

تشخیص تشکیل فرم بستر کلاستری در رودخانه‌های با بستر شنی

مسعود کرباسی^{۱*}، محمد حسین امید^۲ و جواد فرهودی^۳

چکیده

کلاسترها یکی از انواع فرم‌های بستر در رودخانه‌های با بستر شنی هستند. این فرم‌های بستر شامل گروه‌های جدا و سازمان یافته از ذراتی هستند که بالای تراز متوسط بستر اطراف خود تشکیل می‌شوند. فرم‌های بستر کلاستری به دلیل اینکه شرایط جریان و انتقال رسوب را تحت تاثیر قرار می‌دهند از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هدف اصلی این تحقیق تشخیص شرایط رسوب و جریان برای تشکیل کلاسترها است. در این تحقیق خصوصیات رسوب و جریان در یک فلوم آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد و وجود یا عدم کلاسترها در هریک از این آزمایش‌ها ثبت شد. آزمایش‌ها در شرایط جریان پایدار، جریان آب صاف و مواد بستری یکنواخت اجرا شد. با استفاده از رگرسیون لجستیک، تحلیل آماری در مورد وقوع کلاسترها و ترکیب‌هایی از پارامترهای اندازه‌گیری شده که با آنالیز ابعادی بدست آمده بود انجام گرفت. نتایج نشان داد که می‌توان با دو پارامتر $U_{avg}^2 h / gd_u^2$ و gd_u / U_{avg}^2 تشکیل کلاستر را با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک به خوبی پیش‌بینی کرد. این طور به نظر می‌رسد این دو پارامتر به علت متغیرهای مرتبط با خصوصیات رسوبی و هیدرولیک جریان، این قابلیت را دارند.

واژه های کلیدی: رودخانه‌های با بستر شنی، فرم‌های بستر، کلاسترها و پیش‌بینی کلاستر

ارجاع: کرباسی م، امید م.ح. و فرهودی ج. ۱۳۹۰. تشخیص تشکیل فرم بستر کلاستری در رودخانه‌های با بستر شنی. مجله پژوهش آب ایران.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

۳- استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: m.karbasi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۱۹

مقدمه

کرد. کلاسترها ضریب زبری را افزایش می‌دهند و در نتیجه روابط دبی - اشل را تحت تأثیر قرار می‌دهند (میلار، ۱۹۹۹). بطور معمول کلاسترها در آبراهه‌های با بستر شنی با انتقال مواد بستری کم و محدوده شیب‌های ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۷ وجود دارند و عقیده براینست که این فرم‌های بستر به عنوان سازه‌های هدر دهنده انرژی عمل می‌کنند (گوستاوسون، ۱۹۷۴).

اساسی‌ترین سوال در مورد کلاسترها این است که شرایط هیدرولیکی و رسوبی برای تشکیل کلاسترها چه چیزهایی هستند و یا کلاسترها چه موقع و کجا در یک سیستم آبراه‌های تشکیل می‌شوند.

یکی از نظریه‌های متداول در مورد زمان تشکیل کلاسترها به این مطلب اشاره دارد که این فرم‌های بستر در شاخه پایین رونده هیدروگراف سیل تشکیل می‌شوند (برایشاوا، ۱۹۸۴؛ بیلی، ۱۹۸۸؛ رید و حسن، ۱۹۹۲؛ وایتنبرگ و نیوسون، ۲۰۰۵). بقیه نظریه‌ها بیان می‌دارند که کلاسترها بجای تشکیل شدن در شاخه پایین رونده هیدروگراف در شاخه بالارونده آن و با ترتیب یافتن ذرات در هنگام شروع به حرکت ذرات، شروع به شکل یافتن می‌کنند (کلیفورد، ۱۹۹۲). با توجه به اینکه هنوز در رودخانه‌های طبیعی، تشکیل کلاسترها به صورت مستقیم مشاهده نشده‌اند، می‌توان گفت که تشکیل کلاسترها تحت شرایط انتقال انتخابی^۳ است (دال سین، ۱۹۶۸؛ چرچ و همکاران، ۱۹۹۸؛ استورم و همکاران، ۲۰۰۴).

بیشتر مطالعات این شرایط انتقال انتخابی را به وجود درجه‌بندی در اندازه ذرات بستر نسبت داده‌اند (چرچ و همکاران، ۱۹۹۸). مطالعات دیگر ثابت کرده‌اند که توپوگرافی کلاستری در ذرات یکنواخت نیز به علت شرایط تلاطمی جریان قابل شکل‌گیری است (پاپانیکیولا و همکاران، ۲۰۰۳ و استورم و همکاران، ۲۰۰۴).

در اکثر تحقیقات آزمایشگاهی قبلی بجای استفاده از رسوبات طبیعی از گوی‌های شیشه‌ای استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق تشخیص شرایط جریان و رسوب برای تشکیل کلاسترها است.

رودخانه‌های مناطق کوهستانی از جنبه‌های مختلفی با رودخانه‌های مناطق پست تفاوت دارند. همان طور که باتهورست (۱۹۸۷) تأکید می‌کند، اکثر تحقیقات انتقال رسوب در رودخانه‌ها بر روی رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای، سیلنتی مناطق پست متمرکز گشته و تنها اخیراً توجه نسبتاً گسترده‌ای به رودخانه‌های با بستر شن و قلوه‌سنگی شده است. آبراهه‌های رودخانه‌های کوهستانی معمولاً دارای شیب تندتر، زبری‌های کف بزرگتر و سیلاب دشت‌های خیلی کم عرض و غیرپیوسته‌اند.

