

الله أكبر
الله أكبر
الله أكبر

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست جداول
یازده	فهرست شکل ها
۱	چکیده
۲	فصل اول مقدمه و بررسی منابع
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ مدیریت محیط زیست
۴	۳-۱ مدل های اختلاط در رودخانه ها
۴	۱-۳-۱ فرآیند انتقال
۴	۲-۳-۱ فرآیند پخش مولکولی
۵	۳-۳-۱ معادلات فرآیند پخش مولکولی
۸	۴-۳-۱ نقش میانگین گیری در جریان های آشفته
۹	۴-۱ انتقال ماده حل شده در جریان های آشفته
۹	۱-۴-۱ روش میانگین گیری رینولدز
۱۱	۲-۴-۱ مدل پخش فیکس
۱۳	۵-۱ ساده سازی معادله انتقال-پخش برای مسائل اختلاط
۱۵	۱-۵-۱ روش میانگین گیری روی عمق
۱۹	۲-۵-۱ روش میانگین گیری روی سطح مقطع
۲۰	۶-۱ ضرایب انتشار و اختلاط
۲۱	۱-۶-۱ ضریب انتشار طولی
۲۲	۲-۶-۱ ضریب اختلاط عمودی
۲۳	۳-۶-۱ ضریب اختلاط عرضی
۲۷	۴-۶-۱ طول اختلاط کامل
۲۷	۵-۶-۱ آنالیز آبعادی
۲۸	۷-۱ شکل بستر
۳۰	۱-۷-۱ انواع اشکال بستر
۳۰	۲-۷-۱ شکل گیری تلماسه ها
۳۲	۳-۷-۱ ابعاد تلماسه ها
۳۳	۴-۷-۱ ساختار جریان روی تلماسه
۳۴	۸-۱ پوشش گیاهی
۳۵	۹-۱ توزیع سرعت
۳۶	۱۰-۱ سرعت برشی
۳۷	۱۱-۱ بررسی منابع
۴۶	۱۲-۱ اهداف تحقیق
۴۸	فصل دوم مواد و روش های آزمایشگاهی
۴۸	۱-۲ تجهیزات آزمایشگاهی
۴۸	۱-۱-۲ کانال آزمایشگاهی
۵۰	۲-۱-۲ عمق سنج

۵۱	۳-۱-۲ سرعت سنج
۵۴	۴-۱-۲ دستگاه اندازه گیری غلظت
۵۴	۲-۲ مواد مورد استفاده
۵۸	۳-۲ شرایط انجام آزمایش
۶۰	فصل سوم نتایج و بحث
۶۱	۱-۳ بررسی توسعه یافتگی و تعادل جریان
۶۳	۲-۳ محاسبه سرعت برشی جریان
۶۳	۳-۳ ضریب اختلاط عرضی
۶۴	۳-۳ داده‌های هیدرولیکی
۶۴	۳-۳ ضریب اختلاط عرضی بدون حضور تلماسه و پوشش گیاهی
۶۹	۳-۳ ضریب اختلاط عرضی با حضور تلماسه و پوشش گیاهی
۸۲	۳-۳ طول اختلاط کامل
۸۲	۳-۳ تغییرات ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی
۸۳	۳-۳ اثر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی با وجود تلماسه و پوشش گیاهی
۸۹	۳-۳ ضریب اصطکاک
۹۱	۴-۳ بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ساختار جریان
۹۲	۳-۴-۱ سری اول
۹۸	۳-۴-۱ سری دوم
۱۰۶	فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۶	۱-۴ نتیجه گیری
۱۰۶	۴-۱-۱ ضریب اختلاط عرضی
۱۰۸	۴-۱-۲ بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ساختار جریان
۱۰۹	۴-۲ پیشنهادات
۱۱۰	منابع

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۱-۱ مسائل اختلاط و ترم‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی آن‌ها
۶۴	جدول ۱-۳ خلاصه‌ی داده‌های هیدرولیکی در چهار سری آزمایشات
۶۸	جدول ۲-۳ واریانس توزیع عرضی غلظت در فواصل طولی متفاوت
۶۹	جدول ۳-۳ خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مربوط به آزمون شاهد
۷۰	جدول ۴-۳ خلاصه‌ی داده‌های به دست آمده در بررسی تلماسه و پوشش گیاهی
۸۴	جدول ۵-۳ تأثیر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی در حضور تلماسه بدون پوشش گیاهی در دیواره‌ها
۸۴	جدول ۶-۳ تأثیر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی در حضور تلماسه و پوشش گیاهی در دیواره‌ها
۹۰	جدول ۷-۳ داده‌های منتشر شده پخشیدگی عرضی در کانال‌های مستطیلی

