Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوم، شماره ۲، پاییز ۱۳۸۵
Volume 2, No. 2, Fall 2006 (IR-WRR)
۳۱-۳۸

شبیه‌سازی عددی پخش آلودگی در منابع آب سطحی

ابوالفضل شمسایی[۱]، عطاءاله نجفی جیلانی[۲]

چکیده

هدف از این تحقیق، دستیابی به روش مناسب برای تحلیل عددی مسئله توزیع آلودگی در آبهای سطحی است به نحوی که ضمن تأمین محدوده پایداری مناسب و حداقل خطای عددی، دقت نتایج افزایش یابد. در تحقیق حاضر، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود[۱] و استفاده از الگوهای گسسته سازی[۲] جدید، معادله دیفرانسیل جزئی حاکم بر پخش آلودگی در سیال در شرایط یک و دو بعدی تحلیل شده‌است. همچنین تأثیر اعداد بدون بعد شامل اعداد کورانت[۳] و پکلت[۴] در روند حل عددی و مقایسه روشهای مختلف تحلیل از حیث تأثیرپذیری از این پارامترها و همچنین تحلیل حساسیت نسبت به ابعاد شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نتایج بدست آمده و با مطالعه موردی تخلیه پساب گرم یک نیروگاه حرارتی ناشی از عملکرد سیستم خنک‌کننده آن در رودخانه مجاور، الگوی بهینه گسسته سازی در روش تفاضل محدود تعیین شده و انطباق خوبی بین نتایج حل عددی و اندازه‌گیری‌های میدانی ایجاد شده است.

کلمات کلیدی: مدلسازی عددی، انتشار، پخشیدگی، منابع آب سطحی.

Numerical Simulation of Pollutant Dispersion in Surface Water Resources

A. Shamsaii[1], *A. N. Jilani*[2]

Abstract

The main objective of this study is to develop a higher order numerical scheme to simulate the pollutant spreading in surface water resources. The new discretisation schemes in Finite Difference Method are presented in one and two dimensional domain to predict surface water quality. Moreover, the effect of dimensionless computational numbers on numerical processing and errors is investigated for several methods. The grid size sensitivity analysis is made based on numerical results which are obtained in several methods. A real case study is made for thermal pollutant released from cooling water outfall of a power plant into the adjacent river. The numerical results are compared with field measurements and a good agreement is obtained.

Keywords: Numerical modeling, Advection, Diffusion, Surface water resources.

۱. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۲. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

1- Professor of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
2- Ph.D. Student of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

بهره‌گیری از روش تفاضل محدود در تحلیل مسائل توزیع هر کمیت اسکالر همچون آلودگی حرارتی در محیط سیال، درصورت استفاده از الگوی مناسب منقطع سازی معادلات حاکم، ضمن کاهش بازه زمانی حل عددی و ایجاد شرایط پایداری کامل[۵]، منجر به افزایش دقت نتایج حاصله خواهد شد. تاکنون روشهای عددی تفاضل محدود و اجزای محدود[۶] در الگوهای متفاوتی برای تحلیل عددی توزیع آلودگی در منابع آب سطحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

Arnold et al. (1990) با استفاده از روش تفاضل محدود و منقطع سازی معادلات با الگوی مرتبه دوم، پخش آلودگی در سیال را در شرایط دوبعدی در سطح شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق روش مورد استفاده از حیث حساسیت به مشخصات شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. آنان نتیجه گرفتند که در زمانی که عامل انتقال ناشی از سرعت به عنوان عامل برتر و تعیین کننده در پخش آلودگی موثر باشد، روش عددی مورد استفاده حساسیت کمتری نسبت به ابعاد شبکه از خود نشان می دهد.

Trudgill and Ball (1995) با استفاده از روش تفاضل محدود و به کارگیری الگوی مرتبه دوم در محدوده داخلی میدان حل و مرتبه دوم اصلاح شده در نزدیکی مرزها، معادله حاکم بر پخش آلودگی در شرایط دوبعدی را مورد تحلیل عددی قرار داده اند. بر اساس این تحقیق درصورتی که مرزها به اندازه کافی دور از محدوده مورد مطالعه انتخاب شوند و با صرف زمان قابل توجه در تحلیل سیستم، نتایج از دقت مناسبی برخوردار خواهند بود.

Brian et al. (1998) با استفاده از روش تفاضل محدود و به کارگیری الگوی مرتبه دوم در شرایط دوبعدی در مقطع، شبیه سازی توزیع شوری برای جریان همگام[۷] را انجام داده اند. بر اساس نتایج این تحقیق که در تجزیه و تحلیل جریان عبوری از بازشوی ارتباطی میان گذر دریاچه بزرگ نمک[۸] در ایالات متحده آمریکا به کار گرفته شده، با رعایت محدودیت ابعاد شبکه‌بندی میدان حل، می‌توان نتایج مناسبی از روش عددی مورد بررسی به‌دست آورد.

