دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده کشاورزی
گروه آموزشی مهندسی آب

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی عددی همزمان جریان سطحی و زیرسطحی در آبیاری شیاری، ابزاری جهت مدیریت آبیاری سطحی

الهام بیک‌زاده

بهمن ۱۳۹۱

دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده کشاورزی
پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل‌سازی عددی همزمان جریان سطحی و زیرسطحی در آبیاری شیاری، ابزاری جهت مدیریت آبیاری سطحی

الهام بیک زاده

استادان راهنما

دکتر علی نقی ضیایی

دکتر کامران داوری

استاد مشاور

دکتر حسین انصاری

بهمن ۱۳۹۱

دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

از این پایان نامه کارشناسی ارشد توسط الهام بیک زاده دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی

در تاریخ در حضور هیات داوران دفاع گردید. پس از بررسی های لازم، هیات داوران این پایان نامه را با نمره

عدد حروف و با درجه مورد تایید قرار داد / نداد.

عنوان پایان نامه: مدل سازی عددی همزمان جریان سطحی و زیر سطحی در آبیاری جویچه ای، ابزاری جهت مدیریت آبیاری سطحی

سمت در هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	گروه	موسسه / دانشگاه	امضاء
داور	محمود فغفور مغربی	استاد	مهندسی عمران	دانشگاه فردوسی مشهد	
داور	سید مجید هاشمی‌نیا	مربی	مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	
نماینده تحصیلات تکمیلی	علیرضا فرید حسینی	استادیار	مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	
استاد راهنما	علی نقی ضیایی	استادیار	مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	
استاد راهنما	کامران داوری	دانشیار	مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	
استاد مشاور	حسین انصاری	دانشیار	مهندسی آب	دانشگاه فردوسی مشهد	

تعهد نامه

عنوان پایان نامه: **مدل‌سازی عددی همزمان جریان سطحی و زیرسطحی در آبیاری جویچه‌ای، ابزاری جهت مدیریت آبیاری سطحی**

اینجانب **الهام بیک زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی آبیاری و زهکشی** دانشکده **کشاورزی** دانشگاه فردوسی مشهد تحت راهنمایی **دکتر علی نقی ضیایی** و **دکتر کامران داوری** متعهد می شوم:

- نتایج ارایه شده در این پایان نامه حاصل مطالعات علمی و عملی اینجانب بوده، مسئولیت صحت و اصالت مطالب مندرج را به طور کامل بر عهده می گیرم.
- در خصوص استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد نظر استناد شده است.
- مطالب مندرج در این پایان نامه را اینجانب یا فرد یگری به منظور اخذ هیچ نوع مدرک یا امتیازی تاکنون به هیچ مرجعی تسلیم نکرده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد. مقالات مستخرج از پایان نامه، زیر نام دانشگاه فردوسی مشهد (Ferdowsi University of Mashhad) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت خواهد شد.
- در خصوص استفاده از موجودات زنده یا بافتهای آنها برای انجام پایان نامه، کلیه ضوابط و اصول اخلاقی مربوطه رعایت شده است.

تاریخ

نام و امضاء دانشجو: الهام بیک‌زاده

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) به دانشگاه فردوسی مشهد تعلق دارد و بدون اخذ اجازه کتبی از دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج این پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.**

