بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنّی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی ژئوتکنیک

موضوع پایان‌نامه:

تحلیل عددی انتقال آلاینده در محیط متخلخل اشباع و ارزیابی تأثیر پارامترهای فیزیکی خاک بر آن

دانشجو:

امین خاکشورنیا

استاد راهنما:

دکتر امیر حمیدی

شهریور ۱۳۹۱

چکیده

در حرکت آلاینده‌ها در محیط متخلخل عوامل انتقال و زوال حاکم می‌باشد. انتقال شامل فرآیندهای همرفت و انتشار و زوال شامل فرآیندهای شیمیایی و جذب می‌باشد. معادله انتقال به معادله جریان در قانون دارسی وابسته بوده که آن نیز نیازمند حلّ سه‌بعدی جهت معادله جریان آب زیرزمینی جهت به دست آوردن هد هیدرولیکی می‌باشد. پدیده انتقال را می‌توان در دو قالب معادله تک فازی و معادلات دو فازی بررسی کرد که قالب دوم شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از محیط با درنظرگیری فاز ساکن و متحرّک می‌باشد. برای حلّ مسائل پیچیده انتقال آلاینده در محیط متخلخل به جای استفاده از روابط تحلیلی، از روش‌های عددی مناسب استفاده می‌گردد که شامل انواع روش‌های المان محدود (شامل روش‌های اولری، لاگرانژی و اولری- لاگرانژی) و تفاضل محدود می‌باشد. نرم‌افزارهای گوناگونی برای حلّ مسائل انتقال آلاینده با استفاده از این روش‌ها موجود است که یکی از آن‌ها CTRAN/W می‌باشد. این نرم‌افزار با استفاده از روش‌های المان محدود مسائل را حل می‌نماید. انواع تحلیل‌های مورد استفاده در CTRAN/W، همرفت- انتشار، وابسته به چگالی و ردیابی مسیر ذرّات می باشد. در این پایان‌نامه در ابتدا معادلات انتقال و اجزای آن مورد بررسی قرار گرفته، سپس مطالعات گذشته در دو بخش مطالعات و آزمایش‌های تجربی و مطالعات تحلیلی و مدل سازی عددی بیان گردیده و در نهایت کاربرد نرم‌افزار CTRAN/W در حلّ مسائل انتقال آلاینده در محیط متخلخل اشباع و تأثیر پارامترهای فیزیکی خاک از جمله نفوذپذیری، تراکم و تخلخل بر نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است که تحلیل‌های انجام شده از نوع همرفت- انتشار می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک‌ها، انتشار و انتقال، تحلیل عددی، نفوذپذیری و تخلخل.

