

بررسی مفهوم سطح ویژه‌ی سنگ‌دانه‌ها در تحلیل غیرخطی جریان در محیط‌های متخلخل دانه‌ی

زهرا اشکو (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سمیه کاظمی یکتا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

احمدطاهر شمسی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

با وجود در دسترس بودن رابطه‌های ریاضی گوناگون برای تحلیل غیرخطی جریان در محیط‌های متخلخل دانه‌ی، استفاده از آن‌ها در کارهای مهندسی متعارف با دشواری‌هایی روبروست. یکی از اصلی‌ترین نکات مبهم در این زمینه، چگونگی تعیین شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط متخلخل بر پایه‌ی برآورد سطح ویژه‌ی آن است. این نوشتار با ارزیابی پایه‌های تئوریک موضوع به منظور کاربردی نمودن رابطه‌ی کوزینی - کارسن رویکرد پژوهشگران را در این زمینه مورد مطالعه و بررسی قرار داده است. و پس از مقایسه‌ی برخی از رابطه‌های در دسترس برای تعیین سطح ویژه و شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه، کاربردی‌ترین روش مهندسی برای برآورد این پارامترها را نشان می‌دهد.

Z_eshkou@aut.ac.ir
Syekta@aut.ac.ir
tshamsi@aut.ac.ir

واژگان کلیدی: سطح ویژه، شعاع هیدرولیکی، محیط متخلخل، تحلیل غیرخطی.

مقدمه

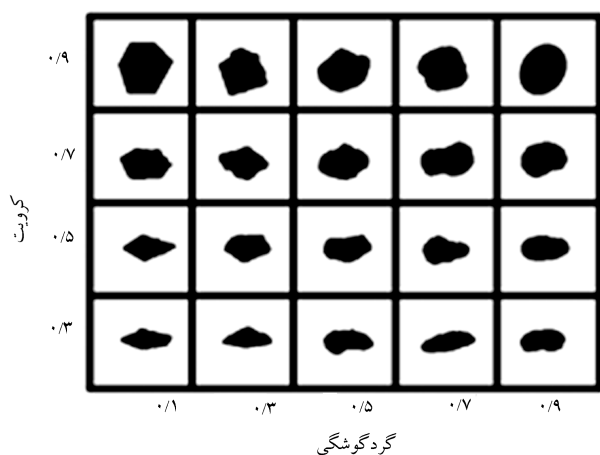
متوسط محیط متخلخل، تعریف شکل استاندارد و تعیین میزان انحراف شکل ذرات از شکل استاندارد مطرح می‌شود. که همه از موارد ویژه‌ی است که در این نوشتار به آن پرداخته شده است.

پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که جریان عبوری از درون محیط‌های متخلخل درشت دانه آشفته هستند و در این مورد نمی‌توان از رابطه داریسی استفاده کرد. در این شرایط رابطه بین سرعت و شیب هیدرولیکی خطی نیست و اصطلاحاً به جریان‌های غیر داریسی معروف‌اند. نمونه این نوع جریان در سدهای توری - سنگی رخ می‌دهد که در کارهای مهندسی عمران جایگاه ویژه‌ی دارد. رابطه‌ی غیر خطی ارائه شده در مورد جریان‌های غیرداریسی به صورت نمایی و دوجمله‌ی فورس - هایمر است. اصولاً برای تخمین ضرایب ثابت مربوط به دوجمله‌ی فورس - هایمر نیاز است که خصوصیات فیزیکی مصالح محیط متخلخل از قبیل اندازه بارز، تخلخل، شکل ذرات، خصوصیات منحنی دانه‌بندی و زبری سطح دانه‌ها به روش آزمایشگاهی تعیین شوند. تلفیق مدل کوزینی - کارسن با دوجمله‌ی فورس - هایمر مبین شرایط جریان‌های غیرخطی در محیط متخلخل است. مدل کوزینی - کارسن علاوه بر پارامترهای فوق‌الذکر شامل پارامتر دیگری به نام سطح ویژه است. لذا تعیین سطح ویژه ذرات در آزمایشگاه یکی از قدم‌های اصلی در کاربرد دوجمله‌ی فورس - هایمر براساس مدل کوزینی - کارسن است. در بخش‌های بعدی این نوشتار رویکرد محققین مختلف برای تعیین این پارامتر مورد بررسی و ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. در این راستا ضرورتاً تعاریف بنیادین دیگری از قبیل شعاع هیدرولیکی

مفهوم شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه و روش‌های برآورد آن

محیط‌های متخلخل - چه از نوع دانه‌ی و چه از گونه‌ی سازنده‌های سخت - از دیدگاه جریان سیال در آن‌ها نقشی همچون دسته‌ی از لوله‌های موئین در کنار هم دارند. اگرچه این لوله‌های موئین هندسه‌ی منظمی ندارند و به سادگی قابل مدل‌کردن با مفاهیم ریاضی نیستند، لیکن رفتار هیدرولیکی آن‌ها بسیار شبیه به لوله‌های موئین ساخته‌ی دست بشر است. این همانندی رفتاری از یک سو و پیچیدگی مدل‌سازی ریاضی برای تحلیل جریان در محیط‌های متخلخل از سوی دیگر، انگیزه‌ی قوی برای فراگیر تعمیم قوانین هیدرولیکی حاکم بر جریان در لوله‌های موئین به جریان در محیط‌های متخلخل بوده است.