چکیده

در این تحقیق، یک مدل هیدرودینامیک کامل برای شبیه‌سازی فازهای مختلف آبیاری در جویچه ارایه گردید. معادلات حاکم بر جریان (معادله‌ی سنت ونانت در جریان سطحی و معادله‌ی کاستیاکوف–لوییس در جریان زیر سطحی) توسط حجم کنترل‌های متغیر گسسته شد. معادلات غیر خطی تولید شده توسط روش نیوتن رافسون، خطی‌سازی شده و معادلات جبری حاصل با استفاده از الگوریتم جاروب برگشتی حل گردید. مدل ارایه شده با توجه به نرم‌افزار SIRMOD و همچنین پنج سری داده‌ی مزرعه‌ای (بنسون–۲۲۱، مچت–۲۳۵، پرینتز–۳۲۳، واکر (۱۹۸۹) و مرکلی (۱۹۸۳)) و با استفاده از معیارهای ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) و خطای همبستگی (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی تطابق بسیار خوبی با داده‌های مزرعه‌ای داشته و عملکرد مشابهی با نرم‌افزار SIRMOD دارد. پس از اطمینان از صحت مدل، حساسیت آن نسبت به پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ورودی مورد بررسی در این آنالیز، دبی، ضریب زبری مانینگ، شیب مزرعه و ضرایب نفوذ معادله‌ی کاستیاکوف–لوییس درنظر گرفته شد. با توجه به نتایج، زمان پیشروی بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به دبی ورودی و پارامترهای نفوذ f_0، k و a، و زمان پسروی نیز بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به ضریب مانینگ، f_0 و شیب زمین نشان داد. سپس به علت تأثیر قابل توجه پارامترهای نفوذ و زبری در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای، از روش‌های حل معکوس مانند روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش واسنجی چند مرحله‌ای واکر (۲۰۰۵) به منظور تخمین پارامترهای نفوذ و زبری استفاده شد. سپس برای تعدیل نفوذ در آبیاری‌های متفاوت از روش مقیاس ارایه شده توسط ختری و اسمیت (۲۰۰۶) که در آبیاری با زمان واقعی کاربرد دارد، استفاده گردید. نتایج نشان داد روش واسنجی چند مرحله‌ای نسبت به روش دونقطه‌ای بهتر عمل کرده و حتی روش دو نقطه‌ای در داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) خطای RMSE شبیه‌سازی فاز پیشروی را به شدت افزایش داده است. اما روش واسنجی علی‌رغم نیاز به داده‌ها و زمان بیشتر برای شبیه‌سازی، موجب کاهش خطا در هر دو فاز پیشروی و پسروی گردید. روش تعدیل نفوذ نیز به علت استفاده از روابط مشابه با روش دونقطه‌ای در بعضی شرایط نتوانست به خوبی عمل کند و خطای شبیه‌سازی را افزایش داد (آبیاری بنسون–۲۲۱). در نهایت با استفاده از یک روش بهینه‌سازی به تعیین بهترین جریان ورودی و زمان قطع جریان در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) پرداخته شد. ابتدا پارامترهای جریان و زمان قطع، بر اساس حداکثر تابع هدف تعیین گردید که به ترتیب موجب افزایش ۱۳ و ۱۴ درصدی راندمان کاربرد و نیاز آبیاری گردید. سپس برای دستیابی به راندمان‌های دلخواه، سناریوهای متفاوتی برای بهینه‌سازی تعیین شد. بدین ترتیب با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی، امکان مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر در زمینه‌ی آبیاری سطحی فراهم خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: آبیاری سطحی، جریان سطحی و زیر سطحی، روش دونقطه‌ای، روش مقیاس نفوذ، واسنجی چندمرحله‌ای

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱.فصل اول: مقدمه و بیان اهداف تحقیق ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مدل‌های آبیاری سطحی ۲

۱-۲-۱ مدل هیدرودینامیک کامل ۲

۱-۲-۲ مدل اینرسی صفر ۳

۱-۲-۳ مدل موج سنیماتیک ۳

۱-۲-۴ مدل بیلان حجمی ۴

۱-۳ روش‌های حل معادلات ۵

۱-۳-۱ روش مشخصه ۵

۱-۳-۱-۱ شبکه‌ی مشخصه‌ها (GC) ۶

۱-۳-۱-۲ روش گام‌های زمانی مشخص (STI) ۷

۱-۳-۲ روش‌های تفاضل محدود ۸

۱-۳-۲-۱ الگوی لکس ۸

۱-۳-۲-۲ الگوی مک کورمک ۹

۱-۳-۲-۳ الگوی پریزمن ۱۰

۱-۴ معادلات حاکم بر جریان زیرسطحی ۱۱

۱-۴-۱ معادله‌ی کاستیاکوف ۱۱

۱-۴-۲ معادله‌ی کاستیاکوف-لوییس ۱۲

۱-۵ فرضیات تحقیق ۱۲

۱-۶ جمع‌بندی و برجسته نمودن اهداف تحقیق ۱۳

۲.فصل دوم: مروری بر سوابق مطالعاتی و پژوهشی ۱۵

۲-۱ مقدمه ۱۵

۲-۱-۱ مدل‌های ارایه شده در آبیاری سطحی ۱۵

۲-۱-۲ ارزیابی مدل‌های موجود ۲۱
۲-۱-۳ بررسی و تصحیح مقدار نفوذ در مدل‌های آبیاری سطحی ۲۲
۳.فصل سوم: مواد و روش‌ها ۲۵
۳-۱ معادلات حاکم ۲۵
۳-۱-۱ معادلات حاکم بر جریان سطحی ۲۵
۳-۱-۲ معادله جریان زیرسطحی ۲۵
۳-۲ منفصل‌سازی معادلات حاکم ۲۸
۳-۲-۱منفصل سازی معادله‌ی پیوستگی در شبکه‌ی اولری ۲۸
۳-۲-۲ منفصل سازی معادله‌ی مومنتم در شبکه‌ی اولری ۲۹
۳-۳ حل عددی معادلات حاکم ۳۳
۳-۳-۱شرایط اولیه‌ی حاکم بر جریان ۳۳
۳-۳-۱-۱ حدس اولیه برای سطح مقطع جریان در گام زمانی اول ۳۵
۳-۳-۲ شرایط جریان در گام‌های زمانی بعدی در طول فاز پیشروی ۳۵
۳-۳-۲-۱ روش حل دستگاه معادلات خطی‌سازی شده ۳۸
۳-۳-۳ آغاز فاز مرطوب شدن یا فاز ذخیره ۴۰
۳-۳-۴ شروع فاز پسروی ۴۱
۳-۴ بررسی تأثیر محیط خیس شده در شبیه‌سازی ۴۲
۳-۵ تخمین ضرایب نفوذ با استفاده از روش‌های حل معکوس ۴۳
۳-۵-۱ روش دو نقطه‌ای ۴۴
۳-۵-۲ واسنجی چند مرحله ای ضرایب نفوذ و ضریب زبری ۴۵
۳-۵-۲-۱ مراحل کالیبراسیون ۴۷
۳-۶ بررسی روش مقیاس نفوذ و کاربرد آن در روش‌های زمان واقعی ۴۹
۳-۷ بهینه‌سازی میزان جریان ورودی و زمان آبیاری (زمان قطع جریان) ۵۰
۳-۸ معرفی پارامترهای ورودی و خروجی مدل ۵۳
۳-۹ داده‌های مزرعه‌ای مورد استفاده در ارزیابی مدل ۵۴

