

## تحلیل جریان‌های غیر داریسی در مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی

جلال بازرگان<sup>۱\*</sup> و سید محمد شعاعی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار دانشکده فنی - دانشگاه زنجان

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۸۶/۲/۲۹، تاریخ دریافت اصلاح شده ۸۷/۸/۱۴، تاریخ تصویب ۸۸/۱۲/۱۹)

### چکیده

تحلیل جریان در درون مصالح سنگریزه‌ای اغلب با حل معادله دیفرانسیلی که از ترکیب رابطه غیرخطی  $[i = mV^n]$  و معادله پیوستگی به دست می‌آید، انجام می‌گیرد. حل این معادله دیفرانسیلی به روش تفاضل‌های محدود و متناسب با شرایط مرزی مسائل مورد نظر، به نسبت حجیم و وقت‌گیر است. این محاسبات در شرایطی که نیمرخ سطح آب در درون مصالح سنگریزه‌ای مشخص نباشد، با مشکلات بیشتری رو به رو خواهد بود. برای تحلیل جریان در مصالح سنگریزه‌ای می‌توان از روش دیگری که متکی به تئوری جریان‌های متغیر تدریجی است، استفاده کرد. محاسبات در این روش در مقایسه با روش قبلی بسیار ساده‌تر و کم‌حجم‌تر است. برای استفاده از این روش باید درستی فرضیه‌های مورد استفاده در این روش، بررسی شود. همچنین لازم است عوامل موجود در روش تئوری جریان‌های متغیر تدریجی را با توجه به شرایط فیزیکی محیط‌های متخلخل دانه‌درشت تعریف کرد. در مقاله حاضر، با توجه به انجام آزمایش‌های گسترده روی انواع مختلف مصالح سنگریزه‌ای، ضمن بررسی درستی فرضیه‌های مورد استفاده در تئوری جریان‌های متغیر تدریجی، تأثیر خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل از قبیل دانه‌بندی، تخلخل، ضریب یکنواختی و خاصیت گرانروی سیال، روی ویژگی‌های مختلف جریان مانند سرعت و گرادبان هیدرولیکی، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده به وسیله نگارندگان مقاله، رابطه‌های جدیدی نیز برای به دست آوردن گرادبان هیدرولیکی که در تئوری جریان‌های متغیر تدریجی، مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** محیط‌های متخلخل دانه درشت، مصالح سنگریزه‌ای، جریان غیر داریسی، تئوری جریان‌های متغیر تدریجی، خصوصیات فیزیکی مصالح

### مقدمه

کارآیی خود را از دست داده [۲] و [۳] و تحلیل جریان در این گونه محیط‌ها به طور معمول با حل معادله دیفرانسیلی امکان‌پذیر است که از ترکیب یکی از رابطه‌های غیر خطی مانند رابطه (۲) و معادله پیوستگی به شکل رابطه (۳) به دست می‌آید [۴]:

$$i = m V^n \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \right) \quad (3)$$

که مقادیر  $m$  و  $n$  به خصوصیات فیزیکی مصالح و سیال و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بستگی دارد.

این معادله دیفرانسیلی که به شکل یک معادله دیفرانسیلی جزئی است، جانشین معادله لاپلاس برای تحلیل غیر خطی جریان‌های غیر داریسی می‌شود که شکل عمومی زیر را دارد:

$$(\varphi_{xx} + \varphi_{yy})(\varphi_x^2 + \varphi_y^2) + (N-1)\{(\varphi_x^2)\varphi_{xx} + 2\varphi_x\varphi_y\varphi_{xy} + (\varphi_y^2)\varphi_{yy}\} = 0 \quad (4)$$

در حالت کلی، جریان آب در محیط‌های متخلخل، می‌تواند به دو صورت شکل بگیرد. در محیط‌های متخلخل با مصالح ریزدانه از قبیل خاک رس و سیلت، با توجه به کم بودن سرعت، جریان به طور آرام و لایه‌ای (Laminar) بوده و برای تحلیل این نوع جریان‌ها و به دست آوردن مشخصات آنها از قبیل سرعت، دبی، تراز انرژی و سطح آزاد آب، از رابطه داریسی (Darcy, ۱۸۵۶) که به شکل زیر تعریف می‌شود، استفاده می‌شود [۱]:

$$i = \left( \frac{1}{k} \right) V \quad (1)$$

که در آن:  $v$  سرعت جریان،  $k$ :قابلیت هدایت هیدرولیکی که بستگی به خصوصیات فیزیکی ذرات و مشخصات جریان دارد؛  $i$ : گرادبان هیدرولیکی است.