یکی از مهمترین خصوصیات رودخانه‌های با بستر شنی، متغیر بودن توپوگرافی بستر آنها است. این توپوگرافی از فرم‌های بستر کوچک مقیاس که به عنوان کلاستر شناخته می‌شوند، (برایشاوا و همکاران، ۱۹۸۳) تا فرم‌های بستر متوسط و بزرگ مقیاس مانند استخر-ریفل، پله استخری و آنتی دیون‌ها متغیر است. (ووهل، ۲۰۰۰).

در واقع کلاسترها گروه‌هایی از ذرات جدا از هم که بصورت سازمان یافته‌ای در بالای تراز متوسط سطح بستر اطراف قرار گرفته‌اند. علت تشکیل کلاسترها را فرونشست سریع سیل‌ها دانسته‌اند (ویتاگر، ۱۹۸۷). برای تشکیل کلاسترها، لازم است که دو یا چند قطعه به صورت یک گروه درآیند. یک کلاستر معمولاً شامل یک مانع^۱ است که اندازه آن در بیشتر موارد بزرگتر از D_{84} مواد بستری است. بالادست این مانع تجمعی از ذرات روی هم قرار گرفته بوجود می‌آید و در پایین دست آن نیز دنباله^۲ تشکیل می‌شود (پاپانیکیولا و همکاران، ۲۰۰۳).

ساختمان‌های کلاستری که شکلهایی نزدیک به دایره‌ای و بیضوی دارند، به نام کلاسترهای حلقوی شناخته می‌شوند (کوزلوفسکی و ارگنزیگر، ۲۰۰۰). هنگامی که تعداد زیادی ذرات به صورت یک توده در می‌آیند، به نظر می‌آید که کلاسترها لایه‌های سنگفرشی مجزا از همی را تشکیل می‌دهند (چانگ، ۱۹۹۸).

استورم، ۲۰۰۶، کلاسترها را به پنج دسته سنگریزه‌ای، توده‌ای یا کپه‌ای، دنباله‌دار، خطی و حلقه‌ای طبقه‌بندی

1 - Obstacle

2 - Wake

3 - Selective transport

مواد و روش‌ها

برای نیل به اهداف مورد نظر در این تحقیق، از یک مدل آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه مرکزی تحقیق آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران استفاده شد. این کانال دارای طول ۱۸ متر، عرض ۰/۹ متر و عمق ۰/۶ متر است و از ورقه‌های پلکسی گلاس ساخته شده است. به منظور کمی کردن داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق اقدام به عکسبرداری شد. برای نیل به این منظور از یک دوربین Canon Powershot S70 که با استفاده از کامپیوتر قابل کنترل از راه دور است، استفاده شد. این دوربین دارای قدرت تفکیک پذیری ۷ مگاپیکسل و بزرگنمایی اپتیکال 3X می‌باشد. به دلیل جلوگیری از قطع عکسبرداری در خلال آزمایش‌ها از سیستم تامین برق AC استفاده شد. آزمایش‌های تحقیق فوق در شرایط مختلف جریان، شیب و رسوب اجرا شده است. نحوه آزمایش‌ها به شرح زیر است:

الف- پخش رسوبات در کف بنحوی که رسوبات بهم چسبیده نباشند.

ب- برقرار کردن جریان و حصول جریان یکنواخت

ج- مشاهده و عکسبرداری از فرایندهای موجود (فاصله عکسبرداری‌ها ۳۰ ثانیه می‌باشد).

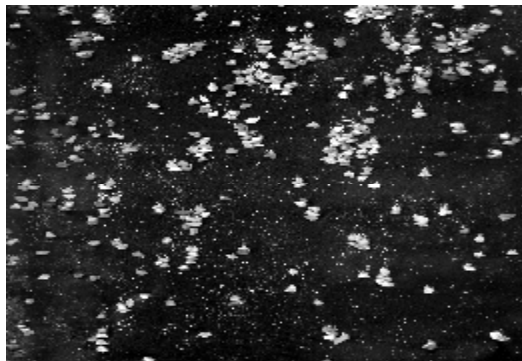
د- انجام آزمایش تا رسیدن به شرایط تعادل (شرایطی که دیگر حرکت رسوبات و تغییر شکل کلاسترها مشاهده نشود) که در حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد. زمان ۳۰ دقیقه با استفاده از یک سری آزمایش که در مدت زمان‌های طولانی انجام گرفته و عکسبرداری نیز انجام شده، بدست آمده است.

در مجموع ۴۷ آزمایش در شرایط مختلف اجرا شد که خلاصه شرایط آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- خلاصه شرایط آزمایشگاهی

دبی	۸۷-۶ lit/sec
شیب	۰/۰۵ و ۰/۰۱
عمق	۰/۱۱ - ۰/۰۱۷m
سرعت متوسط	۱/۱۶ - ۰/۳۷ m/sec
قطر رسوب	۸/۷۳، ۱۱/۱، و ۱۵/۹ ۲۰/۱ mm
عدد فرود	۱/۲۹ - ۰/۵۲

شکل ۱ یک نمونه از نتایج آزمایش‌ها را بر روی رسوبات با قطر ۱۵/۹ میلی‌متر و دبی ۳۹/۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۱- یک نمونه از نتایج آزمایش‌ها

تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر پدیده

برای شناخت پارامترهای موثر بر پدیده مورد مطالعه، پارامترهای بدون بعد با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج می‌شوند. از میان روش‌های ارائه شده در تحلیل ابعادی، روش پارامتر بی بعد پی- باکینگهام متداولترین روش شناخته شده است که در بررسی‌های این پژوهش استفاده شد. برای تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر پدیده لازم است ابتدا پارامترهای موثر شناسایی شوند. با توجه به این موضوع می‌توان پارامترهای موثر بر پدیده را به شکل معادله ۱ نوشت.

$$f(U_{avg}, \mu, S, h, g, \rho, \rho_s, w, d_u) = 0 \quad (1)$$

که در آن S : شیب کانال، h : عمق جریان، g : شتاب ثقل، ρ و ρ_s : به ترتیب جرم واحد حجم آب و رسوب، w : عرض کانال، d_u : قطر رسوبات یکنواخت هستند.