۳-۹-۱ داده‌های مزرعه‌ای بنسون-۲۲۱ ..... ۵۴
۳-۹-۲ دادههای مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳ ..... ۵۵
۳-۹-۳ داده‌های مزرعه‌ای مچت-۲۳۵ ..... ۵۵
۳-۹-۴ داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) ۵۸
۳-۹-۵ داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) ۶۰
۳-۱۰ شاخص‌های ارزیابی مدل ۶۱
٤.فصل چهارم: نتایج و بحث ٦٣
۴-۱ ارزیابی مدل عددی ارایه شده ۶۳
۴-۱-۱ مزرعه‌ی بنسون-۲۲۱ ..... ۶۳
۴-۱-۲ مزرعه‌ی پرینتز-۳۲۳ ..... ۶۴
۴-۱-۳ مزرعه‌ی مچت-۲۳۵ ..... ۶۶
۴-۱-۴ مزرعه‌ی واکر (۱۹۸۹) ۶۷
۴-۱-۵ مزرعه‌ی مرکلی (۱۹۸۳) ۶۹
۴-۲ تحلیل حساسیت مدل ۷۰
۴-۳ تعیین پارامترهای نفوذ با استفاده از روش دونقطه‌ای ۷۲
۴-۴ تعیین پارامترهای نفوذ و زبری با استفاده از روش واسنجی چند مرحله‌ای ۷۷
۴-۵ روش مقیاس نفوذ ۷۹
۴-۶ بهینه‌سازی شدت جریان ورودی و زمان قطع آبیاری ۸۴
۵.فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۱
۵-۱ خلاصه و نتایج بخش اول تحقیق ۹۱
۵-۲ خلاصه و نتایج بخش دوم تحقیق ۹۲
۵-۳ خلاصه و نتایج بخش سوم تحقیق ۹۲
۵-۴ خلاصه و نتایج بخش چهارم تحقیق ۹۳
۵-۵ خلاصه و نتایج بخش پنجم تحقیق ۹۳
۵-۶ خلاصه و نتایج بخش ششم تحقیق ۹۴

۵-۷ پیشنهادات ۹۴
منابع ۹۶

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل | صفحه

شکل ۱-۱. شبکه‌ی محاسباتی در روش GC ۷

شکل ۱-۲. شبکه‌ی محاسباتی در روش STI ۷

شکل ۳-۱. فازهای پیشروی، ذخیره و پسروی در فرایند آبیاری سطحی ۲۶

شکل ۳-۲. نمایش حجم کنترل متغیر در شبکه‌ی محاسباتی. ۲۷

شکل ۳-۳. شبکه‌ی محاسباتی اولری زمان- مکان ۲۸

شکل ۳-۴. شکل کلی مقطع عرضی از یک جویچه ۳۱

شکل ۳-۵. سلول مثلثی شکل در شرایط اولیه حاکم بر جریان (گام زمانی اول) ۳۳

شکل ۳-۶. شبکه‌ی اولری در فاز پیشروی، برای گام زمانی سوم ۳۶

شکل ۳-۷. الگوریتم استفاده شده در کد مربوط به واسنجی چند مرحله‌ای ۴۹

شکل ۴-۱. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای بنسون-۲۲۱ ..... ۶۳

شکل ۴-۲. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳ ..... ۶۵

شکل ۴-۳. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای مچت-۲۳۵ ..... ۶۶

شکل ۴-۴. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) ۶۷

شکل ۴-۵. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) ۶۷

شکل ۴-۶. مقایسه‌ی نتایج پیشروی حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) ۶۹

شکل ۴-۷. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با نرم افزار SIRMOD و داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) ۶۹

شکل ۴-۸. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای بنسون-۲۲۱ با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۳

شکل ۴-۹. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳ با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۴

شکل ۴-۱۰. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مچت-۲۳۵ با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۴

شکل ۴-۱۱. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۵

شکل ۴-۱۲. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۵

شکل ۴-۱۳. مقایسه‌ی نتایج پیشروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۶

