

# بررسی اثر مقیاس در مطالعه آزمایشگاهی جریان‌های غیرداری غیرماندگار گذرنده از موج‌شکن‌های توده سنگی

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

۱- دانشجوی تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

sadafnez@aut.ac.ir

**چکیده** - نقش مهم روند تغییرات فشار حفره‌ای در مصالح هسته سازه‌های توده سنگی حجیم مانند موج‌شکن‌ها بر پایداری این نوع سازه‌های هیدرولیکی، سبب شده که یافته‌های مطالعات مدل‌های مقیاس‌دار آنها - که بدون در نظر گرفتن معیار رینولدز طراحی می‌شوند - به شکل ابهام‌هایی جدی در تحلیل این سازه‌ها ظاهر شود. در مقاله حاضر با استفاده از نتایج مطالعه تحلیلی جریان‌های گذاری غیرماندگار گذرنده از محیط‌های متخلخل درشت دانه، روشی برای مدل‌سازی صحیح این جریان‌ها بر اساس تشابه پاسخ هیدرولیکی مدل و نمونه ارائه شده است. به منظور برآورد گرادیان هیدرولیکی در جریان‌های گذاری غیرماندگار، از رابطه سه جمله‌ای حاصل از تعمیم معادله فورس‌هایمر استفاده شده است. در این راستا و با اتکا به مدلی غیرخطی، نشان داده شده که نسبت مقیاس بین اندازه سنگدانه‌ها نمی‌تواند عددی ثابت باشد و متناسب با تغییر رژیم جریان عبوری از محیط متخلخل، توان آن دستخوش تغییر می‌شود. در انتها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی منتشر شده توسط محققان پیشین، سعی شده که گستره اعتبار روش پیشنهاد شده در این پژوهش و توانایی آن در تفسیر صحیح نتایج آزمایشگاهی برآورد شود.

**کلیدواژه‌گان:** اثر مقیاس، جریان غیرخطی غیرماندگار، موج شکن‌های توده سنگی.

## ۱- مقدمه

است. از طرفی پاسخ هیدرولیکی این نوع محیط‌های متخلخل درشت دانه متناظر با اندازه سنگدانه تشکیل دهنده سازه است تا بتواند در برابر حملات موج و نوسانهای سطح آب در طی جزر و مد مقاومت کند. بنابراین برای تحلیل‌های مورد نظر به آگاهی از چگونگی اثرگذاری شرایط بحرانی برخورد امواج ناشی از توفان

به خلاف روشهای متداول و سراسر تحلیل، در مطالعه برخی سازه‌های ساحلی مانند شمعها، سپرها و سازه‌های بزرگ غرق شده، تحلیل پایداری و تنش- کرنش سازه‌هایی مانند موج شکن‌های دانه‌ای، به آگاهی از چگونگی تغییر فشار حفره‌ای در خلل و فرج آنها نیاز

نیروهای مؤثر بر ایجاد جریان در محیط‌های متخلخل، لازم است ابتدا نوع رژیم جریان تعیین و بر اساس آن مدل‌سازی محیط انجام شود.

یکی از معیارهای شناسایی رژیم جریان، عدد رینولدز است که برخی از محققان با فرض اعتبار آن به‌عنوان شاخص تعیین نوع جریان، سعی کرده‌اند مقدار مشخصی از آن را به‌عنوان مرز رویداد جریان بینابینی و غیرخطی ارائه دهند. دای و کاملز<sup>۵</sup> (۱۹۶۹)، شیمادا<sup>۶</sup> (۱۹۸۶) و ون در میر<sup>۷</sup> به‌ترتیب عددهای  $3 \times 10^4$ ،  $4 \times 10^5$  و  $4 \times 10^4$  را مرز بین جریان کاملاً غیرخطی و بینابینی دانسته و بیان کردند که برای عددهای رینولدز بزرگتر از این مقادیر، معیار فرود جریان به‌تنهایی برای ساخت مدل‌های هیدرولیکی کافی است (به نقل از استون، ۱۹۹۳). لیکن با کمی تأمل در عددهای گزارش شده توسط محققان پیشین، چنین استنباط می‌شود که مرز بین جریان کاملاً غیرخطی و بینابینی، عدد مشخصی نیست، بلکه متناسب با دیگر شرایط حاکم، این مقدار دستخوش تغییر می‌شود (هال، ۱۹۹۱). بنابراین اگرچه استفاده از مدل‌های مقیاس‌دار فیزیکی یکی از متداول‌ترین روش‌های مطالعه جریان در سازه‌های توده سنگی است، اما چگونگی انتخاب مقیاس و نیز تعیین نوع جریان، مسائلی است که استفاده از این روش مطالعاتی را با مشکل روبه‌رو کرده است. در ادامه پس از بررسی دقیق‌تر اثر مقیاس در این سازه‌ها، روشی برای مدل‌سازی صحیح پیشنهاد شده است.

## ۲- بررسی اثر مقیاس در مدل‌های فیزیکی هسته موج‌شکن‌ها

وجود پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری متعدد در مدل‌های

طراحی و نوسانهای جرم ناشی از آن نیاز است. از دیدگاه مکانیک سیالات، درشت بودن دانه‌ها در این نوع سازه‌ها از یک سو و دامنه خاصی از سرعت درون حفره‌ای جریان عبوری از آنها از سوی دیگر سبب می‌شود که معیار رینولدز جریان، علاوه بر معیار فرود، اهمیت داشته باشد. بررسی‌های متعددی نشان داده است که جریان در لایه‌های محافظ موج شکن‌ها از نوع کاملاً غیرخطی بوده و نیروهای لزجت‌گونه سهمی در مقاومت در برابر جریان ندارند (هال، ۱۹۹۱). به‌همین دلیل برای مدل‌سازی این بخش از موج شکن‌های توده سنگی، استفاده از معیار فرود به‌تنهایی کاملاً منطقی به نظر می‌رسد، زیرا مصالح از نوع کاملاً زهکشی شده<sup>۱</sup> بوده و پراکنش فشار حفره‌ای به‌صورت آبی<sup>۲</sup> رخ می‌دهد (مدسن، ۱۹۷۴). اما از آنجا که هسته این سازه‌ها از دانه‌های نسبتاً ریزتری ساخته می‌شود، سرعت جریان در خلل و فرج هسته بسیار کمتر از لایه‌های محافظ بوده و رژیم جریان عبوری از این منطقه از نوع بینابینی<sup>۳</sup> به‌شمار می‌رود (استون، ۱۹۹۳). بنابراین در هر مطالعه مدل مقیاس‌دار صحیح باید هر دو معیار رینولدز و فرود در نظر گرفته شود (استون، ۱۹۹۳). در چنین جریان‌هایی اگر مدل‌سازی فقط براساس معیار فرود انجام شود، عدم تشابه نیروی گرانی در دو محیط سبب می‌شود که نتایج به‌دست آمده از مطالعه جریان در مدل مقیاس‌دار قابل تعمیم به محیط اصلی نباشد. غیرقابل تعمیم بودن نتایج به‌دست آمده از مدل مقیاس‌دار برای محیط‌های واقعی -که ناشی از استفاده از قوانین مقیاسی نادرست است- با نام اثر مقیاس<sup>۴</sup> شناخته می‌شود (USBR, 1980). همان‌گونه که در دینامیک سیالات محیط‌های متخلخل تشریح می‌شود، برای ورود به بحث

