

بسمہ تعالیٰ

# روش های عددی در هواشناسی و اقیانوس شناسی

کریستوفر دوس

ترجمہ:

دکتر سعید ملا اسماعیل پور

زمستان ۱۴۰۱

## پیش‌گفتار مترجم

کامبود کتاب درسی به زبان فارسی در زمینه روش‌های عددی در هواشناسی و اقیانوس‌شناسی چه در بحث تألیف و چه در بحث ترجمه، ما را ترغیب به ترجمه این اثر ارزشمند نموده است. کتاب حاضر، ترجمه کتاب « Numerical Methods in Meteorology and Oceanography » اثر کریستوفر دوس، استاد دانشکده هواشناسی دانشگاه استکهلم سوئد می‌باشد. در این کتاب با استفاده از طرح‌واره‌های مختلف به تحلیل روش‌هایی پرداخته شده است که جواب‌های عددی معادلات را به ما می‌دهد. زیرا حل تحلیلی معادلات بعضاً پیچیده و حتی به روش‌های معمول غیرممکن است. از این‌رو، ناچار به بررسی و حل آنها با روش‌های عددی می‌باشیم. به طور نمونه، برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE) نیاز به گسسته‌سازی آنها داریم. روش تفاضل محدود یک روش مستقیم برای گسسته‌سازی این معادلات است. به این معنی که به جای تحلیل یک معادله در یک مکان پیوسته، آن را به دو یا چند معادله در مکان‌های گسسته تبدیل می‌کنیم. این کتاب مشتمل بر ۱۴ فصل است که در فصل آخر (فصل ۱۴) نمونه سؤالات امتحانی دانشگاه استکهلم سوئد از سال ۱۹۹۹-۲۰۰۸ آورده شده است.

این کتاب برای دانشجویان رشته‌های هواشناسی، اقیانوس‌شناسی فیزیکی، فیزیک دریا، ریاضیات کاربردی و سایر رشته‌های مهندسی به‌ویژه مکانیک سیالات بسیار مفید است. در خاتمه هرگونه نظر و پیشنهادی از سوی دانشجویان، خوانندگان و همکاران محترم در جهت بهبود کیفیت این کتاب با نشانی و ایمیل [esmaeilpour@aut.ac.ir](mailto:esmaeilpour@aut.ac.ir) موجب امتنان خواهد بود.

دکتر سعید ملا اسماعیل‌پور

زمستان ۱۴۰۱

## فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۹
فصل ۲: معادلات دیفرانسیل جزئی (PDE)	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- بیضوی	۱۳
۳-۲- سهموی	۱۵
۴-۲- هذلولوی	۱۶
فصل ۳: تفاضلات محدود	۱۸
۱-۳- روش نقطه- شبکه	۱۹
۲-۳- طرح‌واره تفاضل محدود	۱۹
۳-۳- تفاضلات محدود زمانی	۲۲
۱-۳-۳- طرح‌واره‌های دو ترازی	۲۴
فصل ۴: پایداری عددی معادله فرارفت (هذلولی)	۲۷
۱-۴- معادله فرارفت با طرح‌واره لیپ- فراگ، یعنی $O[(\Delta x)]^2$	۲۸
۲-۴- معادله فرارفت با طرح‌واره اویلر (پیشرو) در زمان و طرح‌واره مرکزی در مکان	۳۱
۳-۴- طرح‌واره پادجریان یا پادبادسو	۳۳
۴-۴- معادله فرارفت با طرح‌واره $O(\Delta x)^4$	۳۷
فصل ۵: مُد عددی	۴۱
۱-۵- مُد عددی طرح‌واره‌های سه ترازی	۴۲
۱-۱-۵- شرط اولیه محاسباتی	۴۵
۲-۵- منع مُد محاسباتی	۴۵
فصل ۶: دقت سرعت فاز عددی	۴۷
۱-۶- پراکندگی ناشی از گسستگی مکانی	۴۸