فهرست شکل ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۶	شکل ۱-۱ حجم کنترل برای تعیین معادله پخش
۲۳	شکل ۲-۱ نمایی از اختلاط عمودی [۲۵]
۲۳	شکل ۳-۱ نمایی از اختلاط عرضی [۲۵]
۲۶	شکل ۴-۱ نمایش شیب واریانس توزیع غلظت
۲۶	شکل ۵-۱ نمای شماتیک عوامل مؤثر بر اختلاط عرضی در یک کانال طبیعی [۴۰]
۳۲	شکل ۶-۱ (a) انواع شکل بستر (b) شکل بستر متحرک [۲۵]
۳۴	شکل ۷-۱ ساختار لایه مرزی روی یک تلماسه [۵۷]
۳۸	شکل ۸-۱ اختلاط و پخشیدگی ردیاب در رودخانه [۳۵]
۴۹	شکل ۱-۲ نمایی از لوله ورودی
۴۹	شکل ۲-۲ دریچه انتهایی
۵۰	شکل ۳-۲ دبی سنج توربینی
۵۰	شکل ۴-۲ عمق سنج با دقت ۰/۰۱ سانتی متر
۵۲	شکل ۵-۲ نمایی از فرستنده و گیرنده‌های دستگاه سرعت سنج
۵۲	شکل ۶-۲ محل قرارگیری حجم نمونه برداری از فرستنده مرکزی
۵۴	شکل ۷-۲ دستگاه مختصات اندازه گیری سرعت در جهات مختلف نسبت به دستگاه ADV
۵۵	شکل ۸-۲ شن مورد استفاده
۵۷	شکل ۹-۲ سیستم تزریق ردیاب
۵۷	شکل ۱۰-۲ ابعاد هندسی تلماسه ساخته شده
۵۸	شکل ۱۱-۲ نمایی از آزمایشات سری دوم
۶۱	شکل ۱-۳ نیمرخ‌های بدون بعد سرعت در فواصل مختلف از ورودی کانال بر وجه بالادست تلماسه
۶۲	شکل ۲-۳ نیمرخ‌های بی بعد تنش رینولدز در مقاطع مختلف بر وجه بالادست تلماسه
۶۲	شکل ۳-۳ نیمرخ‌های بی بعد شدت آشفتگی بر وجه بالادست تلماسه (a) راستای جانبی (b) راستای جریان (c) راستای عمود بر جریان
۶۳	شکل ۴-۳ تغییرات تنش برشی رینولدز نسبت به عمق در وجه بالادست تلماسه
۶۵	شکل ۵-۳ شبکه‌ی مورد استفاده برای برداشت نمونه‌های غلظت در هر مقطع
۶۵	شکل ۶-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله دو متری از محل تزریق روی بستر صاف
۶۶	شکل ۷-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله سه متری از محل تزریق روی بستر صاف
۶۶	شکل ۸-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله چهار متری از محل تزریق روی بستر صاف
۶۶	شکل ۹-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله پنج متری از محل تزریق روی بستر صاف
۶۷	شکل ۱۰-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله شش متری از محل تزریق روی بستر صاف
۶۷	شکل ۱۱-۳ نیمرخ غلظت در عمق میانی جریان روی بستر صاف در مقاطع مختلف در راستای طولی کانال
۶۸	شکل ۱۲-۳ تعیین شیب واریانس توزیع غلظت روی بستر صاف
۷۰	شکل ۱۳-۳ نیمرخ عمودی سرعت در حالت بستر صاف و تلماسه با دو ارتفاع تاج ۴ و ۸ سانتی متر
۷۲	شکل ۱۴-۳ توزیع تنش رینولدز روی بستر صاف و تلماسه بدون پوشش گیاهی با دو ارتفاع تاج ۴ و ۸ سانتی متر
۷۳	شکل ۱۵-۳ توزیع شدت آشفتگی بر بستر صاف و وجه بالادست تلماسه بدون پوشش گیاهی با دو ارتفاع تاج ۴ و ۸ سانتی متر (a) راستای جریان (b) راستای عرضی (c) راستای عمودی
۷۳	شکل ۱۶-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در دو متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی متر
۷۴	شکل ۱۷-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در سه متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی متر
۷۴	شکل ۱۸-۳ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در چهار متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی متر

- شکل ۳-۱۹ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در پنج متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۷۴
- شکل ۳-۲۰ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در شش متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۷۵
- شکل ۳-۲۱ نیمرخ عرضی غلظت در عمق میانی در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر در مقاطع مختلف در راستای طولی کانال ۷۵
- شکل ۳-۲۲ مقایسه ضریب اختلاط عرضی در چهار سری آزمایش انجام شده ۷۶
- شکل ۳-۲۳ نیمرخ سرعت عمودی در بستر صاف و تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی ۷۷
- شکل ۳-۲۴ توزیع تنش رینولدز روی بستر صاف و تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی ۷۸
- شکل ۳-۲۵ توزیع بی‌بعد شدت آشفتگی بر بستر صاف و وجه بالادست تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی (a) راستای جریان (b) راستای عرضی (c) راستای عمودی ۷۹
- شکل ۳-۲۶ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در دو متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی با تاج ۸ سانتی‌متر ۸۰
- شکل ۳-۲۷ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در سه متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی با تاج ۸ سانتی‌متر ۸۰
- شکل ۳-۲۸ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در فاصله چهارمتری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۸۰
- شکل ۳-۲۹ نیمرخ‌های غلظت در سه تراز عمقی در پنج متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی با تاج ۸ سانتی‌متر ۸۱
- شکل ۳-۳۰ نیمرخ غلظت در سه تراز عمقی در شش متری محل تزریق در وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی با تاج ۸ سانتی‌متر ۸۱
- شکل ۳-۳۱ نیمرخ غلظت در عمق میانی جریان بر وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی با تاج ۸ سانتی‌متر در مقاطع مختلف در راستای طولی کانال ۸۲
- شکل ۳-۳۲ تغییرات طول اختلاط کامل برای چهار سری آزمایش ۸۳
- شکل ۳-۳۳ مقایسه ضریب بی‌بعد اختلاط عرضی در چهار سری آزمایش ۸۳
- شکل ۳-۳۴ تغییرات ضریب اختلاط عرضی روی وجه بالادست تلماسه در اثر تغییر عمق جریان ۸۵
- شکل ۳-۳۵ تغییرات ضریب اختلاط عرضی در اثر برهم‌کنش شکل بستر و پوشش گیاهی و تغییر عمق ۸۵
- شکل ۳-۳۶ نمونه‌ای از نیمرخ سرعت عمودی در سه عمق جریان ۸۶
- شکل ۳-۳۷ توزیع بی‌بعد تنش رینولدز روی تلماسه در حضور پوشش گیاهی با تغییر عمق جریان ۸۷
- شکل ۳-۳۸ توزیع شدت آشفتگی بر وجه بالادست تلماسه و پوشش گیاهی بر دیواره کانال در سه عمق مختلف جریان (a) راستای جریان (b) راستای عرضی (c) راستای عمودی ۸۸
- شکل ۳-۳۹ مقایسه ضرایب اختلاط بدست آمده روی وجه بالادست تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی ۸۸
- شکل ۳-۴۰ مقایسه طول اختلاط کامل بر وجه بالادست تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی با اعماق مختلف جریان ۸۹
- شکل ۳-۴۱ نیمرخ‌های سرعت در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع ۸ سانتی‌متر ۹۳
- شکل ۳-۴۲ نیمرخ سرعت در راستای جریان (cm/s) (a) وجه پایین دست (b) بخش فرو رفته (محل رخداد سرعت منفی) (c) وجه بالادست تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۴
- شکل ۳-۴۳ منحنی‌های هم‌سرعت در راستای عمود بر جریان (cm/s) روی تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۴
- شکل ۳-۴۴ نیمرخ‌های تنش رینولدز $-\overline{u'w'}$ (cm²/s²) در طول تلماسه با ارتفاع ۸ سانتی‌متر ۹۵
- شکل ۳-۴۵ منحنی‌های هم تنش توزیع تنش رینولدز $-\overline{u'w'}$ (cm²/s²) روی تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۶
- شکل ۳-۴۶ توزیع تنش رینولدز τ_{uv} (cm²/s²) روی تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر به صورت منحنی‌های هم تنش ۹۶
- شکل ۳-۴۷ توزیع تنش رینولدز τ_{vw} (cm²/s²) روی تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر به صورت منحنی‌های هم تنش ۹۷
- شکل ۳-۴۸ توزیع نوسانات سرعت در راستای جریان (cm/s) u_{rms} در تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۷
- شکل ۳-۴۹ توزیع نوسانات سرعت در راستای عرضی (cm/s) v_{rms} در تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۸
- شکل ۳-۵۰ توزیع نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان (cm/s) w_{rms} در تلماسه با تاج ۸ سانتی‌متر ۹۸
- شکل ۳-۵۱ نیمرخ‌های سرعت (cm/s) در راستای جریان در طول تلماسه با ارتفاع تاج ۴ سانتی‌متر ۹۹
- شکل ۳-۵۲ نیمرخ سرعت (cm/s) در راستای جریان روی وجه پایین دست (a) در فاصله ۳ سانتی‌متر از تاج تلماسه (b) در فاصله ۸ سانتی‌متر از تاج تلماسه با ارتفاع ۴ سانتی‌متر ۱۰۰
- شکل ۳-۵۳ نیمرخ سرعت (cm/s) در راستای جریان روی وجه بالادست تلماسه با تاج ۴ سانتی‌متر ۱۰۰