فهرست مطالب

فصل اوّل: کلّیّات ۶

۱-۱- مقدّمه ۷

۱-۲- تعریف مسئله ۷

۱-۳- فرضیّات ۹

۱-۳-۱- معادلات حاکم ۹

۱-۳-۲- نرم افزار CTRAN/W ۱۰

۱-۴- روش‌های حل ۱۰

۱-۴-۲-۱- تفاضل محدود ۱۱

۱-۴-۲-۲- اجزای محدود ۱۱

۱-۵- فصول مختلف پایان‌نامه ۱۱

فصل دوم: معادلات حاکم بر انتقال و انتشار آلاینده‌ها ۱۳

۲-۱- مقدّمه ۱۴

۲-۲- فرآیندهای انتقال آلودگی ۱۴

۲-۲-۱- فرآیندهای انتقال ۱۵

۲-۲-۲- فرآیند زوال ۲۰

۲-۳- معادلات حاکم بر انتقال آلاینده‌ها و اصول مدل‌سازی ۲۱

۲-۳-۱- معادلات حاکم ۲۱

۲-۳-۲- همرفت ۲۵

۲-۳-۳- انتشار ۲۷

۲-۳-۳-۱- مکانیزم انتشار ۲۷
۲-۳-۳-۲- ضریب انتشار ۲۸
۲-۳-۴- چاهک و چشمه ۳۰
۲-۳-۵- واکنش‌های شیمیایی ۳۰
۲-۳-۵-۱- موازنه کنترلی خطّی یا غیرخطّی جذب ۳۰
۲-۳-۵-۲- جذب ناموازن ۳۲
۲-۳-۵-۳- زوال رادیواکتیو یا تجزیه ۳۳
۲-۳-۶- جابه‌جایی جرم در محیط دوفازه ۳۳
۲-۳-۷- شرایط اوّلیّه ۳۶
۲-۳-۸- شرایط مرزی ۳۷
۲-۳-۸-۱- غلظت مشخّص در طول مرزها (شرایط دریکله) ۳۷
۲-۳-۸-۲- گرادیان غلظت مشخّص سرتاسری در مرزها (شرایط نیومن) ۳۷
۲-۳-۸-۳- ترکیب حالت‌های اوّل و دوم (شرایط کوشی) ۳۸
۲-۴- روش‌های عددی ۳۸
۲-۴-۱- روش تفاضل محدود استاندارد ۴۰
۲-۴-۲- روش TVD مرتبه سوم ۴۳
۲-۴-۳- روش‌های اولر- لاگرانژ ۴۹

فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته ۵۲

۳-۱- مقدّمه ۵۳
۳-۲- بررسی مطالعات انجام شده در زمینه انتقال آلودگی ۵۳
۳-۲-۱- مطالعات تجربی ۵۳

۳-۲-۱-۱-بررسی‌های آزمایشگاهی و نظری انتقال آلودگی به روش انتشار و همرفت و پخش در خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه ۵۳
۳-۲-۱-۲- نمودار تجربی برای تابع پخش ۵۹
۳-۲-۲- مطالعات تحلیلی و مدل‌سازی عددی ۵۹
۳-۲-۲-۱- جریان وابسته به چگالی (نفوذ آب شور) ۵۹
۳-۲-۲-۲- حلّ تحلیلی معادله انتقال بدون درنظرگیری جذب و زوال ۶۱
۳-۲-۲-۳- حلّ تحلیلی معادله انتقال با درنظرگیری جذب ۶۲
۳-۲-۲-۴- حلّ تحلیلی معادله انتقال با در نظرگیری زوال ۶۴
۳-۲-۲-۵- حلّ تحلیلی معادله انتقال با درنظرگیری جذب و زوال ۶۵
۳-۲-۲-۶- حلّ تحلیلی معادله انتقال با درنظرگیری مرز آزاد خروجی ۶۷
۳-۲-۲-۷- مطالعات شبیه سازی عددی انتقال آلودگی در محیط متخلخل با استفاده از روش لاگرانژی موضعی پایدار ۶۹
۳-۲-۲-۸- مطالعات انتقال آلودگی هسته‌ای در محیط متخلخل دارای درز و شکاف ۷۲
۳-۲-۲-۹-...حلّ کلّی برای معادلات انتقال مزدوج چند بعدی چند مشخّصه‌ای با استفاده از یک شبکه واکنش شامل عوامل تأخیر مشخّص ۷۳
۳-۲-۲-۱۰- تحلیل عددی انتقال محلول در محیط متخلخل ۷۶
۳-۳- نتیجه‌گیری و مقایسه ۷۹

فصل چهارم: تحلیل عددی انتقال آلاینده در محیط متخلخل اشباع ۸۰

۴-۱- مقدّمه ۸۱
۴-۲- معرّفی نرم‌افزار ۸۱
۴-۲-۱- حلّ معادله تراوش ۸۲
۴-۲-۲- تحلیل با استفاده از روش ردیابی مسیر ذرّات ۸۳

