

مروری بر رویکردهای پژوهشی انتقال آلاینده‌ها در رس‌های اشباع تغییر شکل پذیر تحت اثر فرایندهای همبسته‌ی هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی

آیسا هدایتی آذر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حامد صادقی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوری ۳-۳۷، شماره ۲، ص. ۹۷-۱۱۵، (مورخ)

یکی از راهکارهای مدیریت زباله‌ها و کنترل نشت شیرابه، دفن و ایزولاسیون آن‌ها در یک لایه‌ی رسی متراکم است. علی‌رغم نفوذپذیری بسیار کم رس، امکان عبور جریان سیال و اجزاء از آن به میزان کم وجود دارد. پدیده‌هایی که باعث انتقال سیال می‌شوند، شامل جریان هیدرولیکی دارسی و اسمز - شیمیایی است که به ترتیب ناشی از گرادیان هیدرولیکی و غلظت است. پدیدار شدن جریان اسمز - شیمیایی به علت خاصیت غشایی رس است. از سوی دیگر انتقال اجزای شیمیایی، بر اثر انتشار و انتقال اجزاء همراه با جریان سیال رخ می‌دهد. به دلیل اهمیت موضوع، در این مقاله به مرور جامع تحلیل اثرات همبسته‌ی این پدیده‌ها با رویکردهای مختلف پژوهشی می‌پردازیم. پس از دسته‌بندی رویکردهای تحلیل در سه حوزه‌ی آزمایشگاهی، نظری و عددی، معادلات همبسته‌ی حاکم بر این پدیده هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی ارائه می‌شود. در نهایت، با توجه به محدودیت‌های کارهای پیشین، نگرشی بر چالش‌های پیش رو در پژوهش‌های آتی فراهم می‌شود.

واژگان کلیدی: انتقال آلودگی، هدایت هیدرولیکی، اسمز - شیمیایی، انتشار، کارایی غشا، جریان‌های همبسته، مدفن زباله.

۱. مقدمه

این پدیده‌ها در ایمنی بلندمدت منطقه‌ی دفن، حائز اهمیت است.^[۶۵] در حالی که مسئله‌ی انتقال اجزای شیمیایی محلول در خاک‌های رسی تحت اثر پدیده‌های همبسته، محور بسیاری از پژوهش‌های ۲۰ سال اخیر بوده است، خلاء یک نوشتار مروری جهت بررسی یافته‌ها و چالش‌های پیش رو احساس می‌شود.^[۸۷]

۲. پدیده‌های مؤثر در انتقال

پدیده‌ی انتقال در خاک راجع به اثرات مستقیم و همبسته‌ی پدیده‌های اثرگذار در انتقال جریان سیال و اجزای شیمیایی است. انتقال سیال و اجزای شیمیایی محلول در خاک‌ها فرایند پیچیده‌ی است که چندین پدیده در آن ایفای نقش می‌کنند و شناخت هر یک از پدیده‌ها به بهبود درک فرایند کلی کمک می‌کند. پدیده‌های اثرگذار بر انتقال در جدول ۱ خلاصه شده است. بر اساس این جدول، پتانسیل‌های محرک در انتقال جریان سیال، گرادیان هیدرولیکی (قانون دارسی) و اسمز - شیمیایی (قانون ون‌هوف) و پتانسیل‌های مؤثر در انتقال اجزای شیمیایی محلول، انتشار^۲ (قانون فیک) و عبور برخی اجزاء همراه با جریان سیال^۳ (همرفت) است.^[۹۷]

مدیریت زباله‌های شهری و صنعتی یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیست است که دفن آن یکی از مؤثرترین رویکردهاست.^[۱۹] زباله‌ها معمولاً در یک بستر ایزولاسیون متشکل از رس متراکم طبیعی یا مهندسی شده، بنتونیت، ژئوسنتتیک یا ترکیبی از آن‌ها دفن شده تا از انتقال شیرابه و اجزای مضر به داخل خاک و بیرون مدفن جلوگیری شود. استفاده از این نوع خاک‌ها علاوه بر مدفن‌های زباله، در دیواره‌های عمودی حائل^۱ نیز کاربرد دارد.^[۴۲] با وجود قابلیت هدایت هیدرولیکی بسیار کم و اندازه‌ی میکرونی ذرات رس، امکان عبور جریان سیال و اجزای شیمیایی متغی نیست و به کارایی لایه‌ی ایزولاسیون بستگی دارد. وجود اجزای شیمیایی در خاک می‌تواند باعث آلودگی گیاهان، آب‌های زیرزمینی، آسیب به آبزیان و انسان شود و به همین دلیل انتقال اجزای شیمیایی موجود در شیرابه‌ی زباله‌ها از لایه‌های ایزولاسیون خاکی حائز اهمیت است. فرایند انتقال اجزاء و سیال در خاک‌ها فرایندی پیچیده است؛ زیرا حاصل اثر همزمان و همبسته‌ی چند پدیده است. بنابراین، شناخت هرچه دقیق‌تر

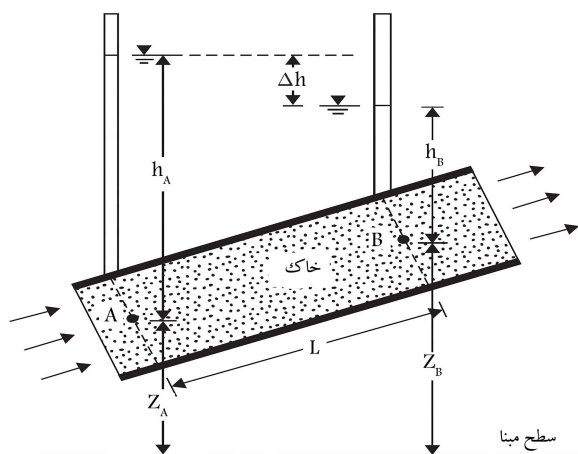
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۴، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۲۶.

DOI:10.24200/J40.2021.56928.1565

جدول ۱. پتانسیل‌های محرک جریان. [۱۰۹]

نوع جریان	گرادیان غلظت	گرادیان هیدرولیکی
سیال	اسمز - شیمیایی	هدایت هیدرولیکی (قانون دارسی)
حل شونده	انتشار (قانون فیک)	انتقال حل شونده‌ها همراه جریان



شکل ۱. تصویر شماتیک برای بیان قانون دارسی. [۲۰]

به‌طور کلی، در بررسی پدیده‌های همبسته‌ی انتقال سیال و اجزای شیمیایی، دو رویکرد وجود دارد: پدیدارشناسی^۴ و فیزیکی^۵. قوانین حاکم در هر دو رویکرد بر اساس قانون دوم ترمودینامیک است؛ با این تفاوت که رویکرد پدیدارشناسی در ابعاد ماکروسکوپی و رویکرد فیزیکی در ابعاد میکروسکوپی به بررسی جریان‌های مذکور می‌پردازد. اولین بار استاورمن^[۱۳] اصول ترمودینامیک فرایندهای برگشت‌ناپذیر را برای غشاهای اعمال کرد. نتیجه‌ی کلیدی از تحلیل استاورمن نشان می‌دهد که انتقال حل شونده‌ها و یون‌ها می‌تواند به صورت تابعی خطی از تفاوت پتانسیل الکتروشیمیایی سیال در دو طرف غشا بیان شود.^[۱۳]

رویکرد پدیدارشناسی به مطالعه‌ی چگونگی رخداد پدیده‌ها پرداخته و در این نگرش خواص خاک به صورت ضرایبی بر اساس نسبتی بین جریان یا جریان و گرادیان تعریف می‌شود. در این رویکرد، داده‌های آزمایشگاهی و متغیرهای حالت برای یافتن ضرایب روابط مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[۱۲] رویکرد پدیدارشناسی به علت پیچیدگی شناخت دقیق پدیده‌های حاکم در انتقال جریان در ابعاد کانی‌های رسی به وجود آمده است.^[۱۵، ۱۴]

رویکرد فیزیکی در مقیاس حفره‌های خاک به تحلیل اثرات همبسته‌ی جریان می‌پردازد. این نوع نگرش به بررسی علت رخداد پدیده‌ها با استفاده از متغیرهای ذاتی مواد می‌پردازد.^[۱۱] در رویکرد فیزیکی، با یافتن قوانین فیزیکی و شیمیایی حاکم بر جریان در ابعاد حفره‌های خاک، اثرات همبسته‌ی جریان‌ها با استفاده از مسئله‌ی مقدار مرزی مورد بحث قرار می‌گیرد.^[۹] این رویکرد در برطرف کردن برخی از مشکلاتی که در نگرش پدیدارشناسی وجود دارد، مؤثر است.^[۷]

علت ایجاد جریان اسمز - شیمیایی، وجود خاصیت غشایی در خاک‌های ریزدانه‌ی رسی است.^[۱۸-۱۶] این جریان بر خصوصیات مکانیکی خاک رس نیز تأثیرگذار است و می‌تواند با کاهش دافعه‌ی بین کانی‌های رس، باعث تحکیم خاک شود.^[۱۹، ۱۷] تمام مطالعاتی را که در این حوزه انجام شده است می‌توان در سه حوزه‌ی نظری، آزمایشگاهی و عددی تقسیم‌بندی کرد. در بخش‌های آتی به توضیح هریک از این پدیده‌ها خواهیم پرداخت.

۱.۲. هدایت هیدرولیکی

مقدار ارتفاع آبی^۶ کل در هر نقطه از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:^[۲۰]

$$h_T = h + z + \frac{v^2}{2g} \quad (۱)$$

که در آن، z ارتفاع آبی ارتفاع، h ارتفاع آبی فشار و $v^2/2g$ ارتفاع آبی سرعت است. از آن‌جا که سرعت جریان در خاک‌های ریزدانه خیلی کم است، می‌توان از ارتفاع آبی سرعت چشم‌پوشی کرد. بنابراین، مقدار ارتفاع آبی کل در خاک به صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود:^[۲۰]

$$h_T = h + z \quad (۲)$$

در صورتی که مقدار ارتفاع آبی ارتفاع و فشار در نقطه‌ی A (شکل ۱) برابر با z_A و h_A در نقطه‌ی B (شکل ۱) برابر با z_B و h_B باشد، تفاوت ارتفاع آبی بین این

نقاط عبارت است از:^[۲۰]

$$\Delta h = (h_A + z_A) - (h_B + z_B) \quad (۳)$$

و گرادیان هیدرولیکی که عامل محرک جریان است نیز چنین تعریف می‌شود:^[۲۰]

$$i_h = \frac{\Delta h}{L} \quad (۴)$$

که در آن، L (فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی A و B) و مقدار Δh در شکل ۱ مشخص شده است.^[۲۰] دارسی (۱۸۵۶) رابطه‌ی خطی میان سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی پیشنهاد داد:^[۲۰]

$$v_h = k_h i_h \quad (۵)$$

که در آن v_h برابر سرعت سیال و k_h ضریب هدایت هیدرولیکی است.^[۲۰] بنابراین، می‌توان مقاومت خاک در مقابل عبور جریان را بر مبنای هدایت هیدرولیکی تعیین کرد. مقدار هدایت هیدرولیکی بر اساس مشخصات خاک و سیال توسط رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود:^[۲۰]

$$k_h \text{ (cm/s)} = \frac{K \rho_f g}{\mu_f} \quad (۶)$$

$K \text{ (cm}^2\text{)}$: نفوذپذیری ذاتی؛

$\rho_f \text{ (g/cm}^3\text{)}$: چگالی سیال؛

$g \text{ (cm/s}^2\text{)}$: شتاب گرانش؛

$\mu_f \text{ (g/cm.s)}$: لزجت پویای سیال.^۷

هدایت هیدرولیکی خاک‌های اشباع به توزیع اندازه‌ی دانه‌ها، تخلخل نمونه‌ی خاکی، وزن مخصوص دانه‌های خاک، حدود اتزبرگ خاک‌های چسبنده، چگالی، دما و گرانیوی سیال حفره‌ی بستگی دارد. مدل‌های تجربی بسیاری برای این ضریب معرفی شده است که همگی دارای خطا هستند.^[۲۳-۲۱]

همان‌طور که گفته شد، هدایت هیدرولیکی تابع تخلخل است.^[۲۴] نکته‌ی حائز اهمیت این است که سیال فقط می‌تواند از بین حفره‌های خاک عبور کند؛ بنابراین مقدار واقعی سرعت در خاک به اندازه‌ی v_h/n است، که در این رابطه n نشان‌گر تخلخل خاک است.^[۲۰]

۲.۲. پدیده‌ی اسمز - شیمیایی

اسمز - شیمیایی^۸ پدیده‌ی است که در آن سیال منفذی در نتیجه‌ی گرادین غلظت در دو طرف غشا (لایه‌ی ریزدانه‌ی رسی)، از منطقه‌ی با غلظت پایین‌تر (فعالیت شیمیایی بیشتر آب) به منطقه‌ی با غلظت بالاتر (فعالیت شیمیایی کم‌تر آب) جریان پیدا می‌کند. پدیده‌ی اسمز - شیمیایی در واقع یک حالت خاص از انتشار است که توسط ففر (۱۸۷۷) کشف شد. این پدیده به منظور توجیه نحوه‌ی حرکت آب در سلول‌های گیاهی مورد توجه قرار گرفت.^[۲۵،۲۷]

طبق نتایج آزمایشگاهی ففر (۱۸۷۷)،^[۲۵] با افزایش غلظت حل‌شونده مقدار فشار اسمزی افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که نسبت غلظت حل‌شونده‌های رقیق (تقریباً کم‌تر از ۱ مولار) به فشار اسمزی تقریباً ثابت است. همچنین با افزایش دما، مقدار فشار اسمزی نیز افزایش می‌یابد. مروری بر نتایج ففر (۱۸۷۷) نشان داد که در دمای ثابت، بین فشار اسمزی محلول و فشار گاز معادل اجزای محلول، نوعی ارتباط وجود دارد. به این معنی که در صورت وجود تعداد مولکول‌های گازی معادل اجزای حل‌شونده در حجم برابر با حجم محلول، فشار اسمزی محلول و فشار گاز در این شرایط برابر است. آرنیوس^[۲۶] نشان داد که اسیدها و نمک‌ها در حلال به یون‌هایی تجزیه می‌شوند و هر یون در نقش یک ذره‌ی حل‌شونده برای همسازی فشار اسمزی و فشار گاز عمل می‌کند.^[۲۷]

۱.۲.۲. اسمز - شیمیایی در خاک‌ها

در ابتدا تصور می‌شد که سیال در خاک به ۳ دلیل حرکت می‌کند: نیروی جاذبه، گرادین دما و اثر موینگی. نتایج تحقیقات بعدی نشان داد که دلیل چهارمی هم برای حرکت سیال در خاک وجود دارد که به آن اثر اسمزی گفته می‌شود. نتایج آزمایش‌های لینده^[۲۷] نشان داد که خاک ریزدانه مانند یک غشای نیمه‌تراوا عمل می‌کند و تفاوت فشار اسمزی ناشی از گرادین غلظت، باعث انتقال سیال از درون بافت خاک می‌شود.^[۲۷] خاصیت غشایی در خاک‌های رسی به این معنی است که لایه‌ی خاکی در مقابل عبور اجزای حل‌شونده مقاومت می‌کند.^[۲۸-۳۰]

بر اساس پیشنهاد ون‌هوف بر مبنای نظریه‌های ترمودینامیک، رابطه‌ی برای محاسبه‌ی فشار اسمزی مطرح شده است، که چنین نوشته می‌شود:^[۳۱،۳۲]

$$\Pi = RT \sum_{i=1}^N C_i \quad (7)$$

N : تعداد یون‌های هر حل‌شونده پس از تفکیک در محلول؛

$\prod(N.m^{-1})$: فشار اسمزی؛

$R(8.314 N.m.mol^{-1}.K^{-1})$: ثابت جهانی گازها؛

$T(K)$: دمای مطلق؛

$C_i(mol/m^3)$: غلظت یون‌ها.