تحقیقات انجام‌شده در مورد مدل‌های هیدرولیکی ساخته‌شده از لوله‌های موئین، بیان‌گر اهمیت یک پارامتر طول بارز برای فرمولاسیون جریان در این لوله‌هاست که



شکل ۱. اشکال تفکیک شده‌ی سنگ‌دانه‌ها و تعیین زبری آن به صورت کیفی [۷].

در رابطه‌ی ۴، محاسبه‌ی AVS و همچنین m فقط برای انواعی از سنگ‌دانه‌ها که شکل نسبتاً منظم هندسی داشته باشند، امکان‌پذیر است. درحالی‌که سنگ‌دانه‌های واقعی در طبیعت دارای شکل‌های نامنظم غیرهندسی هستند و از این رو استفاده از رابطه‌ی ۴ را عملاً ناممکن می‌کنند.

برای فائق آمدن بر مشکل یادشده، پژوهش‌هایی بنیادین بر پایه‌ی اندازه‌گیری سطح سنگ‌دانه‌های نامنظم به دست آمده از معادن سنگ با کمک پودر نیکل انجام شده است. [۶] روش آندودکردن در سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر به علت بزرگ‌بودن سطح اندکی متفاوت بوده است، لذا در این اندازه‌گیری‌ها ابتدا سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط‌های متخلخل اشباع را به دو گروه بزرگ‌تر و کوچک‌تر از $160 \mu m$ تفکیک و پس از آغشته‌کردن سطح هر یک از سنگ‌دانه‌ها با روغن جلا و با پاشیدن پودر نیکل، آن‌ها را آندود کرده‌اند. با اندازه‌گیری دقیق تغییر وزن هر سنگ‌دانه در عملیات آندود با پودر نیکل، و به علت داشتن وزن واحد نیکل، توانسته‌اند سطح سنگ‌دانه‌ها را اندازه‌گیری کنند. یافته‌های ایشان برای گستره‌ی آزمایش شده از سنگ‌دانه‌هایی از جنس سنگ آهکی شکسته را می‌توان در قالب رابطه‌های ۵-۷ بازنویسی کرد.

از دیدگاه رفتار هیدرولیکی، رابطه‌ی بین حجم یک سنگ‌دانه با فرض داشتن شکل تخم‌مرغی و با سه قطر متعام a, b, c که ممکن است آن‌را با V_e نشان داد، با حجم واقعی سنگ‌دانه‌ی که شکل نامنظم دارد و ممکن است آن‌را با V نشان داد، به دست آمده از برازش رگرسیون خطی بین داده‌ها با ضریب همبستگی $R^2 = 0.90$ برای محیط متخلخل تک اندازه عبارتست از:

$$V_e = 1.214V - 0.586 \quad (5)$$

که در صورت پذیرش فرض شکل تخم‌مرغی برای سنگ‌دانه‌ها، می‌توان از رابطه‌ی ریاضی $V_e = \pi(a \cdot b \cdot c) / 6$ و با اندازه‌گیری سه قطر متعام، مستقیماً حجم آن‌را محاسبه کرد.

رابطه‌ی بین سطح بارز سنگ‌دانه‌های کروی شکل فرض شده (S_A) در شرایطی که به منزله‌ی جزئی از توده‌ی محیط متخلخل سنگ‌ریزی باشد به حجم آن، برای سنگ‌دانه تک اندازه با قطر 25.6 mm عبارتست از:

$$S_A = 2.101(V_e) - 10.798 \quad (6)$$

رابطه‌ی متناظر با رابطه‌ی ۶ ولی برای شکل غیرکروی سنگ‌دانه‌ها رابطه‌ی ۷ است:

$$S_A = 2.566(V_e) - 11.133 \quad (7)$$

پیامد درک چنان اهمیتی، طرح ایده‌ی شبیه‌سازی جریان در لوله‌های موئین و یا محیط متخلخل با جریان کانال‌ها شد تا با استفاده از مفهوم شعاع هیدرولیکی، طول مشخصه‌ی حجم کنترل در محاسبات اعمال شود. [۱]