1. Free-draining
2. Instantaneous
3. Transitional
4. Scale effect

5. Dai & Kamels  
6. Shiamda  
7. Van der Meer

موج‌شکن‌ها در جدول ۱ آورده شده باشد، تابعی به شکل زیر بین آنها قابل بیان است:

$$f(V, H, L, h, \delta, \theta, g, \rho, \rho_a, L_a, \mu, \xi_a, \gamma, \Delta, D) = 0 \quad (۱)$$

شش متغیر اول در این رابطه مربوط به امواج بوده و چهار متغیر بعدی برای تعریف شناوری سنگدانه‌ها (مقاومت در برابر ثقل) ارائه شده است. متغیرهای  $\mu$  و  $\xi_a$  به ترتیب مربوط به نیروهای لزجت و اصطکاک بوده و  $\gamma$  و  $\Delta$  هندسه سازه را توصیف می‌کنند. با توجه به اینکه معادله ریاضی وجود ندارد که بتواند رفتار موج شکن‌ها را در هنگام برخورد امواج توصیف کند، دستیابی به روابط تشابه در این سازه‌ها مستلزم تحلیل ابعادی در آنها است. یکی از مجموعه ترکیبهای ممکن برای پارامترهای بی بعد توسط هادسن (۱۹۷۹) به شرح زیر ارائه شده است (به نقل از استون، ۱۹۹۳):

$$F\left(\frac{l_a}{h}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \gamma, \delta, \Delta, \theta, \frac{V}{\sqrt{gl_a}}, \frac{V l_a}{\mu}, \frac{\xi_a}{l_a}, \frac{\rho}{\rho_a - \rho}, D\right) \quad (۲)$$

با فرض کردن  $D$  به عنوان پارامتر وابسته، تشابه کامل خسارت در صورتی در مدل فیزیکی حاصل می‌شود که هریک از پارامترهای بی بعد مستقل در رابطه (۲) در مدل و نمونه اصلی برابر باشند. در تساوی‌های زیر  $m$  نشان‌دهنده مدل و  $p$  نشان دهنده نمونه اصلی است:

$$\left(\frac{l_a}{h}\right)_m = \left(\frac{l_a}{h}\right)_p \quad (۳-الف)$$

$$\left(\frac{H}{L}\right)_m = \left(\frac{H}{L}\right)_p \quad (۳-ب)$$

$$\left(\frac{h}{L}\right)_m = \left(\frac{h}{L}\right)_p \quad (۳-ج)$$

$$(\gamma)_m = (\gamma)_p \quad (۳-چ)$$

$$(\delta)_m = (\delta)_p \quad (۳-ح)$$

$$(\Delta)_m = (\Delta)_p \quad (۳-خ)$$

$$(\theta)_m = (\theta)_p \quad (۳-د)$$

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gl_a}}\right)_m = \left(\frac{V}{\sqrt{gl_a}}\right)_p \quad (۳-ذ)$$

ریاضی موجود برای تحلیل جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه موجب شده که با وجود هزینه‌های سنگین اجرایی، استفاده از مدل‌های مقیاس‌دار فیزیکی برای مطالعه موج‌شکن‌های توده سنگی بسیار رایج باشد. هادسن<sup>۱</sup> (۱۹۷۹) یکی از محققانی است که با معرفی پارامترهای دخیل در پایداری سازه‌های توده سنگی به شرح زیر، تشابه مدل و نمونه اصلی را بر مبنای تشابه پایداری آنها با استفاده از روش تحلیل ابعادی بررسی کرده است. پارامترهای یاد شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ پارامترهای مؤثر در پایداری

موج‌شکن‌های توده سنگی [۲]

نماینه	توصیف
$h$	عمق آب در پنجه سازه
$D$	درصد خسارت وارد شده به لایه محافظ
$g$	شتاب ثقل
$H$	ارتفاع موج
$l_a$	اندازه بارز هر واحد آرمور (پوشش هسته)
$V$	سرعت آب در مجاورت هسته
$\gamma$	شیب شیروانی نسبت به افق در سمت دریا
$\delta$	زاویه موج نزدیک شونده به موج‌شکن
$\Delta$	شکل آرمورها (پوشش هسته)
$\theta$	شیب کف سازه به سمت دریا
$L$	طول موج
$\mu$	لزجت دینامیکی آب در مجاورت موج شکن
$\xi_a$	زبری بارز سطح آرمورها (پوشش هسته)
$\rho_a$	جرم مخصوص آرمورها (پوشش هسته)
$\rho$	جرم مخصوص آب در نزدیکی موج‌شکن

با فرض اینکه تمامی پارامترهای مؤثر بر پایداری

که در آن  $v, u$  به ترتیب سرعت جریان در جهت‌های  $x, y, \eta$  تراز سطح آب، و  $L$  طول موج است.

با توجه به پیش‌فرض بلند بودن امواج، تنش‌های سطحی قابل صرف‌نظر بوده و برای تشابه امواج گذرنده از مدل و نمونه اصلی، لازم است ضرایب روابط (۴) و (۵) - که به‌عنوان ضریب مقیاس شناخته می‌شوند - در دو محیط برابر باشند. از برابر قرار دادن ضریب مربوط به جمله فشار رابطه ناویر استوکس بی‌بعد شده در مدل و نمونه اصلی  $\left(\frac{gz}{V^2}\right)$  معیار فرود جریان به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$M \left( \frac{gz}{V^2} \right) = 1 \Rightarrow \frac{Mv}{\sqrt{MgML}} = 1 \quad (6)$$

از طرفی لزوم همسان بودن سازوکار نوسان در مدل و نمونه اصلی موجب می‌شود که ضریب مربوط به شتاب لحظه‌ای  $\left(\frac{X}{VT}\right)$  در دو محیط برابر باشد.

این ضریب به عدد اشتروهل (Strouhal) موسوم است که مقیاس زمان را به شکل رابطه زیر در اختیار می‌گذارد:

$$MT = \frac{MX}{\sqrt{MgML}} \quad (7)$$

رابطه (۷) بیان دیگری از معیار فرود جریان است. به بیان دیگر برابر بودن عدد فرود جریان در مدل و نمونه اصلی یکسان بودن سازوکار نوسان را در دو محیط نیز تضمین می‌کند.

$$\left(\frac{Vl_a}{\mu/\rho}\right)_m = \left(\frac{Vl_a}{\mu/\rho}\right)_p \quad (3-ر)$$

$$\left(\frac{\xi_a}{l_a}\right)_m = \left(\frac{\xi_a}{l_a}\right)_p \quad (3-ز)$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_a - \rho}\right)_m = \left(\frac{\rho}{\rho_a - \rho}\right)_p \quad (3-ژ)$$

هفت تساوی اول متأثر از هندسه محیط بوده و در مدل‌هایی معتبرند که به‌طور هندسی مقیاس زده شده باشند. دو معادله آخر به ترتیب بیانگر برابر بودن زبری سطح دانه‌ها و چگالی نسبی سنگدانه در مدل و نمونه اصلی است. برقراری معادلات (۳-ز) و (۳-ر) نشان‌دهنده تطابق نوع جریان در مدل و نمونه اصلی و مستلزم آن است که عدد رینولدز و عدد فرود جریان در دو محیط (مدل و نمونه) با یکدیگر برابر باشند.

