

## مطالعه رفتار دینامیکی جت قائم بر خوردی در حوضچه استغراق

بابک لشکرآرا<sup>۱\*</sup>، ایراندخت دهقانی<sup>۲</sup>، محمد ذاکر مشفق<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۰

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Lashkarara@jsu.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی، به بررسی اثر رفتار دینامیکی جت قائم بر خوردی بر عمق‌های آبشستگی دینامیکی و استاتیکی در بستر حوضچه استغراق پرداخته شده است. آزمایش‌ها با تغییر در دانه‌بندی رسوب و رقوم نصب جت انجام شده است. سناریوهای اصلی با تثبیت ارتفاع نصب نازل در رقوم ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی‌متر نسبت به سطح بستر آبرفتی شکل گرفته است. سناریوهای فرعی با تغییر در دانه‌بندی بستر آبرفتی با قطر متوسط ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی‌متر و سرعت خروجی جریان در محدوده ۲/۰۴ الی ۱۰/۳۶ متر بر ثانیه نسبت به بررسی شرایط هیدرولیکی جریان تدوین گردیدند. سپس الگوهای رفتاری مختلف چاله آبشستگی، بر اساس فرم چاله و ضریب فشاری جت طبقه‌بندی شد. نتایج به دست آمده علاوه بر معرفی طبقه‌بندی نوینی در فرم چاله آبشستگی تحت شرایط دینامیکی، منجر به معرفی معادله‌ای جهت تعیین تفاضل عمق‌های بدون بعد دینامیکی و استاتیکی  $(d_d - d_s)/h_j$  گردید. ضریب همبستگی رابطه تعریف شده ۰/۷۲ و ریشه میانگین مربعات خطای آن ۰/۰۹۶ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، جت بر خوردی، حوضچه استغراق، فرم چاله، عمق دینامیکی

## Study of the Vertical Impinging Jet's Dynamic Behavior in Plunge Pool

B Lashkar-Ara<sup>1\*</sup>, I Dehghani<sup>2</sup>, M Zakermoshfegh<sup>1</sup>

Received: 27 May 2012 Accepted: 10 July 2016

<sup>1</sup>- Assist. Prof. Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

<sup>2</sup>- M.Sc Student of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

\* Corresponding Author, Email: Lashkarara@jstu.ac.ir

### Abstract

The effect of dynamic vertical impinging jet on the static and dynamic scour depth is investigated in plunge pool bed, concerning the laboratory model. Experiments are conducted by changing jet installation height and a variety of grain size distribution. The basic scenarios are implemented with different nozzle elevation i.e. 24, 35.5, and 44 cm from the surface of alluvial bed. Then, the sub scenarios are developed by changing the grain size of alluvial bed with average diameters of 4.06, 7.14, and 8.73 mm and the output velocity of flow, with a variation range of 2.04 to 10.36 m s<sup>-1</sup>. Toward this end, concerning laboratory observations, various types of scour hole are classified based on the formation of the hole and the pressure factor of the jet. The results in addition to present an innovative classification of dynamic scour holes led to introduce an equation for estimating the relative difference of dynamic and static scour depths. A non-dimensional equation was presented as a simple and precise equation which would be recommended for estimation of the relative difference of dynamic and static scour depths  $(d_d-d_s)/h_j$ . The relation had the correlation coefficient and root mean square error values of 0.72 and 0.096, respectively.

**Keywords:** Dynamic depth, Hole shape, Impinging jet, Plunge pool, Scour

### مقدمه

جت برخوردی آشفته و با مقطع دایره‌ای متعلق به محققانی چون دودیا و همکاران (۱۹۵۳)، پوره و حافظ (۱۹۶۷)، شارما (۱۹۶۷)، ویستریچ و کوبس (۱۹۷۳)، راجاراتنام و بلتاوس (۱۹۷۷)، کوبس و همکاران (۱۹۷۹)، راجاراتنام (۱۹۸۲)، بلاسیدل و آندرسون (۱۹۸۸) می‌باشد. موور و مش (۱۹۶۲) یکسری آزمایش با استفاده از جت برخوردی مستغرق دایره‌ای عمودی برای تخمین پایداری رسوبات در برابر آبشستگی انجام دادند که در آن نرخ آبشستگی با کاهش وزن نمونه اندازه‌گیری شده است. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در طول آبشستگی، متوسط عمق آبشستگی با لگاریتم زمانی متناسب است. ویستریچ و کوبس (۱۹۷۳) و

درمهندسی رودخانه، مقوله فرسایش بستر و کناره‌ها از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. پیش‌بینی و کنترل فرسایش موضعی در مجاورت پی سازه‌های هیدرولیکی از جمله موارد با اهمیت در این علم محسوب می‌شود. علت این نوع فرسایش را می‌توان ناشی از شتاب موضعی جریان، جریان ثانویه و تشکیل گردابه‌ها نام برد. به‌علت ماهیت پیچیده جریان و تقابل آن با بستر رسوبات، مطالعات بر پدیده فرسایش جت اساساً تجربی می‌باشد. راس (۱۹۳۹) با انجام مطالعاتی در این زمینه پیشقدم شد و پس از آن، محققان زیادی این مطالعات را انجام دادند. بعضی از مطالعات مهم در

دینامیکی حدوداً سه برابر عمق آبشستگی استاتیکی در حالت تعادلی می‌باشد. راجاراتنام و مازورک (۲۰۰۵) مطالعاتی بر روی جت هوای برخوردی به یک جداره صاف با قطر نازل  $6/4$  و  $12/7$  میلی‌متر انجام دادند. هوای فشرده شده با تنظیماتی از این جت خارج می‌شد. سرعت نازل  $45$  تا  $90$  متر بر ثانیه تغییر داده شد. نتایج ثبت شده از فشار وارده بر دیواره در منطقه برخوردی، نشان می‌دهد که گسترش شعاعی منطقه برخوردی سطوح صاف کوچکتر از سطوح زبر می‌باشد. بر اساس مطالعات کوبس و همکاران (۱۹۷۹) جت‌ها به دو دسته کلی ضعیف و قوی تقسیم بندی می‌شوند. حد تعیین‌کننده بین این دو نوع جت بر اساس پارامتر فشار (نسبت سرعت جت در نزدیکی بستر به سرعت سقوط ذرات) می‌باشد.

ادارایگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) در انجام مطالعاتی پیرامون طبقه‌بندی جت تحت شرایط دینامیکی نشان دادند که چنانچه عبارت  $d_n/h_j \times V_j / \sqrt{g(G_s - 1) D_{50}}$  که تحت عنوان پارامتر فرسایش نامیده می‌شود کوچکتر از  $0/14$  باشد، جت جزء طبقه‌بندی نوع دوم قرار می‌گیرد. در صورتی که میزان پارامتر فرسایش بین  $0/14$  الی  $0/35$  تغییر نماید، جت در دسته ضعیف نوع اول جای می‌گیرد. همچنین ایشان در مطالعات خود مرز بین جت‌های قوی نوع اول و دوم را به پارامترهای فرسایش بزرگتر از  $2$  نسبت دادند.

در این مقاله به بررسی آبشستگی ناشی از جت برخوردی دایره‌ای مستغرق بر بستر شنی پرداخته شده است. مطالعات پیشین صورت‌گرفته در زمینه اندازه‌گیری عمق دینامیکی و استاتیکی محدود می‌باشد، لذا در این تحقیق به اندازه‌گیری این دو پارامتر مبادرت ورزیده شده است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در تحقیق حاضر، طبقه‌بندی فرم چاله آبشستگی که توسط ادارایگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) و کوبس و همکاران (۱۹۷۹) ارائه گردیده بود، اصلاح

کوبس و همکاران (۱۹۷۹) پدیده آبشستگی بستر ماسه‌ای یکنواخت ناشی از جت مستغرق عمودی را با سرعت‌های مختلف تحت دو نوع قطر نازل و دو نوع ارتفاع جت بررسی نمودند. آنان در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که حجم آبشستگی در ابتدا با ارتفاع جت افزایش می‌یابد، سپس آهنگ تغییرات ثابت مانده و دوباره روند نزولی را در پیش می‌گیرد. راجاراتنام (۱۹۸۲) فرسایش موضعی ناشی از جت‌های آب و هوا را در بسترهای ماسه‌ای مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاکی از وجود تفاوت معنی داری در بین دو سیستم جت آب و هوا با توجه به عمق و وسعت شعاع گودال آبشستگی می‌باشد. رادکیوی (۱۹۹۲) پیشنهاد داد که مقاومت فرسایشی مصالح غیر چسبیده در درجه اول به وزن مستغرق ذرات، شکل و فشردگی آنها بستگی دارد. انصاری (۱۹۹۹)، دانگ هیو و همکاران (۲۰۰۱)، انصاری و همکاران (۲۰۰۳)، مازورک و حسین (۲۰۰۷) روی ارزیابی زمانی آبشستگی در مصالح غیر چسبیده مطالعه نمودند. دانگ هیو و همکاران (۲۰۰۱) مطالعاتی بر روی مصالح غیر چسبیده برای بررسی پاسخ بستر به جت آب عمودی مستغرق انجام دادند. اطلاعات آزمایشگاهی با قطر جت‌های بزرگتر، رسوبات ریزتر و ارتفاع جت برخوردی کوچکتر حاصل شده است. آنها به این نتیجه رسیدند که اختلاف بسیار زیادی در عمق استاتیکی و دینامیکی نسبت به تحقیقات پیشین بدست آمده است. انصاری و همکاران (۲۰۰۳) مطالعات آزمایشگاهی روی آبشستگی جت عمودی دایره‌ای مستغرق با هر دو بستر چسبیده و غیرچسبیده انجام دادند و تفاوت‌هایی در پروفیل آبشستگی بین این دو نوع مصالح مشاهده نمود. نتایج نشان داد که در رسوبات غیر چسبیده بیشتر از  $70$  درصد آبشستگی در  $30$  دقیقه اول اتفاق می‌افتد. راجاراتنام و مازورک (۲۰۰۳) مطالعات آزمایشگاهی روی فرسایش مصالح غیرچسبیده تحت جت عمودی دایره‌ای با عمق پایاب کم ارائه نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که عمق آبشستگی

هیدرولیکی آزمون و مطابق با سناریوهای از پیش تعیین شده برداشت گردیدند. جهت تخمین زمان آزمایش، عمق آبشستگی دینامیکی در زمان‌های متوالی ثبت گردید. تکرار در ثبت زمانی عمق آبشستگی دینامیکی تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت نشان داد که روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی دینامیکی بعد از سپری شدن ۱۲۰ دقیقه به یک ثبات نسبی دست می‌یابد. لذا به همین علت این زمان به‌عنوان زمان پایه کلیه آزمایش‌ها لحاظ گردید. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که متغیرهای تأثیرگذار بر ابعاد حفره آبشستگی به‌شرح زیر می‌باشند:

$$f(V_j, d_n, B, h_{tw}, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s - \rho_w, d_s, d_d - d_s, r_0, \nabla) = 0 \quad [1]$$

که در آن  $V_j$  سرعت جریان خروجی از نازل،  $d_n$  قطر نازل،  $B$  عرض حوضچه رسوب،  $h_{tw}$  عمق پایاب،  $h_j$  ارتفاع نصب جت نسبت به کف حوضچه استغراق،  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت سیال،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $\rho_s - \rho_w$  جرم مخصوص مستغرق ذرات رسوب،  $d_s$  بیشینه عمق آبشستگی متعادل شده،  $d_d - d_s$  اختلاف عمق‌های دینامیک و استاتیک،  $r_0$  شعاع توسعه آبشستگی و  $\nabla$  حجم چاله آبشستگی می‌باشند.