به منظور کم کردن متغیرهای ارائه شده در بالا و بدست آوردن گروه‌های معنی داری از متغیرها برای تحلیل‌های بعدی، آنالیز ابعادی صورت گرفت (معادله ۲).

$$\phi\left(\frac{\mu}{\rho U_{avg} d_u}, \frac{h}{d_u}, \frac{g d_u}{U_{avg}^2}, \frac{\rho_s}{\rho}, S, \frac{w}{d_u}\right) = 0 \quad (2)$$

در معادله بالا برخی از نسبت‌های ثابت هستند که از آنها صرف نظر خواهد شد (معادله ۳).

$$\phi\left(\frac{\mu}{\rho U_{avg} d_u}, \frac{h}{d_u}, \frac{g d_u}{U_{avg}^2}, S\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه ضرب و تقسیم اعداد بدون بعد، اعداد بدون بعد جدیدی بوجود خواهد آورد، می‌توان پارامترها را کاهش داد.

مدل رگرسیون لجستیک C را به‌عنوان تابعی از متغیرهای پیش‌بینی کننده، پیش‌بینی می‌کند. اهمیت آماری هر یک از متغیرها با استفاده از اختلاف در انحراف باقی‌مانده‌ها بین مدل دو متغیره و مدل خنثی برآورد می‌شود. انحراف باقی‌مانده به صورت معادله ۷ تعریف می‌شود:

$$D_R = -2 \ln (\ell(B)) \quad (7)$$

توزیع اختلاف انحراف باقی‌مانده‌ها بین مدل با درجه‌های آزادی مختلف در اینجا به‌عنوان آزمون آماری G نامگذاری می‌شود. G تقریباً از توزیع χ^2 تبعیت می‌کند و در نتیجه می‌تواند برای محاسبه مقادیر P مدل آزادی $P[\chi^2(df_1 - df_2) > G]$ استفاده شود. آزمون آماری G به صورت $G = D_{R1} - D_{R2}$ تعریف می‌شود که در آن D_{R1} : انحراف باقی‌مانده برای مدل بدون ترم‌های اضافی و D_{R2} : انحراف باقی‌مانده برای مدل با ترم‌های اضافی است. برای مدل دو متغیره D_{R1} : مدل خنثی می‌باشد. مدل‌های دو متغیره‌ای که از نظر اهمیت آماری در ۹۰ درصد حد اطمینان هستند ($\chi^2 p\text{-value} < 0.1$) برای توسعه بیشتر مدل انتخاب می‌شوند.

انتخاب مدل و ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل

با توسعه مدل اهمیت آماری، معیاری مورد نیاز است تا توانایی مدل را در پیش‌بینی کلاستری شدن بستر، مورد ارزیابی قرار دهد. در این مرحله می‌توان از دو سنجه آماری استفاده کرد. از شاخص AIC^1 و منحنی‌های ROC² می‌توان برای این منظور استفاده کرد. شاخص AIC به صورت معادله ۸ تعریف می‌شود:

$$AIC = D_R + 2(n+1) \quad (8)$$

در اینجا n تعداد پارامترهای پیش‌بینی کننده در مدل هستند. کم بودن مقدار AIC نشان دهنده بهتر بودن مدل است. منحنی‌های ROC برای بررسی قابلیت کلی مدل آماری در پیش‌بینی صحیح وجود یا عدم وجود کلاسترها می‌باشد. قبل از تعریف منحنی ROC، طبیعت و رفتار مدل رگرسیونی و خروجی پیش‌بینی شده محتمل باید بررسی شود. خروجی نهایی رگرسیون لجستیک رابطه‌ای است که احتمال موفقیت $\pi(X_j)$ ، که حضور کلاستر است را با توجه به متغیر پیش‌بینی کننده به ما ارائه می‌کند.

مدل آماری مناسب برای تحلیل داده‌ها

در مورد کلاستر نیاز به مدلی است که حالت دو دویی وجود یا عدم وجود کلاستر را بیان کند. این را می‌توان با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک انجام داد. رگرسیون لجستیک شکلی از مدل‌های خطی است که می‌توان با آن ترکیبی از متغیرهای پیوسته و حتمی را بررسی کرد و می‌توان آن را در پیش‌بینی فرایندهای مختلف ژئومورفولوژیکی مانند پیش‌بینی شکستن یخ در رودخانه‌ها و پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع رانش زمین، بکار برد.

رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک احتمال موفقیت π را با استفاده از تابع زیر به متغیرهای پیش‌بینی کننده مرتبط می‌سازد (معادلات ۴ و ۵).

$$\pi(x) = \frac{e^\eta}{1 + e^\eta} \quad (4)$$

$$\eta = \alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j \quad (5)$$

X_j ، متغیرهای پیش‌بینی کننده‌اند.

