



آشنایی با نرم افزارهای تخصصی

آبیاری و زهکشی

(رشته علوم و مهندسی آب)

دکتر فاطمه کاراندیش دکتر عبدالله درزی نفت چالی

بهروز محسنی

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چند هزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب کتاب

پیشگفتار	یازده
فصل اول: کلیات	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ نرم‌افزار ریاضی	۴
۲-۱ مدل‌های آماری	۵
۳-۱ فرایند ارزیابی مدل‌ها	۵
۴-۱ تغییرپذیری	۱۰
۵-۱ دقت پارامترهای ورودی	۱۱
۶-۱ آنالیز حساسیت	۱۱
خلاصه فصل اول	۱۳
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول	۱۴
فصل دوم: مدل‌های تحلیل شبکه‌های آبیاری و توزیع آب	۱۷
هدف کلی	۱۷
هدف‌های یادگیری	۱۷
۱-۲ اهمیت آبیاری	۱۷
۱-۲-۱ نیاز آبیاری	۲۰
۲-۱-۲ عمق آب آبیاری	۲۰
۳-۱-۲ روش‌های آبیاری	۲۲
۲-۲ مدل‌های برآورد نیاز آبی و نیاز آبیاری	۲۳
۱-۲-۲ مدل CROPWAT	۲۴
۲-۲-۲ مدل OPTIWAT	۳۹

۴۴	۳-۲-۲ مدل NETWAT
۴۶	۴-۲-۲ مدل AGWAT
۵۰	۵-۲-۲ مدل Ref-ET
۵۴	۶-۲-۲ مدل‌های Dailyet و ETo-Calculator
۵۵	۳-۲ آبیاری سطحی
۵۷	۱-۳-۲ اهمیت راندمان در سیستم آبیاری سطحی
۵۸	۲-۳-۲ مدیریت آب در شبکه آبیاری سطحی
۵۹	۳-۳-۲ معادلات حاکم در آبیاری سطحی
۶۱	۴-۲ مدل‌های آبیاری سطحی
۶۲	۱-۴-۲ مدل win-SRFR
۷۴	۲-۴-۲ مدل SIRMOD
۷۴	۳-۴-۲ مدل‌های IrriProb و SISCO
۷۴	۵-۲ مدل‌های تحلیل شبکه‌های تحت فشار و توزیع
۷۴	۱-۵-۲ مدل EPANET
۸۸	۲-۵-۲ مدل WATERGEMS
۹۰	۳-۵-۲ مدل WATERCAD
۹۰	خلاصه فصل دوم
۹۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۹۵	فصل سوم: مدل‌های جریان در محیط متخلخل
۹۵	هدف کلی
۹۵	هدف‌های یادگیری
۹۵	مقدمه
۹۷	۱-۳ مفاهیم پایه حرکت آب خاک
۹۷	۱-۱-۳ مفهوم مکانیکی
۹۹	۲-۱-۳ مفهوم انرژی
۱۰۰	۲-۳ روابط اساسی حاکم بر جریان غیراشباع آب در خاک
۱۰۱	۱-۲-۳ قانون داریسی
۱۰۱	۲-۲-۳ قانون بقای جرم (معادله پیوستگی)
۱۰۳	۳-۳ مدل HYDRUS
۱۰۳	۱-۳-۳ معرفی مدل
۱۰۴	۲-۳-۳ معادله حرکت آب
۱۰۶	۳-۳-۳ ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک
۱۰۸	۴-۳-۳ حرکت املاح در خاک
۱۰۹	۵-۳-۳ حل معادلات حرکت آب و املاح
۱۱۰	۶-۳-۳ بهینه‌سازی پارامترها
۱۱۰	۷-۳-۳ ورودی‌های مدل