بر اساس تحقیقات لیم (۱۹۹۵) چنانچه عرض حوضچه استغراق نسبت به عرض جت خروجی بیشتر از ۱۰ باشد، می‌توان از اثر دیواره‌ها بر میزان آبشستگی صرف‌نظر نمود. با توجه به اینکه نسبت مذکور در این تحقیق معادل ۴۰ می‌باشد، لذا می‌توان از اثر عرض حوضچه بر فرآیند آبشستگی صرف‌نظر نمود. اگر نشان دهنده ابعاد حفره آبشستگی باشد، می‌توان با استفاده از نظریه باکینگهام- $\pi$  و با در نظر گرفتن پارامترهای  $\rho, V_j, h_j$  به‌عنوان متغیرهای تکراری،

گردید. نتایج این تحقیق منجر به معرفی روشی نوین جهت طبقه بندی انواع جت جریان تحت شرایط دینامیکی گردید.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی با طول ۱/۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر از جنس فولاد گالوانیزه انجام شد. در بالای محفظه یک ارابه کنترل کننده زاویه نازل جت نصب گردید که قادر به تنظیم زاویه جت در حالت‌های مختلف می‌باشد. در شکل ۱ - الف نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را که در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول قرار دارد نمایش داده شده است. بنا به ضرورت تحقیق ارابه در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بستر افقی مصالح آبرفتی قرار گرفت. این نازل دارای مقطع دایره‌ای با قطر ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. در انتهای مخزن یک دریچه کشویی جهت تنظیم تراز پایاب در نظر گرفته شده است که با توجه به رقوم متفاوت نصب نازل، این دریچه به‌گونه‌ای تنظیم گردید که نوک نازل به میزان ۱ الی ۲ سانتی‌متر در زیر آب فرو رود تا شرایط جهت استغراق آن حاصل گردد. در این تحقیق ارتفاع نازل از بستر تسطیح شده ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. جهت شبیه سازی شرایط محیطی که جت به آن وارد می‌شود از مصالح بستر شنی با قطر متوسط ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی‌متر استفاده گردید که این مصالح تا ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از محفظه را پر نمود. جهت شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی جریان، دبی آب از مقدار ۱ تا ۵/۵ لیتر بر ثانیه تغییر یافت، که این تغییرات منجر به ایجاد سرعت خروجی جریان از میزان ۲/۰۴ الی ۱۰/۳۶ متر بر ثانیه گردید. دبی جریان با استفاده از یک دستگاه کنتور الکترومغناطیس با دقت  $\pm 0.2$  تا ۰/۵ درصد اندازه‌گیری گردید. عمق‌های آبشستگی تحت شرایط دینامیکی و استاتیکی در هر یک از شرایط

داشته و پس از ته نشینی، انباشتی از رسوبات را در خارج حفره تشکیل می‌دهند. بخشی از ذرات ته نشین شده بر روی سطح شیب‌دار با لغزش بر روی این سطح به سمت حفره ایجاد شده توسط جت نفوذی حرکت نموده و در لبه جدایی جریان مجدداً به حالت تعلیق در می‌آیند، از طرفی در ناحیه‌ای که جت در مصالح کف نفوذ نموده است جریان چرخشی تشکیل می‌شود که بخشی از مصالح را تا عمقی تحت عنوان عمق آبخستگی دینامیکی  $d_d$  با خود به چرخش در می‌آورد. پس از قطع جریان ملاحظه گردید مصالحی که به حالت تعلیق درآمده بودند از حرکت باز ایستاده و منجر به پر کردن حفره ایجاد شده توسط جت نفوذی می‌شوند. از طرفی مؤلفه وزن ذراتی که بر روی سطح شیب دار ناحیه خارجی تحت تنش وارده از سوی جت دیواره‌ای در حال لغزش و یا آستانه حرکت رو به خارج حفره بودند به یکباره تغییر جهت داده و به سمت حفره لغزش می‌نمایند، این امر پس از پر نمودن حفره حاصل از جت نفوذی منجر به کاهش شیب ناحیه خارجی می‌شود (شکل ۱-ب). در پایان هر آزمایش، تفاضل رقوم حفره تشکیل شده تا تراز اولیه رسوبات، تحت عنوان عمق آبخستگی استاتیکی  $d_s$  و یا عمق متعادل شده آبخستگی، پس از برداشت پروفیل قرائت گردید.

کلیه آزمایش‌های انجام شده در سه سناریو کلی با تغییر در رقوم نصب جت در اعماق ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی‌متر نسبت به سطح تسطیح شده بستر آبرفتی بررسی شد. سپس با تغییر در میزان قطر متوسط مصالح آبرفتی معادل ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی‌متر سه زیر سناریو فرعی تعریف گردید.

به منظور تحلیل نتایج نمودار تفاضل عمق‌های دینامیکی و استاتیکی بدون بعد  $(d_d - d_s)/h_j$  نسبت به عدد فرود دنسیومتریک ترسیم گردید. نتایج حاصل از سه سناریو در شکل‌های ۲ الی ۴ نشان داده شده‌اند.