- شکل ۳-۵۴ منحنی هم‌سرعت در راستای عمود بر جریان w (cm/s) در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۰
- شکل ۳-۵۵ نیمرخ‌های تنش برشی τ_{uw} (cm^2/s^2) روی تلماسه با ارتفاع ۴ سانتی متر ۱۰۱
- شکل ۳-۵۶ منحنی هم‌تنش توزیع تنش رینولدز τ_{uw} (cm^2/s^2) در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۲
- شکل ۳-۵۷ توزیع تنش رینولدز τ_{uv} (cm^2/s^2) به صورت منحنی هم‌تنش در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۲
- شکل ۳-۵۸ توزیع تنش رینولدز τ_{vw} (cm^2/s^2) به صورت منحنی‌های هم‌تنش در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۳
- شکل ۳-۵۹ توزیع نوسانات سرعت در راستای جریان u_{rms} (cm/s) در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۳
- شکل ۳-۶۰ توزیع نوسانات سرعت در راستای عرضی جریان v_{rms} (cm/s) در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۴
- شکل ۳-۶۱ توزیع نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان w_{rms} (cm/s) در تلماسه با تاج ۴ سانتی متر ۱۰۴

چکیده

به لحاظ اهمیتی که رودخانه‌ها در برآورد نیازهای بشری از دیرباز تاکنون داشته‌اند و روند رو به رشد آلودگی آب‌های سطحی، مطالعه در زمینه فرآیندهای اختلاط جهت استفاده مجدد از آب‌های آلوده برای مدیریت این منابع طبیعی حائز اهمیت می‌باشد. نظر به اهمیت شکل‌های بستر نظیر تلماسه‌ها در کنترل میزان انتقال رسوب، تولید توربولانس و مقاومت جریان و همچنین نقش پوشش گیاهی در انتقال جریان و جرم در رودخانه‌ها، کانال‌ها و تالاب‌ها، ضرورت مطالعه ضریب اختلاط آلاینده روی تلماسه‌ها و بررسی آن در اثر برهم کنش پوشش گیاهی و شکل‌های بستر بیش از پیش مطرح می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر بررسی ضریب اختلاط عرضی و همچنین بررسی ساختار جریان روی تلماسه‌ها در حضور پوشش گیاهی بر دیواره‌ها می‌باشد. به منظور بررسی ضریب اختلاط عرضی، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی تلماسه پنجم تا نهم در یک سری ده تایی از تلماسه‌های شنی دوبعدی مصنوعی در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی انجام گردید. این تلماسه‌ها دارای طول موج یک متر، دو ارتفاع تاج $0/04$ و $0/08$ متر، شیب وجه پایین دست 28 درجه و عرضی برابر عرض کانال بودند. شن مورد استفاده برای ساخت تلماسه‌ها دارای قطر متوسط 14 میلی‌متر بود. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی کناری رودخانه‌ها از ساقه برنج استفاده گردید. به منظور بررسی تأثیر نسبت ظرافت بر ضریب اختلاط عرضی روی تلماسه در دو حالت با و بدون پوشش گیاهی در کناره‌های کانال از پنج عمق مختلف استفاده شد. داده‌های غلظت توسط EC متر در پنج مقطع از فلوم در پایین دست محل تزریق برداشت شدند. در هر مقطع داده‌برداری 27 نمونه غلظت برداشت گردید. برای بررسی ساختار جریان در اثر تغییر ارتفاع تلماسه از تاج تلماسه به تاج تلماسه بعدی داده‌های سرعت در 14 مقطع برداشت شدند. نتایج نشان می‌دهد تلماسه‌ها در افزایش ضریب اختلاط عرضی نقش بسزایی دارند به گونه‌ای که این ضریب در حضور تلماسه‌ها $2/36$ برابر و با افزایش ارتفاع تاج تلماسه $3/19$ برابر در مقایسه با بستر صاف افزایش یافته است. با وجود افزایش ضریب اختلاط عرضی در اثر برهم کنش پوشش گیاهی و تلماسه در مقایسه با تلماسه بدون پوشش گیاهی، اثر پوشش گیاهی در افزایش این ضریب کمتر از اثر تلماسه می‌باشد. با توجه به ثابت بودن عرض کانال، در هر دو حالت بدون پوشش گیاهی و در حضور آن، با افزایش نسبت عرض به عمق طول ناحیه‌ای که جریان ثانویه رخ می‌دهد کاهش یافته و بنابراین ضریب اختلاط عرضی کاهش یافته است. در بررسی ساختار جریان، افزایش ارتفاع تاج تلماسه، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌دهد. مقدار ماکزیمم تنش با افزایش ارتفاع تاج تلماسه در فاصله دورتری از بستر اتفاق می‌افتد. ماکزیمم شدت آشفتگی در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر برابر $0/1$ متربرثانیه بالای ناحیه جدایی جریان در ناحیه برخاستگی اتفاق افتاده است. با کاهش ارتفاع تاج تلماسه ماکزیمم نوسانات سرعت کاهش یافته و برابر $0/0898$ متربرثانیه روی وجه بالادست می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضریب اختلاط عرضی، شکل بستر، ساختار جریان، پوشش گیاهی، نسبت ظرافت، جدایی جریان