با استفاده از روابط نظری نیز می‌توان لزوم برابری عدد رینولدز و عدد فرود جریان در مدل و نمونه را برای برقراری جریانی مشابه نشان داد. از طرفی، بنابر تعریف (استون ۱۹۹۳) امواج عبوری از هسته موج شکن‌ها در صورت داشتن نسبت  $\left(\frac{h}{L}\right)$  کوچکتر از  $\left(\frac{1}{20}\right)$ ، به‌عنوان موج بلند شناخته می‌شوند. لذا مسأله تشابه جریان باید برای آن دسته از امواجی که بلند تلقی می‌شوند، بررسی شود (مدسن، ۱۹۷۴).

اکنون ضمن محاسبه مومتم حرکت موج بلند در دو راستای متعامد  $x$  و  $y$  و بی‌بعد کردن متغیرهای دخیل در آن، می‌توان روابط بی بعد شده تکانه را به دست آورد (استون ۱۹۹۳). در راستای  $x$  رابطه (۴) و در راستای  $y$  رابطه (۵) را داریم:

$$\left(\frac{X}{VT}\right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + \hat{u} \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} + \hat{v} \frac{\partial \hat{u}}{\partial y} = -\left(\frac{gz}{V^2}\right) \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial x} + \left(\frac{\nu}{XV}\right) \left[ \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{X}{Z}\right)^2 \left(\frac{1}{\hat{h} + \hat{\eta}}\right) \frac{\partial \hat{u}}{\partial z} \right]_{-h}^{\eta} \quad (4)$$

$$\left(\frac{X}{VT}\right) \frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \hat{u} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x} + \hat{v} \frac{\partial \hat{v}}{\partial y} = -\left(\frac{gz}{V^2}\right) \frac{\partial \hat{\eta}}{\partial y} + \left(\frac{\nu}{XV}\right) \left[ \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{X}{Z}\right)^2 \left(\frac{1}{\hat{h} + \hat{\eta}}\right) \frac{\partial \hat{v}}{\partial z} \right]_{-h}^{\eta} \quad (5)$$

تعیین می‌شود. لیکن بر اساس آنچه که در بالا گفته شد، وقتی رژیم جریان، غیرداریسی اما از نوع بینابینی باشد، نقش نیروهای گرانو در اُفت انرژی قابل چشم‌پوشی نبوده و لازم است در مدل‌سازی‌ها علاوه بر معیار فرود به معیار رینولدز نیز توجه شود. برقراری تشابه رینولدز جریان ایجاد می‌کند که نسبت اندازه دانه‌ها با نسبت هندسی ( $\lambda$ ) متفاوت باشد. با استفاده از این نظریه، در ادامه مدلی برای محاسبه نسبت اندازه دانه‌ها در مدل‌هایی که برای مطالعه جریانهای بینابینی ساخته می‌شوند، ارائه شده است.

### ۳- ارائه مدلی برای برقراری تشابه مدل و نمونه (محیط اصلی)

از بحث بالا چنین نتیجه می‌شود که شرط دستیابی به تشابه رفتاری دو محیط متخلخل (مدل مقیاس‌دار و نمونه واقعی) برای تعمیم‌پذیری یافته‌های آزمایشگاهی، وجود پاسخ یکسان (در دو محیط) در برابر جریان یا برابری گرادیان‌های هیدرولیکی در آنها ضروری است.

از طرفی یکی از روابط مطرح برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی در جریانهای غیرخطی غیرماندگار، معادله سه‌جمله‌ای بدست آمده از بسط رابطه فورس‌هایمر است. با استفاده از نظریه شعاع هیدرولیکی، برخی محققان مانند هنورا و مک کورکودیل (۱۹۷۸) توانسته‌اند با اتکا بر یافته‌های ارگان (۱۹۴۹) شکل پارامتری رابطه سه جمله‌ای را برای شرایط غیرماندگار به صورت زیر ارائه کنند.

$$i = 36\alpha_0 \frac{(1-n)^2 v}{gn^3 d^2} V + \frac{3}{4} \beta_0 \frac{1-n}{gn^3 d} V^2 + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (10)$$

که در آن، جمله اول و دوم به ترتیب نمایانگر گرادیان هیدرولیکی جریان در شرایط کاملاً لایه‌وار و کاملاً آشفته بوده و جمله سوم به منظور اعمال اثر غیرماندگار بودن جریان اضافه شده است.

همچنین لازم است ضریب نیروهای برشی لزجت  $\left(\frac{v}{XV}\right)$  در مدل و نمونه اصلی برابر باشد که این به معنای برابر بودن عدد رینولدز جریان عبوری از مدل مقیاس‌دار و نمونه اصلی است. این مطلب را می‌توان به بیان ریاضی به صورت زیر ارائه کرد:

$$\frac{Mv}{MXMV} = 1 \quad (8)$$

ضریب مربوط به نیروهای برشی قائم  $\left(\frac{X}{Z}\right)$  نیز باید در مدل و نمونه اصلی برابر باشد که در صورت رعایت مقیاس هندسی، این معیار به خودی خود برقرار است و داریم:

$$\frac{MX}{MZ} = 1 \quad (9)$$

لذا برای مدل‌سازی صحیح جریان، ضرورت دارد که علاوه بر عدد فرود، عدد رینولدز جریان عبوری از محیط متخلخل مدل و نمونه اصلی نیز با یکدیگر برابر باشند. اما برابری همزمان این دو معیار در مدل‌های کوچک مقیاس ممکن نبوده و این مشکل اصلی در مدل‌سازی موج شکن‌ها است (استون، ۱۹۹۳).