اما در محیط‌های متخلخل دانه درشت از قبیل شن و قلوه سنگ، سرعت جریان افزایش یافته و جریان به طور آرام نخواهد بود. در این نوع جریان‌ها، رابطه داریسی

### مبانی نظری

همانطور که گفته شد،  $S_f$  شیب خط انرژی بوده که در جریان درون محیط‌های متخلخل به این ترتیب نشان داده می‌شود.

$$S_f = \frac{d(y+z + \frac{V^2}{2gn^2})}{dx} \quad (۶)$$

که در آن  $v$ : عمق جریان،  $z$ : ارتفاع کف لایه متخلخل از خط مبنا،  $v$ : سرعت ظاهری جریان،  $n$ : تخلخل محیط متخلخل و  $g$ : شتاب ثقل است.

آزمایش‌های نگارندگان مقاله و محققان قبلی نشان می‌دهد که اغلب به دلیل کم بودن میزان سرعت جریان در محیط‌های متخلخل، مقدار بلندای سرعت  $\frac{V^2}{2gn^2}$  در مقایسه با جملات دیگر، ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است [۵] [۶] [۷] [۸]. در این حالت، مقدار تغییرات بلندای سرعت نیز قابل چشم‌پوشی بوده و می‌توان شیب خط انرژی را معادل گرادیان هیدرولیکی دانست:

$$i = S_w = S_f \quad (۷)$$

که  $S_w$  شیب تراز سطح جریان است. برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی در مصالح سنگریزی، رابطه‌های مختلفی پیشنهاد شده است که اغلب آنها را به دو صورت زیر می‌توان نشان داد [۹] [۷]:

$$i = aV + bV^2 \quad (۸)$$

$$i = mV^n \quad (۲)$$

که مقادیر  $a$  و  $b$  به خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل و سیال بستگی داشته و  $m$  و  $n$  علاوه بر خصوصیات فیزیکی مصالح و سیال، به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان نیز بستگی دارد.

نکته حائز توجه درباره رابطه (۸) این است که در صورت کم بودن سرعت جریان، جمله دوم این رابطه مقدار خیلی کوچکی بوده و در عمل قابل صرف نظر کردن است و این رابطه به رابطه داری تبدیل می‌شود. همچنین در شرایطی که سرعت جریان خیلی زیاد است، جمله اول رابطه (۸) قابل صرف نظر کردن بوده و این رابطه به شکل یک توان در خواهد آمد.

### مقایسه رابطه دو جمله‌ای و نمایی

در یک مقایسه کلی بین رابطه‌های دو جمله‌ای و

که در آن  $N = \frac{1}{n}$  و  $\phi$  یک تابع اسکالر است که با  $\phi = (\frac{1}{m})h$  بیان می‌شود و در آن،  $h$  ارتفاع پیزومتریک بوده و  $\phi_x$  و  $\phi_y$  نیز مشتقات  $\phi$  در جهت  $x$  و  $y$  را نشان می‌دهد.

این معادله با معلوم بودن شرایط مرزی و مقدار  $n$  قابل حل بوده و با داشتن  $m$  و  $n$ ، مقادیر ارتفاع پیزومتری در نقاط مختلف جریان و گره‌های تعریف شده در محدوده اشباع محیط متخلخل قابل محاسبه است، اما تحلیل جریان با استفاده از این روش و حل عددی معادلات ذکر شده به دلیل ضرورت معرفی شرایط مرزی حاکم از یک سو و تعدد عوامل مؤثر از سوی دیگر وقت‌گیر است. به ویژه دشواری‌های تعریف نیمرخ طولی سطح آب، به عنوان یکی از مرزهای محیط متخلخل اشباع، مشکلات این روش را دو چندان می‌کند [۴]. نمونه‌ای از این جریان‌ها در زهکش‌های سنگی سدهای خاکی، لایه‌های محافظ مرکب از مصالح درشت‌دانه، سدهای سنگریزه‌ای و گابیونی، جریان سیالات (آب، نفت، گاز و ...) در نزدیکی چاه‌های بهره‌برداری، جریان در سازندهای سخت و درشت و غیره رخ می‌دهد که در کارهای مهندسی، جایگاهی ویژه دارند. اما به تازگی برای تحلیل جریان‌های غیر داری، روشی که متکی به نظریه جریان‌های متغیر تدریجی است، مطرح شده است [۵] [۶] که در صورت تأیید درستی فرضیه‌های مورد قبول در این نظریه در محیط‌های سنگریزی، می‌تواند به سهولت در تحلیل جریان در این محیط‌ها مورد استفاده قرار گیرد. رابطه مورد استفاده در جریان‌های متغیر تدریجی به این ترتیب است:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{\cos^2 \theta - Fr_p^2} \quad (۵)$$

که در آن  $S_0$ : شیب کف کانال،  $S_f$ : شیب خط انرژی،  $Fr_p$ : عدد فرود منفذی که برابر با  $\frac{V}{n\sqrt{gy}}$  است. (در این معادله  $V$  سرعت ظاهری جریان،  $y$  عمق آب و  $n$  تخلخل مصالح سنگریزه‌ای است) و  $\theta$ : زاویه شیب خطوط جریان است.