در رابطه‌ی ون‌هوف، حل‌شونده ایده‌آل فرض می‌شود؛ یعنی مقادیر غلظت در طرفین ثابت است. جریان سیال ایجاد شده به علت تفاوت فشار اسمزی در طرفین لایه‌ی خاکی با استفاده از قانونی مشابه قانون دارسی، به صورت زیر نوشته می‌شود:^[۳۳،۳۴]

$$q_\pi = \frac{k_\pi}{\rho f g} \frac{\partial \Pi}{\partial x} = \frac{\omega k_h}{\rho f g} \frac{\partial \Pi}{\partial x} \quad (8)$$

$q_\pi(m/s)$: دبی جریان سیال؛

$k_\pi(m/s)$: ضریب نفوذپذیری اسمزی؛

ω : کارایی غشا.

۲.۲.۲. ضریب کارایی غشا

ضریب کارایی غشای نیمه‌تراوا در خاک‌ها، نشان‌دهنده‌ی توانایی خاک در جلوگیری از عبور حل‌شونده‌ها از درون بافت آن است. مقاومت خاک در مقابل عبور یون‌ها از میان حفره‌های خاک، بستگی به دافعه‌ی الکترواستاتیکی ایجاد شده‌ی بارهای منفی سطح هریک از ذرات رس دارد.^[۳۵،۳۶] وقتی دانه‌های رسی به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک باشند، پتانسیل منفی سطح آن‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی پیدا کرده و فضای میان حفره‌ها هم با ر منفی پیدا می‌کند. همین امر سبب می‌شود که آنیون‌های عبوری تحت اثر پتانسیل منفی فضای متخلخل قرار گرفته و دفع شوند. به علت خاصیت خنثی‌طبی الکتریکی بین همه‌ی یون‌های شیمیایی، کاتیون‌ها نیز به همراه آنیون‌ها رانده می‌شوند.^[۷]

کارایی غشا می‌تواند در بازه صفر تا ۱ متغیر باشد که مقدار ۱ نشان‌دهنده‌ی رفتار ایده‌آل غشا و مقاومت کامل خاک از عبور اجزای شیمیایی و مقدار صفر نشان‌دهنده‌ی عدم مقاومت خاک در مقابل عبور یون‌هاست. در شرایط طبیعی، تمامی حفره‌های خاک، خاصیت رانش از خود نشان نمی‌دهند؛ زیرا که تمام ذرات به اندازه‌ی کافی به یک‌دیگر نزدیک نیستند و همین مورد باعث می‌شود که خاک هیچ‌یک از این دو رفتار را از خود نشان ندهد.^[۳۶،۳۹]

بر اساس نتایج تحقیقاتی که به صورت اولیه توسط کمپر و رولینز،^[۲۹] برسلر^[۳۷] و اولسن^[۳۰] انجام شد، کارایی غشا به ترکیبات شیمیایی مواد حل‌شونده، غلظت حل‌شده‌ها، تخلخل خاک، درصد رطوبت، سطح مخصوص ذرات خاک، کانی‌شناسی خاک و فواصل بین ذره‌ی ارتباط دارد.^[۱۷] برای اندازه‌گیری مقدار کارایی غشا از روش‌های آزمایشگاهی و روابط نظری استفاده می‌شود. در ادامه به توضیح این روش‌ها خواهیم پرداخت.

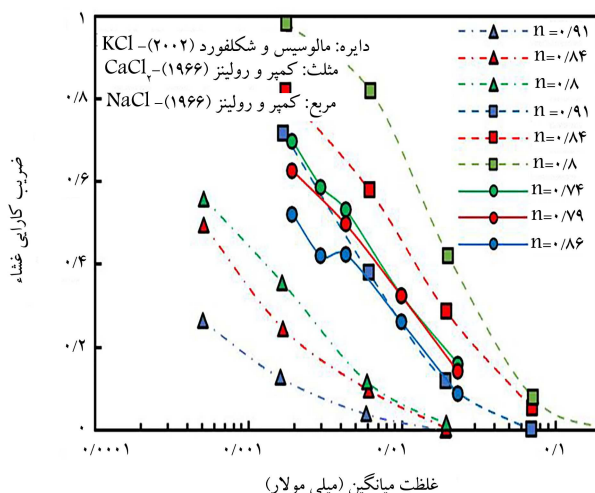
• روش آزمایشگاهی در تعیین کارایی غشا

برای تعیین کارایی غشا دو روش آزمایشگاهی وجود دارد: سیستم باز، سیستم بسته.^[۳۸،۳۹] در سیستم باز، خاک بین دو منبع محلول اجزای شیمیایی قرار گرفته که هر دو آن‌ها در تماس با هوا هستند و بین آن‌ها گرادین هیدرولیکی اعمال نمی‌شود. در هر دو روش، به علت وجود خاصیت غشایی در خاک‌های رسی، با ایجاد گرادین غلظت، تفاوت در مقادیر فشار اسمز - شیمیایی طرفین ایجاد می‌شود. در سیستم باز، مقدار افزایش آب در سمت مخزن دارای غلظت بیشتر حل‌شونده را طی زمان اندازه‌گیری می‌کنند تا مقدار دبی جریان اسمزی به دست آید. انتقال سیال تا جایی ادامه پیدا می‌کند که غلظت محلول در طرفین برابر شود. در این روش پروفیل غلظت در طول نمونه به صورت غیرخطی تغییر می‌کند.^[۴۰-۴۳] در سیستم بسته، اجازه‌ی عبور جریان اسمزی داده نشده و به همین دلیل فشاری هیدرولیکی معادل فشار اسمز - شیمیایی به وجود می‌آید. با اندازه‌گیری فشار هیدرولیکی ایجاد شده، می‌توان مقدار ضریب کارایی غشا را محاسبه کرد. در این روش امکان انتقال سیال وجود ندارد ولی امکان انتشار اجزای شیمیایی همچنان وجود دارد. برخلاف سیستم باز، در این حالت پروفیل غلظت خطی است.^[۴۴] با مقایسه‌ی این دو نوع سیستم می‌توان نتیجه گرفت که به علت پیچیدگی پروفیل غیرخطی غلظت نسبت به پروفیل خطی آن در محاسبه‌ی ضریب انتشار، ساده‌تر بودن کنترل شرایط مرزی در سیستم بسته و دقیق‌تر بودن اندازه‌گیری مقدار فشار هیدرولیکی معادل فشار اسمزی به نسبت اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم دبی انتقالی، سیستم بسته نسبت به سیستم باز برتری دارد.^[۴۳،۴۸]

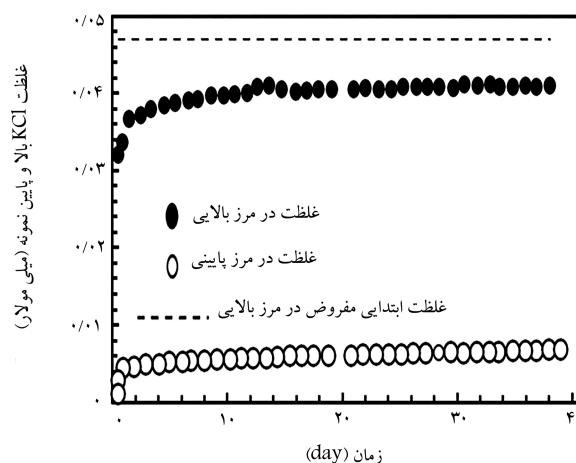
ضریب کارایی غشای محاسبه شده در این حالت، میانگین ضریب کارایی غشا در کل نمونه‌ی آزمایش است. بنابراین، کارایی غشا در آزمایشگاه از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید. [۴۳، ۴۶]

$$\omega = \frac{\Delta p}{\Delta \Pi} \bigg|_{q=0} = \frac{1}{\Delta C_s} \int_{C_b}^{C_t} \omega \cdot dC_s \quad (9)$$

که در آن Δp فشار هیدرولیکی معادل فشار اسمز - شیمیایی است. نمونه‌ی از نتایج آزمایش اندازه‌گیری کارایی غشا در شکل ۲ آمده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت حل‌شونده و تخلخل نمونه‌ی خاکی، مقدار کارایی غشا کاهش می‌یابد. [۱۶] در عمده‌ی کارهای آزمایشگاهی، مقادیر نظری فشار اسمز - شیمیایی با استفاده از رابطه‌ی ون هوف محاسبه شده است. با توجه به وجود انتشار، مقادیر غلظت حل‌شونده‌ها در طرفین نمی‌تواند کاملاً ثابت باشد. نمونه‌ی از نتایج آزمایشگاهی برای نشان دادن تغییر غلظت طرفین در طول زمان در شکل ۳ آمده است. برای حل این چالش، در برخی از کارهای آزمایشگاهی، از میانگین غلظت در زمان ابتدایی و انتهایی بهره‌گرفته می‌شود. در صورت استفاده از این روش، مقدار کارایی غشای محاسبه شده بیشتر می‌شود. به منظور یافتن مقادیر کارایی غشا با



شکل ۲. کارایی غشای بنتونیت برای انواع نمک برحسب غلظت‌های میانگین متفاوت در تخلخل‌های متفاوت (اصلاح شده از [۱۶] و [۲۹]).



شکل ۳. نحوه‌ی تغییر غلظت ابتدایی و انتهایی در طول زمان (اصلاح شده از [۱۶]).

لحاظ اثر انتشار، از روابط ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌شود: [۱۶]

$$\bar{C}_t = \frac{C_{t_0} + C_t}{2} \quad (10)$$

$$\bar{C}_b = \frac{C_{b_0} + C_b}{2} \quad (11)$$

که در آن \bar{C}_t نشان‌گر مقدار میانگین غلظت در مرز غلیظ‌تر و \bar{C}_b نشان‌دهنده‌ی غلظت در مرز رقیق‌تر است. مقادیر C_{t_0} و C_{b_0} نشان‌دهنده‌ی مقادیر غلظت در زمان ابتدایی و C_t و C_b نشان‌دهنده‌ی مقادیر غلظت در انتهای آزمایش است. در برخی سیستم‌های باز، به منظور رفع این مسئله، به سمتی که رقیق‌تر است آب اضافه کرده و از سمتی که غلیظ‌تر است، آب برمی‌دارند تا غلظت‌ها تقریباً ثابت بماند. [۴۳]

با توجه به سهولت و دقت بالاتر سیستم‌های بسته، آزمایش‌هایی که در ۲۰ سال گذشته انجام شده است، بیشتر با این سیستم صورت گرفته است. [۲۷، ۵۰] سیستم‌های مورد استفاده برای کارایی غشا به لحاظ نوع سلول مورد آزمایش دارای دو نوع صلب و انعطاف‌پذیر هستند. نمونه‌هایی که در سلول صلب قرار دارند، تغییر حجم نمی‌دهند. فشار همه‌جانبه در سلول‌های انعطاف‌پذیر قابل کنترل است. در صورتی که سیستم بسته باشد، در حین آزمایش تغییر حجم رخ نمی‌دهد، اما بین مراحل مختلف امکان تغییر حجم وجود دارد. [۴۷] اگر سیستم مورد بررسی باز باشد، امکان تغییر حجم در طی آزمایش هم وجود دارد. [۵۱] مقایسه‌ی مقادیر کارایی غشا در دو سلول انعطاف‌پذیر و صلب نشان می‌دهد که این ضریب در سلول انعطاف‌پذیر کمتر است. [۵۲، ۵۳، ۵۴]

در صورتی که هدف آن باشد که نمونه‌ی خاک در غلظت‌های متعدد مورد بررسی قرار گیرد، انجام آزمایش به دو صورت تک‌مرحله‌ی و چندمرحله‌ی ممکن است. در صورتی که در آزمایش به صورت یک مرحله‌ی صورت گیرد، پس از اتمام هر آزمایش نمونه مورد بررسی تعویض شده و نمونه‌ی جدید برای آزمایش در غلظت بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که آزمایش به صورت چندمرحله‌ی انجام شود، بدون تعویض نمونه‌ی خاکی، غلظت در مخزن متصل به نمونه تغییر می‌کند. [۴۵، ۱۶]

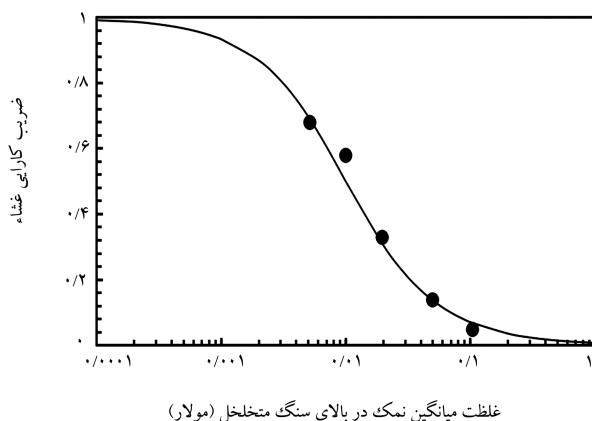
• روش نظری در تعیین کارایی غشا

علاوه بر روش‌های آزمایشگاهی در یافتن مقادیر کارایی غشا که مربوط به رویکرد پدیدارشناسی هستند، استفاده از روش فیزیکی و روابط تحلیلی نیز برای یافتن مقدار ضریب کارایی غشا ممکن است. [۵۳، ۱۱] با به‌کارگیری روابط پواسون، ناویر - استوکس، نارست - پلانک در ابعاد حفره‌ها و رابطه‌ی دونا برای پتانسیل‌های الکتروشیمیایی، رابطه‌ی ۱۲ برای کارایی غشای خاک‌های بنتونیتی (دارای کانی مونت‌موریلینیت) در صورت وجود نمک‌های تک‌ظرفیتی پیشنهاد شده است. [۵۶، ۵۵، ۴۹، ۱۱]

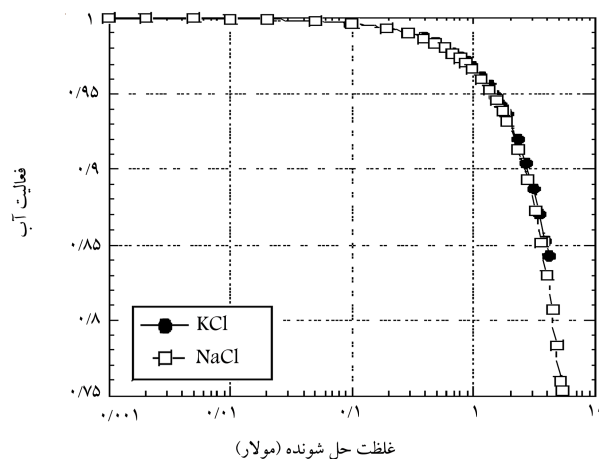
$$\omega = 1 - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\bar{C}_{sk}}{\bar{C}_{sm}}\right)^2 + 1 + (2t_c - 1)\left(\frac{\bar{C}_{sk}}{\bar{C}_{sm}}\right)}} \quad (12)$$

مقدار کارایی غشای میانگین در کل نمونه (ω_g) چنین محاسبه می‌شود: [۱۱]

$$\omega_g = 1 + \frac{\bar{C}_{sk}}{2e_m \Delta C_s} \left[Z_2 - Z_1 - (2t_c - 1) \ln \left(\frac{Z_2 + 2t_c - 1}{Z_1 + 2t_c - 1} \right) \right] \quad (13)$$



شکل ۴. مقدار کارایی غشا بر حسب غلظت میانگین به صورت آزمایشگاهی و نظری برای نمک NaCl (اصلاح شده از [۵۷]).



شکل ۵. فعالیت سیال بر اساس غلظت برای دو نمک KCl و NaCl. [۵۸]

ساده سازی این رابطه در شرایط وجود غلظت رقیق می توان به رابطه ی ون هوف رسید: [۳۵، ۳۹]

$$\Delta \Pi = \Pi - \Pi_p = \frac{RT}{V_w} \ln \left(\frac{a_{w,1}}{a_{w,2}} \right) \quad (20)$$

$$a_w = e^{\frac{-v M_w m \phi}{1000}} \quad (21)$$

V_w : میانگین جزئی حجم مولار سیال؛

a_w : فعالیت سیال؛

$M_w (g/mol)$: جرم مولار سیال؛

ϕ : ضریب اسمز عملی برای مقدار غلظت مولال حل شونده؛

$m (mol/kg)$: مولالیت حل شونده؛

v : تعداد یون های موجود در نمک.

