

مطالعه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک جریان با سطح آزاد در یک محیط متخلخل سنگریزه‌ای

امیر گرد نوشهری^۱، ابراهیم امیری تکلدانی^{۲*}، محمد صدقی اصل^۳

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۳۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۶/۲۰)

چکیده

با افزایش شیب سطح آب و بستر و یا ایجاد انحنای قابل ملاحظه در خطوط جریان، توزیع فشار عمودی از حالت هیدرواستاتیک خارج می‌شود. در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای به دلیل افت شدید انرژی و اختلاف زیاد بین تراز آب بالادست و پایین‌دست محیط، توزیع فشار از نوع غیر هیدرواستاتیک مورد انتظار است. در این مقاله با استفاده از تئوری پای باکینگهام و تحلیل رگرسیون، رابطه‌ای برای نیمرخ طولی سطح آب در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای ارائه شده و همچنین با استفاده از معادله اولر و با در نظر گرفتن اثرات شیب زیاد و انحنای عمودی خطوط جریان، رابطه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای به دست آمده است. نتایج آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب و نیمرخ طولی فشار وارد بر کف در محیط متخلخل سنگریزه‌ای با قطر متوسط ذرات $1/68$ سانتی‌متر و دو طول $0/5$ و $1/0$ متری تطابق خوبی با روابط ارائه شده نشان می‌دهند به طوری که متوسط قدر مطلق خطای نسبی مقادیر محاسباتی این دو نیمرخ به ترتیب برابر با $1/31$ و $1/71$ درصد است.

واژه‌های کلیدی: معادله اولر، نیمرخ سطح آب، نیمرخ طولی فشار، مصالح درشت دانه، جریان متلاطم

مقدمه

سنگریزه‌ها بطور گسترده‌ای در ساخت فیلترهای زهکشی و تصفیه آب و فاضلاب، گابیون‌ها و حوضچه‌های آرامش، سدهای سنگریزه‌ای و تأخیری و زهکش‌های سنگریزه‌ای بکار می‌روند. خصوصیت متداول سازه‌های سنگریزه‌ای این است که جریان در داخل آن‌ها اغلب از قانون دارسی تبعیت نمی‌کند و رابطه بین گرادیان انرژی و سرعت ظاهری جریان به صورت غیر خطی خواهد بود. وقوع جریان غیر ماندگار و ماندگار با سطح آزاد نیز مسئله دیگری است که به پیچیدگی بیشتر جریان در داخل سازه‌های سنگریزه‌ای می‌افزاید (Hosseini, 1997).

با توجه به افت زیاد انرژی در سازه‌های سنگریزه‌ای، اختلاف بین تراز آب بالادست و پایین‌دست سازه زیاد خواهد بود. لذا نیمرخ سطح آب در بخش عمده از طول سازه دارای شیب زیادی بوده و همچنین در انتهای سازه و در محل خروجی از انحنای قابل ملاحظه‌ای نیز برخوردار خواهد بود. در چنین شرایطی، الگوی جریان دو بعدی است و جریان از نوع متغیر سریع خواهد بود. خصوصیت بارز جریان آزاد منحنی الخط

(متغیر سریع) در مقایسه با جریان متغیر تدریجی، انحراف شدید از توزیع فشار هیدرواستاتیک در اثر انحنای شدید خطوط جریان و وجود مؤلفه قابل ملاحظه شتاب عمودی است. جریان عبوری از روی سرریزها و شکل‌های بستر و همچنین جریان در آبشار آزاد نمونه‌هایی از جریان متغیر سریع در مجاری روباز است. با وجود اینکه در گذشته تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی جریان آزاد منحنی الخط صورت گرفته ولی تاکنون در سازه‌های سنگریزه‌ای مطالعه‌ای در این خصوص انجام نشده است.

در تمام تحقیقات پیشین انجام شده در خصوص جریان غیر داریسی با سطح آزاد در محیط‌های متخلخل، برای تعیین گرادیان هیدرولیکی بر اساس فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک عمل شده و فشار پیژومتری در کف فلوام آزمایشگاهی معادل عمق آب در محیط سنگریزه‌ای در نظر گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات Wilkins (1955)، Parkin (1963)، Stephenson (1979)، Herrera and Felton (1991)، Hansen (1992)، Hosseini (1997)، Bazargan and Shoaie (2010)، Sedghi-Asl et al. (2011)، Shokri et al. (2012)، Sedghi-Asl et al. (2014) و Shokri and Sabour (2014) اشاره کرد. از طرف دیگر تاکنون مطالعات مختلفی نظیر

* نویسنده مسئول: amiri@ut.ac.ir

نظری توزیع عمودی فشار در این نوع محیط‌های متخلخل بر اساس روش Zerihun (2016) استخراج خواهد شد و نتایج حاصل از مدل نظری با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

تئوری مسئله

معادله توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک

در جریان با سطح آزاد، فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک تنها در جریان متغیر تدریجی بر روی بستر صلب با شیب ناچیز معتبر است. چنانچه شتاب در جهت عمود بر جریان قابل ملاحظه باشد و یا شیب بستر زیاد باشد و خطوط جریان دارای انحنای باشند، شرایط جریان غیر هیدرواستاتیک برقرار خواهد بود.

با چشم‌پوشی از عبارات مربوط به لزجت در معادله ناویه استوکس، معادله زیر تحت عنوان معادله اولر به دست خواهد آمد:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (\text{رابطه ۱})$$

که $D\vec{V}/Dt$ مشتق کل یا مشتق مادی سرعت، ∇p گرادیان فشار، \vec{g} بردار گرانش و ρ چگالی سیال است. فرض جریان غیر لزج، در بسیاری از مسائل جریان مجاری روباز که در آن عمق و سرعت جریان و در نتیجه عدد رینولدز بزرگ بوده و شرایط جریان در حالت آشفته قرار دارد، تقریب خوبی است. در چنین شرایطی، تنش‌های برشی آشفتگی بزرگ بوده و همچنین اثرات لزجت تنها محدود به لایه نازک مرزی است. ضخامت این ناحیه جریان در عمل بسیار کم است و در مقایسه با عمق جریان قابل چشم‌پوشی است. خارج از این ناحیه برای جریان سیال با لزجت کم نظیر آب، مقدار تنش برشی ناشی از لزجت نزدیک به صفر است. در نتیجه بخش اعظم جریان مشابه حالت جریان غیر لزج، رفتار می‌کند.

معادله اولر، رابطه بین میدان‌های سرعت و فشار را در جریان غیر لزج بیان می‌کند. بر اساس معادله اولر، توزیع فشار در هر راستایی تحت تأثیر شتاب گرانش و سایر شتاب‌های وارد در آن راستا قرار دارد. بازنویسی این معادله در جهت خطوط جریان، منجر به رابطه برنولی خواهد شد و به کار بردن معادله اولر در جهت عمود بر خطوط جریان منجر به رابطه بین فشار و سرعت در جهت عمود بر خطوط جریان خواهد شد که در درک بسیاری از پدیده‌های مرتبط با جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. همان‌طور که در رابطه ۱ مشاهده می‌شود، چنانچه جریان در جهت عمود بر خطوط جریان فاقد شتاب باشد (خطوط جریان دارای انحنای ناچیز باشد)، سمت چپ معادله برابر صفر خواهد بود و در نتیجه اگر شیب خطوط جریان نیز ناچیز باشد (

Dressler (1978)، Hager and Hutter (1984)، Hager (1985)، Matthew Zerihun (1991)، Steffler and Jin (1993)، Castro-Orgaz and Hager (2004)، Castro-Orgaz (2013)، Hager and Hager (2014) برای مدل‌سازی مسائل جریان آزاد منحنی الخط با توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک و یا توزیع سرعت غیر یکنواخت در مجاری روباز انجام گرفته است. Fenton (1996) در تحقیقات خود در خصوص مدل‌سازی جریان منحنی الخط، فرض نمود که مقدار عامل تصحیح فشار دینامیک در سرتاسر مقطع عمودی ثابت و برابر با مقدار متوسط آن در سطح جریان و در روی کف آبراهه است. نتایج تحقیق Fenton (1996) محدود به مواردی است که انحنای خطوط جریان ملایم باشند (Zerihun and Fenton, 2006). Zerihun (2016) تحقیقی به منظور اصلاح روش Fenton (1996) انجام داده و مدلی برای جریان یک بعدی با توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک که شامل تصحیح مرتبه بالاتری برای اثر فشار دینامیک ناشی از انحنای عمودی خطوط جریان و همچنین اثر شیب تند کف آبراهه است، ارائه کرد. در این تحقیق Zerihun، برای عبارت تصحیح فشار دینامیک از توزیع خطی استفاده کرده است.

مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در خصوص شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان منحنی الخط در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای انجام نشده است و در واقع با فرض مساوی بودن ارتفاع معادل فشار وارد بر کف (فشار پیرومتری) با عمق آب، شرایط جریان با سطح آزاد به صورت هیدرواستاتیک لحاظ شده است. لذا بر این اساس مقدار سرعت ظاهری جریان در هر مقطع از محیط متخلخل سنگریزه‌ای محاسبه شده و در نهایت رابطه گرادیان فشار بر حسب سرعت ظاهری به شکل دو جمله‌ای و یا نمایی تعیین شده است که از آن برای محاسبه نیمرخ طولی سطح آب بر اساس معادله جریان متغیر تدریجی استفاده می‌شود.

در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی نیمرخ سطح آب و نیمرخ فشار وارد بر کف در دبی‌های مختلف در داخل محیط متخلخل درشت دانه با دو طول مختلف پرداخته می‌شود و اختلاف بین دو مقدار به علت وجود شرایط غیر هیدرواستاتیک تحلیل می‌شود. با توجه به اهمیت نیمرخ طولی فشار وارد بر کف در تعیین گرادیان فشار و همچنین نیمرخ طولی سطح آب در تعیین سرعت ظاهری جریان (دبی جریان در واحد عرض تقسیم بر عمق آب) و رابطه متقابل این دو پارامتر در تعیین روابط جریان آزاد غیر داری در محیط‌های سنگریزه‌ای، ضروری است که توزیع فشار عمودی در مقطع عرضی و همچنین رابطه آن با عمق آب در دست باشد. بنابراین با استفاده از معادله اولر، رابطه

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -g_n - a_n \quad (\text{رابطه ۲})$$

که چگالی سیال، $\partial p / \partial n$ گرادیان فشار در راستای n ، g_n و a_n به ترتیب مؤلفه شتاب گرانش و شتاب گریز از مرکز در راستای n هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$g_n = g \cos \theta_n \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$a_n = \kappa V_v^2 \cos(\theta_n - \theta_z) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که g شتاب گرانش، $\kappa = 1/R$ انحناى خط جریان، R شعاع انحنا و θ_n و θ_z به ترتیب زاویه سطح آب و خط جریان مفروض با افق است. در نتیجه با جایگذاری روابط ۳ و ۴ در رابطه ۲ می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -g \cos \theta_n - \kappa V_v^2 \cos(\theta_n - \theta_z) \quad (\text{رابطه ۵})$$

از آنجا که $\partial n / \partial z = \cos \theta_n$ است، رابطه ۵ در سیستم مختصات کارتزین به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \cos^2 \theta_n - \kappa V_v^2 \cos \theta_n \cos(\theta_n - \theta_z) \quad (\text{رابطه ۶})$$

با فرض ناچیز بودن انحناى عرضی خطوط جریان که در مقایسه با انحناى عمودی بسیار کوچک است، می‌توان عبارت انحناى خط جریان را از رابطه زیر به دست آورد:

$$\kappa = \cos^3 \theta_z \frac{\partial^2 z_s}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که z_s موقعیت عمودی خط جریان مفروض است. از طرفی مؤلفه افقی سرعت ذره $u_v = V_v \cos \theta_z$ خواهد بود که با فرض توزیع سرعت یکنواخت مقدار آن معادل سرعت واقعی جریان در محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شود:

$$V_v = \frac{q}{(z_\eta - z_b) \phi \cos \theta_z} = \frac{q}{H(x) \phi \cos \theta_z} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه ۸، q دبی در واحد عرض، z_η و z_b به ترتیب تراز سطح آب و تراز بستر، $H(x)$ عمق جریان در فاصله x از ابتدای محیط متخلخل و ϕ تخلخل محیط متخلخل است. با جایگذاری روابط ۷ و ۸ در رابطه ۶ و ساده‌سازی داریم:

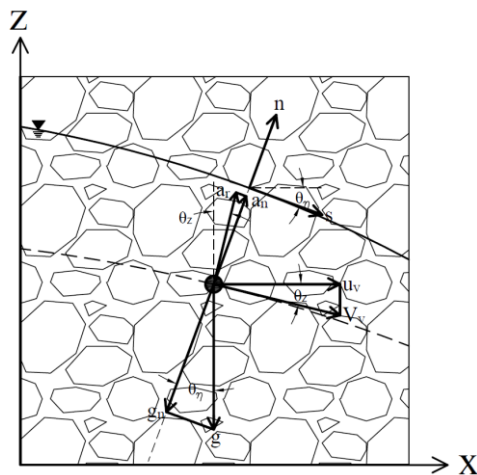
$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \cos^2 \theta_n - \frac{q^2 \cos \theta_n}{H^2(x) \phi^2} \omega(z_s) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که $\omega(z_s)$ ضریب تصحیح فشار دینامیک است. ضریب تصحیح $\omega(z_s)$ تابعی از مشخصات خطوط جریان در راستای عمودی است و با توجه اینکه برای انتگرال‌گیری از رابطه ۹ و تعیین توزیع عمودی فشار نیاز به شناخت تابع $\omega(z_s)$ می‌باشد، در اینجا فرض می‌شود این ضریب به صورت خطی از بستر تا

$\bar{g} = -g_z$ که شتاب گرانش در جهت قائم است)، رابطه به توزیع فشار هیدرواستاتیک منجر خواهد شد که در آن گرادیان عمودی فشار برابر با مقدار ثابت وزن مخصوص سیال است. به عبارت دیگر در شرایط هیدرواستاتیک، توزیع عمودی فشار خطی بوده و فشار در هر نقطه رابطه‌ای مستقیم با عمق جریان از سطح جریان تا نقطه مذکور دارد. اما در صورت وجود انحناى عمودی خطوط جریان و یا شیب زیاد خطوط جریان، شرایط جریان غیر هیدرواستاتیک بوده و فشار بسته به محدب یا مقعر بودن خطوط جریان، کمتر و یا بیشتر از فشار هیدرواستاتیک است.

با توجه به اینکه شتاب عمود بر خط جریان در هر نقطه به سرعت و شعاع انحنا بستگی دارد، در نتیجه با داشتن توزیع عمودی سرعت و همچنین تابع تغییرات انحناى خطوط جریان از بستر تا سطح جریان، می‌توان از رابطه ۱ انتگرال‌گیری کرد و رابطه توزیع عمودی فشار را تعیین نمود.

جریان ماندگار را در یک محیط متخلخل با بستر صلب و مسطح (شیب صفر) با سیستم مختصات کارتزین (x, y, z) که x به صورت افقی در راستای جریان و بر روی بستر صلب، y در جهت عرضی و عمود بر صفحه و z به صورت عمودی و رو به بالا است، در نظر بگیرید. سیستم مختصات خطوط جریان منحنی الخط نیز به صورت مماس s و عمود n بر سطح جریان که خود یک خط جریان است، مطابق شکل ۱ می‌باشد.