برای حذف پیامدهای ناهنجاری فوق، برخی محققین مانند لمه<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) و کولگان<sup>۲</sup> (۱۹۷۳) (به نقل از استون، ۱۹۹۳) پیشنهاد کرده‌اند که نسبت اندازه سنگدانه، مقداری متفاوت از نسبت مقیاس هندسی در طراحی مدل مقیاس‌دار باشد. اما معمولاً برای کارهای متعارف مهندسی، مدل‌های فیزیکی جریانهای کاملاً غیرداریسی را با مقیاسی هندسی (قابل نمایش با  $\lambda$ ) و فقط بر اساس معیار فرود (بدون در نظر گرفتن عدد رینولدز) طراحی می‌کنند. در این مدل‌ها اندازه سنگدانه‌ها در آزمایشگاه با توجه به مقدار  $\frac{1}{\lambda}$ ، نسبت به اندازه سنگدانه‌های نمونه

1. Le Mehaute
2. Keulgan

بسیار بزرگ را پیشنهاد کرده‌اند که آشکارا غیرکاربردی و پرهزینه است (نظافت‌خواه، ۱۳۸۷).  
 در پژوهش حاضر به منظور دستیابی به قانونی برای مدل‌سازی صحیح جریان در دو محیط، از تساوی گرادیان هیدرولیکی محیطها استفاده شده است. برای این منظور ابتدا شرایط در مرزهای جریان بینابینی (جریان دارسی یا لایه‌وار و غیرخطی) - به‌طور نظری نشان داده می‌شود که مقیاس مدل در این شرایط چندان مشکل‌آفرین نیست - بررسی شده و سپس جریانهای بینابینی مطالعه شده است. برای طراحی مدل‌های فیزیکی سازه‌های هیدرولیکی معمولاً از روش شبیه‌سازی دینامیک (USBR (1980) استفاده می‌شود، که در صورت به‌کارگیری آن می‌توان مشاهده کرد که در جریانهای دارسی (لایه‌وار) با اعداد رینولدز کوچک، مقاومت در برابر عبور سیال، بیشتر ناشی از نیروهای لزجت بوده و جمله دوم رابطه (۱۰) قابل صرف‌نظر است. از برابر قرار دادن گرادیان هیدرولیکی در مدل و نمونه اصلی با رعایت معیار عدد فرود، نسبت اندازه دانه‌ها چنین محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{V}{d^2}\right)_m = \left(\frac{V}{d^2}\right)_p \quad (12)$$

$$\frac{d^2 p}{d^2 m} = \frac{V_p}{V_m}$$

که در آن نسبت  $\frac{V_p}{V_m}$  از معیار عدد فرود برابر  $\sqrt{\lambda}$  بوده و نسبت اندازه دانه در جریانهای کاملاً لایه‌وار به‌صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$\frac{dp}{dm} = \lambda^{1/4} \quad (13)$$

که در آن  $V$  سرعت جریان،  $dp$  قطر دانه‌های اصلی،  $dm$  قطر دانه‌های مدل مقیاس‌دار و  $\lambda$  عدد مقیاس هندسی مدل است.

از سوی دیگر، در جریانهای کاملاً آشفته - که سهم نیروهای لزجت در مقاومت در برابر عبور سیال قابل صرف‌نظر

اگر با استناد به قوانین مدل‌سازی موجود، مدل آزمایشگاهی موج شکن بر اساس معیار عدد فرود جریان و با مقیاس هندسی  $\lambda$  ساخته شود، نسبت سرعت جریان در طبیعت به مدل  $\left(\frac{V_p}{V_m}\right)$  و نسبت مقیاس زمان  $\left(\frac{T_p}{T_m}\right)$  با استناد به تشابه هندسی و معیار فرود برابر  $\sqrt{\lambda}$  به دست می‌آید.  
 از سوی دیگر، در مدلی که بر اساس معیار فرود جریان ساخته شده، با فرض یکسان بودن  $\alpha_0, \beta_0, n, g, \nu$  در مدل و نمونه اصلی، برابر بودن گرادیانهای هیدرولیکی دو محیط، به تساوی نسبتهای  $\frac{V}{T}, \frac{V^2}{d}, \frac{V}{d^2}$  در مدل و نمونه اصلی وابسته است. با اعمال معیار عدد فرود جریان، شرط تساوی عبارت  $\frac{V}{d^2}$  در دو محیط در صورت رعایت نسبت مقیاس  $\frac{\sqrt{\lambda}}{\lambda^2} = \lambda^{-3/2}$  محقق خواهد شد. در حالی که در نتیجه استفاده از همین معیار برای مدل‌سازی، عبارتهای  $\frac{V}{T}$  و  $\frac{V^2}{d}$  بدون هیچ شرطی در نمونه واقعی و مدل برابرنند، به‌طوری که نسبت آنها در نمونه واقعی به مدل به ترتیب برابر با  $\frac{(\sqrt{\lambda})^2}{\lambda} = 1$  و  $\frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{\lambda}} = 1$  به دست می‌آید. بیان ریاضی این موضوع چنین است:

$$\begin{cases} M\left(\frac{V}{d^2}\right) = \lambda^{-3/2} \\ M\left(\frac{V^2}{d}\right) = 1 \\ M\left(\frac{V}{T}\right) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

که در آن  $M$  نسبت مقیاس هر عبارت در نمونه واقعی به مدل است.

بدین ترتیب جمله اول رابطه (۱۰) - که مربوط به جریان کاملاً لایه‌وار است همواره مشکل مقیاس را خواهد داشت. به بیان دیگر تشابه کامل مدل مقیاس‌دار و محیط اصلی (بدون مقیاس) فقط در صورتی برقرار است که نسبت مقیاس ( $\lambda$ ) برابر (۱) باشد؛ یعنی مدل هم اندازه با نمونه ساخته شده باشد که این ناممکن است. لذا برخی محققان برای غلبه بر این مشکل، استفاده از مدل‌های

است- نسبت اندازه دانه‌ها چنین به دست می‌آید:

$$\left(\frac{V^2}{d}\right)_m = \left(\frac{V^2}{d}\right)_p$$

$$\frac{dp}{dm} = \left(\frac{V_p}{V_m}\right)^2$$

با اعمال نسبت سرعت به دست آمده از معیار فرود جریان  $\left(\frac{V_p}{V_m}\right)$  برابر  $(\sqrt{\lambda})$ ، به رابطه فوق نسبت اندازه دانه در محیط اصلی به مدل در جریان کاملاً آشفته چنین به دست می‌آید:

$$\frac{dp}{dm} = \lambda \quad (14)$$

همان‌طور که از روابط (۱۳) و (۱۴) برمی‌آید، نسبت اندازه دانه‌های نمونه اصلی به مدل در جریانهای داری برابر  $\lambda^{1/4}$  و در جریانهای غیرداری برابر  $\lambda$  است. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نسبت اندازه دانه‌ها در مدل‌های ساخته شده برای مطالعه جریانهای بینابینی همواره مقدار ثابتی نبوده و متناسب با رژیم جریان از  $\lambda^{1/4}$  تا  $\lambda$  تغییر می‌کند.

بر اساس رابطه (۱۳)، در مدلهایی که بر اساس معیار عدد فرود جریان ساخته می‌شوند و جریان گذرنده از آنها کاملاً لایه‌وار است، مدل‌سازی صحیح گرادیان هیدرولیکی مستلزم ساختن مدل‌هایی بسیار بزرگتر از مدل‌هایی است که جریان گذرنده از آنها کاملاً آشفته باشد. این نتیجه به دلیل مدل‌سازی بخش هسته موج‌شکن که معمولاً از دانه‌های نسبتاً ریز تشکیل شده از اهمیت زیادی برخوردار است.