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، مهندسی هیدرولیک به تحلیل‌ها و پیشگویی‌هایی در زمینه اختلاط مواد در آبراه‌ها پرداخته است ولی این تحلیل‌ها به اندازه کافی نبوده و نیاز به بررسی‌های بیشتر در زمینه‌های مختلف وجود دارد. آلاینده‌ها به مقدار زیادی به صورت عمدی یا غیر عمدی به چرخه هیدرولوژیک وارد می‌شوند. کیفیت آب در پایین دست به هیدرودینامیک انتقال و اختلاط و همچنین شیمی و بیولوژی سیستم‌های آبراه‌های طبیعی بستگی دارد. هیدروسفر همانند اتمسفر برای بشریت دارای اهمیت می‌باشد. آب و هوا به دلیل خاصیت متحرک بودن، عامل انتقال و پراکندگی بسیاری از عناصر ضروری مورد استفاده در زندگی انسان هستند. اگر این سیالات بی‌حرکت بودند، انسان‌ها به سرعت در سیل پساب‌های تولید شده به دست خودشان، غرق می‌شدند. آن‌ها همچنین در مدیریت محیط زیست، مانند مدیریت دفع پسماندها، نقش اساسی ایفا می‌کنند [۳۵].

۱-۲ مدیریت محیط زیست

فرآیند اختلاط هیدرولوژیکی، کوچکترین قسمت فرآیند کلی مدیریت محیط زیست است. سیستم کنترل محیطی خوب، باید ترکیبی از فرآیندهای الف) کنترل منبع آلودگی (اغلب درمان اولیه سیستم‌های مجاری پساب نامیده می‌شود)، ب) تصفیه پساب‌ها و ج) چگونگی پراکندگی در محیط باشد. یک مهندس هیدرولیک باید توجه خاصی به تأثیر فعالیت‌های انسان بر آب، پساب و به‌طور کلی محیط زیست

داشته باشد. در طی سال‌های گذشته مهندسان هیدرولیک مسئولیت تأمین آب از منابع طبیعی را بر عهده داشته‌اند، اما امروزه به همان میزان باید تلاش کنند تا کمبود مقدار آب موجود را مرتفع کرده و کاهش کیفیت آب این منابع را به حداقل مقدار برسانند [۲۸].

فرآیندهای هیدرولوژیکی و فیزیکی جریان در رودخانه‌ها، باعث انتقال و اختلاط مواد آلاینده و یا تبادل این آلاینده‌ها با واسطه‌های دیگر می‌شوند. برخی از این فرآیندها و واژه‌ها عبارتند از [۲۵، ۳۵]:
انتقال^۱: جابجایی بواسطه حرکت معمولی سیال انتقال نامیده می‌شود که شامل حرکت توده‌ای سیال بواسطه تغییر درجه حرارت و یا دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن است.
همرفت^۲: انتقال عمود بر راستای جریان که القاء شده توسط ناپایداری‌های هیدرواستاتیکی است را همرفت گویند.

پخش^۳: به موجب چنین فرآیندی ذرات مایعات، گازها و جامدات باهم مخلوط شده به طوریکه این مخلوط شدن حاصل حرکت طبیعی خود ذرات باشد و برای ذرات حل شده، فرآیندی است که ذرات از نقطه‌ای با غلظت زیاد به سمت نقطه‌ای با غلظت کم حرکت کرده و باهم مخلوط شوند.
ضریب پخش^۴: مقداری از یک ماده که هنگام پخش شدن از یک منطقه به منطقه دیگر، در واحد زمان از سطح مقطع واحد عبور کند را ضریب پخش نامند. بعد ضریب پخش L^2/T می‌باشد.
پخش مولکولی^۵: پراکندگی ذرات بواسطه حرکت بی‌نظم مولکول‌ها پخشیدگی مولکولی نامیده می‌شود.

پخش آشفته^۶: پراکندگی تصادفی ذرات بواسطه حرکت‌های متلاطم جریان پخش آشفته نامیده می‌شود.
جریان برشی^۷: جریان برشی، تغییرات گرادیان سرعت در راستای عمود بر جریان می‌باشد. جریان برشی ممکن است ناشی از تغییرات سرعت هم از لحاظ مقدار و هم از لحاظ جهت بردار سرعت با عمق باشد.
انتشار^۸: انتشار به پراکندگی طولی ذرات یا توده آلاینده تحت تأثیر متقابل فرآیند جریان برشی و فرآیند پخش گفته می‌شود.

اختلاط^۹: بواسطه چنین فرآیندی آلاینده‌ها توسط فرآیند پخش و فرآیند انتشار به طور کاملاً یکنواخت باهم مخلوط می‌شوند.

¹ Advection

² Convection

³ Diffusion

⁴ Diffusion coefficient

⁵ Molecular diffusion

⁶ Turbulent diffusion

⁷ Shear flow

⁸ Dispersion

⁹ Mixing

جریان آشفته^۱: در جریان آشفته ذرات سیال در مسیرهای بسیار نامنظم حرکت کرده و باعث تبادل مومتم از یک قسمت به قسمت دیگر می شود.

۳-۱ مدل های اختلاط در رودخانه ها

حرکت آلاینده در رودخانه ها (از مکان تزریق آلاینده) تحت تأثیر دو فرآیند زیر می باشد:
- فرآیند انتقال که تحت تأثیر آن، آلاینده توسط جریان از مکان تزریق به نقطه پایین دست منتقل می شود.

- فرآیند پخش، که به واسطه آن آلاینده در جهات مختلف پراکنده می شود.

