداکثر سرعت جریان صفحه‌ای یا سرعت برخورد جت با بستر (V_b) از طریق رابطه ارائه شده توسط Wittaker & Schleiss بدست می‌آید [7]:

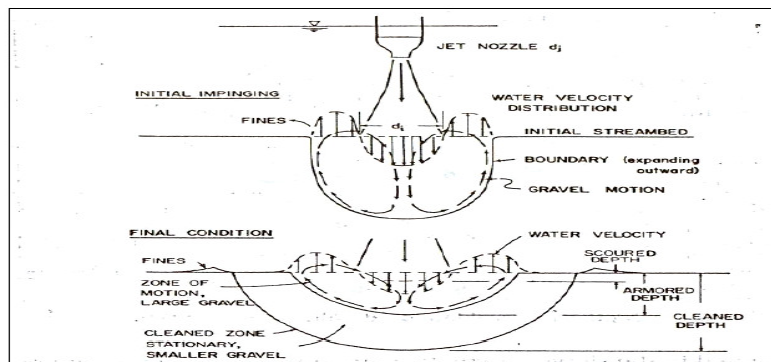
$$v \quad (3-2)$$

در این رابطه C_d ضریب پخش می‌باشد که مطابق با مطالعات *Albertson* و همکاران برابر $2/28$ است. V_b سرعت برخورد جت با بستر، θ زاویه برخورد جت با سطح حوضچه، Y_f عمق پایاب، Y_s حداکثر عمق حفره آبستگي و B_p ضخامت جت برخوردی با سطح پایاب است [۲].

در مصالح غیرچسبنده و غیریکنواخت چند پارامتر برای شناخت ابعاد حفره آبستگي در نظر گرفته می‌شود [8]:

- عمق آبستگي: در این عمق کل مصالح موجود در درون حفره از آن خارج می‌شوند.
- عمق قفل شدگی: تا انتهای این عمق تمام مصالح ریزدانه از حفره خارج می‌شوند.
- عمق تمیز شدگی: قسمتی از مصالح ریزدانه تا این عمق خارج می‌شوند و اثر جت تا انتهای این عمق مشاهده می‌شود.
- عرض تمیز شدگی: اثر جت تا انتهای این عرض دیده می‌شود و در انتهای این عرض مصالح ریزدانه بصورت عمده از جای خود خارج نشده‌اند.

در ادامه مکانیزم آبستگي در این نوع مصالح با توجه به شکل ۲-۲ توضیح داده می‌شود. با برخورد جت عمودی به بستر در لحظات ابتدایی و خارج شدن ذرات درشت‌دانه و ریزدانه، حفره آبستگي تشکیل می‌شود. جت در مسیر حرکت خود به درون حفره موجب بوجود آمدن جریان‌های چرخشی شده که باعث خارج شدن ذرات ریزدانه از درون حفره می‌شود. این ذرات در دهانه خارجی حفره رسوب می‌کنند. جت برخورد کننده به کف حفره به دلیل برخورد با ذرات درشت‌دانه که در عمق قفل شدگی قرار دارند مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد. در انتهای عمق قفل شدگی، جریان‌های چرخشی دیگر توانایی چرخاندن ذرات درشت‌دانه را نداشته و فقط ذرات ریزدانه را در مسیر چرخشی خود می‌چرخانند. بنابراین ذرات درشت‌دانه در شعاع‌هایی کمتر از شعاع چرخش مسیر حرکت ذرات ریزدانه حرکت می‌کنند. این روند تا عمقی ادامه می‌یابد که جت توانایی خارج کردن ذرات ریزدانه موجود در درون مرز انتهایی عمق تمیز شدگی را نداشته باشد [۲].