۴-۲-۳- تحلیل همرفت-انتشار ۸۵
۴-۲-۴- تحلیل وابسته به چگالی ۸۶
۴-۳- تحلیل‌های نرم‌افزاری ۸۷
۴-۳-۱- تعریف و اختصاص توابع بیان‌گر ویژگی‌های محیط متخلخل در تحلیل جریان ۸۷
۴-۳-۲- ترسیم هندسه محیط، مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی ۹۰
۴-۳-۳- تحلیل جریان و دریافت خروجی نرم‌افزار SEEP/W ۹۱
۴-۳-۴- تعریف توابع بیان‌گر ویژگی‌های محیط متخلخل در تحلیل انتقال آلودگی ۹۲
۴-۳-۵- ترسیم هندسه محیط، مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی ۹۳
۴-۳-۶- تحلیل انتقال آلودگی و دریافت خروجی نرم‌افزار CTRAN/W ۹۴
۴-۳-۷-بررسی میزان حسّاسیّت تغییرات غلظت نسبت به تغییرات پارامترهای فیزیکی در نقاط مختلف محیط متخلخل ۹۵
۴-۳-۷-۱- تغییرات ضریب نفوذپذیری در عمق با فرض همسانگرد بودن محیط ۹۵
۴-۳-۷-۲- تغییرات ضریب نفوذپذیری در عمق با فرض غیرهمسانگرد بودن محیط ۹۹
۴-۳-۷-۳- مقایسه گسترش غلظت آلودگی در مدل‌های همسانگرد و غیرهمسانگرد ۱۰۰
۴-۳-۷-۴- بررسی تغییرات غلظت آلاینده، با رویکرد بررسی تغییرات پوکی ۱۰۱
۴-۳-۷-۵- بررسی تغییرات غلظت آلاینده، با رویکرد بررسی تغییرات وزن مخصوص خاک ۱۰۴
۴-۴- مقایسه مدل فیزیکی انتقال آلودگی با تحلیل عددی ۱۰۵

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات ۱۱۰

۵-۱- مقدّمه ۱۱۱
۵-۲- نتایج حاصل از تحقیق ۱۱۱
۵-۲-۱- شرایط حاکم بر تحلیل‌ها ۱۱۱
۵-۲-۲- ملاحظات نرم‌افزاری ۱۱۲

۵-۳- پیشنهادات ۱۱۴

فهرست منابع ۱۱۵

فصل اوّل: کلّیّات

۱-۱- مقدّمه

هرگاه برای حلّ مشکلی که در صنعت و یا طبیعت با آن روبه‌رو شدیم، به علوم تجربی موجود روی آوریم، لازم است آن موضوع به شکل یک مسئله بیان گردد. در این راستا باید هدف از حل، دامنه کاربرد، قوانین مورد استفاده و فرضیّات لازم برای مدل‌سازی و یا ساده‌سازی مشخّص شود. سپس برای حلّ مسئله به دنبال راه حلّ بهینه بگردیم. بدین ترتیب با مطالعه پژوهش‌های گذشته، مسئله و روش‌های مناسب برای حلّ آن تفهیم و بررسی می‌شود. همچنین مقایسه میان این روش‌ها و تعیین صحّت انجام روش و چگونگی حلّ آن‌ها بررسی می‌گردد. سپس در صورت وجود روش‌های جدید کاربردی جهت ساده‌سازی حلّ مسئله و دست‌یابی به پاسخ‌های نزدیک‌تر به واقعیّت امکان‌سنجی شده و سپس بیان گردد. در نهایت ویژگی‌های حلّ ارائه شده و مزایا و مشکلات آن و راهکارهای لازم برای انجام پژوهش‌های بعدی مطرح گردد.

در این فصل کلّیّاتی درباره مسئله انتقال آلودگی، ضرورت، هدف و روش‌های حلّ آن بیان شده است. در ادامه مباحث مطروحه در فصول بعدی و مدل‌سازی‌های انجام شده و نتایج مربوطه معرّفی می‌گردد.

