

# ارائه مفهوم "تخلخل متغیر" برای افزایش دقت تحلیل جریان‌های غیرخطی غیرماندگار در سازه‌های توده سنگی دریایی

حبیب‌الله بیات<sup>۱\*</sup>، صدف نظافت‌خواه<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

byatt@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

**چکیده**- امروزه به سازه‌های توده‌سنگی به علت سادگی ساخت در محیط‌های دریایی و هزینه‌ی نسبتاً کم، بین سازه‌های ساحلی بیش از سایرین توجه شده است. طراحی صحیح این سازه‌های حجیم و سنگین مستلزم درک جریان‌های غیرخطی غیرماندگار در محیط‌های نسبتاً درشت‌دانه است. از طرفی یکی از مهم‌ترین نکات مبهم در مطالعه‌ی هیدرولیک تغییرات فشار حفره‌ای در محیط‌های متخلخل، مسئله‌ی چگونگی برآورد دقیق مقدار تخلخل است. برای درک مطلب با توجه به تحقیقات محدودی که در سال‌های اخیر پیرامون این موضوع انجام شده، جریان غیرخطی غیرماندگار در محیط‌های توده‌سنگی نسبتاً درشت‌دانه طی پژوهشی جامع در دانشگاه صنعتی امیرکبیر بررسی شده است. این مقاله، پس از مرور یافته‌های پژوهش یاد شده، نشان می‌دهد که روابط ریاضی معمول استفاده شده برای تحلیل غیرخطی جریان قادر به تخمین دقیق شیب هیدرولیکی جریان در توده‌های سنگ‌ریز نیست. با قبول تخلخل به عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر این مدل‌های ریاضی، در یک نتیجه‌گیری کلی تخلخل به صورت تابعی از رژیم جریان بیان شده است. به طوری که بر خلاف نظریه‌ی غالب که تخلخل را یک پارامتر کاملاً ژئوتکنیکی معرفی می‌کند، مقدار این پارامتر در نتیجه‌ی تغییرات حجم موثر حفرات و ضریب شکل مؤثر در هر رژیم جریان متفاوت خواهد بود. سرانجام مطالعات عددی که برای تأیید یافته‌ها انجام شده نشان می‌دهد نتایج نامعتبری که از روابط ریاضی غیرخطی حاکم بر جریان‌های غیرماندگار به دست آمده، ممکن است ناشی از تخمین نادرست مقدار تخلخل باشد.

**کلیدواژه‌گان:** تخلخل، سازه‌های توده‌سنگی، تحلیل غیرخطی جریان‌های غیرماندگار

## ۱- مقدمه

چشم‌پوشی از نیازهای صنعت نفت به پتانسیل‌های ساحلی-دریایی کشور، ضرورت‌های معیشتی ساکنین سواحل و ترابری دریایی در مقیاس جهانی، ایجاب می‌کند که به درستی طراحی‌ها در ساخت‌وساز دریایی توجهی ویژه شود. از طرفی چون بسیاری از تأسیسات ساحلی با استفاده از مصالح

وابستگی‌های محلی و ملی به خطوط ساحلی بسیار طولانی در جنوب و شمال کشور، از دیرباز زمینه‌ای بنیادین برای تدوین سیاست‌های توسعه اقتصادی اجتماعی ساکنان این نواحی و همچنین کل کشور بوده است. به طوری که حتی در صورت

سنگ‌ریز ساخته می‌شود، در تلقی‌های مهندسی برای ارزیابی رفتار این نوع سازه‌ها لازم است از تئوری‌های محیط‌های متخلخل درشت‌دانه استفاده کرد.

یکی از گزینه‌ها که توجیه‌پذیری اقتصادی خوب و بسیار متداولی برای اسکله‌سازی دارد، گزینه دیوار باراندازی وزنی<sup>۱</sup> است که از روی هم قرار دادن بلوک‌های صلب بتنی و پشتیبانی با سنگ‌ریز درشت‌دانه ساخته می‌شود. برتری اقتصادی این گزینه در برابر گزینه‌های دیگری چون شمع-تابلیه، سپرکوبی، سازه‌های سلولی و ... در طول عمر بیشتر در شرایط فیزیکوشیمیایی دشوار و خورنده آب دریاست که کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را در پی دارد. در برخی ساختگاه‌های ویژه که پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح دریا برای برپا کردن این گونه باراندازها مناسب باشد، سادگی در طراحی و اجرا نیز از برتری‌های این سازه‌ها خواهد بود [۲]. یکی از انواع دیوارهای وزنی استفاده شده در محافظت از اسکله‌ها، سازه‌های توده‌سنگی<sup>۲</sup> است [۳] که در ادامه به مسائل مطرح در طراحی آن‌ها اشاره شده است.

هندسه‌های متداولی که برای دیوارهای بارانداز وزنی تعریف می‌شود، معمولاً کج‌شدگی<sup>۳</sup> دیوار نسبت به جابه‌جائی<sup>۴</sup> مخاطره‌آمیزتر بوده و به همین دلیل هم لازم است تا ضریب اطمینان بزرگ‌تری در برابر واژگونی-درمقایسه با لغزش-انتخاب شود [۳].

یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در مورد پایداری سازه‌های توده‌سنگی، چگونگی جریان سیال حفره‌ای در داخل سازه است و یکی از روش‌های مطالعه‌ی آن برای بررسی پایداری سنگ‌های مرزی استفاده از مدل‌های هیدرولیکی است [۵]. اگر سطح دریا آرام و بدون موج باشد، آب حفره‌ای در تعادل استاتیکی با بلندای آب دریا خواهد بود؛ ولی هرگونه انحرافی از این شرایط سبب ایجاد جریانی با شیب هیدرولیکی ( $i$ ) می‌شود. وجود جریان، نیروی ( $i\gamma_w$ ) بر دانه‌ها وارد می‌کند که بسته به این‌که جهت جریان رو به بالا یا پایین باشد، سبب می‌شود وزن مخصوص مؤثر خاک کمتر شده و یا افزایش یابد. اگر نیروی جریان به حدی برسد که با وزن دانه برابر شود، پدیده‌ی روانگرایی در مصالح رخ می‌دهد.

برخی از محققین [۵، ۶، ۷، ۸] اثر نفوذپذیری هسته‌ی سازه‌های توده‌سنگی را روی پایداری لایه‌ی محافظ بررسی کرده و نشان داده‌اند که نفوذپذیری هسته اثر قابل توجهی بر پایداری این لایه دارد. نتایج مطالعات [۵] نشان می‌دهد جریان گذرنده از محیط متخلخل، نیروی کشانی بر دانه‌های واقع بر شیب پشت دریا وارد می‌کند که به مرور زمان بیشتر شده و دانه‌ها کم‌کم بیرون رانده می‌شوند. برای پایدارسازی این قطعات در سازه‌ی توده‌سنگی باید انرژی جریان هنگام عبور از هسته به طور قابل توجهی کاهش یابد که این امر تأییدی بر اهمیت طراحی صحیح نفوذپذیری هسته است. اگر جابه‌جایی قطعات محافظ سطحی سبب شود چند قطعه

## ۲- اهمیت طراحی صحیح هسته‌ی سازه‌های توده‌سنگی دریایی

دو مد ناپایداری بارز لغزش و واژگونی می‌تواند زیرساختی ابتدایی برای تحلیل‌های سازه‌های دیوار بارانداز وزنی باشد [۳]. در شرایطی که سازه در منطقه‌ی زلزله‌خیز و روی خاک نرم بنا شده باشد، محتمل‌ترین مد ناپایداری، فرورفتن مصالح در داخل خاک ضعیف، نشست تاج و تورم پنجه است. در این شرایط اگر تجهیزات و تأسیساتی روی سازه وجود داشته باشد، کج یا جابه‌جا می‌شود [۴]. متناسب با