ضرایب مدل برازش شده α و β_j با استفاده از روش حداکثر کردن تابع درست‌نمایی بدست می‌آیند.

$$\ell(\beta) = \prod_{i=1}^n [\pi(x_i)]^{y_i} [1 - \pi(x_i)]^{(1-y_i)} \quad (6)$$

در معادله فوق y_i : نشان دهنده نتیجه پاسخ دو دویی متغیر پاسخ است و n: تعداد اندازه‌گیری‌ها است. حداکثر درست‌نمایی مقدار β را طوری محاسبه می‌کند که احتمال بدست آمدن داده‌های مشاهده شده حداکثر شود. مقدار $\pi(x)$ در محدوده صفر تا یک قرار دارد و نشان دهنده احتمال وقوع نتیجه مطلوب ما است.

تحلیل آماری داده‌های این تحقیق با استفاده از نرم افزار آماری SPSS 17 انجام گرفته است.

تولید مدل و انتخاب پارامترها

تحلیل ابعادی نشان داد که کلاستری شدن بستر می‌تواند تابع متغیرهای فیزیکی مختلفی باشد. هدف از مدل آماری، یافتن متغیر و یا ترکیبی از متغیرها است که به لحاظ آماری بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی وقوع کلاستر دارند. برای رسیدن به این هدف، اهمیت آماری هر یک از پارامترها و توانایی مدل برای پیش‌بینی با دقت وقوع کلاسترها بررسی می‌شود.

1- Akaike Information Criteria

2- Receiver Operator Characteristic

۰/۸-۰/۷، ضعیف، ۰/۷-۰/۶، شکست مدل، ۰/۶-۰/۵ متوسط، ۰/۹-۰/۸ خوب، ۱-۰/۹ عالی (لوتو و جورت، ۲۰۰۵).

Cox & Snell R² and Nagelkerke R²: این دو پارامتر به مانند پارامتر R² در رگرسیون چند متغیره‌اند، با این تفاوت که Cox & Snell R نمی‌تواند به مقدار یک برسد ولی Nagelkerke R² می‌تواند به یک برسد. True classification: نشان دهنده درصد پیش‌بینی صحیح مدل است.

نتایج

در جدول ۲ نتایج تحلیل پارامترهای مختلف به‌عنوان پیش‌بینی کننده وقوع کلاستر ارائه شده است.

آماره wald و ضریب sig مربوط به آن نشان دهنده اهمیت هر یک از پارامترهاست. اگر sig آماره wald کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان می‌دهد که پارامتر در مدل مهم است. از بین تمام متغیرهای ارائه شده، متغیر $U_{avg}^2 h / gd_u^2$ با مقادیر AUC ۰/۹۶۹، AIC ۲۸/۴۹۴، طبقه بندی صحیح ۹۱/۵ درصد و Nagelkerke R Square ۰/۷۷۱ بهترین متغیر پیش بینی کننده برای تشکیل و یا عدم تشکیل کلاستر در بسترهای با رسوب یکنواخت است.

تابع مورد استفاده در پیش‌بینی کلاستر به صورت معادله ۹ است:

$$\pi(U_{avg}^2 h / gd_u^2) = \frac{e^{4.42-0.254(U_{avg}^2 h / gd_u^2)}}{1+e^{4.42-0.254(U_{avg}^2 h / gd_u^2)}} \quad (9)$$

شکل ۲ نمودار این تابع و همچنین منحنی ROC مربوط به آن را نشان می‌دهد.

متغیر gd_u / U_{avg}^2 دومین متغیر خوب در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع کلاستر می‌باشد. مقادیر AUC برابر ۰/۹۵۵، AIC برابر ۲۸/۵۲۶، طبقه بندی صحیح معادل ۸۵/۱ درصد و Nagelkerke R Square برابر ۰/۷۷۱ می‌باشند. تابع مورد استفاده در پیش‌بینی کلاستر با استفاده از متغیر gd_u / U_{avg}^2 به شکل معادله ۱۰ است.

$$\pi(gd_u / U_{avg}^2) = \frac{e^{-6.118+23.183(gd_u / U_{avg}^2)}}{1+e^{-6.118+23.183(gd_u / U_{avg}^2)}} \quad (10)$$

به دلیل اینکه مدل یک احتمال را بین صفر و یک به ما ارائه می‌کند، لازم است عددی بین صفر و یک به‌عنوان عدد بحرانی تعریف شود. مقادیر احتمال بیشتر از این عدد نشان موفقیت و کوچکتر از عدد بحرانی نشان عدم موفقیت (عدم وجود کلاستر) است. با تعریف عدد بحرانی، چهار نتیجه محتمل می‌تواند وجود داشته باشد.

الف- بخش مثبت صحیح (TPF): در این قسمت کلاستری شدن بستر توسط مدل رگرسیون لجستیک به صورت کلاستری پیش‌بینی می‌شود. TPF به‌عنوان حساسیت^۱ مدل معروف می‌باشد.

ب- بخش منفی غیر صحیح (FNF): در این قسمت کلاستری شدن بستر، توسط مدل رگرسیون لجستیک بصورت عدم وجود کلاستر پیش‌بینی می‌شود.

ج- بخش مثبت غیر صحیح (FPF): در این قسمت عدم وجود کلاستر در بستر، توسط مدل رگرسیون لجستیک بصورت کلاستری پیش‌بینی می‌شود.