۱-۲- تعریف مسئله

امروزه با گسترش تولید زباله‌های ناشی از فعّالیّت‌های بشری و ایجاد ترکیبات مختلف خطرناک و زاید، محیط زیست در معرض خطرات ناشی از آن قرار گرفته است. یکی از این آلودگی‌ها، آلودگی بستر خاک می‌باشد (شکل ۱-۱). آلودگی خاک می‌تواند در اثر نفت، مواد شیمیایی و پساب تولیدی کارخانجات و یا زباله‌های هسته ای و دارای خاصیّت رادیواکتیو ایجاد گردد. وقتی یک منبع زباله در داخل خاک قرار می‌گیرد یا آلاینده‌های محلول و نامحلول همراه با جریان آب وارد حفرات خاک می‌شود، با حرکت رطوبت در خاک منتشر گردیده و خاک را آلوده می‌سازد. این مسئله که آلودگی به چه شکل و تا چه عمق و در چه زمانی در لایه‌های خاک پخش می‌شود، مسئله اساسی است که باید مورد توجّه قرار گیرد. همچنین چگونگی محاسبه و یا تخمین میزان انتشار آلودگی در خاک خود مسئله قابل توجّه و بسیار پیچیده‌ای است که در بسیاری موارد با استفاده از روش‌های تحلیلی موجود نیز قابل حل

نبوده و یا بسیار دشوار می‌باشد. از این جهت برای حلّ این این گونه مسائل به روش‌های عددی گوناگونی روی آورده می‌شود. در این جا چگونگی مدل سازی حرکت آلودگی در خاک و انواع روش‌های مربوط به آن بررسی می‌گردد. این بررسی‌ها براساس خواصّ فیزیکی خاک، سیّال و آلاینده‌ها در قالب معادله انتقال انجام می‌گردد. همچنین انواع فرآیندهای انتقال و انتشار آلودگی در محیط متخلخل اشباع و غیر اشباع و عوامل زوال آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱-۱) نمایی از آلودگی خاک توسّط آلاینده‌ها

انتقال آلودگی در محیط متخلخل خاک مکانیزم‌های متفاوتی دارد که از انتقال آلودگی به همراه سرعت جریان انتقال در امتداد جریان، انتقال آلودگی در اثر تغییرات سرعت جریان، پراکنش و پخش مواد آلاینده به عنوان مهمترین آن‌ها نام برده می‌شود. در زمانی که سرعت جریان آب زیاد است، مکانیزم انتقال در امتداد جریان بر پخش آلودگی غلبه دارد و در مقابل هنگامی‌که سرعت ناچیز است و یا حرکت جریان وجود ندارد و یا محیط غیر اشباع است، پدیده پخش بر سایر مکانیزم‌ها غالب می‌گردد. در فرآیند پخش آلودگی پدیده‌هایی همچون جذب سطحی توسّط دانه‌های خاک و تجزیه مواد آلاینده توسّط فرآیندهای زیستی، باعث تأخیر در توزیع و پخش آلودگی می‌شود.

حرکت آلودگی همراه با جریان آب در محیط‌های متخلخل به گرادیان هیدرولیکی جریان و پارامترهای انتقال بستگی دارد. پارامترهای انتقال پارامترهایی هستند که قابلیّت محیط متخلخل را در انتقال آلودگی همراه جریان آب زیر زمینی بیان می‌کند. از جمله این پارامترها می‌توان به ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب پراکندگی اشاره کرد. این پارامترها نیز به خصوصیّات فیزیکی خاک و سیّال مانند پوکی بستگی دارد.

۱-۳- فرضیّات

۱-۳-۱- معادلات حاکم

در معادله انتقال، عبارات گوناگونی وجود دارد که برای بیان روابط مربوط به آن فرضیّات مختلفی مورد نیاز است. در این بخش به چند مورد که در فصول بعدی در بیان معادلات حاکم و حلّ مسائل مورد استفاده قرار گرفته است، اشاره می‌شود.

در همرفت سرعت جریان نقش عمده‌ای دارد که رابطه آن براساس قانون دارسی بیان گردیده است. در انتشار، ضریب مربوط به صورت تابعی از سرعت دارسی، انتشارپذیری و ضریب پخش مولکولی تعریف شده است که موارد دوم و سوم از خصوصیّات مواد هستند. در واکنش‌های شیمیایی فرض می‌شود که شرایط موازنه میان آلودگی فاز آبی و جامد موجود بوده و واکنش جذب که با سرعت آب زیرزمینی مرتبط است، به سرعت اتّفاق می‌افتد.