۱۱۲	۳-۳-۸ خروجی‌های مدل
۱۲۵	۳-۴-۴ مدل MODFLOW
۱۲۵	۳-۴-۱ معرفی مدل
۱۲۶	۳-۴-۲ ورودی‌ها و خروجی‌های مدل MODFLOW
۱۲۹	۳-۴-۳ تعیین ماه تعادل
۱۳۰	۳-۴-۴ مدل‌سازی معکوس
۱۳۱	۳-۵-۵ مدل SWAP
۱۳۱	۳-۵-۱ معرفی مدل
۱۳۶	۳-۵-۲ معادلات حاکم در مدل SWAP
۱۳۷	۳-۵-۳ ورودی‌های مدل
۱۴۳	۳-۵-۴ خروجی‌های مدل
۱۴۷	۳-۶-۶ مدل AquaCrop
۱۴۷	۳-۶-۱ اساس شکل‌گیری مدل
۱۴۹	۳-۶-۲ صفحه اصلی و ورودی‌های مدل
۱۵۶	۳-۶-۳ خروجی‌های مدل
۱۶۸	خلاصه فصل سوم
۱۶۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۱۷۱	فصل چهارم: آشنایی با نرم‌افزارهای تحلیل سامانه‌های زهکشی
۱۷۱	هدف کلی
۱۷۱	هدف‌های یادگیری
۱۷۱	۴-۱-۱ مدل‌های شبیه‌سازی
۱۷۲	۴-۱-۱-۱ مدل‌های ریاضی
۱۷۲	۴-۱-۲ روش‌های عددی
۱۷۳	۴-۲-۲ شبیه‌سازی دینامیک آب خاک در ارتباط با زهکشی
۱۷۴	۴-۳-۳ مدل DRAINMOD
۱۷۴	۴-۳-۱ معرفی مدل
۱۷۶	۴-۳-۲ کاربردهای مدل
۱۸۱	۴-۳-۳ توصیف مدل
۱۸۹	۴-۳-۴ محدودیت‌های مدل
۱۹۴	خلاصه فصل چهارم
۱۹۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۹۷	فصل پنجم: مدل‌های مدیریت منابع آب
۱۹۷	هدف کلی
۱۹۷	هدف‌های یادگیری
۱۹۸	مقدمه

۲۰۰	۱-۵ مدل HEC-HMS
۲۰۰	۱-۱-۵ معرفی مدل
۲۰۲	۲-۱-۵ روش‌های تبدیل بارش - رواناب
۲۰۳	۳-۱-۵ شاخص‌های ارزیابی برازش
۲۰۵	۴-۱-۵ جمع‌آوری داده‌ها برای واسنجی مدل بارش - رواناب
۲۱۶	۲-۵ مدل HEC-RAS
۲۱۶	۱-۲-۵ معرفی مدل
۲۱۸	۲-۲-۵ مفاهیم هیدرولیکی در مدل HEC-RAS
۲۲۵	۳-۲-۵ ورودی‌های مدل
۲۲۷	۴-۲-۵ خروجی‌های مدل
۲۲۸	۳-۵ مدل MODSIM
۲۲۹	۴-۵ مدل Mike Basin
۲۳۱	۵-۵ مدل River Ware
۲۳۱	۶-۵ مدل Hec-Resim
۲۳۲	۷-۵ مدل SWBM
۲۳۲	۸-۵ مدل WEAP 21
۲۳۳	۹-۵ مدل ISIS
۲۳۴	۱۰-۵ مدل Flow-3D
۲۳۴	خلاصه فصل پنجم
۲۳۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۲۳۹	فصل ششم: آشنایی با نرم‌افزارهای تحلیل کیفیت آب
۲۳۹	هدف کلی
۲۳۹	هدف‌های یادگیری
۲۴۰	مقدمه
۲۴۱	۱-۶ تفسیر کیفی آزمایشات
۲۴۴	۱-۱-۶ استانداردهای کیفیت آب برای مصارف کشاورزی
۲۴۶	۲-۱-۶ استانداردهای کیفیت آب برای مصارف شرب
۲۴۸	۳-۱-۶ استانداردهای کیفیت آب برای مصارف صنعتی
۲۴۹	۴-۱-۶ اهمیت بررسی آلودگی منابع آب با پساب‌ها
۲۶۰	۵-۱-۶ مدل‌سازی کیفیت آب
۲۶۱	۲-۶ مدل ECM
۲۶۴	۳-۶ مدل MIKE -۱۱
۲۶۶	۴-۶ مدل MONESRIS
۲۶۷	۵-۶ مدل SIMCAT
۲۶۸	۶-۶ مدل TOMCAT
۲۶۹	۷-۶ مدل TOPCAT-NP

۲۷۱	۸-۶ مدل QUAL۲K
۲۷۲	خلاصه فصل ششم
۲۷۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۲۷۷	پاسخ‌نامه
۲۷۹	منابع