برای استفاده از این رابطه در تحلیل جریان‌های غیر داری، لازم است که مقدار شیب خط انرژی  $S_f$  با توجه به خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل و خصوصیات جریان به دست آید.

$$b = \frac{1}{g\sqrt{ck}} \quad (10)$$

$$k = cd^2 \quad (11)$$

که در آن:

$\mu$ : گرانروی دینامیکی سیال

$\rho$ : جرم مخصوص سیال

$g$ : شتاب ثقل

$k$ : نفوذپذیری ذاتی مصالح

$c$ : ثابت بی بعد مصالح

$d$ : پارامتر مشخصه طول که بیانگر قطر مؤثر خلل و فرج محیط متخلخل است. با استفاده از این رابطه‌ها، اگر بتوان مقادیر  $c$  و  $d$  را به خصوصیات فیزیکی مصالح از قبیل دانه‌بندی، تخلخل، ضریب یکنواختی و غیره ارتباط داد، می‌توان در هر محیط متخلخل، با استفاده از رابطه (۸) مقدار گرادیان هیدرولیکی را با معلوم بودن سرعت، با دقت قابل قبولی به دست آورد و از این رابطه در نظریه جریان‌های متغیر تدریجی استفاده کرد.

### مشاهده‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر با توجه به نتایج آزمایش‌های متعددی که روی ۸ نمونه مختلف انجام شده است، با استفاده از تحلیل‌های آماری، رابطه‌های جدیدی برای برآورد مقادیر ضرایب نفوذپذیری  $a$  و  $b$  رابطه (۸) توسعه داده شده است. نمونه‌های مورد استفاده با دو شکل گردگوشه<sup>۱</sup> و کاملاً شکسته<sup>۲</sup> بوده‌اند که به ترتیب با نام‌های  $S_{iR}$  و  $S_{iC}$  مشخص شده‌اند که  $i$  برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ است.

نمایی، وجوه تمایز دو رابطه به این شرح مشخص می‌شود:  
- تک جمله‌ای بودن رابطه (۲) سبب می‌شود که این رابطه فقط در دامنه محدودی از تغییرات اعداد رینولدز (یا سرعت) قابل استفاده باشد.

- رابطه دوجمله‌ای با استفاده از مطالعات ابعادی و هم با استفاده از معادله ناویر استوکس و همچنین با نتایج آزمایش‌های تعداد بسیار زیادی از محققان قابل تطابق است [۱۰] [۱۱].

- تفکیک اثرات خصوصیات جریان و ویژگی‌های مصالح متخلخل و حتی خواص سیال در رابطه دوجمله‌ای امکان‌پذیر است. در حالی که در رابطه نمایی چنین نیست [۲].

- رابطه دوجمله‌ای به شکل رابطه داری و یسباخ و با استفاده از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک جریان قابل تعریف است، در حالی که رابطه نمایی چنین نیست [۷] [۹]. بنابراین در تحقیق حاضر با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، رابطه دوجمله‌ای (۸) دارای دقت و بنابراین کارایی بیشتری دانسته شده و برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی از این رابطه استفاده شده است.

### یافتن ضرایب رابطه دو جمله‌ای

وارد (Ward, ۱۹۶۴) [۱۰] با استفاده از آنالیز ابعادی و احمد و سونادا (Ahmed&Sunada, ۱۹۶۹) [۱۱] با استفاده از معادله ناویر استوکس، رابطه‌های زیر را برای یافتن ضرایب  $a$  و  $b$  رابطه (۸) به دست آوردند:

$$a = \frac{\mu}{\rho g k} \quad (9)$$

جدول ۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش.

Media type and code		n	$C_u$	$C_c$	$d_0$	$d_{50}$	$d_{100}$
coding	shape	[-]	[-]	[-]	mm	mm	mm
$S_{1R}$	R	0.37	1.6	0.87	3.35	7	12.7
$S_{2R}$	R	0.4	2	0.81	3.35	9	25.4
$S_{3R}$	R	0.36	2	0.85	6.35	17	50.8
$S_{4R}$	R	0.40	1.6	0.99	12.7	26	50.8
$S_{1c}$	C	0.43	1.6	0.9	3.35	7	12.7
$S_{2c}$	C	0.42	2	0.89	3.35	9	25.4
$S_{3c}$	C	0.45	2	0.77	6.35	17	50.8
$S_{4c}$	C	0.5	1.6	0.99	12.7	26	50.8

R:Rounded

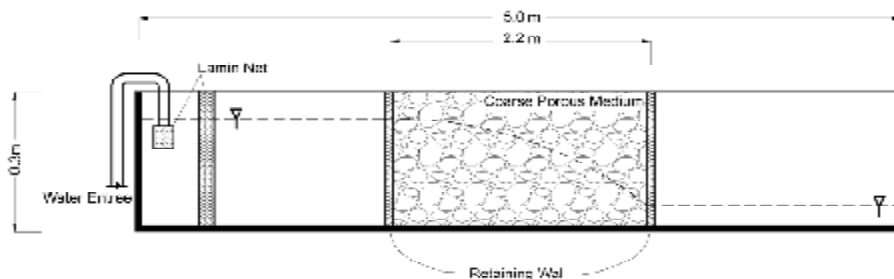
C:Crashed



شکل ۲: نمونه مصالح گردگوشه رودخانه‌ای  
مورد استفاده در نمونه‌ها.