آنچه که درمطالعه حاضر بررسی می‌شود، تعیین الگوهای منقطع سازی در روش عددی تفاضل محدود است به گونه ای که با مقایسه آنها، امکان ارائه الگوهای مناسبتری جهت شبیه‌سازی پخش آلودگی در آبهای سطحی در قالب این روش میسر گردد. قبل از بررسی الگوهای منقطع سازی به اختصار به بیان معادلـه کلـی حاکم بر مسئله پرداخته می‌شود.

معادله حاکم بر پدیده انتقال همرفت[۹] و انتشار[۱۰] هـر کمیـت اسکالر در محیط سیال به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{V} . \vec{\nabla} \phi = \vec{\nabla} (D. \vec{\nabla} \phi) + S \qquad (۱)$$

که درآن ϕ =کمیت اسکالر افزوده به محیط سیال، $\vec{V}$ بردار سرعت جریان به طوری که $\vec{V}$=(u, v, w) ، D = ضریب انتشار، t = زمان و S = جمله منبع یا مخزن[۱۱] است که می تواند چگونگی زوال و یا افزایش کمیت اسکالر را نشان دهد. بردار $\vec{\nabla}$ نیز عملگر گرادیان سه بعدی است.

برای یک کانال طولانی و با فرض عدم وجود کمیت آلاینده در سیال در شرایط اولیه، ثابت بودن سرعت و ضریب انتشار در امتداد طولی و وجود یک منبع تزریق کمیت اسکالر به سیال با مقدار ثابت در بالادست، حل تحلیلی معادله (۱) به صورت زیر خواهد بود :

(۲)

$$\phi(x, \quad t) = \frac{\phi_0}{2}\left[erfc(\frac{x-ut}{\sqrt{4Dt}}) + erfc(\frac{x+ut}{\sqrt{4Dt}}).\exp(\frac{ux}{D}) \right]$$

که در آن ϕ_0 = مقدار غلظت تزریقی در مرز بالادست، $\phi(x, t)$ = همین مقدار در نقطه‌ای به فاصله x از بالادست کانال و پس از گذشت زمان t ، $erfc$ مکمل تابع خطا و u مقدار عددی سرعت در راستای طولی است. در شرایط یک‌بعدی، نتایج به‌دست آمده از رابطه اخیر به‌عنوان مبنا در محاسبه مقادیر خطای روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی‌که با برقراری شرایط دوبعدی در سطح، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدانی در محیط سیال ملاک ارزیابی خطا در شیوه‌های مختلف حل عددی خواهد بود. رابطه اخیر تنها برای شرایط یک بعدی کاربرد داشته و در این تحقیق نیز در همین حالت برای تعیین خطای حل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر برای شرایط دوبعدی از نتایج اندازه گیری میدانی برای سنجش صحت نتایج حل عددی استفاده شده است.

۲- معرفی الگوهای منقطع سازی

به‌جهت امکان مقایسه الگوهای منقطع‌سازی در روش تفاضل محدود، ابتدا روابط حاکم بر هر روش به صورت کلی معرفی شده و پس از ارائه مبانی عددی، نتایج به کارگیری هریک در شرایط دو بعدی مورد بررسی قرارمی‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۱- روش مرتبه دوم همگام[۱۲] (QUICK)

در این روش، تخمین مقدار کمیت اسکالر ϕ در هر دیواره حجم کنترل با عبور دادن یک منحنی درجه دو انجام می شود به طوری که از سه نقطه اصلی مشخص کننده این منحنی، دو نقطه از سمت بالادست دیواره حجم کنترل و دیگری از سمت پایین دست آن انتخاب می‌گردد. به این ترتیب درتعیین کمیت آلودگی در دیواره سمت چپ حجم کنترل یعنی $\phi_\ell(i)$، نقاط ϕ_{i-2} ، ϕ_{i-1} و ϕ_i و در تعیین همین مقدار در دیواره سمت راست حجم کنترل یعنی $\phi_r(i)$ سه نقطه ϕ_{i-1} ،ϕ_i و ϕ_{i+1} دخالت خواهند داشت. این الگو در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این شکل LW بیانگر دیواره چپ و RW بیانگر دیواره راست حجم کنترل است و CV نیز محدوده حجم کنترل را نشان می‌دهد. تمامی این تعاریف برای حالت یک بعدی ارائه شده اند. با فرض عبور منحنی $\phi_{(x)} = ax^2 + bx + c$ و برقراری شرایط $\phi(2\Delta x) = \phi_i$ و $\phi(0) = \phi_{i-2}$ و $\phi(\Delta x) = \phi_{i-1}$ مقادیر ϕ در دیواره های حجم کنترل چنین به دست می‌آیند (Chiew and Peel, 2002):

$$\phi_\ell(i) = \frac{-1}{8}\phi_{i-2} + \frac{6}{8}\phi_{i-1} + \frac{3}{8}\phi_i \qquad (۳)$$