۴۸	۲-۶- پراکندگی ناشی از گسستگی زمانی.....
۵۱	۳-۶- پراکندگی ناشی از گسستگی مکانی و زمانی.....
۵۴	فصل ۷: عبارات انتشار و اصطکاک (سهموی).....
۵۵	۱-۷- اصطکاک ریلی.....
۵۸	۲-۷- معادلهٔ گرما.....
۶۴	۳-۷- معادلهٔ فرارفت - انتشار.....
۶۹	فصل ۸: معادلات پواسون و لاپلاس (بیضوی).....
۷۰	۱-۸- مقدمه.....
۷۰	۲-۸- روش تکرار ژاکوبی.....
۷۱	۳-۸- روش تکرار گاوس-سایدل.....
۷۲	۴-۸- روش فوق تخفیف متوالی (SOR).....
۷۴	فصل ۹: معادلات آب کم عمق.....
۷۵	۱-۹- امواج گرانشی یک بعدی با تفاضل مرکزی مکانی.....
۷۷	۲-۹- امواج گرانشی دو بعدی با تفاضل مرکزی مکانی.....
۷۹	۳-۹- معادلات خطی آب کم عمق بدون اصطکاک.....
۸۶	۴-۹- پایداری جرم، انرژی و آنستروپی.....
۸۶	۱-۴-۹- معادلات آب کم عمق با عبارتهای فرارفت غیر خطی.....
۸۸	۲-۴-۹- گسسته سازی.....
۹۲	فصل ۱۰: طرح‌واره‌های ضمنی و نیمه ضمنی.....
۹۳	۱-۱۰- طرح‌وارهٔ ضمنی (قانون دوزنقه).....
۹۵	۲-۱۰- روش نیمه ضمنی کوپزاک و رابرت.....
۹۷	۳-۱۰- روش نیمه لاگرانژی.....
۹۸	۱-۳-۱۰- فرارفت غیرفعال یک بُعدی (1-D).....

۱۰۰	..... ۱۰-۳-۲- درون‌یابی و پایداری
۱۰۳	..... فصل ۱۱: هارمونیک‌های کروی
۱۰۴	..... ۱۱-۱- روش‌های طیفی
۱۰۶	..... ۱۱-۲- هارمونیک‌های کروی
۱۰۹	..... ۱۱-۳- روش تبدیل طیفی
۱۱۰	..... ۱۱-۴- کاربرد در معادلات آب کم‌عمق در کره
۱۱۲	..... فصل ۱۲: انواع مختلف مختصات
۱۱۳	..... ۱۲-۱- مختصات ارتفاع یا عمق ثابت
۱۱۴	..... ۱۲-۲- سایر مختصات قائم
۱۱۷	..... ۱۲-۲-۱- مختصات فشار
۱۱۹	..... ۱۲-۲-۲- مختصات سیگما
۱۲۰	..... ۱۲-۲-۳- مختصات هیبرید
۱۲۲	..... ۱۲-۲-۴- مختصات مدل گردش عمومی اقیانوس
۱۲۲	..... ۱۲-۳- اجزای محدود
۱۲۴	..... ۱۲-۴- نتایج حاصل از مدل‌های گردش عمومی اقیانوس و جو
۱۲۶	..... فصل ۱۳: تمرینات عملی کامپیوتری
۱۲۷	..... ۱۳-۱- هدف
۱۲۷	..... ۱۳-۲- تئوری
۱۲۸	..... ۱۳-۳- ابزار
۱۲۹	..... ۱۳-۴- تمرینات نظری
۱۳۰	..... ۱۳-۵- تمرینات تجربی
۱۳۲	..... ۱۳-۶- تمرین آب کم‌عمق، توسط آندرس انگستروم
۱۳۲	..... ۱۳-۷- تئوری

۱۳۳	۱۳-۸- ابزار.....
۱۳۳	۱۳-۹- گزارش.....
۱۳۴	۱۳-۱۰- تمرینات.....
۱۳۴	۱۳-۱۰-۱- مدل یک بُعدی (1D).....
۱۳۵	۱۳-۱۰-۲- مدل دو بُعدی (2D).....
۱۳۶	۱۳-۱۱- تمرینات اختیاری.....
۱۳۶	۱۳-۱۱-۱- غیرخطی.....
۱۳۷	۱۳-۱۱-۲- مدل طیفی.....
۱۳۷	۱۳-۱۲- ساختار کلی کد.....
۱۳۹	فصل ۱۴: سؤالات امتحانی دانشگاه استکهلم (سوئد) از سال ۱۹۹۹ - ۲۰۰۸.....
۱۶۷	واژه‌نامه.....
۱۷۶	منابع.....