شکل ۱: نمونه مصالح شکسته گوشه‌دار  
مورد استفاده در نمونه‌ها.



شکل ۳: شکل شماتیک دستگاه آزمایش



شکل ۵: تصویری از آزمایش روی نمونه  
 $S_{4c}$  با دبی متوسط.



شکل ۴: تصویری از آزمایش روی نمونه  
 $S_{1R}$  با بیشترین دبی ممکن.

مختلف انجام شده و در هر آزمایش علاوه بر ثبت دبی و دمای آب، مقادیر بلندای پیژومتریک و ارتفاع آب در فاصله‌های مختلف، ثبت شده‌اند. در ادامه مقادیر گرادیان هیدرولیکی  $i$  و سرعت ظاهری  $V$  در مقاطع مختلف، محاسبه شده و سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری، مقادیر  $a$  و  $b$  رابطه دوجمله‌ای به دست آمده‌اند. با توجه به رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، مقادیر ضرایب نفوذپذیری  $c$  و  $d$  محاسبه شده‌اند. نتایج محاسبات آماری در جدول (۲) مشخص شده است.

با استفاده از نتایج نشان داده شده در جدول (۲) و استفاده از تکنیک‌های آماری، رابطه‌های بی‌بعد زیر برای برآورد مقادیر  $c$  و  $d$  به دست آمده است.

مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش شامل تخلخل ( $n$ )، ضریب یکنواختی ( $C_u$ )، ضریب دانه‌بندی ( $C_c$ ) و برخی از شاخص‌های قطر مصالح به صورت جدول (۱) ارائه شده و در شکل‌های (۱) و (۲)، نوع مصالح مورد استفاده در نمونه‌ها نشان داده شده است.

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به ابعاد مقطع  $30 \times 30$  سانتی‌متر که  $2/2$  متر طول این فلوم با مصالح پر شده‌اند، انجام شده است. شکل (۳) به صورت شماتیک فلوم یادشده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های (۴) و (۵) بعضی از نمونه‌های تحت آزمایش نشان داده شده است.

برای هر نمونه، تعداد متعددی آزمایش با دبی‌های

$D_i$ : قطر الکی که  $i$  درصد مصالح از آن قطر، کوچکترند. به عنوان مثال،  $D_{10}$  اندازه الکی فرضی است که ۱۰ درصد مصالح از آن کوچکترند.

$n$ : تخلخل مصالح

$$C_u: \text{ضریب یکنواختی (برابر با } \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{)}$$

$$C_c: \text{ضریب دانه بندی (برابر با } \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \text{)}$$

جدول (۳) و (۴) خلاصه نتایج به دست آمده از تحلیل های آماری را نشان می دهد.

$$c = e^{(A \times P_{cc})} \quad (12)$$

$$\frac{d_0}{d} = e^{(B \times P_{cd})} \quad (13)$$

که در این رابطه های بی بعد، ضرایب  $A$  و  $B$  به شکل سنگدانه ها و زبری سطحی آنها بستگی داشته و تابع های  $P_{cc}$  و  $P_{cd}$  به این ترتیب، به دست آمده است:

$$P_{cc} = (n + C_u + C_c + \frac{D_{100}}{D_{50}})^{0.5} \quad (14)$$

$$P_{cd} = (n + C_u + C_c + \frac{D_{50}}{D_0})^{0.5} \quad (15)$$

که در آن:

جدول ۲: عوامل نفوذپذیری به دست آمده از تحلیل های آماری.

Media code	$\mu \times 10^3$	a	b	$k \times 10^6$	c	$d \times 10^3$
	N.S/m <sup>2</sup>	L <sup>-1</sup> T	L <sup>-2</sup> T <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	[-]	m
S <sub>1R</sub>	1.002	5.885	134.86	0.017	32.93	0.02
S <sub>2R</sub>	1.017	5.602	195.85	0.019	14.643	0.03
S <sub>3R</sub>	1.002	0.914	200.47	0.112	2.315	0.22
S <sub>4R</sub>	0.995	0.477	109.71	0.213	4.06	0.22
S <sub>1c</sub>	1.022	3.333	191.45	0.031	9.074	0.05
S <sub>2c</sub>	1.004	4.620	121.35	0.022	31.867	0.02
S <sub>3c</sub>	1.004	1.733	89.36	0.059	22.049	0.05
S <sub>4c</sub>	0.99	0.77	81.571	0.131	11.920	0.10

جدول ۳: خلاصه نتایج تحلیل آماری برای برقراری رابطه بین  $c$  و خصوصیات فیزیکی سنگ دانه ها.