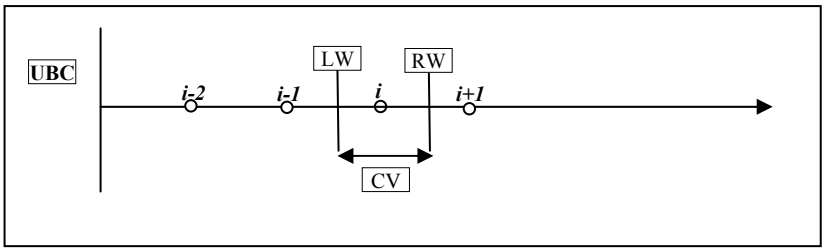
$$\phi_r(i) = \frac{-1}{8}\phi_{i-1} + \frac{6}{8}\phi_i + \frac{3}{8}\phi_{i+1} \qquad (۴)$$

تعیین مقدار کمیت اسکالر در دیواره‌های حجم کنترل در برگیرنده گره‌های محاسباتی مجاور مرزها با به کارگیری این روش نیاز به تعریف یک گره محاسباتی فرضی دارد که مقدار کمیت اسکالر دراین گره فرضی که قبل از مرز بالادست محدوده مطالعاتی قرار دارد، با عبور یک منحنی مرتبه دوم از نزدیکترین دو گره و مرز بالادست حاصل می‌گردد. شمایی از نقاط درگیر در تعیین کمیت آلاینده برای گره های محاسباتی نزدیک مرز در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل UBC نشانگر شرایط مرزی بالادست جریان، LW نشانگر دیواره چپ حجم کنترل و RW نشانگر دیواره راست آن است (Prosser, 2001).

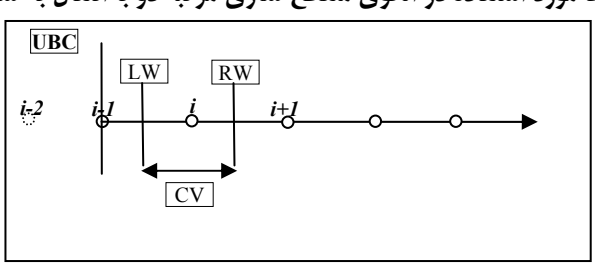
آنچه تاکنون بررسی شد، وضعیت یک بعدی مسئله در امتداد طولی رودخانه بود. حال به بررسی شرایطی می‌پردازیم که توزیع آلودگی در شرایط دائمی و در پلان رودخانه به صورت دو بعدی انجام می‌گیرد. با به کارگیری شیوه‌ای مشابه قبل، در تعیین مقدار کمیت اسکالر $\phi(i+\frac{1}{2}, j)$، رویه دو بعدی مار بر شش نقطه $\phi_{i,j+1}$ ، $\phi_{i-1,j}$ ، $\phi_{i+1,j-1}$ ، $\phi_{i,j-1}$ ،$\phi_{i+1,j}$ ،$\phi_{i,j}$ به کار خواهد رفت و به این ترتیب برای تعیین ϕ در همه دیواره‌های حجم کنترل، هفت گره محاسباتی به صورت نشان داده شده در شکل ۳ دخالت خواهند داشت.

نتایج قابل پیش‌بینی منتج از به کارگیری روش فوق به عنوان نمونه برای یکی از دیواره‌ها به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\phi(i-\frac{1}{2}, j) = \frac{-1}{8}\phi_{i-2,j} + \frac{3}{4}\phi_{i-1,j} + \frac{3}{8}\phi_{i,j} \qquad (۵)$$



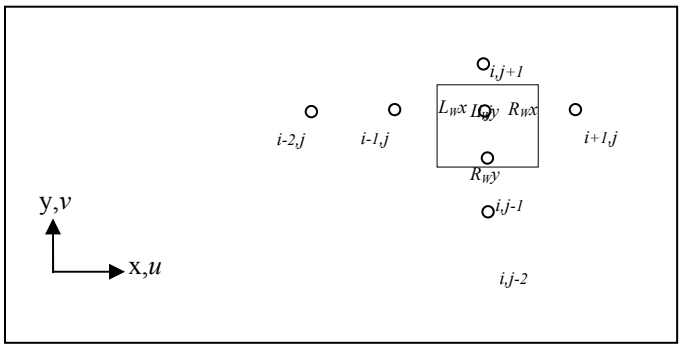
شکل ۱- نقاط مورد استفاده در الگوی منقطع سازی مرتبه دو با انتقال به سمت بالادست