معادلات بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آبخستگی در حوضچه استغراق را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\varphi}{h_j} = f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}}\right) \quad [2]$$

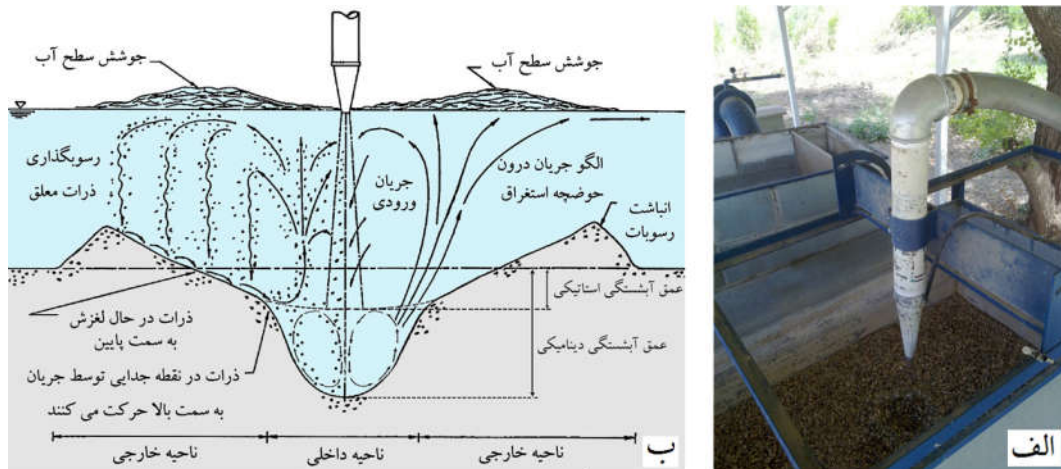
در رابطه ۲ عبارت  $V_j/\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}$  عدد فرود دنسیومتریک نامیده می‌شود. همچنین از حاصل ضرب عدد فرود دنسیومتریک در نسبت  $d_n/h_j$  می‌توان به پارامتر جدید تحت عنوان پارامتر فرسایش دست یافت که در این تحقیق با علامت اختصاری  $Ec$  نشان داده می‌شود (ادارایگب و راجاراتنام ۱۹۹۶).

$$\frac{\varphi}{h_j} = f\left(\frac{d_n}{h_j} \times \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}}\right) \quad [3]$$

$$\frac{\varphi}{h_j} = f(Ec) \quad [4]$$

## نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی در تحقیق حاضر نشان داد که پس از برخورد جت بر بستر مصالح آبرفتی، جت به دو بخش جت دیواره‌ای و جت نفوذی تقسیم می‌شود. محدوده آبخستگی جت نفوذی، ناحیه داخلی و محدوده آبخستگی جت دیواره‌ای که با سطحی شیب دار به تپه رسوبی ختم می‌شود، ناحیه خارجی نامیده شد. جت دیواره‌ای با اعمال تنش برشی بر مصالح کف، منجر به تشکیل سطح شیب دار در ناحیه خارجی می‌گردد، بسته به توان جت دیواره‌ای، شیب حفره آبخستگی در ناحیه خارجی می‌تواند با زاویه‌ای بزرگتر از زاویه استقرار داخلی ذرات شکل بگیرد. جت نفوذی و زیر فشار حاصل از آن منجر به تعلیق ذرات بستری خواهد شد که وزن مستغرق آنها از نیروی زیر فشار کمتر است. این ذرات تا نقطه‌ای از سیال بالا خواهند رفت که نیروی زیر فشار به دلیل لزجت سیال مستهلک شده و این استهلاک انرژی منجر به سقوط ذرات معلق خواهد شد ذرات معلق توانایی گسترش تا ناحیه خارجی را



شکل ۱-الف) تصویر مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و ب) شماتیک جت قائم برخوردی تحت شرایط آبشستگی دینامیکی و استاتیکی.

همبستگی ۰/۷۲ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۹۶ می باشد. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این رابطه تقریباً از آستانه فرسایش اولیه ۰/۱ برخوردار است. مشاهدات صورت گرفته در آزمایش ها نیز رقم یاد شده را تایید می نماید.

بررسی روند تغییرات عمق آبشستگی استاتیکی نشان داد که رابطه ۶ می تواند با ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۳۲ متر و ضریب همبستگی ۰/۸۸۴ تخمین قابل قبولی در خصوص عمق بدون بعد آبشستگی استاتیکی ارائه نماید.

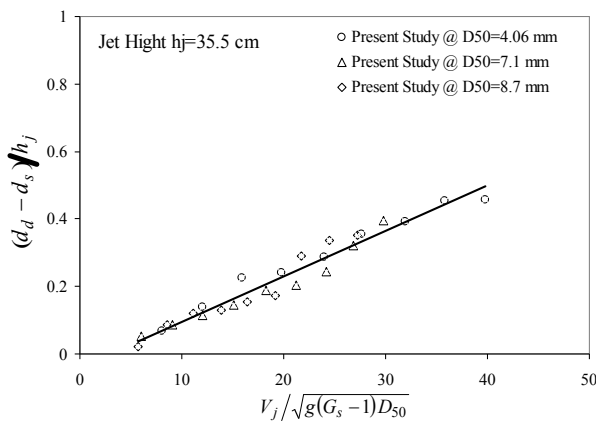
$$\frac{(d_d - d_s)}{h_j} = \frac{0.08 - 0.8246Ec}{Ec - 0.6057} \quad [5]$$

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.0036Ec^{0.1159} - 0.8027 \quad [6]$$

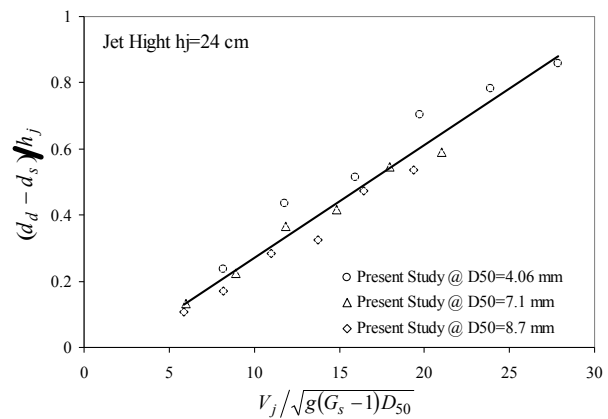
در بخش دوم تحقیق تغییرات عمق های آبشستگی دینامیکی و استاتیکی در مقابل ارتفاع نصب جت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج مشاهداتی منجر به ایجاد انگیزه جهت طبقه بندی فرم چاله آبشستگی تحت شرایط دینامیکی گردید.