پیشگفتار

اعمال مدیریت صحیح و تعدیل مصرف آب در بخش‌های مختلف، گام مؤثری برای کاهش خطرات احتمالی ناشی از مداخله بشر در چرخه طبیعی آب محسوب می‌شود. در این میان، توجه به بخش‌هایی که سهم بالاتری در مصرف منابع آب در دسترس دارند از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. نگاهی به آمارهای جهانی نشان می‌دهد که بخش کشاورزی با سهمی حدود ۷۰ درصد در کشورهای توسعه‌یافته تا بیش از ۹۰ درصد در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، مهم‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در جهان می‌باشد. برآورد صحیح حجم آب در دسترس در یک حوزه آبخیز و تخصیص بهینه منابع آب موجود به بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی فاریاب، تعیین دقیق نیاز آبی گیاه و اعمال برنامه‌ریزی مناسب آبیاری، اتخاذ روش‌های مناسب انتقال و توزیع آب، اعمال آبیاری با شیوه متناسب با شرایط حاکم بر سطح مزرعه، تحلیل کیفیت منابع آب مصرفی در کشاورزی با هدف پیشگیری از مشکلات احتمالی در سیستم آبیاری، طراحی و اجرای سیستم‌های زهکشی صحیح و متناسب با معضلات حاکم، جملگی فعالیت‌هایی هستند که می‌توانند با ارتقای سطح مدیریت آب کشاورزی، خطرات ناشی از کم‌آبی را تا حدی کاهش دهند. عدم امکان پیمایش‌های صحرائی به دلیل زمان‌بر و پرهزینه بودن و گاهی غیرممکن بودن آن‌ها، همواره معضلی در راه اجرای صحیح راهکارهای مذکور می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی قادرند اثرات بالقوه پدیده‌های فوق را با دقتی مناسب شبیه‌سازی کنند و پیش از اجرای آن‌ها، ایده‌ای کلی از نتایج موردانتظار را به طراحان و متخصصان ارائه دهند. با وجود این، انتخاب مدل مناسب و نحوه استفاده صحیح از آن،

مستلزم دانش کافی از اصول حاکم بر مدل و نحوه اجرای آن متناسب با داده ورودی موجود می‌باشد. گاهی نبود چنین دانشی می‌تواند علی‌رغم دقت بالای مدل منتخب، نتیجه‌ای معکوس را به همراه بیاورد و ضررهای زیادی را متوجه کاربران نماید. کتاب حاضر که بر اساس سابقه چندین ساله مؤلفان در تدریس درس نرم‌افزارهای آبیاری و زهکشی در مقاطع مختلف دانشگاهی تهیه شد، می‌تواند به عنوان مرجعی جامع و کاربردی برای آشنایی اساتید، دانشجویان و متخصصان علوم و مهندسی آب با کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه آبیاری و زهکشی و مدیریت آب مورد استفاده قرار گیرد. در این کتاب، پس از ارائه کلیاتی پیرامون مدل‌های ریاضی و آماری، کاربردهای مختلف مدل‌ها و روش‌های تحلیل دقت آن‌ها در فصل اول، مفاهیم کلی در زمینه نیاز آبی، نیاز آبیاری، روش‌های انتقال و توزیع آب و آبیاری در سطح مزرعه، روابط جریان آب و املاح در محیط متخلخل، اهمیت و اصول حاکم بر زهکشی، روش‌های مدیریت آب در مقیاس‌های مختلف و روش‌های تحلیل کیفیت آب برای مصارف گوناگون در ابتدای فصول بعدی گنجانده شد و در ادامه، نحوه به‌کارگیری نرم‌افزارهای مختلف در راستای اهداف مذکور برای ارزیابی‌های غیرمستقیم بحث شد. علاوه بر معرفی تعداد زیادی نرم‌افزار موجود در این زمینه، چگونگی کار با برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارها به صورت گام‌به‌گام و در قالب مثال‌هایی تشریح شد. امید است اساتید، دانشجویان و متخصصان اهل فن، با ارائه نظرات ارزشمند خود، ما را در ارتقای مطالب یاری نمایند. در پایان، مؤلفان بر خود لازم می‌دانند تا ضمن تشکر از مساعدت بی‌دریغ مدیریت دفتر تدوین، تولید کتاب و محتوای آموزشی دانشگاه پیام‌نور خانم دکتر دیده‌بان و کارشناس محترم خانم خدیجه علی‌نژادرنجکش برای تقبل زحمت در فرآیند تولید این اثر، از مجموعه‌ی عزیزان انتشارات این دانشگاه نیز نهایت قدردانی را به عمل آورند.