3- Tilting  
4- Displacement

1- Gravity quay wall  
2- Rubble mound structures

گذرنده از آن‌ها در اختیار باشد. در جریان‌های ماندگار، اگر عدد رینولدز جریان، کوچک بوده و رژیم جریان لایه‌وار باشد، می‌توان نیروی محرک را با داشتن اختلاف بلندا  $\Delta h$  در طول مسیر و نیروی مقاوم در برابر جریان بر اساس رابطه‌ی پویسوله محاسبه کرد. اگر فرض شود با برقراری جریان، دانه‌ها در جای خود ثابت بمانند، پس باید در یک محیط متخلخل دانه‌ای پایدار، تعادل بین نیروهای محرک و مقاوم مؤثر بر دانه‌ها برقرار باشد. از تساوی نیروهای محرک و مقاوم و با فرض دایره‌ای شکل بودن حفرات می‌توان شیب هیدرولیکی را از رابطه‌ی زیر به دست آورد [۲۲]:

$$i = \frac{C_{ck} (1-n)^2 S_0 V_p}{n^3 g} \quad (1)$$

بیان بالا از شیب هیدرولیکی به رابطه‌ی کارمن - کوزینی و  $C_{ck}$  نیز به ثابت کارمن - کوزینی معروف است. که در آن، ضریب  $T$ ، پیچ و خم حفرات،  $S_0$  سطح ویژه‌ی حجمی،  $V$ ، گرانروی سینماتیکی،  $n$  تخلخل و  $V_p$  سرعت جریان در حفره است. اگرچه مفهوم ژئوتکنیکی تخلخل، نسبت فضای خالی به حجم کل محیط متخلخل است ولی بسیاری از محققین تخلخل را در بحث جریان گذرنده از این محیط‌ها، تخلخل مؤثر دانسته‌اند که از حذف حفرات بن‌بست و ایزوله از کل فضای خالی موجود در محیط متخلخل به دست می‌آید. اگرچه هر دو مفهوم تخلخل ژئوتکنیکی و تخلخل مؤثر، مستقل از رژیم جریان است، ولی در این مقاله نشان داده می‌شود که آن تخلخلی که در آنالیزهای غیرخطی استفاده می‌شود علاوه بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی، تابعی از رژیم جریان و تغییرات لایه‌ی مرزی است که در بخش چهارم به تفصیل به آن پرداخته شده است.

کارمن (۱۹۳۷) برای ساده‌سازی درک موضوع، یک ضریب حفره شکل ( $C_0$ ) معرفی کرده و آن را برای مجموعه لوله‌های با مقطع غیردایره، برابر  $2/5$  اندازه‌گیری

آزاد شود، فرسایش سازه آغاز خواهد شد. اگرچه ضریب اصطکاک بین دانه‌ها نقش مهمی در کنترل فرسایش دارد ولی آنچه در حقیقت سبب فرسایش سازه حین پخش جریان به سمت خارج می‌شود، طراحی نادرست هسته است که شامل برآورد نادرست نفوذپذیری و مقدار آبی است که هسته در خود نگه می‌دارد.

با وجود این که یکی از مؤثرترین روش‌های طراحی سازه‌های توده‌سنگی استفاده از مدل‌های هیدرولیکی است؛ استفاده از مدل‌های فیزیکی خود نیازمند درک صحیح قوانین مقیاس است [۲۲]. در تعریف مقیاس نه تنها تشابه هندسی مدل و پروتوتیپ - که خود شامل تشابه تخلخل دو محیط است - بلکه تعادل دینامیکی نیروهای واقعی در دو محیط نیز باید مدنظر قرار گیرد. با توجه به مشکلات موجود در مقیاس زدن مدل‌های هیدرولیکی و خطاهای معمول در روش‌های آزمایشگاهی، مطالعه‌ی مدل‌های هیدرولیکی برای دستیابی به مدل مفهومی حرکت آب حفره‌ای در هسته کافی نیست و دستیابی به یک مدل مفهومی نیازمند استفاده از هر دو روش آزمایشگاهی و ریاضی است. بنابراین، تئوری‌های حاکم بر جریان گذرنده از این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی نشان داده خواهد شد که در تمامی تئوری‌های موجود، پارامتر تخلخل نقشی کلیدی در یافته‌های محیط‌های بررسی شده (در هر دو نوع مطالعات آزمایشگاهی و تئوری)، داشته و مهم‌ترین عامل مؤثر بر اعتبار نتایج خواهد بود.

### ۳- تئوری‌های حاکم بر جریان گذرنده از سازه‌های توده‌سنگی

با توجه به اهمیت نقش هسته‌ی سازه‌های توده‌سنگی در استهلاک انرژی جریان و در نتیجه تأمین پایداری سازه، لازم است رابطه‌ای برای محاسبه‌ی شیب هیدرولیکی جریان

$$\frac{dk}{K} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dg}{g} - \frac{dC_{ck}}{C_{ck}} - \frac{d\mu}{\mu} - \frac{2dS_0}{S_0} + \frac{3-n}{1-n} \frac{dn}{n} \quad (2)$$

اگر مقادیر معمول پارامترهای بالا و خطای احتمالی در اندازه‌گیری یا محاسبه‌ی آن‌ها به شکل زیر در نظر گرفته شود، چگونگی توزیع خطا برای هر یک قابل محاسبه است [۲۱]:

$$\begin{cases} \rho = 1 \pm 0.01 \\ n = 0.3 \pm 0.05 \\ C_{ck} = 5 \pm 0.25 \\ S_0 = 130 \pm 5 \\ g = 980 \pm 10 \\ \mu = 0.0131 \pm 0.0007 \end{cases}$$

$$\frac{dk}{k} = \frac{0.01}{1} + \frac{10}{980} + \frac{0.25}{5} + 0.0131 + \frac{2 \times 5}{130} + \frac{3 - 0.3}{1 - 0.3} \frac{0.05}{0.3} = 100\%$$

با استفاده از داده‌های بالا، بیشینه‌ی خطای ایجاد شده در ضریب نفوذپذیری ۱۰۰ درصد به دست آمده است. البته این خطا در شرایط غیرواقعی ایجاد می‌شود که تمام پارامترها هم‌جهت فرض شده، بیشینه‌ی خطا را تجربه کرده و هم‌زمان رخ دهند. آنچه اهمیت دارد آن است که در چنان شرایطی ۶۳ درصد از این خطا ناشی از برآورد نادرست مقدار تخلخل است که اهمیت تخمین صحیح این پارامتر را در مقدار نفوذپذیری و در نتیجه شیب هیدرولیکی نشان می‌دهد.