شکل ۴-۱۴. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳)با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ۷۶

شکل ۴-۱۵. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش واسنجی چند مرحله‌ای ۷۸

شکل ۴-۱۶. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش واسنجی چند مرحله‌ای ۷۸

شکل ۴-۱۷. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای بنسون–۲۲۱ با استفاده از روش مقیاس ۸۰
شکل ۴-۱۸. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای پرینتز–۳۲۳ با استفاده از روش مقیاس ۸۰
شکل ۴-۱۹. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مچت–۲۳۵ با استفاده از روش مقیاس ۸۱
شکل ۴-۲۰. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش مقیاس ۸۱
شکل ۴-۲۱. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش مقیاس ۸۲
شکل ۴-۲۲. مقایسه‌ی نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) با استفاده از روش مقیاس..... ۸۲
شکل ۴-۲۳. مقایسه‌ی نتایج رواناب خروجی حاصل از مدل با داده‌های مزرعه‌ای مرکلی (۱۹۸۳) با استفاده از روش مقیاس ۸۳
شکل ۴-۲۴. مقادیر تابع هدف به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳)..... ۸۶
شکل ۴-۲۵. مقادیر راندمان کاربرد به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳)..... ۸۶
شکل ۴-۲۶. مقادیر راندمان نیاز آبیاری به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ۸۷
شکل ۴-۲۷. مقادیر راندمان یکنواختی توزیع به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ۸۷
شکل ۴-۲۸. مقادیر ضریب یکنواختی کریستین سن به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ۸۸
شکل ۴-۲۹. مقادیر درصد رواناب خروجی به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ۸۸
شکل ۴-۳۰. مقادیر درصد نفوذ عمقی به دست آمده در فرایند بهینه‌سازی در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳)..... ۸۹

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول | صفحه

جدول ۳-۱. پارامترهای ورودی مدل در آبیاری بنسون–۲۲۱ ..... ٥٤

جدول ۳-۲. زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شده در آبیاری بنسون–۲۲۱ ..... ٥٥

جدول ۳-۳. پارامترهای ورودی مدل در آبیاری پرینتز–۳۲۳ ..... ٥٦

جدول ۳-۴. زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شده در آبیاری پرینتز–۳۲۳ ..... ٥٦

جدول ۳-۵. پارامترهای ورودی مدل در آبیاری مچت–۲۳۵ ..... ٥٧

جدول ۳-۶. زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شده در آبیاری مچت–۲۳۵ ..... ٥٧

جدول ۳-۷. پارامترهای ورودی مدل در آبیاری واکر (۱۹۸۹) ٥٨

جدول ۳-۸. زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شده در آبیاری واکر (۱۹۸۹) ٥٩

جدول ۳-۹. زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شده در آبیاری واکر (۱۹۸۹) ٥٩

جدول ۳-۱۰. پارامترهای ورودی مدل در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ٦٠

جدول ۳-۱۱. زمان‌های پیشروی اندازه‌گیری شده در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ٦١

جدول ۳-۱۲. رواناب خروجی اندازه‌گیری شده در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ٦١

جدول ۴-۱. شاخص‌های آماری در آبیاری بنسون –۲۲۱ ..... ٦٤

جدول ۴-۲. شاخص‌های آماری در آبیاری پرینتز–۳۲۳ ..... ٦٥

جدول ۴-۳. شاخص‌های آماری در آبیاری مچت–۲۳۵ ..... ٦٦

جدول ۴-۴. شاخص‌های آماری در آبیاری واکر (۱۹۸۹) ٦٨

جدول ۴-۵. شاخص‌های آماری در آبیاری مرکلی (۱۹۸۳) ٧٠

جدول ۴-۶. پارامترهای ورودی در حالت پایه، ۱۰٪± و ۲۰٪± تغییر نسبت به پایه در آبیاری بنسون–۲۲۱ ..... ٧١

جدول ۴-۷. مقادیر خروجی مدل (O) برحسب دقیقه و نمایه حساسیت (S) به ازای ۱۰٪± و ۲۰٪± تغییر پارامترهای ورودی مدل ٧١

جدول ۴-۸. بررسی شاخص‌های آماری در آبیاری‌های متفاوت با استفاده از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر ٧٧

جدول ۴-۹. بررسی شاخص‌های آماری در آبیاری واکر (۱۹۸۹) با استفاده از روش واسنجی چند مرحله‌ای ٧٩