مدلی که برای محیط‌های متخلخل غیرهمگن در نظر گرفته می‌شود، مدل محیط دوگانه است. در این فرض دو فاز برای آب درنظر گرفته می‌شود. به صورت عمده در یک فاز همرفت و در فاز دیگر انتشار وجود دارد. برای هر کدام غلظت و پوکی جداگانه درنظر گرفته می‌شود. همچنین پدیده جذب به شکل صریح در نظر گرفته نمی‌شود.

معادله انتقال را می‌توان در محیط‌های اشباع و غیراشباع حل کرد. در فصل دوم این تحقیق درباره اثر تغییر درجه اشباع بر انتشار صحبت شده است.

۱-۳-۲- نرم افزار CTRAN/W

نرم افزار CTRAN/W ابزاری مناسب برای حلّ عددی معادله انتقال-انتشار می‌باشد. در فصل چهارم انواع تحلیل‌های مورد استفاده در نرم افزار CTRAN/W معرّفی گردیده است. هر کدام از این تحلیل‌ها بر اساس فرض‌هایی انجام می‌شود. در روش ردیابی ذرّات[1] به دلیل ناپایداری در جواب، از انتشار، جذب، زوال و چگالی آلاینده صرف‌نظر شده و تنها همرفت محاسبه می‌شود. در حالی که سه فرض اوّل در روش همرفت- انتشار و فرض آخر در روش وابسته به چگالی وجود ندارد.

۱-۴- روش‌های حل

برای محاسبه و برآورد میزان انتقال و انتشار آلودگی در خاک روش‌های گوناگونی وجود دارد که در این بخش به چند روش کاربردی اشاره می‌شود و شامل روش‌های تحلیلی و عددی می‌باشد. روش‌های عددی در دو دسته تفاضل محدود و اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته به دلیل تنوّع و کارایی که تکنیک‌های تفاضل محدود دارد، در فصل‌های بعدی مورد بحث قرار گرفته اند. از تکنیک‌های اجزای محدود در تحلیل توسّط نرم افزار CTRAN/W استفاده شده که در فصل چهارم معرّفی شده است.

۱-۴-۱- روش‌های تحلیلی

در فصل سوم معادلات لازم جهت حلّ تحلیلی معادله انتقال بیان و در هر کدام با توجّه به فرض موجود ملاحظاتی اعمال شده است که شامل حالت بدون جذب و زوال (اوگاتا[2] ۱۹۷۰)، همراه با جذب (مارسیلی[3] ۱۹۸۶)، همراه با زوال (مارسیلی ۱۹۸۶) و همراه با جذب و زوال (مارسیلی ۱۹۸۶) می‌باشد. این معادلات برای حلّ مسائل ساده و غالباً یک بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مسائل پیچیده و عملی که دو یا سه بعدی می‌باشد، به تکنیک‌های مربوط به روش‌های عددی روی آورده می‌شود.

[1] Particle Tracking
[2] Ogata
[3] Marsily

۱-۴-۲- روش‌های عددی

همان‌طور که پیشتر عنوان شد، روش‌های عددی در قالب دو تکنیک تفاضل محدود و اجزای محدود بررسی می‌شود.

۱-۴-۲-۱- تفاضل محدود

در فصل دوم تکنیک‌های تفاضل محدود در قالب سه دسته کلّی اولری، لاگرانژی و اولری- لاگرانژی معرّفی شده و خصوصیّات، مزایا و معایب و دامنه کاربرد هر کدام بیان شده است. روش اولری بیشتر برای مسائل انتشار و واکنش مناسب بوده و در حالت همرفت دارای خطا می‌باشد. امّا در این حالت روش لاگرانژی مطلوب می‌باشد. در روش سوم سعی شده است تا با ترکیب دو روش اولری و لاگرانژی مسائلی که همه فرآیندها هم زمان با هم انجام می‌شود، قابل حل شده و خطاهای ناشی از تقریب به حدّاقل برسد. امّا حل با استفاده از این روش دشواری‌هایی را در محاسبات در پی دارد. همچنین در این فصل روش‌های تفاضل محدود استاندارد، TVD[1] که نوعی روش لاگرانژی است. به علاوه روش اولری-لاگرانژی به تفصیل بیان شده و معادلات مربوط به آن آورده شده است.