در جریان گذرنده از هسته موج شکن‌ها، ریز بودن سنگدانه‌ها سبب می‌شود که نفوذپذیری در این ناحیه کمتر از نفوذپذیری لایه محافظ شود و در نتیجه سرعت و عدد رینولدز جریان گذرنده از این منطقه از مقدار مشابه در جریان آشفته کمتر باشد. بنابراین اگرچه مدل‌سازی موج‌شکن‌ها بر اساس معیار فرود انجام می‌شود، اما برای

شبیه سازی جریان گذرنده از هسته مدل موج‌شکن با سازه اصلی باید تغییراتی را در مدل‌سازی اعمال کرد. جریان گذرنده از این بخش نه کاملاً آشفته و نه کاملاً لایه‌وار، بلکه از نوع بینابینی و غیرماندگار است. به منظور شبیه‌سازی پاسخ هیدرولیکی دو محیط، گرادیان هیدرولیکی جریان گذرنده از آنها را -که با رابطه (۱۱) ارائه شد- برابر قرار می‌دهیم:

$$\frac{i_m}{i_p} = \frac{36\alpha_0 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3} \frac{V_m}{dm^2} + \frac{3\beta_0 (1-n) V_m^2}{4 gn^3 dm} + \frac{n}{g} \frac{\partial V_m}{\partial t_m}}{36\alpha_0 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3} \frac{V_p}{dp^2} + \frac{3\beta_0 (1-n) V_p^2}{4 gn^3 dp} + \frac{n}{g} \frac{\partial V_p}{\partial t_p}} = 1 \quad (15)$$

اگر نسبت اندازه دانه‌ها  $\left(\frac{dp}{dm}\right)$  برابر  $k'$  فرض  $(dp = k' dm)$  و با استفاده از معیار عدد فرود، سرعت جریان در نمونه با  $(Vp = \sqrt{\lambda} Vm)$  جاگذاری شود،  $k'$  به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{i_m}{i_p} = \frac{36\alpha_0 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3} \frac{V_m}{dm^2} + \frac{3\beta_0 (1-n) V_m^2}{4 gn^3 dm} + \frac{n}{g} \frac{\partial V_m}{\partial t_m}}{36\alpha_0 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3} \frac{\sqrt{\lambda} V_m}{k'^2 dm^2} + \frac{3\beta_0 (1-n) \lambda V_m^2}{4 gn^3 k' dm} + \frac{n}{g} \frac{\partial (\sqrt{\lambda} V_m)}{\partial (\sqrt{\lambda} t_m)}} = 1 \quad (16)$$

با حذف مخرج و خلاصه سازی رابطه فوق داریم:

$$12\alpha_0 (1 - \frac{\sqrt{\lambda}}{k'^2})(1-n)\nu \frac{V_m}{gdm^2} + \frac{1}{4} (1 - \frac{\lambda}{k'}) \beta_0 \frac{V_m^2}{gdm} = 0 \quad (17)$$

اگر دو طرف معادله را در  $\frac{k'^2}{\beta_0}$  ضرب کرده و معادله را برای مرتب کنیم، رابطه درجه دومی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{k'^2}{\beta_0} [48\alpha_0 (1 - \frac{\sqrt{\lambda}}{k'^2})(1-n)\nu \frac{V_m}{gdm^2} + (1 - \frac{\lambda}{k'}) \beta_0 \frac{V_m^2}{gdm}] = 0$$

$$\frac{48\alpha_0}{\beta_0} (1-n)\nu \frac{V_m}{gdm^2} k'^2 - 48 \frac{\alpha_0}{\beta_0} \sqrt{\lambda} (1-n)\nu \frac{V_m}{gdm^2} + k'^2 \frac{V_m^2}{gdm} - k\lambda' \frac{V_m^2}{gdm} = 0$$

$$\therefore \underbrace{(48 \frac{\alpha_0}{\beta_0} (1-n)\nu \frac{V_m}{gdm^2} + \frac{V_m^2}{gdm})}_{S_y} k'^2 - \lambda \frac{V_m^2}{gdm} k' - 48 \frac{\alpha_0}{\beta_0} (1-n)\nu \sqrt{\lambda} \frac{V_m}{gdm^2} = 0 \quad (18)$$

با تعریف  $S_y$  برابر  $48 \frac{\alpha_0}{\beta_0} (1-n)\nu$  و تقسیم دو طرف

بر  $\frac{V_m \nu}{gdm^2}$ ، معادله را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

مفروض با ویژگیهای ارائه شده در جدول ۲ را که با مقیاس‌های مختلف ۱:۱۰ تا ۱:۵۰ مدل‌سازی شده در نظر گرفت. در این شرایط تغییرات  $k'$  در مقابل عدد رینولدز جریان به شکل نمودار ۱ است.

تغییرات  $k'$  در شکل ۱ نشان می‌دهد که بنابر انتظار، این نسبت در محدوده جریان بینابینی از  $\lambda^{1/4}$  تا  $\lambda$  تغییر کرده و در جریانهای کاملاً غیرخطی و کاملاً لایه‌وار مقدار ثابتی را داشته است.

#### ۴- ارزیابی حدود اعتبار یافته‌های پژوهشی با استفاده از مدل حاضر

بسیاری از محققان پیشین مانند احمد و سونادا (۱۹۶۹)، هال (۱۹۹۱) هنورا و مک کروکودیل (۱۹۷۸)، شکری (۱۳۸۳) و قاسمی (۱۳۸۵) به کمک روشهای آزمایشگاهی، جریانهای غیرخطی غیرماندگار را در محیطهای متخلخل درشت‌دانه مطالعه کرده‌اند. استفاده از نتایج آزمایشهای ایشان برای تغییر نظریه‌های حاکم بر جریانهای مورد بررسی، مستلزم درک ماهیت آنها است.

از آنجا که مدل پیشنهاد شده ارتباط بین مدل مقیاس‌دار و نمونه واقعی را بیان کرده است، با استفاده از آن می‌توان از خصوصیات مدل به ویژگیهای محیط واقعی رسید. بنابراین می‌توان با استفاده از یکی از ویژگی‌های معلوم در محیط واقعی، حدود اعتبار آزمایشهای این پژوهشگران را بررسی کرد. از آنجا که در کارهای متعارف مهندسی، قطر سنگدانه‌ها در هسته موج‌شکن‌ها بازه تغییرات مشخصی دارد، می‌توان با استفاده از اندازه دانه‌های بکار رفته توسط پژوهشگران در مدل‌های آزمایشگاهی، قطر دانه‌های نمونه متناظر را محاسبه کرد. سپس مقدار به‌دست آمده برای اندازه سنگدانه‌ها در نمونه را با منحنی دانه‌بندی هادسن (شکل ۲) (۱۹۷۹) - که به صورت تجربی ارائه شده - مقایسه کرد.

$$\left(\frac{S_y V_m}{gdm^2} + \frac{V_m^2}{gdm}\right)k'^2 - \lambda \frac{V_m^2}{gdm} k' - S_y \sqrt{\lambda} \frac{V_m}{gdm^2} = 0$$

$$\left(\frac{S_y}{v} + \frac{V_m dm}{v}\right)k'^2 - \lambda \frac{V_m dm}{v} k' - \frac{S_y \sqrt{\lambda}}{v} = 0 \quad (19)$$