جدول ۴-۱۰. بررسی شاخص‌های آماری در آبیاری‌های متفاوت با استفاده از روش مقیاس ٨٣

جدول ۴-۱۱. مقایسه‌ی خطای RMSE در شبیه‌سازی مدل با روش‌های متفاوت ٨٣

فهرست علائم و اختصارها

معادل فارسی	معادل انگلیسی	علامت
ضریب وزن زمانی	Time weighting coefficient	α
ضریب وزن مکانی	Spatial weighting coefficient	β
پارامترهای تجربی مربوط به محیط خیس شده	Wetted perimeter empirical parameters	γ_1, γ_2
گام مکانی	Space step	δx
گام زمانی	Time step	δt
نمای تجربی	Empirical exponent	ϵ
ضریب روش جاروب برگشتی	Double sweep coefficient	K
ضریب روش جاروب برگشتی	Double sweep coefficient	λ
ضریب تصحیح نفوذ	Infiltration adjustment coefficient	ξ
پارامترهای تجربی	empirical parameters	ρ_1, ρ_2
پارامترهای تجربی مربوط به سطح مقطع	Area empirical parameters	σ_1, σ_2
فرصت زمانی نفوذ	Infiltration opportunity time	τ
نمای تجربی	Empirical exponent	φ
نمای معادله‌ی کاستیاکوف–لوییس	Exponent in Kostiakov-Lewis equation	a
نمای $\boldsymbol{a}$ در شرایط اولیه مزرعه	a exponent at initial field condition	a_{ref}
سطح مقطع جریان	Flow cross area	A
متوسط سطح مقطع جریان سطحی	Average surface flow area	$\bar{A}_s$
متوسط سطح مقطع جریان زیرسطحی	Average subsurface flow area	$\bar{A}_l$
سطح مقطع جریان بالادست	Upstream flow area	A_0
حجم نفوذ در واحد طول	Infiltration volume per unit length	A_{0z}
راندمان کاربرد	Application Efficiency	AE
سرعت موج	Wave speed	c
عدد کورانت	Courant number	C_r
ضریب یکنواختی کریستین سن	Christiansen’s coefficient of uniformity	CU
نیروی دراگ	Drag force	D
متوسط عمق نفوذ	Average infiltration depth	$\overline{D}$
میانگین یک چهارم کمترین مقادیر عمق نفوذ	Average depth in quarter of field with the lowest infiltration depth	$\overline{D_{LQ}}$
عمق نفوذ در گره i	Infiltration depth in node i	D_i

معادل فارسی	معادل انگلیسی	علامت
نفوذ عمقی	Deep percolation	DP
یکنواختی توزیع	Distribution uniformity	DU
سرعت نفوذ نهایی در معادله‌ی کاستیاکوف–لوییس	Basic infiltration rate in Kostiakov-Lewis equation	f_0
مقادیر باقیمانده در معادله‌ی پیوستگی	Residuals in the continuity equation	f_c
مقادیر باقیمانده در معادله‌ی مومنتم	Residuals in the momentum equation	f_m
$\boldsymbol{f_0}$ در شرایط اولیه مزرعه	f_0 at the initial field condition	f_{0ref}
فاکتور مقیاس نفوذ	Infiltration scaling factor	F
شتاب ثقل	Acceleration of gravity	g
شماره گره محاسباتی	The number of computational node	i
نمای تصحیح نفوذ	Infiltration adjustment exponent	$infilt-n$
شدت نفوذ	Infiltration rate	I
فاکتور شرایط آبیاری	Irrigation condition factor	ICF
ضریب معادله‌ی کوستیاکف لوییس	Coefficient of Kostiakov-Lewis	k
ضریب $\boldsymbol{k}$ در شرایط اولیه‌ی مزرعه	k coefficient at the initial field condition	k_{ref}
تعداد سلول‌های محاسباتی	Number of computational cells	l
ضریب زبری مانینگ	Manning's roughness coefficient	n
شماره‌ی آخرین گره	Number of the last node	N
امین داده اندازه‌گیری شده $\boldsymbol{i}$	ith measured data	o_i
تابع هدف	Objective function	OBJ
فشار خالص هیدرواستاتیکی	Net hydrostatic pressure	P
میانگین مقادیر پیش‌بینی شده	Average of predicted data	$\bar{p}$
امین داده پیش‌بینی شده $\boldsymbol{i}$	ith predicted data	p_i
شدت جریان در واحد عرض	Flow rate per unit width	q
شدت جریان	Flow rate	Q
شدت جریان ورودی	Inflow rate	Q_0
شعاع هیدرولیکی	Hydraulic radius	R
رواناب خروجی پیش‌بینی شده	Predicted runoff	r_o
رواناب خروجی اندازه‌گیری شده	Measured runoff	$\bar{r}_o$
فاکتور پروفیل سطحی	Surface profile shape factor	r_y