از طرفی با توجه به پیچیده بودن اندازه‌گیری سطح ویژه، مشکل عمده در استفاده از رابطه‌ی کوزینی کارمن، مسئله‌ی چگونگی برآورد سطح ویژه است. بنابراین با تعریف سطح ویژه به صورت "سطح واحد حجم از مصالح جامد"، پارامتر سطح ویژه با اندازه‌ی بارز دانه جایگزین شده که استفاده از رابطه‌ی کوزینی - کارمن را تا حدودی ساده‌تر نموده است. با استفاده از تعریف سطح واحد حجم از مصالح کروی جامد، ( $S_0 = \frac{6}{d}$ ) مقدار شیب هیدرولیکی برحسب اندازه‌ی بارز دانه به صورت رابطه‌ی ریاضی زیر

کرد. همچنین وی برای برآورد  $T^2$  به روش آزمایشگاهی، با تزریق رنگ به داخل جریان در محیط متخلخل نشان داد جریان عبوری با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به خط مستقیم منحرف می‌شود به طوری که طول واقعی ( $L_0$ )،  $\sqrt{2}$  برابر طول ظاهری ( $L$ ) است که در نتیجه مقدار  $T^2$  برابر ۲ خواهد شد. با این ترتیب، دستیابی به ضریب کوزینی - کارمن یا  $C_{ck} = C_0 T^2$  ممکن شده و  $C_{ck}$  را مقداری ثابت و برابر ۵ پیشنهاد کرده است. کارمن ثابت  $C_{ck}$  را در آزمایشهای خود و دیگران کنترل کرد و نتیجه گرفت مقدار این ضریب در بازه‌ی  $5 \pm 4\%$  متغیر است. همچنین بار (۱۹۴۹) سطح ویژه را با اعمال  $C_{ck}$  برابر ۵ محاسبه و تفاوت آن را با سطح ویژه‌ی اندازه‌گیری شده حدود ۳ درصد گزارش کرد که تأییدی ضمنی برای مقدار پیشنهادی کارمن برای این ثابت است [۲۲].

اینک اگر فرض شود که نفوذپذیری پارامتری مستقل به صورت  $K = \frac{\rho g}{C_{ck} \mu S_0^2} \frac{n^3}{(1-n)^2}$  باشد، آنگاه می‌توان با محاسبه‌ی چگونگی توزیع خطا در بین این پارامترها، میزان اثرگذاری هر یک را به شرح زیر مطالعه کرد:

$$dK = \frac{\partial K}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial K}{\partial g} dg + \frac{\partial K}{\partial C_{ck}} dC_{ck} + \frac{\partial K}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial K}{\partial S_0} dS_0 + \frac{\partial K}{\partial n} dn$$

از آنجا که در مشتق‌گیری جزئی نسبت به یک پارامتر، سایر پارامترها ثابت می‌مانند، هر یک از عبارات‌های بالا برابر با نسبت نفوذپذیری به آن پارامتر خواهد شد مثلاً مشتق نسبی نفوذپذیری نسبت به جرم مخصوص سیال ( $\frac{\partial K}{\partial \rho}$ ) برابر با  $\frac{K}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \rho}$  است. با جاگذاری هر یک از مشتق‌های جزئی رابطه‌ی (۱)، این رابطه به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

نوشته می‌شود:

$$i = 36\alpha \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} V + 6\beta \frac{(1-n)}{gn^3 d} V^2 \quad (۷)$$

$$i = \alpha_0 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} V + \beta_0 \frac{(1-n)}{gn^3 d} V^2$$

نوسانات سینوسی انرژی (یا فشار حفره‌ای) جریان غیرماندگار گذرنده از سنگریزهای دریایی ایجاد می‌کند اثر غیرماندگار شدن نیز بر شیب هیدرولیکی جریان بررسی شود. بنابر متون فنی [۱] طبیعت رفت و برگشتی جریان غیرماندگار سبب از بین رفتن گردابه‌ها و تأخیر در آشفته شدن جریان منجر می‌شود. از بین رفتن گردابه‌ها مستلزم مومنتوم اضافی است که این افزایش مومنتوم به معنای افزایش مقاومت محیط در برابر جریان است که بخشی از این مقاومت ناشی از شتاب لحظه‌ای جریان  $\frac{\partial V}{\partial t}$  خواهد بود [۲۲]. لازم به ذکر است که با وجود هر دو شتاب انتقالی و آنی در این نوع از جریان در محیط‌های متخلخل، معمولاً برای محاسبه‌ی شیب هیدرولیکی از شتاب انتقالی  $\frac{\partial V}{\partial x}$  در مقابل شتاب لحظه‌ای  $\frac{\partial V}{\partial t}$  چشم‌پوشی شده و رابطه‌ی شیب بر حسب سرعت با افزودن جمله‌ی سوم به رابطه (۵)، به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰]:

$$i = aV + b|V|V + c \frac{\partial V}{\partial t} \quad (۸)$$

مک کورکودیل و هنورا با استفاده از مفهوم جرم افزوده ناشی از نوسان دانه در اثر برخورد امواج، رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی شیب هیدرولیکی جریان‌های غیرخطی غیرماندگار ارائه کردند [۲۲]:

$$i = 36C_0 T^2 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} V + 6 \frac{fT^3}{8} \frac{(1-n)}{gn^3 d} V^2 + \frac{1+C_m(1-n)}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (۹)$$

$C_m$  جرم مجازی اضافه شده در نتیجه‌ی ارتعاش دانه

$$i = 36C_0 T^2 \frac{(1-n)^2 v}{n^3 g d^2} V_p = 180 \frac{(1-n)^2 v}{n^3 g d^2} V_p \quad (۳)$$

ثابت ۱۸۰ که از مطالعات تئوری و با فرض ضریب  $C_{ck}$  برابر ۵ به دست آمده، ممکن است در محیط‌های واقعی معتبر نباشد. بدین ترتیب، رابطه‌ی شیب هیدرولیکی در جریان‌های لایه‌وار را می‌توان با بیان کلی‌تری به شکل زیر ارائه کرد:

$$i = \alpha \frac{(1-n)^2 v}{n^3 g d^2} V_p \quad (۴)$$

در نتیجه با استفاده از مدل شعاع هیدرولیکی، مقاومت ویسکوز محیط متخلخل در برابر جریان‌های لایه‌وار به صورت رابطه‌ی (۴) به دست آمده ولی با خروج جریان از رژیم خطی، این رابطه بی‌اعتبار خواهد شد. برای محاسبه‌ی مقاومت محیط در برابر جریان باید جمله‌ی دومی به رابطه‌ی (۴) اضافه شود که این جمله را می‌توان به کمک آنالوژی جریان آشفته در لوله‌ها به صورت زیر محاسبه کرد [۱۲]:

$$i = C_0 T^2 \frac{(1-n)^2 v S_0^2}{gn^3} V + \frac{f}{8g} \frac{S_0(1-n)}{n^3} T^3 V^2 \quad (۵)$$

$f$  ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ است و سایر پارامترها پیش‌تر معرفی شده است. ارگان با تعریف ضرایب  $\alpha, \beta$  به صورت  $\alpha = C_0 T^2$  و  $\beta = \frac{fT^3}{8}$  را به شکل زیر بیان کرده است [۲۳]:

$$i = \alpha \frac{(1-n)^2 v S_0^2}{gn^3} V + \beta \frac{S_0(1-n)}{gn^3} V^2 \quad (۶)$$

و در صورت استفاده از قطر بارز دانه‌ها به جای سطح ویژه، شیب هیدرولیکی جریان‌های غیرخطی ماندگار در

از نتایج آزمایش‌هایی که به وسیله‌ی محققین پیشین منتشر شده، نشان داده شده که این ضرایب در حقیقت علاوه بر ویژگی‌های محیط متخلخل تابعی از شیب هیدرولیکی جریان نیز است.