با مروری بر ادبیات فنی مرتبط با جریان در محیط‌های متخلخل، دیده می‌شود که احتمالاً اولین بار در سال ۱۹۷۸ محققان با به‌کارگیری مفهوم شعاع هیدرولیکی و حل معادلات ناور استوک در کانال‌ها و با ترکیب رابطه‌ی خودشان با رابطه‌ی داری، رابطه‌ی ۱ را برای برآورد افت در جریان لایه‌وار در محیط متخلخل ساخته شده از مصالح دانه‌ی به دست آوردند: [۲]

$$i = \frac{\mu k S_i^2}{gn^2} V \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، μ گرانیوی دینامیکی سیال، K ثابت Kozeny-Carman، g شتاب ثقل، n تخلخل، S سطح ویژه، V سرعت تراوش است. دشواری استفاده از رابطه‌ی ۱ در وجود پارامتر سطح ویژه است که برآورد آن کار ساده‌ی نیست. [۳-۴] این تذکر لازم است که اگرچه رابطه‌ی ۱ نوعی بیان پارامتریک از مفهوم ضریب نفوذپذیری را در اختیار می‌گذارد، ولی به این دلیل که رابطه‌ی ۱ با مطالعه‌ی جریان‌های ماندگار در محیط‌های متخلخل نسبتاً نرم (فیلترهای ماسه‌ی تصفیه‌ی آب) و در شرایط عدد رینولدز کوچک به دست آمده است، کاربری آن محدود به جریان‌های لایه‌وار خواهد بود. [۵] با زمینه‌ی ذهنی همسانی برای استفاده از مفهوم شعاع هیدرولیکی در جریان‌های سطح آزاد در تحلیل جریان در محیط‌های متخلخل، برخی پژوهشگران استفاده از نوع دیگری از مفهوم شعاع هیدرولیکی برای تجزیه و تحلیل‌های غیرخطی را پیشنهاد کرده‌اند. [۶، ۷] در تعریفی بنیادین از شعاع هیدرولیکی متوسط محیط متخلخل از سوی این پژوهشگران ممکن است مانند رابطه‌ی ۲ نوشت: [۷]

$$m = v_{void} / s_{void} \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۲، m شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل؛ s_{void} سطح خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط؛ v_{void} حجم خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط است. محاسبه‌ی m با استفاده از رابطه‌ی ۲ فقط در صورتی ممکن است که بتوان شکل هندسی منظمی برای خلل و فرج به وجود آورد. از طرفی در سنگ‌ریزه‌ی ساخته شده از سنگ‌دانه‌های به دست آمده از معادن سنگ، چندان اشکال هندسی منظمی وجود ندارد و به همین جهت، ذهنیت استفاده از یک اندازه‌ی بارز از سنگ‌دانه‌ها برای پرهیز از چنان محدودیتی مطرح شده است. شکل ۱ در این ذهنیت فرض می‌شود که ارتباط مستقیم و معنی‌داری بین اندازه‌ی سنگ‌دانه و خلل و فرج وجود دارد. اگرچه مشاهدات آزمایشگاهی بر روی سنگ‌دانه‌های تک‌اندازه این ذهنیت را تأیید می‌کند، این تذکر لازم است که حتی برای سنگ‌دانه‌های تک‌اندازه، در آن به آثار سطح تماس بین دانه‌ها توجه نشده است. از این رو این ذهنیت برای سنگ‌دانه‌های شکسته و یا پولکی که سطح تماس بین دانه قابل چشم‌پوشی نیست، منطقی نخواهد بود. برای حل این مشکل، ممکن است از پارامتر AVS که نسبت بین سطح یک سنگ‌دانه‌ی بارز (s_{solid}) به حجم آن (v_{solid}) است، استفاده کرد. یعنی می‌توان نوشت: [۷]

$$A_{vs} = s_{solid} / v_{solid} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن تعریف نسبت پوکی (e) اینک می‌توان رابطه‌ی ۴ را برای شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه ارائه کرد: [۷]

$$m = v_{void} / AVS \cdot v_{solid} = \frac{e}{AVS} \quad (4)$$

در معادله ۱۳، S سطح هندسه‌ی تخم‌مرغی کامل با سه قطر متعام a, b, c است. با مرور در ادبیات فنی مشاهده می‌شود که روابطی صریح برای محاسبه‌ی هندسه‌ی تخم‌مرغی کامل با سه قطر متعام a, b, c کمتر مورد توجه بوده است. راهکار پیشنهادی پژوهشگران برای تعیین پارامتر سطح برای استفاده در شبیه‌سازی جریان در لوله‌های موئین و یا محیط متخلخل با جریان کانال‌ها، تفکیک هندسه‌ی شکل مرجع به هندسه‌ی تخم‌مرغی صفحه‌یی، هندسه‌ی تخم‌مرغی لوله‌یی و هندسه‌ی کروی است که آن‌ها را می‌توان از رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶ محاسبه کرد:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2} + \left(\frac{\pi \cdot c}{2} \sqrt{(a^2 + b^2)/2} \right) \quad \text{تخم‌مرغی صفحه‌یی} \quad (14)$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot c \cdot b}{2} + \left(\frac{\pi \cdot a}{2} \sqrt{(b^2 + c^2)/2} \right) \quad \text{تخم‌مرغی لوله‌یی} \quad (15)$$