معادل فارسی	معادل انگلیسی	علامت
فاکتور پروفیل زیرسطحی	Subsurface profile shape factor	r_z
راندمان نیاز آبیاری	Requirement efficiency	RE
ریشه میانگین مربعات خطا	Root mean square error	RMSE
نمایه حساسیت	Sensitivity index	s
فواصل مکانی	Spatial distance	S
شیب کف	Bed slope	S_0
شیب اصطکاکی	Friction slope	S_f
خطای استاندارد	Standard error	SE
زمان	time	t
زمان پیشروی اندازه‌گیری شده	Measured advance time	$\bar{t}_l$
زمان پسروی اندازه‌گیری شده	Measured recession time	$\bar{t}_R$
زمان پیشروی شبیه‌سازی شده	Simulated advance time	t_l
زمان پسروی شبیه‌سازی شده	Simulated recession time	t_R
عرض سطح آب	Flow top width	T
حداکثر عرض بالایی جویچه	Maximum top width of furrow	T_{max}
عرض میانی جویچه	Middle top width of furrow	T_{mid}
رواناب خروجی	Tail water	TW
سرعت جریان	Flow velocity	u
حجم کل جریان ورودی به زمین	Volume of total inflow water	Vol_{inflow}
حجم آب ذخیره شده در منطقه ریشه	Volume of Root zone storage	Vol_{Rz}
حجم آب مورد نیاز برای تأمین کمبود رطوبتی	Volume of infiltration required to satisfy the field deficit	Vol_{req}
حجم کل رواناب خروجی	Volume of total runoff water	Vol_{run}
فاصله‌ی بین جویچه‌ها	Furrow spacing	W
محیط خیس شده در شرایط اولیه مزرعه	Wetted perimeter at the initial field condition	WP_{ref}
مسافت	Distance	x
عمق جریان	Flow depth	y
متوسط عمق ذخیره سطحی	Average depth of surface storage	$\bar{y}$
حداکثر عمق جویچه	Maximum depth of furrow	y_{max}
عمق نفوذ تجمعی	Cumulative infiltration depth	Z

۱. فصل اول

مقدمه و بیان اهداف تحقیق

۱-۱ مقدمه

سیستم‌های آبیاری سطحی سهم عظیمی را در کشاورزی فاریاب در سراسر جهان در بر می‌گیرند وکیفیت اجرای این سیستم‌ها به شدت وابسته به مراحل مختلف طراحی آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این، اجرای آبیاری بستگی به تصمیم‌گیری و مدیریت صحیح و مؤثر کشاورز دارد. با وجود کاربرد گسترده‌ی آبیاری سطحی در سراسر جهان، از جمله عمده‌ترین مشکلات این روش پایین بودن راندمان آن است که خود گویای ضعف مدیریت و اجرای آبیاری می‌باشد. با توجه به سرمایه‌گذاری بالا در بخش آبیاری تحت فشار، بهبود و اصلاح روش‌های آبیاری سطحی و افزایش راندمان در آن‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. یکی از مؤثرترین روش‌ها در اجرای مدیریت صحیح در زمینه آبیاری سطحی، استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری و مدل‌های عددی است که می‌تواند با شبیه‌سازی، ارزیابی و طراحی سیستم آبیاری سطحی نیاز به مدیریت صحیح را در زمینه‌ی اجرا برطرف نماید. امروزه مدل‌های ریاضی فراوانی در شبیه‌سازی آبیاری سطحی توسعه پیدا کرده‌اند که از کیفیت بالاتری در طراحی برخوردارند و وسیله‌ای جهت طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی می‌باشند. با استفاده از این مدل‌ها، می‌توان یک آبیاری کامل را شبیه‌سازی نموده و با تغییر عوامل ورودی که در حقیقت عوامل طراحی نیز می‌باشند، به بازدهی و یکنواختی بالاتری در اجرای آبیاری دست یافت. البته شبیه‌سازی جریان آب روی سطح خاک کار جدید و تازه‌ای نیست، اما همزمان با پیشرفت تکنولوژی کامپیوتر در سه دهه‌ی اخیر، این موضوع به طور گسترده‌ای پیگیری شده و در حال پیشرفت می‌باشد. در این راستا تاکنون مدل‌های بسیاری مطرح شده‌اند که هر کدام فرضیات، محاسن و محدودیت‌های خود را دارا می‌باشند. معادلات حاکم بر

جریان‌های غیردائمی، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت هستند که به معادلات سنت ونانت[1] معروف می‌باشند. با توجه به این که حل این معادلات با روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نمی باشد، تلاش‌های زیادی برای حل معادلات فوق‌الذکر با روش های عددی انجام پذیرفته‌است. مدل‌های آبیاری سطحی نیز به حل معادلات سنت ونانت می‌پردازند. دقت نتایج حاصل از هر مدل بستگی به دقت پارامترهای ورودی و شبیه‌سازی درست پدیده مورد نظر دارد. هرقدر فرضیات ساده کننده‌ی یک مدل کمتر باشد، می‌توان اطمینان بیشتری به نتایج حاصل از آن داشت (امینی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵).