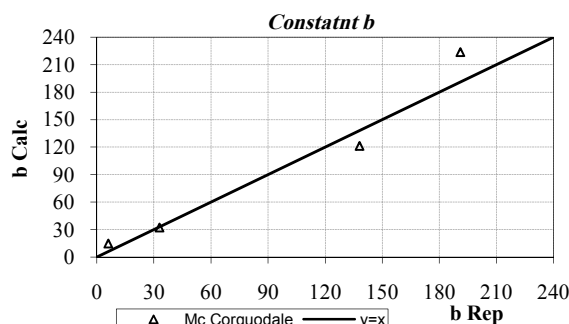
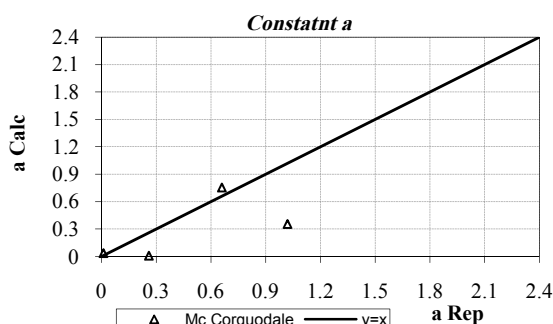
#### ۴- چگونگی تأثیر جریان بر تخلخل محیط و ضریب شکل حفره

برای ارزیابی دامنه اعتبار روابط تئوری جریان در محیط‌های متخلخل، می‌توان از یافته‌های آزمایشگاهی برخی از محققین همچون مک‌کورکودیل و هنورا پیرامون جریان در محیط‌های متخلخل [۱۲، ۱۳، ۲۲، ۱۰، ۹، ۱] استفاده کرد. از چنین بررسی نظری‌ای، آشکار می‌شود که شیب هیدرولیکی گزارش شده از آزمایش‌های ایشان، سازگاری چندانی با مقادیر قابل محاسبه به کمک رابطه‌ی (۱۰) ندارند. برای کشف ریشه‌ی ناسازگاری بین مقادیر شیب محاسباتی و مشاهداتی، ضرایب  $a, b$  در رابطه‌ی "فورس‌هایمر" تعمیم یافته" به صورت تئوری محاسبه شده و با مقادیری که محققین یاد شده از مطالعات آزمایشگاهی به دست آورده‌اند، مقایسه شده است که نتایج در شکل (۱) مشاهده می‌شود. اینک با توجه به نقش کلیدی تخلخل در ورود مقدار این ضرایب، لازم است حدود دقت تخلخل اندازه‌گیری شده را آزمود.

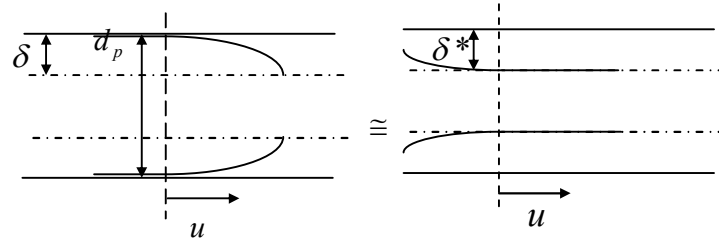
هنگام برخورد موج است. بسیاری از محققین همچون ون‌جنت، مک‌کورکودیل و هال بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی روی مدل‌های ساخته شده برای مطالعه‌ی جریان در لایه‌ی محافظ موج شکن‌ها، اثر جرم مجازی اضافه شده ( $C_m$ ) و در نتیجه جمله‌ی سوم را در مقدار شیب هیدرولیکی ناچیز دانسته‌اند [۱]. از آنجا که اندازه‌ی دانه‌ها در هسته‌ی موج شکن‌ها بسیار کوچک‌تر از بخش محافظ است، احتمالاً مقدار جرم مجازی اضافه شده به دانه هنگام ارتعاش ( $C_m$ ) قابل چشم‌پوشی خواهد بود. از طرفی این نتایج بر اساس مطالعه‌ی اثر امواج کوتاه با دوره‌ی تناوب‌های کوتاه حاصل شده و انتظار می‌رود در جریان‌های غیرخطی غیرماندگار ناشی از امواج بلند در محیط‌های متخلخل، اثر جمله‌ی سوم در مقدار شیب هیدرولیکی قابل چشم‌پوشی باشد. بدین ترتیب رابطه‌ی حاکم بر جریان‌های غیرخطی غیر ماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه با چشم‌پوشی از ضریب  $C_m$  به شکل کلی زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$i = 36C_0 T^2 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} V + \frac{3fT^3}{4} \frac{1-n}{gn^3 d} V^2 + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (10)$$

بسیاری از محققین بر این باورند که ضرایب  $a$  و  $b$  در یک محیط متخلخل معلوم، مقادیر ثابتی است، ولی در ادامه با استفاده



شکل (۱) مقایسه‌ی ضرایب  $a, b$  به دست آمده از روش تئوری و آزمایشگاهی



شکل (۲) چگونگی اثرگذاری لایه مرزی بر هندسه مجراهای موین [۲۲]

$$n = 0.255(1 + 0.83^{Cu}) \quad (11)$$

اینک اگر با کمک تئوری لایه مرزی، مفهوم جدیدی از تخلخل مؤثر که بیانگر میزان مقاومت محیط متخلخل در مقابل عبور سیال در مقیاس میکروسکوپی است، مطرح شود، می توان نشان داد که این مفهوم جدید تخلخل مؤثر تنها تابعی از ویژگی های ژئوتکنیکی مصالح دانه ای نبوده و رژیم جریان عبوری از محیط هم بر آن مؤثر است. به بیان دیگر، اگرچه رابطه ی (۱۱) قادر است تخلخل ژئوتکنیکی را در محیط های دانه ای تنها بر اساس منحنی دانه بندی به دست دهد، ولی نمی تواند آثار تغییر در ضخامت لایه ی مرزی تحت تأثیر تغییر در رژیم جریان را مدل کند. یادآوری می شود منظور از لایه ی مرزی که به طور شماتیک در شکل (۲) نمایش داده شده، گستره ای از توده سیال در مجاورت دانه های صلب است که شیب سرعت در آن فاصله، تغییرات شدیدی را تجربه می کند. طبق تعریف، سرعت در این فاصله از صفر در مجاورت سطح صلب به ۹۹ درصد سرعت جریان در فاصله ی  $(\delta^*)$  از آن سطح صلب می رسد. در این بخش از سیال با ضخامت  $(\delta^*)$ ، به علت سرعت کمتر جریان، دبی گذرنده عملاً نمی تواند تمام مقطع مجرای موینه استفاده کند و در نتیجه لازم است بخشی از مقطع در اختیار جریان حذف شود تا آثار تغییرات سرعت واقعی بر دبی گذرنده، به درستی منظور شود [۱۶]. اگر حفرات محیط متخلخل مفروضی همچون لوله های موینه در نظر گرفته شود، بنا بر شکل (۲) کاهش

چون اندازه گیری دقیق پارامتر تخلخل به علل مختلفی که قبلاً به آن ها اشاره شده، با استفاده از روش های معمول در آزمایشگاه ممکن نیست، بنابراین به نظر می رسد همین امر علت اصلی تفاوت شیب های به دست آمده از روش های تئوری و آزمایشگاهی باشد. شایان ذکر است که از دیدگاه ریاضی هم تأثیرگذاری بیشتر تخلخل بر ضریب  $a$  نسبت به ضریب  $b$ ، می تواند موجب بروز ناسازگاری مقادیر  $a$  تئوری و آزمایشگاهی بیش از مقادیر مشابه برای  $b$  باشد.

آنچه که به عنوان تخلخل مؤثر محیط شناخته می شود، از تقسیم حجم آن بخش از فضای خالی موجود در محیط متخلخل که عبور سیال از آن ممکن است به حجم کل محیط متخلخل به دست می آید. این تخلخل که معمولاً با دشواری در یک نمونه از محیط اندازه گیری می شود، سپس به کل محیط تعمیم داده می شود. با دانستن به اینکه محیط های متخلخل متشکل از مصالح طبیعی هیچ گونه همگنی و ایزوتروپی را نشان نمی دهند، تعمیم تخلخل اندازه گیری شده در یک نمونه کوچک به کل محیط متخلخل منطقی نخواهد بود. ووکویک و سورو<sup>۱</sup>، به صورت تجربی این ایده ی مطرح شده [۱۵] را تأیید کرده و ضریب یکنواختی را مؤثرترین پارامتر بر تخلخل مصالح دانه ای طبیعی دانسته و در همین راستا رابطه ی تجربی زیر را پیشنهاد کردند [۱۴].