د- بخش منفی صحیح (TNF): در این بخش عدم وجود کلاستر در بستر، توسط مدل رگرسیون لجستیک به صورت عدم وجود کلاستر پیش‌بینی می‌شود. TNF به‌عنوان اختصاصیت^۲ مدل معروف است.

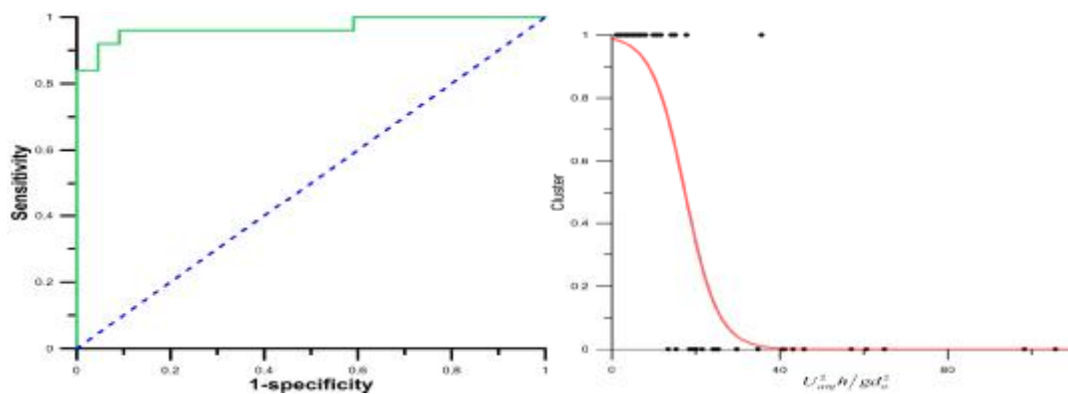
منحنی ROC یک رابطه گرافیکی خروجی مدل TPF در مقایسه با FPF در کل محدوده عدد بحرانی است. بنابراین قابلیت مدل در پیش بینی دقیق وقوع کلاستر را تشریح می‌کند. منحنی ROC با شیب بیشتر نشان دهنده بهتر بودن قابلیت مدل در پیش بینی وقوع کلاستر است. هرچه شیب منحنی بیشتر باشد، مقادیر TPF بالاتر می‌رود در حالی که FPF کاهش پیدا می‌یابد. منحنی ROC با شیب ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل قابلیت تشخیص کلاستری شدن یا نشدن را ندارد. انتگرال گیری از منحنی ROC یک سنجه آماری را فراهم می‌کند که نشان دهنده دقت مدل پیش بینی کننده است. این سنجه آماری بصورت AUC^۳ تعریف می‌شود. طبقه بندی دقت مدل برحسب AUC به صورت زیر است:

1 - Sensitivity
2 - Specificity
3 - Area Under Curve (AUC)

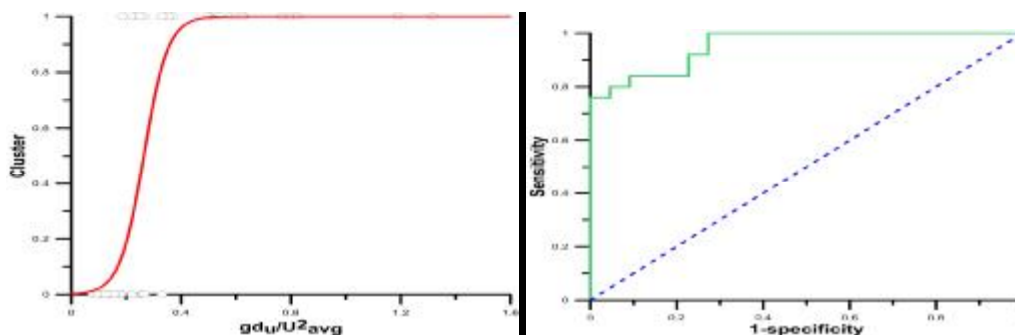
شکل ۳ نمودار این تابع و همچنین منحنی ROC مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج تحلیل‌های آماری پارامترهای مختلف با استفاده از رگرسیون لجستیک