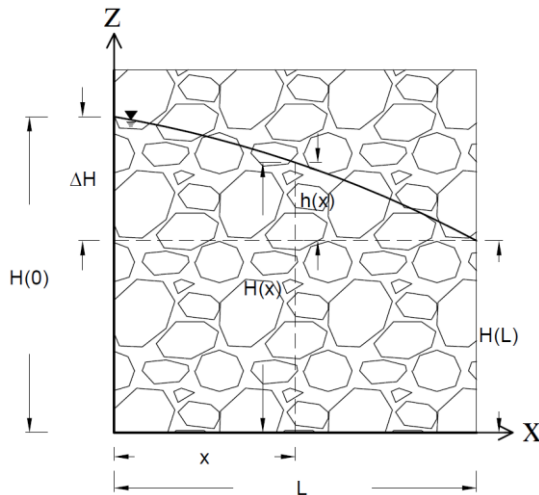
شکل ۱- شکل شماتیک جریان منحنی الخط عبوری از محیط سنگریزه‌ای و متغیرهای مورد استفاده در مدل

بر ذره فرضی نشان داده شده در شکل ۱ که با سرعت V_v بر روی خط جریان مفروض در حال حرکت است، علاوه بر شتاب گرانش، شتاب گریز از مرکز a_r نیز در جهت عمود بر خط جریان وارد می‌شود. در نتیجه معادله اولر در راستای n را می‌توان به صورت زیر نوشت:

تحلیل ابعادی پای باکینگهام برای تعیین پارامترهای بی بعد مؤثر در هیدرولیک جریان محیط متخلخل استفاده می شود. بر اساس شکل ۲ پارامترهای مؤثر در هیدرولیک مسئله را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$f(u_v, x, L, v, D_{50}, \phi, h(x), \rho, g, \Delta H) = 0 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در رابطه ۱۴، u_v سرعت متوسط واقعی جریان در مقطع عرضی، v لزجت سینماتیک آب، D_{50} قطر متوسط ذرات سنگریزه، ϕ تخلخل محیط متخلخل، ρ چگالی آب، g شتاب گرانش بوده و سایر پارامترها در شکل ۲ مشخص شده اند.



شکل ۲- نیمرخ طولی سطح آب در محیط متخلخل سنگریزه ای

از آنجا که در این تحقیق تنها از یک نوع سنگریزه با دانه بندی مشخص استفاده شده است در نتیجه می توان از دو پارامتر ϕ و D_{50} صرف نظر کرد. همچنین با توجه به اینکه از u_v (معادل u/ϕ که u سرعت ظاهری در محیط متخلخل است) در پارامترها استفاده شده است که تخلخل در آن مورد استفاده قرار گرفته است و خود تخلخل به دانه بندی و اندازه متوسط ذرات بستگی دارد، صرف نظر کردن از دو پارامتر ϕ و D_{50} غیر منطقی نخواهد بود. با این شرایط ۸ پارامتر وجود دارد که هر سه بعد اصلی را دارا هستند و بر اساس نظریه پای باکینگهام می توان ۵ پارامتر بی بعد تعریف کرد. با در نظر گرفتن ρ ، g و ΔH رابطه تابعی پارامترهای بی بعد به صورت زیر خواهد بود:

(رابطه ۱۵)

$$f\left(\frac{u_v}{\sqrt{g \Delta H}}, \frac{v}{\Delta H \sqrt{g \Delta H}}, \frac{x}{\Delta H}, \frac{L}{\Delta H}, \frac{h(x)}{\Delta H}\right) = 0$$

با تقسیم پارامتر اول بر دوم و تقسیم پارامتر سوم بر چهارم به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$f\left(\frac{u_v \Delta H}{v}, \frac{x}{L}, \frac{h(x)}{\Delta H}\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

سطح آب تغییر می کند. در نتیجه می توان نوشت:

(رابطه ۱۰)

$$\omega(z_s) = \cos \theta_z \cos(\theta_\eta - \theta_z) \frac{\partial^2 z_s}{\partial x^2} = \omega_b + \left(\frac{z_s - z_b}{z_\eta - z_b}\right) (\omega_\eta - \omega_b)$$

از آنجا که بستر مسطح فرض شده است و خود یک خط جریان است، لذا عبارت $(\partial^2 z_b / \partial x^2)$ و در نتیجه ضریب $\omega_b = \omega(z_b)$ معادل صفر خواهد بود. همچنین در سطح جریان مقدار ضریب تصحیح فشار دینامیک $\omega_\eta = \omega(z_\eta) = \cos \theta_\eta (\partial^2 z_\eta / \partial x^2)$ با در نظر گرفتن سطح مبنا منطبق بر بستر به جای عبارت $\partial^2 z_\eta / \partial x^2$ می توان از $H''(x)$ استفاده کرد. در نتیجه می توان نوشت:

(رابطه ۱۱)

$$\omega(z_s) = \cos \theta_\eta \frac{\partial^2 z_\eta}{\partial x^2} \left(\frac{z_s}{H(x)}\right) = \cos \theta_\eta H''(x) \left(\frac{z_s}{H(x)}\right)$$

با جایگذاری رابطه ۱۱ در رابطه ۹ و انتگرال گیری آن از z_η تا z_s و در نهایت ساده سازی، رابطه زیر برای توزیع فشار عمودی بدست می آید:

(رابطه ۱۲)

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{z_s} = \frac{z_\eta - z_s}{1 + (H'(x))^2} + \frac{q^2 H''(x)}{g H^3 \phi^2 (1 + (H'(x))^2)} \left(\frac{z_\eta^2 - z_s^2}{2}\right)$$

با قرار دادن $z_s = z_b$ در رابطه ۱۲ و ساده سازی، رابطه زیر برای فشار وارد بر بستر به دست می آید:

(رابطه ۱۳)

$$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_{z_b} = \frac{H}{1 + (H'(x))^2} + \frac{q^2 H''(x)}{2g H \phi^2 (1 + (H'(x))^2)}$$

همان گونه که در رابطه ۱۲ مشاهده می شود اگر انحنای سطح آب کم باشد ($H''(x) \approx 0$)، عبارت دوم حذف می شود و رابطه توزیع فشار برای جریان های با شیب زیاد به دست می آید و چنانچه شیب سطح آب اندک باشد، عبارت مشتق جمله اول نیز به سمت صفر میل می کند و در نتیجه رابطه معرف توزیع فشار هیدرواستاتیک خواهد بود.

به منظور ارزیابی درستی رابطه ۱۳، در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی جریان عبوری از محیط سنگریزه ای شامل نیمرخ طولی سطح آب و نیز فشار کف استفاده به عمل آمده است. مقایسه داده های آزمایشگاهی و داده های حاصل از رابطه فوق در بخش های بعدی ارائه خواهد شد.

آنالیز ابعادی

حل رابطه حاصل از انتگرال گیری معادله اولر، نیازمند معادله تغییرات سطح آب و همچنین مشتقات آن است. لذا از روش

آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران وجود دارد، استفاده شد (شکل ۳). در ابتدای این فلوم یک مخزن ورودی به ابعاد ۱ متر در ۱/۵ متر و به ارتفاع ۱ متر وجود دارد که با یک سرریز مثلثی به فلوم مورد نظر متصل شده است. اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از این سرریز مثلثی انجام می‌گیرد. کف فلوم از جنس پلاکسی گلاس و دیواره‌ها از جنس شیشه است که امکان مشاهده جریان را فراهم می‌کند. تعداد ۲۴ پیزومتر با فواصل تقریبی ۸ سانتی‌متری در کف فلوم تعبیه شده است که برای ثبت نیمرخ طولی فشار استفاده می‌شوند. به منظور ایجاد محیط متخلخل سنگریزه‌ای، از محفظه‌ای با طول متغیر ۰/۵ و ۱/۰ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر که از شبکه توری با منافذ مربعی ۱/۰ سانتی‌متری ساخته شده، استفاده گردید. وجه بالادست و پایین‌دست این محفظه به صورت عمودی بوده و وجود قاب فلزی در اطراف آن باعث شد که در طی آزمایش‌ها شکل خود را حفظ کند.

پارامتر اول رابطه ۱۶ معرف عدد رینولدز است که بعد طولی در آن معادل ΔH است، بنابراین از نماد $Re_{\Delta H}$ به جای آن استفاده می‌شود. همچنین با جایگذاری $h(x)=H(x)-H(L)$ و $\Delta H=H(0)-H(L)$ در پارامتر سوم می‌توان نوشت:

$$f\left(\frac{H(x)-H(L)}{H(0)-H(L)}, \frac{x}{L}, Re_{\Delta H}\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