1- Vukovic &amp; Soro

مؤثر نمی‌تواند مقدار ثابتی برای تمامی رژیم‌های جریان گذری داشته باشد. به‌دیگر سخن، توان پارامتر تخلخل در معادلات فورس‌هایمر نمی‌تواند عدد ۱ برای تمامی رژیم‌های جریان باشد که قبلاً به‌وسیله‌ی پژوهشگران گزارش شده است. برای به‌دست آوردن تابعی که این توان تخلخل مؤثر را به‌دست دهد، لازم است پژوهش‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس گسترده‌ای در آینده انجام شود.

شایان ذکر است که تغییرات ضخامت لایه‌ی مرزی در درون حفرات محیط متخلخل در رژیم جریان غیرماندگار، ناشی از طبیعت سینوسی (رفت و برگشتی) جریان است. در این شرایط ریزچرخه‌های تشکیل شده در درون لایه‌ی مرزی به علت وجود ناهمواری‌های سطحی دانه‌ها، بسیار ضعیف بوده (تحت تأثیر میدان‌های سرعت جریان رفت و برگشتی) و در نتیجه لایه‌ی مرزی نسبت به شرایط ماندگار کم‌ضخامت‌تر می‌شود. کاهش ضخامت ممکن است خود تابعی از زمان باشد، به طوری که در برخی موارد به صفر میل کرده و در برخی موارد مقدار آن بیشینه شود. پس ممکن است بتوان ضخامت لایه مرزی در درون حفرات را در جریان‌های غیرماندگار به صورت تابعی از ویژگی‌های جزر و مدی آب دریا تلقی کرد. در یک بیان ساده‌شده ممکن است ضخامت لایه‌ی مرزی برای جریان‌های غیرماندگار در محیط‌های متخلخل دانه‌ای بین یک بیشینه (که همسان با ضخامت لایه‌ی مرزی در جریان‌های ماندگار باشد) و رقمی نزدیک به صفر فرض شود.

با فرض قابل اثبات بودن نظریه‌ی بالا، تغییرات ضخامت لایه‌ی مرزی سبب می‌شود هندسه حفرات محیط متخلخل تغییر کرده و در نتیجه ضرایب  $\alpha_0, \beta_0$  نیز (که در مطالعات آزمایشگاهی به صورت ضرایب اصلاحی به رابطه فورس‌هایمر تحمیل شده‌اند و برآورد آن‌ها معیار تئوری نداشته است) تغییر کند. چگونگی تغییرات این ضرایب باید

قطر مویینه‌ها در نتیجه‌ی گسترش لایه‌ی مرزی منجر به کاهش تخلخل مؤثر آن محیط می‌شود. به طوری که در صورت حذف بخش اشغال‌شده با لایه‌ی مرزی، قطر مؤثر حفره به کمک رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۲].

$$d_{pr} = \frac{d_p - 2\delta^*}{d_p} \quad (12)$$

$$d_p = \frac{4n}{1-n} \frac{d}{6}$$

$d_{pr}$  قطر باقی‌مانده از مویینه (حفره‌ی) پس از گسترش لایه‌ی مرزی ( $\delta^*$ )،  $d_p$  قطر اولیه حفره‌ی،  $d$ ، قطر دانه و  $n$ ، تخلخل ژئوتکنیکی است. با توجه به این‌که جریان‌های بررسی شده در پژوهش‌های پیشین بیشتر در رینولدزهایی کمتر از ۲۰۰۰ انجام شده و آغاز آشفته‌شدن لایه‌ی مرزی در رینولدزی حدود  $3 \times 10^5$  رخ می‌دهد [۱۷، ۱۸] می‌توان ضخامت جابه‌جایی لایه‌ی مرزی ( $\delta^*$ ) را از روابط حاکم در شرایط آرام محاسبه کرد [۱۷]:

$$\delta^* = \frac{1.73L}{\sqrt{\text{Re}_L}} \quad (13)$$

که در آن  $L$  شاخص طول و  $\text{Re}_L = \frac{VL}{\nu}$  است.

بدین ترتیب در جریان ماندگار، تخلخل مؤثر متناظر با قطر باقی‌مانده مویینه‌ها پس از حذف لایه مرزی از سطح در اختیار جریان، به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$n_r = n \left( \frac{d_p - \delta^*}{d_p} \right)^2 \quad (14)$$

با چنین استدلالی، تخلخل مؤثر تابعی از ضخامت لایه مرزی است و ضخامت لایه مرزی نیز خود تابعی از رژیم جریان است. بنابراین در شرایطی که رژیم جریان در محیط متخلخل، تغییراتی گسترده را تجربه می‌کند (مثلاً در سازه‌های توده‌سنگی دریایی که رژیم جریان غیرماندگار است) تخلخل



محاسبه شده با رابطه‌ی (۱۱) دانست. این در حالی است که کارمن (۱۹۳۷) و بار (۱۹۹۴) ضریب  $\alpha_0$  را در محیط‌های مختلف، تقریباً ثابت و برابر عدد ۵ دانسته‌اند [۱۹،۲۱].

نتایج آزمایش‌های احمد و سونادا (۱۹۶۷) و سوبا (۱۹۶۹) که بیشتر متمرکز بر جریان‌های غیرخطی ماندگار در محیط‌های ماسه‌ای است، نشان داده است ضریب  $\alpha_0$  ممکن است ۱ تا ۳ برابر مقدار گزارش شده به وسیله‌ی کارمن (یعنی مقدار ثابتی چون ۵) تغییر کند. در حالی که مشاهدات آزمایشگاهی شکری و قاسمی در جریان‌های غیرخطی غیرماندگار در محیط‌های درشت‌دانه حاکی از وجود ضرایبی ۵ تا ۷ برابر مقدار گزارش شده به وسیله‌ی کارمن است. نتایج آزمایشگاهی مک‌کورکودیل و هنورا روی جریان‌های غیرخطی ماندگار در محیط‌های درشت دانه نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب  $\alpha_0$  از ۰/۳۵ تا ۳ برابر مقدار گزارش شده به وسیله‌ی کارمن است [۱۱] که این مقدار در نتایج شکری و قاسمی از ۱/۷۷ تا ۵ برابر تغییر می‌کند [۱۰،۱۳]. نمودار تغییرات ضریب بالا در جریان‌های ماندگار و غیرماندگار به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است.

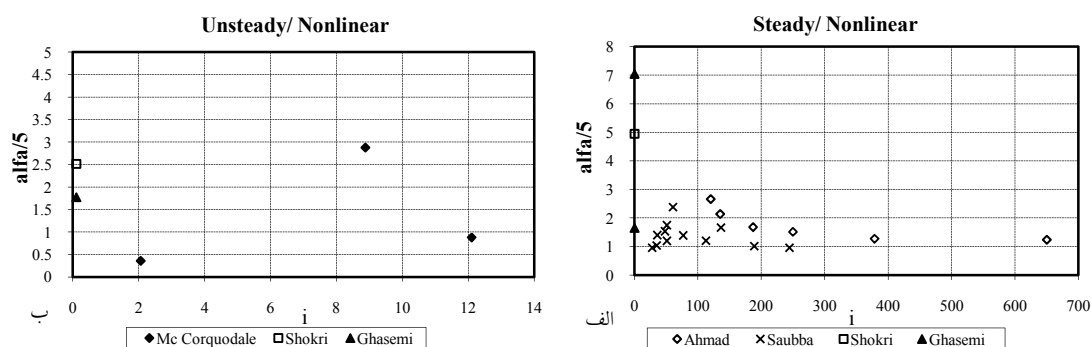
ضریب  $\beta_0$  نیز در آزمایش‌های ماندگار و غیرماندگار متأثر از مقدار ضرایب اصطکاک ( $f$ ) و پیچ و خم حفرات ( $T$ ) تغییر می‌کند که چگونگی تغییرات آن در جریان‌های غیرخطی ماندگار و غیرماندگار به ترتیب در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) مشاهده می‌شود.