میزان فعالیت محلول برای دو حل شونده ی NaCl و KCl با استفاده از شکل ۵

نیز نشان داده شده است. در صورت استفاده از روش فعالیت آب، هم در مقدار کارایی غشا و هم در مقدار فشار اسمزی تغییر ایجاد می شود. با توجه به نتایج ارائه شده در مقاله ی فریتزو همکاران، [۳۴] می توان پیش بینی کرد که تا غلظت حدود ۱/۶ مولار برای NaCl و ۲/۴ مولار برای KCl، مقدار فشار اسمزی با این روش کم تر از فشار اسمزی در رابطه ی ون هوف و مقدار کارایی غشا نیز به تبع آن بیشتر از مقدار به دست آمده از رابطه ی ون هوف است. [۵۸، ۳۴]

$$Z_1 = \sqrt{1 + \left(\frac{2C_s e_m}{\bar{c}_{sk,s}} \right)^2} \quad (14)$$

$$Z_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{2C_L e_m}{\bar{c}_{sk,s}} \right)^2} \quad (15)$$

$$t_c = \frac{D_{oc}}{D_{oc} + D_{oa}} \quad (16)$$

$$\Delta C_s = C_s - C_L \quad (17)$$

$\bar{c}_{sk} (mol/L)$: غلظت بار الکتریکی دانه های جامد؛

e_m : نسبت تخلخل حفره های با قابلیت هدایت هیدرولیکی؛

e : نسبت تخلخل رس؛

$C_s (mol/L)$: غلظت مرزی بیشتر؛

$C_L (mol/L)$: غلظت مرزی کم تر؛

D_{oc} : ضریب خود انتشاری کاتیون؛

D_{oa} : ضریب خود انتشاری آنیون.

در این روابط مقادیر غلظت بار الکتریکی دانه های جامد و تخلخل میکروسکوپی، مجهول است. برای یافتن غلظت بار الکتریکی دانه های جامد می توان از رابطه های ۱۸ و ۱۹ استفاده کرد: [۱۱، ۱۲]

$$\bar{c}_{sk,s} = \frac{(1 - f_{stren}) \cdot \sigma \cdot \rho_{sk} \cdot S_{eff}}{F} \quad (18)$$

$$S_{eff} = \frac{S}{N_{1,AV}} \quad (19)$$

$F (96490 C/equivalent)$: ثابت فارادی؛

ρ_{sk} : چگالی دانه های جامد؛

f_{stren} : کاتیون های ساکن شده در لایه ی استرن^۹

$\sigma (C/m^2)$: بار الکتریکی سطح لایه های موجود در تاکتوئید^{۱۰}

$S (g/m^2)$: سطح مخصوص؛

$S_{eff} (g/m^2)$: سطح مخصوص مؤثر؛

$N_{1,AV}$: میانگین تعداد لایه های موجود در یک تاکتوئید.

تخلخل کل خاک شامل دو بخش است: نانوحفره ها (e_n) و میکروحفره ها (e_m). نانوحفره ها قسمتی از حفره هایی است که درون تاکتوئیدها و در لایه ی استرن قرار دارند و امکان عبور جریان از آن ها وجود ندارد و ابعاد آن کم تر از ۱۰۰۰ نانومتر است. ریزحفره ها، قسمتی از حفره هایی را شامل می شوند که ابعاد آن ها بیشتر از ۱۰۰۰ نانومتر بوده و امکان عبور سیال از آن ها وجود دارد. [۵۴] یک روش برای یافتن پارامتر $\bar{c}_{sk,s}$ بر اساس نتایج آزمایشگاهی، برازش غیرخطی رابطه ی ۱۳ است. [۵۰، ۴۹، ۷]

در شکل ۴ نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسبات نظری با هم در یک نمودار آورده شده است. این نتایج مربوط به NaCl و با فرض $\bar{c}_{sk,s}$ برابر با ۹۰ میلی مول است. [۵۷]

۳.۲.۲. فشار اسمز - شیمیایی بر اساس فعالیت آب

همان طور که گفته شد، در رابطه ی ارائه شده توسط ون هوف، فرض بر آن بود که مقدار غلظت ابتدایی همواره ثابت است؛ زیرا فرض بر ایده آل بودن حل شونده است؛ یعنی مقدار حل شونده، بی نهایت فرض شده است. با توجه به فرایند انتقال حل شونده ها با انتشار، این فرض منطقی به نظر نمی رسد و در نتایج آزمایشگاهی خطا ایجاد می کند. روش دیگری که برای محاسبه ی فشار اسمزی پیشنهاد شده، استفاده از تفاوت در فعالیت سیالی طرفین غشا است، که به صورت رابطه ی ۲۰ است. در صورت

۳.۲. انتقال حل‌شونده‌ها همراه با جریان هیدرولیکی و اسمز - شیمیایی (همرفت)

در صورتی که خاک مانند یک غشای نیمه‌تراوای ایده‌آل عمل کند، ضریب نفوذپذیری اسمزی برابر با ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی است و هیچ ذره‌بی امکان عبور ندارد؛ اما در حقیقت مانند یک غشای ایده‌آل عمل نکرده و سیال، مقداری از مواد حل شده را با خود منتقل می‌کند. [۴۱، ۱۷]

در صورتی که غشا هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل عبور نمک از خود نشان ندهد، مقدار جریان نمک عبوری به همراه جریان هیدرولیکی به اندازه‌ی $c_s q_h$ است. در صورت وجود خاصیت غشایی و کارایی غشا با مقدار ω ، مقدار جریان معادل است با: [۳۱]

$$J_{ah} = (1 - \omega) q_h c_s \quad (22)$$

J_{oh} : جریان نمک عبوری در صورت وجود خاصیت غشایی؛

جریان عبوری اجزای شیمیایی محلول همراه جریان اسمز - شیمیایی برابر با $q_\pi c_s$ است. ماناسرو و دومینیچانی [۵۹] پیشنهاد دادند در صورتی که مقدار کارایی غشا به یک میل کند، اجزای شیمیایی محلول در آب امکان عبور ندارند. به همین دلیل ضریب $1 - \omega$ باید در جریان اجزای همراه با جریان اسمزی ضرب شود. بنابراین رابطه‌ی مقدار عبوری اجزای شیمیایی محلول همراه با جریان اسمزی برابر مقدار زیر است: [۵۹، ۷]

$$J_\pi = (1 - \omega) q_\pi c \quad (23)$$

در ارتباط با اعمال ضریب مذکور، بین پژوهش‌گرانی که در این حوزه فعالیت کرده‌اند، اجماع نظر وجود ندارد و در برخی موارد، رابطه‌ی ۲۳ به صورت $q_\pi c$ نیز مورد استفاده قرار گرفته است. [۶۰، ۵۹، ۳۱]

۴.۲. انتشار

«انتشار» پدیده‌ی است که در آن ذرات، تحت تأثیر گرادین غلظت و در اثر حرکات تصادفی منتشر می‌شوند. معادلات مربوط به انتشار می‌توانند نحوه‌ی حرکت سیالات، گازها و اجزای محلول را در یک محیط متخلخل توصیف کنند. [۶۱] قانون اول فیک، انتشار اجزای شیمیایی محلول را در حالت وجود جریان دائمی و به دلیل گرادین غلظت به صورت رابطه‌ی ۲۴ شرح می‌دهد: [۶۲]

$$J_d = -D_e \frac{\partial c}{\partial x} \quad (24)$$

J_d : جریان اجزاء؛

D_e : ضریب انتشار ذره‌ی تنها (خودانتشاری) [۱].

رابطه‌ی نارست - اینشتین یکی از روابطی است که قادر است عوامل تأثیرگذار بر انتقال یون‌ها را نشان دهد. روابط موجود در این زمینه، نشان می‌دهند که ضریب انتشار تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله دما، گرانیوی حلال، تحرک مطلق اجزاء، شعاع و بار یون‌های حل شده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب انتشاری که بر اساس این روابط به دست می‌آید، مقدار بیشینه‌ی آن در شرایط ایده‌آل و در صورت عدم وجود مانع در مسیر انتقال است. [۶۳، ۶۲]

به منظور محاسبه‌ی ضریب انتشار در حالت آزاد از دو رابطه‌ی ۲۵ و ۲۶ استفاده می‌شود: [۶۵، ۶۴]

$$D_e = \frac{RT\lambda_e}{F^2 |z|} \quad (25)$$

$$D_e = \frac{RT}{6\pi N \mu_f r} \quad (26)$$

λ_e : حد نهایی هدایت یونی.

N : عدد آووگادرو؛ $(6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})$

r : شعاع یونی یا مولکولی.

۱.۴.۲. انتشار در خاک

انتشار در خاک کندتر از انتشار در حالت آزاد است؛ زیرا مسیری که اجزای شیمیایی باید در خاک طی کنند، طولانی‌تر از مسیر اجزاء در حالت آزاد است (شکل ۶). جریان خروجی سیال نیز در خاک کم‌تر است؛ زیرا دانه‌های جامد قسمتی از سطح مقطع را اشغال کرده که در نتیجه، مسیر عبور سیال سخت‌تر می‌شود. [۶۲]

به منظور لحاظ کاهش سطح مقطع مؤثر، ضریب θ به رابطه‌ی ۲۴ اضافه می‌شود و رابطه به صورت زیر اصلاح می‌شود. به منظور اصلاح رابطه‌ی انتشار برای لحاظ اثر افزایش مسیر عبوری اجزاء در درون فضای متخلخل خاک، پارامتر τ در رابطه‌ی ۲۴ ضرب می‌شود. مقدار این ضریب در خاک همواره از ۱ کوچک‌تر است. معادله اصلاح شده به صورت زیر به دست می‌آید: [۶۷، ۶۶، ۶۲]

$$J_d = -D_e \tau \theta \frac{\partial c_s}{\partial x} \quad (27)$$

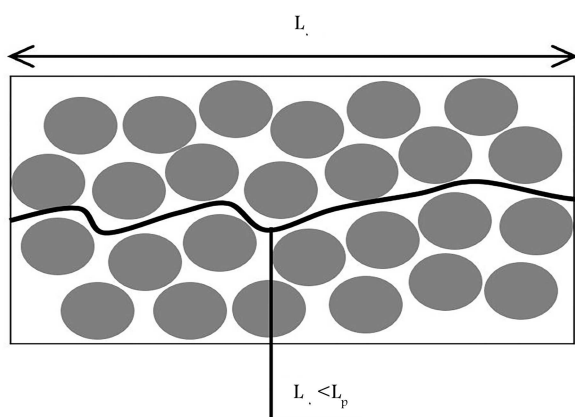
$$\theta = n S_r \quad (28)$$

τ : ضریب انحناء؛

θ : رطوبت حجمی؛

S_r : درجه‌ی اشباع.

عوامل دیگری نیز وجود دارد که باعث کاهش انتشار می‌شود و در معادله‌ی مذکور لحاظ نشده است. یکی از این موارد که توسط کمپرو و همکاران [۶۹] مطرح شد، شاخص تحرک است که با α نشان داده می‌شود. این عامل نشان‌دهنده‌ی افزایش گرانیوی سیال در تماس با رس در مقایسه با سیال خالص است. عامل دیگر، خروج آنیون‌ها از ریزحفره‌ها به علت دافعه است. این فرایند، فیلتر نمک نیز نام دارد. این شاخص با γ نشان داده می‌شود. [۷۰، ۶۶] با اعمال تمام اصلاحات، معادله‌ی نهایی



شکل ۶. مفهوم طول مؤثر عبور سیال از فضای متخلخل خاک (اصلاح شده از [۶۸]).

چنین نوشته می‌شود: [۶۲]

$$J_d = -D_s \tau \alpha \gamma \theta \frac{\partial c_s}{\partial x} \quad (29)$$

در بیشتر روابط مربوط به انتشار، شاخصی به نام شاخص انحناى ظاهرى با نماد τ_a مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت، ضریب انتشار مؤثر برای هر ذره به صورت رابطه ۳۰ تعریف می‌شود: [۶۲]

$$D_j^* = D_s \tau_a \quad (30)$$

D_j^* : ضریب خودانتشاری ذره ی j .

بنابراین می‌توان قانون اول فیک در خاک‌های اشباع را در حضور نمک به صورت رابطه ۳۱ نوشت. در این رابطه، D_s^* نشان‌دهنده ی ضریب انتشار نمک است. [۶۲]

$$J_d = -D_s^* n \frac{\partial c_s}{\partial x} \quad (31)$$

۲.۴.۲. ضریب انتشار مؤثر

همان‌طور که گفته شد، در تعریف ضریب انتشار مؤثر از شاخص انحناى ظاهرى استفاده می‌شود که مقدار آن برابر است با: [۷۱]

$$\tau_a = \tau_m \tau_r = \tau_m \prod_{i=1}^N \tau_i = \tau_m (\tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdots \tau_N) \quad (32)$$

در این رابطه مقدار τ_m نشان‌دهنده ی انحناى ساختارى [۷۲] است که به علت هندسه و توزیع حفره‌های به وجود می‌آید. τ_r هم ضریب انحناى مقاوم [۷۳] است که به علت خاصیت غشایی خاک و به علت کاهش توانایی هدایت‌کنندگی حفره‌ها به وجود می‌آید. در نبود خاصیت غشایی، مقدار τ_r برابر ۱ است. تغییر کارایی غشا روی τ_r و در نتیجه τ_a تأثیرگذار است. [۷۱]

مقدار ضریب انحناى ساختارى، مربوط به هندسه ی خاک است و به اندازه ی حفره‌ها بستگی دارد. یکی از مدل‌های قابل استفاده برای مقدار ضریب انحناى ساختارى را می‌توان به صورت رابطه ی ۳۳ نوشت: [۷۲]

$$\tau_m = n^m \quad (33)$$

که در آن m توان تجربی است. در رویکرد فیزیکی، ارتباط خطی بین مقدار ضریب انتشار مؤثر و کارایی غشا برقرار می‌کنند. اگر کارایی غشا ۱۰۰٪ باشد، اجزای شیمیایی عبوری از غشا برابر با صفر است. به همین دلیل در این رویکرد، ضریب $(1 - \omega)$ به عنوان ضریب انحناى مقاوم (τ_r) فرض می‌شود. در این صورت، رابطه ی ضریب انتشار مؤثر برای هر ذره، به صورت رابطه ی ۳۴ در می‌آید. [۷۲، ۷۱]

$$D_j^* = (1 - \omega) D_{se} = (1 - \omega) \tau_m D_s \quad (34)$$

به طور کلی برای یافتن ضریب انتشار مؤثر، دو روش آزمایشگاهی و نظریه وجود دارد که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

• روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری ضریب انتشار مؤثر

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب انتشار مؤثر در آزمایشگاه وجود دارد. به طور کلی با ایجاد گرادینان غلظت در دو طرف یک نمونه ی خاکی، انتشار به وجود می‌آید. بعد از پایدار شدن جریان اجزای شیمیایی و جلوگیری از عبور جریان سیال از نمونه، مقدار ضریب انتشار مؤثر با استفاده از رابطه ی ۳۵ به دست می‌آید: [۴۵]

$$D_s^* = \frac{L}{n \Delta c_s} \left(\frac{Q_{ss}}{\Delta t} \right)_{q=0} \quad (35)$$

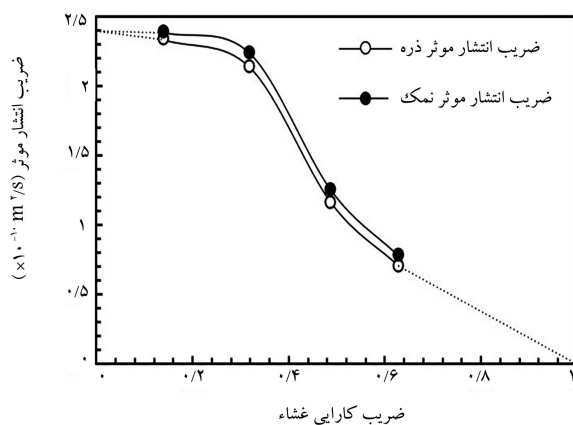
Q_{ss} : مقدار تجمعی نمک عبوری در حالت جریان پایدار در طی زمان Δt ؛
 L : طول نمونه.