شکل ۲- نقاط مورد استفاده در الگوی منقطع سازی مرتبه دودر نزدیکی مرز بالا دست

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- نقاط مورد استفاده در الگوی منقطع سازی مرتبه دوبرای حالت دو بعدی در پلان

با اعمال شیوه انقطاع معادله حاکم در مجاورت مرزها مشابه آنچه در شرائط یک بعدی گفته شد، برای تمامی گره‌های محدوده محاسباتی امکان حل معادله حاکم بر پخش آلودگی در شرایط دوبعدی وجود خواهد داشت. نامگذاری دیواره های حجم کنترل در این شکل نیز به صورت نمونه با Lwx نشان داده شده که بیانگر دیواره چپ عمود بر محور x است و همین قاعده برای سایر اسامی اشاره شده نیز صادق است (جیلانی، ۱۳۷۶).

۲-۲- روش مرتبه دوم غیر همگام (QUICKEST)

اگر روش قبل در تعیین مقدار کمیت اسکالر در دیواره‌ها برای شرایط غیردائمی[۱۳] توزیع آلودگی $\frac{\partial \varphi}{\partial t} \neq 0$ به کار رود و با هدف افزایش دقت نتایج حاصله، متوسط تغییرکمیت درگامهای قبل و بعد ازگذشت زمان Δt برای هر یک از گره‌های محاسباتی در نظر گرفته شود، روش QUICKEST ایجاد می‌گردد.

براساس محاسبات انجام گرفته، با به کارگیری شیوه فوق، معادله اساسی این روش به‌صورت زیر به دست خواهد آمد (Parsons et. al., 2001):

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - \frac{u\Delta t}{\Delta x}.(F_r - F_\ell) + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2}(G_r - G_\ell) \qquad (۶)$$

که در آن:

$$F_* = \frac{1}{2}(\phi_i^n + \phi_{i+1}^n) - \frac{\Delta x}{2}.cr.GR\phi_* + \frac{\Delta x^2}{6}(1 - cr^2 - 3\alpha).CURV\phi_* \qquad (۷)$$

$$G_* = \Delta x.GR\phi_* - \frac{\Delta x^2}{2}.cr.CURV\phi_* \qquad (۸)$$

در معادلات فوق، cr عدد کورانت جریان برای سرعت در هریک از جهات x و یا y، $CURV$ عملگر مشتق دوم جزئی نسبت به x و یا y بسته به نوع معادله، GR عملگر گرادیان برای دو بعد مسطحاتی x و y، n بیانگر گام زمانی قبل (نسبت به گام زمانی جدید که معادلات در آن نوشته شده و مقادیر ϕ در آن مجهول هستند)، α عدد پکلت یا همان ضریب جمله سوم در سمت چپ معادله (۶) و *F و *G همان کمیتهای به کار رفته در معادله (۶) هستند که به جای * می‌تواند زیرنویس l (برای دیواره چپ حجم کنترل) و یا r (برای دیواره راست حجم کنترل)، قرار گیرد. عددکورانت به صورت $(cr=u.\Delta t/\Delta s)$ و عدد پکلت به صورت $(Pc=u.\Delta s/D)$ تعریف می شود که در آنها u بردار سرعت با دو مولفه u و v، Δs بازه مکانی در جهات اصلی x یا y بسته به راستای محاسبه و D بردار ضریب انتشار آلودگی با دو مولفه D_x برای انتشار در راستای طولی و D_y برای انتشار آلاینده در راستای عرضی رودخانه است تا شرایط کلی از حیث نحوه توزیع منظور گردد (Simons, 1996, De Roo and Jetten, 1999).

۲-۳- معرفی روشهای جدید

به منظور امکان مقایسه چگونگی تغییر در دقت نتایج با افزایش مرتبه منحنی به کار رفته در تخمین کمیت آلاینده در دیواره‌های حجم کنترل، گامهای بعدی مسیری که پیش از این توسط روشهای QUICK یا QUICKEST معرفی شده بود، مورد آزمایش قرار گرفته است. درگام نخست، منحنی مرتبه سوم به صورت منتقل شده به سمت بالادست (یعنی انتخاب نقاط بیشتری از سمت بالادست نقطه واقع در حجم کنترل تحت مطالعه) به کار گرفته می‌شود به نحوی که به عنوان نمونه در تعیین آلودگی در دیواره چپ حجم کنترل (i)ام (با فرض مثبت بودن جهت سرعت)، منحنی مار بر چهار نقطه ϕ_i ، ϕ_{i-1} ، ϕ_{i-2} و ϕ_{i-3} ملاک است (Watson et al., 1996, Walton and Hunter, 1996). به عبارت دیگر انتخاب تعداد سه نقطه از سمت ورود جریان به حجم کنترل و یک نقطه از سمت خروج آن انجام می‌شود.