$$S_3 = \pi [(a + b + c)/3]^2 \quad \text{کروی} \quad (16)$$

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای افزایش دقت در تعیین S لازم است نوعی میانگین‌گیری بین مقادیر به‌دست آمده از رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶ در قالب رابطه‌های ۱۷ تا ۱۹ انجام شود:

$$S_4 = (S_1 + S_2) / 2 \quad (17)$$

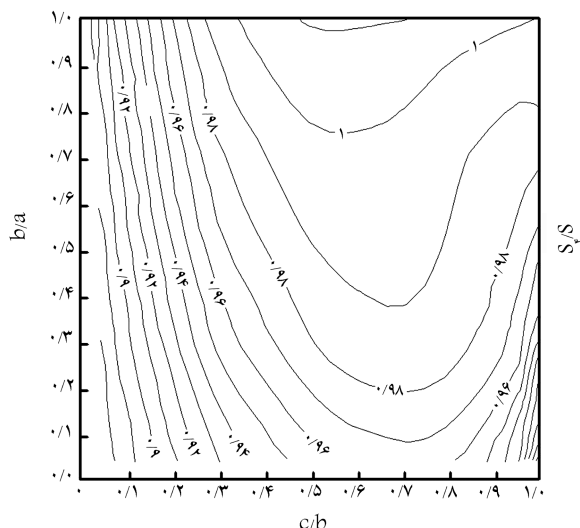
$$S_5 = (S_1 + S_2 + S_3) / 3 \quad (18)$$

$$S_6 = (S_4 + S_5) / 2 \quad (19)$$

اینک با در دست داشتن مقادیر قابل محاسبه با رابطه‌های ۱۷ تا ۱۹ و به کمک نمودارهای نشان داده‌شده در شکل‌های ۲ تا ۴ می‌توان ضریب پخی (RO_{blate}) را به‌دست آورد و از آن‌جا شعاع هیدرولیکی متوسط را محاسبه کرد (رابطه ۲۰):

$$m = (e \cdot b) / (6r_e) \quad (20)$$

دو روشی که برای تعیین سطح ویژه و شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده‌ی محیط متخلخل توضیح داده شد، کاربرد آزمایشگاهی دارند و برای اهداف مهندسی مناسب نیستند.^[۹] بنابراین لازم است تا از روابطی کاربردی تر



شکل ۲. منحنی‌های تغییرات (S_2/S_1) در مقابل قطرهای بی بعد شده‌ی شکل مرجع تخم‌مرغی.^[۷]

و نهایتاً رابطه‌ی کلیدی که سطح ویژه‌ی توده‌ی سنگ‌ریز تشکیل‌دهنده‌ی محیط متخلخل (A_{MS}) را به‌عنوان تابعی از اندازه‌ی بارز سنگ‌دانه‌ها d متناظر با قطر متوسط شکل فرضی تخم‌مرغی یا b نشان می‌دهد، به‌صورت رابطه‌ی ۸ پیشنهاد شده است:

$$A_{MS} = 3.89/d^{1.08} \quad (8)$$

در صورت پذیرش اعتبار رابطه‌ی ۸ برای انواع مختلف سنگ‌دانه‌ها (درورای گستره‌ی آزمایش‌شده‌ی سال ۱۹۹۱^[۶]) لازم است فرض شود که $A_{VS} = \rho A_{MS}$ تا بتوان از رابطه‌ی ۴ برای محاسبه‌ی شعاع هیدرولیکی سنگ‌دانه‌ها استفاده کرد. شایان ذکر است که رابطه‌ی ۸ فقط برای سنگ‌ریز تک‌اندازه و با ویژگی‌های ظاهری گزارش‌شده در تحقیق سال ۱۹۹۱^[۶] اعتبار دارد و نمی‌توان از آن مستقیماً برای سنگ‌ریزهای متداول در کارهای مهندسی عمران استفاده کرد.

در تلاشی دیگر برای برطرف‌کردن محدودیت فوق‌الذکر پیشنهاد شده است که از یک ضریب تصحیح شکل (r_e) برای نشان‌دادن انحراف، از یک شکل استاندارد استفاده شود.^[۵] بدین منظور سایین و هانسن^[۷] پارامتر C را به‌صورت رابطه‌ی ۹ معرفی کردند.

$$1 \leq \frac{S^2}{36\pi \cdot V^2} = \phi \quad (9)$$

در رابطه‌ی ۹، V حجم یک جسم صلب مفروض S سطح آن است. برای هندسه‌ی کاملاً کروی، این ضریب برابر یک و برای دیگر هندسه‌ها -چه منظم و چه غیرمنظم- ضریب یادشده بزرگ‌تر از یک خواهد بود. برای مثال برای هندسه‌ی مکعبی شکل با اندازه‌ی ضلع s ، رابطه‌ی ۱۰ را خواهیم داشت:

$$\phi = \frac{(6s^2)^2}{36\pi (s^3)^2} = \frac{6}{\pi} = 1.91 \quad (10)$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که بهترین معیار شکل برای نشان‌دادن انحراف از استاندارد، r_e است. اینک اگر نسبت سطح یک سنگ‌دانه‌ی نامنظم با سه قطر متعام a, b, c (A_{VS}) به سطح یک ساجمه با قطر b ، به‌عنوان ضریب تصحیح شکل پذیرفته شود، می‌توان رابطه‌ی ۱۱ را نوشت:

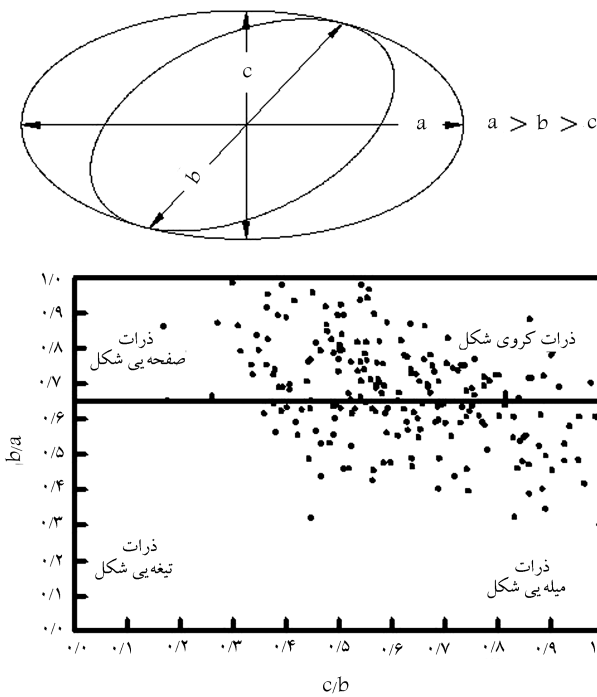
$$r_e = \frac{A_{VS}}{A_{VS}'} \quad (11)$$

سایین و هانسن^[۷] در ادامه‌ی این فرضیات، معیار شکل منطقی‌تری برای نشان‌دادن انحراف از استاندارد برای سنگ‌دانه‌های شکسته‌ی استخراجی از معادن را شکل تخم‌مرغی ناهموار با سه قطر متعام a, b, c متناظر با اقطار سنگ‌دانه‌ی معدنی، معرفی کردند و نشان دادند که ضریب تصحیح شکل مورد بحث از حاصل ضرب دو ضریب پخی (RO_{blate}) و ضریب ناهمواری (R_{rough}) به‌شرح رابطه‌ی ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$r_e = RO_{blate} \times R_{rough} \quad (12)$$

(R_{rough}) را فقط از طریق اندازه‌گیری مستقیم در آزمایشگاه می‌توان تعیین کرد، ولی (RO_{blate}) را می‌توان با اتکاء به شکل مرجع انتخابی یعنی هندسه‌ی تخم‌مرغی کامل با سه قطر متعام a, b, c با معادله‌ی ۱۳ محاسبه کرد:

$$RO_{blate} = \frac{S}{\pi \cdot a \cdot c} \quad (13)$$



شکل ۵. تعریف ترسیمی از هندسه‌ی مرجع با سه قطر متعامد و توزیع اندازه‌گیری‌های انجام شده در بین چهار گروه بارز شکل دانه‌ها. [۵]

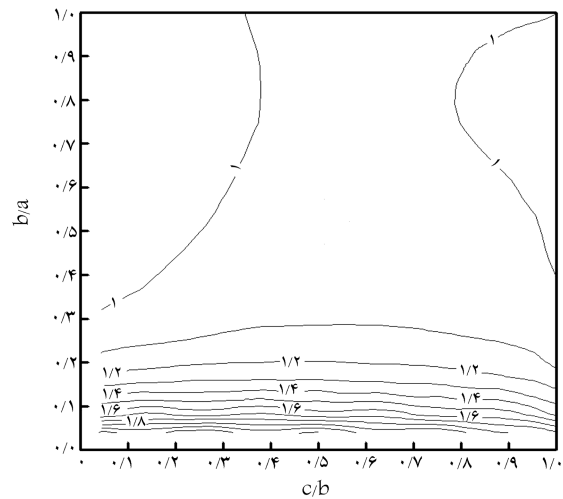
مقایسه‌ی دقت روش‌های تعیین شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه

برای نشان دادن حدود دقت سه روش متداول‌تر برای برآورد سطح ویژه سنگ‌دانه برای فرمولاسیون جریان در لوله‌های موتین یا محیط متخلخل، اقدام به یک آنالیز عددی بر پایه‌ی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی شد. [۶] در مرور اجمالی این سه روش عبارتند از:

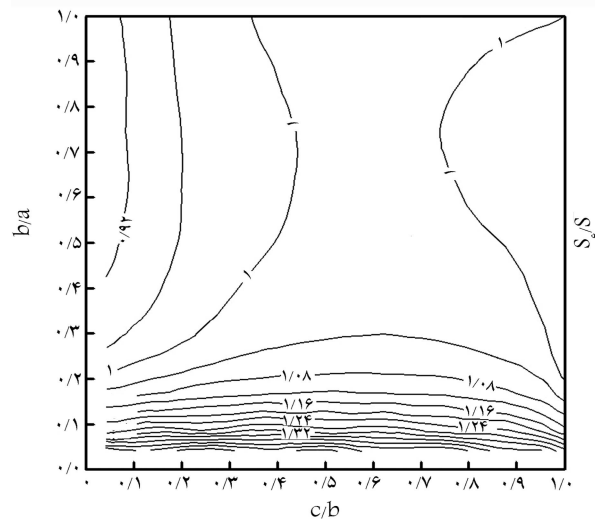
- روش بازگان که برای برآورد سطح ویژه، فقط متکی به اندازه‌ی سنگ‌دانه‌هاست و با رابطه‌ی ۲۱ به آن اشاره شد؛
- روش سایین که برای برآورد سطح ویژه، متکی به تخمین چند پارامتر کمکی است و با رابطه‌ی ۱۴ تا ۱۹ به آن اشاره شد؛
- روش گرگا که برای برآورد سطح ویژه، از مشاهداتی آزمایشگاهی بر روی سنگ‌دانه‌هایی که سطح آن‌ها با روش پوشش با پودر فلز اندازه‌گیری شده است و با رابطه‌ی ۶ به آن اشاره شد.

اندازه‌گیری‌های گزارش شده از سنگ‌دانه‌های مورد بحث، [۶] که در آنالیز حاضر مورد استفاده بوده‌اند، در جدول ۱ از نظر می‌گذرد. برای ساده‌سازی، یافته‌های این تجزیه و تحلیل به صورت شکل ۶ ارائه شده است.

برای تبیین حدود دقت هر یک از سه روش می‌توان از روش‌های آماری کمک گرفت و مقدار خطا در تخمین را نسبت به مقادیر واقعی محاسبه کرد. یافته‌های چنین ارزیابی آماری در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که از مقادیر مندرج در دو سطر آخر جدول ۲ مشخص است، مجموعه‌ی رابطه‌های سایین (۱۴ الی ۱۹) دقیق‌ترین برآورد سطح ویژه سنگ‌دانه‌ها را با



شکل ۳. منحنی‌های تغییرات (S₅/S) در مقابل قطرهای بی بعد شده‌ی شکل مرجع تخم مرغی. [۷]



شکل ۴. منحنی‌های تغییرات (S₆/S) در مقابل قطرهای بی بعد شده‌ی شکل مرجع تخم مرغی. [۷]

مانند رابطه‌ی ۲۱ به جای آن‌ها استفاده شود:

$$(AVS)_i = \frac{6(1-n)}{d_i(R_{rough})} \quad (21)$$

در رابطه‌ی ۲۱، n ، تخلخل؛ d_i اندازه‌ی الکی است که جزء λ_m از مخلوط سنگ‌دانه‌ها در روی آن باقی می‌ماند. مزیت رابطه‌ی ۲۱ در متکی بودن آن به پارامترهایی است که به سادگی در آزمایشگاه قابل تعیین است. برای این منظور می‌توان از رابطه‌ی ۲۲ استفاده کرد:

$$r_e = (AVS)_i / \pi [(a_i + b_i + c_i) / 3]^2 \quad (22)$$

ابتدا باید ضریب تصحیح شکل را به دست آورد و سپس با رابطه‌ی ۲۵ که در آن به جای b از d_i استفاده می‌شود، شعاع هیدرولیکی متوسط را محاسبه کرد. شایان ذکر است که در رابطه‌ی ۲۲ نیز ممکن است با پذیرش کمی خطا به جای میانگین سه قطر متعامد سنگ‌دانه‌ی بارز، از اندازه‌ی الک متناظر با آن استفاده کرد (شکل ۵).

جدول ۲. ارزیابی حدود دقت نتایج به دست آمده از سه روش آزموده شده با شیوه‌های آماری.