به منظور یافتن مقدار انحناى ساختارى با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی باید مقدار ضریب انحناى ظاهرى را در جایی که کارایی غشا برابر صفر است، یافت. یکی از این روش‌ها، استفاده از مقادیر تقریبی است که توسط امتداد نمودارها به دست می‌آید. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، امتداد نقاط در حالت کارایی غشای صفر با خط چین نشان داده شده است. در صورتی که ضریب انتشار مؤثر در نقطه‌ای که کارایی غشا صفر است، به ضریب انتشار آزاد نمک تقسیم شود، مقدار انحناى ساختارى به صورت تقریبی به دست می‌آید. [۷۱] روش دیگری که مقدار انحناى ساختارى را دقیق‌تر نشان می‌دهد، اندازه‌گیری ضریب انتشار مؤثر در غلظتی از نمک است که کارایی غشا به صفر می‌رسد. با تقسیم ضریب مؤثر انتشار بر مقدار ضریب انتشار در حالت آزاد، مقدار انحناى ساختارى دقیق‌تر محاسبه می‌شود. [۵۲] شکلفورد و همکاران [۵۲] نشان دادند که مقدار محاسبه شده با استفاده از امتداد نقاط و مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش با یکدیگر تفاوت دارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار محاسبه شده با استفاده از امتداد نقاط از مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش کم‌تر است. علاوه بر آن نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انحناى مقاوم با کارایی غشا رابطه ی خطی ندارد. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که رابطه ی خطی بین ضریب انتشار مؤثر و کارایی غشا مورد توافق نیست. در شکل ۷ رابطه ی غیرخطی و در شکل ۸ رابطه ی خطی نشان داده شده است. [۷۲، ۷۳، ۷۱، ۶۲] عدم توافق نتایج در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که مدل‌های موجود برای هر دو مورد انحناى مقاوم و ساختارى نیاز به دقیق‌تر شدن دارد. یکی از فرضیاتی که در این مورد مطرح است، احتمال وجود رابطه بین غلظت نمک و انحناى ساختارى است. [۵۲]

• روش نظری برای محاسبه ی ضریب انتشار مؤثر

مقدار ضریب انتشار مؤثر برای هر ذره ی شیمیایی j تحت تأثیر اجزای حل‌شونده ی دیگر قرار می‌گیرد. مقدار ضریب انتشار مؤثر از رابطه ی ۳۶ به دست می‌آید. در صورتی که ذره ی j کاتیون باشد، عبارت دوم مثبت و در صورتی که آنیون باشد، منفی است. [۳۱]

$$D_{sj}^* = D_j^* \pm \frac{D_j^* |z_j| C_j \sum_{i=1}^M \left[D_i^* z_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right]}{\frac{\partial C_j}{\partial x} \sum_{i=1}^M \left[D_i^* |z_i| C_i \right]} \quad (36)$$



شکل ۷. ارتباط بین ضریب انتشار مؤثر و کارایی غشا (اصلاح شده از [۷۱]).

ایجاد شده و چون جریان اسمزی باعث آن شده است، «تحکیم ایجاد شده به علت جریان اسمزی^{۱۶}» یا «تحکیم شیمیایی^{۱۷}» نام دارد. [۱۷]

۱.۳. تنش مؤثر و تغییر حجم

تنش‌های دفع‌کننده الکترواستاتیکی (R)، به علت نزدیکی ذرات باردار رس به هم و تنش‌های جذب‌کننده^{۱۸} (A)، به علت نیروی واندروالسی است. تغییر در مقدار ($R - A$) تابع ترکیبات شیمیایی سیال منفذی است. با انتشار نمک از سمت غلظت بیشتر در حفرات، کاهش ثابت دی‌الکتریک و کاهش pH سیال، مقدار R کاهش می‌یابد. مقدار A ارتباطی به ترکیب شیمیایی سیال ندارد و در این فرایند، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. تنش مؤثر حقیقی چنین تعریف می‌شود: [۷۶، ۷۵]

$$\sigma^* = \sigma - u_f - (R - A) \quad (38)$$

تغییر در مقدار تنش مؤثر حقیقی باعث تغییر تخلخل و حجم می‌شود. با توجه به ثابت نیروهای واندروالسی، می‌توان تغییر در تنش مؤثر را به صورت رابطه‌ی ۳۹ نوشت: [۷۸، ۷۷، ۱۷]

$$\Delta \sigma^* = \Delta \sigma - \Delta u_f - \Delta(R - A) = \Delta \sigma - \Delta u_f - \Delta R \quad (39)$$

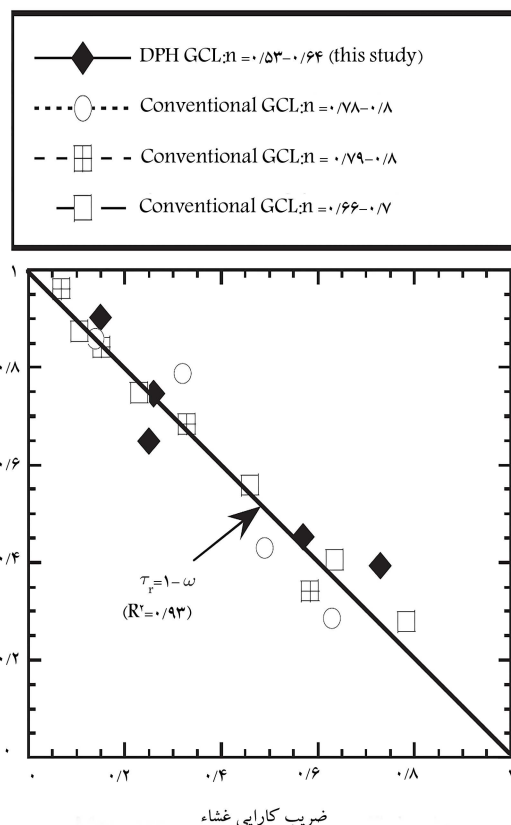
در این رابطه می‌توان گفت عبارت Δu_f نشان‌دهنده‌ی تحکیم شیمیایی و ΔR نشان‌دهنده‌ی تحکیم اسمزی است. هر دو عبارت منفی است و باعث افزایش مقدار تنش مؤثر حقیقی می‌شود. در این حالت کاهش حجم یا فشردگی رخ می‌دهد. [۷۵]

دی‌مایو^{۱۹} اثرات نمک‌های مختلف (NaCl ، KCl و CaCl_2) را در تماس با خاک سدیم - بنتونیت ارزیابی کرد. نتایج این ارزیابی نشان داد که تمامی این نمک‌ها تحکیم قابل ملاحظه‌ی در نمونه‌های خاکی ایجاد کرده که باعث افزایش مقاومت برشی نیز می‌شود. در ادامه نمونه‌هایی که در تماس با محلول نمکی قرار گرفته بودند، مجدداً در تماس با آب خالص قرار داده شدند. نتیجه‌ی این مرحله از آزمایش نشان داد که تغییرات حجمی برای کاتیون Na^+ برگشت‌پذیر و برای دو کاتیون Ca^{2+} و K^+ برگشت‌ناپذیر است. این تفاوت رفتار ناشی از کاتیون‌های موجود در نمونه‌ی رسی اولیه (کاتیون Na^+) است.

اندازه‌گیری تغییرات R و A به طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. اندازه‌گیری $R - A$ تنها در شرایط ایده‌آل امکان‌پذیر است و این مسئله یک محدودیت اساسی است. میچل^{۸۰} پیشنهاد داد که فشار اسمزی، نمایان‌گر واکنش‌های لایه‌ی مضاعف پخش و دافعه‌ی بین‌ذره‌ای است. فشار اسمز - شیمیایی شامل دو جزء است: نمک‌های آزادی که در سیال منفذی وجود دارد و یون‌هایی که در لایه‌ی مضاعف پخش قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری مقدار مطلق اجرای فشار اسمزی، امکان‌پذیر نیست. تغییر در مقدار فشار اسمز - شیمیایی در تغییرات حجمی حائز اهمیت است. رابطه‌ی بنیادین به منظور یافتن کرنش حجمی در صورت تغییر تنش مؤثر به صورت زیر است: [۱۷]

$$\varepsilon = -\frac{dV}{V} = -\frac{1}{V} \left[\frac{\partial V}{\partial(\sigma - u_f)} d(\sigma - u_f) + \frac{\partial V}{\partial \Pi} d\Pi \right] \quad (40)$$

ε : کرنش حجمی؛
 V : حجم اولیه خاک.



شکل ۸. رابطه‌ی بین کارایی غشا و شاخص انحنای مقاوم در تخلخل‌های مختلف. [۷۴، ۷۳، ۱۶]

D_{sz}^* : ضریب انتشار مؤثر ذره‌ی شیمیایی محلول در خاک؛
 z : بار ذره‌ی z .

در صورت وجود فقط یک آنیون و یک کاتیون در نمک محلول، رابطه فوق چنین نوشته می‌شود: [۱۲]

$$D_s^* = D_{sc}^* = D_{sa}^* = \frac{(v_1 + v_2)D_1^*D_2^*}{v_1D_1^* + v_2D_2^*} \quad (37)$$

۳. تغییر خصوصیات مکانیکی خاک

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که خصوصیات مکانیکی خاک با واکنش‌های بین ذرات خاک و سیال دچار تغییر می‌شود. تغییر حجم خاک، به دو عامل بستگی دارد: قابلیت فشردگی خاک‌ها که تغییرات حجمی را به تغییرات تنش ارتباط می‌دهد و قابلیت هدایت هیدرولیکی خاک‌ها. [۱۷]

با انتقال نمک بین دانه‌های خاک، نیروهای دافعه‌ی بین‌ذره‌ای در رس‌ها تغییر کرده و در نتیجه تنش‌های بین‌ذره‌ای نیز تغییر می‌کند. تغییر تنش باعث کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف پخش^{۱۴} و در نتیجه تخلخل می‌شود. تغییرات حجمی که در اثر تغییر فشار اسمزی سیال منفذی پدید می‌آید، «تحکیم اسمزی^{۱۵}» نام دارد. [۱۷]

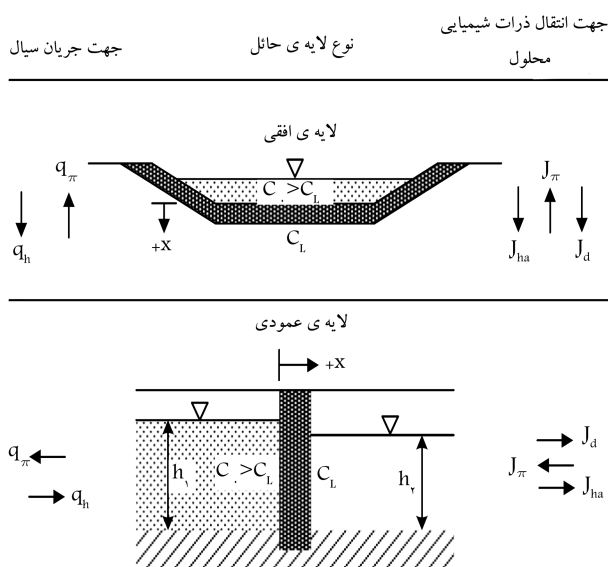
جریان اسمزی، دومین فرایندی است که باعث تغییر حجم در خاک‌های رسی می‌شود. این نوع جریان از سمت غلظت کم به سمت غلظت زیاد حرکت کرده و باعث ایجاد فشار سیال حفره‌ی منفی می‌شود که افزایش تنش مؤثر و در نتیجه کاهش حجم را به دنبال دارد. این نوع از تغییرات حجمی به علت تغییر تنش مؤثر

۵. اثرات توأم جریان‌ها

۱.۵. روابط انتقال سیال و آلاینده

بر اساس مواردی که تا به اینجا ذکر شد، برای یک خاک رسی اشباع و در حالت یک بعدی، پتانسیل‌های محرک برای جریان سیال، هدایت هیدرولیکی واسمز - شیمیایی و پتانسیل‌های محرک اجزای شیمیایی محلول، انتشار و همرفت است. وجود جریان اسمزی نیز باعث ایجاد تحکیم اسمزی و تحکیم شیمیایی در خاک‌ها می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت این است که تمام این پدیده‌ها به طور همزمان و همبسته اتفاق می‌افتد و هر یک از پدیده‌ها بر رخداد دیگر پدیده‌ها نیز تأثیرگذار است. [۹۷]

برای طراحی سیستم بستر به منظور دفن آلاینده‌ها، در ابتدا فرض بر آن بوده که پارامتر تعیین‌کننده برای تعیین نرخ نفوذ آلاینده‌ها، «هدایت هیدرولیکی» است. هدایت هیدرولیکی در انتقال سیال بر اثر گرادیان هیدرولیکی و انتقال اجزای شیمیایی محلول به صورت همرفت تأثیرگذار است. با توجه به مقدار هدایت هیدرولیکی بسیار کم خاک‌های رسی و در نتیجه سرعت بسیار کم سیال حفره‌یی، «انتشار» پدیده‌ی تعیین‌کننده برای تعیین میزان نفوذ آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی در خاک‌های ریزدانه است. [۶۲] از سوی دیگر، در خاک‌های درشت‌دانه، همرفت نقش اساسی‌تری در انتقال اجزای شیمیایی محلول دارد. [۷] خاصیت غشایی خاک‌های رسی و جریان اسمز - شیمیایی و نقش آن در کنترل انتقال آلاینده‌های محلول نیز در مطالعات ۲۰ سال گذشته مورد توجه قرار گرفته است. [۲۴] بررسی نقش غشاهای رسی به طور دقیق‌تر در بخش مدل‌سازی عددی مورد بحث قرار می‌گیرد. به طور کلی تأثیر جریان‌های همبسته بر رفتار مکانیکی خاک‌هایی که به لحاظ شیمیایی فعال‌ترند، بیشتر است. فعالیت شیمیایی رس‌ها تابعی از مشخصات کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌هاست. هرچه واکنش‌های الکترواستاتیکی بین ذرات رس نزدیک به هم بیشتر باشد، خاک رسی به لحاظ شیمیایی فعال‌تر است. لازم به ذکر است که رس‌هایی مانند بنتونیت که دارای کانی‌های اسمکتیت^{۱۹} (مانند مونت‌موریلینیت) هستند، فعال‌ترند. [۸۴] در شکل ۹ جریان‌های مؤثر در انتقال اجزای شیمیایی محلول و سیال به ترتیب برای دو حالت لایه‌ی حائل افقی و عمودی نشان داده شده است. مطابق شکل،



شکل ۹. انواع جریان‌های مؤثر در انتقال اجزای شیمیایی محلول و سیال در دو جهت افقی و عمودی. [۸۵، ۷]

همچنین ضرایب تغییر حجمی به صورت زیر هم تعریف می‌شود: [۱۷]

$$m_v = \frac{dV}{d\sigma'} \quad (41)$$

$$m_\pi = \frac{dV}{d\Pi} \quad (42)$$

m_v : ضریب فشردگی حجمی؛

m_π : ضریب فشردگی اسمزی.