این روش در مجاورت مرزهای پایین دست و بالادست و با اعمال تغییر مشابه روش QUICK و همچنین ملحوظ نمودن شرائط مرزی تعریف شده، قابل کاربرد خواهد بود. نتایج حاصله از این روش تحت

www.SID.ir

Archive of SID

عنوان روش TDS[14] با سایر روشهای عددی معرفی شده در این تحقیق مقایسه و بررسی شده‌اند. تحلیل نتایج وقتی کامل خواهد بود که با آزمایش منحنی مرتبه بالاتر (چهارم) و حل معادله حاکم و مقایسه دقت حاصله از هر روش، نهایتاً مرتبه بهینه منحنی به کار رفته در منقطع سازی معادله مشخص گردد. براین اساس در روش جدید دیگری، منحنی مرتبه چهار و این بار نیز به صورت منتقل شده به سمت بالادست به کار رفته و نتایج حاصله تحت عنوان روش FDS[15]، در شرائط یکسان اولیه و مرزی با روشهای پیشین، مقایسه شده است (Valeo and Moin, 2000). لذا در این روش، برای تعیین کمیت ϕ در دیواره حجم کنترل، مقدار ϕ در پنج گره محاسباتی که دو گره در پایین دست و مابقی در بالادست دیواره قرار دارند، دخالت خواهند داشت. شایان ذکر است که در مجاورت مرزها، لزوم اعمال اصلاح مشابه روش QUICK و همچنین اعمال شرایط مرزی وجود خواهد داشت.

۳- مقایسه الگوهای عددی و تحلیل نتایج

الگوهای معرفی شده، در شبیه‌سازی عددی توزیع آلودگی حرارتی در محیط سیال به کار رفته و نتایج ارزیابی و مقایسه شده‌اند.

مسئله نمونه مورد بررسی، چگونگی شکل‌گیری منحنی‌های همدما در رودخانه "راین" تحت تاثیر تخلیه پساب گرم نیروگاه حرارتی مجاور آن است. این انتخاب، به‌دلیل دسترسی به نتـایج اندازه‌گیری محلی از دمای آب رودخانه در محدوده تأثیر پساب گرم نیروگاه به‌عنوان مبنای مناسبی برای تعیین خطای حل عددی، انجام گرفته است (Stamou, 1992).

سیستم مدار خنک‌کننده نیروگاه، جریانی معادل ۱۸ m^3/s را از رودخانه آبگیری نموده و پس از اعمال افزایش دمایی معادل ۸ درجه سانتی گراد ، پساب گرم و آلوده را در مقطع مشخصی در پایین‌دست نقطه آبگیری تخلیه می‌کند. سرعت جریان خروجی در محل ورود به رودخانه برابر ۱/۱m/s بوده و راستای این مجرا با محور رودخانه زاویه ° ۴۵ می‌سازد. به‌دلیل تأثیر انحنای رودخانه در فاصله ناچیزی از دهانه کانال خروجی در بالادست آن، میدان سرعت به‌صورت دوبعدی در محدوده مورد مطالعه از رودخانه برقرار است. عرض متوسط رودخانه در این منطقه حدوداً برابر ۱۰۰ متر و طول مورد بررسی از آن معادل ۲۰۰۰ متر انتخاب شده است. به‌طوری که بتوان شرط مرزی پایین‌دست محدوده مدل‌سازی را عدم تغییر در آلودگی دمایی در هردو امتداد عمود بر هم در رودخانه درنظر گرفت. بر اساس نقشه خطوط همتراز بستر در محدوده شبیه سازی، عمق آب در رودخانه معادل حداکثر ۲ متر بوده و لذا به‌نحوی است که امکان شبیه‌سازی سیستم در شرایط دوبعدی در سطح وجود دارد.

منحنی‌های همدما در منطقه ۳۰۰ متر از ابتدای محدوده مدل‌سازی، حاصل از تحلیل عددی با استفاده از الگوهای QUICK یا QUICKEST (QDS)، TDS و FDS به‌ازای مقادیر مختلف اعداد بدون بعد در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه گردیده است. تغییر در نتایج ناشی از تغییر در ابعاد و الگوی شبکه بندی در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در این شکل ها شماره‌های ذکر شده در کناره‌های رودخانه بیانگر شماره گره آن نقطه از شبکه می‌باشند. به‌منظور امکان ارزیابی خطای ایجاد شده در هر روش عددی، داده‌های موجود از اندازه‌گیری‌های محلی به‌صورت منحنی‌های مبنا در شکل‌های زیر نشان داده شده است. در شکل ۴، ابعاد مش‌بندی در امتداد محور رودخانه برابر ۳۰ متر و در امتداد عمود بر آن معادل ۱۰ متر انتخاب شده است. در این حالت ابعاد شبکه در مجاورت مرزها و همچنین نقطه ورود آلودگی حرارتی به‌طور متناسب کوچکتر انتخاب شده است که به ترتیب برای امتدادهای x و y برابر 7.5 و 2.5 متر است.