بررسی های صورت گرفته از نتایج مندرج در شکل ۲ نشان می دهد که تغییرات تفاضل نسبی عمق های دینامیکی و استاتیکی آبشستگی در مقابل عدد فرود دنسیومتریکی در سناریوی اول با عمق نصب جت ۲۴ سانتی متر دارای شیب متوسط ۳/۴۲ درصد می باشد. به طور مشابه از بررسی شکل های ۳ و ۴ می توان دریافت که تغییرات تفاضل نسبی عمق های دینامیکی و استاتیکی آبشستگی در مقابل عدد فرود دنسیومتریکی در سناریوهای دوم و سوم با عمق های نصب جت ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی متر بترتیب دارای شیب متوسط ۱/۳۵ درصد و ۰/۷۷ درصد می باشند. به منظور بررسی اثر هم زمان قطر ذرات و عمق نصب جت بر ابعاد حفره آبشستگی و معرفی رابطه ای عمومی جهت تخمین عمق آبشستگی کلیه سناریوهای حاکم بر تحقیق با یکدیگر ترکیب و نتایج به صورت تغییرات تفاضل عمق های دینامیکی و استاتیکی در مقابل پارامتر فرسایش در شکل ۵ ارائه گردیدند.

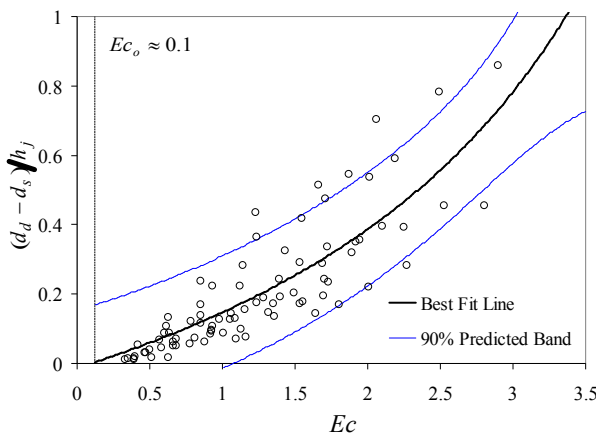
به منظور ارضاء شرایط آستانه حدی معادله خط برازش داده شده از بین نتایج از نوع تپه ای و به صورت رابطه ۵ معرفی گردید. این رابطه دارای ضریب



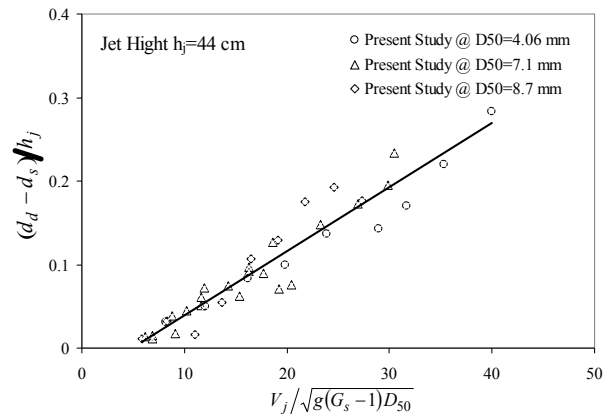
شکل ۳- مقایسه تفاوت عمق‌های دینامیکی و استاتیکی نسبی در مقابل عدد فرود دنسیومتری (سناریوی دوم).



شکل ۲- مقایسه تفاوت عمق‌های دینامیکی و استاتیکی نسبی در مقابل عدد فرود دنسیومتری (سناریوی اول).



شکل ۵- تغییرات تفاوت عمق‌های دینامیکی و استاتیکی بدون بعد در مقابل پارامتر فرسایش.



شکل ۴- مقایسه تفاوت عمق‌های دینامیکی و استاتیکی نسبی در مقابل عدد فرود دنسیومتری (سناریوی سوم).

برخوردار بوده و پس از رسیدن به نقطه اوج از یک روند کاهشی پیروی می‌نماید  
 منحنی تغییرات عمق آبشستگی دینامیکی با افزایش ارتفاع جت ابتدا روند کاهشی را در پیش گرفته و سپس این منحنی در بازه‌ای از محدوده تغییرات خود با کاهش گرادیان مواجه شده و در محدوده‌ای کوتاه تقریباً تغییرات عمق دینامیکی مستقل از رقوم نصب جت می‌گردد. با افزایش ارتفاع نصب جت مجدداً منحنی عمق دینامیکی روند نزولی را در پیش رو گرفته تا نهایتاً عمق آبشستگی دینامیکی به سمت عمق استاتیکی میل می‌نماید و تغییرات عمق آبشستگی دینامیکی با استاتیکی یکسان می‌گردد.

همان‌طوری که پیش‌تر در مقدمه نیز بیان گردید در این زمینه ادارابیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) و کوبس و همکاران (۱۹۷۹) مطالعاتی را به انجام رساندند که پایه اصلی بخش دوم تحقیق را رقم می‌زنند. مشاهدات تحقیق حاضر نشان داد که عمق‌های آبشستگی استاتیکی و دینامیکی روند تغییرات متفاوتی را در مقابل تغییر ارتفاع جت از خود نشان می‌دهند.  
 این امر منجر به تغییر دینامیکی فرم چاله آبشستگی می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که منحنی تغییرات عمق آبشستگی استاتیکی در مقابل افزایش ارتفاع نصب جت ابتدا از یک روند افزایشی

نقش به‌سازایی را در طراحی می‌تواند ایفا نماید. مشتق رابطه ۶ بر حسب رقوم نصب جت به‌صورت رابطه ۷ ارائه می‌گردد.