Shape of materials	Suggested equation for obtaining c	A	Signif F Coefficient	Correlation coefficient of R
Rounded	$e^{(A \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{100}}{D_{50}})^{0.5})}$	0.886	0.049	0.880
Crashed	$e^{(A \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{100}}{D_{50}})^{0.5})}$	1.204	0.000	0.993
Mixture	$e^{(A \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{100}}{D_{50}})^{0.5})}$	1.046	0.000	0.938

جدول ۴: خلاصه نتایج تحلیل آماری برای برقراری رابطه بین  $\frac{D_0}{d}$  و خصوصیات فیزیکی سنگ دانه ها.

Shape of materials	Suggested equation for obtaining $D_0/d$	B	Signif F Coefficient	Correlation coefficient of R
Rounded	$e^{(B \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{50}}{D_0})^{0.5})}$	1.806	0.002	0.986
Crashed	$e^{(B \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{50}}{D_0})^{0.5})}$	1.972	0.000	0.999
Mixture	$e^{(B \times (n + C_u + C_c + \frac{D_{50}}{D_0})^{0.5})}$	1.89	0.000	0.992

مصالح می‌توان جریان در محیط متخلخل دانه درشت را تحلیل کرد.

برای رسم پروفیل طولی، روش‌های مختلفی وجود دارد که به دو روش اشاره می‌شود:

#### الف - روش (Prasad, 1970) [۵]

این روش عبارت است از انتگرال‌گیری عددی از معادله دینامیکی یک بعدی (شبه معادله (۱۹)) در مقاطع عرضی پی در پی که از یک تراز آب مشخص شروع می‌شود. این کار نیازمند ارزیابی تابع  $\frac{dy}{dx} f(x,y)$  در معادله (۱۹) در تعدادی از نقاط مجزای  $x_j$  برای به دست آوردن جواب  $y_j$  در این نقاط است که در آن  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  (تعداد کل مقاطع عرضی) است.

از جمله آسان‌ترین روش‌های انتگرال‌گیری عددی آن است که از معلوم بودن جواب در یک مقطع عرضی برای یافتن جواب در مقطع بعدی استفاده شود. محاسبات تا جایی ادامه می‌یابد که شرایط مرزی مناسب به صورت  $y = y_0$  در  $x = x_0$  برآورده شود.

با استفاده از روش بالا، برای معادله (۱۹) می‌توان نوشت:

$$y_{j+1} = y_j + \int_{x_j}^{x_{j+1}} f(x,y) dx \quad (20)$$

$y_j$ : عمق جریان در مقطع  $j$  (L)

$y_{j+1}$ : عمق جریان در مقطع  $j+1$  (L)

یک نتیجه ساده که از معادله (۲۰) با فرض تغییر خطی  $f(x,y)$  در هر فاصله نتیجه می‌شود، به این ترتیب است:

$$y_{j+1} = y_j + \frac{\Delta x_j}{2} \left\{ \left( \frac{dy}{dx} \right)_j + \left( \frac{dy}{dx} \right)_{j+1} \right\} \quad (21)$$

$\Delta x_j$ : فاصله بین مقاطع  $j$  و  $j+1$  (L)

با استفاده از معادلات (۱۹) و (۲۱) برای یک زوج مجاور از مقاطع عرضی که با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، این رابطه به دست می‌آید:

$$y_2 = y_1 + \frac{\Delta x}{2} \left\{ \left( \frac{S_0(x) - S_f(x,y)}{1 - F_p^2(y)} \right)_1 + \left( \frac{S_0(x) - S_f(x,y)}{1 - F_p^2(y)} \right)_2 \right\} \quad (22)$$

با جایگذاری جمله شیب اصطکاک  $S_f$  با مقدار  $i$  از معادله (۱۸) و حل معادله (۲۲)، عمق مجهول آب در مقطع ۲ به دست می‌آید. با توجه به وابسته بودن سرعت

ستون اول این جداول بیانگر شکل مصالح محیط متخلخل است که شامل مصالح گردگوشه، کاملاً شکسته و مخلوط گردگوشه و شکسته<sup>۳</sup> هستند که رابطه توسعه داده شده برای استفاده در محیط‌های متخلخل با مصالح مخلوط از برآزش رابطه دو جمله‌ای روی مجموع داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی مصالح گردگوشه و شکسته به دست آمده است. نکته شایان توجه اینکه برای تشخیص معنی‌داری رابطه‌های به دست آمده، مقادیر ضریب Signif F نشان داده شده در ستون پنجم جداول بالا است. این ضریب در حقیقت، شاخص P value است که نشان‌دهنده معنی‌داری وجود هر یک از ضرایب A و B به دست آمده از برآزش است و اگر این ضریب دارای مقدار کمتر از ۰/۰۵ باشند، معنی‌داری ضرایب به دست آمده قابل قبول خواهد بود و می‌توان با اطمینان ۹۵ درصد به داده‌های به دست آمده اعتماد کرد. در غیر این صورت نمی‌توان به داده‌ها اطمینان کرد.

