پیشگفتار

شبیه‌سازی جریان درون محیط متخلخل، کاربردهای فراوانی در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی از جمله مهندسی زمین‌شناسی، مهندسی آب، مهندسی شیمی، مهندسی نفت و مهندسی عمران دارد. در راستای ذکر برخی از این کاربردها می‌توان به بررسی جریان آب درون سدهای سنگریزه‌ای چه در هنگام ساخت چه در هنگام بهره‌برداری، بندهای انحرافی سنگریزه‌ای، موج شکن‌ها، فیلترهای شنی و گابیون‌ها اشاره نمود (He et al., 2007).

اخیراً بحث استفاده از بدنه سدهای سنگریزه‌ای به عنوان سرریز[1] مورد توجه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است. این دسته از پژوهشگران معتقدند، چنانچه با شناخت و تحلیل دقیق جریان درون محیط های متخلخل، از فضاهای خالی درون بدنه سدهای سنگریزه‌ای جهت عبور سیلاب و یا به‌منظور آب‌گیری[2] استفاده گردد، با حذف سرریز بتنی نه تنها در هزینه ساخت و نگهداری آن صرفه‌جویی می‌گردد، بلکه بدنه متخلخل سد به عنوان یک سیستم تصفیه بزرگ عمل کرده و ضمن جلوگیری از عبور مواد معلق درشت‌دانه، با رشد باکتری‌ها و موجودات ذره‌بینی در روی سطح مصالح و سنگریزه‌ها، آلاینده‌های شیمیایی نیز مورد تصفیه قرار می‌گیرند (Michioku et al., 2005).

هنگام عبور سیال در لابلای سنگریزه‌ها نیز عمدتا جریان مغشوش گردیده و سیال به‌صورت طبیعی در معرض عمل هوادهی قرار می‌گیرد که خود این امر باعث از بین بردن آلاینده‌های آلی موجود در سیال خواهد شد . از نظر زیست محیطی، استفاده از بدنه سدهای سنگریزه‌ای به‌عنوان مکانی جهت تعبیه سرریز نه تنها سازگاری بیشتری با محیط زیست دارد، بلکه با هدایت و کنترل آب و چیدمان مناسب بدنه سد، در پائین دست، امکان ایجاد یک منطقه زیبا با جاذبه گردشگری مهیا می‌گردد. با توجه به موارد فوق، تحقیق و پژوهش پیرامون جریان درون سدهای سنگریزه ای به عنوان مصداقی از محیط متخلخل بسیار حائز اهمیت بوده و نظر بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است.

جهت تحلیل جریان در محیط متخلخل دو رابطه‌ی مشهور پایه تحت عنوان روابط دارسی و فورشهایمر به‌وجود آمدند، این روابط پایه در ابتدا مفهوم تجربی داشته ولی بعدها با معادلات تئوریکی نظیر ناویر استوکس هم نتیجه‌گیری شده‌اند. دارسی، از جمله اولین محققانی بوده که جریان آرام درون محیط‌های متخلخل ریزدانه را مورد بررسی قرار داده

1-Weir
2-Intake

است. وی با ارزیابی نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی، نشان داد که گرادیان هیدرولیکی جریان به‌صورت خطی با سرعت ظاهری سیال ارتباط دارد.

با آزمایشات مشابهی که بر روی محیط‌های متخلخل درشت دانه انجام شده، تغییر در رژیم جریان از آرام به آشفته مشاهده شده است. این تغییر به سبب افزایش سرعت جریان در محیط مذکور و مش اهده اعداد رینولدز بالا صورت می‌گیرد. در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، نیروهای شتاب دهنده جریان بر نیروهای لزوجت غلبه می‌یابند و منحنی سرعت– گرادیان در این شرایط از حالت خطی انحراف می‌یابد. به جریانی که در این وضعیت قرار می گیرد ، جریان غیر خطی یا غیر دارسی می‌گویند. به عبارت دیگر در رژیم آشفته جریان در محیط‌های متخلخل از نوع درشت-دانه، گرادیان هیدرولیکی با توان اول سرعت جریان متناسب نمی‌باشد و رابطه دارسی به عنوان رابطه پایه جریان در این شرایط اعتبار خود را از دست خواهد داد . فورشهایمر، برای اولین بار، در سال ۱۹۱۴، بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، در جریان‌های ناآرام، گرادیان هیدرولیکی علاوه بر توان اول سرعت، با توان دوم آن نیز ارتباط مستقیم پیدا می‌کند.

آنچه در رابطه فورشهایمر و یا دیگر روابط پایه‌ی جریان در محیط متخلخل حائز اهمیت می باشد ، چگونگی تعیین ضرایب ثابت این روابط می‌باشد. این ضرایب متناسب با شرایط خاص حاکم بر مسئله مورد مطالعه ، از جمله مشخصه‌های فیزیکی سیال و مشخصه‌های فیزیکی محیط متخلخل تغییر کرده و به‌همین دلیل ، بخش عمده ای از تحقیقاتی که در خصوص جریان درون محیط‌های متخلخل صورت پذیرفته، مربوط به چگونگی تعیین این ضرایب می‌باشد.

دو روش عمده برای تعیین این ضرایب وجود دارد، روش اول تعیین این ضرایب به‌صورت تجربی می باشد . در روش تجربی، جریان درون محیط‌های متخلخل با توجه به تئوری‌های مختلف حرکت سیال، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج حاصل از آن‌ها، روابط مختلفی برای تعیین ضرایب موجود در معادلات اصلی حرکت، ارائه می‌گردد. نتیجه کار در نهایت به‌صورت یکسری روابط و یا معادلات ارائه می‌گردد که به‌صورت ریاضی ، بعضی از ویژگی‌های جریان را پیش‌بینی و مورد ارزیابی قرار می‌دهند. در مورد انواع و پیشینه این روابط و مدل ها در فصل اول توضیح داده خواهد شد.

روش دیگر برای تعیین ضرایب معادلات پایه جریان در محیط متخلخل استفاده از مدل‌های هندسی می باشد . این مدل‌ها بر اساس بررسی میکروسکوپیک جریان در محیط متخلخل استوار هستند . بخش اساسی در بررسی میکروسکوپیک جریان در محیط متخلخل، تبیین روشی برای تعیین خصوصیات هندسی دانه‌بندی محیط متخلخل می‌باشد. در روش هندسی تأکید اصلی در تجسم هندسی ساختار محیط متخلخل می‌باشد (Hifler, 2002).