$$\frac{\partial d_s}{\partial h_j} = 0.9138 \times \left( \frac{V_j d_n}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \right)^{0.1159} h_j^{-0.1159} - 0.8027 \quad [7]$$

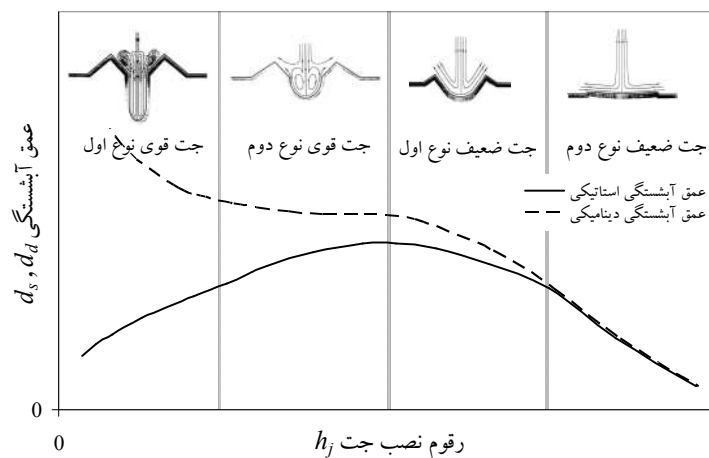
از مساوی صفر قرار دادن رابطه ۷ به ازای شرایط اولیه هر یک از مراحل آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر ۸۴ رقوم نصب جت حاصل شد که هر یک از آنها تحت شرایط آزمایشگاهی خاص خود ریشه رابطه ۷ خواهند بود.

به منظور تسهیل در برآورد واقع‌گرایانه از رقوم نصب جت که منجر به تحقق بیشینه عمق آبشستگی استاتیکی  $h_{j,ext}$  می‌گردد، تلاش گردید تا رابطه نسبی  $h_{j,ext}/h_j$  که معرف رقوم نصب جت حدی به عمق نصب جت می‌باشد در مقابل پارامتر فرسایش تعیین گردد. با استفاده از معادله رگرسیون خطی رابطه ۸ ارائه گردید.

$$\frac{h_{j,ext}}{h_j} = 3.0515 \times (Ec) \quad [8]$$

تجزیه و تحلیل مشاهدات صورت گرفته و مقایسه آن با نتایج محققین دیگر منتج به ارائه شکل ۶ جهت طبقه‌بندی انواع جت‌های مشاهداتی در تحقیق حاضر گردید.

درمحل که بیشترین عمق آبشستگی استاتیکی رخ می‌دهد حد فاصل بین جت قوی و ضعیف می‌باشد. در سمت چپ نقطه اکسترم که تغییرات عمق دینامیکی دارای یک نقطه عطف و تغییر گردایان می‌باشد، حد بین جت قوی نوع اول و دوم را تعیین می‌کند و در سمت راست نقطه اکسترم که عمق دینامیکی و استاتیکی بر هم منطبق می‌شوند حد فاصل بین جت‌های ضعیف نوع اول و دوم معرفی می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۶ نمایش داده شده است، میزان عمق آبشستگی استاتیکی در رقومی از نصب جت به بیشینه مقدار خود در بازوی افزایشی رسیده و پس از آن روند کاهشی را پیش رو می‌گیرد. تحلیل‌های صورت گرفته از نتایج آزمایشگاهی این فرصت را ایجاد نمود تا بتوان با مشتق‌گیری از رابطه ۶ نسبت به تعیین رقوم نصب جتی که بیشینه عمق آبشستگی استاتیکی را ایجاد می‌نماید اقدام نمود. از نقطه نظر اجرایی این پارامتر



شکل ۶- طبقه‌بندی فرم چاله آبشستگی تحت شرایط عمق آبشستگی استاتیکی و دینامیکی.



راجاراتنام (۱۹۹۶) و کوبس و همکاران (۱۹۷۹) به منظور حذف نواحی انتقالی در مشاهدات آزمایشگاهی و همپوشانی بهتر نتایج به شرح زیر اصلاح گردید.

به ازای  $Ec < 0.25$ ،  $K < 0.3$  جت ضعیف نوع دوم، به ازای  $0.25 < Ec < 0.327$  و  $3 < K < 5$  جت ضعیف نوع اول، به ازای  $0.327 < Ec < 2$  و  $5 < K < 12$  جت قوی نوع دوم و به ازای  $Ec > 2$  و  $K > 12$  جت قوی نوع اول تحقق می پذیرد. در این راستا با توجه به اینکه آزمایشها در سه نوع دانه بندی مختلف به اجرا درآمده است لذا آزمایشها در سه دانه بندی و در سرعت های مختلف طبقه بندی گردید. شکل های ۷، ۸ و ۹ این نتایج را به صورت انتخابی به تصویر کشیده است. از بررسی صورت گرفته در سه دانه بندی و در سرعت های متفاوت مشخص گردید که بیشتر آزمایش های انجام شده در این تحقیق در محدوده جت قوی نوع اول و دوم قرار می گیرد. از طرفی بدلیل آنکه بخش عمده ای از تحولات بوجود آمده در طبقه بندی نوع جت ها بر عهده تغییرات دینامیکی عمق آبشستگی می باشد، لذا این اندیشه در ذهن متصور گردید که با بهره گیری از تغییرات عمق های آبشستگی استاتیکی و دینامیکی در مقابل یکدیگر، در راستای معرفی نوع جدیدی از طبقه بندی جت گام برداشته شود.

در این راستا با برآزش رابطه ای بین مقادیر مشاهداتی پارامترهای فرسایش و ضریب فشاری در کلیه آزمون های صورت گرفته نسبت به تخمین نسبت عمق های آبشستگی دینامیکی به استاتیکی  $d_d/d_s$  اقدام گردید، نتایج توسط رابطه ۱۰ نمایش داده شده است

$$\frac{d_d}{d_s} = 57.6359 \times (Ec)^{1.9686} \times (K)^{-1.6982} \quad [10]$$

ضریب همبستگی رابطه ۱۰ معادل ۰/۸۶ و ریشه میانگین مربعات خطای آن ۰/۱۹۱ برآورد گردید.