۱-۲ مدل‌های آبیاری سطحی

به طور کلی مدل‌های آبیاری سطحی در چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

(۱) مدل هیدرودینامیک کامل

(۲) مدل اینرسی صفر

(۳) مدل موج سنیماتیک

(۴) مدل توازن حجمی

در ادامه، هر یک از مدل‌های مذکور به طور مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۱ مدل هیدرودینامیک کامل

معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر جریان کم عمق، غیرماندگار و غیر یکنواخت در آبیاری سطحی، معادلات بقای جرم و مومنتم هستند که به معادلات سنت ونانت معروف می‌باشند. این معادلات با در نظر گرفتن نفوذ به ترتیب زیر می‌باشند (اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱):

$$\frac{A\partial u}{\partial x}+\frac{Tu\partial y}{\partial x}+\frac{T\partial y}{\partial t}+I=0 \qquad (۱-۱)$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{u}{g}\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial x}=S_0-S_f+\frac{uI}{2gA} \qquad (۱-۲)$$

که در معادلات فوق A: سطح مقطع جریان (متر مربع)، u: سرعت جریان (متر بر ثانیه)، y: عمق جریان (متر)، I: شدت نفوذ (متر بر ثانیه)، T: عرض سطح آب (متر)، S_0: شیب کف کانال (متر بر متر)، S_f: شیب اصطکاکی (متر بر متر)، x: مسافت در طول مسیر جریان (متر)، t: زمان (ثانیه) و g: شتاب جاذبه‌ی ثقل (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه) می‌باشند.

[1] Saint Venant

مدل هیدرودینامیک کامل که دقیق‌ترین و پیچیده‌ترین مدل برای شبیه‌سازی جریان می‌باشد، به حل کامل معادلات سنت‌ونانت می‌پردازد و به علت دقت بالایی که نسبت به مدل‌های دیگر دارد، اصولاً برای ارزیابی و کالیبراسیون مدل‌های ساده‌تر به کار می‌رود (ابراهیمیان و لیاقت، ۲۰۱۱). در این تحقیق از مدل هیدرودینامیک کامل برای منفصل‌سازی معادلات حاکم بر جریان سطحی استفاده شده که در فصل سوم به تفصیل شرح داده می‌شود.

۱-۲-۲ مدل اینرسی صفر

مدل اینرسی صفر فرم ساده شده‌ی معادله‌ی هیدرودینامیک کامل می‌باشد. در این مدل به دلیل ناچیز بودن سرعت جریان روی سطح خاک، از ترم‌های اینرسی (شتاب) صرف نظر شده است (بهبهانی و بابازاده، ۱۳۸۳؛ اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱؛ ابراهیمیان و لیاقت،۲۰۱۱) به این ترتیب اگر از جملات شتاب صرف نظر کنیم معادله‌ی (۱-۲) به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_f - S_f \qquad (۱-۳)$$

به این ترتیب حل معادلات (۱-۱) و (۱-۳) نسبت به معادلات (۱-۱) و (۱-۲) (معادلات هیدرودینامیک کامل)، آسان‌تر و نیازمند زمان محاسبات کمتری می‌باشد. هرچند اولین مدل اینرسی صفر برای آبیاری نواری ارایه شد، اما بعد از آن برای آبیاری جویچه نیز مورد استفاده قرار گرفت (ابراهیمیان و لیاقت،۲۰۱۱).

۱-۲-۳ مدل موج سنیماتیک

در اغلب موارد گرادیان عمق جریان ($\frac{\partial y}{\partial x}$) و جملات اینرسی در معادله‌ی مومنتم (معادله‌ی (۱-۲)) در مقایسه با شیب کف و شیب اصطکاکی ناچیز هستند، بنابراین معادله‌ی (۱-۲) بعد از ساده‌سازی به صورت زیر خواهد بود (ابراهیمیان و لیاقت، ۲۰۱۱):

$$S_0 = S_f \qquad (۱-۴)$$

معادله‌ی (۱-۴) به این معناست که عمق جریان در طول جویچه یکنواخت می‌باشد و با این فرضیات می‌توان با توجه به هر معادله‌ی جریان یکنواخت (به طور مثال معادله‌ی مانینگ)، رابطه‌ی منحصر به فردی بین شدت جریان و سطح مقطع جریان به دست آورد. با استفاده از معادله‌ی مانینگ رابطه‌ی به دست آمده برای سطح مقطع و شدت جریان به صورت زیر می‌باشد (ابراهیمیان و لیاقت، ۲۰۱۱):

$$Q = \alpha_1 A^{\alpha_2} \qquad (۵-۱)$$

که در آن ضریب α_1 و نمای α_2 به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{S_0 \rho_1}}{n} \quad , \quad \alpha_2 = \frac{\rho_2}{2} \qquad (۶-۱)$$

که در این روابط n: ضریب زبری مانینگ، ρ_1 و ρ_2: پارامترهای به دست آمده از هندسه‌ی جویچه که بر پایه معادله‌ی $A^2 R^{\frac{2}{3}} = \rho_1 A^{\rho_2}$ هستند و R: شعاع هیدرولیکی جویچه می‌باشد (ابراهیمیان و لیاقت، ۲۰۱۱).