پیش بینی کننده	متغیرهای مدل	ضرایب مدل	Wald	Sig.	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square	True classification	AIC	AUC																																																																																																										
$\mu/\rho U_{avg} d_u$	متغیر	۱۴۰۷۳/۸۷	۴/۴۹۶	۰/۰۳۴	۰/۱۱۷	۰/۱۵۶	۵۹/۶	۶۳/۱۱۶	۰/۶۹۱																																																																																																										
	ثابت	-۱/۵۱۵	۳/۵۵۰	۰/۰۶۰						h/d_u	متغیر	-۱/۱۲۵	۱۱/۵۷۱	۰/۰۰۱	۰/۳۹۱	۰/۵۲۲	۷۸/۷	۴۵/۶۸۲	۰/۸۸۵	ثابت	۴/۷۶۸	۱۱/۶۹۹	۰/۰۰۱	gd_u/U_{avg}^2	متغیر	۲۳/۱۸۳	۹/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۵۷۷	۰/۷۷۰	۸۵/۱	۲۸/۵۲۶	۰/۹۵۵	ثابت	-۶/۱۱۸	۱۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	$\mu/\rho S U_{avg} d_u$	متغیر	۷۵/۸۵۰	۴/۰۹۷	۰/۰۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۴۹	۶۶	۶۳/۴۰۸	۰/۷۱۶	ثابت	-۱/۱۱۹	۲/۸۸۷	۰/۰۸۹	h/Sd_u	متغیر	-۰/۰۰۲	۳/۹۶۱	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۱۳۵	۵۷/۴	۶۳/۹۵۳	۰/۶۸۵	ثابت	۱/۱۲۸	۳/۹۱۴	۰/۰۴۸	gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳	$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵
h/d_u	متغیر	-۱/۱۲۵	۱۱/۵۷۱	۰/۰۰۱	۰/۳۹۱	۰/۵۲۲	۷۸/۷	۴۵/۶۸۲	۰/۸۸۵																																																																																																										
	ثابت	۴/۷۶۸	۱۱/۶۹۹	۰/۰۰۱						gd_u/U_{avg}^2	متغیر	۲۳/۱۸۳	۹/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۵۷۷	۰/۷۷۰	۸۵/۱	۲۸/۵۲۶	۰/۹۵۵	ثابت	-۶/۱۱۸	۱۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	$\mu/\rho S U_{avg} d_u$	متغیر	۷۵/۸۵۰	۴/۰۹۷	۰/۰۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۴۹	۶۶	۶۳/۴۰۸	۰/۷۱۶	ثابت	-۱/۱۱۹	۲/۸۸۷	۰/۰۸۹	h/Sd_u	متغیر	-۰/۰۰۲	۳/۹۶۱	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۱۳۵	۵۷/۴	۶۳/۹۵۳	۰/۶۸۵	ثابت	۱/۱۲۸	۳/۹۱۴	۰/۰۴۸	gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳	$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱								
gd_u/U_{avg}^2	متغیر	۲۳/۱۸۳	۹/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۵۷۷	۰/۷۷۰	۸۵/۱	۲۸/۵۲۶	۰/۹۵۵																																																																																																										
	ثابت	-۶/۱۱۸	۱۰/۰۰۳	۰/۰۰۲						$\mu/\rho S U_{avg} d_u$	متغیر	۷۵/۸۵۰	۴/۰۹۷	۰/۰۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۴۹	۶۶	۶۳/۴۰۸	۰/۷۱۶	ثابت	-۱/۱۱۹	۲/۸۸۷	۰/۰۸۹	h/Sd_u	متغیر	-۰/۰۰۲	۳/۹۶۱	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۱۳۵	۵۷/۴	۶۳/۹۵۳	۰/۶۸۵	ثابت	۱/۱۲۸	۳/۹۱۴	۰/۰۴۸	gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳	$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																						
$\mu/\rho S U_{avg} d_u$	متغیر	۷۵/۸۵۰	۴/۰۹۷	۰/۰۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۴۹	۶۶	۶۳/۴۰۸	۰/۷۱۶																																																																																																										
	ثابت	-۱/۱۱۹	۲/۸۸۷	۰/۰۸۹						h/Sd_u	متغیر	-۰/۰۰۲	۳/۹۶۱	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۱۳۵	۵۷/۴	۶۳/۹۵۳	۰/۶۸۵	ثابت	۱/۱۲۸	۳/۹۱۴	۰/۰۴۸	gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳	$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																				
h/Sd_u	متغیر	-۰/۰۰۲	۳/۹۶۱	۰/۰۴۷	۰/۱۰۱	۰/۱۳۵	۵۷/۴	۶۳/۹۵۳	۰/۶۸۵																																																																																																										
	ثابت	۱/۱۲۸	۳/۹۱۴	۰/۰۴۸						gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳	$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																																		
gd_u/SU_{avg}^2	متغیر	۰/۰۶۰	۸/۸۴۹	۰/۰۰۳	۰/۳۹۲	۰/۵۲۳	۷۰/۲	۴۵/۵۷۶	۰/۸۹۶																																																																																																										
	ثابت	-۲/۳۱۸	۹/۰۵۸	۰/۰۰۳						$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱	$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																																																
$U_{avg}^2 h/gd_u^2$	متغیر	-۰/۲۵۴	۱۱/۰۶۹	۰/۰۰۱	۰/۵۷۷	۰/۷۷۱	۹۱/۵	۲۸/۴۹۴	۰/۶۹۶																																																																																																										
	ثابت	۴/۴۲۸	۱۱/۵۰۰	۰/۰۰۱						$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳	$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																																																														
$\mu h/\rho U_{avg} d_u^2$	متغیر	۱۲۹۰/۷۰۰	۲/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۷	۶۱/۷	۶۶/۵۳۶	۰/۶۳۵																																																																																																										
	ثابت	-	۲/۱۴۳	۰/۱۴۳						$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																																																																												
$\mu g/\rho U_{avg}^3$	متغیر	۱۱۸۰۳۸/۹	۱۱/۳۳۹	۰/۰۰۱	۰/۵۴۰	۰/۷۲۱	۹۱/۵	۳۲/۴۵۷	۰/۹۴۵																																																																																																										
	ثابت	-۳/۶۷۰	۱۲/۳۰۱	۰/۰۰۱																																																																																																															



شکل ۲- نمودار متغیر $U_{avg}^2 h/gd_u^2$ و منحنی ROC مربوط به آن



شکل ۳- نمودار متغیر gd_u/U_{avg}^2 و منحنی ROC مربوط به آن

این هیستوگرام‌ها نشان می‌دهند که این دو پارامتری که می‌توان با آن وجود کلاستر را به خوبی پیش بینی کرد دارای توزیع نرمال‌های متفاوت هستند، در حالی که در پارامتر $\tau_b h / \rho U_{avg}^2 d_u$ توزیع‌های نرمال برازش داده شده خیلی به هم نزدیک‌اند. نکته جالب اینجاست که ورود شیب به پارامترها، موجب بدتر شدن مدل پیش‌بینی کننده می‌شود.