۱-۳-۱ فرآیند انتقال

به حرکت آلاینده در راستای جریان، بدون هیچ گونه تغییر در جرم آن انتقال می گویند. مقدار آلاینده انتقال یافته در واحد زمان و از واحد سطح (عمود بر راستای جریان) را شار انتقال می نامند و از حاصلضرب سرعت در راستای جریان در غلظت آلاینده به دست می آید. با در نظر گرفتن یک المان کوچک از سیال که در راستای x حرکت می کند، می توان نوشت:

$$I_x = u_x c \quad (1-1)$$

I_x شار انتقال در راستای جریان و وابسته به زمان و مکان $I_x(x, y, z, t)$ ، u_x سرعت در راستای جریان و c غلظت ردیاب می باشد. اگر از فرآیند پخش مولکولی چشم پوشی شود، فرآیند انتقال با سرعت ثابت به سمت پایین دست حرکت کرده، بدون آنکه دستخوش تغییری در مسیر حرکت و پراکندگی ذرات آن شود [۹].

۲-۳-۱ فرآیند پخش مولکولی

پخش مولکولی در آب ساکن: اگر آلاینده در نقطه ای دور از مرزهای جریان به درون سیال راکد تزریق شود، در سه جهت سیستم مختصات به طور یکسان پخش می شود. این پخش که ناشی از حرکت دائمی و تصادفی مولکول های سیال است، پخش مولکولی نامیده می شود. طبق فرضیه فیک (۱۸۵۵)، نرخ خالص انتقال آلاینده وارد شده به سیال از یک منطقه با غلظت زیاد به منطقه ای با غلظت کم، با گرادیان غلظت بین دو نقطه متناسب است. این فرضیه، به قانون اول فیک معروف است. قانون اول فیک در یک سیستم مختصات یک بعدی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$J_x = -e_m \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2-1)$$

¹ Turbulent flow

شار پخش مولکولی^۱ در راستای جریان (نرخ انتقال آلاینده در راستای جریان و از واحد سطح توسط فرآیند مولکولی، شار پخش مولکولی نامیده می‌شود)، c غلظت ردیاب، e_m ضریب پخش مولکولی و $\frac{\partial c}{\partial x}$ گرادیان غلظت ردیاب در راستای جریان است. علامت منفی در معادله ۱-۲ نشان دهنده پخش آلاینده از منطقه‌ای با غلظت زیاد به منطقه‌ای با غلظت کم است. ضریب پخش مولکولی یک خاصیت از سیال است و مقدار آن در درجه حرارت و غلظت مشخص سیال ثابت است و به صورت تجربی تعیین می‌گردد.

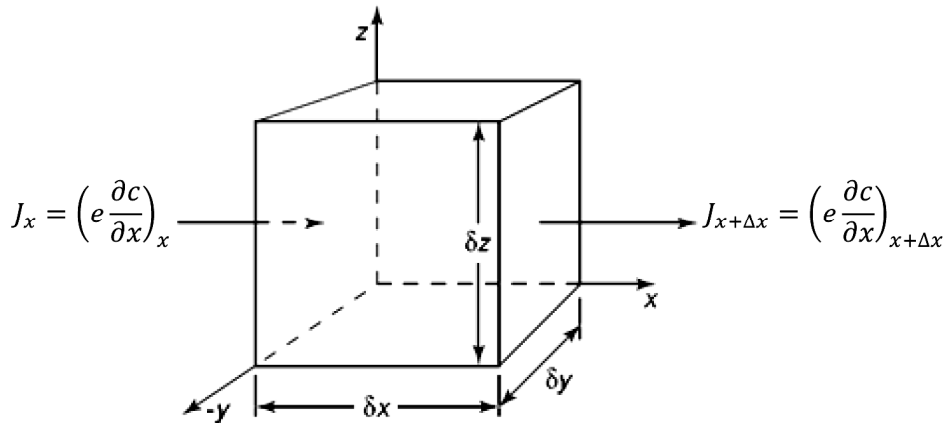
فرآیند پخش مولکولی در جریان آرام: برای تعیین معادله‌های مربوط به پخش و انتشار، از یک سیستم لاگرانژی استفاده می‌شود. مرکز مختصات در مرکز توده آلاینده قرار گرفته و به همراه آلاینده به سمت پایین دست حرکت می‌کند. در مقابل، برای تعیین معادلات مربوط به فرآیند انتقال از یک سیستم مختصات اویلری استفاده می‌شود. در این سیستم، مرکز مختصات در جای خود ثابت بوده و با گذشت زمان، غلظت در نقطه پایین دست منبع آلاینده، ثابت باقی می‌ماند. مزیت سیستم مختصات لاگرانژی نسبت به سیستم مختصات اویلری این است که در آن، تنها تغییرات غلظت ناشی از فرآیندهای انتشار و پخش محاسبه شده و فرآیند انتقال، تأثیری روی نتایج آن ندارد. به منظور بررسی تغییرات غلظت آلاینده لازم است که تأثیر فرآیندهای انتقال و پخش مولکولی با در نظر گرفتن فرض جمع‌پذیری و مستقل بودن این دو فرآیند، با یکدیگر ترکیب شوند. بنابراین یک سیستم مختصات لاگرانژی که مرکز مختصات آن با سرعتی برابر با سرعت میانگین سیال حرکت می‌کند، اختیار می‌شود. در این سیستم دو فرض اساسی در نظر گرفته می‌شود: اول اینکه فرآیند پخش مولکولی در یک سیال ایستا رخ می‌دهد و دوم شار پخش، از حاصلضرب گرادیان غلظت در ضریب پخش مولکولی بدست می‌آید. این گرادیان غلظت در یک سیستم مختصات لاگرانژی که با سرعت میانگین حرکت می‌کند، اندازه‌گیری شده است. با این فرضیات، معادلات حاکم بر غلظت آلاینده بر اساس قانون بقای جرم به دست می‌آیند [۹].

۱-۳-۳ معادلات فرآیند پخش مولکولی

تعیین معادله سه بعدی پخش فیکس در سیستم مختصات کارتزین

برای تعیین معادله سه بعدی پخش فیکس، یک سیستم مختصات کارتزین با محورهای x ، y و z در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که یک المان مستطیلی کوچک از سیال با سرعت میانگین در این سیستم مختصات در حال حرکت است [۹].