شکل ۲-۲. روند آبستنگی در مصالح غیر یکنواخت غیر چسبنده در اثر جت ریزشی عمودی [۲]

۲-۳- مکانیزم آبستنگی جت

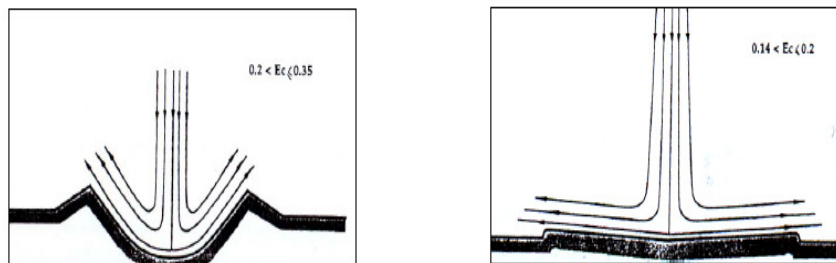
آبستنگی ناشی از برخورد جت با بستر فرسایش پذیر پایین دست را با توجه به نوع جت می توان به دو گروه آبستنگی ناشی از جت های عمودی و آبستنگی ناشی از جت های مایل تقسیم بندی کرد. هر کدام از حالت های فوق را می توان در گروه جت های مستغرق یا آزاد تقسیم بندی نمود.

۲-۳-۱- آبستنگی جت قائم

در جت های عمودی، در ناحیه جت آزاد، جت همانند آنچه در بند (۲-۲) گفته شد عمل می کند با این تفاوت که زاویه جت قائمه است. در نزدیکی بستر یک ناحیه برخورد تشکیل می گردد (Region Impinging) که جریان از حالت محوری به شعاعی تغییر جهت می دهد و بالاخره جریان منحرف شده به شکل جت دیواره ای در می آید. Rouse مطالعه بر روی یک جت عمودی مستغرق بر بستر غیر متراکم ماسه را انجام داد. وی مشاهده نمود که جریان داخل حفره به صورت جتی با حداکثر انحراف (Maximum deflection) یعنی زاویه انحراف نزدیک ۱۸۰ درجه شروع و با افزایش تدریجی فاصله برخورد جت، زاویه انحراف جت کمتر شده و جت از مرز حفره آبستنگی پیروی می کند [3]. Aderibigbe & Rajaratnam، پارامتر فرسایش را بصورت $E_c = SN \cdot D / H_c$ تعریف کردند که در آن، SN عدد فرود ذرات بستر، H_c ارتفاع ریزش جت و D قطر جت می باشد. ایشان رژیم های جریان را به دو دسته رژیم جت با تغییر جهت زیاد (Strongly deflected jet) و

رژیم جت با تغییر جهت کم (Weakly deflected jet) تقسیم بندی کردند که به اختصار SDJR و WDJR گفته می‌شود. به نظر می‌رسد که این دو رژیم نیز توسط یک رژیم انتقالی با هم مرتبط باشند [3].

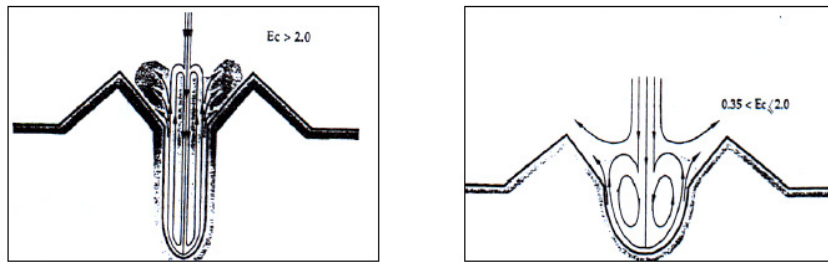
رژیم WDJR در مقادیر کمتر پارامتر فرسایش ($E_c < 0.35$) ایجاد می‌شود. این نوع رژیم یک پروفیل حفره آبستگي کم عمق را مشخص می‌کند. شکل ۲-۳ به طور شماتیک جت برخوردکننده را برای دو حالت WDJR نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳. طرح شماتیک جت برخورد کننده در دو حالت [۲WDJR]