| شماره سنگ‌دانه | روش گرگا | روش ساین | روش بازرگان |
|----------------------------|----------|----------|-------------|
| ۱ | ۰٫۰۲ | ۱٫۰۳ | ۶٫۵۴ |
| ۲ | ۰٫۱۷ | ۱٫۰۷ | ۳٫۸۹ |
| ۳ | ۹٫۰۶ | ۱۷٫۴۱ | ۲۵٫۲۳ |
| ۴ | ۰٫۱۳ | ۲٫۸۱ | ۱۴٫۲۴ |
| ۵ | ۱۱٫۱۹ | ۲۰٫۲۲ | ۳۵٫۳۹ |
| ۶ | ۲۵٫۰۱ | ۱٫۰۵ | ۵۰٫۷۴ |
| ۷ | ۰٫۳۳ | ۲ | ۱۵٫۷ |
| ۸ | ۹٫۶۹ | ۱۸٫۱۵ | ۳۵٫۰۸ |
| ۹ | ۶۹٫۴۸ | ۰٫۰۲ | ۳۴٫۲۳ |
| ۱۰ | ۰٫۰۴ | ۱٫۱۸ | ۹٫۳۶ |
| ۱۱ | ۰٫۱۷ | ۱٫۰۷ | ۳٫۸۹ |
| ۱۲ | ۹۵٫۱۵ | ۰٫۱۷ | ۳۴٫۲۳ |
| ۱۳ | ۰ | ۰٫۰۱ | ۰٫۲ |
| ۱۴ | ۰٫۰۱ | ۰٫۰۳ | ۰٫۱۹ |
| ۱۵ | ۰ | ۰٫۰۱ | ۰٫۳۷ |
| مجموع خطاها (۱/cm) | ۲۲۰٫۴۴ | ۶۶٫۲۲ | ۲۶۹٫۲۸ |
| میانگین مربع خطا (۱/cm) | ۱۴٫۷ | ۴٫۴۱ | ۱۷٫۹۵ |

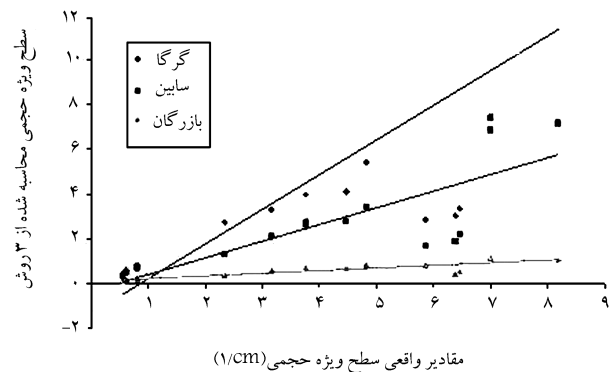
و تخلخل محیط است و قابلیت تعمیم برای محیط‌های متخلخل ساخته شده از مصالح طبیعی را دارد، آن‌گاه می‌توان آن‌را روشی با پتانسیل برای توسعه تلقی کرد تا در صورت اعمال برخی اصلاحات، قابلیت استفاده در کاربری‌های مهندسی را پیدا کند. روش ساین با کمترین خطا، بهترین برآزش را بر روی داده‌های واقعی از سطح ویژه سنگ‌دانه‌ها نشان می‌دهد. لیکن این روش به دلیل دراختیار نبودن روش‌های ژئوتکنیکی لازم برای اندازه‌گیری سریع و آسان سه قطر مختلف سنگ‌دانه‌ها، فاقد پتانسیل کاربری هیدرولیکی در مهندسی عمران است. نگارندگان این نوشتار بر این باور هستند که با اتکاء به روش‌های اندازه‌گیری رایانه‌ای سطوح از طریق تصویربرداری‌های مکرر، و دخالت دادن برخی عوامل هندسی سنگ‌دانه‌ها در معادله‌ی ۲۱ بتوان آن‌را اصلاح کرد و برای کاربری‌های دقیق مهندسی توصیه کرد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت‌های علمی و پشتیبانی‌های لجستیکی معاونت مالی اداری دانشکده‌ی مهندسی عمران که انجام این پژوهش را امکان‌پذیر فرمودند، کمال سپاسگزاری را دارد.

جدول ۱. ویژگی‌های هندسی گزارش شده از سنگ‌دانه‌های مورد بررسی. [۶]

| a (cm) | b (cm) | c (cm) | V (cm ^۳) | S _A (cm ^۲) |
|--------|--------|--------|----------------------|-----------------------------------|
| ۴٫۴۶ | ۳٫۲۶ | ۱٫۹۶ | ۱۵٫۲ | ۴۸ |
| ۷٫۴ | ۴٫۷۹ | ۳٫۴ | ۴۵٫۴ | ۱۰۶ |
| ۳٫۲ | ۲٫۴۶ | ۹٫۵ | ۵ | ۲۹٫۳ |
| ۳٫۸۷ | ۲٫۴۳ | ۱٫۴۷ | ۷٫۳ | ۳۲٫۶ |
| ۶٫۲۲ | ۳٫۲۷ | ۲٫۲۳ | ۱۲٫۹ | ۸۲٫۳ |
| ۲٫۵۳ | ۱٫۷۶ | ۰٫۴۵ | ۲٫۲ | ۱۸ |
| ۳٫۱۲ | ۱٫۹۹ | ۱٫۲۱ | ۳٫۹ | ۱۸٫۸ |
| ۵ | ۲٫۸۳ | ۱٫۹۳ | ۷٫۲ | ۴۶٫۵ |
| ۲٫۳۳ | ۱٫۴۳ | ۰٫۵ | ۱٫۴ | ۹٫۸ |
| ۳٫۸۲ | ۲٫۵۶ | ۱٫۵۵ | ۸٫۸ | ۳۳٫۱ |
| ۷٫۴ | ۴٫۷۹ | ۳٫۴ | ۴۵٫۴ | ۱۰۶ |
| ۲٫۳۳ | ۱٫۴۳ | ۰٫۴۵ | ۱٫۴ | ۹٫۸ |
| ۱۶٫۷ | ۱۳ | ۹٫۱ | ۷۹۴٫۹ | ۴۸۵٫۸ |
| ۲۲ | ۱۷٫۵ | ۱۲٫۵ | ۱۲۳۹ | ۶۸۵٫۴ |
| ۱۳٫۵ | ۹ | ۶ | ۴۰۲ | ۳۲۴٫۹ |