به عنوان توصیف‌کننده‌ی جریان در این محیط‌ها بررسی شود. اگر فرض شود تخلخل در آزمایش‌های انجام شده صحیح اندازه‌گیری شده باشد، می‌توان با داشتن آن همراه سایر خصوصیات ژئوتکنیکی محیط متخلخل و ضرایب  $a, b$  فورس‌هایمر که به روش آزمایشگاهی به دست آمده است، مقادیر  $\beta_0, \alpha_0$  در این محیط‌ها را به کمک روابط  $\frac{3}{4}\beta_0 \frac{(1-n)}{gn^3d}$  و  $36\alpha_0 \frac{(1-n)^2v}{gn^3d^2}$  محاسبه کرد. مثلاً مک‌کورکودیل و هنورا مقدار ضرایب  $a, b$  فورس‌هایمر را به شرح جدول (۱) ارائه دادند که با اعمال تخلخل و قطر مؤثر محیط بر آن‌ها، می‌توان ضرایب  $\alpha_0, \beta_0$  را محاسبه کرد.

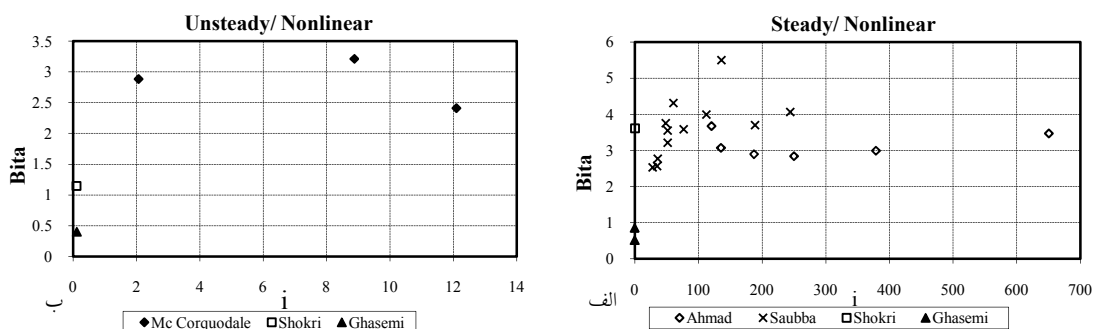
با توجه به رابطه‌ی تئوری به دست آمده، برای ضرایب  $\alpha_0, \beta_0$  به صورت  $fT^3$  و  $C_0T^2$ ، بنا بر انتظار، تیزگوشه‌تر بودن دانه‌ها که سبب افزایش ضرایب اصطکاک ( $f$ ) و پیچ و خم حفرات ( $T$ ) می‌شود، ضریب  $\beta_0$  را افزایش داده است. در حالی که وجود ضریب شکل حفرات ( $C_0$ ) در رابطه‌ی  $\alpha_0$  سبب شده چگونگی تغییرات آن قابل پیش بینی نباشد، چرا که ضریب شکل حفره متأثر از عوامل متعددی چون شکل دانه‌ها، نسبت قطر آن‌ها و نیز نحوه‌ی چیدمان دانه‌ها است. البته اگر از  $\alpha_0$  به دست آمده در شن رودخانه‌ای ۷۹/۲ میلی‌متری چشم‌پوشی شود، به نظر می‌رسد با افزایش ضریب شکل دانه‌ها، ضریب  $\alpha_0$  نیز افزایش می‌یابد. اگرچه تشخیص دقیق‌تر چگونگی تغییرات این ضرایب مستلزم وجود داده‌های آزمایشگاهی بیشتری است، ولی با توجه به بازه‌ی وسیع تغییرات  $\alpha_0$ ، می‌توان این ضریب را از عوامل مهم بروز خطا در شیب هیدرولیکی

جدول (۱) ضرایب  $\beta_0, \alpha_0$  به دست آمده از آزمایش‌های پیشین [۱۱]

$\beta_0$	$\alpha_0$	$b(s^2/cm^2)$	$a(s/cm)$	تخلخل ( $n$ )	ضریب شکل	اندازه متوسط ( $mm$ )	نوع مصالح
۱/۱۵۸	۱۶۱/۱۸	$6 \times 10^{-5}$	$26 \times 10^{-4}$	۰/۴۶۴	۱/۳۱	۷۹/۲	شن رودخانه‌ای
۲/۴۱	۴/۳۸	$191 \times 10^{-5}$	$66 \times 10^{-4}$	۰/۳۴۲	۱/۵۹	۱۵/۹	شن رودخانه‌ای
۲/۸۸	۱/۷۷	$33 \times 10^{-5}$	$1/2 \times 10^{-4}$	۰/۴۴۱	۱/۵۶	۴۳/۶	سنگ شکسته
۳/۲۱	۱۴/۳۷	$138 \times 10^{-5}$	$102 \times 10^{-4}$	۰/۴	۱/۹۲	۱۶/۷	سنگ شکسته



شکل (۳) تغییرات ضریب  $\alpha_0$  با شیب هیدرولیکی در (الف) جریان‌های غیرخطی ماندگار و (ب) جریان‌های غیرخطی غیرماندگار

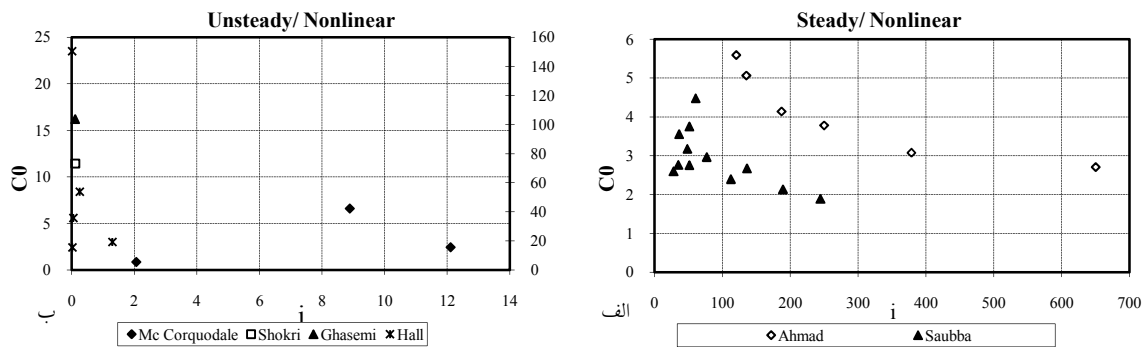


شکل (۴) تغییرات ضریب  $\beta_0$  با گرادیان هیدرولیکی در (الف) جریان‌های غیرخطی ماندگار و (ب) جریان‌های غیرخطی غیرماندگار

پژوهش‌های انجام‌شده در مورد جریان‌های غیرخطی ماندگار و غیرماندگار به ترتیب در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در شیب‌های کوچک، ضریب شکل حفره در جریان‌های غیرخطی ماندگار و یا غیرماندگار بیشتر از عدد  $2/5$  است که به وسیله‌ی کارمن گزارش شده است. ولی با افزایش شیب هیدرولیکی جریان این ضریب به حدود  $2/5$  کاهش می‌یابد. به طوری که بیشترین مقدار ( $C_0$ ) در جریان‌های غیرخطی ماندگار در ماسه‌ها حدود  $5/5$  و در جریان‌های غیرخطی غیرماندگار در درشت‌دانه‌ها حدود  $23/6$  به دست آمده است [۲۳].