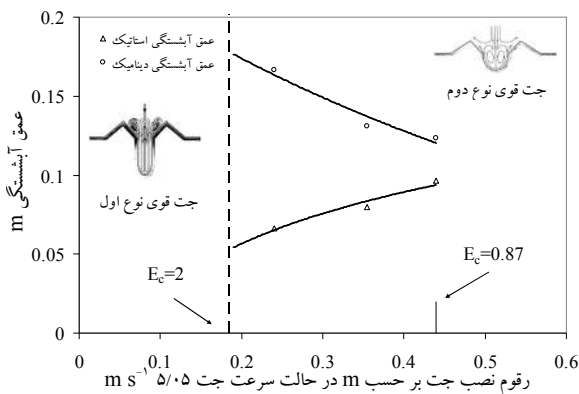
خاطر نشان می گردد که پارامتر فرسایش محاسبه شده در کلیه مراحل آزمایشگاهی به ازاء رقوم نصب جت اکسترم  $h_{j,ext}$  رقمی معادل ۰/۳۲۷ را به خود اختصاص می دهد که از این رقم به عنوان فصل مشترک جت های ضعیف و قوی ایفای نقش می نماید. خاطر نشان می سازد که این رقم بر اساس تحقیقات اداراییگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) رقمی بالغ بر ۰/۳۵ را به خود اختصاص داده است. همچنین مشاهدات صورت گرفته حاکی از آن است که با کاهش رقوم نصب جت و به تبع آن افزایش پارامتر فرسایش، فرم چاله آبشستگی پس از طی یک مرحله انتقالی وارد مرحله جت قوی نوع یک می گردد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته، حد آستانه پارامتر فرسایش جهت تشکیل فرم چاله جت قوی نوع یک را می توان عدد ۲ بیان نمود که این رقم بیشتر توسط اداراییگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) نیز به تایید رسیده است. همچنین بر اساس مشاهدات عینی صورت گرفته مرز بین جت های ضعیف نوع اول و دوم، عدد پارامتر فرسایش معادل ۰/۲۵ را نشان می دهد. خاطر نشان می سازد که این رقم در تحقیقات اداراییگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) به ۰/۲ محدود می گردد. از طرفی جهت طبقه بندی جت، تنها پارامتر فرسایش شرط کافی را برقرار نمی نماید و در این میان عامل تعیین کننده دیگری علاوه بر پارامتر فرسایش می تواند ایفای نقش نماید. این پارامتر توسط کوبس و همکاران (۱۹۷۹) پارامتر فشار نامیده شد و از نسبت سرعت جریان در نزدیکی بستر به سرعت سقوط ذرات تعیین گردید (رابطه ۹).

$$K = \frac{V_u}{\omega} \quad [9]$$

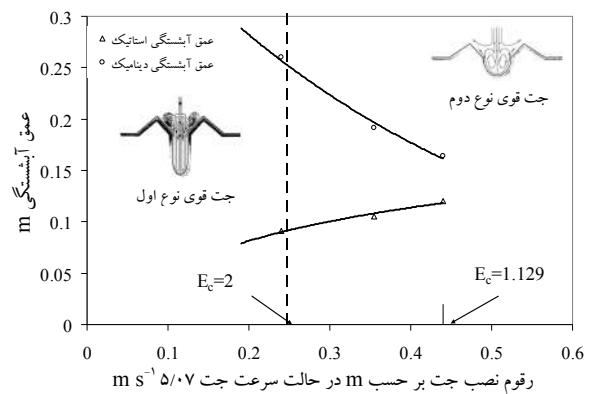
که در آن  $V_u$  سرعت در نزدیکی بستر و  $\omega$

سرعت سقوط ذرات می باشد.

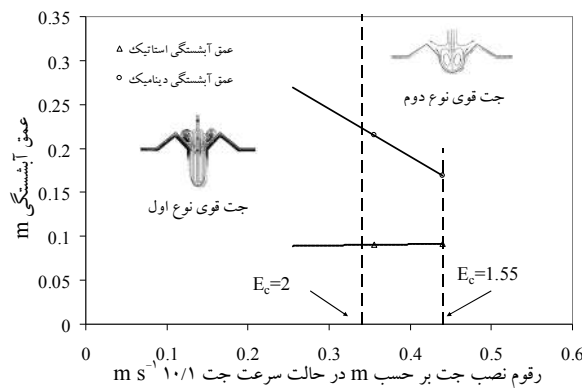
کوبس و همکاران (۱۹۷۹) جت را به دو ناحیه  $K > 6.5$  جت قوی و  $1.5 < K < 3$  جت ضعیف طبقه بندی نمودند. با توجه به مشاهدات انجام شده در تحقیق حاضر طبقه بندی جت بر اساس نظر اداراییگب و



شکل ۸- نتایج مشاهداتی طبقه‌بندی جت در دانه‌بندی ۷/۱۴ میلی‌متر.



شکل ۷- نتایج مشاهداتی طبقه‌بندی جت در دانه‌بندی ۴/۰۶ میلی‌متر.



شکل ۹- نتایج مشاهداتی طبقه‌بندی جت در دانه‌بندی ۸/۷۳ میلی‌متر.

دینامیکی درون حوضچه استغرق تحت جت قائم دایره‌ای مستغرق انجام شده است. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل اطلاعات برداشت شده در این مطالعه، به‌طور کلی نتایج زیر حاصل شده است: با افزایش مقدار پارامتر فرسایش، روند تغییرات تفاضل عمق‌های دینامیکی و استاتیکی  $(d_d - d_s)/h_j$  افزایش می‌یابد.