در نتیجه معادله‌ی مومنتم برحسب رابطه‌ای بین دبی و سطح مقطع جریان نوشته می‌شود، که این ساده‌سازی موجب کمتر شدن محاسبات ریاضی معادله‌ی مومنتم خواهد شد. اما این تقریب‌ها، کاربرد معادله‌ی موج سینماتیک را به شرایط زهکشی آزاد در مزارع شیب‌دار محدود می‌کند. ولی در هر صورت این مدل ساده‌تر و کم هزینه‌تر از مدل‌های هیدرودینامیک کامل و اینرسی صفر می‌باشد (اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱).

۱-۲-٤ مدل بیلان حجمی

از آنجا که حل معادلات هیدرودینامیک کامل، تنها از طریق تکنیک‌های عددی و با استفاده از کامپیوتر امکان‌پذیر می‌باشد، از گذشته برخی مطالعات در مدل‌سازی آبیاری سطحی بر روی ساده‌سازی و راه حل‌های تحلیلی متمرکز شده است. در این مدل‌ها، معادله‌ی مومنتم به طور کامل نادیده گرفته می‌شود و تنها معادله‌ی پیوستگی در نظر گرفته خواهد شد. بنابراین مدل‌هایی که بر اساس این فرضیات ساده‌کننده هستند، به مدل‌های بیلان حجمی معروف بوده و بر پایه‌ی قانون بقای جرم و فرض جریان با عمق نرمال در انتهای بالادست می باشد. اولین معادلات مدل بیلان حجمی برای پیش‌بینی جبهه‌ی پیشروی در آبیاری نواری با استفاده از معادله‌ی زیر پیشنهاد شد (اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱):

$$q t_x = \bar{y}\, x_a + \int_0^{x_a} z(\, t_x - t_S\,) dS \qquad (۷-۱)$$

که در آن q: شدت جریان در واحد عرض نوار (متر مربع بر ثانیه)، t_x: زمان پیشروی تا فاصله‌ی x_a (ثانیه)، $\bar{y}$: متوسط عمق ذخیره‌ی سطحی که مقدار ثابتی فرض می‌شود (متر)، x_a طول پیشروی در زمان t (متر)، S: فواصل مکانی در طول x_a (متر) و عبارت $z\,(t_x - t_S\,)$: عمق تجمعی نفوذ (متر) در نقطه‌یS و زمان t_s می باشد. تقریب‌های

متفاوتی برای حل معادله‌ی (۱-۷) توسط محققان به کارگرفته شده است. سپس معادله‌ی پیوستگی در جویچه به صورت زیر بسط داده شد:

$$Q_0 t_x = \int_0^{x_a} A_s(s,t_s)ds + \int_0^{x_a} A_i(s,t_s)ds \qquad (۱-۸)$$

که در آن Q_0: شدت جریان (متر مکعب بر ثانیه)، A_s: تابع مساحت جریان سطحی (متر مربع) و A_i: تابع مساحت جریان زیرسطحی (متر مربع) می‌باشد. و صورت ساده شده‌ی معادله‌ی (۱-۸) به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_0 t_a = \overline{A_s} x_a + \overline{A_i}\, x_a \qquad (۱-۹)$$

که در آن $\overline{A_s}$ و $\overline{A_i}$: مساحت متوسط جریان سطحی و زیرسطحی (متر مربع) می‌باشند که مربوط به موقعیت جبهه‌ی پیشروی در زمان t_a (ثانیه) می‌باشند. حالت خاصی از معادله‌ی (۱-۹) با توجه به در نظرگرفتن فاکتور شکل سطحی و زیر سطحی به این صورت تعریف شد (اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱):

$$Q_0 t_a = A_0 r_y x_a + A_{0z}\, x_a r_z x_a \qquad (۱-۱۰)$$

که در آن A_0: سطح مقطع جریان در بالادست، r_y: فاکتور شکل پروفیل سطحی، A_{0z}: حجم نفوذ در واحد طول جویچه در انتهای بالادست و r_z: فاکتور شکل پروفیل زیر سطحی می‌باشد (اسفندیاری و ماهشوری، ۲۰۰۱).

۱-۳ روش‌های حل معادلات

تا کنون روش‌های عددی متفاوتی جهت حل معادلات با مشتقات جزئی مطرح گردیده است. از جمله می‌توان برای حل معادلات هذلولوی به روش مشخصه، روش تفاضل محدود، روش المان محدود، روش حجم محدود و روش‌های بدون شبکه‌بندی یا کاهش شبکه اشاره کرد که در ادامه، چند روش عددی که کاربرد بیشتری در زمینه‌ی آبیاری سطحی دارند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۳-۱ روش مشخصه

در سال ۱۷۸۹ به منظور انتگرال‌گیری معادلات دیفرانسیل جزئی، روش گرافیکی به نام روش مشخصه پیشنهاد شد. این روش برای تحلیل موج در کانال‌های رو باز و سپس بررسی انتشار امواج سیل و دیگر مسائل جریان غیرماندگار به کار برده شد. مفهوم منحنی‌های مشخصه، به منظور تشخیص انتشار امواج و اعمال شرایط مرزی برای روش‌های صریح تفاضل محدود از اهمیت زیادی برخوردارند (چادری، ۱۹۸۷).