در این حالت جت انحراف یافته به صورت جت دیواره‌ای مسیر حفره را طی می‌کند. تنها در لبه حفره فرسایش در ($r = r_0$) جدایی جریان در اثر تغییر شکل بستر اتفاق می‌افتد. سیستمی از مواد موجود در بستر در ضمن حرکت در ناحیه انحراف ته نشین و قسمتی نیز به سمت خارج از حفره هدایت می‌شوند. ذرات خارج شده از حفره اگر درشت‌دانه باشند و جریان خروجی از جت نتواند آن‌ها را با خود حمل کند به صورت یک برآمدگی در اطراف حفره ته‌نشین و در صورتی که ریزدانه باشند و جت خروجی از حفره توانایی حمل آن‌ها را داشته باشد در ناحیه دور دست ته نشین می‌شوند [۲].

رژیم SDJR با ایجاد یک چاله عمیق در مرکز و یک ناحیه خارجی با یک شیب مستقیم تا لبه حفره آبستگي مشخص می‌شود (شکل ۲-۴).



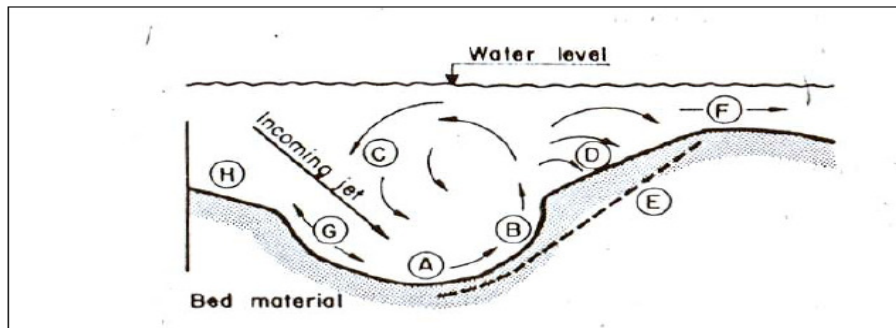
شکل ۲-۴. طرح شماتیک جت برخورد کننده در دو حالت جت [۲SDJR]

شرایط تشکیل این رژیم $E_c > 0.35$ می‌باشد. انحراف جت مواد فرسایش یافته در درون حفره را به صورت معلق به خارج گودال انتقال می‌دهد. در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال جت در فواصل شعاعی بزرگتر، ذرات بر روی کناره‌های داخلی حفره فرسایش، ته‌نشین شده و در نتیجه به سمت مرکز حفره فرسایش سر می‌خورند و دوباره به وسیله جریان برخوردی جت از کف حفره برداشته می‌شوند. از مشخصه‌های این نوع حفره، تناوبی بودن عمق حفره آبستنگی می‌باشد و اینکه در زمان پایان آزمایش هنگامی که جریان جت قطع می‌شود، همه ذرات معلق برای پر کردن گودال فرسایش ته‌نشین می‌شوند. بنابراین عمق فرسایش دینامیکی (عمق آبستنگی نهایی در حین انجام آزمایش) بیشتر از عمق فرسایش استاتیکی (عمق آبستنگی پس از قطع جریان) است.

تحت شرایط جریان مشخص، مواد بستر در ناحیه داخلی حفره فرسایش می‌یابد. در صورتی که در آن سوی نقطه جدایی، حمل مواد به وسیله جت دیواره‌ای جدا شده صورت می‌گیرد و در نهایت رسوبات ته‌نشین می‌شوند. با افزایش قدرت جت E_c زاویه انحراف جت افزایش یافته تا به مقدار 180° درجه برسد. هر چه زاویه بزرگتر می‌شود قسمت بیشتری از مواد فرسایش یافته دوباره به درون حفره باز می‌گردند و نمی‌توانند خود را از جریان‌های دورانی متناوب درون حفره خارج ساخته و به نرخ فرسایش کمک کنند. تنها بخش کوچکی از ذرات خود را به جریان حمل شعاعی رسانده و به سمت لبه گودال، حمل شده و ته‌نشین می‌شوند. این روند ادامه می‌یابد تا زمانی که تعادل دینامیکی بین جریان و شکل بستر به وجود آید که در آن ظرفیت حمل جریان شعاعی برابر با ظرفیت فرسایش باشد [۲].