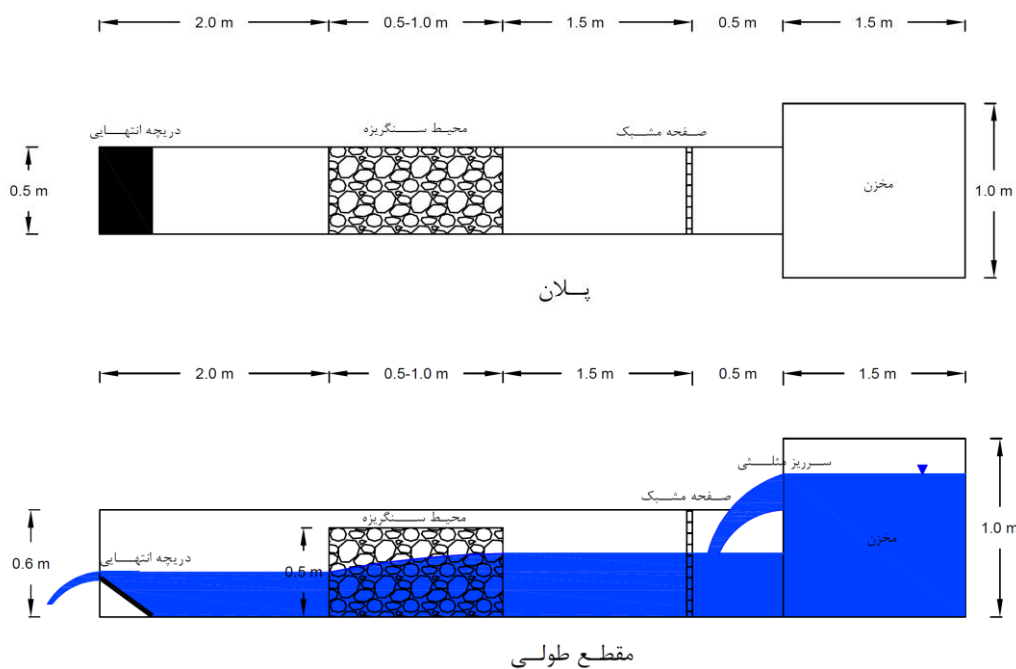
بنابراین نیمرخ سطح آب به صورت رابطه تابعی زیر قابل تعریف است:

$$\frac{H(x)-H(L)}{H(0)-H(L)} = f\left(\frac{x}{L}, Re_{\Delta H}\right) \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، از یک فلوم آزمایشگاهی شیب پذیر با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۵ متر، طول ۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر که در آزمایشگاه هیدرولیک گروه



ذرات نسبت به تصویر پس‌زمینه است. لذا در این تحقیق از یک دوربین دیجیتال کانن مدل Powershot SX410 IS با دقت مؤثر حس‌گر ۲۰ مگاپیکسل استفاده شد. همچنین برای افزایش قابلیت تشخیص ذرات نسبت به تصویر پس‌زمینه از یک صفحه به رنگ آبی به عنوان پس‌زمینه استفاده شد و سعی شد نور محیط به گونه‌ای باشد که کمترین سایه در اطراف ذرات ایجاد شود (شکل ۴). از آنجا که هدف تعیین اندازه متوسط ذرات

مصالح مورد استفاده به عنوان سنگریزه‌های محیط متخلخل از نوع رودخانه‌ای گرد گوشه بود. برای تهیه دانه‌بندی یکنواخت سنگریزه‌ها از روش الک کردن استفاده گردید. سپس با استفاده از تکنیک عکس‌برداری و تحلیل عکس توسط نرم‌افزار Hydraulic Toolbox منحنی دانه‌بندی و قطر متوسط نمونه سنگریزه‌ها تعیین گردیدند. نکات قابل توجه برای حصول بهترین نتایج، وضوح بالای تصویر و همچنین مشخص بودن

همچنین برای اندازه‌گیری تخلخل مصالح سنگریزه از یک ظرف با حجم مشخص استفاده شد به طوری که ابتدا این ظرف با سنگریزه پر شده و سپس درون آن آب ریخته می‌شد. در نهایت با تقسیم کردن حجم آب ریخته شده بر حجم کل ظرف مقدار تخلخل محیط سنگریزه‌ای محاسبه گردید. مقدار متوسط تخلخل محیط سنگریزه برای سه آزمایش مختلف برابر با ۰/۳۹ به دست آمد.

روش انجام آزمایش‌ها

ابتدا محفظه برای طول موردنظر محیط متخلخل (۵/۰ یا ۱۰/۰ متری) تنظیم می‌شد و در داخل فلوم قرار می‌گرفت. پس از پر کردن محفظه با سنگریزه، جریان آب با دبی‌های مختلف از درون محیط متخلخل عبور داده می‌شد و پس از متعادل شدن جریان و برقراری شرایط جریان ماندگار در فلوم، نیمرخ فشار در داخل بدنه و طرفین محفظه حاوی سنگریزه‌ها با استفاده از پیژومترهای موجود قرائت می‌شد. همچنین برای تعیین نیمرخ سطح آب در داخل محیط سنگریزه، از روش عکس‌برداری از دیواره کناری فلوم با استفاده از دوربین عکاسی استفاده شد. به این صورت که با استفاده از ماژیک سطح آب بر روی دیواره شیشه‌ای کناری فلوم علامت‌گذاری گردیده و با دوربین عکاسی از آن عکس‌برداری و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Grapher رقمی‌سازی می‌شد.

نتایج و بحث

نیمرخ بی‌بعد سطح آب

برای استفاده از رابطه ۱۳ نیاز به نیمرخ طولی سطح آب در داخل محیط متخلخل است که بر اساس رابطه ۱۸ شکل بی‌بعد آن بر اساس تحلیل پای باکینگهام مشخص شده است. برای تعیین فرم رابطه ۱۸ از تحلیل رگرسیون بر روی دوسوم داده‌های موجود استفاده می‌شود. بر اساس تحلیل رگرسیون رابطه زیر حاصل می‌شود:

(رابطه ۱۹)

$$\frac{H(x)-H(L)}{H(0)-H(L)} = 1 - 0.141\left(\frac{x}{L}\right) - 1.735\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2.103\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 1.225\left(\frac{x}{L}\right)^4 - \frac{57.43}{Re_{\Delta H}} \quad R^2 = 0.997$$

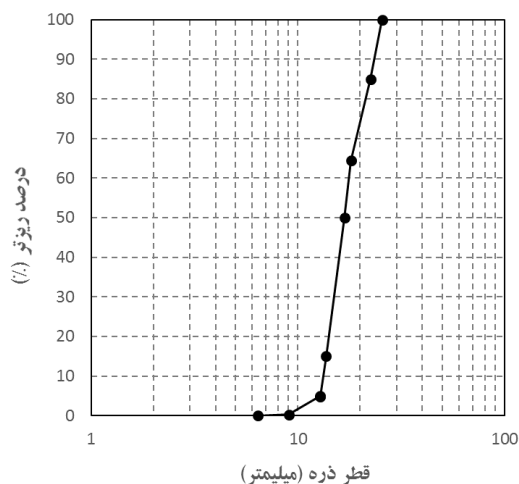
با توجه به اینکه $Re_{\Delta H}$ در نتایج آزمایشگاهی در محدوده ۱۰۴۰۸ تا ۶۹۱۳۲ متغیر است و این پارامتر در مخرج آخرین عبارت قرار گرفته است می‌توان نتیجه گرفت که عبارت آخر بسیار کوچک است و لذا قابل صرف‌نظر می‌باشد. چنین فرضی با

سنگریزه بود و با توجه به اینکه عکس تهیه شده به صورت دو بعدی می‌باشد، لذا ذرات به گونه‌ای بر روی صفحه پس‌زمینه قرار گرفتند که کوچکترین قطر سه محوری ذرات به صورت عمود بر صفحه قرار گیرد و در نتیجه در پردازش تصویر لحاظ نشود.