ضریب فشردگی اسمزی کم‌تر از ضریب فشردگی حجمی است؛ زیرا تأثیر تغییر فشار اسمز - شیمیایی به نسبت تغییر تنش مؤثر کم‌تر است. مقادیر m_v و m_π لزوماً ضرایب وابسته به جنس ماده نیستند. مقدار m_v وابسته به بازه‌ی تنش و مقدار m_π تابعی از ترکیب شیمیایی سیال منفذی است. [۱۷]

رابطه‌ی تحکیم با در نظر گرفتن اثرات جریان اسمزی و کارایی غشا چنین نوشته می‌شود: [۸۱]

$$-m_v \frac{\delta}{\delta t} [\sigma_v - \gamma_w (h - z)] - m_\pi RT \frac{\delta c}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[-k_h \frac{\delta h}{\delta z} + RT \frac{\omega k_h}{\gamma_w} \frac{\delta c}{\delta z} \right] \quad (43)$$

۴. ضریب تأخیر

ضریب تأخیر که با R_{dj} نشان داده می‌شود، یکی از ضرایب مهم در فرایند انتقال آلاینده‌ها در خاک است. این ضریب نشان می‌دهد حرکت اجزاء در محیط متخلخل با امکان جذب، چقدر از حرکت آن‌ها در آب خالص کندتر است. [۸۳، ۸۲] کل اجزای وارد شده به محیط متخلخل شامل دو بخش هستند؛ اجزای عبوری و اجزایی که جذب می‌شود. بنابراین، می‌توان شار کل اجزاء را به صورت رابطه‌ی ۴۴ نوشت: [۳۱]

$$Q_j = (n + \rho_d K_D) C_j \quad (44)$$

$Q_j (mol/L)$: آلاینده‌های منتقل شده؛

$\rho_d (kg/m^3)$: چگالی خاک خشک؛

در نتیجه، ضریب تأخیر به صورت زیر تعریف می‌شود: [۸۲]

$$R_{dj} = 1 + \left(\frac{K_D \cdot \rho_d}{n} \right) \quad (45)$$

$$K_D = \frac{CEC}{1000z} \left[\frac{\beta_{cation}}{cation^{z+}} \right] \quad (46)$$

$K_D (m^3/kg)$: ضریب پخش؛

CEC : ظرفیت تبادل کاتیون در خاک؛

β_{cation} : نسبتی از ظرفیت تبادل اشغال شده با کاتیون؛

z : بار کاتیون؛

$[cation^{z+}]$: غلظت مولار کاتیون در حلال.

ضریب K_D عددی ثابت فرض شده است. در واقع فرض شده است که میزان جذب با غلظت نمک، رابطه‌ی مستقیم و خطی دارد. در صورتی که رابطه غیرخطی باشد، به آن ضریب تقسیم می‌گویند. تعریف عمومی ضریب تقسیم به صورت زیر است. [۶۲]

$$K_p = \frac{dq_a}{dc} \quad (47)$$

K_p : ضریب تقسیم؛

q_a : مقدار غلظت جذب شده.

جهت جریان اسمز - شیمیایی خلاف جریان داری است. جهت انتقال اجزاء توسط همرفت ایجاد شده در اثر جریان اسمز - شیمیایی هم خلاف انتشار و همرفت ایجاد شده توسط جریان هیدرولیکی است.^[۷]

در ادامه، ابتدا به بررسی جریان همبسته هیدرولیکی - شیمیایی و سپس جریان همبسته هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی می‌پردازیم.

جریان یک‌بعدی سیال در راستای قائم و اجزای شیمیایی محلول عبوری از یک لایه خاک رسی اشباع، با لحاظ اثرات همبسته گرا دیان هیدرولیکی، اسمز - شیمیایی، انتشار و انتقال اجزای شیمیایی همراه با جریان سیال از درون لایه‌ی خاکی با کارایی غشای ω و با صرف نظر از گرا دیان الکتریکی و دمایی به صورت روابط ۴۸ و ۴۹ است. این روابط حاصل جمع روابط ذکر شده در قسمت‌های قبل برای هر پدیده است که پارامترهای آن‌ها نیز قبلاً تعریف شده است. این روابط برای جریان در راستای z (لایه‌ی افقی در شکل ۹) توسعه داده شده است.^[۴۸]

$$q = q_h + q_\pi = -k_h \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\omega k_h RT}{\gamma_w} \sum_{i=1}^M \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (48)$$

$$J_j = J_{h,a,j} + J_{\pi,j} + J_{d,j} = (\omega - \omega) q_h C_j + (\omega - \omega) q_\pi C_j - n D_{s,j}^* \frac{\partial C_j}{\partial z} \quad (49)$$

رابطه‌ی حاکم بر نحوه‌ی عبور آلاینده‌ها در حالت وجود جریان گذرا و برقراری قانون پیوستگی عبارت است از:^[۸۶]

$$\frac{\partial q}{\partial z} = -k_h \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\omega k_h RT}{\gamma_w} \sum_{i=1}^M \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} = 0 \quad (50)$$

در صورت برقراری قانون پیوستگی برای اجزاء، ثابت بودن کارایی غشا و وجود جریان گذرا، می‌توان رابطه‌ی ۵۱ را برای شار نمک نوشت:^[۸۶,۳۳]

$$\begin{aligned} R_{dj} n \frac{\partial c_s}{\partial t} = & - \frac{\partial J_{s,j}}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} [(\omega - \omega) q_h c_s + (\omega - \omega) q_\pi c_s - n D_{s,j}^* \frac{\partial c_s}{\partial z}] \\ = & (\omega - \omega) k_h \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial z} c_s \right) - (\omega - \omega) \frac{\omega k_h RT}{\gamma_w} \frac{\partial^2 c_s}{\partial z^2} \\ & - (\omega - \omega) \frac{\omega k_h RT}{\gamma_w} \left(\frac{\partial c_s}{\partial z} \right)^2 + n D_{s,j}^* \frac{\partial^2 c_s}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (51)$$

۲.۵. روابط مربوط به اثرات توأم جریان‌ها همراه با تغییر شکل

در این قسمت، روابط قبلی به نحوی اصلاح می‌شوند که اثر تغییرات مکانیکی هم لحاظ شود. مقدار نیروی وزنی که به جسم وارد می‌شود برابر است با:^[۸۷]

$$f = [(\omega - \omega) \rho_d + n \rho_f] g \quad (52)$$

رابطه‌ی بین تنش مؤثر و کرنش در حالت الاستیک و خطی برای تغییر شکل‌های کوچک عبارت است از:^[۸۷]

$$\sigma' = (\lambda + 2\mu)(\epsilon - \epsilon_\pi) \quad (53)$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)} \quad (54)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+v)} \quad (55)$$

$$\epsilon = - \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad (56)$$

E : مدول الاستیسیته؛

ν : ضریب پواسون؛

w_z : تغییر شکل در راستای عمودی؛

با توجه به رابطه‌ی باریور و فردلاند،^[۱۷] می‌توان رابطه‌ی ۵۷ را نوشت:^[۸۷]

$$d\epsilon_\pi = -m_\pi d\pi = -m_\pi RT dc = -m_c dc \quad (57)$$

بر اساس تعادل نیروها و با صرف نظر از تنش برشی، نیز می‌توان رابطه‌ی ۵۸ را نوشت:^[۸۷]

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} + f = 0 \quad (58)$$

با جایگذاری روابط ۵۲، ۵۳، ۵۶ و ۵۷ در رابطه‌ی ۵۸ می‌توان رابطه‌ی ۵۹ را برای تغییر شکل خاک نوشت:^[۸۷]

$$\begin{aligned} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(- \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} + m_c \frac{\partial c_s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} \\ & + [(1-n)\rho_d + n\rho_f] \cdot g = 0 \end{aligned} \quad (59)$$

بر اساس قانون پیوستگی و فرض ثابت بودن چگالی سیال، می‌توان نوشت:^[۸۷]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (nV_f) \quad (60)$$

با توجه به تغییر تداخل تحت اثر نیروی اسمز - شیمیایی و بارگذاری مکانیکی می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:^[۸۸,۸۷]

$$n = n_0 - m_v \Delta \sigma' - m_c \Delta c \quad (61)$$

با جایگذاری رابطه‌ی ۶۱ در رابطه‌ی ۶۰ می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:^[۸۷]

$$-m_v \frac{\partial(\sigma - u)}{\partial t} - m_c \frac{\partial c_s}{\partial t} = -(nV_f) \quad (62)$$

سرعت سیال جاری در حفره‌های (V_f) را می‌توان حاصل جمع سرعت سیال نسبت به دانه‌های خاک و سرعت مطلق دانه‌های خاک ایجاد شده در اثر نشست دانست.^[۸۷]

$$V_f = V_r + V_s \quad (63)$$

$$V_r = \frac{V}{n} \quad (64)$$

$$V_s = \frac{\partial w_z}{\partial t} \quad (65)$$

V_r : سرعت نسبی سیال نسبت به دانه‌های خاک؛

V_s : سرعت مطلق دانه‌های خاک.

با جایگذاری روابط ۶۳ تا ۶۵ در رابطه‌ی ۶۲ خواهیم داشت:^[۸۷]

$$-m_v \frac{\partial(\sigma - u)}{\partial t} - m_c \frac{\partial c_s}{\partial t} = -\nabla \cdot (V + n \frac{\partial w_z}{\partial t}) \quad (66)$$

$$V = \frac{v_h}{n} + \frac{v_\pi}{n} \quad (67)$$

که در آن ν_π سرعت جریان اسمز - شیمیایی است. با جایگذاری مقادیر سرعت مربوط به گرا دیان هیدرولیکی و گرا دیان غلظت در رابطه‌ی ۶۶، می‌توان برای انتقال سیال نوشت:^[۸۷]

$$m_v \frac{\partial u}{\partial t} - m_c \frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \omega \frac{RT}{M} \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 c_s}{\partial z^2} - n \frac{\partial^2 w_z}{\partial t \partial z} \quad (68)$$

و برای اثر همزمان پتانسیل‌ها در انتقال اجزای شیمیایی، می‌توان رابطه ی ۶۹ را نوشت: [۸۷]

$$P(z) = \omega RTc \left(\frac{P_1 - P_2}{L} - \omega RT \frac{c_1 - c_2}{L} \right) z + P_1 - \omega RTc_1 \quad (74)$$

$$c(z) = \frac{c_1 e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]} - c_2}{e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]} - 1} - \frac{(c_1 - c_2) e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]}}{e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]} - 1} \quad (75)$$

$$J_v = \frac{k_h}{\gamma V_w} \left(\frac{P_1 - P_2}{L} - \omega RT \frac{c_1 - c_2}{L} \right) \quad (76)$$

$$J_s = (1 - \omega) \frac{k_h}{\gamma} \left(\frac{P_1 - P_2}{L} - \omega RT \frac{c_1 - c_2}{L} \right) \times \frac{c_1 e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]} - c_2}{e^{\left[\frac{(1-\omega) J_v V_w L / n D_s^*}{\gamma} \right]} - 1} \quad (77)$$

$$\frac{\partial(nc_s)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 - \omega) \left[\left(-\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) c_s - n\tau D_s \frac{\partial c_s}{\partial z} + \omega \frac{RT}{M} \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial c_s}{\partial z} c_s \right] \right\} \quad (69)$$

با توجه به رابطه ی پیوستگی در فاز جامد، می‌توان روابط نوشت: [۸۷]

$$\frac{\partial[(1 - n)\rho_d K_p c_s]}{\partial t} = -\frac{\partial J_s}{\partial z} \quad (70)$$

$$J_s = (1 - n)V_s \rho_d K_p c_s \quad (71)$$

با ادغام روابط ۷۰ و ۷۱ می‌توان نوشت: [۸۷]

$$\frac{\partial[(1 - n)\rho_d K_p c_s]}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} [(1 - n)V_s \rho_d K_d c_s] \quad (72)$$

در نهایت، با جمع روابط ۶۹ و ۷۲ می‌توان برای انتقال اجزای شیمیایی نوشت: [۸۷]

$$\frac{\partial[(1 - n)\rho_d K_d c_s]}{\partial t} + \frac{\partial(nc_s)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 - n) \frac{\partial w_s}{\partial t} \rho_d K_d c_s - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (1 - \omega) \left[\left(-\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) c_s - n\tau D_s \frac{\partial c_s}{\partial z} + \omega \frac{RT}{M} \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial c_s}{\partial z} c_s \right] \right\} \right\} \quad (73)$$

نکته ی حائز اهمیت در رابطه ی ۷۳ این است که ژانگ و همکاران [۸۷] ضریب $(1 - \omega)$ را برای همرفت اجزای شیمیایی از طریق جریان اسمزی لحاظ نکرده‌اند. در صورتی که نتایج تحقیقات مؤخر نشان می‌دهد که لحاظ آن ضروری است. [۲۱] به همین دلیل رابطه ی اولیه ی آن‌ها در این قسمت اصلاح شده است.

۶. مدل‌سازی تحلیلی برای انتقال آلاینده‌ها در خاک

تا این‌جا معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده‌های تأثیرگذار در انتقال اجزای شیمیایی محلول و جریان سیال بیان شد. طراحی لایه‌های ایزولاسیون در مدفن‌های زباله نیازمند وجود راه‌حل برای معادلات دیفرانسیل است. با ساده‌سازی شرایط مرزی و اولیه می‌توان راه‌حل تحلیلی برای این مسئله ارائه داد که در ادامه به بررسی یک مورد خواهیم پرداخت.

۱.۶. راه‌حل تحلیلی ماناسرو و دومینجانی (۲۰۰۳)

این راه‌حل در شرایط جریان گذرای اجزای شیمیایی محلول $(\partial c / \partial t = 0)$ برای روابط دیفرانسیلی جریان همبسته ی هیدرولیکی - شیمیایی (روابط ۵۰ و ۵۱) ارائه شده است. در این راه‌حل فرض بر آن است که مقدار فشار هیدرولیکی در مرز بالایی و پایینی به ترتیب P_1 و P_2 است. همچنین غلظت نمک در مرزهای بالایی و پایینی مدفن خاکی به ترتیب c_1 و c_2 است. با توجه به این توضیحات، مقادیر توزیع فشار هیدرولیکی، غلظت نمک در طول لایه، شار اجزای حل‌شونده و شار سیال به صورت

۷. مدل‌سازی عددی برای انتقال آلودگی در خاک

علاوه بر کارهای آزمایشگاهی و نظری، در این زمینه کارهای عددی هم انجام شده است. در هر زیربخش از این بخش مقاله به بررسی یک مقاله ی عددی ممتاز پیرامون انتقال سیال و اجزای شیمیایی با در نظر گرفتن اثرات همبسته ی پدیده‌های مذکور می‌پردازیم.

راه‌هایی تحلیلی برای حل مسئله ی انتقال آلاینده‌ها در لایه ی رسی وجود دارد که در حالت‌های خاص و اعمال ساده‌سازی‌هایی (مثلاً فرض جریان پایدار) به ارائه ی راه‌حل می‌پردازند؛ به عنوان مثال در بخش ۱.۶. به یک مورد پرداخته شد. در صورتی که مدل‌سازی‌های عددی قادر به حل مسئله در حالت‌های کلی‌ترند. این موضوع باعث می‌شود که امکان طراحی مدفن‌های زباله در شرایط متنوع ممکن باشد. اصول کلی روابط مانند یکدیگر است، ولی در موارد جزئی تفاوت‌هایی وجود دارد. راه‌حل‌های عددی موجود برای انتقال آلاینده‌ها در لایه ی ایزولاسیون افقی مشابه شکل ۹ ارائه شده‌اند. [۸۹، ۸۷، ۵۹، ۳۳] فرضیات کلی عبارت است از: [۸۷، ۵۹]

-- جریان، یک‌بعدی است و حل‌شونده‌ها ایده‌آل‌اند؛

-- اجزای جامد و حلال تراکم‌ناپذیرند؛

-- دما ثابت است و جریان الکتریکی وجود ندارد؛

-- خاک همگن، یکنواخت و اشباع است؛

-- تغییر شکل خاک به صورت خطی و کشسان فرض شده است؛

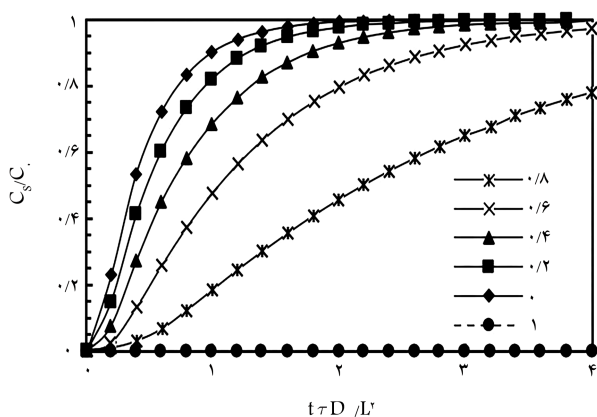
-- ضریب جذب نیز ثابت است.