در این رابطه،  $\frac{V_m dm}{v}$  تعریفی از عدد رینولدز بوده و با جاگذاری آن، معادله درجه دوم زیر برای محاسبه  $k'$  حاصل می‌شود.

$$\left(\frac{S_y}{v} + Re_m\right)k'^2 - \lambda Re_m k' - \frac{S_y \sqrt{\lambda}}{v} = 0 \quad (20)$$

که در آن  $S_y$  برابر با  $48 \frac{\alpha_0}{\beta_0} (1-n)v$ ،  $k'$  نسبت اندازه

دانه‌ها و  $Re_m$  عدد رینولدز جریان در مدل مقیاس‌دار است. با حل معادله (۲۰)  $k'$  برحسب  $(S_y)$ ، رینولدز جریان ( $Re_m$ ) و نیز عدد مقیاس مدل ( $\lambda$ ) به‌دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جمله سوم رابطه (۱۱) - که تعریف‌کننده شرایط غیرماندگاری جریان است - مستقل از عدد مقیاس مدل آزمایشگاهی ( $\lambda$ ) است. بنابراین غیرماندگار شدن جریان اثری بر محاسبه مقیاس مدل آزمایشگاهی با در نظر گرفتن پارامترهای دخیل ( $k'$ ) نخواهد داشت.

شایان ذکر است که عدد مقیاس ( $\lambda$ ) بر اساس نسبت سرعت جریان در مدل اصلی به مدل مقیاس‌دار با استفاده از معیار فرود جریان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\lambda} \quad (21)$$

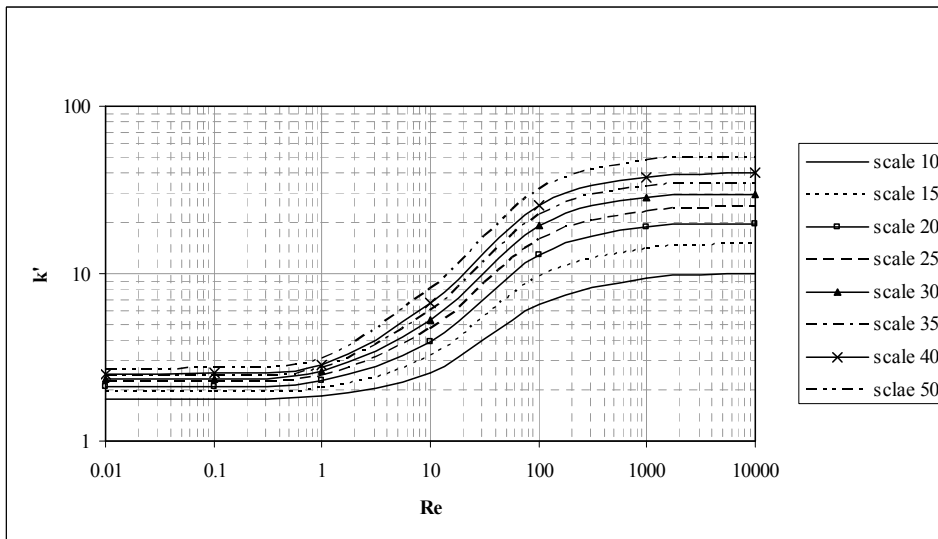
مشکل اصلی در جریانهای غیرماندگار آن است که جهت و سرعت جریان به‌طور پیوسته در حال تغییر بوده و تخمین سرعت در هر لحظه امکان‌پذیر نیست. لذا در تعیین عدد مقیاس ( $\lambda$ ) و عدد رینولدز جریان از حداکثر سرعت استفاده می‌شود. با معلوم شدن  $\lambda$  و ویژگیهای محیط متخلخل  $S_y$ ، نسبت اندازه دانه  $k'$  برای هر عدد رینولدز مورد مطالعه به کمک رابطه (۲۰) قابل تخمین است.

برای آشکار ساختن موضوع می‌توان محیط متخلخل

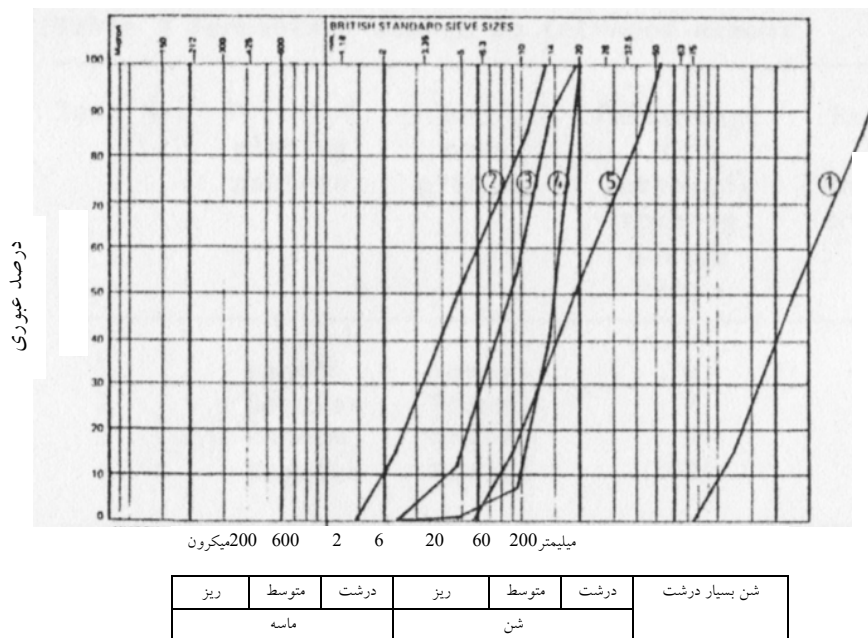


جدول ۲ خصوصیات محیط متخلخل مورد بررسی [۱۴]

نوع محیط متخلخل	تخلخل	قطر متوسط دانه (میلی متر)	ضریب یکنواختی	عدد رینولدز جریان
درشت دانه نخودی	۰/۴۲۱۳	۹/۵۱	۱/۹۳۵	۰/۰۱-۱۰۰۰۰



شکل ۱ تغییرات نسبت اندازه دانه ها  $k' = \frac{dp}{dm}$  در برابر تغییرات عدد رینولدز جریان در مقیاس های مختلف



شکل ۲ منحنی های دانه بندی پیشنهاد شده توسط هادسن (۱۹۷۹) برای هسته موج شکن ها (به نقل از سیم، ۱۹۸۸)