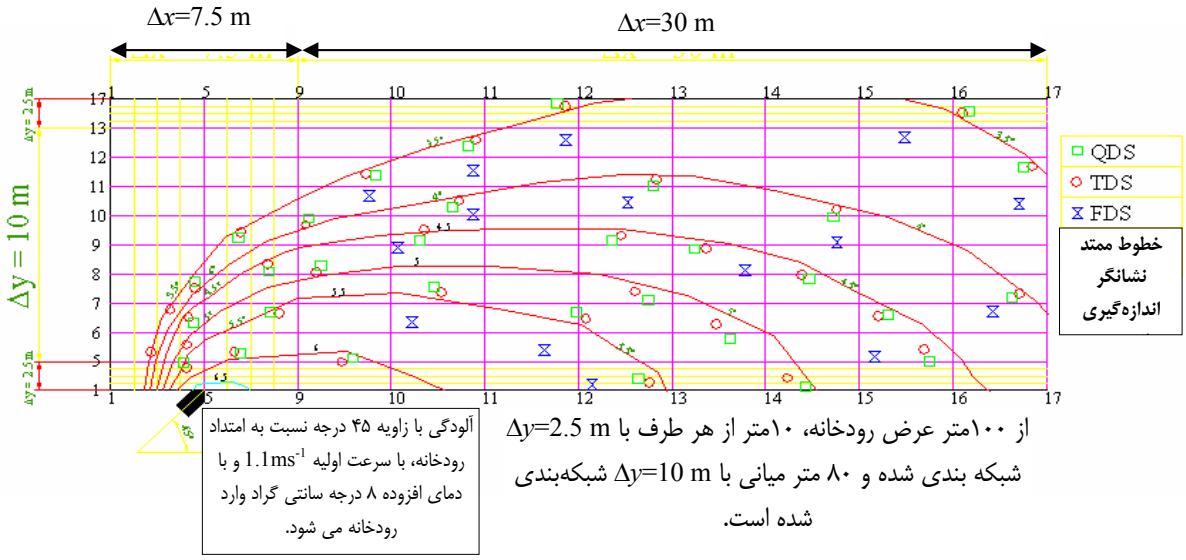
تبعیت مناسب نتایج روش QDS که از منحنی مرتبه دوم برای تخمین مقدار آلودگی حرارتی در دیواره‌های حجم کنترل استفاده می‌کند، در شکل ۴ مشهود است. بر اساس خطای محاسبه شده برای هر روش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از منحنی مرتبه سوم در منقطع‌سازی معادلات، به‌نحوی که در روش TDS بیان شد، منجر به نزدیکی بیشتری میان نتایج عددی و اندازه‌گیری محلی می‌شود. برای محاسبه خطا، با مبنا قراردادن نتایج در دسترس از اندازه‌گیری میدانی، رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$E = \Sigma e_{i,j}^2 = \Sigma \left(\frac{\left| \phi_{i,j} - \phi_{i,j}^{FM} \right|}{\phi_{i,j}^{FM}} \right)^2 \qquad (۹)$$