فاطمه کاراندیش

عضو هیأت علمی دانشگاه زابل

عبداله درزی نفت‌چالی

عضو هیأت علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

بهروز محسنی

عضو هیأت علمی دانشگاه پیام نور

فصل اول

کلیات

هدف کلی

هدف کلی در این فصل، آشنانمودن دانشجو با کلیاتی پیرامون نرم افزارهای ریاضی و مدل های آماری و نحوه ارزیابی آنها می باشد.

هدف های یادگیری

با مطالعه این فصل، دانشجو قادر به یادگیری مفاهیم زیر می باشد:

۱. آشنایی با نرم افزارهای ریاضی.

۲. آشنایی با مدل های آماری.

۳. روند ارزیابی مدل ها.

۴. دقت و آنالیز حساسیت.

مقدمه

مدل شرحی ساده از فرایندی پیچیده است. به عبارت دیگر، مدل سازی به معنای استخراج روابط بین پدیده های مرتبط با هم و ارائه یک سیستم پویاست تا امکان پیشگویی تغییرات پدیده یا پدیده ها نسبت به زمان، مکان و غیره به وجود آید. ساخت مدل مبتنی بر کشف روابط منطقی و شناخت و تفسیر این روابط می باشد. استفاده از مدل ها تقریباً در تمامی علوم، کاری متعارف می باشد به طوری که امروزه از شبیه سازی انفجارهای اتمی گرفته تا

۲ آشنایی با نرم افزارهای تخصصی آبیاری و زهکشی

علوم انسانی، از آنها استفاده می شود. در علوم مهندسی، با پیشرفت محاسبات عددی و ساخت کامپیوترهای پرسرعت طی چند دهه اخیر، زمینه های لازم برای مدل سازی، بیش از پیش فراهم شد. در علوم مختلف کشاورزی و از جمله آبیاری و زهکشی نیز، مدل سازی در حال توسعه می باشد. استفاده از مدل ها، زمینه لازم را برای پاسخ های سریع، دقیق و اقتصادی به بسیاری از سؤالات فراهم آورده است.

کلمه «مدل» تعاریف بسیار زیادی دارد و در موارد متعددی از آن استفاده می شود به طوری که گاهی، تشخیص معنی آن دشوار می باشد. در ساده ترین تعریف، به نمایش تقریبی یک فرایند یا سیستم واقعی، مدل گفته می شود. یک مدل مفهومی، فرضیه نحوه عمل یا سیستم یا فرایند است. این فرضیه را می توان به صورت کمی به عنوان مدل ریاضی بیان کرد. مدل های ریاضی، فرایندها را به صورت معادله ها، خواص فیزیکی را به صورت ضرایب در معادله ها و معیارهای وضعیت یا پتانسیل در سیستم را به صورت متغیرها نشان می دهند.

اغلب مدل های آب زیرزمینی مورد استفاده امروزی، مدل های ریاضی قطعی هستند. مدل های قطعی بر مبنای قانون بقای جرم، مومنتوم و انرژی هستند و روابط علت و اثر را تشریح می کنند. مدل های قطعی آب زیرزمینی اغلب مستلزم حل معادلات دیفرانسیل جزئی می باشند. معمولاً می توان با حل تحلیلی به جواب دقیق دست یافت لکن در مدل های تحلیلی لازم است پارامترها و مرزها، کاملاً ایده ال باشند. برخی مدل های قطعی، خصوصیات محیط متخلخل را به صورت پارامترهای یکپارچه^۱ (مثل جعبه سیاه) در نظر می گیرند که این امر از نمایش صریح خصوصیات هیدرولیکی ناهمگن در مدل ممانعت می کند. ناهمگنی یا تغییرپذیری در خصوصیات سفره، مشخصه کلیه سیستم های ژئولوژیکی است و تأثیر زیادی بر جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح دارد. بنابراین، استفاده از مدل های پارامتر - توزیعی^۲ بر نوع قطعی برتری دارد زیرا امکان توزیع های واقعی تر خصوصیات سیستم را فراهم می کنند. روش های عددی از طریق گسسته سازی، معادله های حاکم را به طور تقریبی نسبت به زمان و مکان حل می کنند. در محدوده مسئله گسسته شده، خواص داخلی متغیر، مرزها و استرس های