۱-۴-۲-۲- اجزای محدود

سه نوع تحلیل در نرم افزار CTRAN/W قابل استفاده می‌باشد که در فصل چهارم معرّفی گردیده است.

۱-۵- فصول مختلف پایان‌نامه

در فصل اوّل کلیّاتی درباره هدف و ضرورت بررسی انتقال و انتشار آلودگی در خاک بیان و انواع روش‌های کاربردی معرّفی شده است.

در فصل دوم مفهوم پدیده‌های انتقال و انتشار و معادلات حاکم مربوط به آن بیان شده است. همچنین انواع روش‌های عددی شرح داده و معادلات آن‌ها، مزایا و معایب و دامنه کاربرد آن‌ها ارائه گردیده است.

[1] Total Variation Diminishing

در فصل سوم به تحقیقات قبلی و مطالعات و پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام گرفته پرداخته شده و نتایج و ویژگی‌های آن‌ها با هم مقایسه شده است.

در فصل چهارم نرم افزار CTRAN/W معرّفی شده است. همچنین مسئله نمونه ای در رابطه با انتقال و انتشار آلودگی در خاک با استفاده از آن حل شده و مقایسه ای میان نتایج حاصل از حلّ عددی با حلّ تحلیلی آن انجام گرفته است. سپس در قالب چند تحلیل، آثار تغییرات پارامترهای فیزیکی خاک بر روند گسترش آلودگی بررسی گردیده است.

در فصل پنجم درباره نتایج به دست آمده از تحقیق و پیشنهادات کاربردی جهت انجام مطالعات و پژوهش‌های آتی مطرح گردیده است.

فصل دوم: معادلات حاکم بر انتقال و انتشار آلاینده‌ها

۲-۱- مقدّمه

در مسائل مربوط به انتقال[1] و انتشار[2] که در آن با حرکت و جریان آب و محلول‌های آن و یا سیّالات دیگر در محیطی متخلخل مانند خاک روبه رو هستیم، نیاز به شناخت خصوصیّات فیزیکی و شیمیایی این مواد وجود دارد. خاک که خود از پیچیده‌ترین ساختارهای طبیعیست و در وضعیّت‌های مختلف و وجود جریان سیّال‌های مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد که عامل بروز پیچیدگی‌ها و مسائل گوناگونی می‌باشد. همچنین سیّالات جاری در این محیط مانند آب و محلول‌های آن و انواع آلاینده‌ها در ابعاد گوناگونی قابل بررسی هستند. با شناخت معادلات حاکم بر مسائل انتقال و انتشار و کاربرد عبارات و اجزای تشکیل دهنده آن، می‌توان روند گسترش آلاینده‌ها در بستر خاک و جریان‌های آب زیرزمینی و فعل و انفعالاتی که این مواد با هم دارند را تخمین زد و اثرات سوء آن را کاهش داد. همچنین در شرایطی که دسترسی به تمام خصوصیّات فیزیکی محیط و آلاینده‌ها به خصوص در صحرا امکان‌پذیر نمی‌باشد، یا مسئله پیچیدگی‌های زیادی برای حل دارد، می‌توان از مدل‌سازی عددی و روش‌های تقریبی قابل قبول برای بهینه‌سازی روند حل استفاده کرد.

در بخش دوم مفاهیم انتقال و انتشار آلودگی شرح داده شده و فرآیندهای انتقال معرّفی گردیده‌اند. در بخش سوم معادلات حاکم بر انتقال در حالت‌های مختلف و شرحی بر انواع فرآیندهای مربوطه و روابط آن‌ها و انواع شرایط اوّلیّه و مرزی ارائه گردیده است. در بخش آخر نیز چند روش عددی کاربردی با شرح مزایا و معایب آن‌ها معرّفی شده‌اند.