با تغییر رقوم نصب جت از مقدار ۲۴ به ۳۵/۵ سانتی‌متر، این پارامتر به مقدار ۴۷/۹۱ درصد افزایش می‌یابد، و در نتیجه آهنگ تغییرات  $(d_d - d_s)/h_j$  حفره آبشستگی در مقابل پارامتر فرسایش ۶۰/۵۲ درصد کاهش می‌یابد.

بر اساس مشاهدات صورت گرفته و طبقه‌بندی جدید ارائه شده در تحقیق حاضر هنگامی جت ضعیف نوع دوم تشکیل خواهد شد که شرط  $d_d/d_s < 0.1$  برقرار باشد. همچنین جت ضعیف نوع اول هنگامی رویت خواهد شد که نسبت عمق‌های آبشستگی دینامیکی به استاتیکی در محدوده  $0.1 < d_d/d_s < 1.12$  تغییر نماید. اگر شرط  $1.12 < d_d/d_s < 2.5$  برقرار باشد جت قوی نوع دوم بوده و چنانچه نسبت عمق‌های آبشستگی دینامیکی به استاتیکی بزرگتر از ۲/۵ باشد جت قوی نوع اول می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آزمایشگاهی تخمین مشخصات عمق‌های حفره آبشستگی استاتیکی و

طبقه‌بندی جدید جت بر پایه نسبت بدون بعد عمق آبشستگی دینامیک به استاتیک ارائه شده در تحقیق نشان می‌دهد که هنگامی جت ضعیف نوع دوم تشکیل خواهد شد که شرط  $d_d/d_s < 0.1$  برقرار باشد، همچنین جت ضعیف نوع اول هنگامی رویت خواهد شد که نسبت عمق‌های آبشستگی دینامیکی به استاتیکی در محدوده  $0.1 < d_d/d_s < 1.12$  تغییر نماید. اگر شرط  $1.12 < d_d/d_s < 2.5$  برقرار باشد جت قوی نوع دوم مشاهده می‌گردد و چنانچه نسبت عمق‌های آبشستگی دینامیکی به استاتیکی بزرگتر از  $2/5$  باشد جت قوی نوع اول تشکیل خواهد شد.

از ترکیب کلیه نتایج مشاهداتی، معادله‌ای عمومی جهت تعیین تفاضل عمق‌های بدون بعد دینامیکی و استاتیکی  $(d_d - d_s)/h_j$  ارائه گردید. این رابطه دارای ضریب همبستگی  $0.72$  و ریشه میانگین مربعات خطای  $0.096$  می‌باشد.

طبقه‌بندی جدید ارائه شده در تحقیق حاضر با هدف حذف محدوده‌های انتقالی بین وقوع جت‌های مختلف نشان می‌دهد که به ازای  $K < 0.3$ ,  $Ec < 0.25$  جت ضعیف نوع دوم، به ازای  $0.25 < Ec < 0.327$  و  $3 < K < 5$  جت ضعیف نوع اول، به ازای  $0.327 < Ec < 2$  و  $5 < K < 12$  جت قوی نوع دوم و به ازای  $Ec > 2$  و  $K > 12$  جت قوی نوع اول رخ می‌دهد.

#### منابع مورد استفاده

- Aderibigbe OO and Rajaratnam N, 1996. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *J Hydraul Res* 34(1): 19-33.
- Ansari SA, 1999. Influence of cohesion on local scour. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Roorkee.
- Ansari SA, Kothyari UC and Ranga Raju KG, 2003. Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jet. *J Hydraul Eng ASCE* 129(12): 1014-1019.
- Blaisdell FW and Anderson CL, 1988. A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets. *J. Hydraul. Res.* 26(4): 357-376.
- Doddiah D, Albertson ML and Thomas R, 1953. Scour from jets. Pp. 161-169, Proc 5th Int Association for Hydraulic Research Congress, IAHR, 1-4 September, Minneapolis, USA.
- Donoghue TO, Trajkovic B, and Piggins J, 2001. Sand bed response to submerged water jet. Proc Eleventh Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June, Stavanger, Norway.
- Kobus H, Leister P, and Westrich B, 1979. Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets on a movable bed. *J Hydraul Res* 17(2): 175-192.
- Lim SY, 1995. Scour below un-submerged full flowing culvert outlets. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 112(2): 136-149.
- Mazurek KA and Hossain T, 2007. Scour by jets in cohesionless and cohesive soils. *Can J Civil Eng*, 34(6): 744-751.
- Moore WL and Masch FD, 1962. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. *J Geophys Res* 67(4):1437-1446.
- Poreh M and Hefez E, 1967. Initial scour and sediment motion due to an impinging jet. 11-14 September, Proc 12th IAHR Cong., Fort Collins, Colorado, USA.
- Rajaratnam N and Beltaos S, 1977. Erosion by impinging circular turbulent jets. *J Hydraul Div, ASCE*, 103(10): 1191-1205.
- Rajaratnam N, 1982. Erosion by submerged circular jets. *J. Hydraul. Div., ASCE*, 108(HY2): 262-267.
- Raudikivi AJ, 1992. Loose Boundary Hydraulics. Chap. 9, 3rd ed., Pergamon Press, New York.
- Rajaratnam N and Mazurek KA, 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tail water. *J Hydraul Eng, ASCE*, 129(3): 225-229.
- Rajaratnam N and Mazurek KA, 2005. Impingement of circular turbulent jets on rough boundaries. *J Hydraul Res, IAHR*, 43 (6): 688-694.
- Rouse H, 1939. Criteria for similarity in the transportation of sediment. Bulletin 20, University of Iowa, Iowa, USA, pp 33-49.
- Sharma KVN, 1967. Study of scour phenomenon and its functional form. PhD Thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Westrich B and Kobus H, 1973. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets. Pp A13 (1-8). Proc 15th IAHR Congress, Istanbul, Turkey