## پیش‌گفتار مؤلف

هدف از این نوشته، ارائهٔ مقدمه و مروری بر مدل‌سازی عددی اقیانوس و جو است. در این کتاب، طرح‌واره‌های عددی برای متداول‌ترین معادلات هواشناسی و اقیانوس‌شناسی تشریح شده است. برای سهولت، معادلات اغلب به معادلات هیدرودینامیکی ارجاع داده می‌شوند، زیرا روش‌های عددی تشریح شده در این نوشته، هم برای مدل‌سازی اقیانوس و هم برای جو قابل استفاده و کاربردی می‌باشند. از طرفی، عمدتاً به دلیل غیرخطی بودن معادلات هیدرودینامیکی که حرکت در اقیانوس و جو را توصیف می‌کنند، نمی‌توان جواب‌های تحلیلی برای آنها پیدا کرد. بنابراین، ناچار به تقریب عددی معادلات و حل عددی آنها با ساخت مدل‌های گردش عددی هستیم.

کریستوفر دوس، استاد اقیانوس‌شناسی فیزیکی دانشکدهٔ هواشناسی، دانشگاه استکهلم (سوئد)

# فصل ۱

## مقدمه

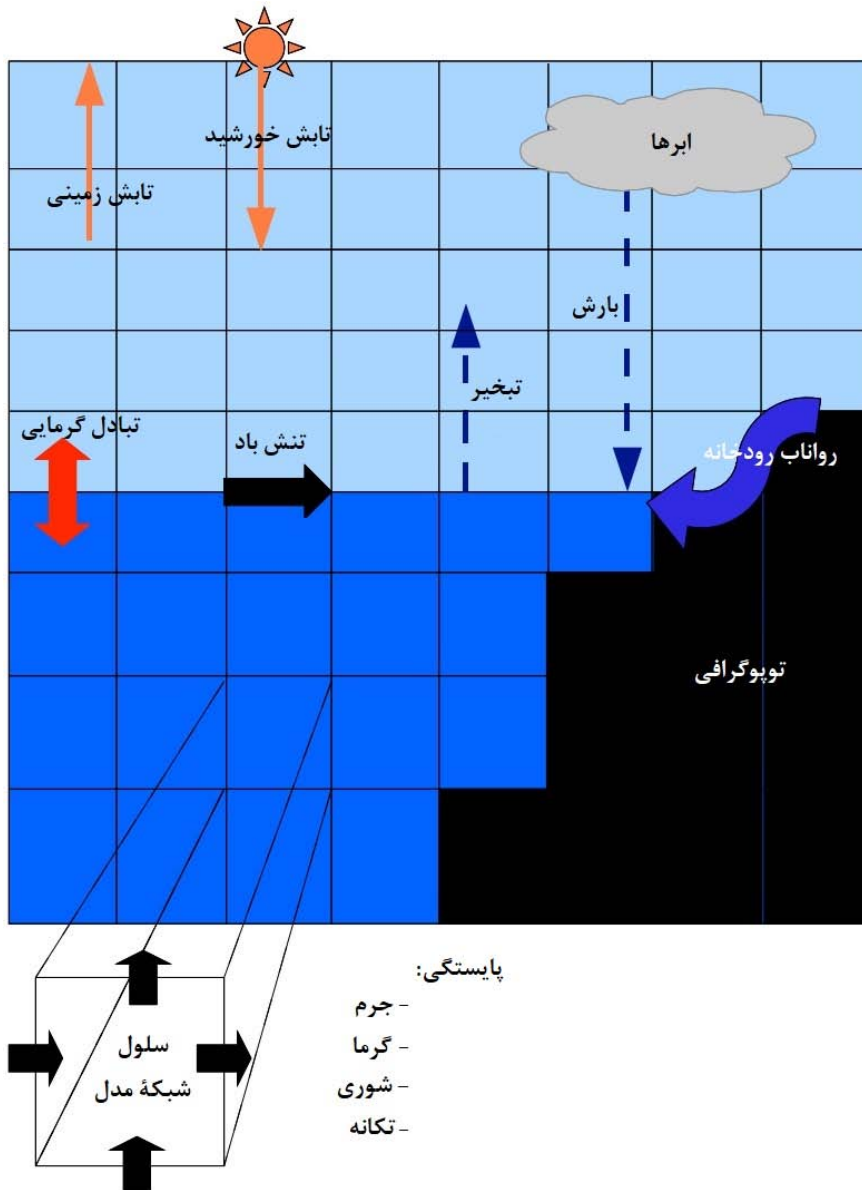
یک مدل عددی گردش جو یا اقیانوس اصولاً از سه مقوله زیر تشکیل شده است:

الف) شبکه‌ای در فضا

ب) معادلاتی که پایداری جرم، گرما، نمک و تکانه را توصیف می‌کنند.

پ) مرزهای باز





شکل ۱-۱- تصویر شماتیک از یک مدل عددی گردش اقیانوس - جو.