۲-۲- فرآیندهای انتقال آلودگی

عوامل حاکم بر حرکت آلاینده‌ها در فرآیندهای انتقال[3] و زوال[4] مشاهده می‌شود. فرآیندهای مربوط به انتقال را می‌توان به صورت ریاضی به کمک معادلاتی که بر مبنای قوانین جریان قرار دارند، نشان داد. این معادلات می‌تواند

[1] Transport
[2] Dispersion
[3] Transport Processes
[4] Attenuation Processes

در یک تعادل جرمی با فرآیندهایی که سبب زوال می‌شود، ترکیب شود. این روش، معادله دیفرانسیل عمومی حاکم بر حرکت آلودگی را به دست می‌دهد.

۲-۲-۱- فرآیندهای انتقال

دو فرآیند اساسی انتقال، همرفت[1] و انتشار[2] می‌باشند. همرفت، حرکت آلودگی به همراه آب جاری می‌باشد. انتشار، ظهور آلودگی مخلوط و در حال گسترش درون جریان می‌باشد. فرآیندهای انتقال همرفت و انتشار می‌تواند با مشاهده جریان پایدار آب در لوله طویل محتوی ماسه نمایش داده شود (مطابق شکل ۲-۱).

تزریق گلوله‌ای از آلودگی جرمی در لوله درنظر گرفته شود. جرم در طول لوله با سرعت ثابت v جریان پیدا می‌کند. این فرآیند انتقالی همرفت نامیده می‌شود. همان‌طور که جرم در طول آب جاری حرکت می‌کند، گسترش نیز می‌یابد. در نتیجه کاهش غلظت آلاینده در طول زمان، آلودگی جرمی طول فزاینده بیشتری از لوله را اشغال می‌کند. گسترش آلودگی انتشار نامیده می‌شود.

شکل ۲-۲ فرآیند انتقال در حین تزریق آلودگی جرمی در لوله را نشان می‌دهد. در چند نقطه در لوله در آن سوی محلّ شلیک، آلودگی در ابتدا با غلظت پایین ظهور کرده و به صورت تدریجی افزایش یافته تا به غلظت کامل برسد. اگر تنها فرآیند جابه‌جایی در نظر گرفته شود، آلودگی می‌تواند در چند نقطه در لوله به صورت یک پلاگ با غلظت کامل برسد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در اثر انتشار، غلظت کامل در زمان دیرتری نسبت به ظهور اوّلیّه آلودگی منتشر شده به دست می‌آید.