بدیهی است که در این بررسی، نتایج آزمایشگاهی که بازتاب صحیحی از جریان در محیطهای واقعی هسته موج شکن‌ها ارائه دهند باید عدد رینولدزی متناظر با جریانهای انتقالی و اندازه دانه‌هایی متناظر با بازه ارائه شده توسط هادسن (۷۰ تا ۳۰۰ میلیمتر (به نقل از سیم، ۱۹۸۸)) داشته باشند. بدین روش، قطر دانه در محیطهای واقعی متناظر با آزمایشهای هر یک از محققان در جدول ۳ محاسبه شده است. اکنون با توجه به اعداد رینولدز جریان، اندازه دانه‌های نمونه اصلی در آزمایشها و نیز مقایسه  $k'$  با مقادیر  $\lambda, \lambda^{1/4}$  (که با فرض مقیاس ۱:۵۰ به ترتیب برابر ۵۰ و ۲/۶۵۹ به دست آمده) چنین نتیجه می‌شود که:

الف - مطالعات هنورا و مک کورکودیل (۱۹۷۸) متمرکز بر جریان کاملاً آشفته عبوری از لایه‌های حفاظتی موج‌شکن‌ها بوده و به بررسی جریان بینابینی غیرماندگار در هسته این سازه‌ها پرداخته است. با توجه به رژیم جریان مورد بررسی در این پژوهش، نسبت  $k'$  مطابق معادله (۲۰) با اثرپذیری بسیار جزئی از عدد رینولدز جریان، برابر با عدد مقیاس ( $\lambda$ ) است.

ب - بررسی نتایج آزمایشهای هال (۱۹۹۱) نشان می‌دهد که مطالعات وی بر جریانهای آرام و گاهی بینابینی در محیطهای متخلخل ریزدانه متمرکز بوده است.

جدول ۳ نتایج مطالعه جریان آزمایش شده توسط برخی محققین

مشع	Re	dp(mm)	k'	توضیحات
هنورا و مک کورکودیل (۱۹۷۸)	۶۷۵۲-۳۳۶۳۷	۷۸۸-۳۶۰۰	۴۵/۲-۴۹/۹۵	• $dp > 300$ • $k' \cong \lambda$ • جریان غیرخطی متناظر با لایه محافظ موج شکن
احمد و سونادا (۱۹۶۹)	۶۹-۱۴۳۴	۲۰-۲۶۰	۳۷/۵-۴۸	• $dp > 300$ • $k' \cong \lambda$
هال (۱۹۹۱)	۱۴۶-۵۸۴.۳۶	۱۴/۲-۴۶۰	۲/۸۷-۴/۰۶	• $dp < 70$ • $k' \cong \lambda^{1/4}$ • جریان لایه‌وار - مرز پایین بینابینی
هال و اسمیت (۱۹۹۴)	۱۴۰۲-۳۳۴۰	۱۵۴۰-۳۶۳۰	۲۰/۵۴-۳۸/۹۴	• $dp > 300$ • $\lambda^{1/4} < k' < \lambda$ • مقیاس نادرست
شکری (۱۳۸۳)	۲۶۷/۶۴	۳۴	۱/۳	• $70 < dp < 300$ • $\lambda^{1/4} < k' < \lambda$ • جریان بینابینی
قاسمی (۱۳۸۵)	۳۵۷/۳-۷۳۴/۶۳	۲۶۰-۵۷۰	۳۰/۹۶-۳۲/۴۷	• $70 < dp < 300$ • $\lambda^{1/4} < k' < \lambda$ • جریان بینابینی

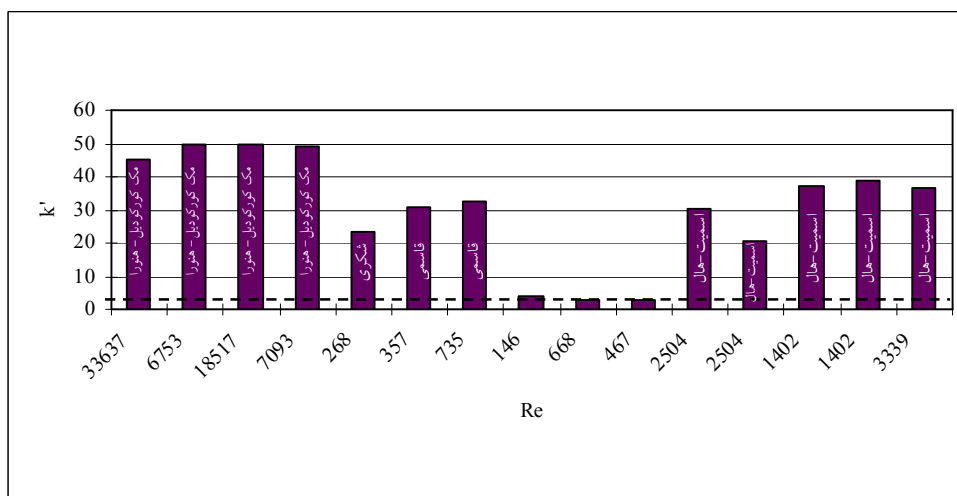
حدی  $\lambda$  و  $\lambda^{1/4}$  تغییر کرده است. شایان یادآوری است که اندازه سنگدانه‌های تیزگوشه به کار رفته توسط قاسمی (۱۳۸۵) ( $dp$ ) که حدود ۵۷۲ میلی‌متر است، کمی بزرگتر از بزرگترین اندازه دانه‌ها در منحنی دانه‌بندی ارائه شده توسط هادسن (۱۹۷۹) است.

بازه تغییرات  $k'$  در آزمایشهای مختلف در مقیاس ۱:۵۰ در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین مقدار  $k'$  در آزمایشهای هال (۱۹۹۱) و بیشترین آن در آزمایشهای هنورا و مک کورکودیل (۱۹۷۸) بوده است.

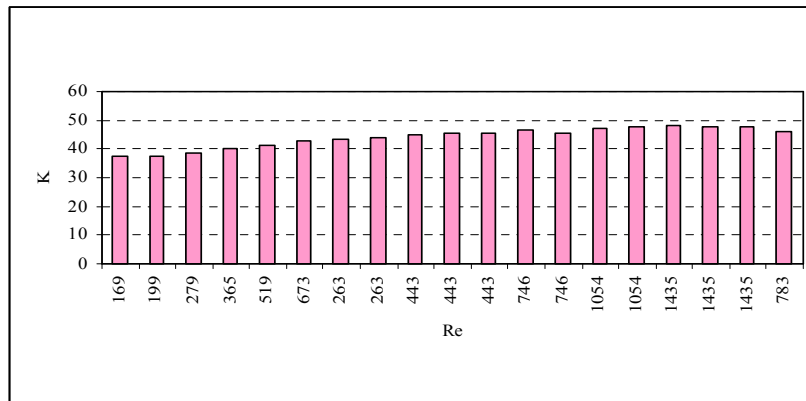
ت - یافته‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط احمد و سونادا (۱۹۶۹) برای جریان غیرداریسی ماندگار در محیطهای ماسه‌ای نیز در پژوهش حاضر بررسی شده است. به طوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگرچه در آزمایشهای ایشان هم مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز در جریانهای بینابینی،  $k'$  از ۳۷/۵ تا ۴۸ تغییر می‌کند، لیکن چون آزمایش در محیطهای ماسه‌ای و بیشتر از نوع کاملاً آشفته انجام شده، لذا نسبت  $k'$  در آنها بسیار نزدیک به عدد مقیاس ( $\lambda$ ) است.