۲-۳-۲- آبشستگی جت مایل

در این نوع جت نیز فرآیند آبشستگی اولیه خیلی سریع به وقوع می‌پیوندد. شکل ۲-۵ انواع جریان‌های داخل حفره آبشستگی برای یک جت مایل را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۲-۵) جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره آبشستگی A شسته و همراه خود به سمت پائین دست سطح برخورد (محدوده B)، انتقال می‌دهد. در این محدوده جت، منحرف شده و تقریباً رو به بالا بلند می‌شود در حالی که مواد کف را نیز به همراه خود دارد. در این حالت قسمتی از جریان به سمت بالا دست (محدوده C)، بر می‌گردد و دوباره وارد جریان جت اولیه می‌شود. رسوبات همراه این جریان در داخل حفره به صورت معلق باقی می‌مانند. باقی جریان به سمت پائین دست فرستاده شده و بخشی از مواد فرسایش یافته همراه خود را روی سطح شیبدار (D) ته‌نشین و همراه باقی ذرات به سمت پائین دست آن سوی تپه (محدوده F)، حرکت می‌کند. در حالی که مقدار مواد بستر در محدوده D بطور متناوب افزایش می‌یابد، مواد ته‌نشین شده در این سطح بتدریج سرخورده و به داخل حفره اصلی باز می‌گردد. در نتیجه شیب سطح D مسطح تر و سطح E پدیدار می‌شود. در سطح G قسمتی از مواد بستر چنانچه نشان داده شده است دارای حرکت نوسانی می‌باشند. در حالی که در سطح H مواد بستر بدون حرکت هستند.



شکل ۲-۵. انواع رژیم جریان یک جت مایل داخل حفره آبشستگی [۲]

این فرآیند پیوسته تکرار می‌شود تا زمانی که میزان فرسایش در سطح A با نرخ مواد فرستاده شده به پائین دست، بر روی تپه F برابر گردد و به عبارت بهتر ریزش سطح D متوقف گردد و فرسایش به حالت تعادل

برسد. پس از قطع جریان جت، هر دو سطح بالادست و پائین دست حفره به داخل حفره ریزش خواهند کرد [۲].

۲-۴- ابعاد حفره آبشستگی:

آبشستگی فرایندی است وابسته به زمان، به این معنی که پارامترهای مختلف آن با گذشت زمان دستخوش تغییر می‌شوند. بنابراین لازم خواهد بود تا بسته به اهداف تحقیق، زمانی به عنوان زمان مبنای انجام آزمایش لحاظ گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت فرسایش پس از مدتی، بسیار ناچیز می‌شود اما این سرعت هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد. نتایج مطالعات Clarke نشان داد که ۷۰ درصد عمق نهائی حفره آبشستگی چند ثانیه اول تشکیل می‌شود [9]. فرضیه افزایش لگاریتمی عمق فرسایش با زمان توسط Rouse ارائه گردید. به این معنی که ابتدا ابعاد حفره بصورت خطی با لگارتیم زمان افزایش می‌یابد و پس از زمان فوق، تغییرات آبشستگی غیر خطی می‌شود و در نهایت بعد از مدت زمان طولانی، آبشستگی به مقدار مشخصی می‌رسد که مستقل از زمان است و گفته می‌شود آبشستگی به تعادل رسیده است. اغلب مطالعاتی که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد مربوط به انجام آزمایش در زمان تعادل است [۲].

پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی که تا به حال محققان به بررسی آن پرداختند شامل اثر اختلاف چگالی $(\Delta\rho)$ ، عمق پایاب (Y_f) ، ابعاد رسوب و دانه بندی مصالح بستر، ابعاد و شکل جت، دبی یا سرعت جت خروجی، ارتفاع ریزش، زاویه جت، هوای ورودی به جت و زمان می‌باشند. Aderibigbe&Rajaratnam با جمع‌آوری داده‌های جت‌های عمودی استوانه‌ای مستغرق آب و هوا، روابط زیر را بدست آوردند [3]:

(۴-۲)

که در آن:

$$\Delta\rho = (\rho_s - \rho)/\rho \quad (۵-۲)$$

$$E \quad (۶-۲)$$

Y_s حداکثر عمق نهائی آبشستگی از سطح مصالح، V سرعت جت خروجی از لوله، D قطر لوله، g شتاب جاذبه زمین، d_{50} قطر متوسط ذرات بستر، H ارتفاع ریزش جت تا بستر، ρ چگالی سیال و ρ_s چگالی ذرات بستر و E_o پارامتر فرسایش جت استوانه‌ای می‌باشند. ایشان همچنین حداکثر عرض حفره آبشستگی از محور جت (B_s) را به شکل زیر تعریف کردند :

$$\frac{B}{F} \quad (7-2)$$

مطالعات انجام شده توسط Chiew & Lim بر روی جت‌های دیواره‌ای و ریزشی (Offsetjet) استوانه‌ای مستغرق آب و هوا نشان می‌دهد که شکل حفره آبشستگی در سیال آب و هوا متفاوت و برای پارامتر فرود ذره یکسان است ابعاد آبشستگی در هوا بزرگتر از آب است ولی ارتفاع بالا آمدگی رسوبات در آب خیلی بیشتر از هوا است که در واقع تفاوتی بین آب و هوا محسوب می‌شود [10]. ایشان نشان دادند که شکل و ارتفاع بالا آمدگی رسوبات در آب، تأثیر مهم بر توسعه حفره آبشستگی دارد به قسمی که ارتفاع تپه بزرگتر در آب، مانع حفره آبشستگی شده و منجر به تشکیل حفره کم عمق تری نسبت به هوا می‌گردد.

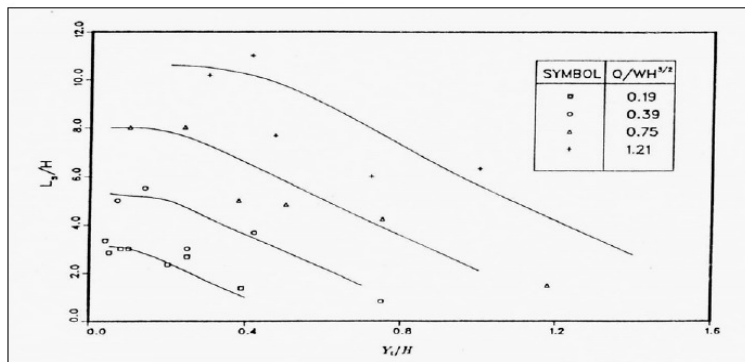
Dodiah آزمایش‌های خود را بر روی جت استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر انجام داد و مشاهده نمود که با افزایش عمق پایاب، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. مطلب دیگری که Dodiah به آن اشاره می‌کند کاهش نرخ افزایش عمق حفره آبشستگی با افزایش پایاب می‌باشد. البته عمق پایاب کم باعث می‌شود که برآمدگی‌های تشکیل شده در اطراف حفره مانع از خروج مصالح جدیدی شوند که از حفره خارج می‌شوند. به همین دلیل است که عمق حفره آبشستگی در حالت عمق پایاب کم، کمتر از حالتی است که عمق پایاب زیاد باشد. بنابراین حدی برای افزایش عمق حفره آبشستگی به ازای افزایش عمق پایاب وجود دارد [۱۱]. Martins حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد را تابعی از عمق پایاب بیان کرد و رابطه زیر را ارائه نمود [12]:

$$\gamma \quad (8-2)$$

$$\lambda \quad (9-2)$$

Abida & Townsend نشان دادند که طول حفره آبشستگی (L_s) نیز مانند عمق حفره با افزایش دبی افزایش می‌یابد و با کاهش عمق پایاب طول حفره افزایش می‌یابد (شکل ۲-۶). این محققین نشان دادند

هنگامی که عمق پایاب کم باشد طول حفره آبستگی مستقل از عمق پایاب می‌باشد اما افزایش پایاب اثر زیاد بر طول حفره آبستگی دارد به طوری که هر چقدر عمق پایاب بیشتر شود طول آبستگی کمتر می‌شود [13].