#### کاربرد رابطه‌های توسعه داده شده در تحلیل جریان‌های غیر داری با استفاده از نظریه جریان‌های متغیر تدریجی

با توجه به رابطه‌های توسعه داده شده که در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است، می‌توان مقادیر  $a$  و  $b$  رابطه دوجمله‌ای را به این ترتیب، به دست آورد:

$$a = \frac{\mu}{\rho g (d_0^2 e^{(A.P_{cc} - 2B.P_{cd})})} \quad (16)$$

$$b = \frac{1}{g d_0 e^{(A.P_{cc} - B.P_{cd})}} \quad (17)$$

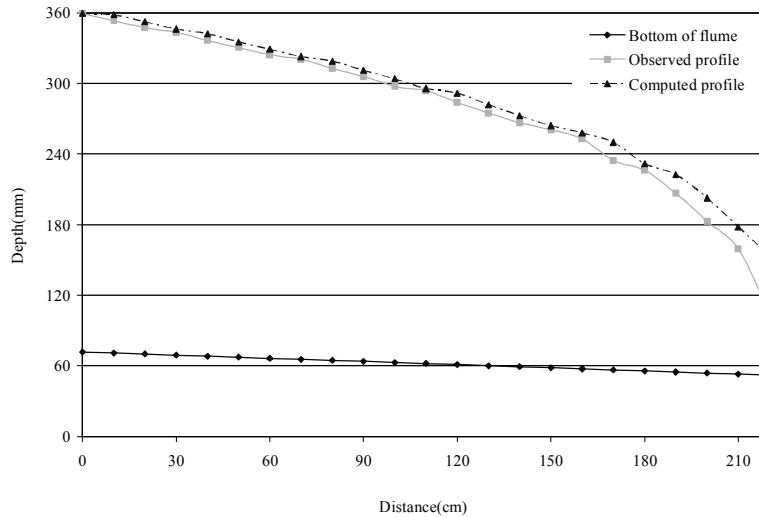
در نتیجه، رابطه دوجمله‌ای (۸) به شکل زیر در می‌آید:

$$i = \frac{\mu}{\rho g (d_0^2 e^{(A.P_{cc} - 2B.P_{cd})})} V + \frac{1}{g d_0 e^{(A.P_{cc} - B.P_{cd})}} V^2 \quad (18)$$

در نهایت، با توجه به رابطه‌های (۵)، (۷) و (۱۸) می‌توان نوشت:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - i}{\cos^2 \theta - F_{rp}^2} \quad (19)$$

از این رابطه می‌توان به راحتی در تحلیل جریان‌های غیر داری درون محیط‌های متخلخل استفاده کرد. به عبارتی، فقط با داشتن منحنی دانه‌بندی، تخلخل و شکل



شکل ۶: نمودار پروفیل‌های محاسباتی و مشاهداتی در نمونه  $S_{4C}$  و برای دبی  $Q=1/9$  لیتر بر ثانیه.

در شکل (۶) به عنوان مثال، نمودار پروفیل‌های محاسباتی و مشاهداتی برای یک دبی و نمونه شکسته خاص، نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۶) مشخص است، همخوانی بین پروفیل‌های محاسباتی و مشاهداتی در همه مسیر به غیر از انتهای آن، مناسب است. دلیل همخوان نبودن پروفیل‌ها در انتهای مسیر به دلیل معنی‌داری مقدار  $\cos^2 \theta$  در رابطه (۱۹) آن هم به دلیل معنی‌دار بودن شیب خطوط جریان است.

### حدود اعتبار فرضیه‌های مورد استفاده در کاربرد تئوری جریان‌های متغیر تدریجی در تحلیل جریان‌های غیر آرام در مصالح سنگریزی

در استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی در تحلیل جریان‌های غیر داریسی در مصالح سنگریزه‌ای، دو فرض اساسی انجام گرفته است که در ذیل به بررسی درستی این فرضیه‌ها پرداخته می‌شود:

### معادل بودن شیب خط انرژی با گرادیان هیدرولیکی

همان‌طور که گفته شد، استفاده از نظریه جریان‌های متغیر تدریجی در تحلیل جریان‌های غیر داریسی، منوط به قبول کردن فرضیه‌های مورد استفاده در این نظریه است. یکی از این فرضیه‌ها، برقراری رابطه (۷)

$V_2$  و عدد فرود منفذی  $F_{p2}$  در طرف راست معادلات بالا به  $y_2$  راه حل صریحی برای معادلات بالا وجود ندارد و باید از تکنیک سعی و خطا استفاده کرد.