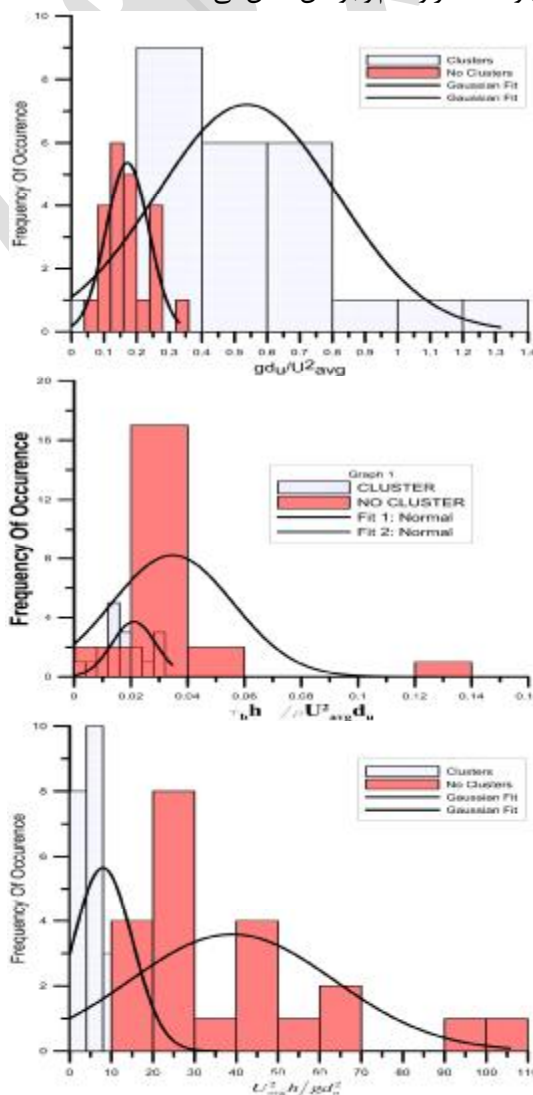
بحث

تحلیل‌های قسمت قبل نشان داد که یک ارتباط آماری بین وجود یا نبود کلاستر و مقادیر پارامترهای gd_u/U_{avg}^2 و $U_{avg}^2 h / gd_u^2$ وجود دارد. قطر ذرات و سرعت متوسط جریان دو متغیر کلیدی در این دو پارامتر هستند. این دو متغیر نشان دهنده مشخصات رسوبی و هیدرولیک بازه مورد آزمایش هستند. به دلیل ثابت بودن هندسه کانال (بجز شیب)، متغیرهای مربوط به هندسه کانال وارد اعداد بدون بدست آمده نشده‌اند. در قسمت قبل نشان داده شده که پارامتر شیب نمی‌تواند در پیش‌بینی کلاستر استفاده شود و نتایج ضعیفی بدست آمد. به نظر می‌رسد ارتباط آماری بین پارامترهای مربوط به هندسه کانال و کلاستری شدن بستر وجود داشته باشد. برای بررسی این موضوع نیاز است که تحقیقات بیشتری در مورد کانال‌هایی با عرض‌های مختلف شود.

مقایسه نتایج تحقیق با نتایج محققین دیگر

برای مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی استورم و همکاران (۲۰۰۴) استفاده شد که خلاصه نتایج آنها و نتایج حاصل از معادلات بدست آمده در تحقیق فوق در جدول ۳ ارائه شده است. بنابه نظر استورم و همکاران

شکل ۴ هیستوگرام فراوانی سه پارامتر $U_{avg}^2 h / gd_u^2$ ، gd_u / U_{avg}^2 و $\tau_b h / \rho U_{avg}^2 d_u$ را در حالت‌های وجود کلاستر و عدم وجود آن، نشان می‌دهد



شکل ۴- هیستوگرام و توزیع نرمال برازش داده شده برای چند پارامتر مورد بررسی

تنش‌های $1.25\theta_{cr} - 1.75\theta_{cr}$ کلاسترها تشکیل می‌شوند و $2\theta_{cr}$ را به‌عنوان کلاستر طبقه‌بندی نمی‌کند.

(۲۰۰۴) کلاسترها در تنش‌های $1.25\theta_{cr} - 2\theta_{cr}$ تشکیل می‌شوند. نتایج حاصل از معادله ۱۰ نشان می‌دهد که در

جدول ۳- مقایسه نتایج استورم و همکاران (۲۰۰۴) با رابطه بدست آمده در این تحقیق

θ_{cr}	Q	h	U_{avg}	d_u	معادله gd_u/U_{avg}^2	cluster
$1/25\theta_{cr}$	۰/۰۲۲	۰/۰۶۳	۰/۳۹۳	۰/۰۰۸	۰/۹۹۶	۱
$1/5\theta_{cr}$	۰/۰۳۴	۰/۰۷۶	۰/۴۹۵	۰/۰۰۸	۰/۷۸۷	۱
$1/75\theta_{cr}$	۰/۰۴۱	۰/۰۸۹	۰/۵۲۳	۰/۰۰۸	۰/۶۳	۱
$2\theta_{cr}$	۰/۰۵۲	۰/۱۰۳	۰/۵۶۹	۰/۰۰۸	۰/۳۷۷	۱
$2/25\theta_{cr}$	۰/۰۴۵	۰/۰۹۱	۰/۵۵۶	۰/۰۰۸	۰/۴۴۲	.
$2/5\theta_{cr}$	۰/۰۴۳	۰/۰۸۴۳	۰/۵۷۸	۰/۰۰۸	۰/۳۳۸	.
$2/75\theta_{cr}$	۰/۰۵۱	۰/۰۹۲	۰/۶۱۳	۰/۰۰۸	۰/۲۱۸	.
$3\theta_{cr}$	۰/۰۵۱	۰/۰۸۶۷	۰/۶۵۷	۰/۰۰۸	۰/۱۲۹	.