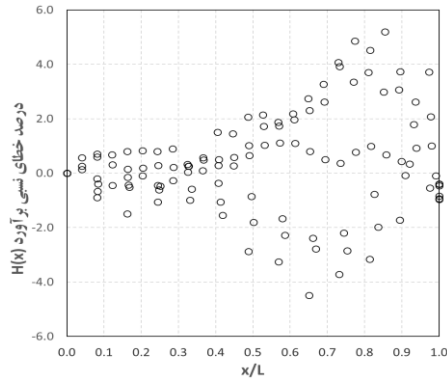


شکل ۴- عکس دیجیتالی تهیه شده از نمونه ذرات سنگریزه

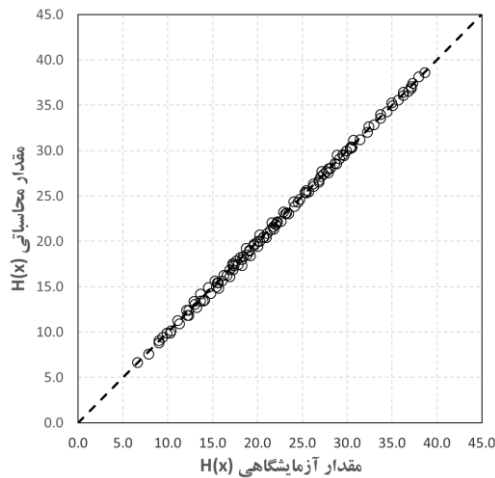
سپس با ترسیم یک طول مقیاس بر روی صفحه پس‌زمینه (شبکه مربعی به طول ۱۰ سانتی‌متر) و تعریف آن در نرم‌افزار، پس از فیلتر نمودن و پردازش عکس دیجیتالی، مقادیر منحنی دانه‌بندی ذرات تعیین شد (شکل ۵). بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصاویر مربوط به دو عکس تهیه شده از ذرات سنگریزه، مقدار قطر متوسط ذرات برابر با ۱/۶۸ سانتی‌متر تعیین گردید. با توجه به اینکه ذرات سنگریزه مذکور پس از فرآیند الک کردن و عبور از الک با شبکه ۲/۴×۲/۴ سانتی‌متری بر روی الک با شبکه ۱/۲×۱/۲ سانتی‌متری باقیمانده بودند، نتایج حاصل از تعیین دانه‌بندی ذرات با استفاده از پردازش تصویر مورد قبول خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود ۱۰۰ درصد ذرات کوچکتر از ۲/۶ سانتی‌متر و تقریباً ذره‌ای کوچکتر از ۰/۹ سانتی‌متر نیست که کاملاً با نتایج الک همخوانی دارد.



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی ذرات سنگریزه



شکل ۶- درصد خطای نسبی تخمین عمق آب با استفاده از رابطه ۲۰



شکل ۷- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی عمق آب

تغییرات بار آبی معادل فشار وارد بر کف در جریان عبوری از دو محیط متخلخل به طول ۰/۵ و ۱/۰ متر در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل نیمرخ بی بعد فشار کف $(p/\gamma)/H$ در هر مقطع (که p/γ بار آبی معادل فشار وارد بر کف و H عمق آب است) در مقابل طول بی بعد شده x/L ترسیم شده است. عبارت $(p/\gamma)/H$ در واقع معرف نسبت فشار پیرومتری به عمق آب است که در شرایط هیدرواستاتیک معادل ۱ است و در شرایط غیر هیدرواستاتیک بسته به انحنا و شیب خطوط جریان، مقداری بزرگتر و یا کوچکتر از ۱ را دارا خواهد بود. به طوری که مشاهده می شود مقدار $(p/\gamma)/H$ در طول محیط متخلخل کوچکتر از ۱ است که با توجه به مقادیر شیب سطح جریان در جهت طولی ($H'(x) \neq 0$) و همچنین تحذب خطوط جریان ($H''(x) < 0$)، در رابطه ۱۳ کاملاً بدیهی است. همچنین با افزایش دبی و در نتیجه افزایش اختلاف تراز آب در بالادست و پایین دست محیط متخلخل که باعث افزایش شیب سطح آب (کاهش عبارت اول رابطه ۱۳) و همچنین منفی تر شدن عبارت دوم رابطه ۱۳ خواهد شد، نسبت فشار پیرومتری به عمق آب نیز بیشتر کاهش می یابد. به علاوه شکل ۸ نشان می دهد که با

توجه به اینکه جریان عبوری از داخل محیطهای متخلخل درشت دانه در محدوده شرایط جریان آشفته قرار دارد، منطقی خواهد بود. بنابراین می توان نوشت:

(رابطه ۲۰)

$$H(x) = \left[1 - 0.141 \left(\frac{x}{L} \right) - 1.735 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 2.103 \left(\frac{x}{L} \right)^3 - 1.225 \left(\frac{x}{L} \right)^4 \right] [H(0) - H(L)] + H(L)$$

$$R^2 = 0.997$$

به منظور تعیین درستی رابطه ۲۰، از یک سوم باقی مانده داده ها که در تحلیل رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفته بودند، استفاده شد و مقادیر درصد خطای نسبی (RE) و متوسط قدر مطلق خطای نسبی (MARE) به ترتیب بر اساس روابط ۲۱ و ۲۲ محاسبه شد.

$$RE = \frac{E_i - C_i}{E_i} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$MARE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - C_i}{E_i} \right| \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

که E_i مقدار آزمایشگاهی، C_i مقدار محاسباتی و N تعداد داده ها است. درصد خطای نسبی برآورد نتایج حاصل از رابطه ۲۰ در شکل ۶ و مقادیر آزمایشگاهی در مقابل مقادیر محاسباتی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، خطای نسبی در بازه $-۴/۵$ تا $۵/۲$ درصد تغییر می کند و مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی برابر با $۱/۳۱$ درصد است. در نیمه انتهایی محیط متخلخل خطای نسبی افزایش می یابد که به دو علت قابل توجیه است. اول اینکه به لحاظ ریاضی اندک خطایی در مقادیر کوچک مقدار آزمایشگاهی منجر به مقادیر بزرگ خطای نسبی می شود، لذا در بخش انتهایی با کم شدن مقدار عمق آب می توان انتظار افزایش خطای نسبی را داشت. دوم اینکه به لحاظ هیدرولیکی با نزدیک شدن به انتهای محیط متخلخل و افزایش سرعت جریان، به علت نوسان شدید سطح آب در اثر حفرات نامنظم محیط متخلخل، خطای ناشی از اندازه گیری نیمرخ سطح آب افزایش می یابد. ولی در مجموع با توجه به شکل های ۶ و ۷، رابطه ۲۰ از دقت قابل قبولی در برآورد نیمرخ سطح آب در محیط متخلخل سنگریزه ای برخوردار است.

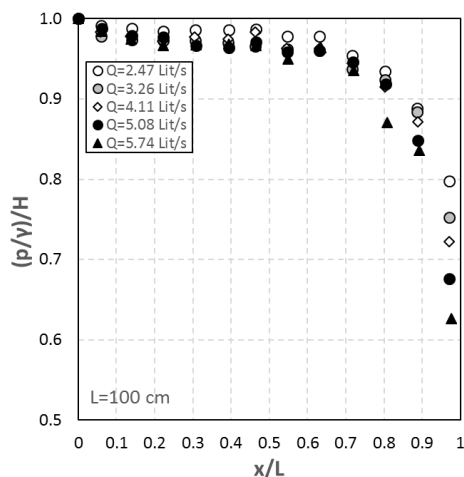
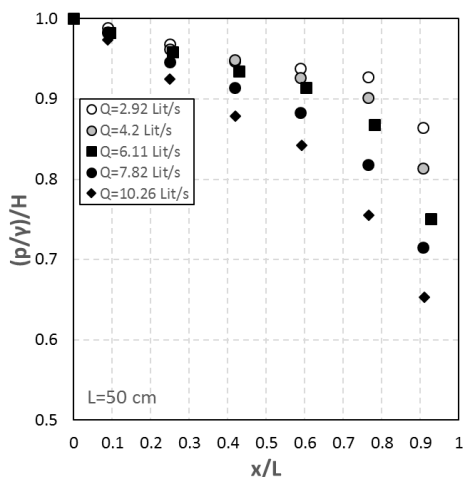
نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی مدل

در این تحقیق به ترتیب ۹ و ۱۰ آزمایش در دبی های متغیر از $۲/۴۷$ تا $۱۰/۲۶$ لیتر بر ثانیه بر روی محیط متخلخل ۱ متری و $۰/۵$ متری که شامل ذرات سنگریزه با قطر متوسط $۱/۶۸$ سانتی متر بودند، انجام گرفت. دمای آب در این آزمایش ها بین ۲۶ تا ۲۹ درجه سانتی گراد متغیر بود.