آرام بودن جریان در این محیطها سبب شده که  $k'$  با اثرپذیری بسیار جزئی از عدد رینولدز جریان، برابر  $\lambda^{1/4}$  باشد. آزمایشهای هال و اسمیت (۱۹۹۴) اگرچه نسبت اندازه دانه را مقداری بین  $\lambda$  و  $\lambda^{1/4}$  به دست آورده است، اما اندازه دانه‌های محیط واقعی ( $dp$ ) حدود ۵ تا ۱۲ برابر حداکثر مقدار گزارش شده توسط هادسن (۱۹۷۹) به دست آمده است. به این ترتیب آزمایشهای آنها مقیاس صحیحی نداشته و قابل تعمیم برای نمونه واقعی نیست.

پ - ارزیابی یافته‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط شکری (۱۳۸۳) و قاسمی (۱۳۸۵) بر روی مصالح دانه‌ای گرد گوشه نشان می‌دهد که هم عدد رینولدز جریان در مدل‌های ایشان متناظر با رژیم بینابینی جریان بوده و هم اندازه سنگدانه مورد استفاده در مدل‌های آنها ( $dp$ ) متناظر با بازه ارائه شده توسط هادسن (۱۹۷۹) ( $dp=70-300$ ) است. به بیان دیگر یافته‌های ایشان به علت انطباق ساختار مدل‌های مورد بررسی با جریان عبوری از هسته موج‌شکن‌ها، قابل تعمیم به نمونه واقعی نیست. به همین دلیل مقدار  $k'$  در نتایج آنها (علی‌رغم تبعیت از مقیاس)، متأثر از عدد رینولدز جریان بوده و بین مقادیر



شکل ۳ نسبت  $k'$  به دست آمده از آزمایشهای جدول ۱ (مقیاس ۱:۵۰)



شکل ۴ نسبت  $k'$  به دست آمده از آزمایشهای احمد و سونادا (۱۹۶۹)

### ۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مدل پیشنهاد شده در این پژوهش، آزمایشهایی می‌توانند به مدل‌سازی صحیح جریانهایی با رژیم بینابینی در هسته موج‌شکن‌ها بپردازند که اولاً نسبت اندازه دانه‌ها در محیط اصلی به مدل مقیاس‌دار را مقداری بین  $(\lambda)$  و  $(\lambda^{1/4})$  به دست دهند و همچنین قطر دانه محیط اصلی متناظر با آن  $(dp)$  بین ۷۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر تغییر کند. بر این اساس فقط برخی از آزمایشهای مورد بررسی (بر روی مصالح گردگوشه) منطبق بر جریانهای با رژیم بینابینی و شرایط هیدرولیکی غیرماندگار در محیطهای متخلخل درشت دانه بوده و سایر آزمایشها نمی‌توانند توصیف صحیحی را از رفتار هسته موج‌شکن‌ها ارائه دهند.

### ۶- فهرست علائم

$h$	عمق آب در پنجه سازه
$H$	ارتفاع موج
$i$	گرادیان هیدرولیکی
$k'$	نسبت قطر دانه در نمونه به مدل
$L$	طول موج
$n$	تخلخل
$Re$	عدد رینولدز جریان (در مدل یا نمونه)
$V$	سرعت آب در نزدیکی هسته
$v, u$	به ترتیب سرعت جریان در جهتهای $y, x$
$\gamma$	زاویه شیب نسبت به افق در سمت دریا
$\delta$	طول موج برخورد کننده به موج‌شکن
$\Delta$	شکل دانه‌ها
$\theta$	شیب کف سازه به سمت دریا
$\mu$	لزجت دینامیکی آب در نزدیکی سازه
$\nu$	لزجت سینماتیکی آب در نزدیکی سازه
$\xi_a$	زبری سطح
$\rho_a$	جرم مخصوص سنگدانه‌ها
$\rho$	جرم مخصوص آب در نزدیکی سازه
$\eta$	تراز سطح آب
$\lambda$	مقیاس هندسی
$\alpha_0, \beta_0$	ثابت‌های متأثر از محیط مورد مطالعه

$D$	درصد خسارت وارد شده لایه محافظ
$d$	قطر دانه
$dp$	قطر دانه‌های اصلی
$dm$	قطر دانه‌های مدل مقیاس‌دار
$g$	شتاب ثقل

## ۷- منابع

- Hall, K. R. (1991). "Trends in phreatic surface motion in rubble-mound breakwaters", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 117, No 2, pp. 179-187
- Hannoura, A.A. and Mc. Corquodale, I.A., (1978). "Virtual mass of coarse granular media" J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 104, pp. 191-200
- Hudson, R. Y., Herrmann, F. A., Sager, R. A., Whalin, R. W., Keulegan, G. H., Chatham, C. E., and Hales, L. Z. (1979). "Coastal hydraulic models," Special Report No. 5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi
- Madsen, O.S., (1974). "Wave transmission in porous structures", J. of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. 3, pp. 69-98
- Simm, J.D., (1988). "Pore pressure response and stability of rubble mound breakwaters", Design and Construction Congress.
- Steven, A.H, (1993). "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", World Scientific, Singapore .
- USBR, (1980). "Hydraulic laboratory techniques", A Water Resources Technical Publication, US Department of the Interior, Water & Power Resources Services, Denver, Colorado.
- شکری، م.، (۱۳۸۳). "بررسی پارامترهای مؤثر بر جریان غیردائم و غیر خطی در محیط‌های متخلخل" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- قاسمی، ع.، (۱۳۸۵). "بررسی پارامترهای مؤثر بر جریان غیردائم و غیر خطی در محیط‌های متخلخل" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- نظافت‌خواه، ص.، (۱۳۸۷). "بررسی ارزیابی کاربرد تئوری اصلاح شده فورس‌هایمر برای تحلیل جریان آشفته غیرماندگار در محیط‌های متخلخل درشت دانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- نظافت‌خواه، ص.، طاهرشمسی، ا.، (۱۳۸۷). "بررسی اعتبار روش معمول تحلیل غیرخطی جریان در سنگریزها برای شرایط غیرماندگار"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران، تهران ص. ۶۹۰
- نظافت‌خواه، ص.، طاهرشمسی، ا.، (۱۳۸۶). "جایگاه رویکرد طراحی سبز در ساخت اسکله‌ها و موج شکن‌ها برای توسعه پایدار صنعت دریایی"، اولین کنفرانس ملی صنعت، دانشجو، توسعه پایدار، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- Ahmed, N. and Sunada, D. K., (1969). "Nonlinear flow in porous media" ASCE J. of Hydraulics Division, 95, HY 6, pp. 947-957
- Ergun S., Orning A. A, (1949). "Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds", J. Ind. Eng. Chem, pp. 159
- Hall, K. R., Smith, G. M. and Turcke, D. J., (1994). "Development of a non-linear porous media relationship for oscillatory unsteady flow", J. Coastal Research, Vol. 10, No. 1, pp. 158-69