### ب- روش گام به گام استاندارد

#### [۵] (Standard Step Method, SSM)

این روش با حل همزمان یک سری معادله بر پایه بلندای کلی و شیب اصطکاک بین یک زوج از مقاطع مجاور انجام می‌شود. با محاسبه اندازه شیب اصطکاک حاکم بر محدوده با میانگین‌گیری حسابی شیب‌های اصطکاک در مقطع، جایگذاری  $S_f$  با  $i$  و محاسبه  $i$  با معادله (۱۸)، معادلات زیر برای دو مقطع در محدوده مورد نظر به دست می‌آیند:

$$H_1 = Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (23)$$

$$H_2 = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (24)$$

$$H_2 = H_1 + \frac{\Delta x}{2} \{i_1 + i_2\} \quad (25)$$

$H_1$  و  $H_2$ : کل بلندا برای مقاطع ۱ و ۲

$Z_1$  و  $Z_2$ : تراز ارتفاعی از مبنا برای مقاطع ۱ و ۲

$V_1$  و  $V_2$ : سرعت در مقاطع ۱ و ۲

حل همزمان معادلات (۲۳) و (۲۴) با معادله (۲۵)

منجر به، به دست آمدن عمق مجهول آب در مقطع ۲ می‌شود. در اینجا نیز تکنیک سعی و خطا برای یافتن مجهولات باید به کار رود.

حالت، متوسط این دو شیب را می‌توان وارد تحلیل‌ها کرد. این متوسط‌گیری در نواحی با انحنای کم (مانند نواحی ابتدایی جریان در محیط‌های متخلخل مورد آزمایش در پژوهش حاضر) دارای دقت بسیار خوبی خواهد بود، ولی در نواحی با انحنای زیاد (مانند نواحی انتهایی جریان در محیط‌های متخلخل مورد آزمایش در پژوهش حاضر) دارای مقداری خطا خواهد بود و هر چه انحنای بیشتر باشد، خطا بیشتر است.

### نتیجه‌گیری

الف- نظر به اینکه استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی در تحلیل جریان‌های غیر داریسی مزایایی از قبیل سادگی استفاده از رابطه ذکر شده و قابلیت در نظر گرفتن اهم عوامل مؤثر در جریان را دارد، بنابراین با بهره‌گیری از مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل یافته‌های آن به شرحی که گذشت، این امکان فراهم آمده است تا با احراز شرایط ذکر شده در بخش (۵) مقاله حاضر، تحلیل‌های غیرخطی را در موارد مشابه و با به کارگیری نظریه جریان‌های متغیر تدریجی، بدون توسل به آزمایش‌های دشوار و پرهزینه انجام داد.

ب- یافته‌های تحقیقات انجام شده توسط نگارندگان مقاله حاضر، حاکی از آن است که می‌توان عوامل نفوذپذیری هر محیط متخلخل درشت دانه‌ای را بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیکی مصالح تشکیل‌دهنده آن محیط‌ها، تعیین کرد.

ج- رابطه‌های کاربردی که در جدول‌های (۳) و (۴) این مقاله ارائه شده است، می‌تواند پاسخگوی نیازهای مهندسی برای تحلیل‌های غیر خطی باشد.

د- رابطه‌های به دست آمده در این پژوهش که در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده‌اند، اگر چه به وسیله روش سعی و خطا به دست آمده است، ولی با توجه به نتایج تحلیل‌های آماری از قبیل ضرایب همبستگی R و معنی‌داری Signif F در نوع خود دقت خوبی دارند. مزیت دیگر این رابطه‌ها عبارت از کم بودن متغیرهای مورد نیاز برای به دست آوردن پاسخ است. متغیرهایی که در این رابطه‌ها استفاده شده‌اند، علاوه بر اینکه بیانگر خوبی از خصوصیات فیزیکی مصالح از قبیل دانه‌بندی و تخلخل است، به راحتی قابل دسترسی بوده و اغلب در هر مصالحی با چند نمونه‌برداری و آزمایش ساده به دست

است که نشان‌دهنده برابری گرادیان هیدرولیکی با شیب خط انرژی است. نتایج بررسی‌های انجام شده توسط نگارندگان مقاله حاضر [۱۱] نشان می‌دهد که مقدار جمله  $\frac{V^2}{2gn^2}$  در رابطه (۶) در اغلب موارد ناچیز بوده و بنابراین در موارد مشابه، از بلندای نظیر سرعت در مقابل بلندای پیژومتریک می‌توان صرف‌نظر کرد، ولی با افزایش ابعاد حفره‌های محیط متخلخل، میزان بلندای نظیر سرعت جریان می‌تواند قابل توجه باشد. در چنین مواردی امکان معنی‌دار بودن تغییرات بلندای سرعت نسبت به گرادیان هیدرولیکی وجود خواهد داشت. بنابراین در این شرایط از تغییرات بلندای نظیر سرعت در مقابل تغییرات بلندای پیژومتریک نمی‌توان به راحتی صرف‌نظر کرد و رابطه (۷) در چنین شرایطی اعتبار ندارد.