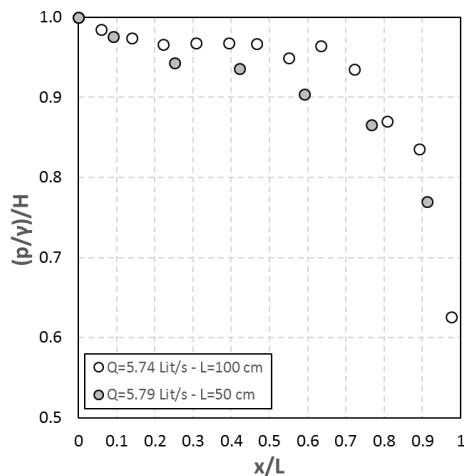
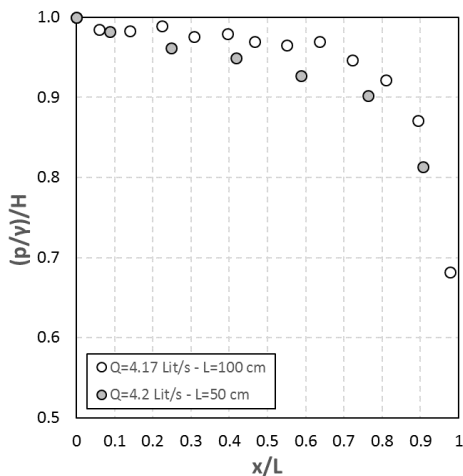
داده شده است. به طوری که مشاهده می‌شود با کاهش طول محیط متخلخل، شرایط غیر هیدرواستاتیک توزیع فشار در جریان مشهودتر شده است. در واقع می‌توان گفت چنانچه طول محیط به اندازه کافی زیاد باشد، در نتیجه کم شدن شیب خطوط جریان و همچنین ناچیز بودن انحنای خطوط جریان می‌توان انتظار داشت که در بخش عمده از طول محیط متخلخل، شرایط هیدرواستاتیک برقرار خواهد بود.

افزایش طول محیط متخلخل، مقادیر نیمرخ‌های بی‌بعد فشار کف نسبتاً بر هم منطبق بوده و پراکندگی کمتری دارند. به عبارتی دیگر با افزایش طول محیط متخلخل، جریان بیشتر تکامل یافته است.

به منظور ارزیابی اثر طول محیط متخلخل بر نیمرخ طولی فشار وارد بر کف، مقادیر نیمرخ بی‌بعد فشار کف در دو طول ۰/۵ و ۱/۰ متر برای دو دبی تقریباً یکسان در شکل ۹ نشان



شکل ۸- تغییرات فشار کف در طول محیط متخلخل



شکل ۹- اثر طول محیط متخلخل بر نیمرخ بی‌بعد فشار وارد بر کف

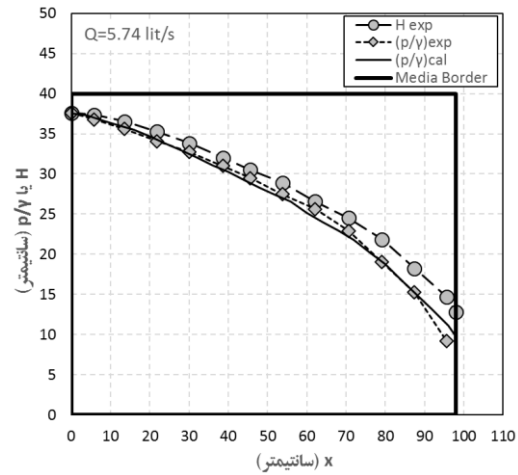
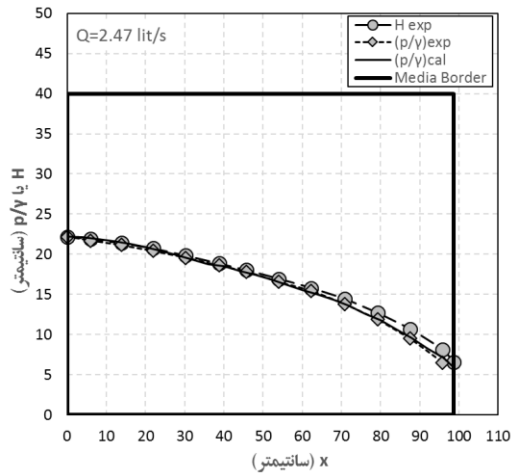
متخلخل، اختلاف بین عمق آب و فشار پیزومتری نیز زیاد می‌شود و نتایج حاصل از حل رابطه ۱۳ انطباق خوبی بر مقادیر آزمایشگاهی دارد.

به منظور بررسی درستی رابطه ۱۳ در تخمین بار آبی معادل فشار وارد بر کف در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب درصد خطای نسبی تخمین رابطه ۱۳ نسبت به طول بی‌بعد محیط متخلخل (x/L) و نمودار مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر آزمایشگاهی بار آبی معادل فشار وارد بر کف ارائه شده است.

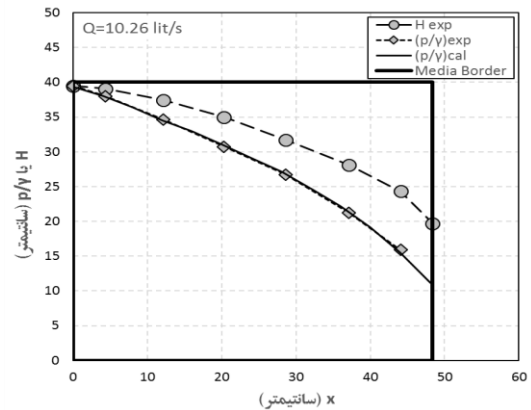
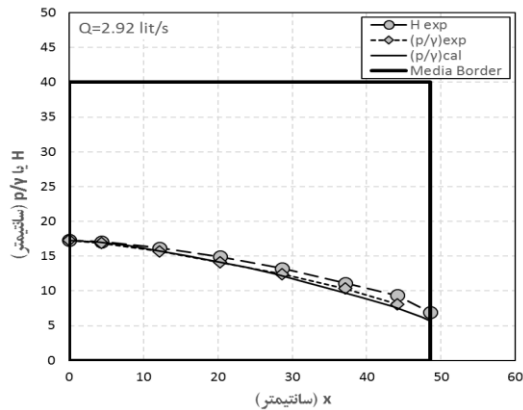
با استفاده از معادله نیمرخ سطح آب (رابطه ۲۰) می‌توان مشتقات سمت راست رابطه ۱۳ را برآورد کرد و مقدار فشار پیزومتری وارد بر بستر را به دست آورد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمونه‌هایی از نیمرخ سطح آب H_{exp} و همچنین نیمرخ فشار وارد بر کف $(p/\gamma)_{exp}$ در محیط متخلخل سنگریزه‌ای به همراه نتایج حاصل از حل رابطه ۱۳، $(p/\gamma)_{cal}$ ، نشان داده شده است. به طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش دبی و در نتیجه افزایش اختلاف تراز آب در بالادست و پایین‌دست محیط

معادله از درستی قابل قبولی برخوردار است به طوری که خطای نسبی بین $5/3$ تا $8/2$ درصد متغیر است و مقدار متوسط قدر مطلق خطای نسبی آن برابر با $1/71$ درصد می‌باشد.

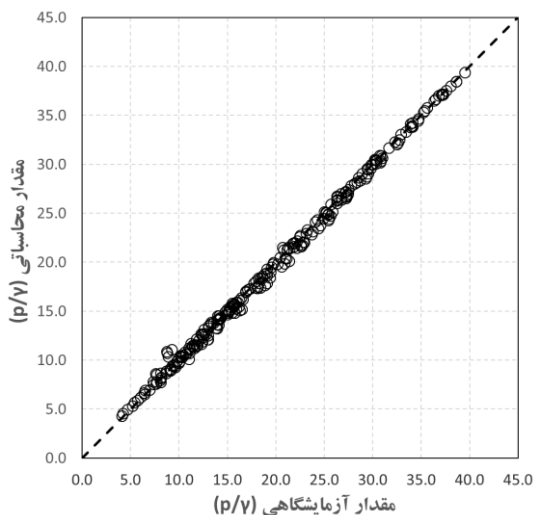
نتایج نشان می‌دهند که رابطه ۱۳ به خوبی فشار وارد بر کف را برآورد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در قسمت انتهایی محیط متخلخل $1/0$ متری، خطای برآورد فشار وارد بر کف توسط رابطه ۱۳ افزایش یافته و در سایر قسمت‌ها