¹ Molecular diffusive flux



شکل ۱-۱ حجم کنترل برای تعیین معادله پخش

به منظور تعیین معادله پخش فیکسی با توجه به حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۱-۱، تغییر در جرم ردیاب حل شده در این حجم کنترل در زمان به وسیله قانون بقای جرم به صورت زیر است:

$$\frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} = (J_x - J_{x+\Delta x})\Delta y\Delta z + (J_y - J_{y+\Delta y})\Delta x\Delta z + (J_z - J_{z+\Delta z})\Delta x\Delta y \quad (۳-۱)$$

$M_{t+\Delta t}$ و M_t جرم ردیاب عبوری از المان در زمان‌های t و $t + \Delta t$ ، J_x ، J_y و J_z شار پخش (که روی فاصله زمانی Δt میانگین گرفته شده) که بواسطه حرکت مرزها در نقطه x ، y و z وارد المان می شوند. $J_{y+\Delta y}$ ، $J_{x+\Delta x}$ و $J_{z+\Delta z}$ شار پخش (که روی فاصله زمانی Δt میانگین گرفته شده) که بواسطه حرکت مرزها در نقطه $x+\Delta x$ ، $y+\Delta y$ و $z+\Delta z$ وارد المان می شوند. با استفاده از بسط سری تیلور رابطه ۴-۱ و صرف نظر کردن از ترم‌های مرتبه دوم به بالا معادله ۵-۱ به دست می آید:

$$f(x) = f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0} \delta x \quad (۴-۱)$$

$$M_{t+\Delta t} = M_t + \left(\frac{DM}{Dt} \right)_t \Delta t \quad (۵-۱)$$

عملگر مادی $\left(\frac{D}{Dt} \right)^1$ بیان کننده نرخ تغییرات با زمان در یک سیستم لاگرانژی است در صورتی که

این سیستم با سرعت میانگین حرکت کند [۱]. مقدار جرم آلاینده درون المان در زمان t برابر است با:

$$M_t = c_i \Delta x \Delta y \Delta z \quad (۶-۱)$$

c_i میانگین غلظت آلاینده درون المان در زمان t است. در نتیجه معادله ۵-۱ را می توان به صورت زیر

¹ Material operator

نوشت:

$$M_{t+\Delta t} - M_t = \left(\frac{Dc}{Dt} \right)_t \Delta x \Delta y \Delta z \quad (۷-۱)$$

بدلیل اینکه فرآیند پخش در یک سیستم کارترین تعریف شده است، لازم است گرادیان غلظت عبوری از هر یک از مرزهای این المان را با استفاده از عملگر اویلری^۱ بدست آورد.

$$\begin{bmatrix} J_{x+\Delta x} = J_x + \left(\frac{\partial J_x}{\partial x} \right) \Delta x \\ J_{y+\Delta y} = J_y + \left(\frac{\partial J_y}{\partial y} \right) \Delta y \\ J_{z+\Delta z} = J_z + \left(\frac{\partial J_z}{\partial z} \right) \Delta z \end{bmatrix} \quad (۸-۱)$$

این تقریب‌ها در صورتی معتبر هستند که Δt ، Δx ، Δy و Δz به سمت صفر میل کنند. مشکل اصلی در معادله‌های بالا این است که فرآیند پخش در یک سیستم مختصات لاگرانژی متحرک تعریف شده در صورتیکه فرآیند انتقال در یک سیستم اویلری ثابت تعریف می‌شود. برای حل این مشکل، شار پخش مولکولی بدست آمده در معادله ۱-۲ در معادله ۸-۱ جایگزین می‌شود.

$$\begin{bmatrix} (J_x - J_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial x} \left(e_m \frac{\partial c}{\partial x} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \\ (J_y - J_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z = \frac{\partial}{\partial y} \left(e_m \frac{\partial c}{\partial y} \right) \Delta y \Delta x \Delta z \\ (J_z - J_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y = \frac{\partial}{\partial z} \left(e_m \frac{\partial c}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \end{bmatrix} \quad (۹-۱)$$

با ترکیب معادلات و ساده‌سازی آن‌ها و همچنین با فرض اینکه e_m مستقل از x ، y و z می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$\frac{DC}{Dt} = e_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (۱۰-۱)$$

^۱ Eulerian operators

عملگر مادی^۱ $\left(\frac{D}{Dt}\right)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (11-1)$$

با بازنویسی معادله ۱-۱۰ معادله سه‌بعدی پخش فیزیکی در مختصات کارترین حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = e_m \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (12-1)$$

اگر سرعت در راستاهای مختلف، ضریب پخش مولکولی، شرایط اولیه و شرایط مرزی غلظت مشخص باشند می‌توان از معادله ۱-۱۲ برای پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی غلظت آلاینده استفاده نمود. به این معادله در جریان‌های آرام معادله انتقال-پخش نیز گفته می‌شود.

۴-۳-۱ نقش میانگین‌گیری در جریان‌های آشفته

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جریان آشفته نسبت به جریان آرام، سریعتر پخش شدن ردیاب است. میانگین‌گیری زمانی، مکانی و تجمعی^۲، سه نوع میانگین‌گیری مورد استفاده در پژوهش‌های جریان آشفته می‌باشند. با توجه به مشخص بودن میانگین‌گیری زمانی و مکانی، در زیر توضیحاتی در ارتباط با میانگین‌گیری تجمعی داده می‌شود. با فرض اینکه در یک آزمایش، مقدار جرم ردیاب تزریق شده مشخص باشد، در یک نقطه مشخص مانند (x_0, y_0, z_0) در پایین دست مکان تزریق و پس از گذشت زمان t_0 از تزریق، غلظت ردیاب اندازه‌گیری می‌شود. اگر این آزمایش در شرایط مشابه چندین بار تکرار شود و هر بار در همان نقطه (x_0, y_0, z_0) و پس از گذشت زمان t_0 اندازه‌گیری غلظت ردیاب تکرار شود به علت وجود جریان آشفته، غلظت‌های اندازه‌گیری شده با هم متفاوت هستند. می‌توان نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها را به صورت $c_i(x_0, y_0, z_0, t_0)$ نوشت که $i=1,2,3,\dots,N$ و N تعداد کل آزمایش‌ها است. با میانگین‌گیری روی همه آزمایش‌ها، یک تخمین از مقدار میانگین تجمعی از غلظت در نقطه (x_0, y_0, z_0) و پس از گذشت زمان t_0 از تزریق به دست می‌آید که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\langle c(x_0, y_0, z_0) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i(x_0, y_0, z_0, t_0) \quad (13-1)$$

¹ Material derivative

² Ensemble average

علامت $\langle \rangle$ معمولاً برای نشان دادن میانگین جمعی استفاده می‌شود. بنابراین میانگین جمعی روی نتایجی که از آزمایش‌های مستقل بدست آمده‌اند گرفته می‌شود و می‌توان از آن برای محاسبه غلظت، سرعت و حاصلضرب‌های آن‌ها استفاده کرد [۷۳].