شکل ۲-۶. تغییرات طول آبستگی نسبت به عمق پایاب بر اساس پارامترهای مختلف جریان [13]

Aderibigbe & Rajaratnam جت‌های مستغرق عمودی از نوع استوانه‌ای را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که در جت‌های مستغرق اثر پایاب بر ابعاد حفره آبستگی بی تأثیر ولی ارتفاع تپه پایین دست حفره در حالت استغراق زیاد، بیشتر از حالت استغراق کم می‌باشد [3]. محبوبی به منظور بررسی اثر پایاب بر حداکثر عمق آبستگی آزمایش‌هایی با قطر مصالح ۱ میلی‌متر، ارتفاع ریزش ۵۰ سانت، دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و شش عمق پایاب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتیمتر انجام داد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبستگی افزایش یافته است. همچنین شکل تپه حاصل از مواد فرسایش یافته تابعی از عمق پایاب است به طوری که در پایاب کم عمق، تپه ایجاد شده دوزنقه و در پایاب عمیق شکل حاصل مثلثی شکل می‌باشد. به نظر می‌رسد که سرعت جریان عبوری از روی برآمدگی پایین دست به دلیل کاهش عمق پایاب افزایش یافته و در نتیجه رسوبات در فاصله‌ای دورتر رسوب می‌کنند در نتیجه شکل آن بصورت دوزنقه‌ای خواهد شد [۱۴].

آذر با انجام آزمایش بر روی یک سرریز ریزشی آزاد با مصالح ۲/۹ - ۱۵/۶ میلی‌متر و دبی ۲۰-۵ لیتر در ثانیه با ارتفاع ریزش و عمق پایاب مختلف نشان داد که افزایش عمق پایاب باعث افزایش حداکثر عمق آبستگی و کاهش طول حفره آبستگی می‌شود. همچنین با افزایش پایاب هم ارتفاع تپه و هم شکل تپه

تشکیل شده پائین دست حفره دچار تغییر می شود به طوری که در پایاب عمیق ارتفاع تپه افزایش می یابد ولی در پایاب های کم عمق ارتفاع تپه ثابت می شود. [۱۵]. نجفیانمیش های را بر روی جت خروجی از کالورت دایره ای با قطر ۲/۲-۴/۶، ارتفاع ریزش ۳۰ و عمق پایاب ۲۰-۵ سانتیمتر انجام داد. جنس مصالح بستر ماسه شسته شده با دانه بندی یکنواخت با $d_{50} = 2/2$ و انحراف معیار $\sigma = 1/3$ بود. محدوده دبی ۱/۵-۰/۵ لیتر بر ثانیه تغییر می کرد. وی نشان داد که [۱۶]:

- با افزایش عمق پایاب از مقدار و عرض و ارتفاع برآمدگی رسوبات پائین دست حفره آبشستگی کاسته می شود ولی با افزایش طول حفره آبشستگی افزایش پیدا می کند.
- با افزایش عمق پایاب حفره به سمت پائین دست جابجا می شود و فاصله نقطه شروع حفره از انتهای کالورت افزایش می یابد.
- با افزایش عمق پایاب فاصله محل وقوع حداکثر و عرض برآمدگی رسوبات افزایش می یابد.