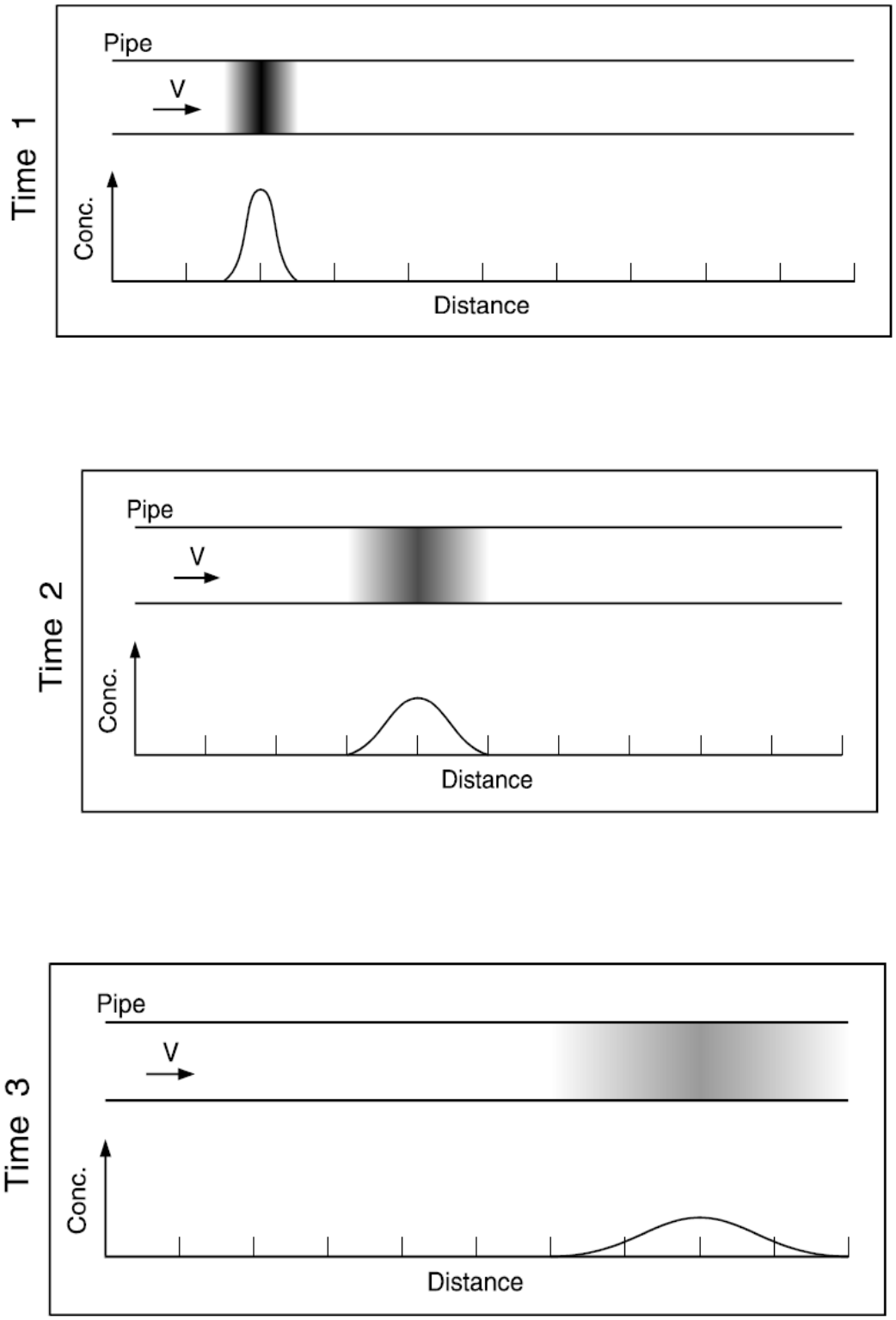
از دیدگاه تئوری، زمان رسیدن به پلاگ جریان با زمانی که ۵۰٪ غلظت حاصل می‌شود، مطابقت دارد. به دلیل افزایش فاصله از نقطه شلیک، تفاوت زمانی میان ورود اوّلین توده منتشر شده آلودگی و ورود اوّلین پلاگ جریان فاصله از محلّ شلیک افزایش می‌یابد.

[1] Advection
[2] Dispersion

درحالی که فرآیند جابه‌جایی به سادگی در نتیجه جریان آب حرکت می‌کند، فرآیند انتشار شامل دو قسمت می‌شود. یکی پدیده «اختلاط» و دیگری پخش مولکولی[1] می‌باشد.

اختلاط که گاهی انتشار مکانیکی[2] نامیده می‌شود، در اثر تغییرات سرعت در محیط متخلخل رشد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، تغییرات سرعت در مقیاس میکروسکوپی می‌تواند رخ دهد که به ایجاد اصطکاک در میان ذرّات خاک و سیّال منجر می‌شود که سبب ایجاد انحنا در مسیر جریان می‌شود. این تغییرات سرعت، تغییرات غلظت را در پی دارد. زمانی که تغییرات غلظت به‌طور میانگین بیش از حجم داده شده است، مشاهده می‌شود که آلودگی منتشر شده است.

[1] Molecular Diffusion
[2] Mechanical Dispersion



شکل ۲-۱) حرکت و گسترش گلوله آلودگی در یک سیّال جاری با سرعت V؛ کران (۲۰۰۴)[1]

[1] Krahn (2004)