۴-۱ انتقال ماده حل شده در جریان‌های آشفته

معادله سه‌بعدی انتقال-پخش در جریان آرام، در قسمت قبل به صورت زیر به دست آمد.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = e_m \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (۱۴-۱)$$

در مورد کاربرد و روش‌های حل معادله فوق در انتقال ماده حل شده در جریان آشفته، در ادامه بحث خواهد شد.

۱-۴-۱ روش میانگین‌گیری رینولدز

رینولدز پیشنهاد کرد که در جریان آشفته، سرعت‌ها و غلظت مشاهده‌ای را می‌توان به صورت زیر

نوشت:

$$\left[\begin{array}{l} u_x = \langle u_x \rangle + u'_x \\ u_y = \langle u_y \rangle + u'_y \\ u_z = \langle u_z \rangle + u'_z \\ c = \langle c \rangle + c' \end{array} \right] \quad (۱۵-۱)$$

که در آن‌ها u_x, u_y, u_z سرعت میانگین در راستای x, y و z ، c غلظت، $\langle \rangle$ علامت میانگین جمعی و علامت پریم نشان دهنده انحرافات از میانگین جمعی است که با توجه به تعریف، حاصل میانگین‌گیری جمعی از c', u'_x, u'_y و u'_z صفر خواهد شد. با جایگزینی مقادیر فوق در معادله ۱۲-۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle c \rangle + c') + (\langle u_x + u'_x \rangle) \frac{\partial}{\partial x} (\langle c \rangle + c') + (\langle u_y \rangle + u'_y) \frac{\partial}{\partial y} (\langle c \rangle + c') + (\langle c \rangle + c') = e_m \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\langle c \rangle + c') + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\langle c \rangle + c') + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\langle c \rangle + c') \right] \quad (۱۶-۱)$$

حال از معادله بالا میانگین جمعی گرفته می‌شود، باید توجه داشت که حاصل میانگین‌گیری جمعی

از عبارت‌های $\frac{\partial c'}{\partial t}, u'_x \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x}, \langle u_x \rangle \frac{\partial c'}{\partial x}, \frac{\partial^2 c'}{\partial x^2}$ برابر صفر خواهد شد. سمت چپ معادله شامل عبارت

$$u'_x \frac{\partial c'}{\partial x} + u'_y \frac{\partial c'}{\partial y} + u'_z \frac{\partial c'}{\partial z}$$

می‌باشد که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت

$$\frac{\partial}{\partial x}(u'_x c') + \frac{\partial}{\partial y}(u'_y c') + \frac{\partial}{\partial z}(u'_z c')$$

با توجه به اینکه جریان دائمی و غیرقابل تراکم است می توان رابطه زیر را نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \left[\langle u_x \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \langle u_y \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} + \langle u_z \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \right] = \\ e_m \left[\frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial z^2} \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x}(u'_x c') + \frac{\partial}{\partial y}(u'_y c') + \frac{\partial}{\partial z}(u'_z c') \right] \end{aligned} \quad (17-1)$$

عبارت [۱] در معادله فوق نرخ تغییرات میانگین تجمعی غلظت نسبت به زمان است. سه قسمت عبارت [۲]، میزان انتقال میانگین تجمعی غلظت توسط سرعت‌ها در جهت‌های مختلف است. سه قسمت عبارت [۳] پخش مولکولی است. مقایسه معادله ۱۴-۱ و ۱۷-۱ نشان می‌دهد که هفت ترم اول دو معادله از نظر ظاهری شبیه به هم هستند با این تفاوت که ترم‌های u_x ، u_y ، u_z و c در معادله ۱۴-۱ توسط ترم‌های $\langle u_x \rangle$ ، $\langle u_y \rangle$ ، $\langle u_z \rangle$ و $\langle c \rangle$ در معادله ۱۷-۱ جایگزین شده‌اند. تفاوت اساسی دو معادله، در سمت راست معادله و عبارت [۴] است که شامل سه عبارت جدید انتقال آشفته بصورت ذیل است:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \langle u'_x c' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle u'_y c' \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle u'_z c' \rangle$$

اگرچه حاصل میانگین‌گیری تجمعی از انحرافات سرعت و غلظت صفر است ولی در حالت کلی، حاصل میانگین‌گیری تجمعی از حاصلضرب آن‌ها صفر نیست. به بیان دیگر نوسانات سرعت و غلظت، در برخی از فرآیندها باهم همبستگی دارند و این همبستگی باعث به وجود آمدن عبارت انتقال می‌شود. این عبارت انتقال اضافی را پخش آشفته^۱ می‌نامند [۱۱].

پخش آشفته در رودخانه‌ها سبب می‌شود که ردیاب سریعتر از وقتی که تنها تحت تأثیر فرآیند پخش مولکولی بوده است، پراکنده شود. گرچه این بدان معنی نیست که فرآیند پخش مولکولی نقشی در اختلاط ایفا نمی‌کند بلکه فرآیند پخش همچنان فرآیند اساسی است که باعث پراکندگی و پخش آلاینده از منطقه‌ای با غلظت زیاد به منطقه‌ای با غلظت کم می‌شود. توربولانس تأثیر زیادی بر پراکنده شدن توده آلاینده دارد که به موجب آن گرادیان غلظت موضعی افزایش یافته و بر سرعت پخش مولکولی افزوده می‌شود. ترکیبی از پخش آشفته و پخش مولکولی باعث اختلاط سریعتر آلاینده در جریان آشفته می‌شود

¹ Turbulent diffusion

[۱۲]

برای ساده شدن محاسبات به جای میانگین گیری تجمعی می توان از میانگین گیری زمانی استفاده کرد. پس معادله را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \left[\bar{u}_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right] = e_m \left[\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'_x c') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{u}'_y c') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}'_z c') \right] \quad (۱۸-۱)$$

علامت بار نشان دهنده میانگین زمانی می باشد [۱۲].