سعیدی نژاد با انجام آزمایش بر روی سرریز ریزشی آزاد با مصالح یکنواخت به قطر ۲/۸-۰/۶ میلیمتر، دبی ۲۰/۸-۷/۴۷ لیتر بر ثانیه و ۵ عمق پایاب نشان داد که عمق پایاب بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی اثر افزایشی-کاهشی دارد. افزایش عمق پایاب تا یک مقدار حدی، Y_s را افزایش و سپس باعث کاهش آن می شود. ایشان مقدار حدی را وابسته به Fr_d دانست و رابطه زیر را ارائه کرد [۱۷]:

$$\frac{Y}{H} \quad (10-2)$$

همچنین سعیدی نژاد بیان کرد که فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب افزایش می یابد. در روابط بالا Y_{ti} عمق پایاب حدی، Fr_d عدد فرد ذره، R شعاع هیدرولیکی جت و H_c ارتفاع ریزش جت می باشد. ایشان همچنین رابطه ای به شکل زیر را برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی ارائه نمود [۱۷]:

$$\varphi \quad (11-2)$$

در جدول ۱-۲ ضرایب معادله فوق بر حسب پارامتر اندازه گیری شده ارائه گردیده است:

جدول ۱-۲. ضرایب معادله سعیدی نژاد [۱۷]

پارامتر اندازه گیری شده	a	b	c	d	e	f
Y_s	12.61	0.36	1.63	32.1	0.28	0.47
L_s^2	14266.97	0.5	0.89	5064.44	0.58	2.05
W_s^2	7273.34	0.5	0.89	2857.12	0.58	2.05

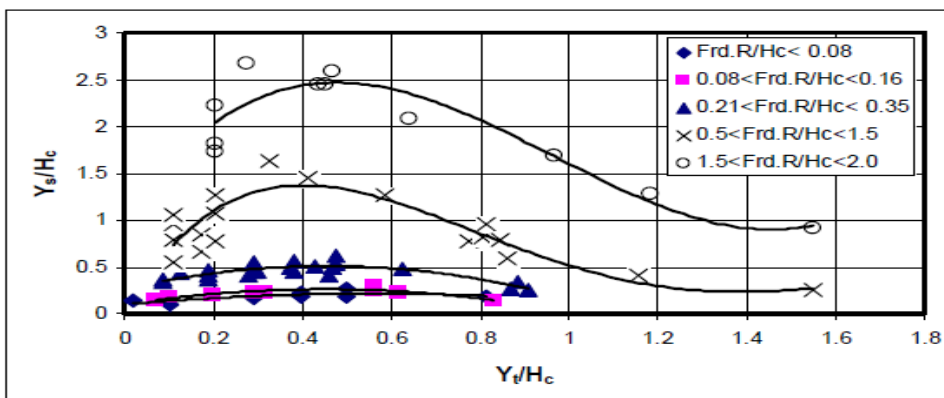
به ترتیب بیشترین عمق، بیشترین عرض و بیشترین طول حفره می‌باشند و φ نماینده ابعاد حفره می‌باشد. قدسیان و همکاران با تحلیل بر روی داده‌های آزمایشگاهی نجفی، آذر و Dohering&Abt اثر پایاب را بطور جداگانه بررسی کردند، ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت عمق پایاب به ارتفاع ریزش Yt/Hc ، نسبت ابعاد حفره آبستگي و تپه پایین دست آن افزایش یافته، به مقدار حداکثر می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۲-۷ حداکثر عمق آبستگي برای تمام مقادیر $Frd.R/Hc$ حدوداً در $Yt/Hc = 0/4$ اتفاق می‌افتد. در مقادیر بالای Yt/Hc ، اثر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستگي کم می‌شود. ایشان همچنین رابطه‌ای برای محاسبه ابعاد حفره آبستگي بصورت زیر ارائه کردند [18]:

$$\frac{4}{Y} \quad (12-2)$$

در جدول ۲-۲ مقادیر a, b, c برای پارامترهای مختلف ابعاد حفره ابعاد حفره آبستگي ارائه گردیده است.

جدول ۲-۲. ضرایب رابطه قدسیان و همکاران [18]

φ	a	b	c
d_s (عمق آبستگي)	1.925	-0.66	0.3
L_s (طول آبستگي)	8.432	-0.9	1
W_s (عرض آبستگي)	10.126	-0.02	0.2
h_m (ارتفاع تپه آبستگي)	0.549	-0.3	0.03



شکل ۲-۷. نسبت عمق آبستگي به عمق پایاب [18]