۱.۷. شرایط مرزی در تحلیل‌های عددی

هر مدل‌سازی عددی نیازمند شرایط مرزی است تا امکان ارائه ی راه‌حل برای آن وجود داشته باشد. روابط مربوط به جریان سیال و انتقال آلاینده با لحاظ اثرات همبسته ی هیدرولیکی - شیمیایی، نیازمند دو شرط مکانی و یک شرط زمانی است. در بسیاری از تحلیل‌های عددی موجود (از جمله تحلیل‌های مطرح شده در این مقاله)، دو شرط مرزی زیر صادق‌اند: [۹۰، ۸۹، ۶۰، ۵۹]

$$c_s(z = 0, t > 0) = c_0 \quad (78)$$

$$c_s(z, t = 0) = 0 \quad (79)$$



شکل ۱۰. مقدار غلظت برحسب زمان بی‌بعد شده در مقادیر مختلف کارایی غشا (اصلاح شده از [۵۹]).

منتفی است و بنابراین مقدار غلظت در مرز پایینی همواره برابر با صفر است. در صورتی که در مقاله یونگ و میچل^[۹۱] برای مرز پایینی غلظت غیرصفر گزارش شده است که نتیجه ی صحیحی نیست و از محدودیت های این پژوهش است.

۳.۷. مدل سازی عددی مالیوسیسی و شکلفورد (۲۰۰۴)

در این مقاله، ۴ رویکرد برای حل مسئله در نظر گرفته شده است. هدف غایی، مقایسه ی دقت هریک از این رویکردهاست. این رویکردها عبارتند از: ۱. بدون در نظر گرفتن رفتار غشایی رس و صرف نظر از فشار اسمز - شیمیایی (NM)؛ ۲. رویکرد صریح: با در نظر گرفتن رفتار غشایی و عدم لحاظ رفتار غشا در ضریب انتشار مؤثر (E)؛ ۳. رویکرد ضمنی: وابسته فرض کردن مقدار غلظت و ضریب انتشار مؤثر و صفر فرض کردن کارایی غشا (I)؛ ۴. ترکیبی از رویکرد صریح و ضمنی به طوری که با افزایش کارایی غشا، ضریب انتشار مؤثر کاهش یابد (EI).^[۶۰]

در عبارت مربوط به انتقال اجزای شیمیایی همراه با جریان اسمزی در رابطه ی دیفرانسیلی مورد استفاده در این مقاله برای انتقال اجزاء محلول، عبارت $1 - \omega$ ضرب نشده است و از جذب اجزاء و تغییر شکل پذیری خاک هم صرف نظر شده است. روش حل عددی در این تحلیل هم، روش تفاضل محدود است.^[۶۰]

در این تحلیل عددی از نتایج آزمایشگاهی مالیوسیسی و شکلفورد^[۱۶] استفاده شده است. این تحلیل برای چهار غلظت اولیه ی (C_0) مختلف (۸/۷، ۳/۹، ۲/۰ و ۴/۷ میلی مولار) و سه گرادیان هیدرولیکی مختلف (صفر، ۱۰ و ۱۰۰) انجام شده است. در ادامه، نمونه یی از نمودارهای مربوط به نتایج تحلیل های عددی برای گرادیان هیدرولیکی ۱۰ و غلظت اولیه ۸/۷ میلی مولار آورده شده و سایر نتایج در متن شرح داده می شود. در این حالت مقدار هدایت هیدرولیکی 10^{-10} m/s و $1/33 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ ضریب انتشار مؤثر $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1/25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ کارایی غشا ۰/۴۹، نسبت تخلخل ۰/۸ و ضخامت لایه ی ایزولاسیون رسی ۱ متر است. شرایط مرزی مورد استفاده در این تحلیل ها از روابط ۷۸ تا ۸۰ تبعیت می کند.^[۶۰]

در صورت چشم پوشی از رفتار اسمزی (NM)، مقدار شار اجزاء افزایش می یابد (شکل ۱۱). نتایج مربوط به رویکرد توأم ضمنی و صریح (EI) از سایر موارد کم تر است و در این رویکرد اگر مقدار کارایی غشا ۱۰۰٪ باشد، مقدار جریان صفر خواهد شد که نتیجه یی مطابق واقعیت فیزیکی است. این نتیجه در تمامی تحلیل های دیگر با شرایط متفاوت از نظر غلظت اولیه، ضرایب هدایت هیدرولیکی و انتشار مؤثر و کارایی غشا صدق می کند، هرچند فاصله ی بین

مشاهده می شود که در زمان اولیه در لایه ی خاکی، نمک (بیان گر آلاینده) وجود ندارد و پس از آن مقدار غلظت نمک در مرز بالایی لایه ی رسی ثابت است. علاوه بر این موارد، مسئله نیازمند یک شرط مکانی دیگر برای مرز پایینی لایه ی رسی است. در مقالات موجود، این شرط به یکی از سه صورت زیر مطرح شده است:^[۸۹، ۸۷، ۶۰، ۵۹]

$$c_s(z=L, t>0) = 0 \quad (80)$$

$$\frac{\partial c_s}{\partial z}(z=L, t>0) = 0 \quad (81)$$

$$\lambda \frac{\partial c_s(z=L, t>0)}{\partial z} + \mu c_s(z=L, t>0) = 0 \quad (82)$$

شرط مرزی ۸۰ زمانی ایجاد می شود که دبی آب زیرزمینی زیاد باشد به طوری که امکان وجود آلاینده در مرز پایینی لایه ی ایزولاسیون وجود نداشته باشد.^[۴۱]

در صورتی که تحلیل از نوع هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی باشد، مسئله نیازمند شرایط اولیه و مرزی دیگری برای فشار آب حفره یی اضافه و نشست است:^[۸۷]

$$u(z, t=0) = \sigma \quad (83)$$

$$w_z(z, t=0) = 0 \quad (84)$$

$$u(z=0, t) = u_1 \quad (85)$$

$$u(z=L, t) = u_2 \quad (86)$$

$$w_z(z=L, t) = 0 \quad (87)$$

بر اساس روابط ۸۳ تا ۸۷، در زمان اولیه ی مدل سازی نشست وجود ندارد و مقدار فشار آب حفره یی اضافه برابر با σ است.^[۸۷]

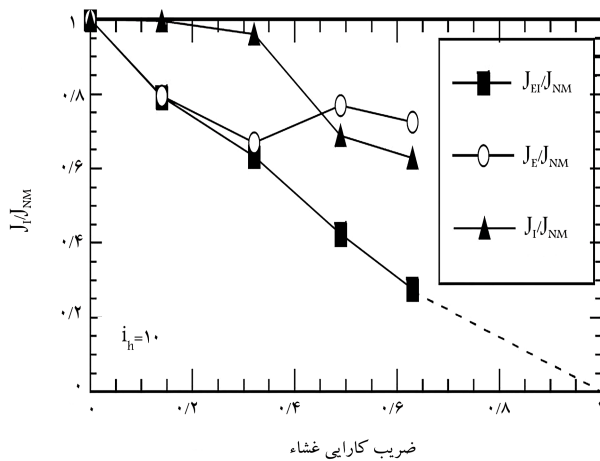
۲.۷. مدل سازی عددی ماناسرو و دومینیجانی (۲۰۰۳)

هدف این مقاله بررسی تأثیر مقدار کارایی غشا و رفتار غشایی خاک های رسی بر نتایج است. برای حل عددی این مسئله از روش تفاضل محدود استفاده شده است که در آن گام زمانی پیش رونده و گام مکانی، مرکزی است. نمونه ی مورد بررسی، تغییر شکل ناپذیر فرض شده است که با رفتار فیزیکی خاک در طبیعت ناسازگار است.^[۵۹]

شرایط مرزی این مسئله از روابط ۷۸، ۷۹ و ۸۱ پیروی می کند. علاوه بر آن از جذب اجزاء صرف نظر شده، مقدار گرادیان هیدرولیکی ۱۰، ضریب انتشار $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ، ضریب هدایت هیدرولیکی 10^{-10} m/s ، دمای مورد بررسی ۲۹۳ کلوین، ضخامت ۰/۱ متر و مقدار C_0 در رابطه ی ۷۸ معادل ۵ میلی مولار است. طبق تصریح نویسندگان در مقاله، به منظور صحت سنجی نتایج مدل عددی، پایداری و پیوستگی راه حل نهایی به دقت مورد بررسی قرار گرفته است.^[۴۱]

حل مسئله ی عددی با استفاده از روابط و شرایط مرزی مذکور، ما را به نمودار شکل ۱۰ رهنمون می شود. در این نمودار، تأثیر تغییر کارایی غشا در پخش آلاینده بررسی شده است. نتایج نشان می دهد با در نظر گرفتن اثر جریان اسمزی، مقدار آلاینده منتقل شده در طول زمان کاهش می یابد. در صورت افزایش مقدار کارایی غشا، مقدار آلاینده ی منتقل شده کم تر می شود.^[۴۱]

همچنین نتایج این شکل با راه حل یونگ و میچل^[۹۱] مقایسه شده است. نتیجه ی مقایسه نشان می دهد که تطابق نسبتاً خوبی بین رفتار کلی مدل ها برقرار است. تفاوت این مدل ها با یکدیگر، در نحوه ی تغییرات غلظت در مرز پایینی در صورت وجود رفتار ایده آل غشایی ($\omega = 1$) است. بنابر روابط ارائه شده در این مقاله و مقاله ی ماناسرو و دومینیجانی،^[۴۱] در صورت رفتار ایده آل غشا، امکان عبور اجزاء



شکل ۱۳. تفاوت انواع آنالیزها در مقادیر مختلف کارایی غشا. [۶۰]

نتیجه‌ی خلاف واقعیت فیزیکی است. به همین علت، به منظور برداشت دقیق‌تر از نتایج تحلیل‌های عددی، باید به طور همزمان با افزایش کارایی غشا، مقدار ضریب انتشار مؤثر نیز کاهش داده شود که در واقع همان رویکرد ترکیبی (EI) است. [۶۰]

بیشترین کاهش در میزان غلظت خروجی با کاهش غلظت اولیه زمانی اتفاق می‌افتد که از تحلیل توأم ضمنی و صریح (EI) استفاده شود؛ زیرا هر دو عامل افزایش کارایی غشا و کاهش ضریب انتشار مؤثر در این نوع تحلیل باعث کاهش میزان اجزای شیمیایی منتقل شده می‌شود که به واقعیت فیزیکی پدیده هم نزدیک‌تر است. [۶۰]

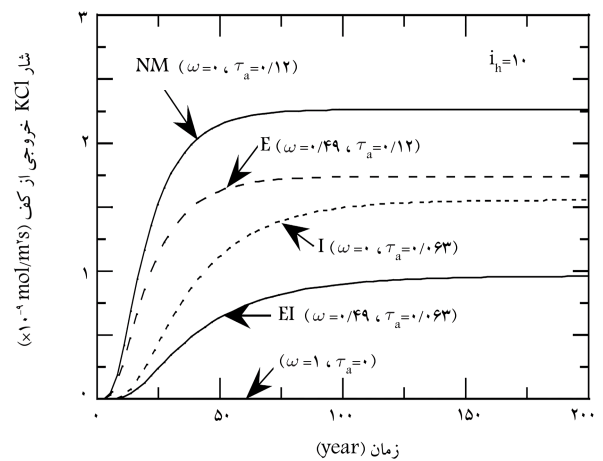
بنابراین با لحاظ نتایج تحلیل عددی ماناسرو و دومینیچانی [۵۹] و مالیوسیس و شکلفورد [۶۰] می‌توان نتیجه گرفت که با لحاظ اثرات رفتار غشایی خاک‌های رسی (جریان اسمز-شیمیایی) در طراحی‌ها، می‌توان انتظار زمان طولانی‌تری برای استفاده از لایه‌ی ایزولاسیون رسی در مدفن‌های زباله داشت و به نوعی طراحی‌ها بهینه‌تر خواهد بود.

۴.۷. مدل‌سازی عددی ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)

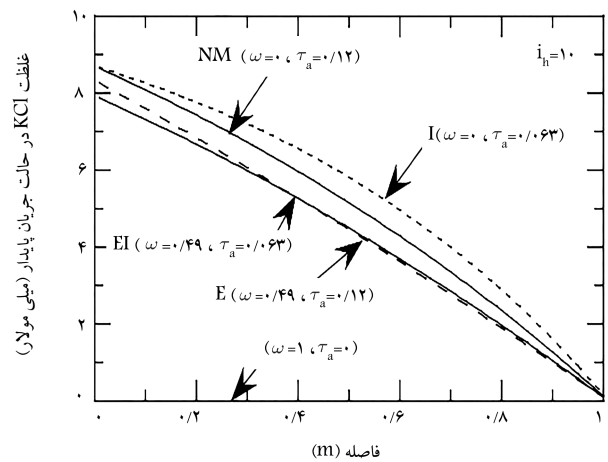
در این مقاله، آثار مکانیکی نیز همزمان با انتقال آلاینده‌ها بر اثر پدیده‌های همبسته انتشار، هیدرولیکی و اسمزی در نظر گرفته شده است. روابط مورد استفاده برای تحلیل در این مقاله، روابط ۵۹، ۶۸ و ۷۳ است؛ با این تفاوت که در همرفت جریان اسمزی، ضریب $(1 - \omega)$ در این تحلیل لحاظ نشده است. نرم‌افزار مورد استفاده برای تحلیل عددی نیز «کامسول» است. [۸۷]

در این تحلیل، مقدار u_1 و u_2 برابر با صفر و مقدار تنش کل و در نتیجه اضافه فشار آب حفره‌ی اولیه، برابر با 50 کیلوپاسکال است. همچنین مقدار مدول کشسانی 10^6 kPa و $1/49 \times 10^6$ ضریب پواسون $0/3$ ، ضخامت لایه‌ی رسی 1 متر، دمای مورد بررسی 293 کلوین، غلظت اولیه 1 مولار، مقدار نسبت تخلخل $0/5$ ، چگالی دانه‌های جامد $2/6 \text{ Mg/m}^3$ ، ضریب هدایت هیدرولیکی 10^{-10} m/s ، ضریب انتشار $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ، ضریب جذب خطی $0/8142 \text{ L/kg}$ ، ضریب فشردگی حجمی $5 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ و ضریب فشردگی اسمزی $2/5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ است. شرایط مرزی در این تحلیل مطابق روابط 78 تا 80 و 83 تا 87 است. [۹۲، ۸۷]

به منظور صحت‌سنجی این مدل از مدل عددی پیترواسمیت [۹۲] و مدل تحلیلی



شکل ۱۱. مقایسه‌ی رویکردهای مختلف در ارزیابی شار آلاینده‌ی انتقالی. [۶۰]

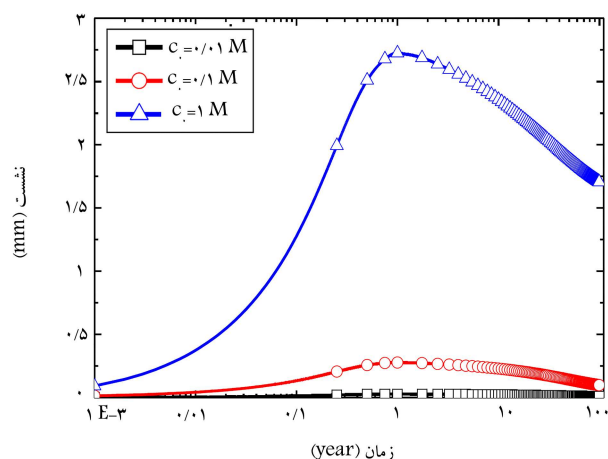


شکل ۱۲. پروفیل غلظت در عمق لایه‌ی رسی در زمان بی‌نهایت. [۶۰]