روش کار در این نوع مدل ها بدین صورت می باشد که ابتدا هندسه و چگونگی توزیع فضاهای خالی محیط متخلخل شناسایی می‌شود، سپس این توزیع هندسی ساده‌سازی و بر یکی از توابع آماری منطبق می‌گردد، سپس فرض می‌شود در ساختار تشکیل شده، سیال جریان پیدا کرده است و در انتها جریان درون مدل هندسی مورد آنالیز و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این مدل سازی جهت تعیین ضرایب روابط پایه همچون دارسی و فورشهایمر و یا تعیین مشخصات جریان در محیط متخلخل مانند هدایت هیدرولیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل‌های هندسی به انواع مختلفی تقسیم بندی می‌شوند، یکی از انواع آن‌ها تحت عنوان مدل‌های شبکه‌ای در مقیاس منفذی نامیده می‌شود. اساس کار در این نوع مدل ها بدین صورت می‌باشد که تمامی فضاهای خالی درون محیط متخلخل، به‌صورت شبکه‌ای به هم پیوسته از مجراها و حفرات در نظر گرفته می‌شود که می‌توان آن‌را با شبکه‌ای متشکل از یکسری لوله و گره (مثلا گره‌های کروی یا مکعبی شکل)، که به‌صورت منظم و یا غیرمنظم به یکدیگر متصل شده‌اند، شبیه‌سازی نمود. پس از تعیین هندسه این لوله‌ها و گره‌ها فرض می‌گردد سیال در این شبکه جریان دارد، سپس به تحلیل این شبکه‌ها می‌پردازند. در انتها نتایج کار جهت تعیین ضرایب معادلات پایه استفاده می‌گردد.

با استفاده از ایده ساختار مدل‌های شبکه‌ای در مقیاس منفذی، می‌توان مدلی تحت عنوان مدل شبکه لوله‌ای بنا نمود که مشخصات عمومی فضاهای خالی را، در یک نگاه ماکروسکوپیک و با توجه به پارامترهای ماکروسکوپیک، در قالب شبکه‌ای متشکل از لوله‌ها و گره‌ها تبیین نماید که می‌تواند ضمن حفظ ساختار درونی محیط متخلخل به سادگی مورد تجزیه و تحلیل هیدرولیکی قرار گیرد و نتایج ماکروسکوپیکی جریان نظیر فشار، ارتفاع هیدرولیکی و دبی جریان را در اختیار گذارد.

در مدل شبکه لوله‌ای، محیط متخلخل، به‌صورت شبکه‌ه‌ای مربعی منظم از لوله‌ها، که در محل گره ها به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده است. در این شبکه، گره‌های موجود در محل اتصال لوله‌ها، مبین حفره‌های موجود

در محیط متخلخل بوده و لوله ها نقش مجاری موجود در محیط مزبور را ایفا می‌کنند. مهمترین مبحث در مدل شبکه لوله‌ای، چگونگی تعیین مشخصه‌های شبکه متناسب با شرایط فیزیکی محیط متخلخل و در نهایت شیوه آنالیز شبکه معادل‌سازی شده می‌باشد.

در این پژوهش، جهت تعیین مشخصه‌های فیزیکی شبکه لوله‌ای، ابعاد شبکه و ابعاد لوله‌ها با توجه به تخلخل و شعاع هیدرولیکی محیط متخلخل تعیین شده‌اند. اما موضوعی که در این مدل‌سازی قابل تأمل می باشد چگونگی مرتبط کردن افت فشار در محیط متخلخل و افت فشار در شبکه لوله ای می‌باشد. به علت پیچیده بودن مسیر حرکت سیال درون حفرات و مجراهای محیط متخلخل به دست آوردن رابطه ای تئوریک جهت تعیین افت فشار درون محیط متخلخل بسیار دشوار و تقریباً غیر ممکن می‌باشد. به همین علت اکثر روابطی که جهت تعیین این افت تعیین شده‌اند تجربی و تا حدودی تقریبی و یا متعلق به محدوده ی خاصی از انواع محیط متخلخل می‌باشند . بدین منظور در این پژوهش، جهت محاسبه افت فشار محیط متخلخل از معادله تجربی استیفنسن و روشی تحلیلی به نام قانون فرکتال که در دهه‌های اخیر بسیاری از مسائل فیزیکی توسط این قانون شبیه‌سازی شده‌اند، استفاده شده است. سپس، ضریب افت انرژی درون لوله‌های موجود در شبکه از روی افت فشار به‌دست آمده برای محیط متخلخل تعیین می‌گردد.

از آنجا که هدف اصلی این تحقیق، بررسی جریان آشفته درون محیط های سنگریزه‌ای درشت‌دانه با سطح آزاد می‌باشد، لذا در راستای نیل به این هدف، ابتدا با استفاده از مبانی تئوریک مربوط به مدل‌های شبکه‌ای، شبکه خاصی جایگزین محیط متخلخل می‌شود. این شبکه معادل‌سازی شده در مقایسه با شبکه‌های متداول توزیع سیال، ویژگی خاصی خواهد داشت. از آنجاکه حفره‌ها و مجاری اطراف محیط متخلخل با سطح آزاد، در ارتباط مستقیم با اتمسفر می-باشند، لذا لوله‌های متناظر با این مجاری در اطراف شبکه معادل، باز و در ارتباط با هوا قرار می‌گیرند.

این پژوهش شامل سه فصل می‌باشد، در فصل اول ابتدا پیرامون کلیات جریان در محیط متخلخل بحث می - گردد، سپس در رابطه با معادلات تجربی موجود جهت تعیین چگونگی حرکت آب در محیط متخلخل توضیح داده می-شود و در انتها با انواع مدل‌های شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل به خصوص مدل‌های هندسی آشنا می شویم . فصل دوم در رابطه با چگونگی ارتباط یک به یک بین اجزای مدل شبکه لوله‌ای و محیط متخلخل می باشد . در این فصل چگونگی ایجاد مدل، با توجه به شرایط مرزی بالادست و پائین‌دست و خصوصیات محیط متخلخل مرحله به

مرحله توضیح داده می‌شود. سپس روش تحلیل شبکه ایجاد شده بیان می گردد. فصل سوم مربوط به بحث در رابطه با مقایسه میان نتایج به‌دست آمده از مدل شبکه لوله‌ای ایجاد شده در این پژوهش و نتایج واقعی به‌دست آمده از چند مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