اگر همه‌ی پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه‌ی ضریب  $b$  فورس‌هایمر با استفاده از رابطه‌ی  $(\frac{3}{4} f T^3 \frac{1-n}{gn^3 d})$  معلوم باشد، همچنین اگر بتوان ضریب اصطکاک ( $f$ ) را نیز با رابطه‌ی پیشنهادی احمد و سونادا ( $1 + \frac{1}{Re}$ ) محاسبه کرد، در این صورت ممکن است با داشتن ضریب  $b$  فورس‌هایمر مشاهداتی، ضریب  $T$  محیط را به دست آورد. سپس با استفاده از  $T$  و ضمن بهره‌گیری از رابطه پارامتریک ضریب  $a$  فورس‌هایمر  $(36C_0 T^2 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2})$  ضریب شکل حفره ( $C_0$ ) گزارش‌شده به وسیله‌ی کارمن (که مقدار آن را به صورت تجربی در حفرات غیردایره‌ای شکل برابر  $2/5$  است) را در همان محیط‌های به دست آورد. یافته‌های چنین بررسی‌ای با اتکا به یافته‌های



شکل (۵) تغییرات ضریب شکل حفرات ( $C_0$ ) با شیب هیدرولیکی در (الف) جریان‌های غیرخطی ماندگار و (ب) جریان‌های غیرخطی غیرماندگار

بدون توجه به رابطه‌ی فورس‌هایمر و به کمک آنالیز ابعادی به مطالعه‌ی این جریان‌ها پرداخته است. از آنجا که شکری هر دو نوع جریان غیرخطی ماندگار و غیرماندگار را در یک محیط متخلخل ثابت مطالعه کرده است، می‌توان به کمک نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی وی چگونگی تغییرات ضرایب  $a, b$  فورس‌هایمر را ارزیابی کرد. مطالعات شکری بیانگر تغییر ضرایب  $a, b$  فورس‌هایمر با غیرماندگار شدن جریان است؛ به طوری که وی رابطه‌ی شیب جریان غیرخطی ماندگار را به صورت  $i = 4.3V + 224.6V^2$  و شیب جریان غیرخطی غیرماندگار را به صورت  $i = 2.19V + 71.45V^2 + 3.12E-5t$  ارائه کرده است [۱۰].

شکری شیب هیدرولیکی متوسط محیط در برابر جریان‌های ماندگار را حدود  $0.33$  به دست آورده که این مقدار در جریان‌های غیرماندگار به  $0.11$  کاهش یافته است. این رفتار به معنای کاهش مقاومت محیط در برابر جریان غیرماندگار نسبت به جریان‌های ماندگار است. چنین به نظر می‌رسد که با غیرماندگار شدن جریان، طبیعت رفت و برگشتی جریان سبب شده ضخامت لایه‌ی مرزی کاهش یافته و تخلخل محیط (با وجود ثابت باقی ماندن اسکلت صلب آن) افزایش یابد. به دیگر سخن، نتایج شکری تأیید ضمنی نظریه‌ی تبعیت تخلخل محیط از رژیم جریان است. از طرفی اگر

آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی هال مقادیر بزرگی برای ضریب شکل حفره ( $C_0$ ) در اختیار می‌نهند به طوری که بر خلاف انتظار، این ضریب از  $15$  تا  $150/5$  تغییر کرده است [۹]. با توجه به این که مقادیر ( $C_0$ ) به دست آمده از آزمایش‌های هال بزرگتر از مقدار مشابه حاصل شده از نتایج مک‌کورکودیل، شکری و قاسمی است، برای نمایش چگونگی تغییرات این ضریب در نتایج وی از محور قائم دوم کمک گرفته شده است. اگرچه داده‌های موجود برای بیان یک رابطه‌ی ریاضی که بتواند ضریب شکل حفره را تعریف کند، کافی نیست ولی به نظر می‌رسد ضریب  $C_0$  تابعی نمایی از شیب هیدرولیکی جریان به صورت  $(C_0 = 2.5 + i^{-B})$  باشد که توان  $B$  در آن تابعی از محیط بررسی شده است. بدین ترتیب وقتی شیب هیدرولیکی بسیار بزرگ باشد، ضریب  $C_0$  به سمت  $2/5$  میل خواهد کرد. معتبر بودن این نظریه به معنای تغییرات ضریب  $a$  رابطه‌ی فورس‌هایمر با تغییرات شیب هیدرولیکی جریان است که اثبات آن مستلزم تحقیقات گسترده‌تری در این زمینه است.

از بین محققینی که جریان‌های غیرخطی غیرماندگار را در محیط‌های متخلخل مطالعه کرده‌اند، مک‌کورکودیل و هنورا فرض کرده‌اند که ضرایب فورس‌هایمر با غیرماندگار شدن جریان، بدون تغییر باقی بماند؛ هال نیز

آزمایش‌های تمام مقیاس بیشتری در آینده خواهد بود.

## ۶- فهرست علائم

$a, b, c$	ضرایب رابطه‌ی فورس‌هایمیر تعمیم‌یافته
$B$	توان تجربی
$C_0$	ضریب شکل حفره
$C_{ck}$	ثابت کارمن-کوزینی
$C_m$	اثر جرم مجازی اضافه‌شده
$Cu$	ضریب یکنواختی دانه‌بندی محیط متخلخل
$d$	اندازه‌ی بارز دانه
$d_{pr}$	قطر حفره‌ی باقی مانده ناشی از گسترش لایه‌ی مرزی
$d_p$	قطر حفره‌ی اولیه
$f$	ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ
$g$	شتاب ثقل
$h$	بلندا
$i$	شیب هیدرولیکی
$K$	نفوذپذیری
$L_0$	طول واقعی حفره
$L$	طول ظاهری حفره
$n$	تخلخل
$n_r$	تخلخل کاهش‌یافته
$S_0$	سطح ویژه‌حجمی
$T$	پیچ و خم حفرات
$V_p$	سرعت جریان در حفره
$v$	گرانروی سینماتیکی
$\alpha, \beta$	ضرایب ارگان
$\frac{\partial V}{\partial t}$	شتاب لحظه‌ای جریان
$\frac{\partial V}{\partial x}$	شتاب انتقالی
$\delta^*$	ضخامت جابه‌جایی لایه‌ی مرزی

رابطه‌ی نمایی  $C_0 = 2.5 + i^{-B}$  معتبر فرض شود، کاهش شیب هیدرولیکی با غیرماندگار شدن جریان عبوری از یک محیط مفروض، سبب کاهش ضریب شکل حفره و در نتیجه کاهش ضریب  $a$  رابطه‌ی فورس‌هایمیر می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت برآورد صحیح شیب هیدرولیکی جریان گذرنده از هسته‌ی سازه‌های توده‌سنگی در طراحی آن‌ها، می‌توان برای محاسبه‌ی شیب هیدرولیکی از روش‌های آزمایشگاهی و یا تئوری استفاده کرد. در صورت استفاده از مدل‌های هیدرولیکی باید از دقت اندازه‌گیری تخلخل در مدل‌ها، اطمینان حاصل شود. این در حالی است که تعیین دقیق مقدار تخلخل مؤثر به کمک روش‌های آزمایشگاهی موجود امکان‌پذیر نیست. از طرفی پرهزینه و وقت‌گیر بودن ساخت مدل‌های هیدرولیکی برای انجام مطالعات آزمایشگاهی سبب شده روابط تئوری همچون رابطه‌ی فورس‌هایمیر سه‌جمله‌ای در محاسبه‌ی شیب هیدرولیکی مطلوبیت ویژه‌ای داشته باشد. استفاده از رابطه‌ی فورس‌هایمیر سه‌جمله‌ای مستلزم برآورد ضرایب  $a, b, c$  است که با توجه به نقش مهم تخلخل در محاسبه‌ی ضرایب یادشده، به نظر می‌رسد تفاوت ضرایب به‌دست‌آمده از روش تئوری با مقادیر گزارش‌شده در مطالعات آزمایشگاهی، ناشی از متفاوت بودن تخلخل اعمال شده به رابطه با تخلخل واقعی محیط باشد. در این مقاله با تاکید بر این‌که گسترش لایه‌ی مرزی، فضای موجود برای عبور جریان را تغییر می‌دهد، تخلخل و شکل حفره توابعی از شیب هیدرولیکی جریان گذرنده از محیط بیان شده است. در صورت اعتبار این نظریه، فرض ثابت بودن ضرایب یاد شده در یک محیط متخلخل معلوم، صحیح نیست و درک چگونگی تغییرات آن‌ها با رژیم جریان مستلزم انجام