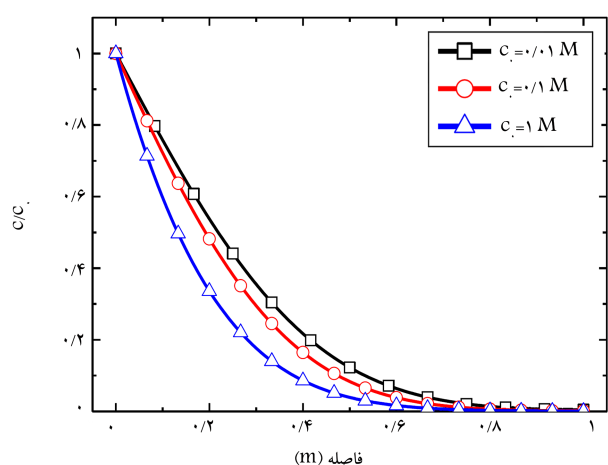
نمودارها در شرایط مختلف فرق دارد. به طور کلی در غلظت‌های اولیه‌ی بالاتر و گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر تفاوت بین دو رویکرد صرف نظر از رفتار غشایی (NM)، ضمنی (I)، همین‌طور رویکرد ترکیبی (EI) و صریح (E)، به طور نسبی کم‌تر می‌شود. این مورد اهمیت لحاظ کارایی غشا را در غلظت‌ها و گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر و اهمیت لحاظ آن در ضریب انتشار مؤثر را در غلظت‌ها و گرادیان‌های پایین‌تر نشان می‌دهد. به طور کلی، اهمیت شار اجزاء از طریق همرفت با افزایش غلظت و گرادیان هیدرولیکی نسبت به شار اجزاء از طریق انتشار افزایش می‌یابد. [۶۰]

چنان که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از رویکرد صریح (E) و رویکرد ترکیبی (EI)، پروفیل غلظت کم‌تر از رویکرد ضمنی (I) و رویکردی است که از اثر اسمزی صرف‌نظر شده است (NM). با کاهش انحنای ظاهری و به تبع آن کاهش ضریب انتشار مؤثر، نسبت شار انتشار به شار همرفت کاهش یافته و جبهه‌ی غلظت نمک به مرز پایینی نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به آن که کاهش انحنای ظاهری در غلظت‌های پایین‌تر نمود بیشتری دارد، تفاوت پروفیل رویکردهای مختلف نیز در غلظت‌های پایین‌تر نمود بیشتری دارد. [۶۰]

چنان که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از تحلیل صریح (E) و ضمنی (I) به طور جداگانه، اگر کارایی غشا افزایش یابد و به 100% نزدیک شود، مقدار جریان اجزای شیمیایی عبوری به مقدار صفر نمی‌رسد؛ این



شکل ۱۵. تأثیر غلظت اولیه بر روند نشست در طول زمان با فرض عدم وجود تنش کل ($\sigma = 0$). [۸۷]

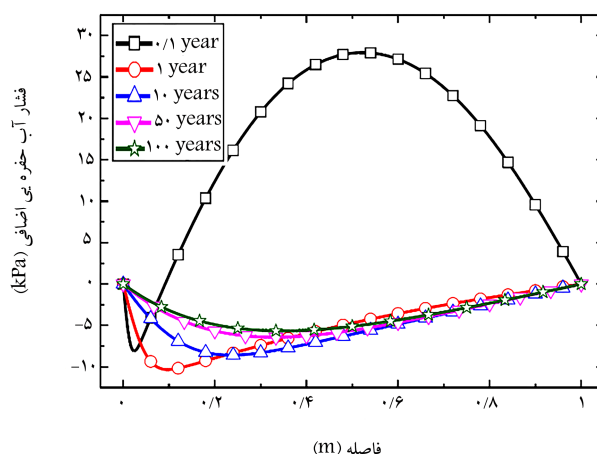


شکل ۱۶. تأثیر تغییر غلظت اولیه بر روی نحوه پخش آلودگی در عمق در سال پنجاهم. [۸۷]

۸. مروری بر محدودیت‌های پژوهش‌های کنونی

با وجود پژوهش‌های بسیاری که در این زمینه صورت گرفته است، همچنان چالش‌هایی وجود دارد که رفع آن‌ها باعث پیشبرد بهتر اهداف زیست‌محیطی در راستای طراحی پایدار مدفن‌های زباله و کنترل شیرابه می‌شود. همان‌طور که گفته شد، انواع مختلفی از ایزولاسیون‌ها (از جمله آستر ژئوسنتتیک - رس، خاک‌های بتونیت‌دار و لایه‌های رس متراکم) وجود دارد. مقایسه‌ی عملکرد و هزینه‌ی اجرای انواع آن‌ها به منظور طراحی بهینه‌تر حائز اهمیت است و همچنان جوانبی از عملکرد آن‌ها همچون اندرکنش شیرابه ناشی از ترکیبات گوناگون زباله‌ها، از مدفنی به مدفن دیگر ناشناخته است. [۹۲]

از طرفی، مدل‌سازی‌های و آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده است، در شرایط دمایی ثابت و حدوداً ۲۰ تا ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است؛ در حالی که واکنش‌های زیستی درون مدفن می‌تواند باعث تغییرات دمایی شود که در روند انتقال آلاینده‌ها و تغییر شکل‌پذیری لایه‌ی آستر تأثیرگذار است. بنابراین، لحاظ شرایط دینامیکی دمایی واقعی مدفن می‌تواند یافته‌ها را واقع‌بینانه‌تر کند. بسیاری از نمک‌های مورد مطالعه در مدل‌سازی‌ها و آزمایش‌های انجام شده، ترکیبات ساده‌ی مانند سدیم‌کلرید و



شکل ۱۴. تغییرات فشار آب حفره‌ی اضافی در طول زمان. [۸۷]

شی و همکاران [۹۳] استفاده شده است. هریک از این مدل‌ها دارای ساده‌سازی‌هایی نسبت به روابط ژانگ و همکاران هستند که به منظور صحت‌سنجی لازم است در روابط این مقاله اصلاحاتی صورت گیرد. به عنوان مثال، اثرات جذب و وزن خاک در مدل پیتر و اسمیت دیده نشده و پس از اعمال این ساده‌سازی در روابط ارائه شده در مقاله‌ی ژانگ و همکاران، [۸۷] تطابق خوبی بین نتایج دیده می‌شود که نشان از صحت مدل و روابط پیشنهادی دارد. مدل تحلیلی پیشنهاد شده توسط شی و همکاران، [۹۳] اثرات جریان اسمز - شیمیایی را نادیده گرفته است. با ساده‌سازی روابط موجود در مقاله‌ی ژانگ و همکاران، [۸۷] تطابق خوبی بین نتایج این دو مورد نیز دیده می‌شود.

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در ابتدا، تحکیم مکانیکی به تحکیم اسمز - شیمیایی غالب است و فقط در سطح لایه‌ی ایزولاسیون جریان اسمزی و در نتیجه فشار آب حفره‌ی منفی دیده می‌شود. در باقی قسمت‌ها، فشار سیال منفذی، افزایش و فشار مؤثر کاهش می‌یابد. در ادامه، فشار سیال منفذی به علت ایجاد جریان اسمزی در تمام قسمت‌ها، منفی شده و در نتیجه تنش مؤثر افزایش یافته که باعث ایجاد تحکیم می‌شود. [۸۷]

مطابق شکل ۱۵، پس از نشست اولیه به علت تحکیم شیمیایی و فشار آب حفره‌ی منفی ایجاد شده، با انتقال آلودگی به نقاط دیگر، مقدار گرادیان غلظت کاهش یافته و در نتیجه مقدار جریان اسمزی و فشار سیال منفذی منفی و روند افزایشی تنش مؤثر، تدریجاً کاهش یافته و مقدار کمی افزایش حجم رخ می‌دهد. باربرداری شیمیایی نشان می‌دهد که خاک رفتار تورمی دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش غلظت اولیه و به تبع آن افزایش گرادیان غلظت، مقدار نشست و تورم افزایش می‌یابد. [۸۷]

در صورت تغییر شرط مرزی مربوط به غلظت اولیه، پروفیل‌های نسبی غلظت بعد از ۵۰ سال تفاوت جزئی دارند (شکل ۱۶). [۸۷]

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که در صورت لحاظ رفتار مکانیکی لایه‌های رسی، تغییرات بسیاری به وجود می‌آید. ضریب هدایت هیدرولیکی، کارایی غشا، ضریب انتشار مؤثر از ضرایبی هستند که به تبع تغییر تخلخل، تغییر می‌کنند. همین امر موجب می‌شود که نحوه‌ی انتقال آلاینده‌ها و جریان سیال تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین، بررسی تغییرات مکانیکی به صورت همبسته با دیگر پدیده‌ها موجب افزایش دقت و بهینه‌سازی فرایند طراحی مدفن‌ها شود. همچنین لحاظ نشست و تورم لایه‌ی خاکی در ایمنی سازه‌های احتمالی موجود در اطراف محل مدفن نیز تأثیرگذار است.

جریان یک‌بعدی، برای همه‌ی حوزه مدفن و به ویژه نواحی بحرانی آن که می‌تواند تحت تأثیر مشکلات پایداری و جریان‌های سه فازه نیز باشد، قابلیت کاربری خود را از دست می‌دهد.^[۹۷]

در نهایت، تحقیقات بسیار محدودی هم راجع به اثر نوع خاک و نوع آلاینده بر ضریب فشردگی اسمزی و ضریب جذب انجام شده است. بنابراین طراحی ابزارهای دقیق به منظور بررسی آزمایشگاهی این ضرایب نیز به طراحی بهینه‌ی مدفن‌ها کمک خواهد کرد.

۹. نتیجه‌گیری

مدیریت زباله‌ها یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی است و یکی از راه‌های آن، دفن زباله‌ها در یک بستر رسی با خاصیت غشایی است. در فرایند انتقال اجزای شیمیایی محلول، انتشار و انتقال اجزاء همراه با جریان سیال و در فرایند انتقال سیال، اسمز - شیمیایی و هدایت هیدرولیکی نقش‌آفرینی می‌کنند. از طرفی، تغییر شکل رس به علت اندرکنش محلول منفذی با کانی‌های رس، اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین در این مقاله، ضمن مروری جامع بر سه رویکرد پژوهشی، تجربی و نظری در تحلیل این پدیده‌ی هم‌بسته‌ی هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی، به نقاط قوت و ضعف هریک اشاره شد. همچنین، معادلات دیفرانسیلی هم‌بسته به صورت منظم و یک‌جا برای استفاده‌ی پژوهش‌گران در تحلیل‌های عددی، ارائه و به توضیح هریک از آن‌ها پرداخته شد. در نهایت نیز با توجه به مرور جامعی که بر رویکردهای مختلف پژوهشی صورت گرفته است، محدودیت‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و پیشنهاداتی برای ادامه‌ی پژوهش در این حوزه مطرح شد که در نهایت می‌تواند با ارتقای سطح مدل‌سازی‌های موجود باعث طراحی بهینه‌ی مدفن‌های زباله با احتمال کم‌تر نشت آلودگی شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف در قالب پنجمین طرح فراخوان‌گرنی از برنامه‌ی پژوهشی تحت عنوان «ارزیابی آزمایشگاهی جریان دوفازه در محیط متخلخل و تغییرشکل‌پذیر» به شناسه‌ی گرنت ۹۷۰۹۰۲ G صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

پانویس‌ها

1. vertical cutoff walls
2. Diffusion
3. advection or ultrafiltration
4. phenomenological
5. Physical
6. head
7. dynamic viscosity
8. chemico-osmosis

پتاسیم کلرید هستند؛ اما در مدفن‌ها، اجزای شیمیایی پیچیده‌تری نظیر فلزات سنگین نیز امکان حضور دارند که بسیار پرخطرند و به همین سبب بررسی آن‌ها در حوزه‌ی سلامت از اهمیت زیادی برخوردار است. به علت نوین بودن مطالعات مربوط به پدیده‌ی اسمز - شیمیایی در مدفن‌ها، همچنان این موارد به طور کامل بررسی نشده است.^[۴۳]

در این مقاله بسترهای رسی اشباع مد نظر قرار گرفت، در حالی که برخی از رس‌های مورد استفاده در قسمت شیب‌دار بدنه‌ی مدفن به علت گازهای تولید شده در فرایندهای زیستی، غیراشباع شده و علاوه بر دو فاز جامد و مایع، فاز سوم گاز هم ایفای نقش کرده و قوانین جریان در محیط سه فازه حاکم می‌شود. شرایط غیراشباع، باعث پیچیده‌تر شدن فرایندهای انتقال سیال و اجزاء می‌شود. در زمینه‌ی آزمایشگاهی به علت وقت‌گیر بودن روند آزمایش‌ها، داده‌های کمی برای شناخت پدیده‌ی اسمز - شیمیایی در محیط متخلخل و غیراشباع وجود دارد.^[۹۶،۹۵،۷]

فاز گاز علاوه بر نقش‌آفرینی در انتقال آلاینده‌ها، باعث ایجاد بوی بد در مدفن شده و در نتیجه، کنترل بوی متصاعدشده از شیرابه‌ها نیز از دیگر مسائل حائز اهمیت در حوزه‌ی محیط‌زیست است. لازم به ذکر است که در روابط دیفرانسیلی توسعه‌یافته، تغییرشکل به صورت کشسان و خطی فرض شده است. توسعه‌ی روابط با فرض تغییرشکل‌های کشسانی - خمیری و غیرخطی خاک می‌تواند گامی دیگر در راستای پیشرفت مطالعات این حوزه باشد. پژوهش‌های آزمایشگاهی که تاکنون انجام شده است بر ضرایب انتشار مؤثر و کارایی غشا متمرکز بوده است. همچنین تحلیل‌هایی که بر اثرات هم‌بسته‌ی پدیده‌ها بر روی انتقال آلاینده‌ها انجام شده است، به صورت نظری و عددی بوده است. طراحی آزمایش‌هایی در راستای اثرات هم‌بسته‌ی پدیده‌های هیدرولیکی - شیمیایی - مکانیکی روی نحوه‌ی انتقال آلاینده‌ها به منظور اعتبارسنجی نتایج موجود، ضروری و کارساز خواهد بود.

تحلیل‌های فعلی با این فرض انجام شده است که لایه‌ی متراکم رسی، همسان‌گرد بوده و شرایط جریان یک‌بعدی حاکم است. بنابراین، تمامی معادلات و تحلیل‌های مذکور در شرایط یک‌بعدی توسعه و انجام یافته است. اگر چه فرض جریان یک‌بعدی در بستر افقی مدفن که شرایط تقارن محوری حاکم است، صادق است، به طور قطع شرایط حاکم بر انتقال آلاینده و جریان سیالات در کناره‌ها و گوشه‌های مدفن، به ترتیب دوبعدی و سه‌بعدی است. بنابراین، تحلیل‌های موجود و مبتنی بر شرایط

۹. اولین لایه‌ی موجود در سطح کانی‌های رسی که در آن کاتیون‌ها ساکن شده‌اند. کاتیون‌های این لایه نسبت به ذرات ساکنند.

۱۰. کانی مونت‌موریلونیت دارای لایه‌هایی از صفحات موازی با یکدیگر است که تاکوئید (tactoid) نامیده می‌شوند.