فصل اول

روابط و مدل‌های تحلیل جریان در محیط متخلخل

۱-۱- مقدمه

شبیه‌سازی جریان در محیط های متخلخل کاربردهای متعددی در شاخه های مختلف علوم و مهندسی از جمله مهندسی منابع آب، محیط زیست، مهندسی شیمی، مهندسی نفت و هیدرولوژی آب های زیرزمینی دارد . تا کنون در راستای درک بیشتر رفتار جریان درون محیط های متخلخل، مطالعات تئوریک و بررسی‌های آزمایشگاهی زیادی بر مبنای روابط دارسی و فورشهایمر و ترکیب آن ها با معادلات پیوستگی صورت گرفته است. با نگاهی دقیق به شکل پروفیل سطح آب در محیط های متخلخل، حتی در جریان های یک بعدی، مشاهده می گردد که پروفیل سطح آب مخصوصاً در قسمت انتهایی جریان از انحنای قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. این انحنا، بیانگر وجود حداقل دو مؤلفه جریان و یا به عبارتی دو مؤلفه سرعت می‌باشد و از آنجا که میزان دبی سیال در ارتباط مستقیم با سرعت جریان است، بنابراین مدل‌های ریاضی یک بعدی توانایی تحلیل دقیق جریان درون محیط‌های متخلخل را ندارند. گرچه مدل-های ریاضی دو یا سه بعدی نیز بر پایه مفهوم عنصر حجمی نماینده محیط و حجم کنترل بنا شده اند و معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان به همراه حل عددی آن ها را ارائه می‌دهند، اما این مدل ها نیز از پیچیدگی و محدودیت‌های خاصی برخوردار هستند.

به‌طور کلی به‌دلیل پیچیدگی‌های خاص جریان درون محیط های متخلخل، جهت تحلیل این‌گونه جریان ها از مدل‌های شبیه‌سازی نیز می‌توان بهره برد. منظور از مدل‌های شبیه‌سازی در این نوشتار مدل‌هایی است که بر پایه شناسایی رفتار فیزیکی جریان در محیط متخلخل در تشابه با محیط‌های دیگر و یا شبیه‌سازی هندسی حفره‌های محیط متخلخل بنا شده‌اند. با این دیدگاه مدل‌های شبیه‌سازی در دو گروه کلی قرار می‌گیرند. یک گروه مدل های فیزیکی شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل می‌باشند. این مدل‌ها بر مبنای شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل با جریان در محیط مشابه بنا شده‌اند که این عمل تنها هنگامی امکان پذیر است که عوامل دو سیستم (محیط متخ لخل و محیط مشابه) یک به یک با یکدیگر مشابه باشند و پارامترهای دو سیستم با روش مشابه‌ی با هم رابطه داشته باشند.

مدل‌های شبیه‌سازی گروه دوم که محققین برای بررسی و تحلیل جریان در محیط متخلخل از آن ها استفاده می‌نمایند تحت عنوان مدل‌های هندسی نام‌گذاری می‌گردند. در این مدل‌ها، بر مبنای بررسی ریزبینانه فضای خالی درون محیط متخلخل، ساختار حفره‌ها و مجاری موجود در محیط متخلخل استخراج می‌شود، سپس این ساختار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در انتها نتایج تحلیل به صورت ضرایب ثابت روابط پایه و یا خصوصیات جریان در محیط متخلخل استخراج می‌گردد.

هدف اصلی این فصل، معرفی و تجزیه و تحلیل انواع مدل های شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل و روابط حاکم بر این جریان می‌باشد. به‌همین منظور ابتدا در مورد کلیات محیط متخلخل توضیح داده می‌شود، سپس در مورد معادلات خطی و غیرخطی حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل توضیح داده می‌شود. در ادامه انواع مدل‌های فیزیکی شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل به اختصار توصیف می‌گردند و در انتها در مورد مدل‌های هندسی توضیح داده می‌شود.

۱-۲- محیط متخلخل

محیط متخلخل یک محیط منفذدار می‌باشد. هنگام عبور جریان در محیط متخلخل، سیال از درون این منفذها عبور می‌کند. تنوع مثال در مورد محیط متخلخل بسیار زیاد می باشد، خاک، سنگ شکسته، سرامیک، کاغذ فیلتر، فیلتر ماسه‌ای، یک تکه نان و ... به عنوان محیط متخلخل در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۱-۱ چند نوع سنگ (مثالی از محیط متخلخل) به همراه منفذهای موجود در آن‌ها را نشان می‌دهد.

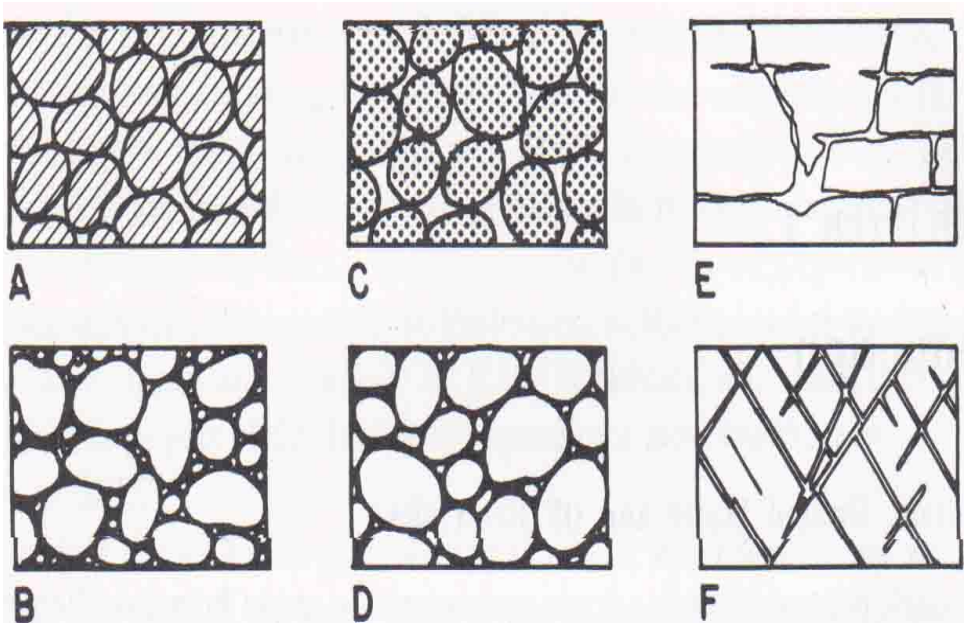
آب‌های زیرزمینی و آبخوان‌ها مثال‌های عملی از جریان در محیط متخلخل می‌باشند. اغلب آبخوان‌ها از شن، ماسه متراکم یا غیرمتراکم تشکیل شده‌اند. برخی از آن‌ها در منطقه محدودی واقع شده اند و برخی از آن ها منطقه وسیعی را شامل می‌شوند. ضخامت آن‌ها از چندین متر تا چندصد متر متغیر می‌باشد. آبخوان‌ها ممکن است به عنوان یک منبع آب زیرزمینی در نظر گرفته شوند که به طور طبیعی توسط بارش یا جریان آب یا توسط چاه‌ها یا سایر روش-های تغذیه مصنوعی پر می‌گردند. آب از درون آبخوان‌ها توسط چشمه‌ها یا آبراهه‌ها یا توسط پمپ به طور مصنوعی خارج می‌گردد. ضخامت یا سایر ابعاد عمودی آبخوان‌ها معمولاً بسیار کوچکتر نسبت به سایر طول‌های افقی می‌باشد . در زیر انواع محیط‌های متخلخل تشکیل دهنده آبخوان‌ها، به همراه خصوصیات آن‌ها ذکر شده است:

- **ماسه سنگ و کنگلومرا:** این مصالح از انواع ماسه و شن متراکم می‌باشند. در اینگونه سنگ‌ها اجزا به طور خاصی به همدیگر چسبانده شده‌اند. این گونه محیط‌ها باعث کم شدن نفوذپذیری آبخوان می‌شوند.
- **آهک[1]:** ضخامت، تخلخل و نفوذپذیری آهک بسیار متغیر می‌باشد. آبخوان‌های مهمی در سراسر جهان از این ترکیب تشکیل یافته‌اند. منفذهای موجود در آهک ممکن است حفره‌های اولیه‌ی میکروسکوپیک تا مجراهای کانال‌گونه زیرزمینی را شامل گردند. با حل شدن قسمتی از سنگ آهک در امتداد شکستگی‌ها، جریان آب آن شکستگی را توسعه می‌دهد و نفوذپذیری محیط افزایش می‌یابد.
- **سنگ‌های آتشفشانی:** سنگ‌های آتشفشانی آبخوان‌های نفوذپذیری را شکل می دهند . جریان بازالتی بسیار نفوذپذیر می‌باشد. منفذهای آبخوان‌های بازالتی ممکن است به بزرگی ماسه یا شن نباشند، اما نفوذپذیری آن‌ها چندین برابر بزرگتر از ماسه و شن می‌باشد.
- **سنگ‌های دگرگیسی:** سنگ‌های کریستالی و دگرگیسی بسیار آب‌بند می باشند. این گونه سنگ ها به عنوان آبخوان‌های ضعیفی در نظر گرفته می‌شوند. نفوذپذیری این گونه سنگ‌ها توسط فرسایش افزایش می-یابد.
- **رس:** رس‌ها و مصالح زبرتر مخلوط شده با رس بسیار متخلخل می باشند. رس‌ها به علت منفذهای کوچک موجود در آن‌ها، بسیار آب بند می‌باشند (Bear, 1972).

1 -Limestone

به طور کلی یک محیط متخلخل شامل فضاهای زیر می باشد:

- فضایی از محیط متخلخل که توسط مایع یا گاز یا هر دو اشغال شده است. به عبارتی دیگر این مورد می‌تواند بیانگر فضاهای خالی باشد.
- فضایی از محیط متخلخل که توسط فاز جامد اشغال شده است (Bear, 1972).



شکل ۱-۱: انواع مختلف سنگ های متخلخل A. رسوبات ته نشین شده دسته بندی شده با تخلخل بالا؛ B. رسوبات ته نشین شده با طبقه بندی ضعیف تخلخل پائینی دارد؛ C. رسوبات ته نشین شده طبقه بندی شده به همراه سنگریزه این مجموعه تخلخل بسیار بالایی دارد D. رسوبات ته نشین شده طبقه بندی شده که با زیاد شدن لایه های معدنی موجود در شکاف ها تخلخل آن کم می‌شود؛ E. سنگ که تخلخل آن با میزان حلالیت آن تغییر می‌کند؛ F. سنگ که میزان تخلخل آن با میزان شکستگی تغییر می‌کند (Bear, 1972).

۱-۳- انواع روابط پایه و مدل‌های شبیه‌سازی تحلیل جریان در محیط متخلخل

مهمترین روابط پایه تحلیل جریان در محیط متخلخل روابط دارسی، فورشهایمر و رابطه توانی می باشند . این روابط پایه در ابتدا مفهوم تجربی داشته ولی بعدها با معادلات تئوریکی نظیر ناویر استوکس هم نتیجه‌گیری شده اند . رابطه دارسی بیان می‌کند که گرادیان هیدرولیکی جریان به‌صورت خطی با سرعت ظاهری سیال ارتباط دارد. این رابطه در جریان آرام درون محیط های متخلخل رژیم‌دانه صادق می باشد. روابط فورشهایمر و توانی از دیگر روابط مهم پایه جریان در محیط متخلخل می‌باشند که در رژیم آشفته جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه (هنگامی که سرعت و عدد رینولدز زیاد می‌شود.) صادق می‌باشند و بیانگر این می‌باشند که در سرعت‌های بالا رابطه بین گرادیان و سرعت ظاهری از حالت خطی خارج می‌شود.

اما آنچه در روابط پایه‌ی جریان در محیط متخلخل حائز اهمیت است، تعیین ضرایب ثابت موجود در آن‌ها می-باشد. این ضرایب متناسب با شرایط خاص حاکم بر مسئله مورد مطالعه، از جمله نوع جریان، شرایط محیط متخلخل و مشخصه‌ای فیزیکی سیال تغییر کرده و به همین دلیل، بخش عمده ای از تحقیقاتی که در خصوص جریان درون محیط‌های متخلخل صورت پذیرفته، مربوط به چگونگی تعیین این ضرایب می‌باشد.