### هیدرواستاتیک بودن توزیع فشار

آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در جریان‌های غیرداریسی درون محیط‌های متخلخل، مقدار بلندای فشار  $\frac{p}{\gamma}$  با عمق متناظر  $y$  در مقاطع مختلف، برابر نیست که دلیل آن با توجه به کنترل عوامل مختلف تأثیر گذار روی این نابرابری، معنی‌دار بودن مقدار  $\cos^2 \theta$  در رابطه (۵) به دلیل معنی‌دار بودن شیب خطوط جریان است. لازم به ذکر است که بر خلاف جریان‌های یکنواخت، در جریان‌های متغیر تدریجی، خطوط جریان باهم موازی نبوده و موازی کف مجرا نیز نیست. بنابراین در این جریان‌ها، مقادیر  $\theta$  برای خطوط جریان مختلف، باهم متفاوت است و در هر عمق باید از  $\theta$  همان عمق، برای استفاده در رابطه (۵) استفاده کرد. بنابراین با توجه به نابرابری شیب خطوط جریان در هر مقطع می‌توان با پذیرش مقداری خطا از یک سو و کاستن از فاصله بین دو ایستگاه محاسباتی متوالی از سوی دیگر مقدار میانگین شیب خطوط جریان را در نظر گرفت. لازم به ذکر است که به کارگیری  $\theta$  در روند محاسبات جریان با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی، به روش سعی و خطا خواهد بود. به این ترتیب که با فرض  $y$  جدید، شیب سطح آب به عنوان یکی از خطوط جریان به دست می‌آید. شیب کف کانال یا لایه نفوذناپذیر به عنوان یکی دیگر از خطوط جریان نیز معلوم است. در ساده‌ترین



مصالح از آن قطر، کوچکترند. ولی رابطه (۹) که به صورت

$$a = \frac{\mu}{\rho g k}$$

نشان می‌دهد که ضریب  $a$  رابطه فرش هایمر علاوه بر خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل، به گرانروی سینماتیک جریان نیز وابسته است.

می‌آید.

ه- رابطه‌های به دست آمده در تحقیق حاضر، نشان می‌دهد که ضرایب  $a$  و  $b$  رابطه دوجمله‌ای فرش هایمر به شاخص‌های تخلخل، ضریب یکنواختی، ضریب دانه‌بندی و نسبت قطرهای  $\frac{D_{100}}{D_{50}}$  و  $\frac{D_{50}}{D_0}$  محیط متخلخل بستگی دارند، که  $D_i$  عبارت از قطری از الک است که  $i$  درصد

## مراجع

- 1 - McWhorter, D. B. and Sunada, D. K. (1977). "Groundwater Hydrology and hydraulics." *Water Resources Publication*, Fort Collins, Colorado, USA, PP.65-73.
- 2 - Bazargan, J. and Byatt, H. (2002). "A new method to supply water from the sea through rockfill intakes." *5th international conference on coasts, ports and marine structures (ICOPMAS)*, October 14-17, Ramsar, Iran, Book of Extended Abstracts, PP.276-279.
- 3 - Hansen, D. and Garga, V. K. and Townsend, D. R. (1995). "Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two dimensional flow through rockfill embankment." *Can. - Geotech. J.*, Vol.33, PP.223-232.
- 4 - Bazargan, J. and Byatt, H. (2003). "Determination of roughness coefficient of rockfill materials using of resolution method." *6th international conference on civil engineering (ICCE 2003)*, May 5-7, Isfahan university of technology (IUT), Iran, Proceedings of conference, Vol. 3, PP.215-222.
- 5 - Bari, R. and Hansen, D. (2002). "Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams." *IAHR J. of Hydraulic Research*, Vol 40, No 6, PP.673-683.
- 6 - Bazargan, J. and Shoaei, S. M. (2006). Discussion, "Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams." *IAHR J. of Hydraulic Research*, Vol 44, No 1, PP.138-141.
- 7 - Stephenson, D. (1969). *Rockfill in hydraulic engineering*, Elsevier scientific, Amsterdam, Nether Lands.
- 8 - Bazargan, J. and Shoaei, S. M. (2007). "Investigation of velocity head efficacy in analyzing of Non-Darcy flow in rockfill materials." *6th Iranian conference of hydraulics*, October 23-25, Shahrekord, Iran
- 9 - Leps, T. M. (1973). *Flow through rockfill-embankment dam engineering*, Casagrande volume, edited by Hirschfield, R.C. and Paulo's, S.J., John Wiley and Sonse, New York, PP.87-107.
- 10 - Ward, J. C. (1964). "Turbulent flow in porous media", *J. Hydra. Div. ASCE*, Vol. 95, No. 6, PP.1-11.
- 11 - Ahmed, N. and Sunada, D. K. (1969). "Nonlinear flow in porous media." *J. Hydra. Divi. ASCE*, Vol. 95, No. 6, PP.1847-1857.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Rounded
- 2 - Crashed
- 3 - Mixture