1. Lumped parameters

2. Distributed-parameter models

کلیات ۳

سیستم هیدرولوژیکی برآورد می‌شوند. مدل‌های قطعی، پارامتر-توزیعی و عددی می‌توانند شرایط ایده‌آل موردنظر در مدل‌های تحلیلی یا پارامتر-یکپارچه^۱ را تسهیل کنند و در نتیجه، با انعطاف بیشتری برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه به‌کار روند. تعداد و نوع معادله‌هایی که باید حل شوند به مهم‌ترین فرایندهای حاکم بستگی دارند. ضرایب معادله‌ها پارامترهایی هستند که معیارهای خواص، مرزها و فشارهای سیستم هستند. متغیرهای وابسته معادله‌ها، معیارهای وضعیت سیستم هستند و از طریق حل ریاضی معادله‌ها تعیین می‌شوند. زمانی که یک الگوریتم عددی در یک کد کامپیوتری اجرا می‌شود تا یک یا تعداد بیشتری معادله دیفرانسیل جزئی را حل کند، این کد را می‌توان به‌عنوان مدل عمومی^۲ در نظر گرفت. در صورت استفاده از ابعاد شبکه، شرایط مرزی و سایر پارامترهای مشخص (مانند هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره) در یک مدل عمومی برای نشان‌دادن یک منطقه جغرافیایی خاص، برنامه کامپیوتری حاصل را مدل خاص مکانی^۳ می‌گویند.

در صورتی که کاربر یک مدل از جزئیات روش عددی مانند تقریب‌ها، مقیاس گسسته‌سازی و روش‌های حل ماتریس آگاه نباشد یا از آن صرف‌نظر کند، خطای قابل‌توجهی وارد می‌شود و به‌صورت ناشناخته باقی خواهد ماند. به‌عنوان نمونه، اگر معادله جریان آب زیرزمینی به‌صورت تکراری^۴ حل شود ولی معیار هم‌گرایی خیلی دقیق نباشد، ممکن است حل عددی به‌سمت جواب نادرست هم‌گرا شود. نتیجه این عدم دقت در حل، می‌تواند در خطای مربوط به بیلان جرم منعکس شود. خطای بیلان جرم به‌راحتی برای کاربران مبتدی مدل قابل مشاهده نیست. رابط‌های گرافیکی کاربر، خطر بالقوه خطاهای ناشناخته در مدل‌های عددی را افزایش می‌دهند. این رابط‌ها، فاصله بین مدل‌ساز و روش عددی مورد استفاده به‌عنوان مبنای مدل را زیاد می‌کند. با وجود این، برای توسعه مدل‌های پیچیده سه‌بعدی، استفاده از رابط کاربری ممکن است ضروری باشد.

-
1. Lumped-parameter models
 2. Generic Model
 3. Site- Specific Model
 4. Iteratively

۱-۱ نرم افزار ریاضی

مجموعه‌ای از برنامه‌های کامپیوتری می‌باشند که قادرند معادله‌هایی را حل یا تغییراتی روی آن‌ها ایجاد کنند. فرایند توسعه معادله‌های ریاضی توصیف‌کننده یک فرایند، مدل‌سازی ریاضی نامیده می‌شود. پس از توسعه، این معادله‌ها باید حل شوند و راه‌حل‌های آن‌ها باید مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند تا خروجی‌های آن‌ها از فرایند، تعیین شوند.

قبل از ابداع کامپیوترها، این معادله‌های ریاضی معمولاً از طریق روش‌های ریاضی حل می‌شدند. غالباً برای حل این معادله‌ها نیاز به کشف روش‌های جدید ریاضی بود. در مواردی که امکان حل وجود نداشت، به روش‌های عددی روی می‌آوردند که تنها شامل جمع، تفریق، ضرب، تقسیم و تقریب می‌باشد. این روش‌ها، الگوریتم‌های عددی نامیده می‌شوند. این الگوریتم‌ها اغلب ساده اما خسته‌کننده و پرزحمت هستند و نیاز به محاسبات زیادی دارند. همچنین، در برخی موارد لازم است معادله‌های بسیاری حل شوند.