جهت تعیین این ضرایب ثابت می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و یا تجربی استفاده کرد . در این بخش از تحقیقات، جریان درون محیط‌های متخلخل، به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج حاصل از آن‌ها، روابط مختلفی برای تعیین ضرایب موجود در روابط پایه جریان در محیط متخلخل، ارائه شده است. با توجه به این موضوع، بعضاً مدل‌های تجربی نیز متناسب با تئوری مورد استفاده در تعیین ضرایب ثابت موجود در آن‌ها، به چند دسته تقسیم شده‌اند. این ضرایب هم مربوط به مشخصه‌های فیزیکی محیط متخلخل می باشند و هم در ارتباط با خواص سیالی هستند که در محیط مزبور جریان می‌یابد. نتیجه کار در نهایت به‌صورت یکسری روابط و یا معادلاتی که بتوانند به‌صورت ریاضی، بعضی از ویژگی‌های جریان در محیط متخلخل را پیش‌بینی نموده و مورد ارزیابی قرار دهند ارائه می‌گردد.

روش دیگر جهت جریان جریان در محیط متخلخل و یا تعیین ضرایب ثابت موجود در روابط پایه حرکت در محیط متخلخل استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد. منظور از مدل‌های شبیه‌سازی در این نوشتار مدل‌هایی است که بر پایه شناسایی رفتار فیزیکی جریان در محیط متخلخل در تشابه با محیط های دیگر و یا شبیه سازی هندسی حفره‌های محیط متخلخل بنا شده‌اند. مجموعه مدل‌های شبیه‌سازی ایجاد شده در خصوص تحلیل جریان درون محیط متخلخل را می‌توان از جنبه‌های مختلف دسته‌بندی نمود، در یک تقسیم‌بندی کلی، مدل‌های مزبور را می‌توان به دو دسته مدل‌های شبیه‌سازی فیزیکی و مدل‌های شبیه‌سازی هندسی تقسیم‌بندی نمود.

مدل‌های شبیه‌سازی فیزیکی که اغلب جهت تحلیل جریان در محیط متخلخل می‌توان از آن‌ها بهره برد، بر اساس شباهت بین معادلات حاکم بر جریان و معادلات حاکم بر دیگر پدیده‌های فیزیکی به‌وجود آمده‌اند. سازکار این نوع از مدل‌ها بر پایه‌ی این اصل استوار است که عوامل دو سیستم (محیط متخلخل و محیط مشابه) یک به یک با همدیگر مشابه باشند و پارامترهای دو سیستم با روش مشابهی با هم رابطه داشته باشند. اکثر این مدل‌ها جریان خطی سیال در محیط متخلخل را شبیه‌سازی می‌کنند. برای به‌وجود آمدن چنین تشابهی بالطبع معادله حاکم بر دو سیستم و شرایط مرزی آن‌ها بایستی مشخص باشند.

گروه دیگر از مدل‌های شبیه‌سازی تحلیل جریان در محیط متخلخل، مدل‌های شبیه‌سازی هندسی می‌باشند. در این مدل‌ها، با توجه به اینکه سیال با عبور از درون خلل و فرج موجود در محیط متخلخل ، در کل محیط، جریان می-یابد، تمامی فضاهای خالی، به‌صورت ساختاری به هم پیوسته در نظر گرفته می‌شود. روش کار در این نوع مدل‌ها بدین صورت است که ابتدا هندسه و چگونگی توزیع فضاهای خالی محیط متخلخل شناسایی می شود، سپس این توزیع هندسی ساده‌سازی و بر یکی از توابع آماری منطبق می‌گردد، سپس فرض می‌شود در ساختار تشکیل شده سیال جریان پیدا کرده است و در انتها جریان درون مدل هندسی مورد آنالیز و بررسی قرار می گیرد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی جهت تعیین ضرایب روابط پایه همچون دارسی و فورشهایمر و یا تعیین مشخصات جریان در محیط متخلخل مانند هدایت هیدرولیکی، استفاده می‌گردد.

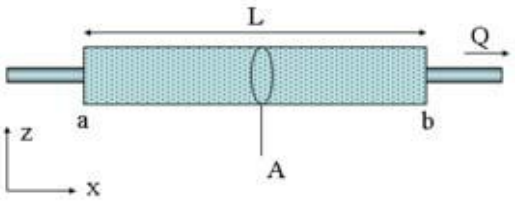
۱-٤- روابط پایه تحلیل جریان در محیط متخلخل

۱-٤-۱- رابطه‌ی خطی دارسی

با وجود اینکه قانون دارسی توسط دارسی به طور تجربی به‌دست آمده است، ولی این قانون از معادلات ناویر استوکس هم قابل استخراج است. این قانون مشابه قانون فوریه در زمینه رسانش گرمایی، قانون اهم در زمینه میدان جریان الکتریکی و یا قانون فیک در تئوری انتقال جرم می‌باشد (Philip, 2006).

دارسی از جمله اولین محققانی است که جریان آرام درون محیط های متخلخل ریزدانه را مورد بررسی قرار داده است. وی با ارزیابی نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی روی مجموعه ای از ستون های ماسه ای، نشان داد که گرادیان هیدرولیکی جریان به صورت خطی با سرعت ظاهری سیال ارتباط دارد. اگر در دو سر ستونی ماسه‌ای به سطح مقطع A و طول L، اختلاف فشار (اختلاف سطح آزاد آب) ΔH وجود داشته باشد (شکل ۱-۲)، دبی عبوری از این ستون ماسه‌ای از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Q = -KA\frac{\Delta H}{\Delta L} \qquad (۱-۱)$$



شکل ۱-۲: جریان عبوری از ستون ماسه‌ای (Philip, 2006)

که در آن، A سطح مقطع عمود بر جریان، ΔH اختلاف بلندای هیدرولیکی بین دو سر جریان، ΔL طول پیموده شده توسط سیال درون محیط متخلخل، Q دبی عبوری از مقطع A و K هدایت هیدرولیکی با بعد [L/T]

می‌باشد. علت وجود علامت منفی در معادله ۱-۱ این است که جهت جریان از سمت پتانسیل بیشتر به سمت پتانسیل کمتر و در خلاف جهت گرادیان هیدرولیکی است.