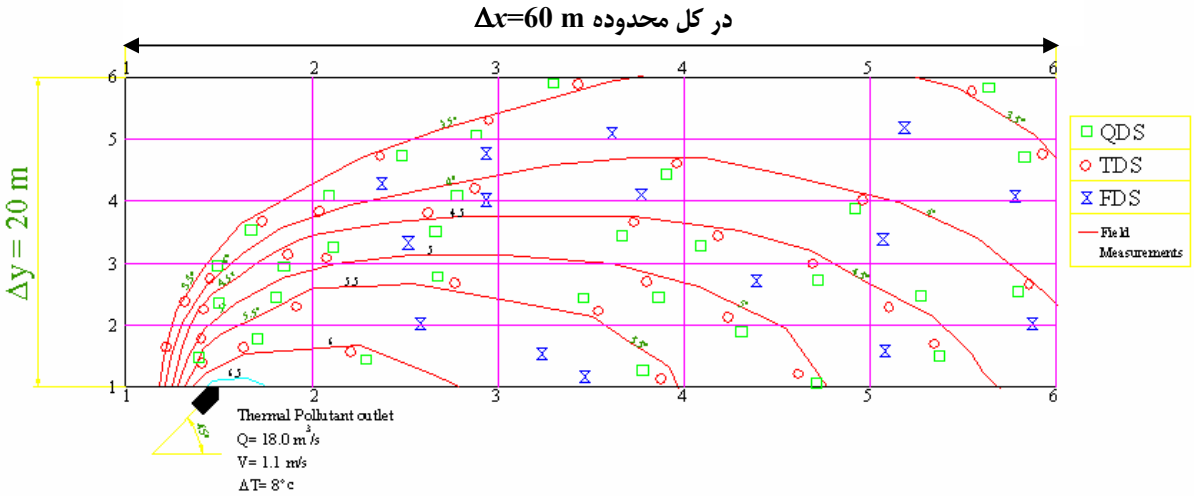
در این رابطه E خطای کل هر روش منقطع سازی، $e_{i,j}$ خطای ایجاد شده در هر گره از شبکه محاسباتی، $\phi_{i,j}$ غلظت آلودگی محاسبه شده در هر گره از حل عددی و $\phi^{FM}{}_{i,j}$ غلظت آلودگی واقعی در آن گره استنتاج شده از نتایج اندازه‌گیری میدانی است. آنچنانکه در شکل ۴ نشان داده شده، افزایش مرتبه منحنی به کاررفته در منقطع‌سازی از ۳ در TDS به ۴ در FDS نه‌تنها باعث افزایش دقت نتایج نشده بلکه تنها حجم محاسبات مورد نیاز برای روش عددی را تا حد قابل توجهی افزایش داده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤ - نتایج تحلیل دوبعدی توزیع آلودگی حرارتی با ابعاد کوچک شبکه‌بندی (منحنی‌های با خطوط ممتد نشانگر داده های حاصل از اندازه گیری میدانی هستند)



شکل ٥ - نتایج تحلیل دوبعدی توزیع آلودگی حرارتی با ابعاد بزرگ شبکه بندی نسبت به شکل ٤

مقایسه روش‌ها با یکسان‌سازی ابعاد مش‌بندی خصوصاً در مجاورت مرزها و اجرای مجدد مدل عددی با استفاده‌از الگوهای عددی مختلف انجام شده است. نتایج این مقایسه در شکل ٥ نشان داده شده است. با استفاده از معادله (۹) و محاسبه مجدد مقادیر خطا، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ابعاد مش‌بندی منجر به کاهش دقت نتایج در روش‌های عددی و ایجاد تفاوت با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری شده است. اما درخصوص روش‌های QDS و TDS که به‌ترتیب با استفاده از منحنی‌های مرتبه دوم و سوم معادلات حاکم را تحلیل می‌کنند، افزایش ابعاد شبکه بندی تاثیر چندانی بر نتایج نداشته‌است. مقایسه شرایط مختلف نشان داده‌شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشانگر عدم تاثیر قابل توجه تغییر در الگوی شبکه‌بندی است. در حالی‌که در روش FDS، که منحنی مرتبه چهارم را به کار می‌گیرد، خطای قابل‌توجهی با افزایش ابعاد مش‌بندی در نتایج ایجاد شده است. مقایسه کمی‌تر مقادیر خطا در هر روش عددی در بخش نتیجه‌گیری مورد اشاره قرار گرفته است.

٤- نتیجه‌گیری

با استفاده از الگوهای مختلف منقطع‌سازی در روش عددی تفاضل محدود در تحلیل چگونگی توزیع کمیت آلوده‌کننده در محیط سیال در شرایط دوبعدی، بررسی شد و مقایسه نتایج از حیث دقت و تطابق با داده‌های حاصل از اندازه گیری میدانی انجام گردید. این مقایسه نشان می‌دهد که:

www.SID.ir

Archive of SID

۱. استفاده از روش تفاضل محدود با به کارگیری الگوهای مرتبه دوم در میانه میدان حل به نحوی که در روش QUICK معرفی می شود، منجر به افزایش دقت نتایج خصوصا" در نقاط مجاور مرزها می‌گردد.

۲. با به کارگیری منحنی مرتبه سوم در منقطع‌سازی معادلات، آنچنان‌که در روش جدید TDS ذکر شد، بیشترین انطباق با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری میدانی حاصل می‌گردد. این روش افزایش قابل توجهی را نیز در میزان محاسبات مورد نیاز برای حل عددی نسبت به روش QUICK از خود نشان نمی‌دهد.

۳. نتایج حاصل از روش جدید مرتبه سوم غیر ماندگار(TDS)، به طور متوسط و برای شرایط مورد مطالعه حداکثر ۵٪ با نتایج اندازه گیری واقعی تفاوت نشان می دهد. در حالی که این خطا برای روش QUICK حدود ۱۰٪ است (بر اساس معادله (۹)).