ظهور کامپیوتر و زبان‌های کامپیوتری سطح بالا، انجام محاسبات خسته‌کننده را امکان‌پذیر کرد. در صورت وجود تعداد بسیار زیادی معادله، با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری امکان دست‌کاری این معادله‌ها وجود دارد. در مرحله بعد می‌توان با یک الگوریتم عددی، که توسط یک برنامه کامپیوتری اجرا می‌شود، این معادله‌ها را به‌طور تقریبی حل نمود. نرم‌افزارهای ریاضی معمولاً به دو گروه تقسیم می‌شوند: محیط محاسبات عددی^۱ و محیط محاسبات نمادین^۲. بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری موجود قادرند هر دو گروه محاسبات عددی و نمادین را انجام دهند.

نرم‌افزار ریاضی که محاسبات عددی را انجام می‌دهد باید دقیق، سریع و قوی باشد. میزان دقت به الگوریتم و ماشینی که نرم‌افزار روی آن اجرا می‌شود، بستگی دارد. اکثر نرم‌افزارهای ریاضی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌های عددی استفاده می‌کنند. بسته‌های نرم‌افزاری ریاضی می‌توانند راه‌حل‌های تقریبی برای طیف وسیعی از مسائل ریاضی از جمله معادله‌های ماتریس، معادله‌های غیرخطی، معادله‌های دیفرانسیل معمولی و جزئی، انتگرال و بهینه‌سازی را ارائه دهند.

1. Numerical Computation Environment
2. Symbolic Computation Environment

کلیات ۵

کامپیوترهای اولیه عمدتاً برای انجام محاسبات عددی مورد استفاده قرار می‌گرفتند درحالی‌که دست‌کاری‌های نمادین ریاضی همچنان توسط انسان انجام می‌شد. در حال حاضر، برای انجام این دست‌کاری‌های ریاضی از نرم‌افزار استفاده می‌شود. بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری ریاضی که دست‌کاری نمادین را انجام می‌دهند می‌توانند محاسبات عددی را نیز انجام دهند. نرم‌افزار را می‌توان در قالب یک بسته تهیه کرد تا محاسبات عددی را انجام دهد و یا محاسبات را می‌توان پس از دست‌کاری نمادین با قراردادن اعداد در فرمول نمادین انجام داد. نرم‌افزار ریاضی که بر اساس الگوریتم عددی برای حل یک مشکل خاص نوشته می‌شود، معمولاً از نظر محاسباتی کارآمدتر از محیط این نرم‌افزارهاست. با این حال، این محیط‌ها می‌توانند تقریباً تمام دست‌کاری‌های عددی و نمادین ریاضی مورد استفاده را انجام دهند.

۱-۲ مدل‌های آماری

این مدل‌ها شامل مسائلی از قبیل توصیف آماری داده‌های عددی، برآورد احتمال رفتار آتی یک سیستم بر اساس رفتار گذشته، برون‌یابی یا درون‌یابی داده‌ها با استفاده از مناسب‌ترین روش‌ها، برآورد خطای مشاهدات یا آنالیز بصری داده‌ها یا خروجی‌های تولیدشده به وسیله مدل می‌باشند.

۱-۳ فرایند ارزیابی مدل‌ها

قبل از استفاده مدل‌ها برای شبیه‌سازی اثرات روش‌های مختلف، نیاز به واسنجی آن‌ها می‌باشد. واسنجی را می‌توان با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده انجام داد. واسنجی مدل عبارت است از تغییر پارامترهای ورودی مدل در جهت تطبیق نتایج مدل با شرایط مزرعه‌ای در محدوده معیارهای قابل قبول. به عبارتی دیگر در شرایط مطلوب، واسنجی فرایند تغییر پارامترهای ورودی مدل می‌باشد به نحوی که نتایج شبیه‌سازی بر داده‌های مشاهده‌ای منطبق گردد. برای این کار لازم است شرایط مزرعه‌ای در یک محل به خوبی توصیف شده باشند. نبود چنین داده‌هایی سبب می‌شود که مدل برای مجموعه شرایطی که معرف شرایط واقعی نیستند، واسنجی شود.

فرایند واسنجی به طور معمول مستلزم واسنجی برای شرایط دائمی و غیردائمی می باشد. در شبیه سازی های حالت دائمی، تغییرات زمانی داده های مشاهده ای برای شرایط مورد استفاده در مدل سازی کاربرد ندارد. شبیه سازی های حالت غیردائمی مستلزم در نظر گرفتن تغییرات زمانی می باشد. در این شبیه سازی ها لازم است محدوده کوچکی از تغییرپذیری داده های ورودی مدل لحاظ گردد زیرا انتخاب های زیادی برای داده های ورودی مدل وجود دارد که ممکن است نتایج مشابهی با شبیه سازی های حالت دائمی داشته باشند.