سرعت جریان به عنوان حجم آبی که از واحد سطح در واحد زمان عبور می‌کند، معرفی می‌شود و واحد آن m/s است. سرعت جریان که با اسامی سرعت ظاهری و یا جریان مخصوص نیز شناخته می شود، متفاوت از سرعت تراوش است. در واقع سرعت تراوش، میانگین سرعتی خواهد بود که در یک نقطه از محیط متخلخل رخ می دهد . سرعت تراوش از تقسیم نمودن سرعت جریان بر سطح منافذ موجود در واحد سطح محیط متخلخل به دست می‌آید. با توجه به اینکه نسبت منافذ موجود در واحد سطح محیط متخلخل همواره کوچکتر از یک می باشد، سرعت جریان کوچکتر از سرعت تراوش است. به بیان دیگر سرعت ظاهری جریان نمایانگر یک دیدگاه کلی از سرعت در محیط متخلخل می - باشد که به سادگی نیز قابل اندازه‌گیری است.

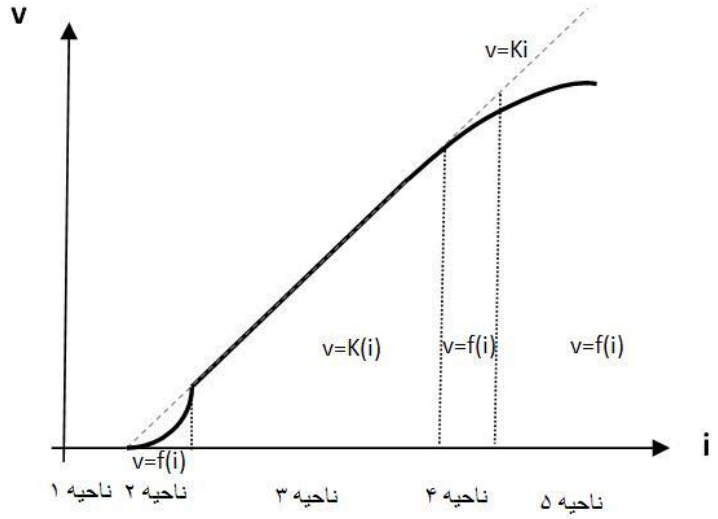
همان گونه که بیان گردید، K به عنوان هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل شناخته می شود که دارای بعد [L/T] می‌باشد. در واقع این ضریب مشخص کننده میزان سرعت حرکت آب در محیط متخلخل است و تابعی از خصوصیات ذرات نمونه خاک و خصوصیات سیال می باشد. خصوصیات محیط مانند توزیع اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها ، پیچ و خم موجود در یک سطح یا مسیر مشخص محیط متخلخل ، سطح ویژه و تخلخل و خصوصیات سیال مانند جرم مخصوص و لزوجت دینامیکی می‌باشند که بر مقدار K مؤثر هستند. بر این اساس هدایت هیدرولیکی به صورت زیر رابطه‌سازی می‌شود:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\vartheta} \qquad (۲-۱)$$

که در آن، ρ جرم مخصوص سیال، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب جاذبه زمین و k نفوذپذیری ذاتی محیط می‌باشد، k دارای بعد [L^2] است و فقط به ویژگی توده متخلخل بستگی دارد.

۱-٤-۲- جریان غیر خطی آب در محیط متخلخل

تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی محیط های ریزدانه که حرکت جریان در آن‌ها به کندی صورت می - گیرد، نشان می‌دهد که رژیم جریان در حالت آرام یا لایه ای قرار دارد. در این شرایط، اعداد رینولدز به دست آمده از آزمایش مقادیر پائینی را نشان می‌دهد و این موضوع حاکی از قوت نیروهای لزوجت نسبت به نیروهای شتاب دهنده می‌باشد. در رژیم لایه‌ای جریان، نمودار سرعت جریان- گرادیان، خطی بوده و قانون دارسی به عنوان رابطه پایه حاکم بر جریان شناخته می‌شود. با آزمایشات مشابهی که بر روی محیط‌های متخلخل درشت دانه انجام شده، تغییر در رژیم جریان از آرام به آشفته مشاهده شده است. این تغییر به سبب افزایش سرعت جریان در محیط مذکور و مشاهده اعداد رینولدز بالا صورت می‌گیرد. در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، نیروهای شتاب دهنده جریان بر نیروهای لزوجت غلبه می‌یابند و منحنی سرعت- گرادیان در این شرایط از حالت خطی انحراف می یابد. به جریانی که در این وضعیت قرار می‌گیرد، جریان غیرخطی یا غیردارسی می‌گویند. به عبارت دیگر در رژیم آشفته جریان در محیطهای متخلخل درشت- دانه، گرادیان هیدرولیکی با توان اول سرعت جریان متناسب نمی‌باشد و رابطه دارسی به عنوان رابطه پایه جریان در این شرایط اعتبار خود را از دست خواهد داد. نحوه تغییرات سرعت با گرادیان هیدرولیکی برای انواع رژیم‌های جریان که ممکن است در محیط‌های متخلخل پیش آیند، در شکل ۱-۳ ارائه می‌شود.



شکل ۱-۳: انواع رژیم‌های جریان در محیط متخلخل (Micchioku et al., 2005)

به منظور درک بهتر انواع رژیم‌های جریان در یک محیط متخلخل و نحوه شکل گیری جریان غیر خطی در رژیم‌های خاص توضیح مختصری در ارتباط با هر ناحیه ارائه می‌شود.

۱. **ناحیه بدون جریان:** این ناحیه در شرایطی که محیط کاملاً متراکم باشد و سیال دارای درصد بالایی از مواد معلق باشد، رخ می‌دهد. در این ناحیه، نیروهای کشش سطحی بین ذرات و سیال به قدری نیرومند می‌باشند که گرادیان اولیه یا آستانه‌ای را ایجاد می‌نمایند.

۲. **ناحیه جریان لایه‌ای غیر دارسی پیش از حالت خطی:** در این ناحیه از جریان نیروی سطحی ناشی از کشش یا جاذبه قوی بین ذرات باردار منفی رس و مولکول‌های قطبی شده آب سبب ایجاد یک رابطه غیر خطی بین سرعت و گرادیان در محیط شده و لذا جریان غیرخطی شکل می‌گیرد.

۳. **رژیم لایه‌ای دارسی:** همانگونه که قبلا نیز اشاره گردید در اکثر خاک‌های طبیعی این رفتار مشاهده می‌گردد و گستردگی این ناحیه جریان بسیاری از انواع خاک ها یا محیط‌های متخلخل را در بر می‌گیرد. در این ناحیه اثرات نیروهای شتاب دهنده در مقایسه با نیروهای لزوجت کوچک و قابل اغماض می باشند . معادله حاکم بر این ناحیه همان رابطه مشهور دارسی است.