## ۷- مراجع

- Waterways, Ports, Coastal Ocean Eng., ASCE 104, 1978, pp.191-200.
- [12] Ahmed, N. and Sunada, D. K., "Nonlinear flow in porous media" ASCE J. of Hydraulics division, 95, HY 6, 1969, pp. 1847-1857.
- [۱۳] قاسمی، ع.، "بررسی پارامترهای مؤثر بر جریان غیردائم و غیرخطی در محیط‌های متخلخل" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.
- [14] Vukovic, M., Soro, A., "Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition", Water Resources Publications, Littleton, CO, 1992.
- [15] Istomina V. S., "Seepage Stability of the Soil", Moscow 1957.
- [16] Shames, Irving H., "Mechanics of Fluids", 4. th. Edition, McGraw Hill.
- [17] Wilson K., Cross R. H., "Scale Effects in Rubble Mound Breakwaters", Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, 1972, pp. 1873-1884.
- [18] Hansen, M., Naca, T.M. 585, "Velocity Distribution in the Boundary Layer of a Submerged Plate", 1930.
- [19] Carman, P. C. Fluid Flow through Granular Beds. Trans. Inst. Chem. Eng., Vol. 15, 1937.
- A. E. Scheidegger, Physics of flow through porous media Revised Edition Macmillan. Co., New York, 1960.
- [20] Barr, D.W., "Turbulent Flow Through Porous Media", Ground Water J., Vol. 39, No. 5, 2000, pp.646-650.
- [۲۱] نظافت‌خواه، ص.، "بررسی ارزیابی کاربرد تئوری اصلاح‌شده فورس‌هایمر برای تحلیل جریان آشفته غیرماندگار در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.
- [1] Van Gent, M. R. A., "Porous Flow Through Rubble-Mound Material", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 121, No. 3, pp. 176-181, 1995.
- [2] US Department of the Navy. Harbors Design Manual, DM 26.1, Alexandria, VA, 1984
- [3] Tsinker, G. P., Port Engineering; Planning, Construction, Maintenance and Security, John Wiley & Sons, Inc, N J., 2004.
- [4] US Army Corps of Engineers, Design of Breakwaters and Jetties, USACE, Washington, DC., 1986.
- [5] Barends, F. J. , Holscher, P., Modeling interior process in breakwater, Delft Geotechnics, Breakwaters- Design and Construction Congress, Presented at the proceedings, 1988.
- [6] Hedar, P. A, Stability of Rock fill breakwaters, Doctoral Thesis University of Goteburg Sweden, 1960.
- [7] Van der Meer, Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis approved by Delft University of Technology, The Netherlands, 1988a.
- [8] De Groot, M.B., Yamzaki, H., Van Gent, Kheyruni, Z., "Pore pressures in rubble mound breakwaters" Breakwaters- Design and Construction Congress, Presented at the proceedings, 1988.
- [9] Hall, K. R., Smith, G. M. and Turcke, D. J. "Development of a non-linear Porous Media Relationship for Oscillatory Unsteady Flow, J. Coastal Research, Vol. 10, No. 1, 1994, pp. 158-169.
- [۱۰] شُکری، م.، "بررسی پارامترهای مؤثر بر جریان غیردائم و غیرخطی در محیط‌های متخلخل" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- [11] Hannoura, A.A. and Mc. Corquodale, I.A. "Virtual mass of coarse granular media" J.

- [22] Abhabhirama, A., Dinoy, A., "Friction Factors and Reynolds Number in Porous Media", ASCE J. Hyd. Div., HY6, 1973, pp. 907-911.
- [۲۳] نطافت‌خواه، ص.، طاهرشمسی، ا. "بررسی اعتبار روش معمول تحلیل غیرخطی جریان در سنگریزها برای شرایط غیرماندگار"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، ایران، تهران، ۱۳۸۶، ص ص ۶۹۰.

# Concept of “Variable Porosity” In Nonlinear Analysis of Unsteady Flow within Marine Rubble Mound Structures

H. O. Bayat<sup>1\*</sup>, S. Nezafatkhan<sup>2</sup>

1- Associate Prof., Amirkabir University

2- M.Sc., Amirkabir University

byatt@aut.ac.ir

## Abstract:

Nowadays, several investigators pay attention to the rubble mounds among coastal structures due to their economic superiority over other types of in-shore structures and ease of construction in the marine environment. However, in order to guarantee a reliable design for such heavy structures, it is certainly necessary to have a sound understanding of the hydraulic nature of the unsteady- nonlinear flow's parameters controlling the rubble mounds response to the wave loadings. One of the basic uncertainties in determining hydraulic pressure gradient variations is known to be porosity of the media that should be estimated reliably.

To cast light on the aforementioned issue, in the absence of up-to-date research works in the literature, a comprehensive investigation has been carried out in the Civil Engineering Department, Amirkabir University of Technology (Tehran, Iran). This paper reviews part of our research findings and points out that the conventional mathematical models for non-linear analysis of unsteady flow through coarse porous media are unable in precisely predicting the hydraulic gradient of flow within rubble mounds. The purpose of this paper is four folds:

a. To study the state-of-the-art of mathematical modeling of the flow in coarse porous media:

- Firstly, Carman-Kozeny mathematical model is investigated in the steady transient flow;
- Secondly, the Forschheimer equation is investigated, where the second term shows the effect of turbulence (still) in steady flow;
- Thirdly, a sound literature review is carried out to show the investigators' view point on the third term that should be added to the Forschheimer equation to represent the impact of unsteadiness in unsteady non-transient flow in coarse porous media.

b. To show the determining role of porosity in calculating the value of hydraulic pressure gradient:

- After studying the distribution of errors amongst the parameters of the currently used mathematical models, it is shown that, to a large extent, an error in the value of hydraulic pressure gradient stems from the error in porosity.

c. To show that mathematical models fail to determine correct values of Forschheimer coefficients:

- The calculated values of Forschheimer coefficients are compared with the experimental results.
- Discrepancies between the two values are shown on diagrams.

d. To introduce the novel concept of effective porosity:

- Effective porosity is introduced as the available space for the flow;
- - In that sense, porosity should be determined not only based on geotechnical parameters but also it has to be regarded as a function of flow regime.

It is also shown that contrary to the dominant opinion, which introduces porosity as a geotechnical property, it may be affected by flow regime through variations in the *effective pore volume* and *effective shape factor*. In a numerical justification of findings, it is shown that unsatisfactory results, obtained from non-linear mathematical models of unsteady flow, may be due to unreliable porosity estimates.

**Keywords:** Rubble mound, Unsteady non-linear flow, Porosity estimation