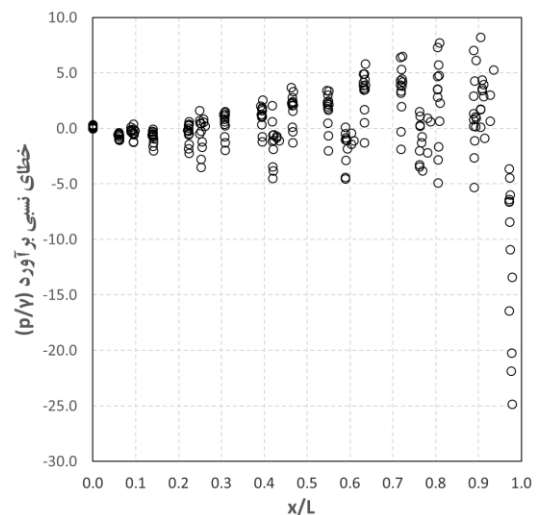
شکل ۱۰- مقادیر آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب H_{exp} و نیمرخ فشار وارد بر کف $(p/\gamma)_{exp}$ به همراه مقادیر محاسباتی فشار وارد بر کف $(p/\gamma)_{cal}$ برای $L=100$ cm



شکل ۱۱- مقادیر آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب H_{exp} و نیمرخ فشار وارد بر کف $(p/\gamma)_{exp}$ به همراه مقادیر محاسباتی فشار وارد بر کف $(p/\gamma)_{cal}$ برای $L=50$ cm



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی فشار وارد بر کف

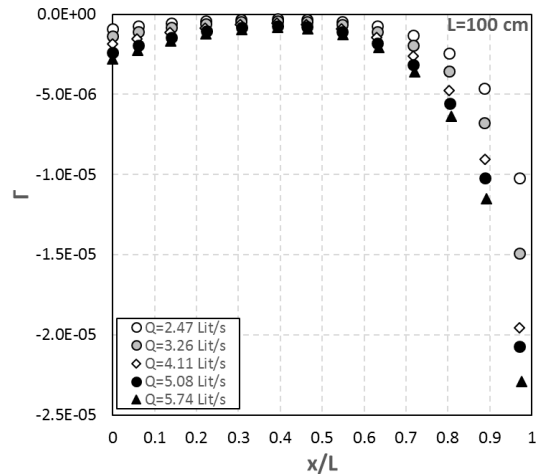
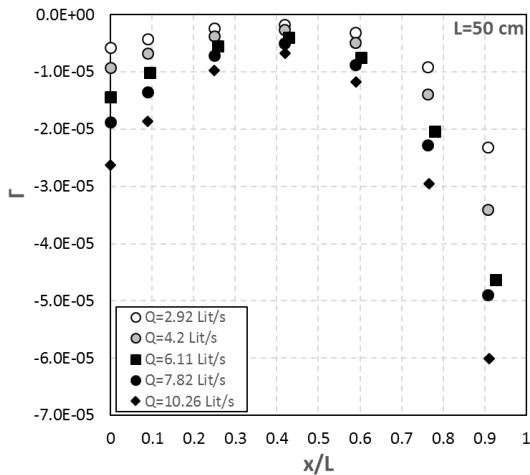


شکل ۱۲- خطای نسبی تخمین فشار وارد بر کف با استفاده از رابطه ۱۳

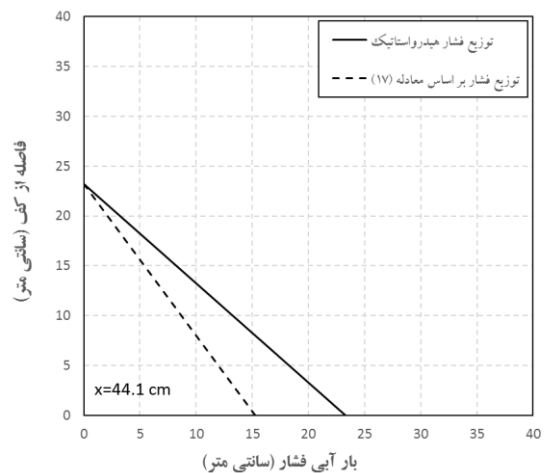
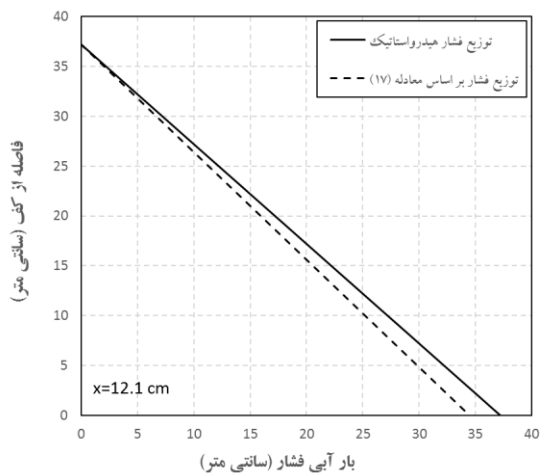
شیب سطح آب بوده و در عبارت دوم پارامتر H که معرف انحناى سطح آب می‌باشد، ظاهر شده‌اند. به منظور بررسی اثر انحناى سطح آب در مقدار برآورد شده بار آبی فشار وارد بر کف، در شکل ۱۴ مقادیر بی‌بعد عبارت دوم معادله ۱۳ $(\Gamma = \frac{[q^2 H''(x)] / (2gH\phi^2 (1 + (H'(x))^2))}{H})$ بر حسب مقدار بی‌بعد طول محیط متخلخل (x/L) ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر Γ بسیار ناچیز و از مرتبه بزرگی 10^{-5} برخوردار هستند و عملاً تأثیری بر روی مقدار بار آبی فشار وارد بر کف ندارند. از آنجا که در هیدرولیک جریان محیط متخلخل مقادیر بار آبی سرعت ناچیز هستند، می‌توان انتظار داشت که وزن عبارت دوم روابط ۱۲ و ۱۳ در کل قابل چشم‌پوشی است. اما با این وجود ملاحظه می‌شود که در ابتدا و انتهای محیط متخلخل که انحناى سطح آب به نسبت قسمت‌های میانی قابل ملاحظه‌تر است، تأثیر انحنا در مقدار بار آبی فشار نیز بیشتر است.

خطای قابل ملاحظه آخرین پیژومتر محیط متخلخل $1/10$ متری در اثر نزدیکی بیش از اندازه این پیژومتر به خروجی و اهمیت اثر دیواره در وجه خروجی است. فاصله این پیژومتر از وجه پایین دست و خروجی محفظه محیط متخلخل در حدود $2/6$ سانتی‌متر بوده و با توجه به اندازه ذرات که قطر متوسط $1/68$ سانتی‌متر دارند می‌توان انتظار داشت که تخلخل در این ناحیه بیشتر از مقدار محاسبه شده $0/39$ بوده و همچنین به علت ریزش جریان و اختلاط هوا با آب، فشار پیژومتری کاهش شدیدی را نشان می‌دهد که در نتیجه خطای قابل ملاحظه‌ای را سبب می‌شود. در مجموع رابطه ۱۳ به جز 10 درصد انتهایی محیط متخلخل در سایر قسمت‌ها از دقت قابل قبولی در تخمین فشار وارد بر کف برخوردار است.

عبارت اول و دوم روابط ۱۲ و ۱۳ به ترتیب معرف اثر شیب و انحناى سطح آب در مقدار بار آبی فشار می‌باشند. به طوری که ملاحظه می‌شود در عبارت اول پارامتر H' که معرف



شکل ۱۴- تغییرات Γ در طول محیط متخلخل



شکل ۱۵- نیمرخ توزیع فشار عمودی در دو مقطع مختلف برای $Q=10.26 \text{ Lit/s}$ و $L=50 \text{ cm}$

نسبی مقادیر محاسباتی برابر با ۱/۷۱ درصد است.
۴- تأثیر شیب سطح آب (عبارت اول سمت راست رابطه ۱۳) در مقدار بار آبی معادل فشار وارد بر کف در محیط‌های متخلخل سنگریزه‌ای غالب بوده و تأثیر انحنای سطح آب در مجموع قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان این تحقیق از آقایان قربانی و درگاهی، مسئول و تکنسین آزمایشگاه هیدرولیک گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران که در ساخت مدل آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها همراهی داشتند و همچنین از دانشگاه تهران به‌واسطه ارائه امکانات و تجهیزات برای انجام آزمایش‌ها، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