۴. **جریان غیردارسی با رژیم لایه‌ای پس از ناحیه خطی:** این ناحیه در واقع موقعیتی از جریان عبوری را بیان می‌دارد که هنوز به صورت لایه‌ای حرکت می‌نماید ولی با این وجود افزایش تدریجی اثرات نیروهای شتاب‌دهنده موجب انحراف جریان از حالت خطی دارسی می‌گردد.

۵. **ناحیه جریان غیردارسی با رژیم آشفته:** پس از ناحیه خطی در این ناحیه ، به علت غالب شدن نیروهای شتاب دهنده جریان بر نیروهای لزوجت، جریان از رژیم آشفته برخوردار است و انحراف رابطه سرعت– گرادیان از حالت خطی نسبت به سایر نواحی بیشتر می‌شود. همانگونه که در شکل ۱–۱ ملاحظه می‌شود، نرخ افزایش سرعت نسبت به گرادیان هیدرولیکی در مقایسه با سایر نواحی در این ناحیه از جریان کمتر شده است.

لازم به ذکر است که ۵ ناحیه ذکر شده برای جریان در محیط متخلخل برای کلیه خاک ها و یا محیط‌ها وجود ندارد. به عنوان نمونه، برای محیط متشکل از رس دو ناحیه آخر وجود نخواهد داشت و این در حالی است که برای ماسه و دیگر مواد درشت دانه، دو ناحیه ابتدایی مشاهده نشده است (Micchioku et al., 2005).

۱-٤-۲-۱- روابط پایه و تجربی جریان غیرخطی آب در محیط متخلخل

فورشهایمر، برای اولین بار، در سال ۱۹۱۴، بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد، در جریان های ناآرام، گرادیان هیدرولیکی علاوه بر توان اول سرعت، با توان دوم آن نیز ارتباط مستقیم پیدا می کند (Wang and Liu, 2003). در رابطه پیشنهادی فورشهایمر، ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت زیر بیان شده است:

$$i = av + bv^2 \qquad (۳-۱)$$

که در آن i گرادیان هیدرولیکی ، v سرعت ظاهری جریان و a و b ضرایب ثابتی می‌باشند که به خصوصیات محیط متخلخل و خصوصیات جریان بستگی دارند. در سرعت‌های پائین تأثیر bv^2 کم می‌شود و رابطه به سمت معادله دارسی متمایل می‌گردد و در سرعت‌های بالا عبارت با توان دوم غالب می‌گردد (Hosseini, 2000).

معادله پایه‌ی غیرخطی دیگری که جهت تحلیل جریان غیر خطی در محیط متخلخل استفاده می شود، معادله پایه توانی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$i = lv^{\lambda} \qquad (۴-۱)$$

که در آن l و λ پارامترهای ثابتی هستند که به خصوصیات محیط متخلخل و خصوصیات جریان وابسته می باشند. مقدار λ بین ۱ و ۲ تغییر می‌کند. به موازات مطالعه روی توصیف تئوریکی و فیزیکی جریان غیرخطی، مطالعات گسترده‌تری برای مرتبط کردن ضرایب معادلات پایه با خصوصیات جریان و محیط متخلخل انجام شده است. در این زمینه روابط تجربی زیادی با استفاده از کارهای آزمایشگاهی و تجربی به وجود آمده‌اند. روابط تجربی زیر بیشترین کاربرد را در زمینه بدست آوردن ضرایب معادلات پایه دارا هستند (Hosseini, 2000):

معادله ارگان[1]:

$$i = \frac{150(1-n)^2 \vartheta}{n^3 g D_p{}^2} v + \frac{1.75(1-n)}{n^3 g D_p} v^2 \qquad (۵-۱)$$

معادله مک کورکوادل[2] و همکاران:

برای اعداد رینولدز $\mathrm{Re}_w = \frac{vmn^{0.5}}{\vartheta} \le 125$ یا $\mathrm{Re}_p = \frac{vm}{\vartheta n} \le 500$:

$$i = \frac{4.6\vartheta}{gnm^2} v + \frac{0.79}{gn^{0.5} m} v^2 \qquad (۶-۱)$$

برای اعداد رینولدز $\mathrm{Re}_w = \frac{vmn^{0.5}}{\vartheta} > 125$ یا $\mathrm{Re}_p = \frac{vm}{\vartheta n} > 500$:

$$i = \frac{70\vartheta}{gnm^2} v + \frac{0.27\left(1 + \frac{f_\varepsilon}{f_0}\right)}{gn^{0.5} m'} v^2 \qquad (۷-۱)$$

معادله استیفنسن[3]:

$$i = \frac{800\vartheta}{gnD_p^2} v + \frac{kt}{n^2 g D_p} v^2 \qquad (۸-۱)$$

معادله عادل[4]:

$$i = \frac{160\vartheta(1-n)^2}{gn^3 d_{15}^2} v + \frac{2.2}{gn^2 d_{15}} v^2 \qquad (۹-۱)$$

1- Ergun
2- McCorquodale
3- Stephenson
4- Adel

معادلات بالا برای تعیین ضرایب رابطه پایه فورشهایمر صادق می‌باشند و دو رابطه زیر برای رابطه پایه توانی کاربرد دارند.

معادله ویلکینز[1]:

$$i = \frac{1}{m^{0.93}} \left(\frac{v}{Wn} \right)^{1.85} \qquad (۱۰-۱)$$

معادله مارتینز[2]:

$$i = \frac{c_u^{2\gamma}}{2n^2 K_m^2 geD_p} v^2 \qquad for \quad \mathrm{Re} > 300 \qquad (۱۱-۱)$$

در روابط فوق، i گرادیان هیدرولیکی، v سرعت ظاهری، n تخلخل، e پوکی، ϑ لزوجت سینماتیکی، Dp اندازه میانگین هارمونیک دانه‌ها، kt فاکتور زبری در ناحیه آشفته جریان (۱ برای گرد گوشه، ۲ برای نیمه گرد گوشه، ۴ برای زاویه دار)، Re عدد رینولدز، Re_p عدد رینولدز منفذی، Re_w عدد رینولدز وارد، f_ε فاکتور اصطکاک دارسی برای سنگ بدون اثر دیواره‌ای، f_0 فاکتور اصطکاک دارسی برای یک سطح صاف هیدرولیکی در عدد رینولدز متشابه، m شعاع هیدرولیکی منفذی، m' شعاع هیدرولیکی مؤثر منفذی که مقدارش از نسبت حجم مؤثر کل حفره‌ها به سطح مؤثر کل به‌دست می‌آید، k_m ضریبی ثابت (که مقدارش ۰/۵۶ برای مصالح تیزگوشه و ۰/۷۵ برای مصالح گردگوشه می‌باشد)، c_u ضریب یکنواختی و W مقدار ثابتی است که در سیستم بین المللی آحاد برابر ۵/۲۴۳ می باشد.