دو مفهوم مهم در ارتباط با واسنجی، دقت^۱ و درستی^۲ می باشند. دقت به حداقل تغییر قابل تشخیص در پارامتر مورد اندازه گیری اشاره می کند درحالی که درستی، بر مقدار واقعی خطای یک واسنجی دلالت دارد. کلیه فرایندهای اندازه گیری مورد استفاده برای واسنجی در معرض منابع مختلفی از خطا قرار دارند. به طور معمول، این خطاها را به عنوان خطاهای تصادفی یا سیستماتیک طبقه بندی می کنند. در صورتی که یک اندازه گیری چندین بار تکرار شود نتایج، نوسانات آماری تصادفی را نشان خواهند داد که ممکن است معنی دار یا بی معنی باشد. خطاهای سیستماتیک، انحرافات از مقدار واقعی پارامتر می باشند و در صورتی که مقدار واقعی معلوم باشد، می توان با اعمال اصلاحات، اثر این نوع خطا بر واسنجی را حذف نمود. واسنجی های با دقت بالا معمولاً به واسطه آنالیز منابع خطا و شرح عدم قطعیت واسنجی حاصل می شوند. عدم قطعیت نشان می دهد که در نتیجه ترکیب خطاها، چه مقدار از درستی یک واسنجی کاسته می شود.

همیشه باید سعی کرد مدل را واسنجی نمود خواه مدل عددی یا تحلیلی باشد. اگر مدلی برای اهداف غربالگری^۳ یا در تصمیم گیری برای فعالیتهای اصلاحی استفاده می شود، باید مدرک یا دلیلی ارائه شود که نشان دهد مدل و مقادیر پارامترهای آن به طور قابل قبولی معرف شرایط محل می باشند. این کار از طریق واسنجی مدل و در صورت امکان تطبیق سوابق انجام می شود. بدون واسنجی مدل امکان ارزیابی پیش بینی های آن وجود ندارد. با وجود این، در ارزیابی های ابتدایی می توان از نتایج مدل های واسنجی نشده استفاده نمود. از مدل های واسنجی نشده می توان به عنوان راهنما

1. Precision
2. Accuracy
3. Screening Level

در فعالیتهای جمع‌آوری داده‌ها برای تحقیقات هیدرولوژیکی یا به‌عنوان یک فیلتر در ارزیابی تأثیر نسبی فعالیتهای اصلاحی استفاده کرد.

چنانچه مدل برای یک محل ناشناخته در یک حوزه آبریز بدون ایستگاه به‌کار رود، مقادیر پارامترها باید از طریق اندازه‌گیری خواص فیزیکی سیستم تعیین شود. چنین پارامترهایی را پارامترهای فرایندی می‌نامند و ممکن است متفاوت از پارامترهای بهینه‌شده^۱، که معمولاً به‌طور خودکار با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری تعیین می‌شوند، باشند. اگر مدل فیزیکی^۲ باشد، مقادیر پارامترها را می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های صحرایی، نقشه‌های موجود و یا با استفاده از امکانات GIS تعیین کرد. در این‌حالات پارامترهای فرایند، بر اساس مشخصات واقعی قابل‌اندازه‌گیری در صحرا یا نقشه هستند و مفهوم واقعی و فیزیکی دارند. تحت این شرایط ممکن است داده‌ها به‌حدی دقیق باشند که حتی نیاز به واسنجی مدل هم نباشد.

به‌طور معمول، در اکثر مدل‌ها، سه روش عمده برای واسنجی به‌شرح ذیل وجود

دارد:

- واسنجی مدل به‌وسیلهٔ آزمون و خطا (روش دستی)؛

- واسنجی مدل به‌صورت خودکار (اتوماتیک)؛

- واسنجی مدل به‌صورت ترکیبی از دو روش فوق.

در روش اول، کاربر تمام پارامترهایی را که می‌تواند بر اساس مشاهدات فیزیکی تعیین کند به‌عنوان برآورد اولیه به مدل معرفی و سپس مدل را اجرا می‌کند. اگر میزان خطای مدل در شبیه‌سازی در حد قابل‌قبول بود، واسنجی کامل و مقادیر واردشده برای این پارامترها به‌عنوان مقادیر بهینه در نظر گرفته می‌شود. در غیر این‌صورت، این فرایند تا جایی‌که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به حداقل برسد ادامه می‌یابد.