11. self-diffusion coefficients
12. matrix tortuosity factor
13. resistance tortuosity factor
14. diffuse double layer
15. Osmotic Consolidation
16. Osmotically-Induced consolidation
17. Chemical Consolidation

18. van der waals
19. Smectite
20. perfect flushing exit boundary condition

(References) منابع

1. De, S. and Debnath, B. "Prevalence of health hazards associated with solid waste disposal-A case study of kolkata, India", *Procedia Environmental Sciences*, **35**, pp. 201-208 (2016).
2. Nelles, M. and et al. "Recycling and recovery of the biogenic fractions from municipal solid waste in the PR of China", Study by University of Rostock (2017).
3. Shackelford, C.D. Diffusion of inorganic chemical wastes in compacted clay. 1988, Texas Univ., Austin, TX (USA) (1988).
4. Toupiol, C. and et al. "Long-term tritium transport through field-scale compacted soil liner", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(8), pp. 640-650 (2002).
5. Shackelford, C.D. and Malusis, M.A. and Olsen, H.W. "Clay membrane behavior for geoenvironmental containment", Soil and Rock America Conf, pp.767-774 (2003).
6. Reddy, K.R. and Kumar, G. and Giri, R.K. "Modeling coupled processes in municipal solid waste landfills: an overview with key engineering challenges", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(1), p. 6 (2017).
7. Shackelford, C.D. and et al. "Research challenges involving coupled flows in geotechnical engineering", *Geotechnical Fundamentals for Addressing New World Challenges*, Springer, pp. 237-274 (2019).
8. Elango, L., *Hydraulic conductivity: Issues, Determination and Applications*, BoD-Books on Demand (2011).
9. Mitchell, J. "Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice", *Geotechnique*, **41**(3), pp. 299-340 (1991).
10. De Ghislain, M. "Quantitative hydrogeology; groundwater hydrology for engineers", Academic press, first edition (1986).
11. Dominijanni, A. and Manassero, M. "Modelling the swelling and osmotic properties of clay soils. part II: the physical approach", *International Journal of Engineering Science*, **51**, pp. 51-73 (2012).
12. Dominijanni, A. and Manassero, M. "Modelling the swelling and osmotic properties of clay soils, part I: the phenomenological approach", *International Journal of Engineering Science*, **51**, pp. 32-50 (2012).
13. Staverman, A. "Non-equilibrium thermodynamics of membrane processes", *Transactions of the Faraday Society*, **48**, pp. 176-185 (1952).
14. Philip, J. and Smiles, D.-E. "Macroscopic analysis of the behavior of colloidal suspensions", *Advances in Colloid and Interface Science*, **17**(1), pp. 83-103 (1982).
15. Smiles, D. "Effects of solutes on clay-water interactions: some comments", *Applied Clay Science*, **42**(1-2) pp. 158-162 (2008).
16. Malusis, M.A. and Shackelford, C.D. "Chemico-osmotic efficiency of a geosynthetic clay liner", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(2), pp. 97-106 (2002).
17. Barbour, S. and Fredlund, D. "Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **26**(4), pp. 551-562 (1989).
18. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons (1993).
19. Musso, G., Romero, E. and Della Vecchia, G. "Double-structure effects on the chemo-hydro-mechanical behaviour of a compacted active clay", In Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013. ICE Publishing (2014).
20. Das, B. Advanced Soil mechanics: Tylor & Frances (2008).
21. Chapuis, R.P. "Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **71**(3), pp. 401-434 (2012).
22. Jabro, J. "Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data", *Transactions of the ASAE*, **35**(2), pp. 557-560 (1992).
23. Chapuis, R.P. and Aubertin, M. "On the use of the kozeny carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(3), pp. 616-628 (2003).
24. Suleiman, A. and Ritchie, J. "Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity", *Transactions of the ASAE*, **44**(2): p. 235 (2001).
25. Parker, S. "Osmotic investigations: studies on cell mechanics (1877), by wilhelm pfeffer", Embryo Project Encyclopedia (2017).
26. Arrhenius, S. "Über die dissociation der in wasser gelösten stoffe", *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, **1**(1), pp. 631-648 (1887).
27. Lynde, C.J. "Osmosis in soils: soils act as semi-permeable membranes", *Agronomy Journal*, **4**(1), p. 102 (1912).
28. Katchalsky, A. and Curran, P. "Membrane permeability to nonelectrolytes: discontinuous systems", *Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics*, pp. 113-132 (1965).
29. Kemper, W. and Rollins, J. "Osmotic efficiency coefficients across compacted clays", *Soil Science Society of America Journal*, **30**(5), pp. 529-534 (1966).
30. Olsen, H.W. "Liquid movement through kaolinite under hydraulic, electric, and osmotic gradients", *AAPG Bulletin*, **56**(10), pp. 2022-2028 (1972).

31. Malusis, M.A. and Shackelford, C.D. "Theory for reactive solute transport through clay membrane barriers", *Journal of Contaminant Hydrology*, **59**(3-4), pp. 291-316 (2002).
32. Lewis, G.N. "The osmotic pressure of concentrated solutions, and the laws of the perfect solution", *Journal of the American Chemical Society*, **30**(5), pp. 668-683 (1908).
33. Malusis, M.A. and Shackelford, C.D. "Predicting solute flux through a clay membrane barrier", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(5), pp. 477-487 (2004).
34. Fritz, C.J. and et al. "Determining maximum chemico-osmotic pressure difference across clay membranes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **146**(1), p. 06019018 (2020).
35. Fritz, S.J. "Ideality of clay membranes in osmotic processes: a review", *Clays and Clay Minerals*, **34**(2) pp. 214-223 (1986).
36. Shackelford, C., Malusis, M. and Olsen, H.W. "Clay membrane behavior for geoenvironmental containment", *In Oil and Rock America Conf. 2003. 1*, pp. 767-774 (2003).
37. Bresler, E. "Anion exclusion and coupling effects in non-steady transport through unsaturated soils: I", *Theory. Soil Science Society of America Journal*, **37**(5), pp. 663-669 (1973).
38. Shackelford, C.D. and Lee, J.-M. "The destructive role of diffusion on clay membrane behavior", *Clays and Clay Minerals*, **51**(2), pp. 186-196 (2003).
39. Shackelford, C. "Membrane behavior in geosynthetic clay liners, in Geo-Frontiers 2011", *Advances in Geotechnical Engineering*. pp. 1961-1970 (2011).
40. Dutt, G.R. and Low, P.F. "Diffusion of alkali chlorides in clay-water systems", *Soil Science*, **93**(4), pp. 233-240 (1962).
41. Dominianni, A. and Manassero, M., *Modelling Advective, Diffusive and Osmotic Transport with Reference to the Molecular Scale*, In *Geotechnical Problems With Man-made and Man Influenced Grounds*. Prague, Czech Republic. pp. 327-332 (2003).
42. Quigley, R.M., Yanful, E.K. and Fernandez, F. "Ion transfer by diffusion through clayey barriers", in *Geotechnical Practice for Waste Disposal'87*, ASCE (1987).
43. Shackelford, C. "Membrane behavior in engineered bentonite-based containment barriers: state of the art", *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, pp. 45-60 (2013).
44. Malusis, M.A., Shackelford, C.D. and Maneval, J.E. "Critical review of coupled flux formulations for clay membranes based on nonequilibrium thermodynamics", *Journal of Contaminant Hydrology*, **138**, pp. 40-59 (2012).
45. Malusis, M.A., Shackelford, C.D. and Olsen, H.W. "A laboratory apparatus to measure chemico-osmotic efficiency coefficients for clay soils", *Geotechnical Testing Journal*, **24**(3), pp. 229-242 (2001).
46. Katchalsky, A. and Curran, P.F. "Nonequilibrium thermodynamics in biophysics", Harvard University Press (2013).
47. Kang, J.-B. and Shackelford, C.D. "Clay membrane testing using a flexible-wall cell under closed-system boundary conditions", *Applied Clay Science*, **44**(1-2), pp. 43-58 (2009).
48. Kang, J.-B. and Shackelford, C.D. "Membrane behavior of compacted clay liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(10), pp. 1368-1382 (2010).
49. Dominianni, A., Guarena, N. and Manassero, M. "Laboratory assessment of semi-permeable properties of a natural sodium bentonite", *Canadian Geotechnical Journal*, **55**(11), pp. 1611-1631 (2018).
50. Musso, G. and et al. "Laboratory characterization of the chemo-hydro-mechanical behaviour of chemically sensitive clays", *Rivista Italiana di Geotecnica*, **3**, pp. 22-47 (2017).
51. Keijzer, T.J., Klingeld, P. and Loch, J. "Chemical osmosis in compacted clayey material and the prediction of water transport", *Engineering Geology*, **53**(2), pp. 151-159 (1999).
52. Shackelford, C.D., Meier, A. and Sample-Lord, K. "Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(5), pp. 707-718 (2016).
53. Meier, A. and et al. "Persistence of semipermeable membrane behavior for a geosynthetic clay liner. in *Proceedings, 7th International Conference on Environmental Geotechnics*, Melbourne, Australia (2014).
54. Manassero, M. "On the fabric and state parameters of active clays for contaminant control", in *Proceedings of the 19th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea (2017).
55. Dominianni, A. and Manassero, M. "Modelling osmosis and solute transport through clay membrane barriers", in *Waste Containment and Remediation*. pp. 1-12 (2005).
56. Manassero, M. and Dominianni, A. "Coupled modelling of swelling properties and electrolyte transport through geosynthetic clay liner", In *Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics*, I, New Delhi (2010).
57. Dominianni, A., Manassero, M. and Puma, S. "Coupled chemical-hydraulic-mechanical behaviour of bentonites. *Géotechnique*, **63**(3), pp. 191-205 (2013).
58. Hamer, W.J. and Wu, Y.C. "Osmotic coefficients and mean activity coefficients of uni-univalent electrolytes in water at 25° C. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **1**(4): pp. 1047-1100 (1972).

59. Manassero, M. and Dominijanni, A. "Modelling the osmosis effect on solute migration through porous media", *Geotechnique*, **53**(5), pp. 481-492 (2003).
60. Malusis, M.A. and Shackelford, C.D. "Explicit and implicit coupling during solute transport through clay membrane barriers", *Journal of Contaminant Hydrology*, **72**(1-4), pp. 259-285 (2004).
61. Stępniewski, W., Sobczuk, H. and Widomski, M. "Diffusion in soils, in encyclopedia of agrophysics", Springer Netherlands. pp. 214-220 (2011).
62. Shackelford, C.D. and Daniel, D.E. "Diffusion in saturated soil. I: background", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(3), pp. 467-484 (1991).
63. Jost, W., "Diffusion in solids", *Liquid, Gases*, Academic press, New York, pp.1-57 (1960).
64. Stokes, R.H. and Robinson, R.A. "Electrolyte solutions: the measurement and interpretation of conductance", *Chemical Potential and Diffusion in Solutions of Si. Butterworth Scientific*, London. (1959).
65. Bird, R.B. "Transport phenomena. Appl. Mech. Rev", **55**(1), pp. R1-R4 (2002).
66. Porter, L. and et al. "Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content", *Soil Science Society of America Journal*, **24**(6), pp. 460-463 (1960).
67. Bear, J. "Dynamics of fluids in porous media", Courier Corporation (2013).
68. Sobieski, W. and et al. "The Path Tracking Method as an alternative for tortuosity determination in granular beds", *Granular Matter*, **20**(4), pp. 72 (2018).
69. Kemper, W., Maasland, D. and Porter, L. "Mobility of water adjacent to mineral surfaces", *Soil Science Society of America Journal*, **28**(2), pp. 164-167 (1964).
70. Van Schaik, J. and Kemper, W. "Chloride diffusion in clay-water systems", *Soil Science Society of America Journal*, **30**(1), pp. 22-25 (1966).
71. Malusis, M.A. and Shackelford, C.D. "Coupling effects during steady-state solute diffusion through a semipermeable clay membrane", *Environmental Science & Technology*, **36**(6), pp. 1312-1319 (2002).
72. Liu, J.-G., Wang, H.-T. and Nie, Y.-F. "Fractal model for predicting effective diffusion coefficient of solute in porous media", *Advances in Water Science*, **15**(4), pp. 458-462 (2004).
73. Malusis, M.A., Kang, j.-B. and Shackelford, C.D. "Restricted salt diffusion in a geosynthetic clay liner", *Environmental Geotechnics*, **2**(2), pp. 68-77 (2015).
74. Malusis, M.A. and Daniyarov, A.S. "Membrane efficiency and diffusive tortuosity of a dense prehydrated geosynthetic clay liner", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(5), pp. 719-730 (2016).
75. Chattopadhyay, P. "On the question of the mode of production in Indian agriculture: a preliminary note", *Economic and Political Weekly*, pp. A39-A46 (1972).
76. Balasubramanian, A., Siddaramappa, R. and Rangaswami, G. "Effect of organic manuring on the activities of the enzymes hydrolysing sucrose and urea and on soil aggregation", *Plant and Soil*, **37**(2), pp. 319-328 (1972).
77. Sridharan, A. and Rao, G.V. "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechnique*, **23**(3) pp. 359-382 (1973).
78. Chatterji, P.K. and Morgenstern, N.R. "A modified shear strength formulation for swelling clay soils", in *Physico-chemical aspects of soil and related materials*. ASTM International (1990).
79. Di Maio, C. "Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects", *Geotechnique*, **46**(4), pp. 695-707 (1996).
80. Mitchell, J., *Components of Pore Water Pressure and Their Engineering Significance, in Clays and Clay Minerals*, Elsevier. pp. 162-184 (1962).
81. Van Impe, P. and et al. "A simulation model for consolidation and contaminant coupled flows in clay layers", *Environmental Geotechnics (4th ICEG)'02*, pp. 189-194 (2002).
82. Mikolajków, J. "Laboratory methods of estimating the retardation factor of migrating mineral nitrogen compounds in shallow groundwater", *Geological Quarterly*, **47**(1), pp. 91-96 (2003).
83. Deutch, M. "The property concept of trade secrets in anglo-american law: an ongoing debate", *U. Rich. L. Rev*, **31**, p. 313 (1997).
84. Santamarina, J. and et al. "Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling interparticle forces and fabric", *Stress*, **10**, p. 2 (2002).
85. Malusis, M.A., Shackelford, C.D. and Olsen, H.W. "Flow and transport through clay membrane barriers", *Engineering Geology*, **70**(3-4), pp. 235-248 (2003).
86. Freeze, R.A. and Cherry, J.A., *Groundwater: Englewood Cliffs*. New Jersey (1979).
87. Zhang, Z. and et al. "Modeling fully coupled hydraulic-mechanical-chemical processes in a natural clay liner under mechanical and chemico-osmotic consolidation", *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(36), pp. 36173-36183 (2018).
88. Kaczmarek, M. and Hueckel, T. "Chemo-mechanical consolidation of clays: analytical solutions for a linearized one-dimensional problem", *Transport in Porous Media*, **32**(1), pp. 49-74 (1998).
89. Zhang, Z., Tian, G. and Han, L. "Influence of chemical osmosis on solute transport and fluid velocity in clay soils", *Open Chemistry*, **18**(1), pp. 232-238 (2020).
90. Manassero, M., Dominijanni, A. and Guarena, N. "Modelling hydro-chemo-mechanical behaviour of active clays through the fabric boundary surface", in *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering*, Springer (2018).

91. Yeung, A. and Mitchell, J. "Coupled fluid, electrical and chemical flows in soil", *Geotechnique*, **43**(1), pp. 121-134 (1993).
92. Peters, G.P. and Smith, D.W. "The influence of advective transport on coupled chemical and mechanical consolidation of clays", *Mechanics of Materials*, **36**(5-6), pp. 467-486 (2004).
93. Xie, H. and et al. "An analytical model for contaminant transport in landfill composite liners considering coupled effect of consolidation, diffusion, and degradation", *Environmental Science and Pollution Research*, **23**(19), pp. 19362-19375 (2016).
94. Dominianni, A. and Manassero, M. "Influence of membrane behavior on contaminant transport through geosynthetic clay liners, in geoCongress 2008", American Society of Civil Engineers (2008).
95. Zhang, H. and et al. "Solute transport in partially-saturated deformable porous media: application to a landfill clay liner", *Advances in Water Resources*, **40**, pp. 1-10 (2012).
96. Sample-Lord, K.M. and Shackelford, C.D. "Membrane behavior of unsaturated bentonite barriers", in Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability (2014).
97. El-Zein, A., McCarroll, I. and Touze-Foltz, N. "Three-dimensional finite-element analyses of seepage and contaminant transport through composite geosynthetics clay liners with multiple defects", *Geotextiles and Geomembranes*, **33**, pp. 34-42 (2012).