یکی از حالاتی که پژوهشگران برای توصیف روابط پایه جریان غیرخطی در محیط متخلخل بیان می کنند، حالت اصطکاکی روابط مذکور می‌باشد. این عمل با برابر قرار دادن معادله جریان در محیط متخلخل با معادله گرادیان هیدرولیکی جریان آب در یک لوله انجام می‌گیرد. بدین ترتیب فاکتور اصطکاک در محیط متخلخل در تشابه با رابطه دارسی وایسباخ به‌دست خواهد آمد.

1- Wilkins
2-Martins

جامع‌ترین معادله توصیف کننده حرکت جریان در محیط متخلخل معادله فورشهایمر می‌باشد. با متشابه قرار دادن این رابطه، با معادله جریان در لوله‌ای با ابعاد برابر با محیط متخلخل، رابطه استیفنسن را می توان به فرم زیر نوشت.

$$f = \frac{A}{\mathrm{Re}_p} + B \qquad (۱۲-۱)$$

که در آن ضرایب A و B ضرایب ثابتی می‌باشند که تابع خصوصیات محیط متخلخل و جریان هستن د. برای مثال معادله تجربی استیفنسن (معادله ۱-۸) با روند زیر به فرم اصطکاکی خود در می‌آید.

اگر ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و ضریب اصطکاک در محیط متخلخل به‌صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$i = \frac{f}{D_p n^2}\frac{v^2}{g} \qquad (۱۳-۱)$$

با توجه به معادله ۱-۱۳ و تعریف عدد رینولدز به‌صورت $\mathrm{Re} = \frac{vD_p}{\vartheta n}$، معادله استیفنسن را می‌توان به صورت زیر در فرم اصطکاکی خود نوشت:

$$f = \frac{800}{\mathrm{Re}} + kt \qquad (۱۴-۱)$$

در روابط فوق، i گرادیان هیدرولیکی، v سرعت ظاهری سیال، ϑ لزوجت سینماتیکی سیال، D_p میانگین هارمونیک قطر ذرات، n تخلخل و kt فاکتور زبری در ناحیه آشفته جریان می‌باشد، مقدار kt برای سنگ‌های صیقلی و کروی ۱، برای سنگ‌های نیمه گرد ۲ و برای سنگ‌های شکسته و تیزگوشه برابر ۴ می‌باشد (Stephenson, 1979).

۱-۵- انواع مدل‌های شبیه‌سازی فیزیکی جریان در محیط متخلخل

همانطور که در بخش ۱-۳ بیان شد، در یک تقسیم بندی کلی مدل های شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل به دو دسته مدل های شبیه سازی فیزیکی و مدل هندسی تقسیم می شوند. مدل‌های شبیه سازی فیزیکی جر یان در محیط متخلخل را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود. در دسته اول سعی شده است محیط متخلخل و سیالی که در

آن جریان می‌یابد به‌صورت واقعی و تنها در مقیاس کوچک‌تر از محیط متخلخل اصلی بنا شود. این مدل‌ها تحت عنوان مدل‌های محفظه ماسه‌ای مشهورند که در بخش بعدی در مورد آن توضیح داده می‌شود.

سازوکار دسته دوم از انواع مدل های شبیه‌سازی فیزیکی جریان در محیط متخلخل بر پایه ی این اصل استوار است که محیطی فیزیکی مشابه محیط متخلخل در مقیاس کوچکتر ایجاد شود، بطوریکه عوامل دو سیستم (محیط متخلخل و محیط مشابه) یک به یک با همدیگر مشابه باشند و پارامتر های دو سیستم با روش مشابهی با هم رابطه داشته باشند. از انواع این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های شبیه‌سازی فیزیکی هله- شاو، الکتریکی و حرکت یون‌ها نام برد که در ادامه در مورد آن‌ها توضیح داده می‌شود.

۱-۵-۱- مدل محفظه ماسه‌ای[1]

مدل محفظه ماسه‌ای از یک جعبه سخت نفوذ ناپذیر که با جسم متخلخل پر شده است، یک یا چند جریان، یک سیستم منبع و یک ابزار اندازه‌گیری تشکیل شده است. هندسه جعبه مطابق با هندسه جریان در محیط متخلخل ولی در ابعاد کوچکتر می‌باشد. ستون‌های ۲ تا ۶ اینچی ماسه ای رایج‌ترین شکل هندسی در مسائل مدل‌سازی یک بعدی می‌باشند. هندسه جعبه مطابق با هندسه دامنه جریان در محیط متخلخل اصلی می‌باشد. شکل‌های رایج محفظه معمولاً مربعی، شعاعی و ستونی است. معمولاً محفظه از جنسی ساخته می‌شود که داخل آن قابل رویت باشد و یک ماده رنگی به مایع اضافه می‌گردد تا جریان سیال در دیواره محفظه قابل ردیابی باشد.

تغییر هدایت هیدرولیکی یا تخلخل در محیط متخلخل اصلی را می توان با تغییر دادن متعلّقات ماده متخلخل داخل محفظه ماسه‌ای شبیه‌سازی کرد. برای کم شدن حجم ماده متخلخل موجود در محفظه، محفظه هنگام پر شدن لرزانده می‌شود. همچنین برای حذف اثرات دیواره محفظه، دانه‌های ماسه به دیواره محفظه چسبانده می‌شوند.

شرایط مرزی و اولیه مدل محفظه ماسه‌ای بایستی به درستی شبیه سازی و پتانسیل جریان های ورودی و خروجی تثبیت شوند. تثبیت تراز می‌تواند با استفاده از مخزن با بلندای هیدرولیکی ثابت که به ورودی و خروجی مدل متصل است، انجام گیرد. در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی معمولاً از آب به عنوان سیال موجود در محفظه استفاده می-

1-Sand Box