شکل ۶. نمایشی از حدود دقت سه روش تخمین سطح ویژه سنگ‌دانه‌ها با اتکاء به اندازه‌گیری‌های واقعی.

استفاده از پارامترهای ماکروسکوپی دانه‌ها به دست می‌دهد. دقت رابطه‌ی ۶ پس از مجموعه‌ی رابطه‌های فوق بیشتر از رابطه‌ی ۲۱ است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که رابطه‌ی گرگا حتی برای داده‌های خودش نیز دقت مطلوبی ندارد. بنابراین می‌توان آن‌را برای کاربری‌های مهندسی نامناسب دانست. از سوی دیگر اگرچه در این تحلیل آماری روش بازرگان کم‌دقت‌ترین روش دیده می‌شود، ولی اگر توجه شود که این روش برای تعیین سطح ویژه سنگ‌دانه‌های تشکیل‌دهنده‌ی محیط متخلخل فقط متکی به اندازه‌های بارزی از سنگ‌دانه‌ها

فهرست علائم

| | |
|--|--|
| V : حجم واقعی سنگ‌دانه | k : ثابت رابطه‌ی ۱ |
| S_A : سطح ویژه سنگ‌دانه | g : شتاب ثقل |
| A_{MS} : سطح ویژه در واحد جرم | n : تخلخل |
| d : اندازه‌ی بارز سنگ‌دانه | S : سطح ویژه |
| r_e : ضریب تصحیح شکل | V : سرعت تراوش |
| A'_{vs} : سطح یک ساچمه با قطر b | m : شعاع هیدرولیکی متوسط سنگ‌دانه‌های محیط متخلخل |
| R_{Oblate} : ضریب پخی | V_{void} : سطح خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط |
| R_{rough} : ضریب ناهمواری | S_{void} : سطح خلل و فرج بین دانه‌ها در واحد حجم مخلوط |
| a, b, c : سه قطر متعامد سنگ‌دانه | A_{vs} : سطح ویژه در واحد حجم |
| d_i : اندازه‌ی الکی که جزء d از مخلوط سنگ‌دانه‌ها روی آن باقی می‌ماند | S_{solid} : سطح یک سنگ‌دانه‌ی بارز |
| S_1 : سطح ویژه تخم‌مرغی صفحه‌بی | V_{solid} : حجم یک سنگ‌دانه‌ی بارز |
| S_2 : سطح ویژه تخم‌مرغی لوله‌بی | e : نسبت پوکی |
| S_3 : سطح ویژه‌ی کروی | V_e : حجم تخم‌مرغی سنگ‌دانه |
| S_4, S_5, S_6 : نوعی میانگین‌گیری بین مقادیر به‌دست آمده از رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶ | |
| μ : گرانروی دینامیکی سیال | |
| ϕ : معیار شکل | |

منابع

1. Wilkins, J.K. "The flow of water through rockfill and its application to the design of dams", *Proceedings 2nd Australian - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 141-149 (1956).
2. Brooks, C.S. and Purcell, W.R. "Surface area measurement on sedimentary rocks", *Trans. A.I.M.E.*, **195**, pp. 280-296 (1952).
3. Kozeny, J. "Über kapillare leitung des wassers im boden", *Stizngsber. Akad. Wiss. Wien*, **136**, pp. 271-306 (1927).
4. Carman, P.C. "Fluid flow through granular beds", *Trans.Inst. Chem. Eng. London*, **15**, pp. 150-156 (1937).
5. Richards, K. "Rivers forms and process in alluvial channels", *Methuen Publishers*, London (1984).
6. Garga, V.K.; Townsend, R. and Hansen, D. "A method for determining the surface area of quarried rocks", *J. American Society for Testing and Materials*, **14**(1), pp. 35-45 (1991).
7. Sabin, G.W. and Hansen, D. "The effect of particle shape and surface roughness on the hydraulic mean radius of a porous medium consisting of quarried rock", *J. American Society for Testing and Materials*, **17**(1), pp. 43-49 (1994).
8. McQorquodale, J.A.; Hannoura, A.A. and Naser, M.S. "Hydraulic conductivity of rockfill", *J. Hydraulic Research*, **16**, pp. 123-137 (1978).
9. Bazargun, J. "Fundamentals in the theory of flow through granular intakes", *Ph.D. Thesis*, presented to the Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2002).