۲-۴-۱ مدل پخش فیک

در مدل پخش فیک، واریانس توده غلظت آلاینده به صورت خطی با زمان افزایش می یابد. در توربولانس همگن، به شرط آنکه پس از تزریق ردیاب مدت زمان کافی در اختیار باشد، پخش آشفته را می توان با استفاده از قانون فیک مدل سازی کرد [۸۲]. با توجه به معادله ۱-۱۲ می توان نوشت:

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \left[\langle u_x \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \langle u_y \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} + \langle u_z \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \right] = (e_m + e_t) \left[\frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial z^2} \right] \quad (۱۹-۱)$$

e_t ضریب پخش آشفته^۱ که فرض می شود ایزوتروپیک و همگن باشد و e_m ضریب پخش مولکولی است. در واقعیت $e_t \gg e_m$ می باشد. با مقایسه دو معادله اخیر می توان نشان داد که:

$$\left[\begin{array}{l} e_t \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial x^2} = - \frac{\partial}{\partial x} \langle u'_x c' \rangle \\ e_t \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial y^2} = - \frac{\partial}{\partial y} \langle u'_y c' \rangle \\ e_t \frac{\partial^2 \langle c \rangle}{\partial z^2} = - \frac{\partial}{\partial z} \langle u'_z c' \rangle \end{array} \right] \quad (۲۰-۱)$$

در مقایسه با قانون اول فیک $\left(J_x = -e_m \frac{\partial c}{\partial x} \right)$ ، شار پخش آشفته برابر است با:

¹ Turbulent diffusion coefficient

$$\begin{cases} J_x = \langle u'_x c' \rangle = -e_t \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} \\ J_y = \langle u'_y c' \rangle = -e_t \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial y} \\ J_z = \langle u'_z c' \rangle = -e_t \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \end{cases} \quad (21-1)$$

مدل پخش فیکي برای پخش آشفته، معادله ۱-۱۹ و ۱-۲۱ می‌باشند. مدل فیکي در مسائل اختلاط ذرات، هنگامی که داده‌های اندازه‌گیری شده از توربولانس موجود نباشند مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای به دست آوردن معادله‌های توربولانس برای پخش آشفته، یک تخمین خوب فراهم می‌کند که با استفاده از آن می‌توان ضریب پخش آشفته را به خوبی تخمین زد. ضریب پخش آشفته و ضریب پخش مولکولی دو تفاوت عمده دارند. اول اینکه به عنوان یک تقریب، e_t در مرتبه 10^{-3} مترمربع بر ثانیه است در حالیکه e_m در مرتبه 10^{-9} مترمربع بر ثانیه قرار دارد. دوم اینکه ضریب پخش مولکولی یک خاصیت سیال می‌باشد در حالی که ضریب پخش آشفته یک خاصیت از جریان است و با تغییر سرعت، توربولانس و ویژگی‌های جریان تغییر می‌کند.

در به دست آوردن معادله ۱-۱۹ فرض شد که ضریب پخش آشفته ایزوتروپیک و همگن است. از این رو شار پخش در تمامی جهات با هم مساوی و برابر با حاصلضرب گرادیان غلظت در آن جهت و ضریب پخش است. در نتیجه اگر محورهای مختصات چرخانده شوند معادله پخش جدید با معادله پخش در سیستم مختصات قبلی تفاوتی ندارد. با توجه به اینکه ضریب پخش آشفته یک خاصیت جریان است پس با تغییر جهت امکان تغییر در آن ضریب وجود دارد. برای نمونه در یک رودخانه که نسبت عرض به عمق آن بزرگ است ضریب پخش عرضی بزرگتر از ضریب پخش عمقی است. بدین منظور به بیان مفهومی از معادله در محیط غیر ایزوتروپیک پرداخته می‌شود.

در یک کانال مستطیلی که محور x هم راستا با جریان، محور y در راستای عمق و محور z در راستای عرض کانال است فرض می‌شود که جریان ساکن و e_t غیر ایزوتروپیک و غیر یکنواخت و $e_t \gg e_m$ است. منطقی است که معادله ۱-۱۹ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \left[\frac{\partial}{\partial x}(u_x c) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y c) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z c) \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(e_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (22-1)$$

معادله ۱-۲۲ شکل بقاء^۱ یا معادله سه بعدی انتقال-پخش نامیده می شود. از طرفی معادله پیوستگی برای جریان غیر قابل تراکم به صورت زیر بیان می شود.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (23-1)$$

با بسط مشتقات مکانی در سمت چپ معادله ۱-۲۲ و با استفاده از معادله ۱-۲۳ معادله انتقال به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \left[u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(e_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(e_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (24-1)$$

اگر ضرایب پخش ثابت باشند، معادله فوق به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \left[u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] = e_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + e_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + e_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (25-1)$$

معادلات ۱-۲۲ تا ۱-۲۴ اساسی ترین معادلات در حل مسائل اختلاط هستند.

۵-۱ ساده سازی معادله انتقال-پخش برای مسائل اختلاط

معادله اساسی برای تحلیل مسائل اختلاط در رودخانه‌ها، معادله سه بعدی انتقال-پخش می باشد. از آنجایی که کاربرد این معادله به طور کامل، نیازمند داده‌های زیادی از جمله عمق، سرعت جریان و ضریب پخش در سه راستا می باشد و تعیین چنین داده‌هایی در طبیعت بسیار مشکل است حل معادله انتقال-پخش در کانال‌های طبیعی دشوار به نظر می رسد. در برخی از مسائل اختلاط، تعدادی از عبارت های معادله انتقال-پخش کوچک بوده و از آن‌ها صرف نظر می شود و معادله به شکل ساده تری خلاصه می گردد [۷۳]. منبع تزریق آلاینده به سه دسته منبع نقطه‌ای، منبع خطی عرضی و منبع خطی عمودی تقسیم می شود. تزریق آلاینده می تواند به دو صورت دائمی و لحظه‌ای باشد. محدوده جریان در فرآیند اختلاط به سه ناحیه تقسیم می شود: ناحیه نزدیک^۲، ناحیه میانی^۳ و ناحیه دور دست^۴. جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از مهم

^۱ Conservation form

^۲ Near field

^۳ Mid field

^۴ Far field