۴. تحلیل حساسیت روش‌ها نسبت به ابعاد شبکه نشان می دهد که در روش جدید TDS، حتی با دوبرابر نمودن ابعاد مش بندی در مجاورت مرزها، تنها ۱٪ افزایش خطا رخ می دهد. درحالیکه در روش مرتبه دوم همگام (QUICK)، افزایش خطایی حدوداً معادل ۱۰ ٪ ایجاد می گردد.

۵. افزایش مرتبه منحنی از ۳ به ۴ در روش جدید FDS ، منجر به افزایش قابل توجه میزان محاسبات عددی و حتی افزایش خطای عددی به صورت موردی در نتایج می‌گردد. در این روش لزوم انتخاب ابعاد بسیار کوچک شبکه و افزایش قابل توجه زمان تحلیل وجود دارد. ضمن اینکه دقت نتایج نیز خصوصاً در مجاورت مرزها تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

۶. با توجه به موارد فوق، برای توسعه مدل‌های عددی پخش آلودگی در روش تفاضل محدود، الگوی منقطع‌سازی TDS که از منحنی مرتبه سوم و به‌صورت انتقال‌یافته به‌سمت بالادست (انتخاب تعداد سه نقطه از سمت ورود جریان به حجم کنترل و یک نقطه از سمت خروج آن) استفاده می‌کند، توصیه می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Finite Difference
2. Discrete
3. Courant Number
4. Peclet Number
5. Unconditionally Stable
6. Finite Element
7. Steady Flow
8. Great Salt Lake
9. Advection
10. Diffusion
11. Sink/Source Term
12. Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics (QUICK)
13. Transient
14. Third-Order Difference Scheme
15. Fourth-Order Difference Scheme

۵- مراجع

نجفی جیلانی، ع. (۱۳۷۶)، "کاربرد روش‌های عددی دقیق در مدل‌سازی توزیع آلودگی در رودخانه‌ها" پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۲۴ صفحه.

Arnold, J.G., Williams, J.R., Griggs, R.H., and Sammons, N.B., (1990), *A basin scale simulation model for soil and water resources management,* A&M Press, Texas.

Beck, M.B., (1995), *Construction and evaluation of models of environmental systems*, John Wiley and Sons, London, pp. 3-35.

Brian L., Loving, B.L., and Waddell, M., (1998), *Water and salt balance of Great Salt Lake, Utah, and simulation of water and salt movement through the causeway,* USGS, Water Resources Investigations Report 00-4221, pp. 50-114.

Chiew, F.H.S., and Peel, M.C., (2002), *Application and testing of the simple rainfall-runoff model,* Water Resources Publication, Littleton, Colorado, No. 26.

De Roo, A.P.J., and Jetten, V.G., (1999), "Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa", *Catena*, No. 37, pp. 477-493.

Leonard, B. P., (1979), *A stable and accurate convective modeling procedure,* John Wiley and Sons, England, No. 5, pp. 10-42.

Parsons, J.E., Thomas, D.L., and Huffman, R.L., (2001), *Non-point sources water quality models; their use and application,* Final Report of USDA-CSREES Southern Region Research Project, Development and Application of Comprehensive Agricultural Ecosystems Models, pp. 200-230.

Prosser, I.P., (2001), "A model of river sediment budgets as an element of river health assessment", *Proceedings of the International Congress on Modeling and Simulation* (MODSIM, 2001), December 10-13, pp. 861-866.

Simons, M., (1996), "A hydrologic modeling tool for water resources and salinity management", *Environmental Softwares Journal*, Vol. 11, pp. 1-3.

Stamou A.I., (1992), "Improving the numerical modeling of river water quality", *Journal of Hydrology*, Vol. 23, pp. 20-33.

www.SID.ir

Archive of SID

catchments", *23rd Hydrology and Resources Symposium*, North Queensland, Sydney.

Watson, F., Rahman, J., and Seaton, S., (1996), "Deploping environmental software using the Tarsier modeling framework", *Proceedings of the Third Australian Stream Management Conference*, August 27-29, pp. 631-638.

Trudgill, S.T., and J. Ball, (1995), *Overview of solute modeling in catchments systems,* John Wiley and Sons, London, pp. 3-56.

Valeo, C., and Moin, S.M.A., (2000), "Grid-resolution effects on a model for integrating urban and rural areas", *Hydrological Process Manual*, No. 14, pp. 2505-2525.

Walton, R., and Hunter, H., (1996), "Modeling water quality and nutrient fluxes in the Johnstone River

تاریخ دریافت مقاله: ۲۶ بهمن ۱۳۸۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۲۰ خرداد ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۰ تیر ۱۳۸۵

www.SID.ir