نمادها

a_n شتاب گریز از مرکز در راستای n
 a_r شتاب گریز از مرکز در جهت عمود بر خط جریان
 C_i مقدار محاسباتی
 D_{50} قطر متوسط ذرات سنگریزه
 $D\bar{V}/Dt$ مشتق کل یا مشتق مادی سرعت
 E_i مقدار آزمایشگاهی
 \bar{g} بردار گرانش
 g_n مؤلفه شتاب گرانش در راستای n
 g_z شتاب گرانش در جهت قائم
 $h(x)$ فاصله سطح آب تا محل خروجی سطح آب در انتهای محیط متخلخل
 $H(0)$ عمق جریان در ابتدای محیط متخلخل
 $H(L)$ عمق جریان در انتهای محیط متخلخل
 $H(x)$ عمق جریان در فاصله x از ابتدای محیط متخلخل
 $H'(x)$ مشتق اول عمق جریان
 $H''(x)$ مشتق دوم عمق جریان
 L طول کل محیط متخلخل
 $MARE$ متوسط قدر مطلق خطای نسبی
 n مختصات منحنی الخط عمود بر سطح جریان
 N تعداد داده‌ها
 p فشار
 q دبی در واحد عرض
 R شعاع انحنای خط جریان
 RE درصد خطای نسبی
 $Re_{\Delta H}$ عدد رینولدز

لذا با توجه به تأیید مقادیر بار آبی فشار وارد کف (رابطه ۱۳) بر اساس نتایج آزمایشگاهی، می‌توان از رابطه ۱۲ برای تعیین نیمرخ عمودی توزیع فشار استفاده کرد. برای این منظور در شکل ۱۵، نمودار نیمرخ عمودی توزیع فشار در دو مقطع از آزمایش انجام گرفته برای طول محیط متخلخل ۵۰ سانتی‌متری و برای دبی جریان ۱۰/۲۶ لیتر در ثانیه (شکل ۱۱) محاسبه و ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود مقادیر فشار واقعی کوچکتر از فشار بر اساس شرایط هیدرواستاتیک بوده و به طوری که در شکل ۱۴ بیان شد تأثیر انحنای سطح آب در مقادیر توزیع فشار بسیار ناچیز بوده و در نتیجه توزیع فشار واقعی به صورت خطی با شیب $1/(1+H^2)$ نسبت به عمق جریان تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن به انتهای محیط متخلخل و افزایش شیب سطح آب، میزان انحراف از توزیع فشار هیدرواستاتیک نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با در نظر گرفتن جریان منحنی الخط در محیط متخلخل سنگریزه‌ای و با استفاده از معادله اولر، رابطه توزیع فشار عمودی در شرایط غیر هیدرواستاتیک استخراج شد. رابطه به دست آمده برای بستر افقی و مقطع عرضی مستطیلی به دست آمده و فرض شده است که ضریب تصحیح فشار دینامیک به صورت خطی از بستر تا سطح آب تغییر می‌کند.

همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی پای باکینگهام و تحلیل رگرسیون، رابطه‌ای بی‌بعد برای تغییرات نیمرخ طولی سطح آب در محیط متخلخل سنگریزه‌ای به دست آمد که متوسط قدر مطلق خطای نسبی تخمین نیمرخ طولی سطح آب توسط این رابطه برابر با ۱/۳۱ درصد است.

در نهایت با استفاده از رابطه بی‌بعد نیمرخ سطح آب و رابطه توزیع عمودی فشار، مقدار بار آبی معادل فشار در بستر محاسبه شد و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که:

۱- در یک طول ثابت محیط متخلخل، با افزایش دبی جریان عبوری از محیط، اختلاف بین فشار پیرومتری و عمق آب در هر مقطع بیشتر می‌شود.

۲- در یک دبی ثابت، با کاهش طول محیط متخلخل، اختلاف بین فشار پیرومتری و عمق آب در هر مقطع بیشتر می‌شود.

۳- رابطه ۱۳ برای تخمین بار آبی معادل فشار وارد بر کف به‌جز در ۱۰ درصد انتهایی طول محیط متخلخل به خوبی بر مقادیر آزمایشگاهی منطبق بوده و متوسط قدر مطلق خطای

θ_z زاویه خط جریان مفروض با افق	s مختصات منحنی الخط در راستای سطح جریان
θ_η زاویه سطح آب با افق	u سرعت ظاهری در محیط متخلخل
K انحنای خط جریان	u_v سرعت متوسط واقعی جریان در مقطع عرضی
v لزجت سینماتیک آب	V_v سرعت ذره بر روی خط جریان مفروض
ρ چگالی آب	x مختصات کارتیزین در راستای طولی
φ تخلخل محیط متخلخل	y مختصات کارتیزین در جهت عرضی و عمود بر صفحه
$\omega(z_s)$ ضریب تصحیح فشار دینامیک	z مختصات کارتیزین به صورت عمودی و رو به بالا
Γ نسبت عبارت دوم رابطه ۱۳ به عمق جریان در هر مقطع	Z_b تراز بستر
ΔH اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست محیط متخلخل	Z_s موقعیت عمودی خط جریان مفروض
∇p گرادیان فشار	Z_η تراز سطح آب
	γ وزن مخصوص آب

REFERENCES

- Bazargan, J. and Shoaie, S. M. (2010). Analysis of Non-Darcy Flow in Rock Fill Materials Using Gradually Varied Flow Method. *Civil Engineering Infrastructures Journal (CEIJ)*, 44(2), 131-139. (In Farsi)
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W.H. (2014). One-dimensional modelling of curvilinear free surface flow: generalized Matthew theory. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), pp.14-23.
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W.H. (2013). Velocity profile approximations for two-dimensional potential open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 51(6), pp.645-655.
- Dressler, R.F. (1978). New Nonlinear Shallow-Flow Equations With Curvature. *Journal of Hydraulic Research*, 16(3), pp.205-222.
- Fenton, J. (1996). Channel flow over curved boundaries and a new hydraulic theory. In *Proceedings of 10th Congress, Asia and Pacific*. pp. 26-29.
- Hager, W.H. (1985). Equations For Plane, Moderately Curved Open Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(3), pp.541-546.
- Hager, W.H. and Hutter, K. (1984). Approximate Treatment of Plane Channel Flow. *ACTA MECHANICA*, 51, pp.31-48.
- Hansen, D. 1992. *The behaviour of flow through rockfill dams*, University of Ottawa (Canada).
- Herrera, N.M. and Felton, G.K. (1991). Hydraulics Of Flow Through A Rockfill Dam Using Sediment-Free Water. *Transactions of the ASAE*, 34(3), pp.871-875.
- Hosseini, S.M. (1997). Development of an Unsteady Non-linear Model for Flow Through Coarse Porous Media. The University of Guelph.
- Matthew, G.D., (1991). Higher order, one-dimensional equations of potential flow in open channels. In *Proc Inst Civ Engrs*. pp. 187-201.
- Parkin, A.K. (1963). Rockfill dams with inbuilt spillways. Stability characteristics-Water Research Foundation of Australia-Melbourne.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., Samani, J. (2011). Analysis of the Water Surface Profiles through Coarse Porous Medium. *Iran Water Research Journal (IWRJ)*, 4(7), 81-88. (In Farsi)
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., Hoorfar and A., Hartmann, S. (2014). One-Dimensional Fully Developed Turbulent Flow through Coarse Porous Medium. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7), pp.1491-1496.
- Shokri, M., Saboor, M.R.; Bayat, H. and Sadeghian, J. (2012). Experimental Investigation on Nonlinear Analysis of Unsteady Flow Through Coarse Porous Media. *journal of Water and Wastewater*, 23(4), 106-115. (In Farsi)
- Shokri, M. and Sabour, M. (2014). Experimental study of unsteady turbulent flow coefficients through granular porous media and their contribution to the energy losses. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), pp.706-717.
- Steffler, P.M. and Jin, Y.-C. (1993). Depth averaged and moment equations for moderately shallow free surface flow. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), pp.5-17.
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in hydraulic engineering*. Elsevier science publisher, New York.
- Wilkins, J.K. (1955). Flow of water through rock fill and its application to the design of dams. *New Zealand Engineering*, 10(11), p.382.
- Zerihun, Y.T. (2004). A One-dimensional Boussinesq-type Momentum Model for Steady Rapidly Varied Open Channel Flows. The University of Melbourne.
- Zerihun, Y.T. (2016). Modelling free surface flow with curvilinear streamlines by a non-hydrostatic model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(3), pp.281-288.
- Zerihun, Y.T. and Fenton, J.D. (2006). One-dimensional simulation model for steady transcritical free surface flows at short length transitions. *Advances in Water Resources*, 29(11), pp.1598-1607.