خصوصیات رسوبی و هیدرولیکی جریان در بازه مورد آزمایش هستند.

منابع

- Bathurst J. 1987a. Critical conditions for bed material movement in steep, boulder-bed streams. In: Beschta, R.L. et al. (eds.), Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, IAHS Publication, 165, 309-318.
- Billi P. 1988. A note on cluster bed-form behavior in a gravel-bed river. Catena, 15:473-481.
- Bowman D. 1977. Stepped-bed morphology in arid gravelly channels: Geological Society of America Bulletin, v. 88, p. 291-298.
- Brayshaw A. 1984. Characteristics and origin of cluster bedforms in coarsegrained alluvial channels. In Koster, E. H. and Steel, R. J., editors, Sedimentology of Gravels and Conglomerates, number 10, pages 77-85. Canadian Society of Petroleum Geologist.
- Brayshaw A. Frostick L. and Reid I. 1983. Hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels. Sedimentology, 30, 137-143.
- Chang H. 1998. Fluvial processes in river engineering, Reprint Ed. Wiley, New York, 146-149
- Church M. Hassan M. and Wolcott J. 1998. Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: field and experimental

نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق تعیین پارامترهایی برای وجود یا نبود کلاستر بر روی رودخانه‌های با بستر شنی بود. برای رسیدن به این هدف یک مطالعه آزمایشگاهی تحت شرایط مختلف رسوب و جریان اجراشد و وجود یا عدم کلاستر در هر یک از آزمایش‌ها ثبت شد. با استفاده از آنالیز ابعادی تعدادی پارامترهای بدون بعد بدست آمد. با استفاده از رگرسیون لجستیک ارتباط آماری بین پارامترهای بدون بعد و حضور یا عدم حضور کلاستر، بررسی شد. خلاصه نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر می‌باشند.

الف- کلاسترها برخلاف عقیده رایج می‌توانند در رسوبات با اندازه یکنواخت نیز تشکیل شوند. این نتیجه یافته‌های استورم و همکاران (۲۰۰۴) را تایید می‌کند. عقیده بر اینست که علت این امر تلاطم جریان می‌باشد.

ب- کلاسترها با شروع به حرکت موضعی ذرات واقع در بستر، شروع به شکل‌گیری می‌کنند.

ج- توسعه مدل رگرسیون لجستیک برای دو پارامتر gd_u/U_{avg}^2 و $U_{avg}^2 h/gd_u^2$ نشان داد که این دو پارامتر می‌توانند در تمایز بین بسترهای کلاستری و غیر کلاستری استفاده شوند.

د- دو پارامتر gd_u/U_{avg}^2 و $U_{avg}^2 h/gd_u^2$ قابلیت پیش‌بینی کلاستری شدن را دارا می‌باشند، چون نشان دهنده

- evolution. *Earth Surf. Processes Landforms*, 28, 69-86.
- 15- Reid I. and Hassan M. 1992. The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers: a reply. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17:535-538.
- 16- Storm K. 2006. Cluster bedforms in mountain rivers. PHD thesis, Iowa university
- 17- Strom K. Papanicolaou A. Evangelopoulos N. and Odeh M. 2004. Microforms in gravel bed rivers: Formation, disintegration, and effects on bedload transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6):554-567.
- 18- Whittaker J. 1987a. Modeling bed-load transport in steep mountain streams, in Beschta, R. L., Blinn, T., Grant, G. E., Ice, G. G., and Swanson, F. J., eds., *Erosion and sedimentation in the Pacific rim: International Association of Hydrological Sciences Publication 165*, p. 319-332.
- 19- Wittenberg L. and Newson M. 2005. Particle clusters in gravel-bed rivers: an experimental morphological approach to bed material transport and stability concepts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30:1351-1368.
- 20- Wohl E. 2000. *Mountain Rivers*, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- observations. *Water Resources Research*, 34(11):3169-3179.
- 8- Clifford N. Robert A and Richards K. 1992b. Estimation of flow resistance in gravel-bedded rivers: a physical explanation of the multiplier of roughness length. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17:111-126.
- 9- Dal Cin R. 1968. Pebble clusters: Their origin and utilization in the study of palaeocurrents. *Sedimentary Geology*, 2:233-241.
- 10- Gustavson T. 1974. Sedimentation on gravel outwash fans, Malaspina glacier foreland. Alaska. *Journal of Sedimentary Research* 44, 374-389.
- 11- Kozłowski B. and Ergenzinger P. 1999. Ring structures - a specific new cluster type in steep mountain torrents. XXVII IAHR Congress Proceedings Graz, page 410.
- 12- Luoto M. Hjort J. 2005. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology* 67: 299- 315.
- 13- Millar R. 1999. Grain and form resistance in gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Res.*, 37_3_, 303-312.
- 14- Papanicolaou A. Strom K. Schuyler A. and Talebbeydokhti N. 2003. The role of sediment specific gravity and availability on cluster