در روش دوم، واسنجی خودکار پارامترهای منتخب به‌وسیلهٔ مدل با یک برنامه‌ریزی داخلی انجام می‌شود و پارامترهای مورد آزمون را مرحله‌به‌مرحله تطبیق می‌دهد تا جایی‌که به‌طور خودکار تعدیل و تنظیم شود. اجرای برنامهٔ آزمون تا به‌دست‌آوردن بهترین مقدار پارامترها تکرار می‌شود.

1. Optimized Parameters

2. Physical Basin

در روش سوم، واسنجی به صورت تلفیقی از دو روش فوق انجام می شود. بدین منظور، از طریق آزمون و خطا، تطبیق پارامترها تا تنظیم تقریبی مدل پیگیری می شود و بعد با اجرای روش پیگیری و جستجوی خودکار، که با دقت بیشتری انجام می گیرد، بهترین برازش برای پارامترهای مدل به دست می آید.

باید توجه داشت که در طول مرحله واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به بقیه حساس تر می باشند. یک پارامتر حساس، پارامتری است که تأثیر بیشتری روی خروجی مدل دارد. بنابراین اگر مقدار یک پارامتر حساس به آرامی تغییر کند، تأثیر زیادتری در خروجی مدل خواهد داشت. در آنالیز حساسیت، تخمین دقیق یک پارامتر حساس از اهمیت بالایی برخوردار است.

مدل واسنجی شده باید با استفاده از مجموعه دیگری از داده ها که در فرایند واسنجی مورد استفاده قرار نگرفت، اعتبارسنجی شود. تنها در صورتی که عملکرد یک مدل در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی رضایت بخش باشد، می توان از آن برای شبیه سازی اثرات طرح های مختلف در فرایند طراحی استفاده کرد. یک واسنجی خوب، مستلزم تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل و اثر آن ها بر نتایج مدل می باشد.

برای ارزیابی عملکرد مدل باید از معیارهای مختلفی استفاده شود زیرا هیچ معیار قابل قبول کلی برای استفاده در همه موارد وجود ندارد. با وجود این، ارائه کنندگان مدل باید تمام تلاش خود را انجام دهند تا تفاوت بین شبیه سازی های مدل و شرایط مزرعه های اندازه گیری شده را به حداقل برسانند. در این راستا، اصلاحات می تواند جزئی از فرایند واسنجی باشد. به واسطه واسنجی، این اطمینان ایجاد می شود که مدل می تواند نتایجی را تولید کند که با ضریب اطمینان خاصی در محدوده معیارهای تعریف شده قرار گیرند.

معمولاً عملکرد مدل در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از آماره های راندمان مدل^۱ (EF)، درصد خطا^۲ (PE)، ضریب تعیین (R^2)، خطای معیار (SE) یا جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف (AD) یا میانگین خطای مطلق ارزیابی می شود. این آماره ها به صورت زیر تعریف می شوند:

1. Nash-Sutcliffe Efficiency
2. Percent Error

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1-1)$$

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (2-1)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (3-1)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (4-1)$$

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (5-1)$$

که در آن‌ها O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در زمان t و n تعداد مشاهده‌ها، $\bar{O}$ متوسط مقادیر مشاهده‌شده در طول دوره زمانی و $\bar{P}$ متوسط مقادیر پیش‌بینی شده در طول دوره زمانی است. در جدول (۱-۱) محدوده تغییرات و نحوه تفسیر آماره‌های فوق بیان شد.

جدول ۱-۱. محدوده تغییرات و تفسیر آماره‌های ارزیابی مدل

آماره	تعریف	محدوده تغییرات	بهترین مقدار	تفسیر
EF	معیاری برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با میانگین مقادیر مشاهده‌ای	منفی بی‌نهایت تا یک	یک	مقادیر صفر تا یک نشان می‌دهند که مدل پیش‌بینی‌کننده بهتری در مقایسه با میانگین مشاهده‌هاست. مقادیر منفی بیانگر پیش‌بینی مدل بدتر از میانگین مشاهدات است. راندمان برابر یک، معرف مدل کامل است.
PE	نسبت کل اختلاف‌ها به مجموع مقادیر مشاهده‌ای	منفی صد تا بی‌نهایت	صفر	مقدار مطلق کمتر، نشان‌دهنده عملکرد بهتر می‌باشد.